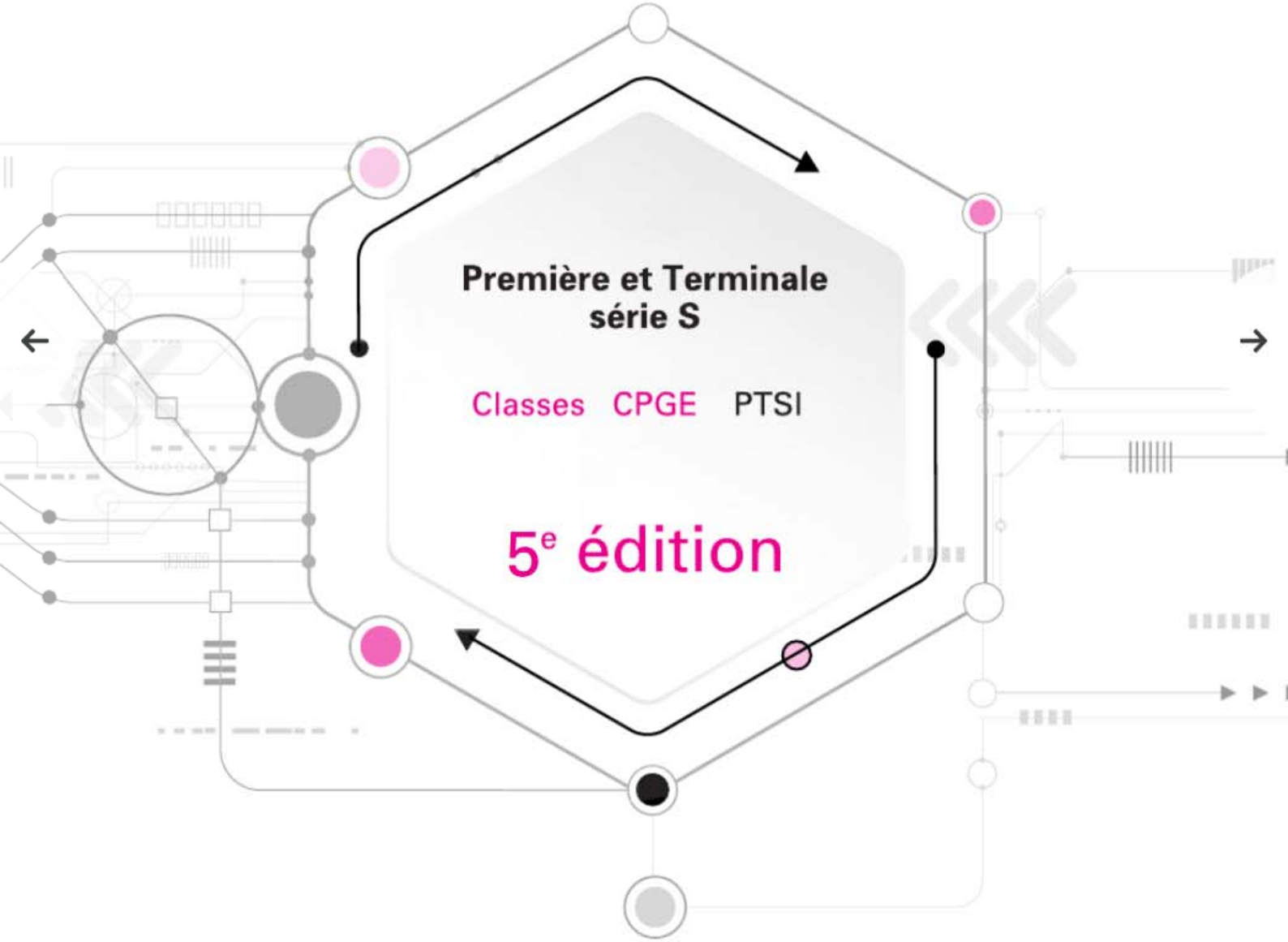
MÉMOTECH

Sciences de l'Ingénieur

D. Bauer
R. Bourgeois
M. Jakubowicz



DELAGRAVE

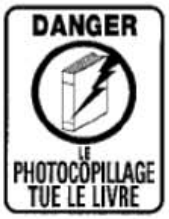
CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Mémoformulaire
Y. Déplanche et C. Hazard

Couverture : dessins © stocks photos (1) et © www.bq.com (4), réalisation STDI
Édition : Hélène Girardet
Compogravure : Nord Compo

ISSN : 0986-4024
ISBN : 978-2-206-10181-1

© Éditions Delagrave, 2017 – 5, allée de la 2e D.B. – 75015 Paris



La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et d'autre part, que les analyses et courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris), constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Note des auteurs

Cet ouvrage a été conçu dans l'esprit Mémotech afin d'apporter aux élèves une aide précieuse pour toutes les étapes de leur approche autonome dans les domaines des sciences de l'ingénieur.

Cette cinquième édition est conforme aux programmes des Sciences de l'Ingénieur de la série S (BO septembre 2010).
Le livre regroupe les documents et informations nécessaires à la formation des élèves des classes de première et terminale S Sciences de l'Ingénieur.

Les grands chapitres de cette nouvelle édition traitent :
l'analyse du besoin et des systèmes pluritechniques;
les éléments de construction;
les transmissions de puissance;
la mécanique (statique, cinématique, RDM) et les matériaux;
les règles d'électricité et les principaux composants électroniques;
l'électrotechnique, le courant triphasé et les moteurs électriques;
l'automatisme et les éléments associés;
l'informatique industrielle, les microcontrôleurs et les algorithmes;
la modélisation multiphysique.

Cet ouvrage est une base de données indispensable à l'élaboration des TPE et projets.

Cet ouvrage comporte également un chapitre dédié aux classes préparatoires aux grandes écoles CPGE traitant des systèmes asservis.

Nous tenons à dédier cette page et à exprimer nos plus sincères remerciements à nos collègues enseignants pour leurs remarques et conseils et tout particulièrement :

- à M. Jean-Marc Galmiche, professeur en Classe Préparatoire aux Grandes Écoles,
- à M. François Brosse, professeur en Classe Préparatoire aux Grandes Écoles,
- à M. Max Thebault, professeur en Classe Préparatoire aux Grandes Écoles,
pour leurs contributions au chapitre CPGE

- à M. Abdallah Daou, professeur de SII ingénierie Mécanique,
- à M. Didier Huin, professeur d'Automatisme,
- à M. Guy L'Huillier, professeur de SII option informatique et numérique,
- à M. Michel Pouymayou, professeur en Classe Préparatoire aux Grandes Écoles,
- à M. Pascal Vaillant, professeur de SII option Energie
pour l'efficacité de leur relecture,

- à M. Georges Beaujon, professeur, pour ses conseils dans le domaine de l'analyse de la valeur,
- à M. Jacques Kessler, professeur de métallurgie, pour ses conseils et ses photos,
- à M. Claude Barlier, professeur, pour ses conseils dans le domaine des états de surface et du prototypage rapide,
- à M. Eric Bertringer, professeur de SII ingénierie Mécanique pour sa participation à l'élaboration des pages sur le langage SysML,
- à tous les ingénieurs et cadres des entreprises qui nous ont fourni avec beaucoup de gentillesse les documentations techniques,
- à nos élèves et étudiants,
- à nos épouses qui nous ont soutenus et supportés tout au long de l'élaboration de cet ouvrage.

Les auteurs,
Avril 2017

TABLES DES SOMMAIRES DES CHAPITRES

1 Analyse fonctionnelle 5

2 Construction 41

3 Transmission de puissance 93

4 Dessin et matériaux 135

5 Mécanique 241

6 Électricité, électronique 275

7 Chaîne d'énergie électrique 383

8 Automatisation des tâches 433

9 Traitement de l'information 467

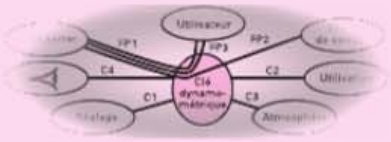
10 CPGE (CLASSES PRÉPARATOIRES AU GRANDES ÉCOLES) 527

SYMBOLES DES GRANDEURS ET DES UNITÉS DE MESURE 580

LEXIQUE ANGLAIS-FRANÇAIS 582

INDEX ALPHABÉTIQUE 584

1 Analyse Fonctionnelle



1.1. ÉNONCÉ DU BESOIN. ANALYSE FONCTIONNELLE 6
1.1.1. Énoncé fonctionnel du besoin NF X50-151 6
– Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) 6
1.1.2. Analyse fonctionnelle 8
– Diagramme Pieuvre 9
– Diagramme BÊTE à CORNE 9
– Diagramme FAST 10
– SADT ou Analyse descendante 15
– Histogramme 18
– Diagramme CAUSE-EFFET ou ISHIKAWA 18
– Matrice de décision 19
– Brainstorming 19
– Diagramme de PARETO 19
– Diagramme PERT 20
– Modélisation avec le langage SysML 21
1.2. DÉMARCHE QUALITÉ 27
1.2.1. Compétitivité des produits industriels 27
– Cycle de vie d'un produit 27
– Choix d'un modèle d'assurance qualité 28
– Analyse de la valeur 29
– La gestion de la qualité 30
1.2.2. Les coûts 31
– Coût de la non-qualité 32
– Valeur et coût d'une fonction 33
1.2.3. L'innovation 34
1.3. DÉVELOPPEMENT DURABLE 35
1.3.1. Présentation 35
1.3.2. Le tri et le traitement des déchets industriels 36
1.4. AMBIANCE ET RYTHME DE TRAVAIL 37
1.4.1. Le bruit 37
1.4.2. Ambiances thermiques 38
1.4.3. Risques chimiques 39
1.4.4. Incendie et lieu de travail 40

1.1. ÉNONCÉ DU BESOIN. ANALYSE FONCTIONNELLE

1.1.1. ÉNONCÉ FONCTIONNEL DU BESOIN — NF X 50-151

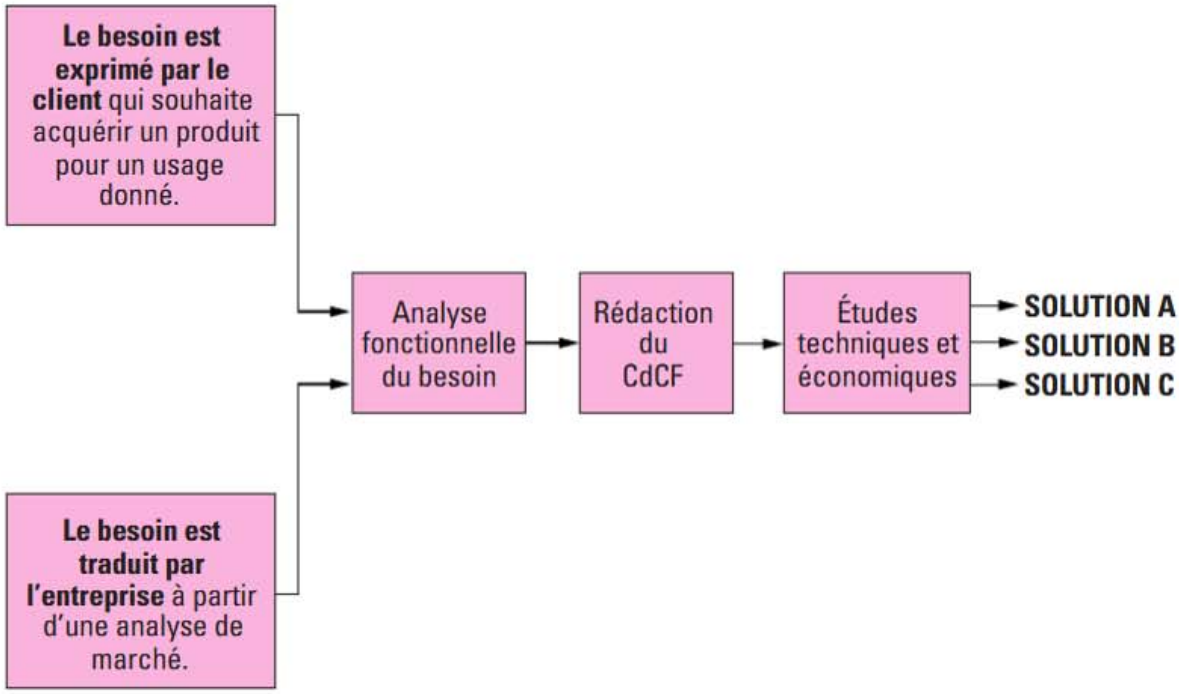
LE CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL (CdCF)

• Concept

Le **CdCF** est le seul document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en termes de fonctions et de contraintes (NF X 50-150).

Ce document sert de **base de dialogue contractuelle** entre demandeur d'une part et concepteur-réalisateur du produit d'autre part.

Deux cas se présentent pour la rédaction du CdCF :



Dans le CdCF, l'expression du besoin est formulée en termes d'obligation de résultat, de finalité, sans référence aux solutions susceptibles d'y répondre (responsabilité du concepteur).

Un groupe de travail est constitué : marketing, achat, bureau d'études, secrétariat administratif, utilisateurs potentiels. Ce groupe peut être celui d'**analyse de la valeur**. Il a une existence limitée à la durée de l'étude.

• Utilisation

Le CdCF est un des éléments d'étude et de développement, il est à créer chaque fois que l'on veut expliciter, d'une manière technologiquement neutre, les besoins à satisfaire.

De par sa nature fonctionnelle, le CdCF ne peut s'adresser qu'à un bureau d'études. Il faut une structure pensante capable de transformer les fonctions de service et les fonctions techniques en imaginant puis en validant ces solutions techniques.

Le CdCF intervient dans les types de situation suivants :

– consultation, appel d'offres, adjudication ;

– marchés négociés entre partenaires ;

– relations entre services d'une même entreprise ;

– analyse de la valeur.

• Processus d'application du CDCF

Phases	Demandeur	Concepteur-réalisateur
1 SAISIE DU BESOIN C'est l'expression par le demandeur du besoin à satisfaire.	Analyse de marché / Analyse fonctionnelle → Formulation du besoin	
2 PROSPECTION DE LA FAISABILITÉ C'est montrer dans quelle mesure on peut répondre au besoin exprimé, en précisant les voies possibles.	1re édition externe du CdCF — DÉCISION de prospection Affinement du besoin	Étude de la faisabilité
3 PRÉDÉVELOPPEMENT OU AVANT-PROJET C'est étudier les voies reconnues comme possibles en fin de phase « prospection de la faisabilité » afin de retenir celle qui sera développée.	2e édition externe du CdCF — DÉCISION de pré-développement Ajustement du CdCF Édition définitive du CdCF — DÉCISION de développement Référence CdCF Spécification Ébauche de définition	Étude de pré-développement ou d'avant-projet Étude de développement
4 DÉVELOPPEMENT Au cours de ces phases, des améliorations peuvent faire l'objet de propositions de modifications. Les propositions de modifications résultant d'une action d'Analyse de la Valeur sont appelées PMAV.	Procédure PMAV DÉCISION d'industrialisation Référence CdCF Référence spécification Définition	
5 INDUSTRIALISATION PRODUCTION MISE EN SERVICE	Procédure PMAV	Introduction Production Mise en œuvre

• Finalité du CDCF

Un CdCF vise à :

– augmenter la **compétitivité**,
– clarifier les **relations**,
– restaurer la **concurrence**,
– favoriser l'**innovation**.

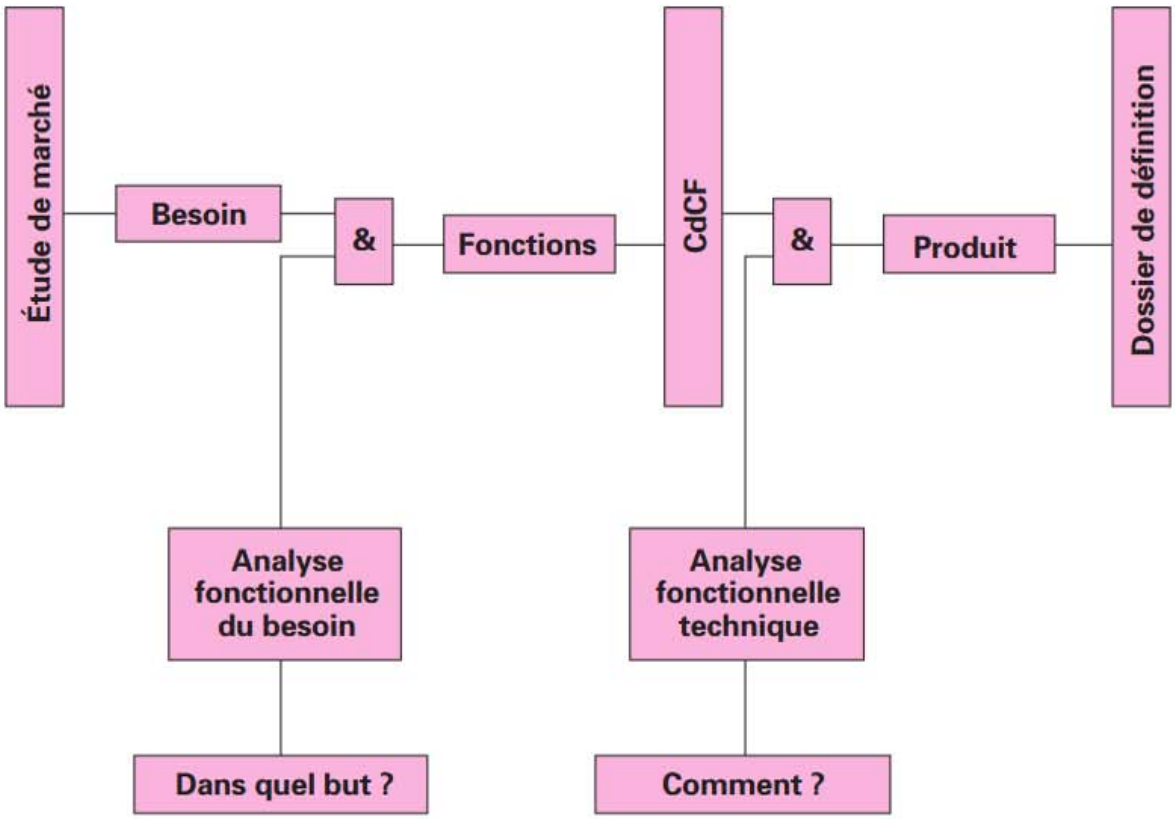
1.1.2. ANALYSE FONCTIONNELLE

DÉFINITION GÉNÉRALE

C'est une démarche qui consiste à analyser un produit d'une manière systématique en l'examinant aussi bien de l'intérieur que de l'extérieur afin de porter une attention particulière aux interactions entre ses différents éléments et l'environnement.
L'objectif est de savoir **dans quel but** et **comment** un produit fonctionne.

PLACE DE L'ANALYSE FONCTIONNELLE

Place de l'analyse fonctionnelle du besoin (AFB) et de l'analyse fonctionnelle technique (AFT) dans une démarche de projet



DÉFINITION DE L'AFB ET DE L'AFT

L'analyse fonctionnelle du besoin est une démarche pour :
– exprimer le besoin réel en termes de services à rendre ;
– déclencher la créativité en accédant aux meilleurs concepts de solutions répondant à ce besoin ;
– justifier les choix des solutions à partir de critères clairement définis ;
– mettre en place une communication efficace, réalisée en groupe, et permettant d'éviter des contentieux ultérieurs ;
– constituer un préalable indispensable à la mise en œuvre d'approches telles que l'**analyse de la valeur**, la conception à coût objectif, la sûreté de fonctionnement, les plans d'expériences, l'assurance qualité…

L'analyse fonctionnelle technique est une démarche pour :
– faire le lien direct entre le service à rendre et la technologie mise en œuvre pour y répondre ;
– répartir les **coûts**, non plus par composant, mais par service offert à l'utilisateur ;
– détecter, en fiabilité, les défaillances potentielles d'un produit ;
– effectuer des analyses critiques concernant les processus et procédés de production et les différents procédés de fonctionnement d'une entreprise.

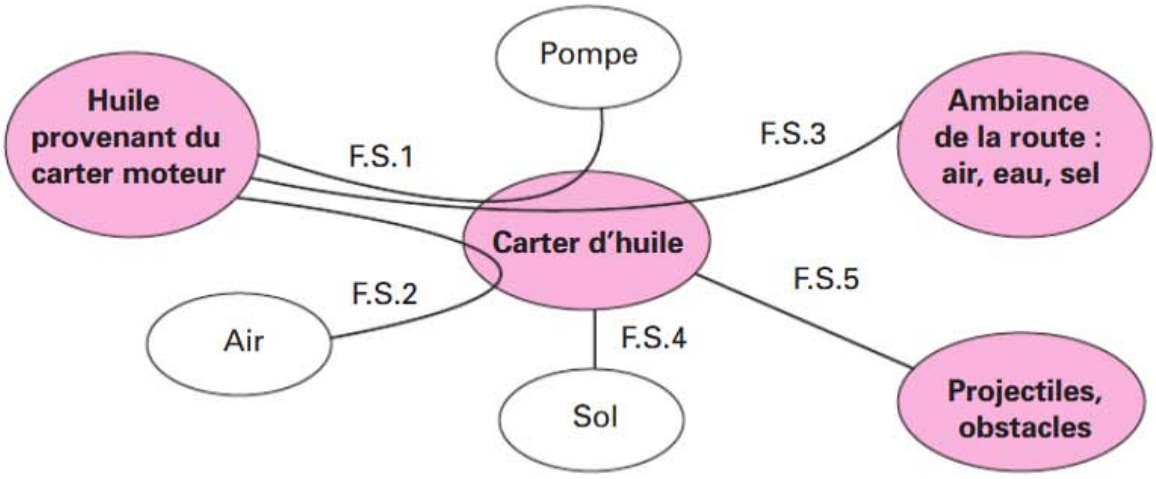
EXEMPLE DE DIAGRAMME PIEUVRE

• Comment se pratique l'analyse fonctionnelle du besoin (AFB) ?

L'AFB constitue une étape fondamentale permettant de poser un problème en termes de finalité et sert de base pour l'établissement du **Cahier des Charges Fonctionnel**.

Elle s'effectue par une observation extérieure du produit en recensant les relations que celui-ci établit avec son environnement : ce sont les **fonctions de service**.

Séquence : Moteur tournant



F.S.1 : canaliser l'huile provenant du carter moteur jusqu'à la pompe,
F.S.2 : évacuer des calories de l'huile vers l'air,
F.S.3 : protéger l'huile (provenant du carter moteur) des ambiances extérieures,
F.S.4 : doit respecter la garde au sol (réglementation),
F.S.5 : doit résister aux chocs des projectiles.

Source : PSA

L'analyse se produit par la caractérisation des **fonctions de service** qui consiste à énoncer les **critères** de performances attendues, à préciser leurs **niveaux** et à indiquer la **flexibilité**.

La **hiérarchisation** permet d'évaluer l'ordre d'importance des fonctions de service.

D'après les référentiels Dunod.

EXEMPLE DE DIAGRAMME BÊTE À CORNE

• Recherche du besoin fondamental

Il s'agit de la recherche du **besoin du système** (ou matériel suivant le cas).

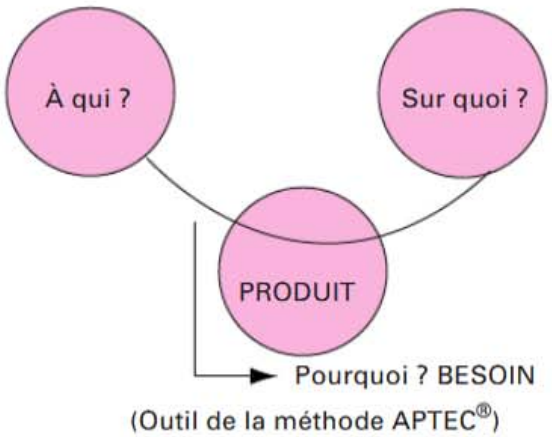
– Le besoin peut être assimilé à l'objectif ou au but à atteindre.
– Le besoin à satisfaire par un système (ou un matériel) s'obtient en posant les questions :

À qui rend-il service ? Sur quoi agit-il ?
Pour quoi faire ?
Pourquoi ce besoin existe-t-il ? (origine).

– Confirmer le besoin par les réponses à la question :

Qu'est-ce qui pourrait le faire évoluer ou disparaître ?

Expression de besoin à l'aide de l'outil appelé « bête à corne » :



(Outil de la méthode APTEC®)

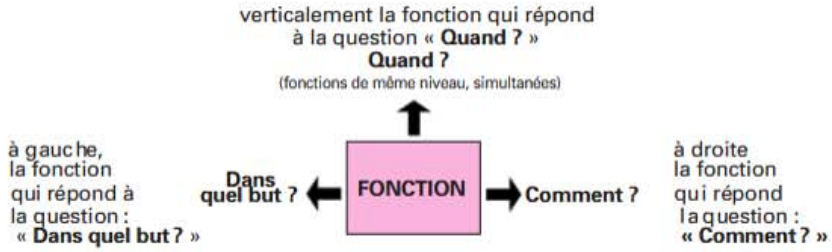
D'après MÉMOTECH Dessin technique

Analyse fonctionnelle

DIAGRAMME FAST

• Comment se pratique l'analyse fonctionnelle technique (AFT) ?

L'**AFT** doit être précédé d'une **AFB**.
Le **FAST** (Technique d'analyse fonctionnelle systématique) permet de décomposer le cheminement d'une fonction de service en fonctions techniques répondant aux trois questions ci-dessous.
L'élaboration d'un FAST se mène en groupe pluridisciplinaire.
Par rapport à une fonction retenue, le groupe de travail place :



DÉMARCHE CONSEILLÉE

• Exemple de résolution d'un diagramme FAST

Définir le problème à traiter :
Définir la recherche de la chaîne fonctionnelle relative à une fonction de service.

Rechercher toutes les fonctions techniques :
Effectuer une analyse interne du produit (comment est rendu le service) en respectant les règles du **« brainstorming » :**
– ne jamais critiquer,
– viser la quantité,
– associer les idées,
– tout noter…

Trier les fonctions techniques :
Par l'élimination des redondances et, plus particulièrement, par une expression rigoureuse des idées précédemment énoncées, en termes de fonctions techniques.

Construire le diagramme FAST
En classant les fonctions techniques selon les trois questions :
– dans quel but ?,
– comment ?,
– quand ?

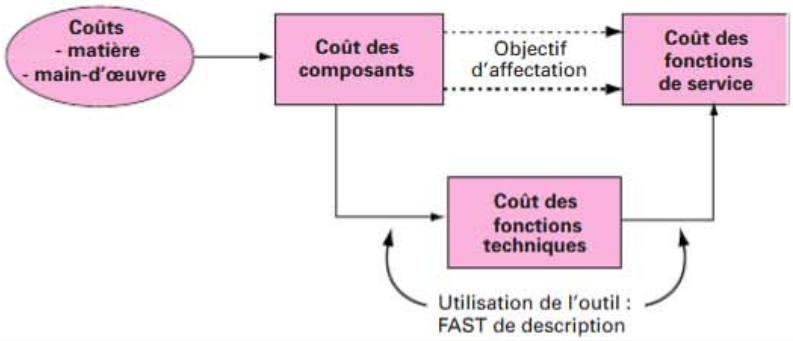
Inscrire sous chaque fonction technique la (ou les) solution(s) technologique(s) associée(s).

UTILISATON DU FAST DE DESCRIPTION

Le FAST de description permet :
– de procéder à l'évaluation économique d'une solution,
– de procéder à l'évaluation fiable d'une solution,
– de rechercher et caractériser des zones fonctionnelles appartenant à une pièce.

Évaluation économique d'une solution
Il s'agit de chiffrer le coût de chaque **fonction de service** assurée par un produit. Rappelons que cette méthode est issue de la démarche **« Analyse de la valeur »** laquelle s'appuie sur le concept de bon sens suivant : il faut considérer un produit, non pas comme un assemblage de pièces, mais comme un assemblage de fonctions ; celles-ci se définissent par la finalisation du produit pour satisfaire les besoins ou désirs de l'utilisateur.

CHIFFRAGE DES FONCTIONS DE SERVICE

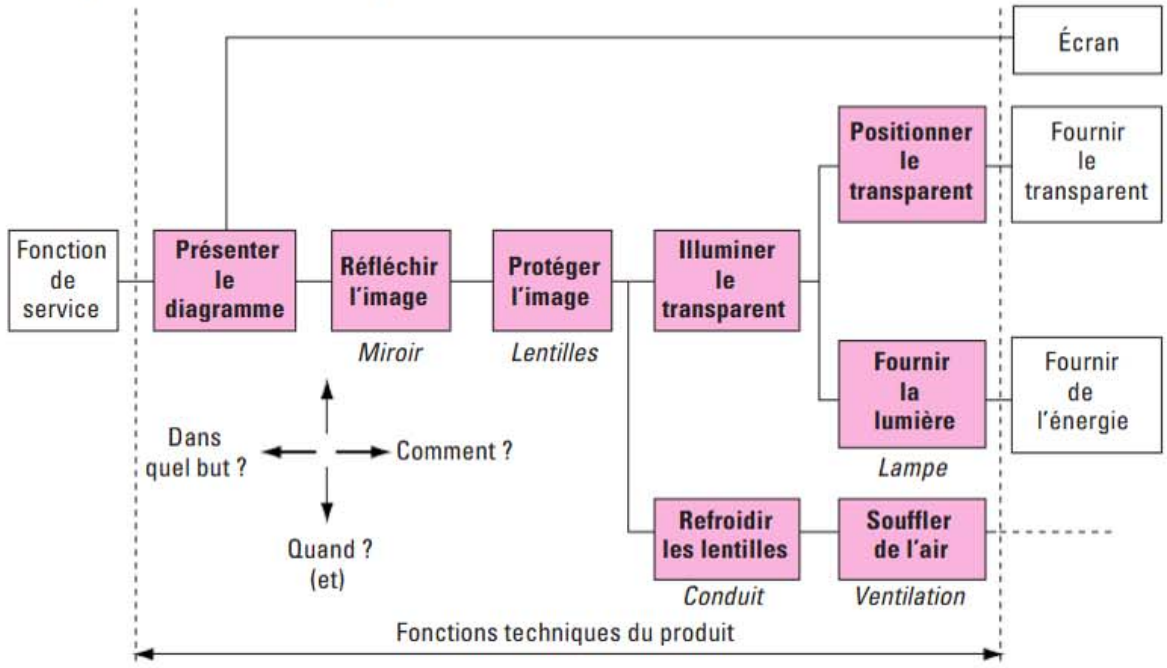


DIFFÉRENTS DIAGRAMMES FAST

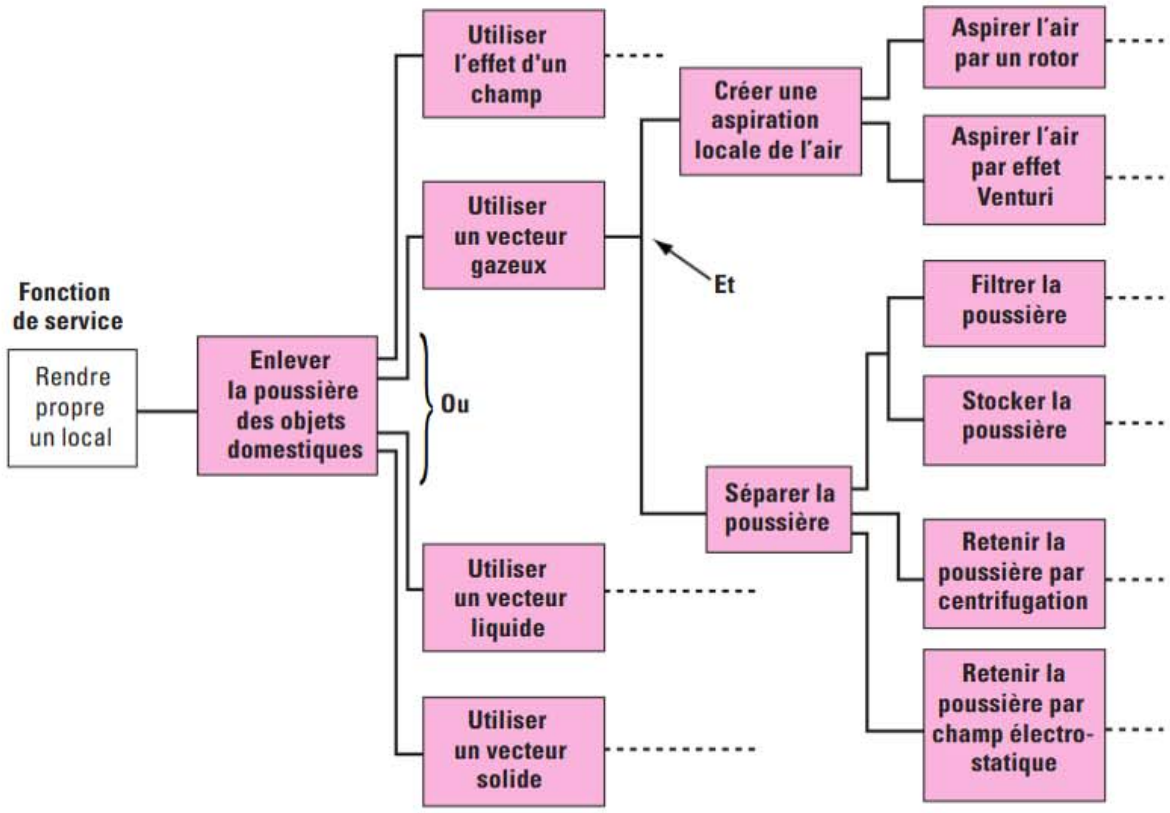
· Diagramme FAST

Selon le cas, on distingue :
– le **FAST de description**, dans le cadre d'une analyse fonctionnelle technique décrivant une solution existante ;
– le **FAST de créativité**, dans le cadre d'une recherche de solutions.

Exemple de FAST de description (rétroprojecteur)



Exemple de FAST de créativité (aspirateur)



D'après les référentiels *Conception en mécanique industrielle* de Dunod.

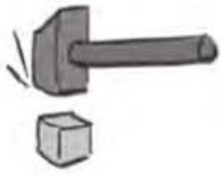
Analyse fonctionnelle

PRINCIPE DU CHIFFRAGE DES COÛTS FONCTIONS DE SERVICE

Fonction de service / Composant	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5	Coût de chaque composant
1	•	2	3	•	5	10
2	10	•	15	15	•	40
3	•	5	•	•	•	5
4	8	2	•	5	10	25
5	10	•	•	•	10	20
Coût de chaque fonction	**28**	**9**	**18**	**20**	**25**	**Coût total 100**

Nota : le remplissage du tableau s'effectue en groupe (pluridisciplinaire). La construction du FAST de description correspondant à chaque fonction de service est recommandée.

EXEMPLE : CLÉ DYNAMOMÉTRIQUE PRÉSENTATION



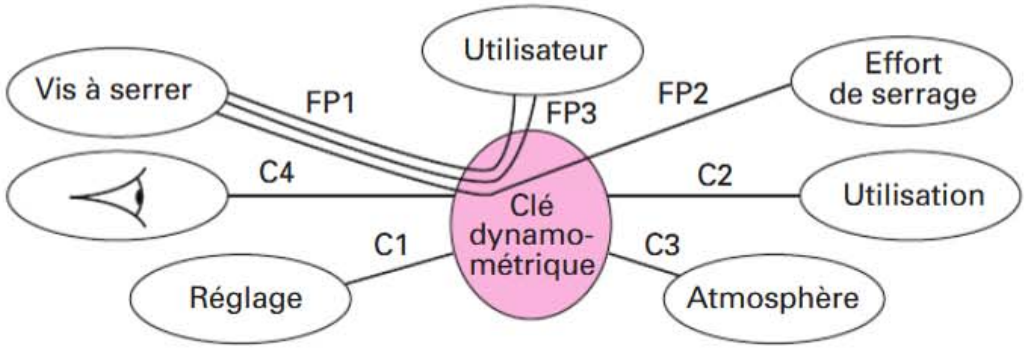
– Clé mécanique à réarmement automatique.
– Précision ± 4 % de la valeur réglée.
– Déclenchement sonore et tactile à l'atteinte du couple.
– Fonctionne en serrage et desserrage par retournement des embouts.
– Mécanisme simple et robuste, entretien facile.
– Réglage rapide par curseur.

– Déclenchement mécanique obtenu par choc de 2 pièces mécaniques ressenti par la main de l'utilisateur.

– Déclenchement indiqué par une alarme sonore.

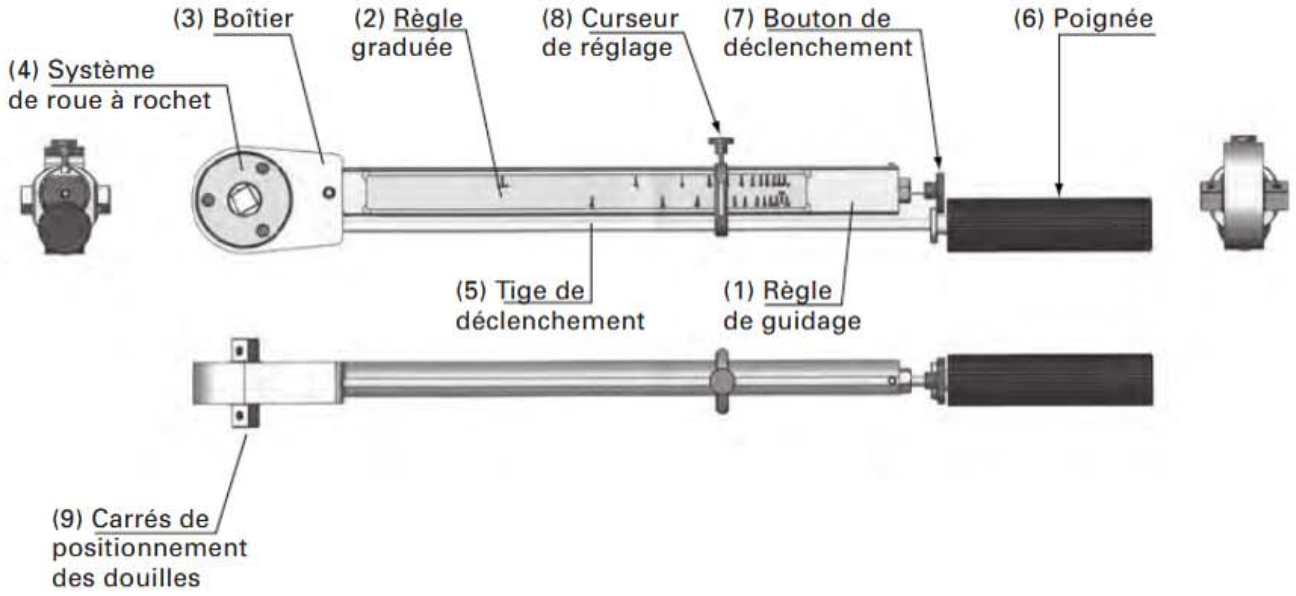
D'après SAM outillage

DIAGRAMME PIEUVRE



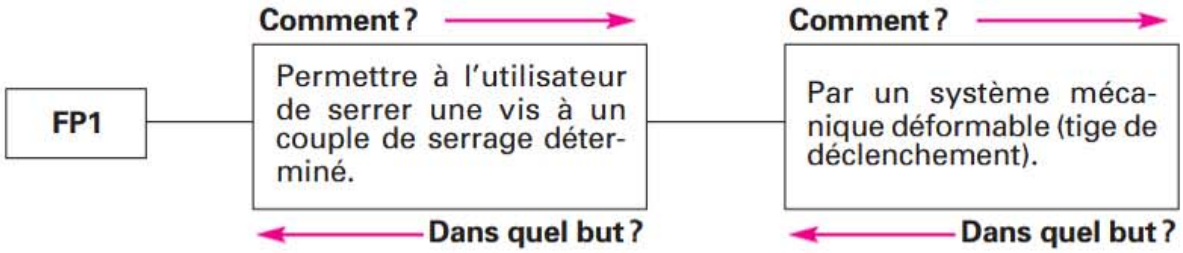
FP1 : permettre à l'utilisateur de serrer une vis à un couple de serrage déterminé.
FP2 : transmettre le couple de serrage à la vis à serrer.
FP3 : permettre à l'utilisateur de modifier le couple de serrage recommandé.
C1 : être facilement réglable.
C2 : être ergonomique.
C3 : résister à la corrosion.
C4 : être esthétique.

• Clé dynamométrique



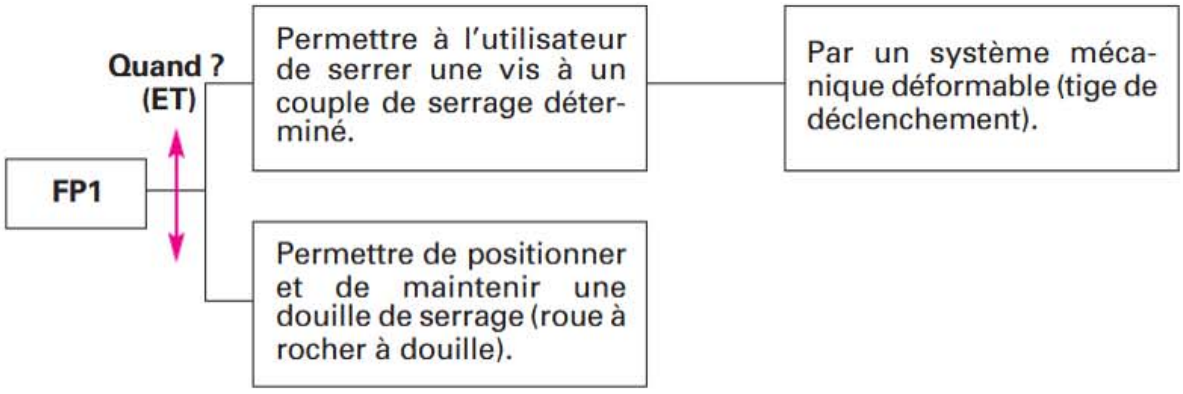
• Techniques d'élaboration d'un FAST

• Dans le sens horizontal (Fonction de service FP1)



• Dans le sens vertical (Fonction de service FP1)

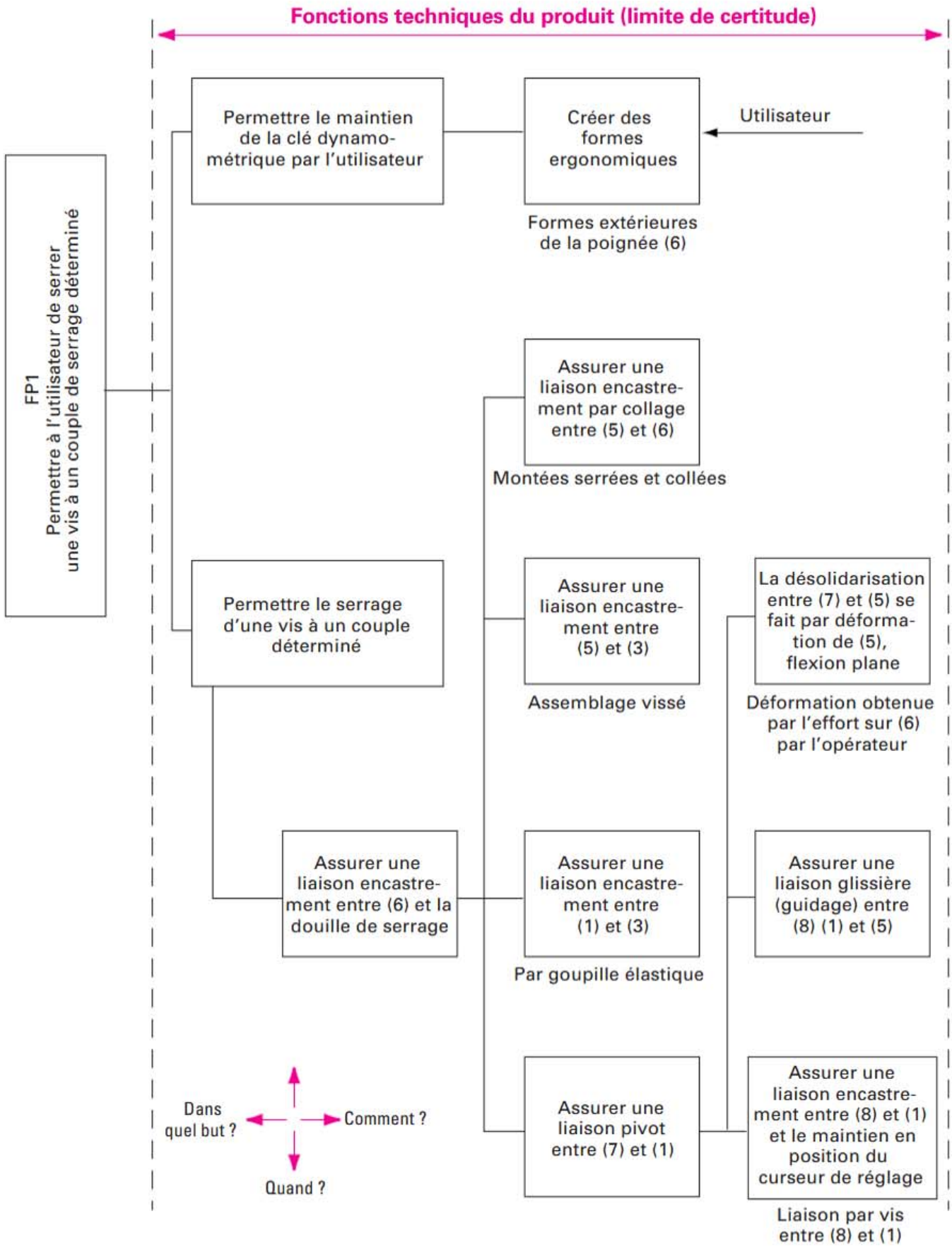
Dans ce cas, la question « Quand ? » est à prendre dans le sens ET.



Il s'agit d'obtenir une liaison mécanique entre la poignée (6) de la clé et la douille correspondant à la vis à serrer.
Pour cela, il faut simultanément :
– réaliser une liaison encastrement entre la poignée (6) et la tige de déclenchement (5) par collage ;
– réaliser une liaison encastrement entre la tige de déclenchement (5) et le système de roue à rochet (3) et (4), filetage-taraudage ;
– réaliser une liaison encastrement démontable entre le carré de positionnement de la douille (9) et la douille correspondant à la vis à serrer.

Analyse fonctionnelle

Diagramme FAST relatif à la fonction de service FP1



SADT ou analyse descendante

• Représentation fonctionnelle des activités dans le système

Définition et rôle d'un système technique

Un système technique est un ensemble d'éléments organisés en fonction d'un but : exercer une activité sur une des matières d'œuvre pour satisfaire un besoin.

On dit que le système remplit une fonction d'usage en produisant une valeur. Cette valeur réside dans la production d'un bien ou d'un service. La fonction d'usage d'un système est de conférer une valeur ajoutée aux matières d'œuvre présentes à l'entrée (produits, énergies ou informations).

Modélisation d'un système technique par des éléments fonctionnels formalisés (notion de fonction et de contrainte)

Il est possible de définir le système par des fonctions reliées entre elles par des contraintes. Les fonctions réalisent (grâce à des moyens techniques) des activités qui opèrent sur les entrées.

Les contraintes sont des interfaces qui véhiculent les grandeurs physiques prises en compte par les fonctions.

Les grandeurs physiques caractérisent les matières d'œuvre qui circulent au sein du système (produits, énergies, informations).

Définitions de l'orientation du modèle d'un système technique

Trois notions importantes caractérisent un modèle pour qu'il puisse être lu :

– LE CONTEXTE est définipar la frontière d'isolement avec le monde extérieur. Il s'agit d'isoler entièrement le système étudié pour permettre d'identifier les relations avec le monde extérieur.

– LE POINT DE VUE selon lequel est observé le système (concepteur, automaticien, maintenance, exploitant…). La prise en compte de toutes les technologies mises en œuvre dans le système nécessite de retenir le point de vue de l'automaticien pour mener l'analyse du modèle.

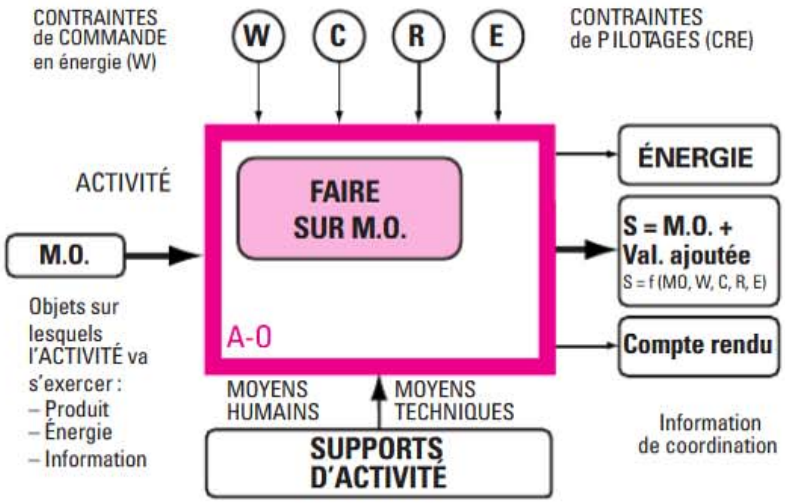
– L'OBJECTIF de communication technique qui est envisagé pour transmettre des connaissances grâce au modèle.

• Modèle général pour la représentation d'un module d'activité

Actigramme de la fonction globale ou fonction d'usage

Il est possible de définir le système par des fonctions reliées entre elles par des contraintes.
Les contraintes sont des interfaces qui véhiculent les grandeurs physiques prises en compte par les fonctions.

MO = matière d'œuvre
W = énergie
C = configuration
R = réglage
E = exploitation
S = bien ou service



• Principes et règles pratiques de lecture d'un modèle

Principes

L'analyse descendante modulaire et structurée d'un modèle de système technique est représentée par des actigrammes (ou diagrammes d'activité).

Un modèle peut comporter plusieurs actigrammes en niveaux de décompositions.

L'actigramme de niveau le plus élevé ne comporte qu'une fonction ; il s'agit de la fonction d'usage du système ou actigramme « CONTEXTE ».

Chaque décomposition d'une activité (fonction) peut être représentée par un actigramme de rang inférieur qui comporte au plus six fonctions.

La décomposition se termine si le niveau de détail souhaité pour atteindre l'objectif est suffisant.

Règles

Le support technique qui conduit l'activité a besoin d'énergie pour modifier l'état de la matière d'œuvre présente en entrée.

Si l'énergie nécessaire au support technique est prélevée sur la matière d'œuvre à traiter (énergie), on la représente comme une contrainte d'activation.

Les contraintes d'activité de la fonction ont les caractères énergétiques et/ou informationnels.

Cas particuliers

Lorsque la configuration C de l'activité ou support technique est réalisée par différents moyens matériels flexibles (outils, fluides...), ces moyens matériels constituent également une contrainte d'activité. Les contraintes d'activité (entités énergétiques, informationnelles ou matérielles) ne sont pas modifiées par l'activité de la fonction mais la déclenchent ou la contrôlent.

Toutefois lorsque la contrainte d'activité subit une transformation ou dégradation, cela ne constitue en aucune façon le but de l'activité du support technique et ces transformations deviendront explicites aux niveaux inférieurs de l'analyse.

Un module d'activité doit avoir au moins une contrainte qui contrôle ou déclenche son activité.

Les données de sorties d'un module d'activité peuvent constituer des données d'entrées ou des contraintes d'activité pour un autre module fonctionnel.

Hiérarchisation des diagrammes : niveaux

La méthode SADT (*Structured Analysis and Design Technic*) propose une hiérarchisation des actigrammes.

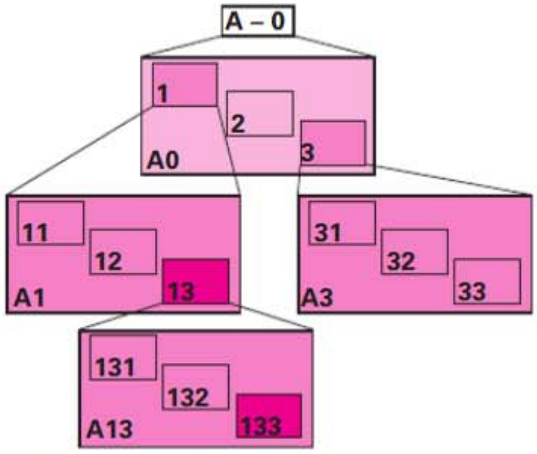
Par convention, le niveau le plus élevé (actigramme « CONTEXTE », porte le numéro A – 0 (A moins zéro).

Ce niveau se décompose au niveau A0 en « n boîtes » : A1, A2, A3, ... An.

Par suite, la boîte A1 se décompose en « p boîtes » : A11, A12, A13, ... A1p.

Ainsi de suite, jusqu'au niveau de détail souhaité.

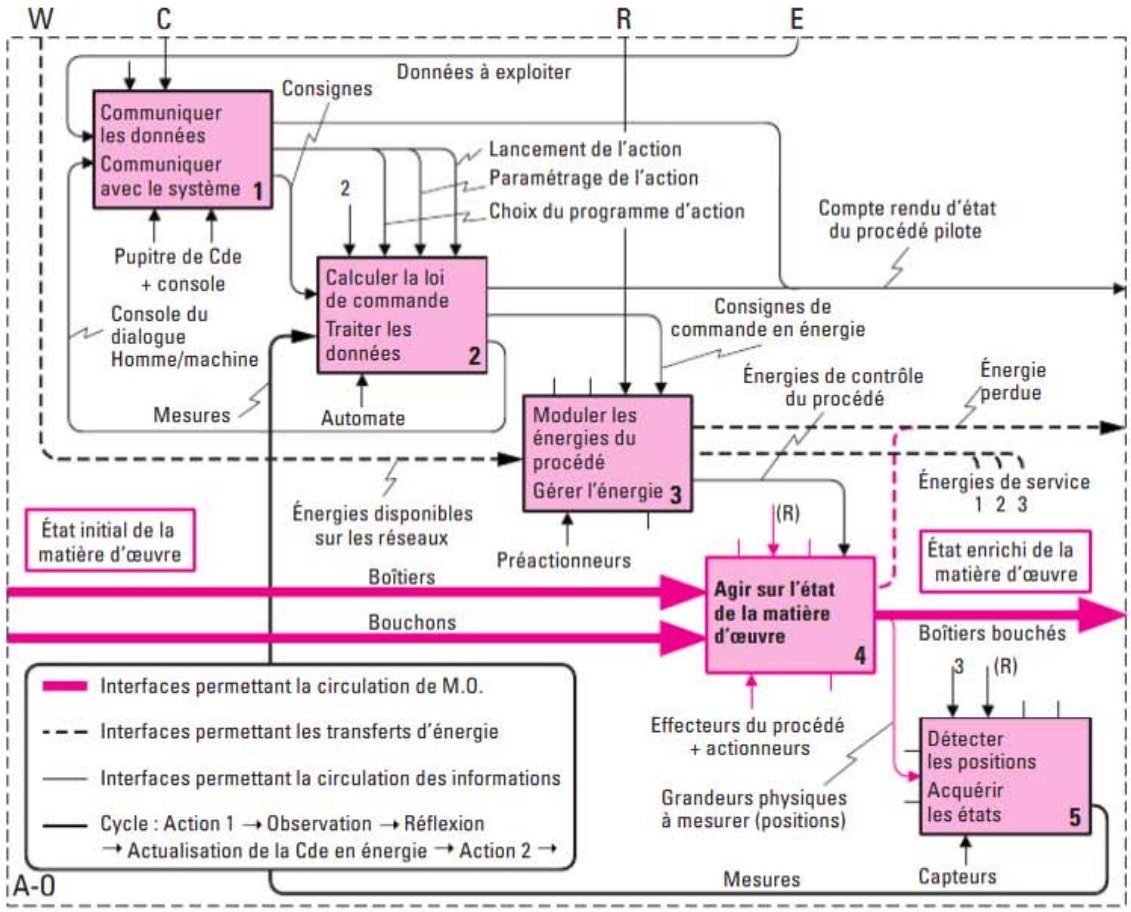
Exemple de décomposition incomplète ci-contre.



• **Procédé automatisé niveau A0** (exemple du bouchage de boîtiers électriques)

C'est l'actigramme décliné de l'actigramme A-0.

Cet actigramme A-0 met en évidence les cinq fonctions essentielles d'un système automatisé.



(1) Communiquer avec le système.
(2) Traiter les données.
(3) Gérer l'énergie.
(4) Agir sur la matière d'œuvre.
(5) Acquérir les états.

• Principaux outils d'analyse des systèmes dans une démarche de conception

	Démarche fonctionnelle	Démarche temporelle	Démarche structurelle
Saisie et définition du besoin	– Enquête – Diagramme (Paréto, Ishikawa, ...) – « Bêtes à cornes » – *Examen de l'environnement* – *Analyse des séquences* – *Graphe d'interactions* – *« Pieuvre »* – *Contrôle de validité* – *Outils de caractérisation et de hiérarchisation* – *Analyse des états* – SADT (A-0 et 1 er niveau) – ...	– GRAFCET (point de vue système) – GEMMA – Analyse des états – Algorithme – PERT – Gantt – ...	
CdCF			
Analyse de l'existant	– *FAST (de description)* – Analyse « VALEUR » des Fonctions de service – *Bloc-Diagramme Fonctionnel* – *Tableau d'Analyse Fonctionnelle* – AMDEC – Schéma fonctionnel – Graphe des liaisons – Schémas cinématique et architectural – Cotation fonctionnelle – Diagramme sagittal – Schéma-bloc – Table de vérité – *Arbre des voies technologiques* – *Liste des états* – ...	– GRAFCET (point de vue PO-PC) – Chronogramme – Ordinogramme – Analyse de déroulement – Planning – ...	– Organigramme Technique du Produit – Schéma structurel – Graphe de montage-démontage – Logigramme – Plan d'implantation – Table de vérité – Plans d'ensemble et de définition – Nomenclature – Schéma technologique – ...
Recherche et évaluation des solutions	– *FAST (de créativité)* – *Arbre des voies technologiques* – Logiciels de CAO – *Séquence de flux bouclés* – *Bloc-Diagramme Idéal* – *Contrôle de validité* – *Tableau de décision* – ...	– Logiciels – GRAFCET – Guides de décision – ...	– Documentation technique – Calculs – Logiciels de validation – Guides de décision (composants) – Bloc-diagramme fonctionnel – ...

Nota : tous les outils décrits dans ce tableau ne sont pas traités dans cet ouvrage.

D'après les référentiels Dunod.

• Analyse fonctionnelle des produits industriels

HISTOGRAMME

L'histogramme est un diagramme qui représente la fréquence des données sous la forme de colonnes.

Il aide à identifier les changements ou variations dans les processus en cours de modification et indique de quelle façon les différentes mesures d'un processus ou d'un produit peuvent être utiles quand des normes sont établies.

Exemple : dimensions des pièces produites.

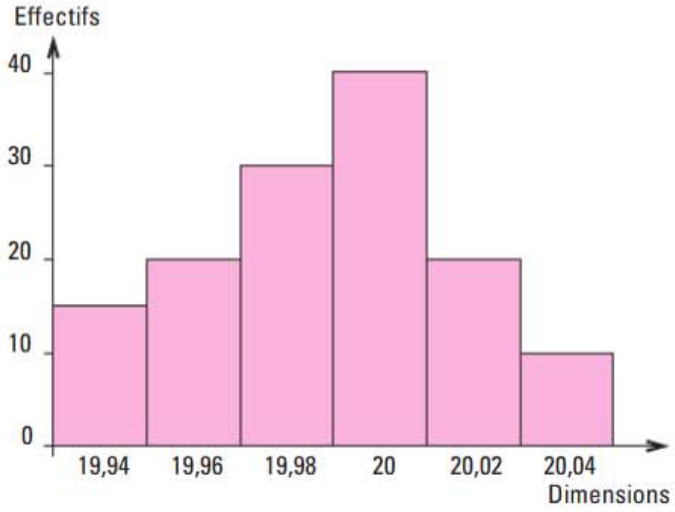
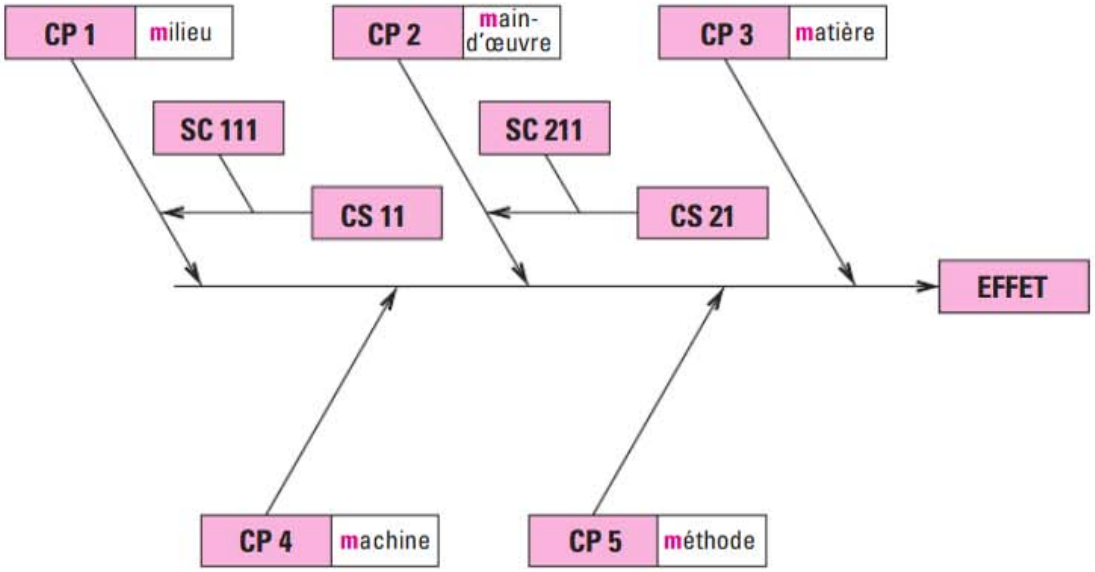


DIAGRAMME CAUSE-EFFET OU ISHIKAWA OU EN ARÊTE DE POISSON



– **CP** : causes principales.
– **CS** : causes secondaires.
– **SC** : sous-causes.

Cette méthode représente la relation entre un problème et ses causes potentielles. Elle aide à trier et à relier les interactions parmi les facteurs affectant un processus. Elle visualise les causes d'un processus, d'un phénomène ou d'un problème, les hiérarchise et les ordonne en décomposant les causes **principales**, les **causes secondaires** et éventuellement les **sous-causes**.

Méthode :
• Identifier toutes les causes (nécessité d'un travail en groupe : *brainstorming*).
• Respecter les règles suivantes :
– écrire toutes les idées,
– ne pas émettre de critiques,
– viser la quantité,
– recueillir les idées.

Remarques :
– Pour faciliter la gestion, ne pas dépasser six causes principales.
– Pour aider à la construction du diagramme (recherche des causes principales), on peut recourir à la méthode des « **cinq m** » : **m**achines, **m**ain-d'œuvre, **m**éthodes, **m**atière, **m**ilieu.

MATRICE DE DÉCISION

C'est un tableau de comparaison des critères pour différentes propositions.

Exemple : moyens de production.

Il fournit un outil simple pour analyser et comparer différentes propositions et aider à la décision.

Critères \ Propositions	A	B	C
Défauts	10	12	14
Durée du cycle (en minutes)	15	18	7
Coût horaire	400	300	350
Flexibilité	Bonne	Moyenne	Moyenne
…			

BRAIN-STORMING (REMUE-MÉNINGES)

Le *brainstorming* permet, lors d'une recherche en groupe pour l'étude d'un problème et la recherche de solutions, de produire un maximum de solutions en utilisant au mieux toutes les idées des participants en combinant celles-ci entre elles.

Règles à suivre :

- Ne pas critiquer les idées émises, ne pas porter un jugement, seulement les consigner (ces idées seront triées par la suite).
- Enregistrer les idées qui paraissent les plus farfelues (elles peuvent être la source d'une innovation).
- Rechercher la qualité (permet d'en retenir les meilleures).
- Combiner les idées entre elles (les idées peuvent être reprises par d'autres et modifiées).
- Tous les participants au *brainstorming* doivent être consultés chacun leur tour.
- Laisser les idées mûrir (les idées peuvent être reprises à la réunion suivante).

DIAGRAMME DE PARETO

Ce diagramme représente la contribution relative des causes (classées par ordre décroissant d'importance) au problème global.

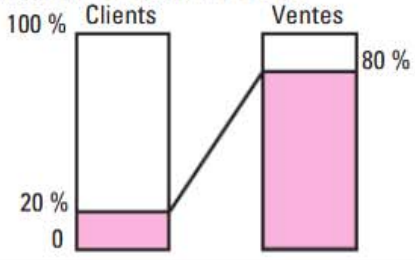
Il est basé sur le principe selon lequel un petit nombre de causes est souvent l'origine de la plupart des effets et il permet d'identifier les quelques problèmes vitaux qui doivent être traités en priorité.

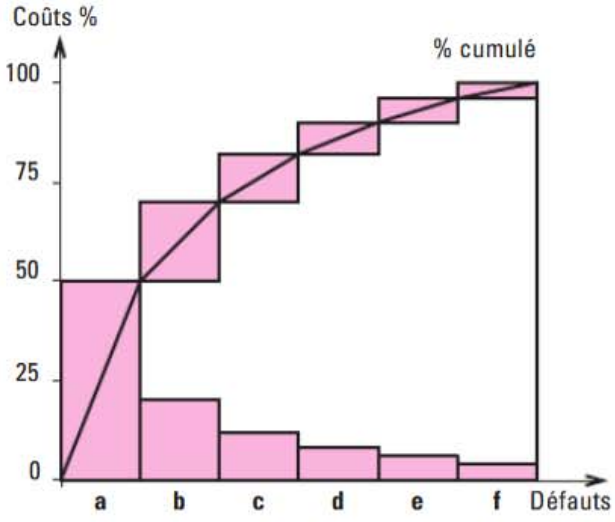
En première analyse du diagramme ci-contre, il faudrait agir en priorité sur les défauts (**a**) et (**b**).

Il n'y a pas toujours concordance entre l'importance du coût et le nombre de causes de dysfonctionnement.

Tout ensemble naturel d'éléments suit la règle de « 80-20 » ; par exemple, environ 20 % de nos clients concernent 80 % des ventes.

Cette relation est tout à fait générale et s'applique à toutes les occasions permettant de réduire le coût.





OPÉRATIONS		Coût des défauts
Rep.	Désignation	
f	Tournage	4
e	Fraisage	6
d	Perçage	8
a	Alésage	50
c	Rectification	12
b	Défaut du brut	20

Analyse fonctionnelle

DÉFINITION

Réseau ou diagramme de PERT *(Program Evaluation and Review Technic)*

Graphe orienté selon une direction symbolisant le déroulement du temps, le diagramme PERT est constitué par un ensemble de flèches représentant chacune une opération élémentaire ou tâche.

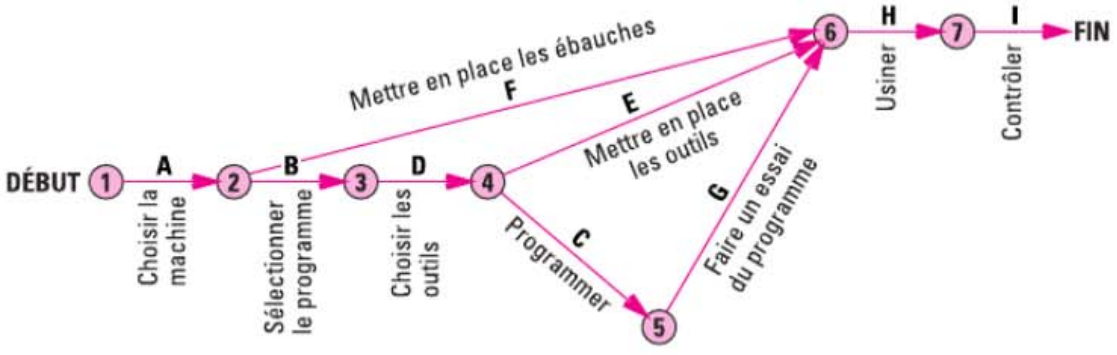
La position des flèches, les unes par rapport aux autres, traduit leur enchaînement dans le temps.

Le réseau PERT visualise la succession et la dépendance des différentes opérations ou actions à mener pour aboutir à la réalisation d'un projet.

TABLEAU D'ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES OPÉRATIONS

Repères des tâches	Usinage sur machine-outil à commande numérique. Énoncé des opérations ou tâches	Tâches antérieures obligatoires	Durée min
A	Choisir le type de machine	néant	
B	Sélectionner le programme d'usinage	A	
C	Programmer	B	10
D	Choisir les outils	B	
E	Mettre en place les outils dans le magasin	D	10
F	Mettre en place l'ébauche sur la machine	A	5
G	Faire un essai du programme à vide	B C	4
H	Usiner	E F G	4
I	Contrôler	H	5

DIAGRAMME PERT



Reporter les durées de chaque opération et tracer le chemin critique (le plus long).

Le réseau PERT est normalement suivi par le planning d'exécution Gantt.

Ingénierie Système (IS)

Pour l'étude des systèmes de plus en plus complexes, l'industrie s'est dotée d'une démarche méthodologique pour piloter les différentes phases de conception, d'évolution et de validation de systèmes répondant ainsi au besoin économique et de performance du client.
Cette démarche est à la fois :
- Fonctionnelle : description du besoin des parties prenantes, cahier des charges, etc.
- Structurelle : description de la structure du système
- Comportementale : analyse des exigences, étude de la qualité et de l'impact environnemental, etc.

L'IS est normalisée : norme ISO 15288 de 2003 revue en 2008 traduite par l'AFNOR sous le n° Z 67-288 (Ingénierie Systèmes – Processus de cycle de vie des systèmes).

Modélisation avec le langage SysML

SysML (***Sys**tems **M**odeling **L**anguage*) est un langage de modélisation spécifique au domaine de l'ingénierie système et non une méthode d'analyse.
Il permet de regrouper dans un modèle commun aux sciences de l'ingénieur, les spécifications, les exigences, l'architecture et les paramètres du système.

• Les diagrammes de modélisation

Le langage SysML s'articule autour de neuf types de diagrammes répartis selon deux points de vue :

- **point de vue comportemental** (5 diagrammes) :
  - diagramme des cas d'utilisation (indicateur **uc** ou **ucd**, *Use Case Diagram*) : il montre les interactions fonctionnelles entre les acteurs et le système ;
  - diagramme d'états (indicateur **stm**, *State Machine Diagram*) : il représente la succession des états du système ;
  - diagramme de séquence (indicateur **seq** ou **sd**, *Sequence Diagram*) : il représente les échanges de messages entre les acteurs et le système (scénarios) ;
  - diagramme d'exigences (indicateur **req**, *Requirement Diagram*) : il définit les exigences du cahier des charges ;
  - diagramme d'activités (indicateur **act**, *Activity Diagram*) : il représente le déclenchement des événements en fonction des états du système et permet de modéliser des comportements.
- **point de vue structurel** (4 diagrammes) :
  - diagramme de définition de blocs (indicateur **bdd**, *Block Definition Diagram*) : il décrit l'architecture matérielle du système ;
  - diagramme de bloc interne (indicateur **ibd**, *Internal Block Diagram*) : il décrit de façon plus précise la structure interne des blocs.
  - diagramme de paquetages (indicateur **pkg**, *Package Diagram*) : il décrit les relations existant entre les paquetages (espaces de noms) d'un système ;
  - diagramme paramétrique (indicateur **par**, *Parametric Diagram*) : il permet de décrire les contraintes qui relient les paramètres du système entre eux.

• Description d'un système à l'aide du langage SysML

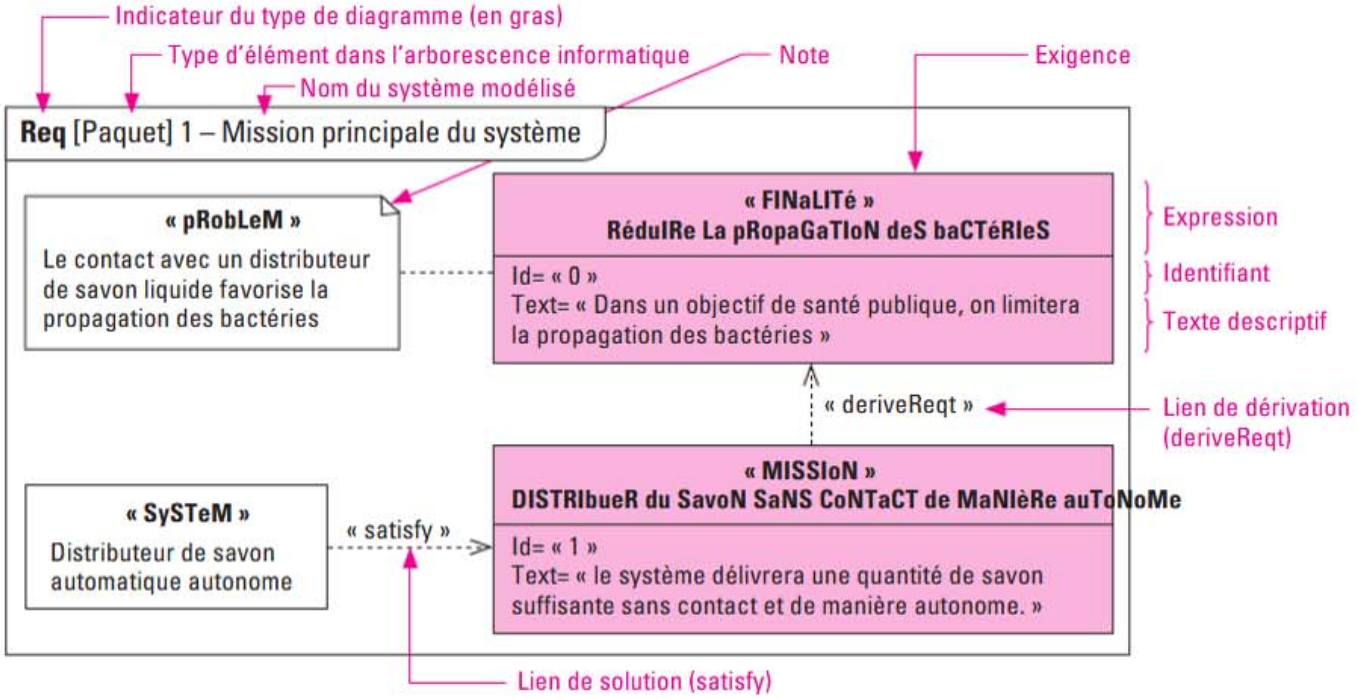
Le système étudié est un distributeur de savon automatisé.
Les différents diagrammes représentés vont permettre de décrire ce système d'un point de vue comportemental et structurel.
Ce système doit répondre à un cahier des charges fonctionnel décrit ci-contre.

DIaGRaMMe de CoNTeNu 0 – ExpReSSIoN du beSoIN INITIaL

- On souhaite limiter la propagation des bactéries qui se transmettent par contact lors du lavage des mains.
- Les distributeurs de savon liquide classiques possèdent des pompes que l'on actionne à la main. Il s'agit de trouver une solution pour obtenir une dose de savon en supprimant le contact avec le distributeur.
- Le système sera à destination du grand public.
- On utilisera le système en intérieur.
- Le système sera positionné près d'un point d'eau.
- On souhaite un système utilisant une recharge spécifique.

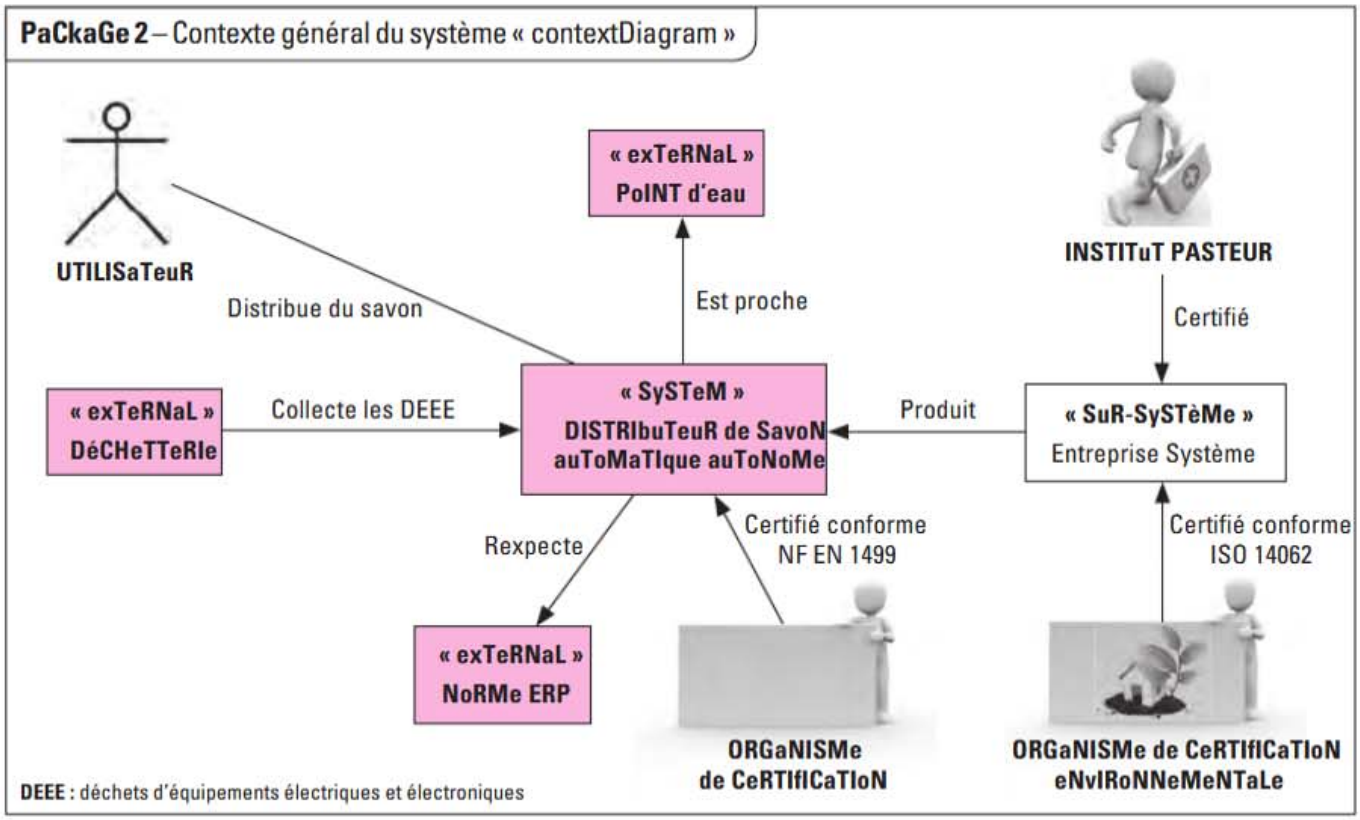
Mission du système

La mission du système est décrite par un **diagramme d'exigences (Req)** ; il spécifie les exigences techniques, fonctionnelles, environnementales ou économiques du système.
Une **exigence** permet de spécifier une capacité ou une contrainte que doit satisfaire le système.



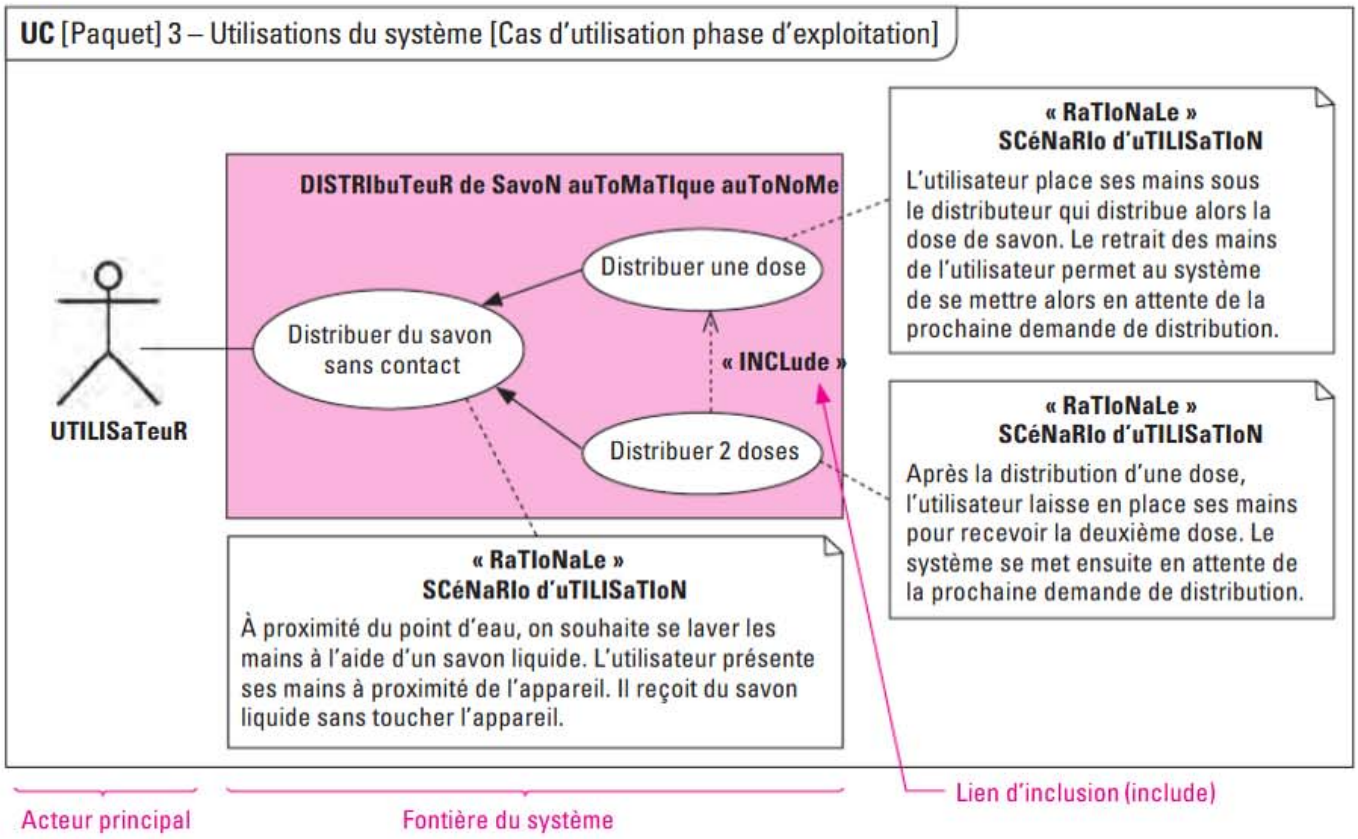
Contexte général

Le **diagramme contexte** définit la frontière du système et spécifie les acteurs et éléments environnants.
Ce diagramme n'est pas normalisé dans le langage SysML ; on utilise généralement un diagramme de définition de blocs.



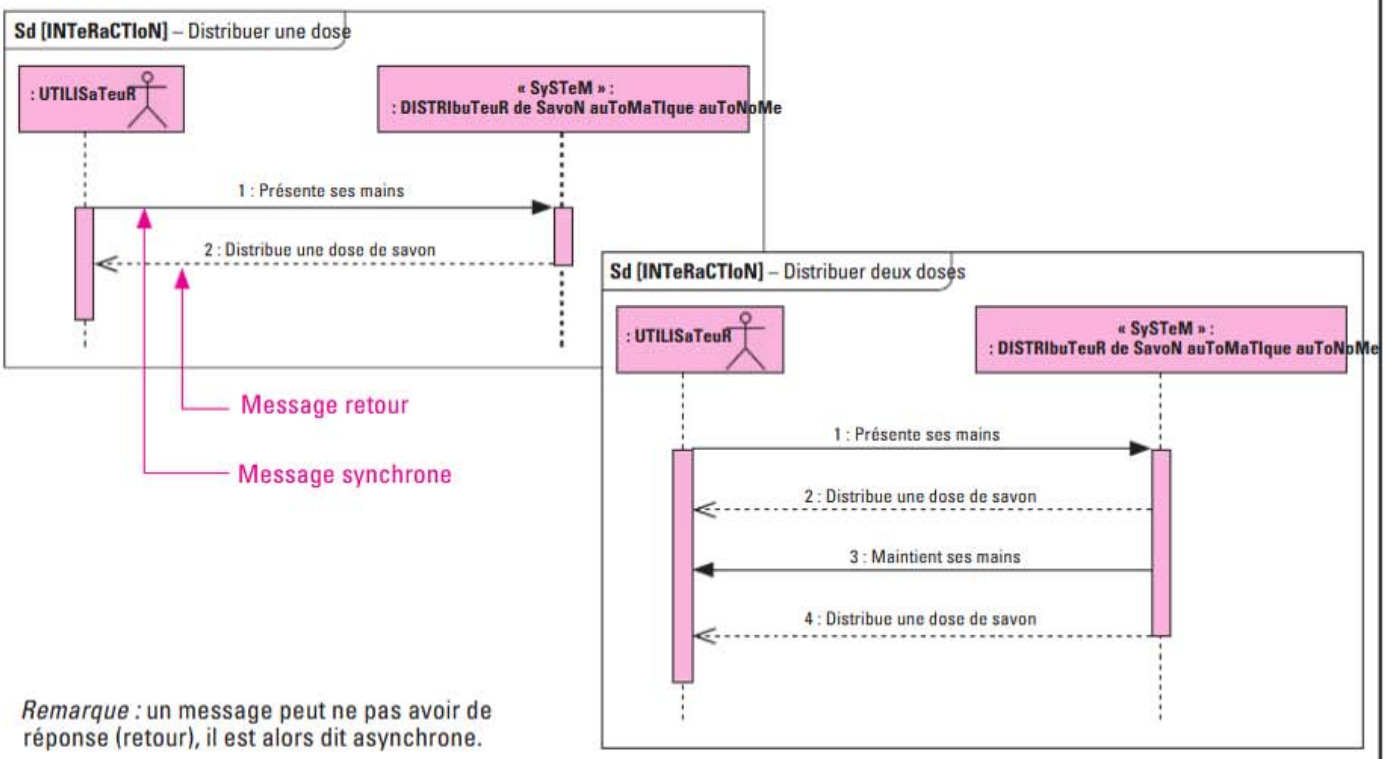
Cas d'utilisation – Phase d'exploitation

Le diagramme des **cas d'utilisation (cu)** permet de montrer les fonctionnalités du système en relation avec les acteurs à qui il rend service. Il peut faire apparaître plusieurs scénarios.



Cas d'utilisation – Définition des scénarios

Le **diagramme de séquences (sd)** décrit les interactions entre plusieurs entités, acteurs et le système ou entre sous-systèmes.

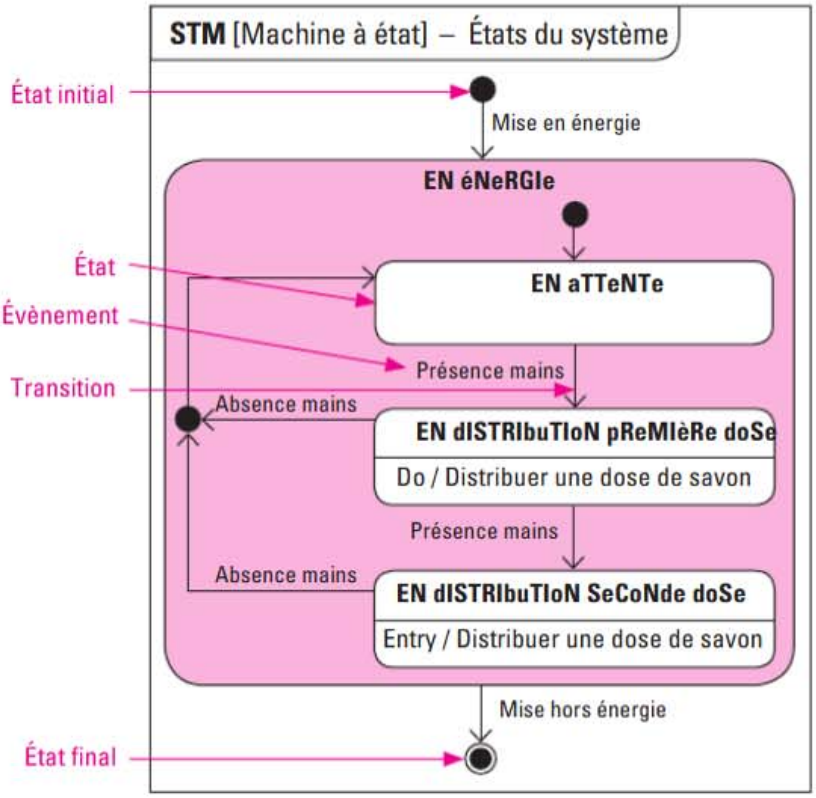


Remarque : un message peut ne pas avoir de réponse (retour), il est alors dit asynchrone.

États du système

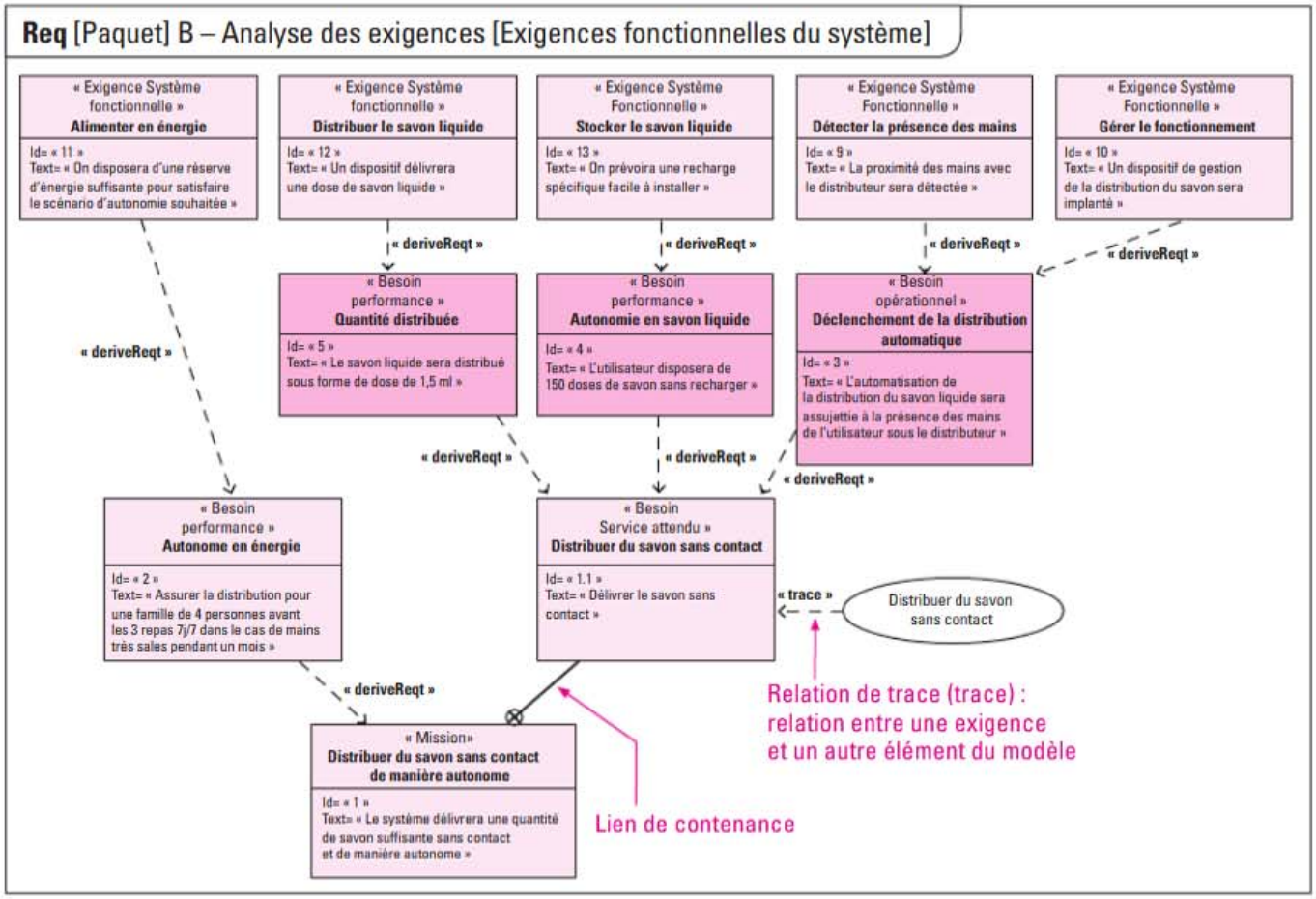
Le **diagramme d'états-transitions (stm)** décrit les états successifs du système et les transitions lors des changements d'états.

Chaque état correspond à une séquence.
C'est le diagramme d'états qui peut générer tous les scénarios possibles.



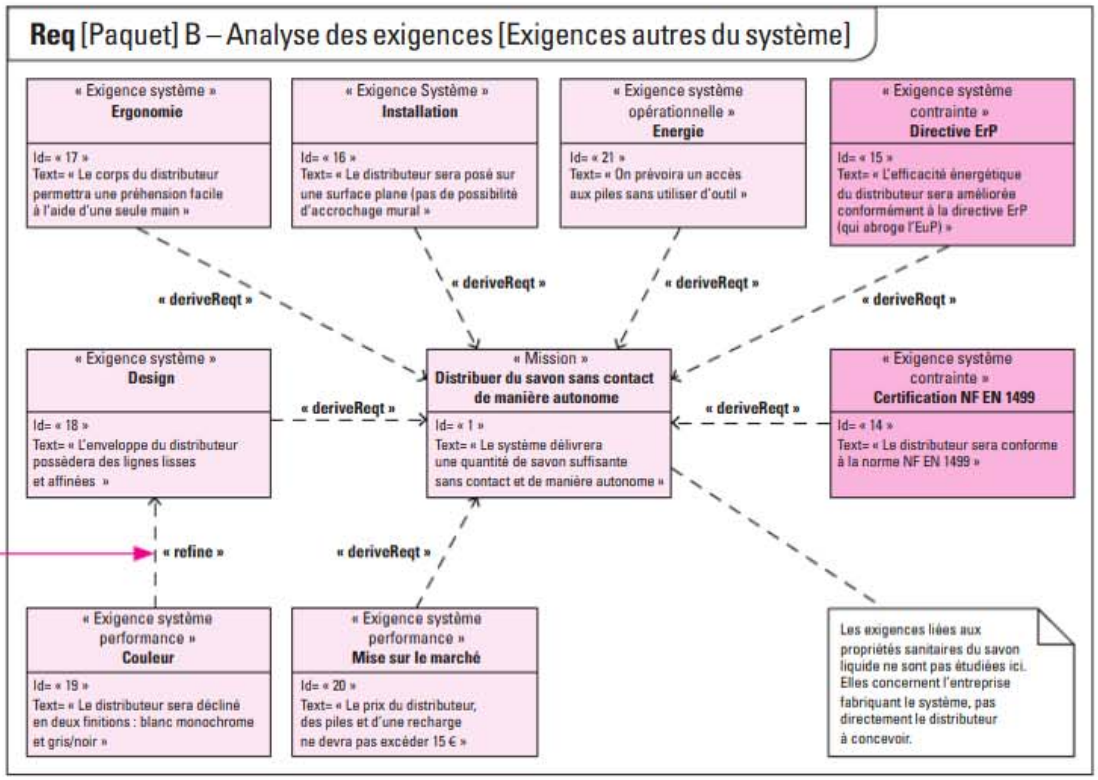
Exigences fonctionnelles du système

Les différentes fonctions du système sont décrites par un **diagramme d'exigences (req)** dans lequel figureront les besoins et les services attendus.



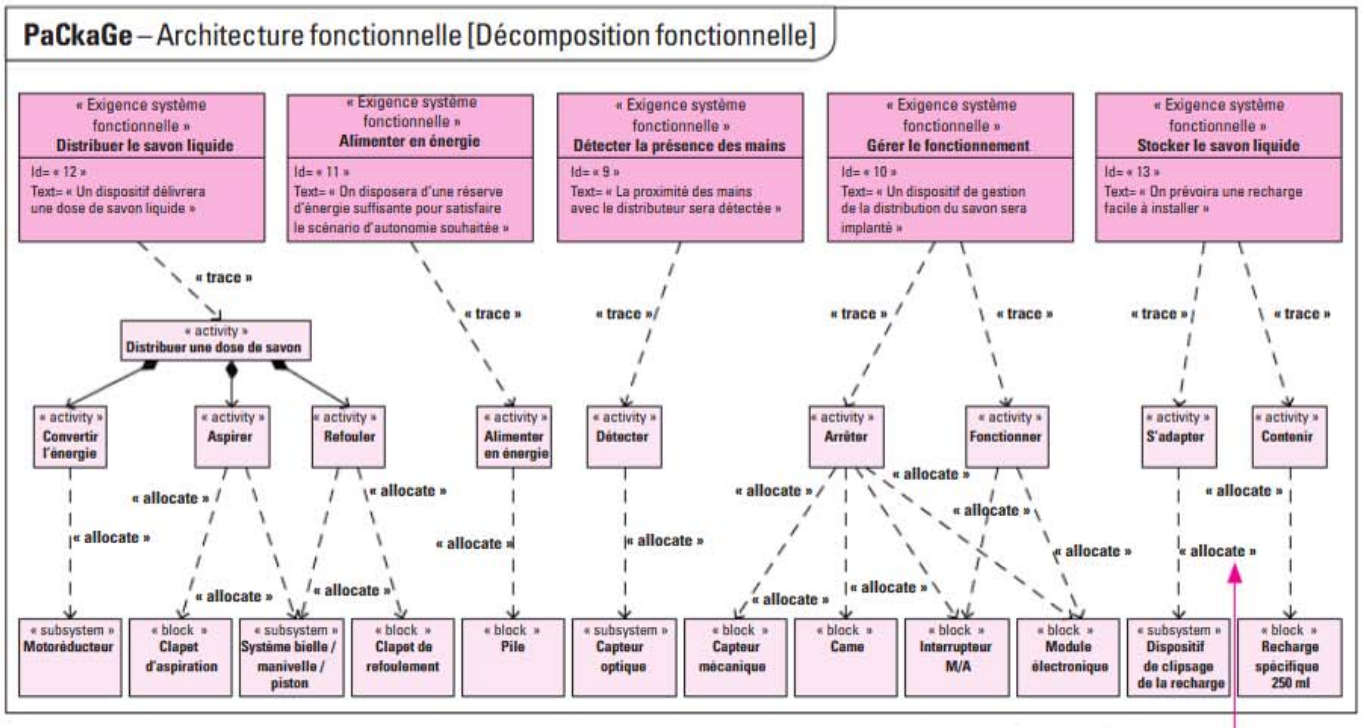
Autres exigences du système

D'autres exigences comme l'énergie, l'ergonomie, les normes, le design etc. sont décrites elles aussi par un diagramme d'exigences.



Décomposition fonctionnelle du système

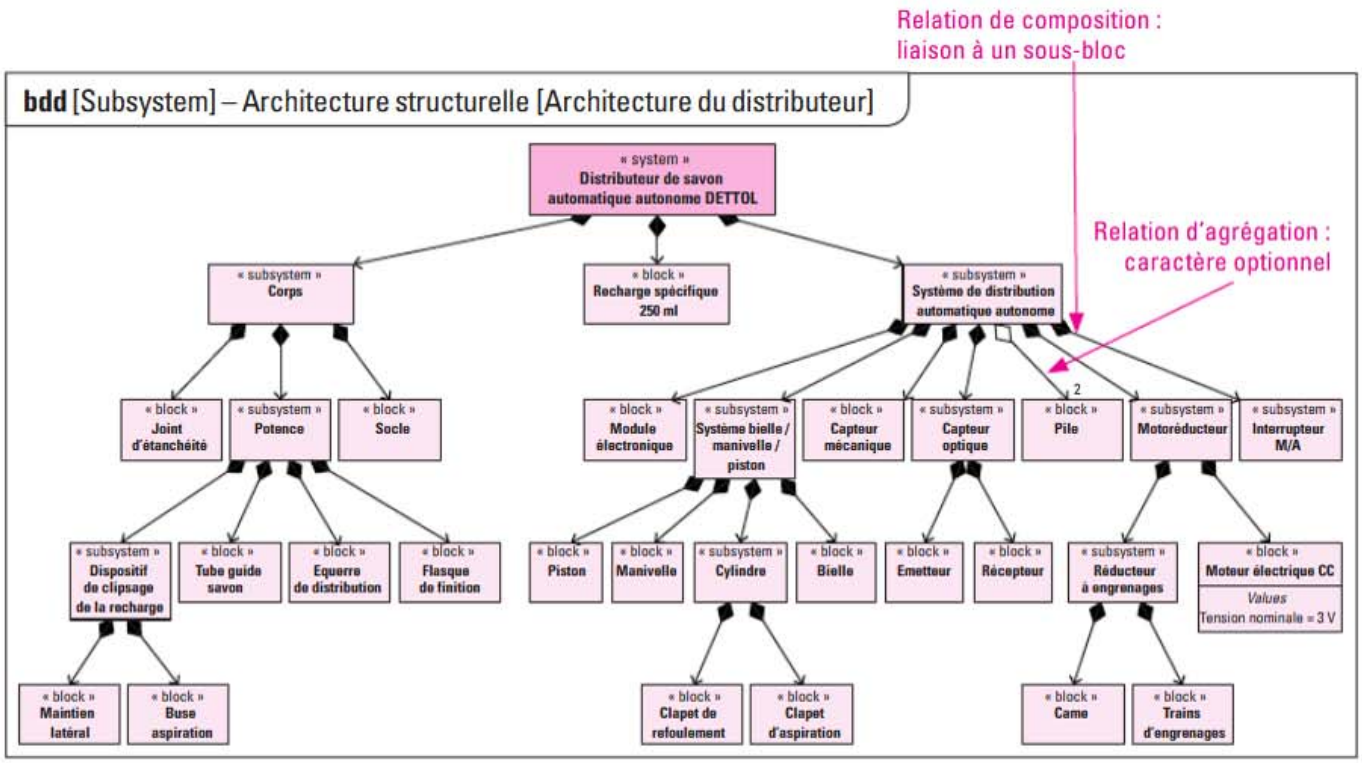
Les différentes fonctions sont représentées par un diagramme d'exigences et une structure de blocs qui spécifient les différents composants du système.



Analyse fonctionnelle

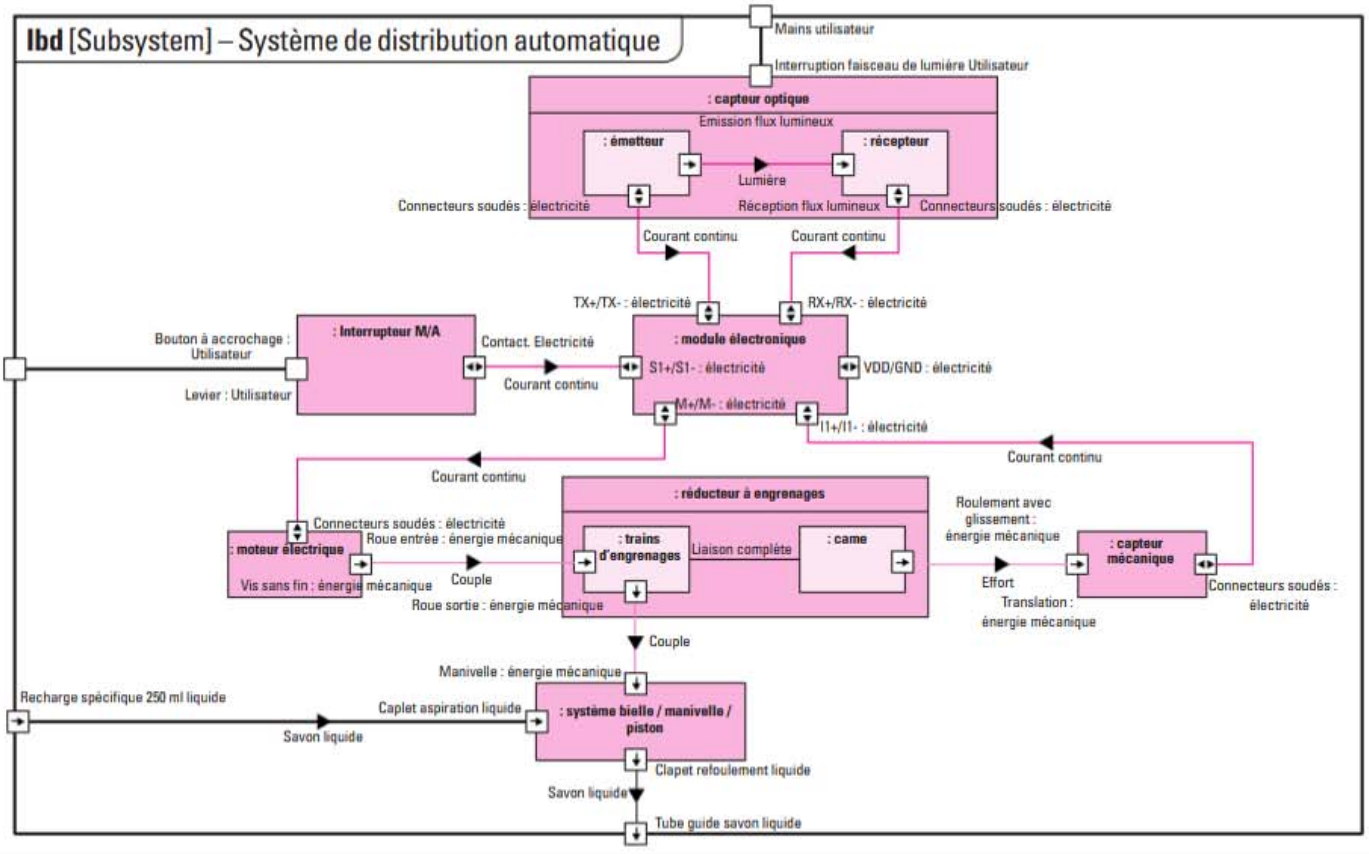
Architecture du système

Le **diagramme de définition de blocs (bdd)** définit l'architecture matérielle globale du système par un organigramme de blocs. On peut faire apparaître les propriétés dans chaque bloc.



Architecture du système de distribution automatique autonome

Le **diagramme de blocs internes (idd)** décrit l'architecture matérielle de la structure interne d'un bloc issu du bdd en faisant apparaître ses composants et les échanges (flux d'énergie ou d'information) entre les blocs internes.



1.2. DÉMARCHE QUALITÉ

1.2.1. COMPÉTITIVITÉ DES PRODUITS INDUSTRIELS

ÉLÉMENTS D'UN SYSTÈME QUALITÉ ISO 9004-1

• Cycle de vie d'un produit

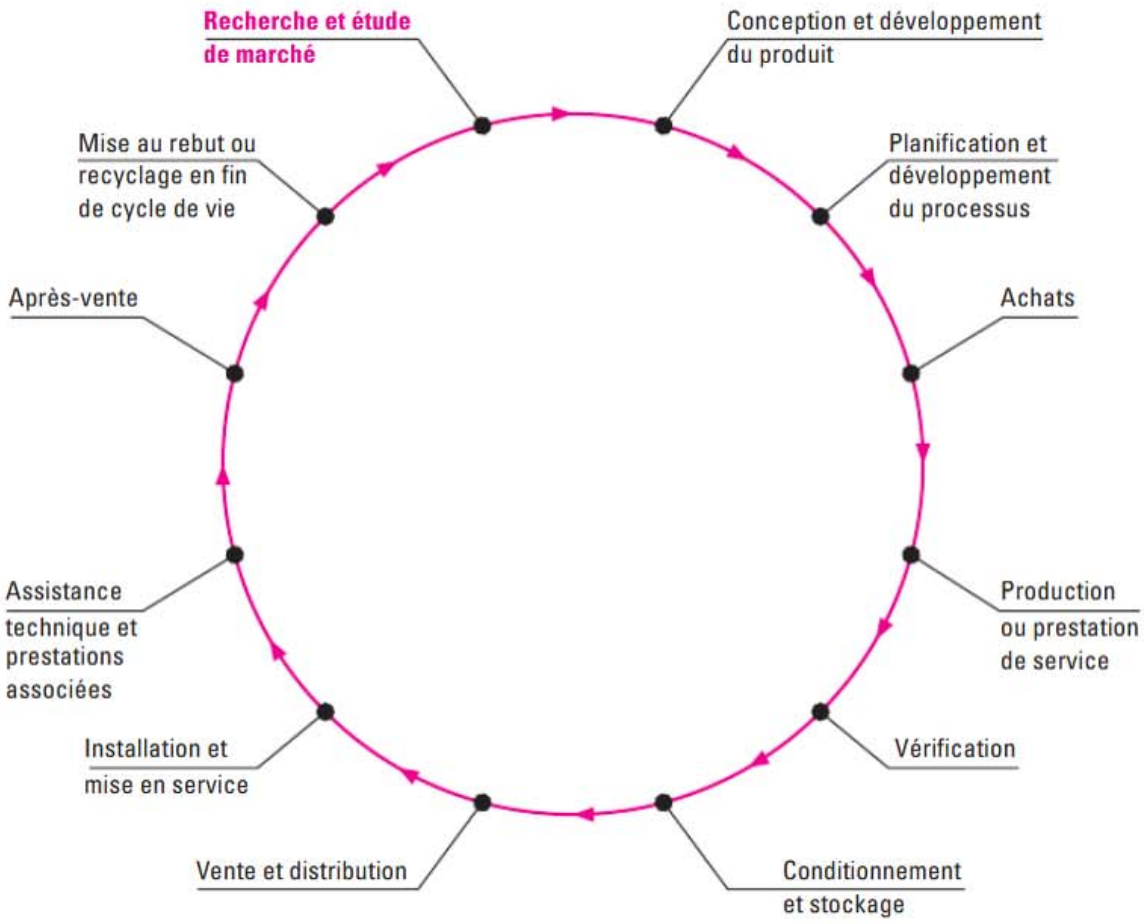
• Portée de l'application

Le système qualité s'applique à toutes les activités relatives à la qualité d'un produit. Il concerne toutes les phases du cycle de vie d'un produit et celles des processus, depuis l'identification initiale des besoins du marché jusqu'à la satisfaction finale des exigences (voir figure ci-dessous).

• Structure du système qualité

– **Responsabilité et autorité** : les responsabilités doivent être clairement définies.
– **Organisation** : les fonctions relatives au système qualité doivent être clairement définies au sein de l'ensemble de l'organisation.
Il convient de définir les liaisons hiérarchiques et les circuits de communication.
– **Procédures opérationnelles** : le système qualité doit mettre l'accent sur les actions préventives qui évitent l'apparition de problèmes.
– **Gestion et configuration** : le système qualité doit comprendre des procédures écrites relatives à la gestion de configuration.

ACTIVITÉS AYANT UNE INCIDENCE SUR LA QUALITÉ ISO 9004-1



MODÈLES D'ASSURANCE QUALITÉ ISO 9000 2000 (F)

• Choix d'un modèle d'assurance qualité

La famille des normes ISO 9000 énumérées ci-dessous a été élaborée pour aider les organismes, de tous types et de toutes tailles, à mettre en œuvre et appliquer des systèmes de management de la qualité efficaces.

– L'ISO 9000 décrit les principes essentiels des systèmes de management de la qualité et en spécifie la terminologie.
– L'ISO 9001 spécifie les exigences relatives à un système de management de la qualité lorsqu'un organisme doit démontrer son aptitude à fournir des produits satisfaisant aux exigences des clients et à la réglementation applicable, et qu'il vise à accroître la satisfaction de ses clients.
– L'ISO 9004 fournit des lignes directrices sur l'efficacité et l'efficience du système de management de la qualité. L'objet de cette norme est l'amélioration des performances de l'organisme et la satisfaction des clients et des autres parties intéressées.
– L'ISO 19011 fournit des conseils sur l'audit des systèmes de management de la qualité et des systèmes de management environnemental.

Ces normes forment un ensemble cohérent relatif aux systèmes de management de la qualité et facilitent la compréhension mutuelle dans le cadre des échanges commerciaux nationaux et internationaux.

Démarche « systèmes de management de la qualité »

Une démarche permettant de développer et de mettre en œuvre un système de management de la qualité comporte plusieurs étapes, telles que :

a) détermination des besoins et attentes des clients et des autres parties intéressées ;
b) établissement de la politique qualité et des objectifs qualité de l'organisme ;
c) détermination des processus et responsabilités nécessaires pour atteindre les objectifs qualité ;
d) détermination et fourniture des ressources nécessaires pour atteindre les objectifs qualité ;
e) définition des méthodes permettant de mesurer l'efficacité et l'efficience de chaque processus ;
f) mise en œuvre de ces méthodes pour mesurer l'efficacité et l'efficience de chaque processus ;
g) détermination des moyens permettant d'empêcher les non-conformités et d'en éliminer les causes ;
h) établissement et application d'un processus d'amélioration continue du système de management de la qualité.

Cette démarche peut également être appliquée pour entretenir et améliorer un système de management de la qualité existant.

AUDITS DU SYSTÈME DE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ

Les audits sont utilisés pour évaluer le niveau de satisfaction des exigences relatives au système de management de la qualité. Les constatations d'audit sont utilisées pour évaluer l'efficacité du système de management de la qualité et identifier les opportunités d'amélioration.

Les audits de première partie sont effectués par, ou pour le compte de, l'organisme lui-même pour des besoins internes et peuvent servir de base à une autodéclaration de conformité de l'organisme.

Les audits de seconde partie sont effectués par des clients de l'organisme ou par d'autres personnes pour le compte du client.

Les audits de tierce partie sont effectués par des organismes externes et indépendants. Ces organismes, généralement accrédités, fournissent la certification ou l'enregistrement de la conformité à des exigences telles que celle de l'ISO 9001.

L'ISO 19011 fournit des conseils pour les audits.

DÉFINITION

• Analyse de la valeur

Selon la norme de novembre 1996 (EN 1325-1), l'analyse de la valeur est une démarche créative et organisée utilisant un processus de conception fonctionnel et économique dont le but est d'augmenter la valeur d'un sujet AV.
Le sujet AV peut être un produit existant ou un produit nouveau en cours de développement.

CARACTÉRISTIQUES

L'analyse de la valeur se caractérise par :
– une démarche fonctionnelle qui impose de formuler le problème en termes de finalités et non en termes de solutions pour rechercher l'essentiel ;
– une démarche à caractère économique par la référence systématique aux coûts ;
– une démarche pluridisciplinaire par un travail de groupe faisant appel à un animateur et un décideur, en présence des personnes de formations et de responsabilités différentes, qui permet de trouver un consensus sur les fonctions, les performances, les principes, les solutions et les coûts, tout en favorisant l'exercice de la créativité.
Cette démarche créative vise à étendre l'éventail des solutions à considérer. Elle permet la prise en compte des évolutions du marché, de l'environnement et des techniques.

GROUPE « ANALYSE DE LA VALEUR »

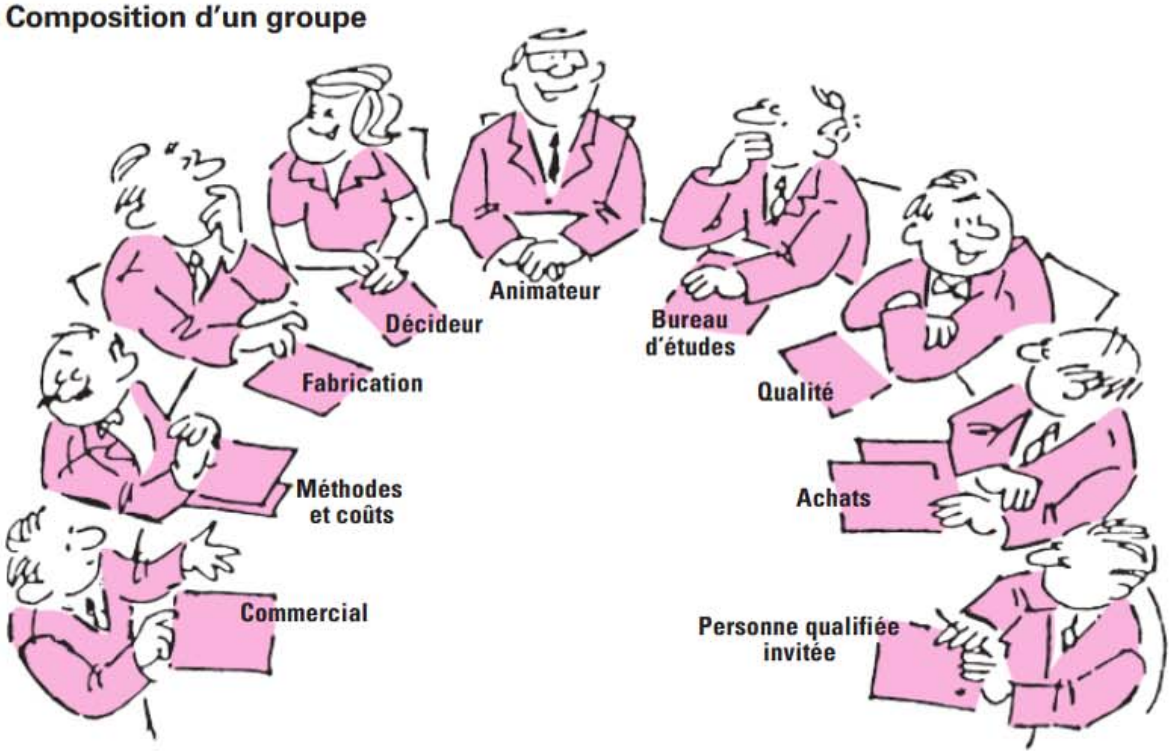
• Recommandations pour la composition d'un groupe « analyse de la valeur »
Ce groupe ne doit pas dépasser 10 personnes.

Attribution des rôles :

– Le **décideur** : c'est la personne mandatée pour prendre les décisions relatives à une action « analyse de la valeur » et les faire connaître. Il représente la direction de l'entreprise et a reçu les pouvoirs nécessaires.

– L'**animateur** : c'est la personne chargée de l'organisation et du déroulement d'une action. Elle en est responsable devant le décideur. Son efficacité repose sur les caractéristiques suivantes :
– maîtrise de la méthodologie de l'analyse de la valeur ;
– expérience en ce domaine ;
– bonne connaissance des principaux secteurs de l'entreprise ;
– esprit de synthèse, objectivité de jugement, réalisme et esprit de progrès ;
– sens des relations humaines ;
– optimisme, dynamisme, ténacité et persévérance, modestie et désintéressement.

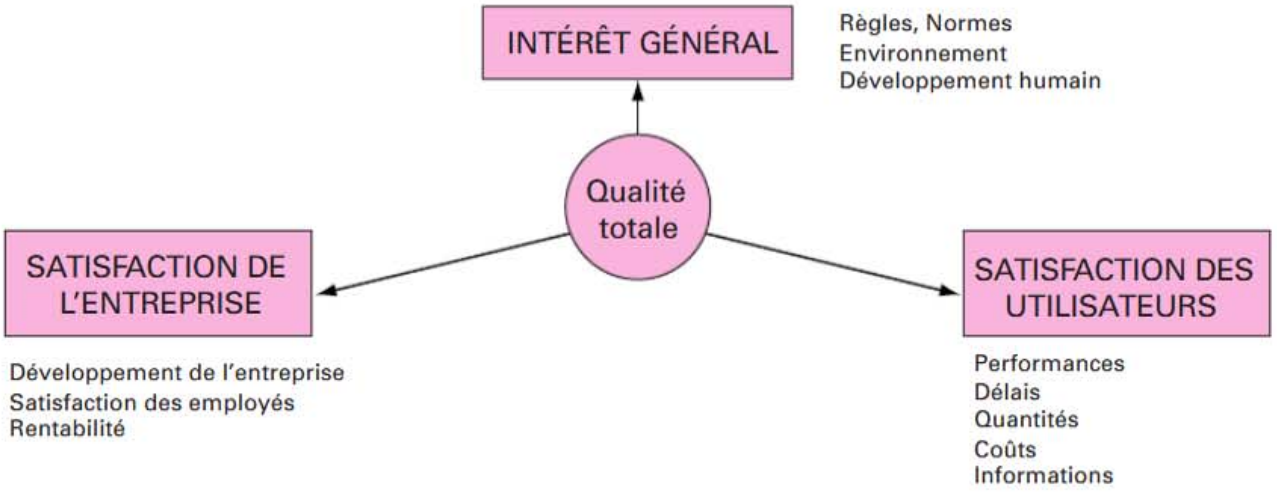
• Composition d'un groupe



D'après un document ANVAR.

• La gestion de la qualité

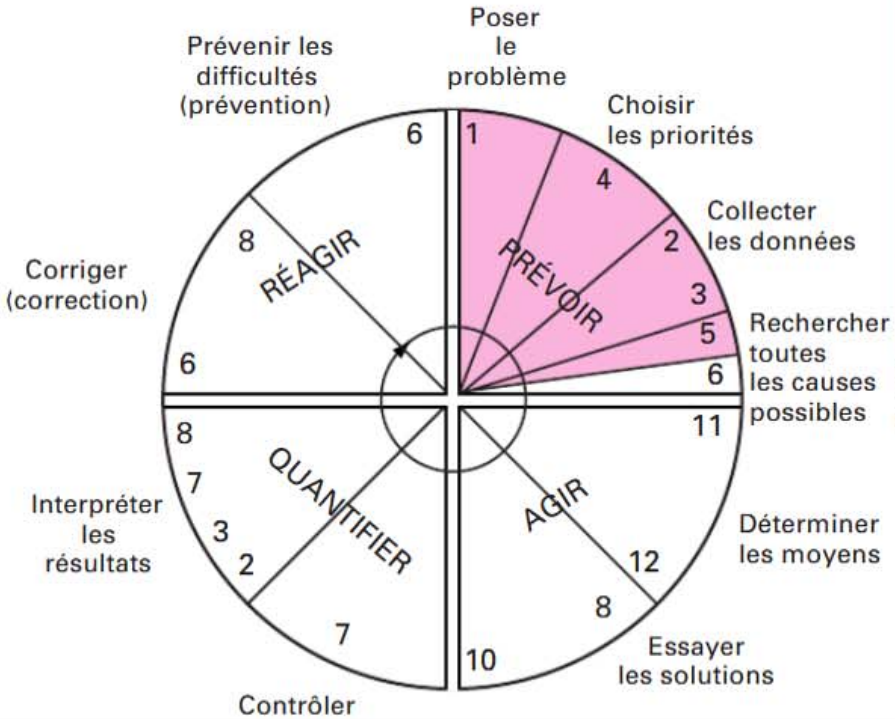
Politique de qualité totale
Les objectifs à atteindre dans une démarche dite de « qualité totale » sont :
– satisfaction des besoins des utilisateurs (clients),
– contribution à la pérennité de l'entreprise (fournisseur),
– respect de l'intérêt de la collectivité.



Gestion de la qualité dans l'entreprise

Ceci dans tous les secteurs de l'entreprise : conception, approvisionnement, usinage, montage, essai, stockage, vente, SAV…

Les outils de la qualité (d'après la roue de Deming)



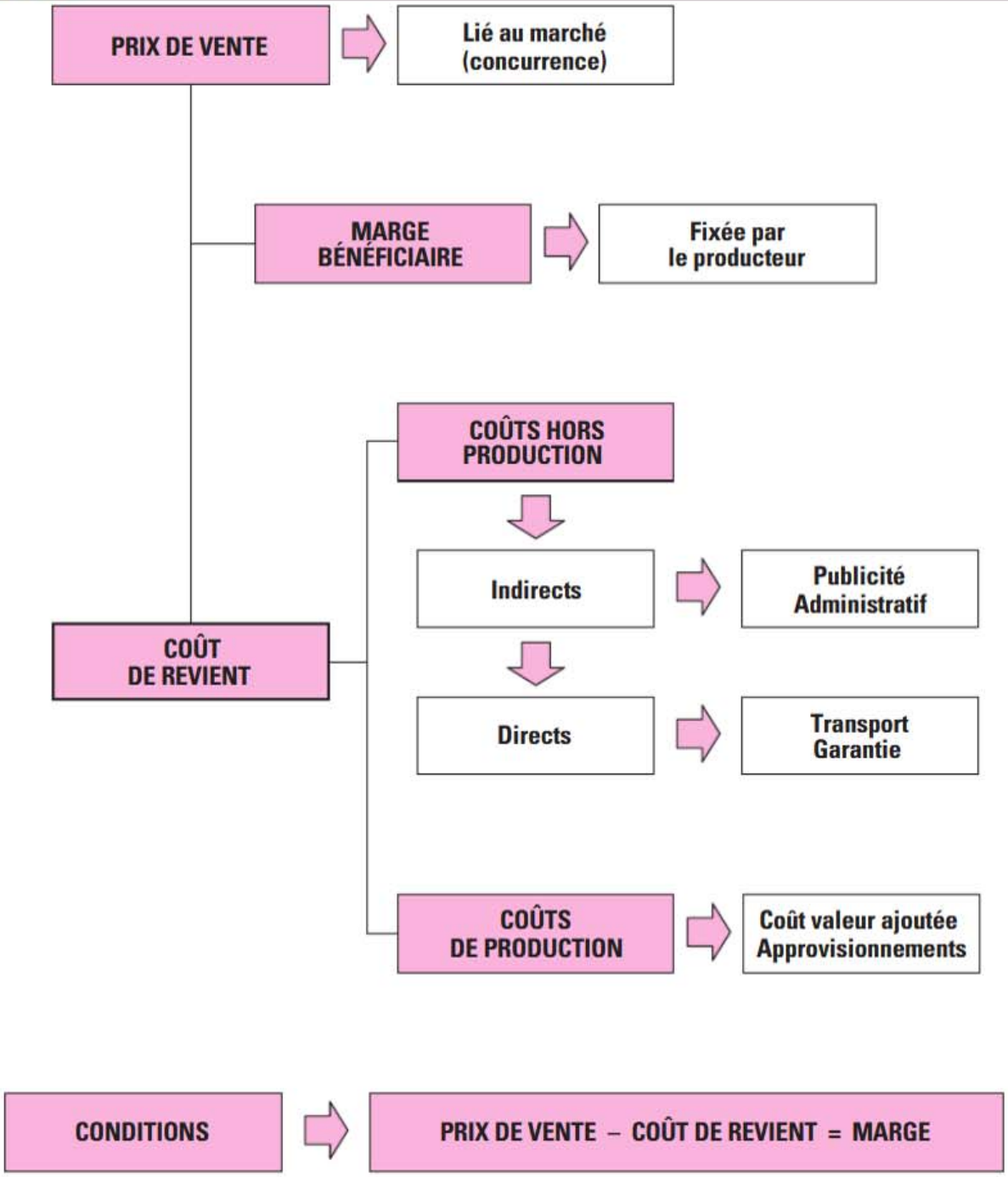
1	Brainstorming (remue-méninges)
2	Feuilles de relevés
3	Histogramme
4	Loi de Pareto, courbe ABC
5	Diagramme Causes-Effet (Ishikawa)
6	Méthode AMDEC
7	Méthode MSP (SPC)
8	Méthode Taguchi
9	Analyse de la valeur
10	Méthode QFD
11	Méthode SMED
12	Poka-Yoke

Seule une partie de ces outils est développée dans ce chapitre.

D'après *Mémotech Génie mécanique*

1.2.2. LES COÛTS

ANALYSE DES COÛTS



ALOURDISSEMENT DES COÛTS

Les causes de l'alourdissement des coûts peuvent être les suivantes :
– cahier des charges insuffisamment élaboré ;
– conception sans contraintes économiques ;
– solutions non remises en cause ;
– mauvaise connaissance des coûts réels ;
– manque de temps (trop de solutions provisoires deviennent définitives) ;
– estimation tardive des coûts dans le projet.

QUALITÉ

La qualité est l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui donne l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites.
Dans de nombreux cas, les besoins peuvent évoluer avec le temps, ceci implique la révision périodique des exigences pour la qualité.
Les besoins peuvent inclure, par exemple, des aspects de performances, de facilité d'emploi, de sûreté de fonctionnement, de sécurité, des aspects économiques et esthétiques.

Les coûts

IDENTIFICATION DES COÛTS

• Coût de la non-qualité

Selon les sources documentaires, les coûts sont appelés :
– coûts de non-qualité (NF X 50-126) ;
– coûts de la qualité (guide des coûts relatifs à la qualité AFNOR) ;
– coût d'obtention de la qualité (COQ).
En fait, chaque identification évoque sensiblement la même chose.

COÛTS RÉSULTANTS

COÛTS DES ANOMALIES INTERNES + **COÛTS DES ANOMALIES EXTERNES** + **COÛTS DE DÉTECTION** + **COÛTS DE PRÉVENTION**

= **COÛTS RÉSULTANT DE LA NON-QUALITÉ**

ANOMALIES INTERNES

Le coût des **anomalies internes** correspond aux frais encourus lorsque le produit ne satisfait pas aux exigences de qualité avant d'avoir quitté l'entreprise :

a) Rebuts.
b) Retouches, reconditionnement, réparations…
c) Déclassements sur produits finis ou en cours.
d) Pertes dues aux achats inemployables.

e) Autres coûts internes :
– pollution,
– accidents du travail,
– absentéisme,
– divers.

ANOMALIES EXTERNES

Le coût des **anomalies externes** représente les frais encourus lorsque le produit ne répond pas aux exigences de qualité après avoir quitté l'entreprise :

f) Réclamations clients.
g) Coûts de garantie (service après-vente).
h) Remises ou ristournes.
i) Autres coûts externes :
– pénalités de retard ;
– agios pour non-respect des délais ;
– pertes de clientèle ;
– remboursements des dommages causés à autrui ;
– prime d'assurance pour couverture de la responsabilité du fait des produits.

DÉTECTION

Les coûts de **détection** sont les dépenses engagées pour vérifier la conformité des produits aux exigences de la qualité, c'est-à-dire pour financer la recherche des anomalies :

– salaires et charges liés aux vérifications ;
– frais de contrôle sous-traités ;
– fournitures diverses et produits détruits lors des essais utilisés pour l'évaluation du produit ;
– amortissement du matériel de contrôle et d'essais utilisés pour l'évaluation du produit ;
– frais d'étalonnage ;
– divers.

PRÉVENTION

Les coûts de **prévention** représentent les investissements humains et matériels engagés pour vérifier, prévenir et réduire les anomalies, c'est-à-dire pour financer les actions menées au niveau des causes des anomalies :

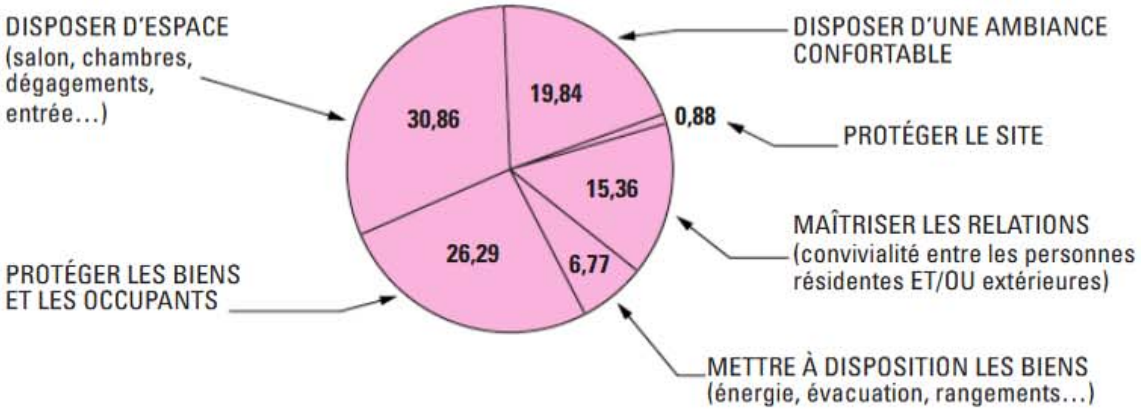
– établissement des documents relatifs à la gestion et à l'assurance de la qualité (manuel qualité, plans qualité, plans de contrôle) ;
– évaluation des fournisseurs ;
– sensibilisation, motivation et formation à la qualité et à la gestion de la qualité ;
– réalisation d'audits qualité ;
– analyse de la valeur ;
– divers.

Valeur et coût d'une fonction

• Exemple du coût d'une maison dans un secteur climatique identifié

• Répartition des coûts par fonction de service

Pourcentages par fonction



• Arborescence de la fonction de service : disposer d'une ambiance confortable

Fonction de service	Sous-fonctions		Critère d'appréciation	Niveau	Flexibilité
DISPOSER D'UNE AMBIANCE CONFORTABLE 19,84 %	4,20	Confort lumineux			
	3,50	Confort atmosphérique qualité de l'air			
	7,10	Confort thermique			
	5,04	Confort acoustique	Isolation phonique	N 3	F 2

Pour une performance* attendue, ce tableau permet d'en calculer le coût.
La flexibilité liée au niveau permet ou pas de négocier la performance demandée et le coût correspondant.

Exemples :
• F0 : pas de possibilité de négocier. Il faut impérativement respecter la performance demandée.
• F3 : toute négociation est possible compte tenu du niveau demandé.

* C'est le niveau d'un critère d'appréciation.

Comparaison des différentes solutions pour atténuer le bruit, coûts et fonctions

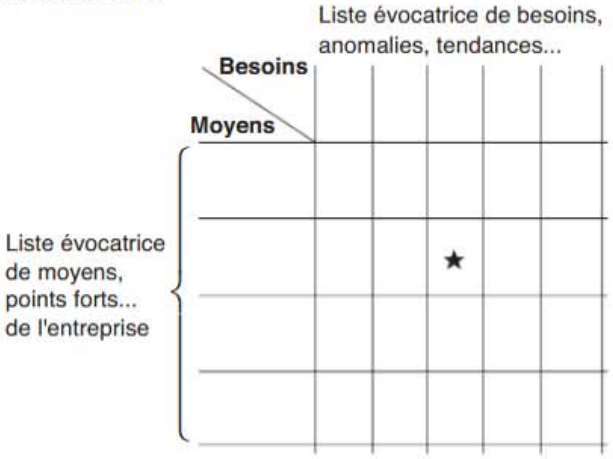
Critère d'appréciation	Performance et niveau	Prix par mètre linéaire
Isolation phonique	**N1 :** conversation normale audible ; paroles fortes compréhensibles.	32 €
	N2 : conversation normale à peine audible ; paroles fortes audibles mais non compréhensibles.	48 €
	N3 : conversation normale inaudible ; paroles fortes assourdies.	60 €
	N4 : conversation normale inaudible ; paroles fortes à peine audibles.	70 €

1.2.3. L'INNOVATION

Méthodes favorisant la production d'idées de solutions

• Méthodes exploratoires : quoi faire de...

★ Dans chaque case on examine en quoi le moyen associé à un besoin donne des idées de réponses.



• Méthode TRIZ

Cette théorie d'origine russe peut se traduire par : **Théorie de la Résolution des Problèmes Inventifs** ; elle a pour objectif de démultiplier la créativité en phase de recherche de solutions techniques avec des outils de résolution de contradiction d'évolutions technologiques, basés sur l'analyse des brevets.

• Questions stimulantes ou check-list

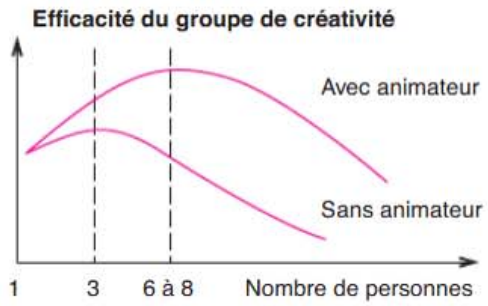
1. QQOCCQ
- **Q** : quoi ?
- **Q** : quand ?
- **O** : où ?
- **C** : comment ?
- **C** : combien ?
- **Q** : qui ?

2. Adaptation, modification, substitution
- Que se passerait-il si l'on modifiait légèrement cela ?
- Que se passerait-il si l'on changeait la forme ?
- Comment améliorer cet appareil ?
- Comment améliorer ce procédé ?
- Comment améliorer ce service, etc.?
- Par quoi puis-je substituer cela ?
- Qui pourrait le faire mieux encore ?
- Où pourrait-on le faire ailleurs ?

3. Check-list de Von Fange
- Que puis-je faire d'autre ?
- Que se passe-t-il si je renverse, si je mets l'intérieur à l'extérieur, le haut en bas ?
- Que puis-je faire sur la forme, sur la taille ?
- Que puis-je laisser de côté ?
- Que se passe-t-il si je considère les extrêmes ?
- Que se passe-t-il si je rends symétrique ou asymétrique ?
- L'objet peut-il être plus sûr, moins dangereux ?
- Peut-il être rendu plus économique ?
- Peut-il glisser au lieu de tourner ? Tourner au lieu de glisser ?
- Peut-il se déplacer ? Peut-il être stationnaire ?

4. Check-list de Flesch
- Que suis-je en train d'accomplir ?
- Ai-je fait cela auparavant et comment ?
- Puis-je le faire d'une autre façon ?
- Puis-je utiliser plus, moins, toute, aucune, une, deux ou plusieurs parties ?
- Que se passe-t-il si je fais le contraire ?
- Que se passe-t-il si je ne fais rien ?

5. Check-list de Reiss
- En quoi consiste votre principale difficulté ?
- Qu'est-ce qui vous trouble ? Vous ennuie ? Vous gêne ?
- Qu'est-ce qui vous fait attraper froid ? Qu'est-ce qui vous salit ?
- Qu'est-ce que vous aimez toucher ? Sentir ? Voir ou entendre ?
- Quand souhaiteriez-vous disposer d'une main supplémentaire ?
- Qu'est-ce que vous oubliez ou vous négligez de faire le plus souvent ?



La protection industrielle (**INPI** : Institut National de la Propriété Industrielle)
- Tout produit non protégé peut être reproduit.
- La protection de l'innovation peut être assurée par un brevet, des droits d'auteur, des certificats, des dessins et modèles...
- Peuvent être brevetables les inventions nouvelles, impliquant une activité inventive et susceptible d'application industrielle.

1.3. DÉVELOPPEMENT DURABLE

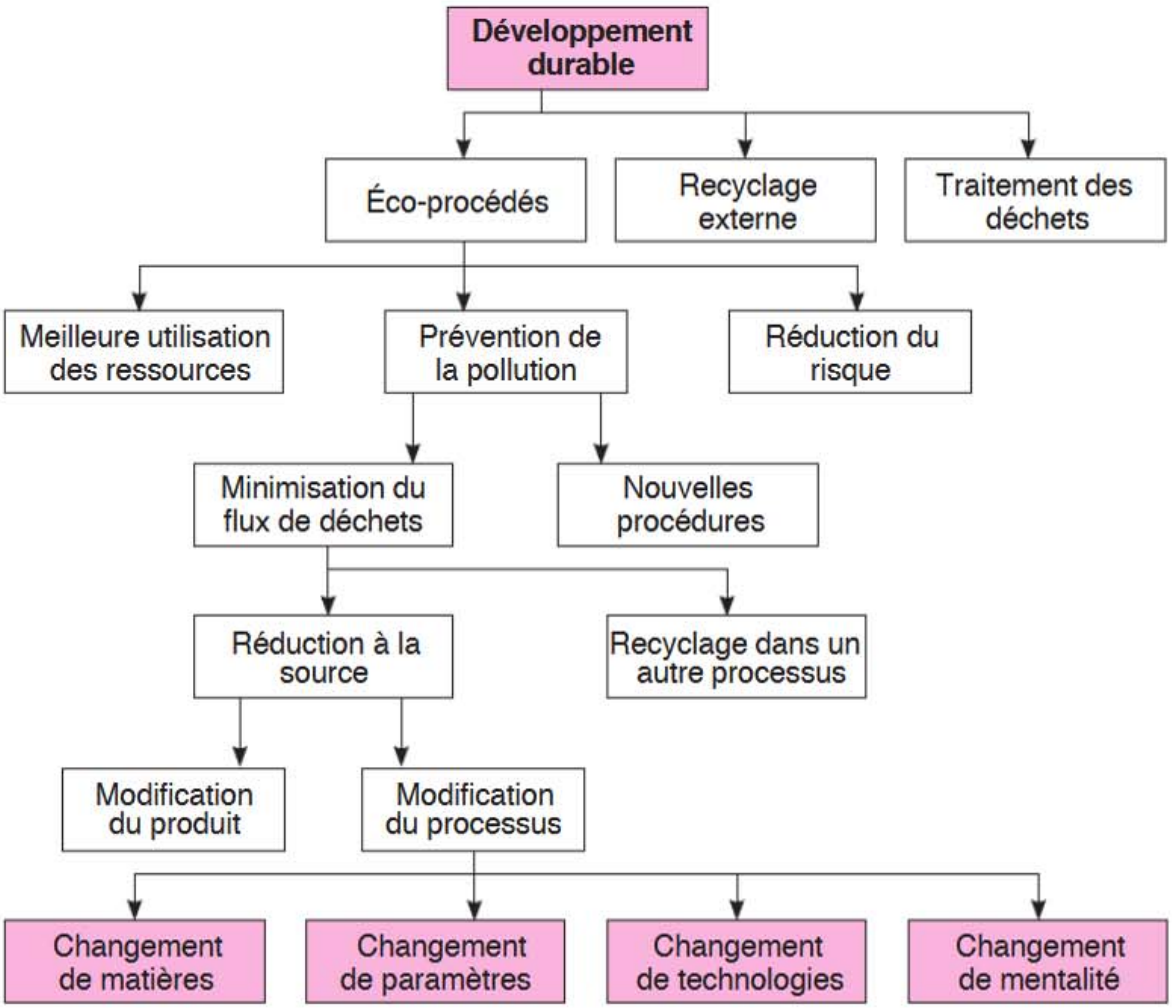
1.3.1. PRÉSENTATION

CONCEPT

Le développement durable est une notion prise en compte dans le secteur industriel. En général, les procédés de tout secteur d'activité génèrent des rejets (solides, liquides, gazeux) pouvant avoir un impact sur l'homme et sur l'environnement.
Ce concept intègre la démarche qualité (**Norme ISO 14000** : cette norme concerne le **management environnemental)** :
– réduire au minimum les effets dommageables de ses activités sur l'environnement,
– réaliser une amélioration continue de ses performances environnementales.

ÉVOLUTIONS DES ENTREPRISES

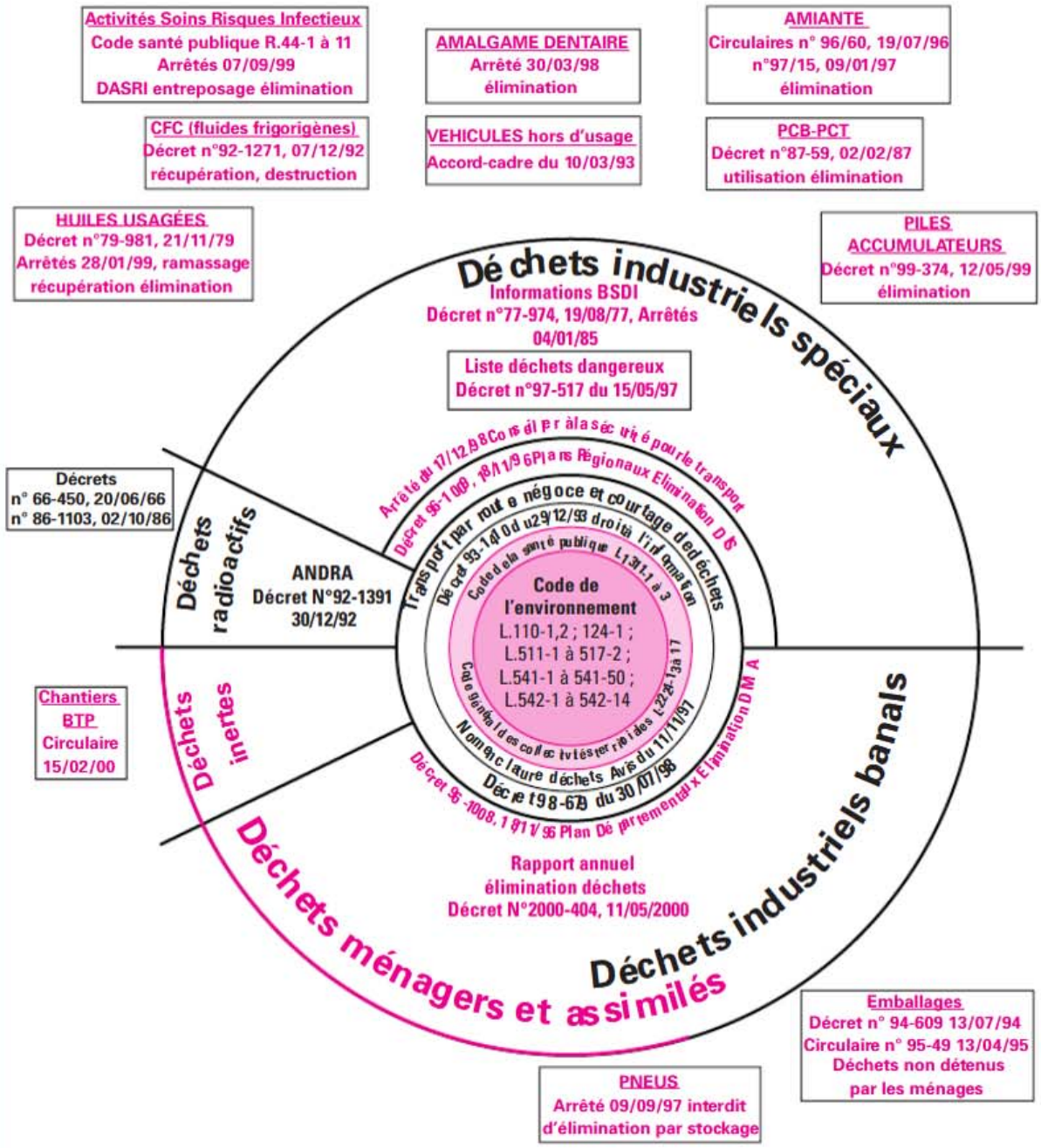
Une famille de technologies (éco-procédés) liées au respect de l'environnement et/ou du recyclage intègre les évolutions des entreprises :
– **Gestion des déchets** :
  – traitement des déchets en fin de chaîne de production par l'intermédiaire de nouveaux procédés, d'amélioration de procédés existants ou du meilleur contrôle/supervision des procédés de dépollution ;
  – réduction ou minimisation des rejets produits par l'introduction de procédés dans la chaîne de production ;
  – tri sélectif multimatériau, valorisation (matière, énergie), recyclage de déchets ;
  – techniques vers le zéro rejet ;
  – remédiation de sites pollués (nouvelles techniques, modification de techniques actuelles, techniques combinées, mécanismes de traitement).
– **Nouveaux concepts** :
  – modélisation ;
  – éco-conception ;
  – analyse de cycle de vie des matériaux, des produits et des procédés ;
  – meilleure compréhension des mécanismes bio-physico-chimiques de traitement ;
  – gestion des ressources et énergies.



1.3.2. LE TRI ET LE TRAITEMENT DES DÉCHETS INDUSTRIELS

RÉGLEMENTATION

• Le tri et le traitement des déchets industriels



EXEMPLE : CONCEPT DE RECYCLAGE COROMANT (CRC)

Face à la consommation croissante de matières premières non renouvelables, une gestion économique des ressources épuisables s'impose à tous les fabricants. **Sandvik Coromant** propose à cet effet un service de collecte des plaquettes carbure usées, en vue d'un **recyclage écologique**.

Toutes les plaquettes usées en métal dur sont récoltées dans les boîtes de collecte au niveau de chaque poste.
Les boîtes de collecte pleines sont vidées dans une boîte de transport. Une fois pleine, la boîte de transport est envoyée au siège de Sandvik Coromant ou au distributeur.

SANDVIK Coromant

Boîte de collecte

Boîte de transport

1.4. AMBIANCE ET RYTHME DE TRAVAIL

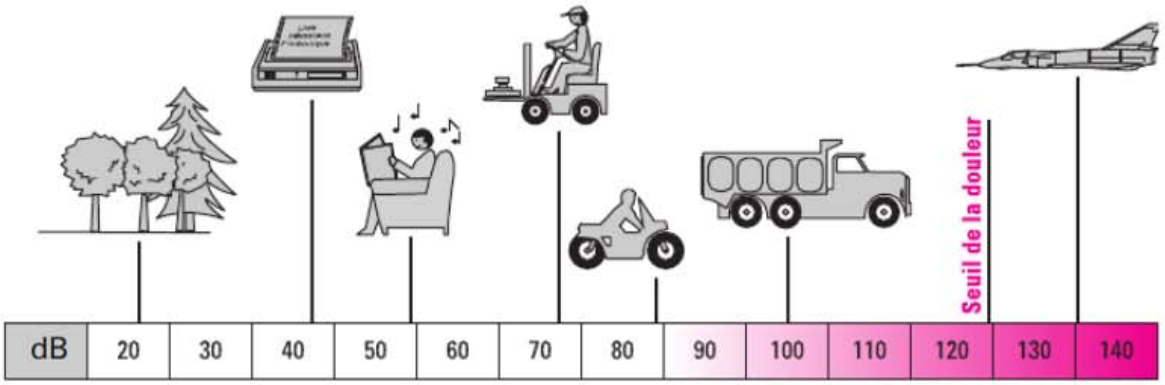
1.4.1. LE BRUIT

SIGNALISATION ET PROTECTION

Zones bruyantes

Port du casque obligatoire

NIVEAU DU BRUIT



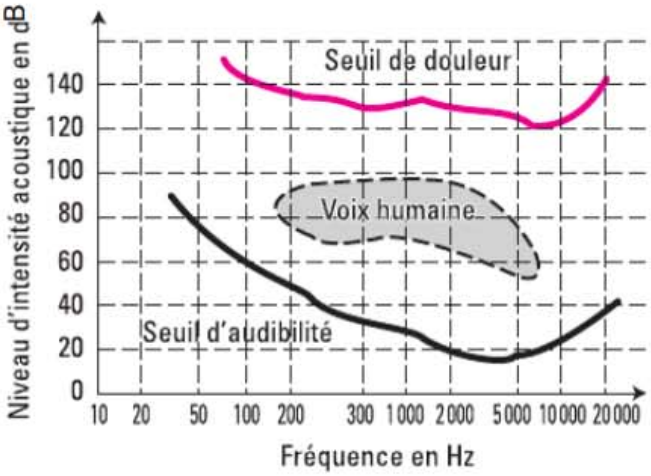
On mesure physiquement le niveau du bruit en **décibels** (dB):
– niveau 0 décibel = bruit le plus faible que l'oreille peut percevoir,
– niveau 120 décibels = bruit provoquant une sensation douloureuse.

EFFETS DU BRUIT

La surdité

L'exposition prolongée à des niveaux de bruits élevés ou intenses détruit peu à peu les cellules liées à la cochlée dans l'oreille interne. Elle conduit à une surdité, dite de perception, qui est **irréversible**.

Diagramme de classification des sons



La surdité professionnelle

Types d'activités	Surdités reconnues en 1991
Fabrication et travail des métaux, essais et réparation de moteurs	350
Travaux publics	129
Broyage, sciage de matériaux	46
Carrières	46
Plastiques, papiers, cartons	39
Tissage	17
Autres	164
TOTAL	**791**

Une surdité coûte en moyenne 90 000 € à l'entreprise.

MOYENS D'ACTION

– Réduction du bruit à la source par action sur la machine.
– Traitement acoustique du local.
– Encoffrements de machines.
– Écrans acoustiques.

– **Protection individuelle :** casque ou bouchons d'oreilles (un protecteur individuel peut couramment permettre un affaiblissement global de 20 dB, **il doit être porté en permanence**).

1.4.2. AMBIANCES THERMIQUES

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

La température interne du corps humain est de 37 °C. Cette température ne supporte que de très petites variations.

Détermination d'une ambiance thermique:

Sensations dues à la température		Sensations dues à la température et aux artifices extérieurs à la température
SENSATION DE CHALEUR	35 °C	SENSATION DE BIEN-ÊTRE avec courant d'air naturel et/ou artificiel ou masquage de la source de chaleur.
SENSATION DE BIEN-ÊTRE	20 °C	SENSATION DE CHALEUR avec une tenue vestimentaire inadaptée à la température.
SENSATION DE FROID	4 °C	SENSATION DE FROID NETTEMENT DIMINUÉE par une activité physique soutenue (travail ou sport).

AMÉLIORATION DU CONFORT THERMIQUE

• Éliminer les risques

– En remplaçant les équipements sources de chaleur ou de froid (*exemple :* remplacer un chauffage à la flamme par un chauffage par induction).

– En procédant à de nouveaux agencements des équipements et locaux de travail (*exemple :* éloignement des équipements des zones où s'exerce l'activité des opérateurs).

• Réduire la contrainte thermique dans les ateliers

– Activité de l'opérateur : automatiser le poste de travail, implanter des aides à la manutention manuelle, limiter les efforts par une étude du poste de travail, organiser des périodes de pauses et de repos.

– Limiter les échanges thermiques par rayonnement, par convection ou par évaporation.

• Réduire la contrainte due au climat

– Peindre en blanc les surfaces extérieures (ambiances chaudes).

– Procéder à un isolement thermique des parois.

– Orienter, à la construction, les parois vitrées.

– Équiper de stores extérieurs.

– Utiliser les vitres teintées.

• Promouvoir l'hygiène alimentaire

La consommation de boissons non alcoolisées et le contrôle diététique de l'alimentation participent favorablement à la réduction de la contrainte thermique. Le médecin du travail joue un rôle de conseil dans ce domaine.

1.4.3. RISQUES CHIMIQUES

IDENTIFICATION

Les produits chimiques doivent être stockés dans leurs récipients d'origine sur lesquels figurent leur identification et les risques qu'ils peuvent présenter.

Exemples:

Produ t rr tant ou noc f

Produ t corros f

Produ t tox que

Produ t nf ammab e fac ement

Produ t comburant (qu entret ent a combust on)

Produ t exp os f

RISQUES

Une mauvaise manipulation (ou utilisation) de produits dangereux peut entraîner :

– des accidents du travail
Exemples : blessures suite à une explosion, brûlures… ;

– des maladies professionnelles
Exemple : allergie ;

– des nuisances, gênes et mauvaises conditions de travail
Exemple : pollution par brouillard d'huile.

PRÉVENTION

Prendre connaissance des précautions d'emploi des produits chimiques.

S'équiper de protections individuelles (masques, lunettes, gants…) conformément aux consignes données.

Ne pas transvaser les produits dangereux.
Les produits chimiques doivent rester dans leur emballage d'origine!

Ne pas utiliser un produit dont l'identification n'est plus possible.

1.4.4. INCENDIE ET LIEU DE TRAVAIL

CONDITIONS DE L'INCENDIE

L'incendie est une combustion qui se développe d'une manière incontrôlée dans le temps et dans l'espace.

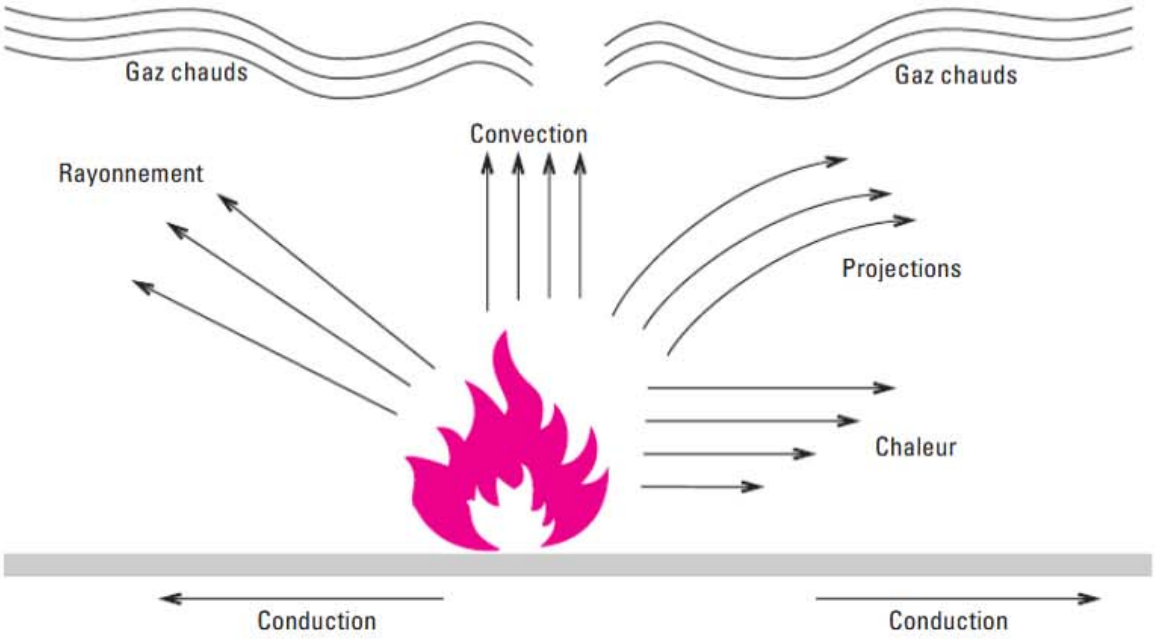
Pour qu'une combustion se déclenche, il faut réunir ces trois éléments :

– **un combustible**, qui constitue l'« aliment » de l'incendie,

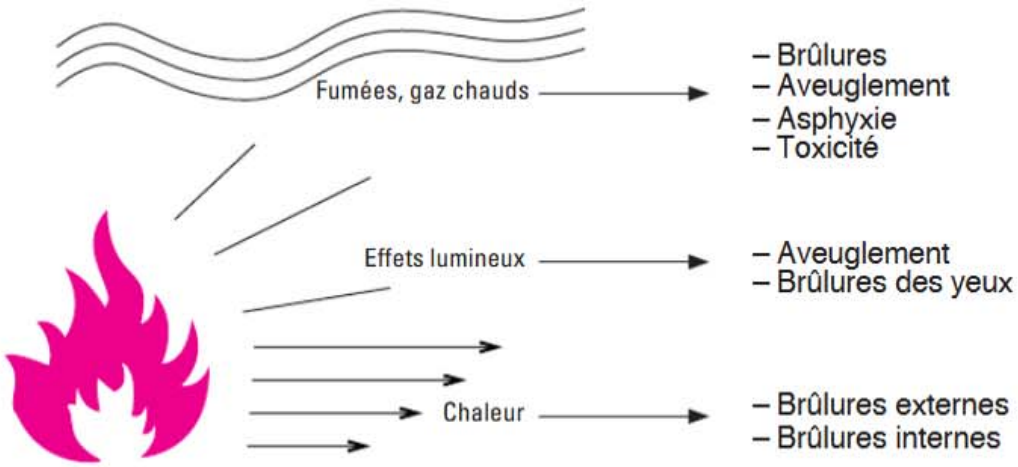
– **un comburant**, qui entretient la combustion (oxygène…),

– **une énergie d'activation**, nécessaire au démarrage de la combustion (source de chaleur, étincelle…).

MODES DE PROPAGATION



RISQUES POUR L'HOMME



2 Construction

2. SPÉCIFICATION DU PRODUIT INDUSTRIEL : AVANT-PROJET 42

2.1. **Définitions préliminaires** 42

– La schématisation 42
– La nomenclature 42
– Dessin d'ensemble 43
– Schémas des liaisons entre pièces 44
– Liaisons sous Simulink multibody 46

2.2. **Études technologiques** 47

– Guidages en translation 47
– Rattrapage de jeu 48
– Liaisons glissières par éléments roulants 49
– Guidages en rotation : paliers lisses 55
– Articulations sphériques 58
– Guidages en rotation : roulements à billes et à rouleaux 59
– Guide de choix d'un roulement : aptitudes 61
– Choix des ajustements 62
– Choix des fixations radiales et axiales 63
– Positionnement axial des roulements 65
– Protection et étanchéité des roulements 69
– Critères de choix d'un roulement 70
– Dimensions et caractéristiques des roulements 73
– Roulements, cages et douilles à aiguilles. Guide de choix 78
– Butées à aiguilles, à billes et roulements combinés. Guide de choix 79
– La lubrification des roulements 80
– Étanchéité et protection des liaisons 82
– Différents types de joints 84
– Représentation simplifiée des joints à lèvres 89
– Roues libres 90
– Recherche de solutions constructives 92

2. SPÉCIFICATION DU PRODUIT INDUSTRIEL : AVANT-PROJET

2.1. DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES

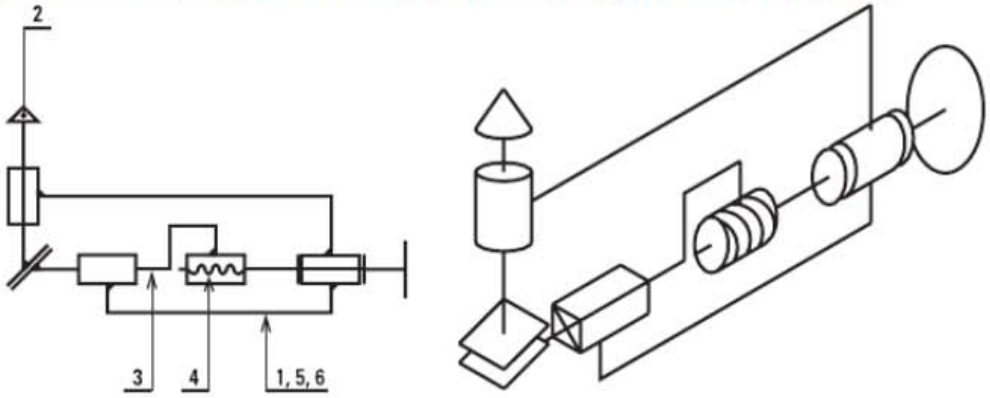
La schématisation

La **schématisation d'un mécanisme** permet, à l'aide de symboles, d'analyser son fonctionnement.

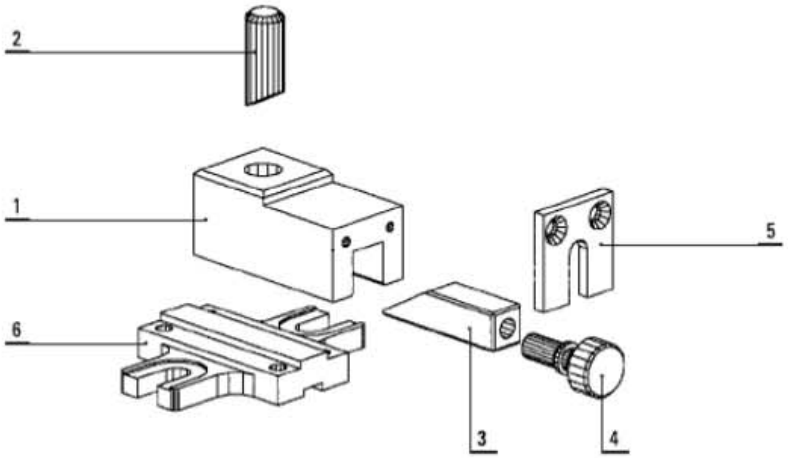
La **schématisation** est souvent la phase préliminaire d'une étude d'**un mécanisme**.

EXEMPLE DE SCHÉMA-TISATION

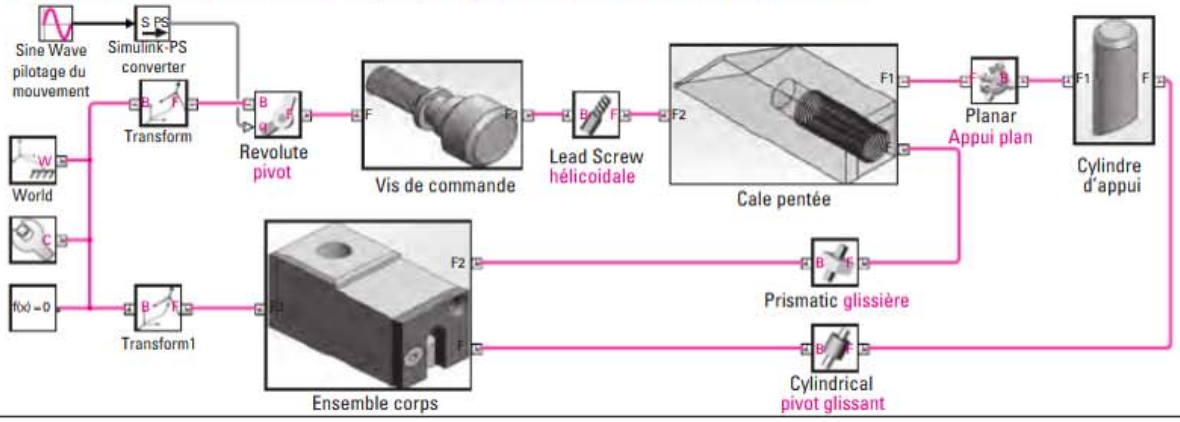
• Schéma cinématique d'un mécanisme simple : butée réglable



• Vue éclatée de la butée réglable



• Représentation multi-physique sous Matlab Simulink



DÉFINITION

La **nomenclature** d'un dessin d'ensemble indique la liste de tous les éléments ou composants du mécanisme considéré.

Elle précise le nombre de pièces identiques, leur matière, leurs spécifications...

Elle permet de classer les éléments par leur importance, par leur ordre de montage des différentes pièces...

Les éléments identiques portent le même repère.

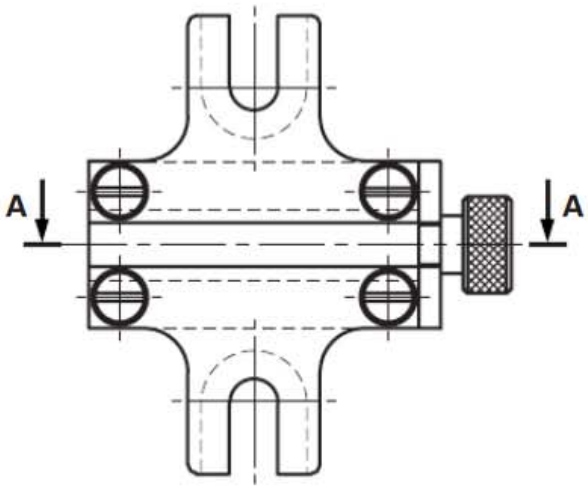
Le positionnement de la nomenclature est indiqué page suivante.

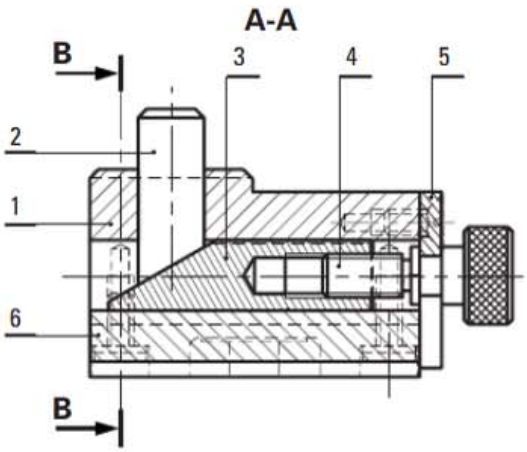
• Dessin d'ensemble

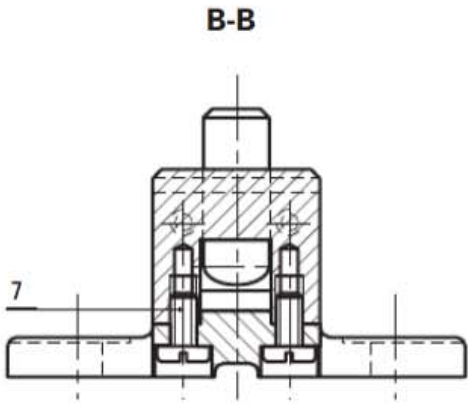
DÉFINITION

Le **dessin d'ensemble** donne une description complète et détaillée d'un mécanisme.
Il indique la forme des pièces et leur agencement entre elles.
Il précise le fonctionnement du mécanisme considéré et les solutions techniques retenues.
Le nom du mécanisme donne une indication sur sa fonction globale.
Les cotes et l'échelle des dessins donnent une indication sur la forme des pièces.

EXEMPLE DE DESSIN D'ENSEMBLE ET DE NOMENCLATURE







Rep.	Nbre	Désignation	Matière	Observation
8	2	Vis f/90, M6 - 12		NF E 27-113
7	4	Vis C, M6 - 12		NF E 27-115
6	1	Semelle	E 355	
5	1	Plaquette d'arrêt	E 335	
4	1	Vis de commande	C 35 E	NF EN 100-88
3	1	Cale pentée	C 40 E	
2	1	Cylindre d'appui	C 40 E	
1	1	Corps	E 335	

Échelle : 0,7:1

Remarques :

Dessiné par :

Le :

Remis à jour le :

N° réf. :

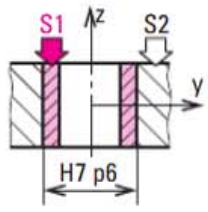
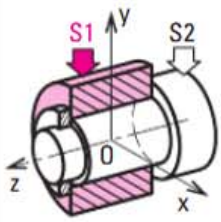
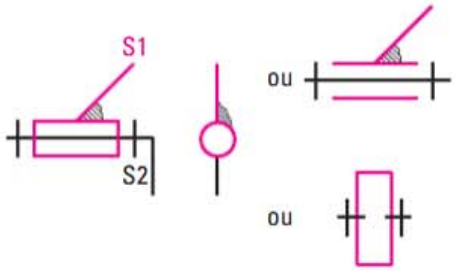
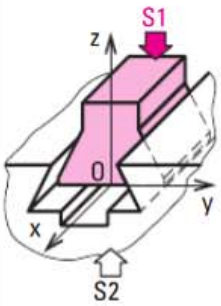
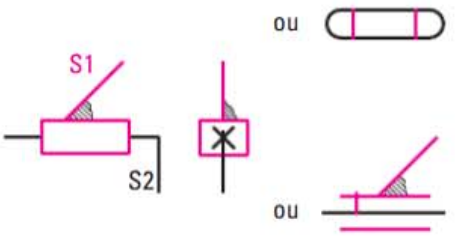
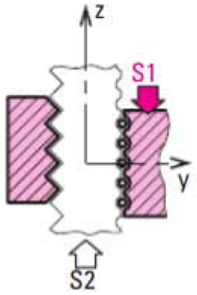
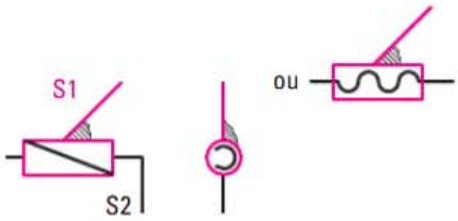
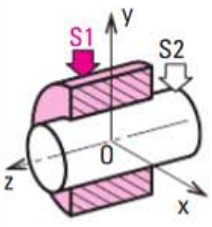
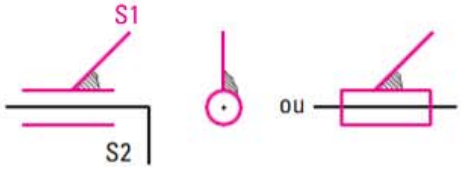
BUTÉE RÉGLABLE

Définitions préliminaires

• Schémas des liaisons entre pièces

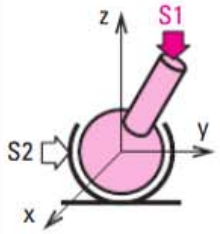
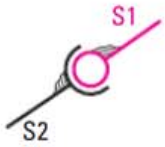
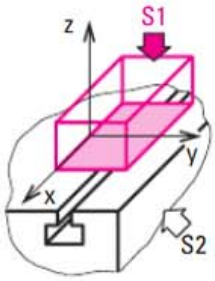
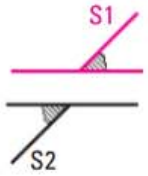
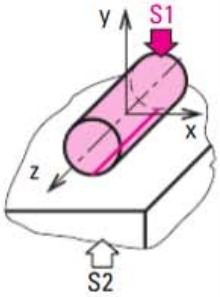
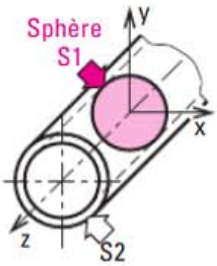
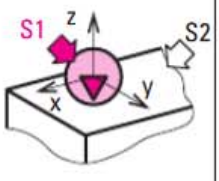
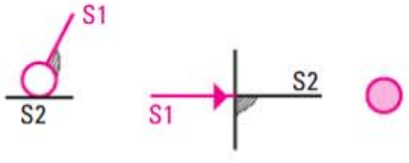
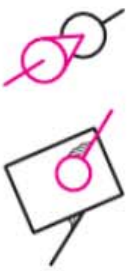
NF EN **ISO 3952-1** (1995)

Hypothèse : Les liaisons sont considérées parfaites, c'est-à-dire qu'aucune résistance ne s'oppose aux mouvements relatifs qu'elles autorisent. Les jeux sont négligés.

Désignation liaison	Représentation simplifiée	Mouvements relatifs R	Mouvements relatifs T	Degrés de liberté supprimés	Symboles — Projection orthogonale (plane 2D)	Symboles — Perspective (3D)
ENCASTREMENT OU LIAISON FIXE OU COMPLÈTE	Canon de perçage  Ajustement avec serrage p. 227	0	0	– 6 Tx Ty Tz Rx Ry Rz	 (1) Symbole admissible lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté.	
PIVOT	 	Rz	0	– 5 Tx Ty Tz Rx Ry	 	
GLISSIÈRE	 	0	Tx	– 5 Ty Tz Rx Ry Rz	 	
HÉLICOÏDALE	 	Rz Tz Mouvements non indépendants mais liés. De ce fait cette liaison n'a qu'un mouvement relatif (hélicoïdal).		– 5 Tx Ty Rx Ry	 	
PIVOT GLISSANT	 	Rz	Tz	– 4 Tx Ty Rx Ry	 	

Spécification du produit industriel : avant-projet

Remarques :
– Les **mouvements relatifs** sont les degrés de liberté disponibles dans la liaison.
– Les **degrés de liberté supprimés** dans la liaison sont également appelés **degrés de liaison.**

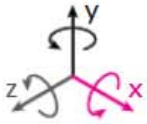
Désignation liaison	Représentation simplifiée	Mouvements relatifs		Degrés de liberté supprimés	Symboles	
		R	T		Projection orthogonale (plane 2D)	Perspective (3D)
ROTULE OU SPHÉRIQUE		Rx Ry Rz	0	–3 Tx Ty Tz		
APPUI PLAN		Rz	Tx Ty	–3 Tz Ry Rx		
LINÉAIRE RECTILIGNE		Ry Rz	Tx Tz	–2 Ty Rx		
SPHÈRE-CYLINDRE OU LINÉAIRE ANNULAIRE		Rx Ry Rz	Tz	–2 Ty Tx		
SPHÈRE-PLAN OU PONCTUELLE		Rx Ry Rz	Tx Ty	–1 Tz		

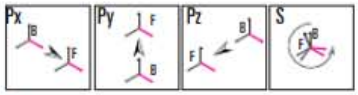
Définitions préliminaires

• Liaisons sous Simulink multibody

6-DOF joint : **Liaison 3 translations avec une liaison sphérique sur un axe**

Rx **Tx**
Ry **Ty**
Rz **Tz**

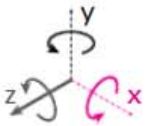


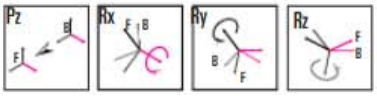


P : Prismatic = Translation B : Base (frame)
S : Sphérique F : Follower = Suivant

Bearing joint : **Liaison linéaire annulaire ou linéaire circulaire**

Rx Tx
Ry Ty
Rz **Tz**



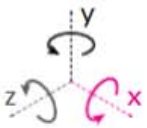


Revolute joint : **Liaison pivot**

Rx Tx
Ry Ty
Rz Tz

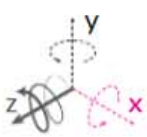
Gimbal joint : **Liaison rotule ou sphérique**

Rx Tx
Ry Ty
Rz Tz



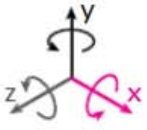
Lead Screw joint : **Liaison hélicoïdale**

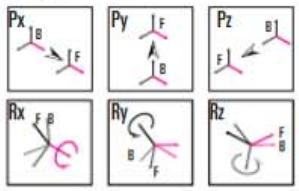
Rx Tx
Ry Ty
Rz **Tz**



Bushing joint : **Liaison libre**

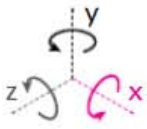
Rx **Tx**
Ry **Ty**
Rz **Tz**





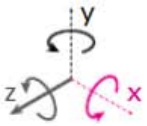
Spherical joint : **Liaison sphérique**

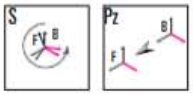
Rx Tx
Ry Ty
Rz Tz



Telescoping joint : **Liaison linéaire annulaire**

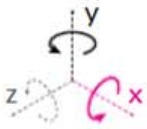
Rx Tx
Ry Ty
Rz **Tz**

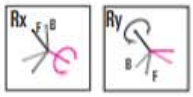




Universal joint : **Liaison sphérique à doigt**

Rx Tx
Ry Ty
Rz Tz



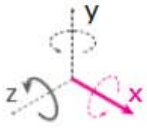


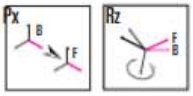
Weld joint : **Liaison encastrement (fixe)**

Rx Tx
Ry Ty
Rz Tz

Pin Slot joint : **Liaison combinée**

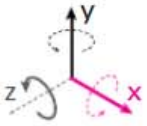
Rx **Tx**
Ry Ty
Rz Tz

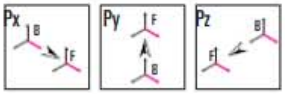




Planar joint : **Liaison appui plan**

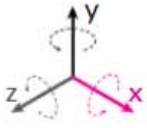
Rx **Tx**
Ry **Ty**
Rz Tz





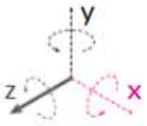
Cartesian joint : **Liaison 3 translations**

Rx **Tx**
Ry **Ty**
Rz **Tz**



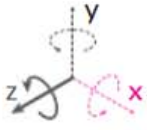
Prismatic joint : **Liaison glissière**

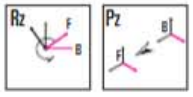
Rx Tx
Ry Ty
Rz **Tz**



Cylindrical joint : **Liaison pivot glissant**

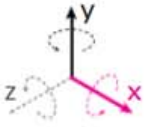
Rx Tx
Ry Ty
Rz **Tz**

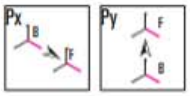




Rectangular joint : **Liaison composée**

Rx **Tx**
Ry **Ty**
Rz Tz





2.2. ÉTUDES TECHNOLOGIQUES

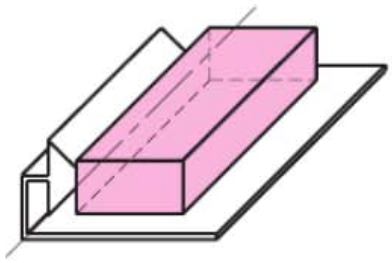
• Guidages en translation

DIFFÉRENTS TYPES DE LIAISONS GLISSIÈRES

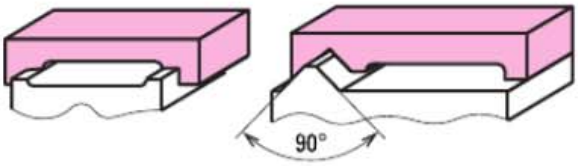
• Liaisons par glissement

Les liaisons glissières doivent assurer un degré de liberté en translation, elles peuvent être réalisées par des formes différentes : formes prismatiques, formes cylindriques.

Formes prismatiques

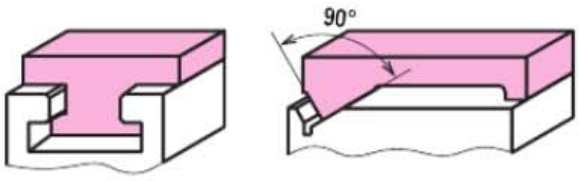


Appui plan + liaison linéique rectiligne



Plan + surfaces latérales réduites

Plan + vé

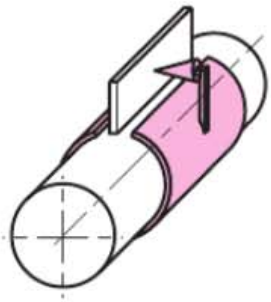


Forme en té

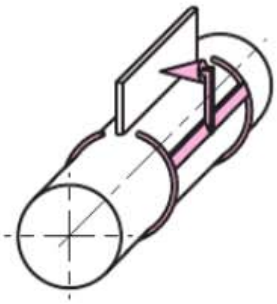
Plan + vé

Queue-d'aronde

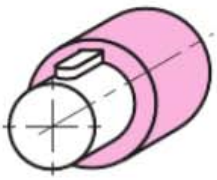
Formes cylindriques



Pivot glissant + contact ponctuel

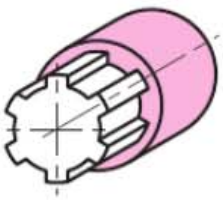


Liaisons linéiques circulaires + contact ponctuel

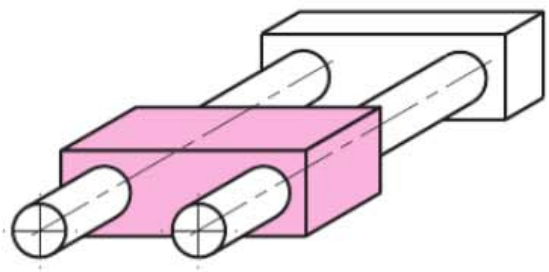


Clavetage libre

Profil **Polygon**



Arbre cannelé



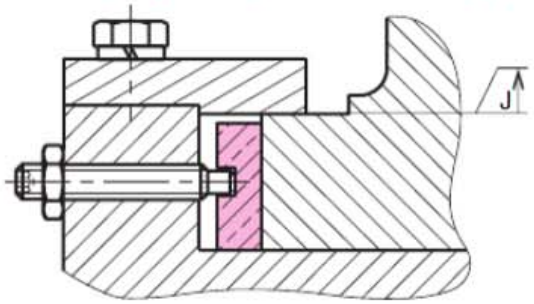
Guidage par double tige

• Rattrapage de jeu

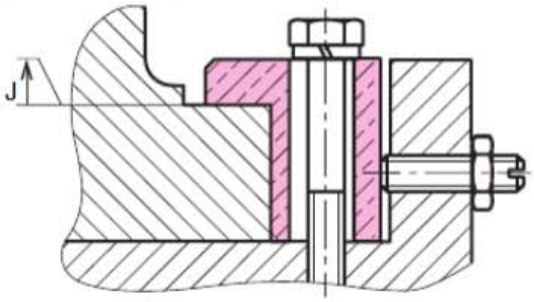
EXEMPLES DE RATTRAPAGE DE JEU

La précision d'un guidage dépend du jeu dans la liaison.
Pour les liaisons par formes prismatiques, on prévoit un dispositif de réglage du jeu dû à l'usure en intercalant des **cales de rattrapage de jeu**.

• Rattrapage de jeu dans des guidages rectangulaires

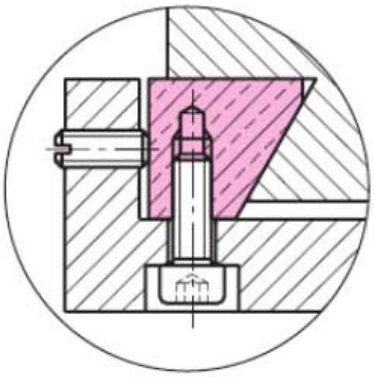


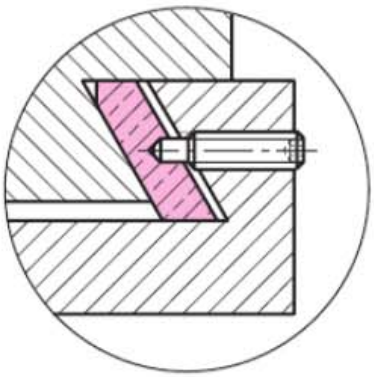
Rattrapage de jeu par mise en place d'une cale en matériau tendre (bronze...) de section rectangulaire.



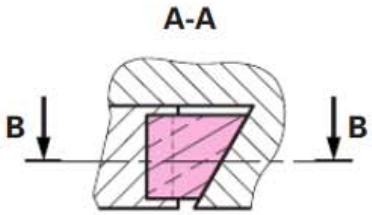
Rattrapage de jeu par mise en place d'une cale épaulée en matériau tendre (bronze...).

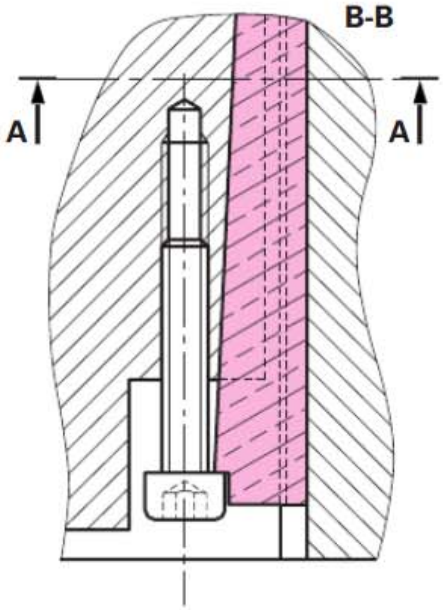
• Rattrapage du jeu dans une queue-d'aronde





• Rattrapage de jeu par cale pentée de réglage



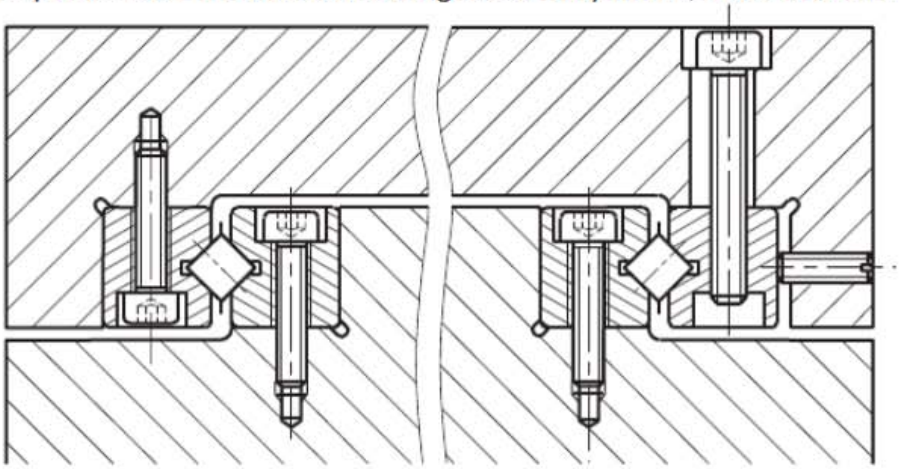


• Liaisons glissières par éléments roulants

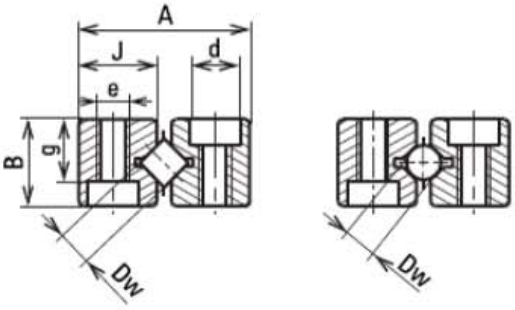
Les guidages linéaires sur patins sont utilisés dans la mécanique de précision (automation, dispositifs de contrôle et de mesure...).
Ils permettent une absence totale de jeu et ils possèdent un très faible coefficient de frottement (0,0005 à 0,003).
Vitesse de déplacement jusqu'à 50 m/min.
Accélération de 50 m/s².

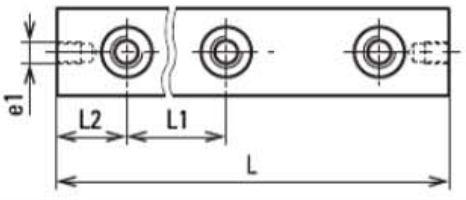
• Rails de guidage type R

Les rails de guidage du type **R** peuvent être équipés de cages à billes ou à rouleaux.
Capables de satisfaire à des exigences moyennes, voire élevées.



Dimensions



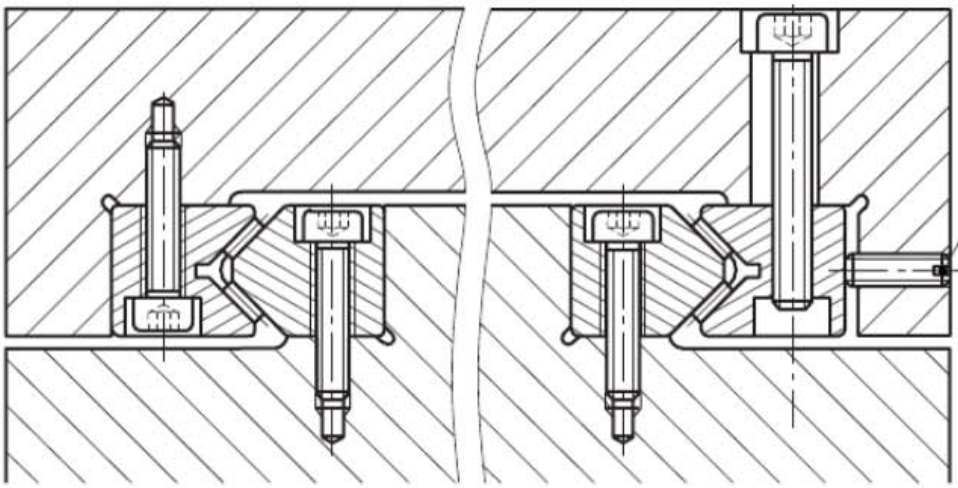


A	B	Dw	J	d	g	e	e1	L	L2
8,5	4	1,5	3,9	3	2,6	M2	M1,7	20-30-40-50-60 70-80-100-120	5
12	6	2	5,5	4,4	4	M3	M2,5	30-45-60-75-90 105-120-150-180	7,5
18	8	3	8,3	6	4,8	M4	M3	50-75-100-125-150 175-200-225 à 600	12,5
31	15	6	13,9	9,5	9,8	M6	M5	100-150-200-250 300-350 à 1 000	25
44	22	9	19,7	10,5	15,8	M8	M6	200-300-400-500 600-700 à 1 600	50
58	28	12	25,9	13,5	19,8	M10	M8	200-300-400-500 600-700 à 1 600	50
71	36	15	31,9	16,5	25,8	M12	M8	300-400-500-600 700-800 à 1 600	50
83	40	18	37,4	18,5	27,8	M14	M10	300-400-500-600 700-800 à 1 600	50

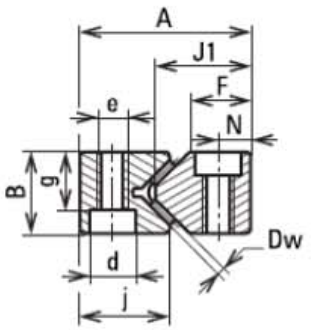
Doc. SCHNEEBERGER

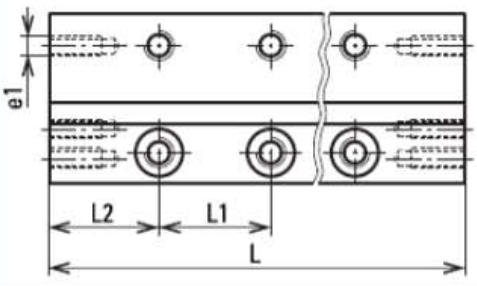
• Rails de guidage type N/O

Rails équipés de cages à aiguilles capables de supporter des charges très élevées.
Très grande rigidité du guidage.



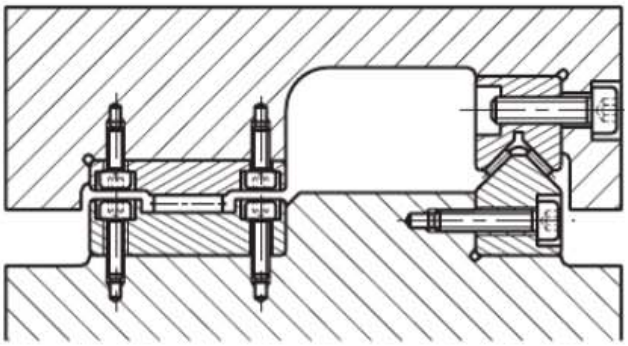
Dimensions





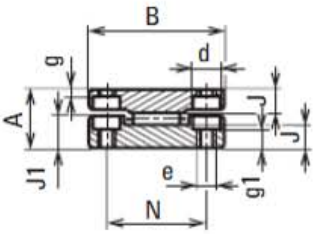
A	B	Dw	F	J	J1	N	g	e	e_1	L	L2
44	**22**	2	15	24	24,5	9	15,8	M8	M4	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 à 1 200	50
52	**25**	2	18	28	29	10	16,8	M10	M6	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 à 1 600	50
62	**30**	2,5	22	34	35	12	19,8	M12	M6	300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 100 à 1 600	50
74	**35**	3	25	42,5	40	14	22,8	M14	M6	400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 100, 1 200 à 1 600	50
78	**45**	3,5	25	45	45	14	32,8	M14	M6	500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 100, 1 200, 1 300 à 1 600	50

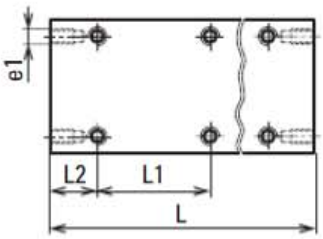
• Rails de guidage type L/M



Les rails de guidage **L/M** sont prévus comme compléments aux rails **N/O** pour les guidages en appui libre.
Ils sont équipés de cages à aiguilles.

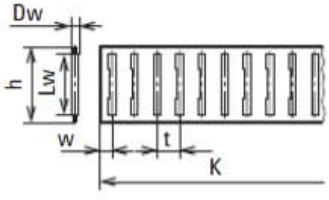
Dimensions





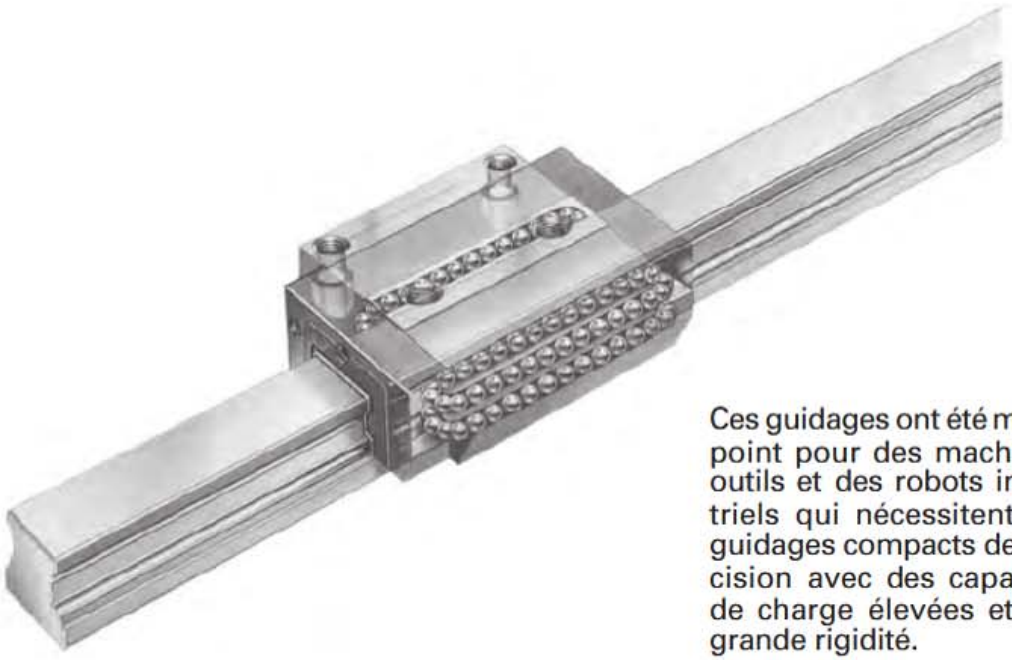
A	B	Dw	J	J1	N	d	g	e	e1	L	L1	L2
22	**36**	2	10	11,5	24	7,5	5,8	M5	M4	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800	100	50
22,5	**40**	2,5	10	12,3	28	7,5	5,8	M5	M4	300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000	100	50
31	**50**	3	14	16,5	36	9,5	8,8	M6	M4	400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000	100	50
31,5	**55**	3,5	14	17	40	9,5	8,8	M6	M4	500, 600, 700, 800, 900, 1 000	100	50

• Cages à aiguilles

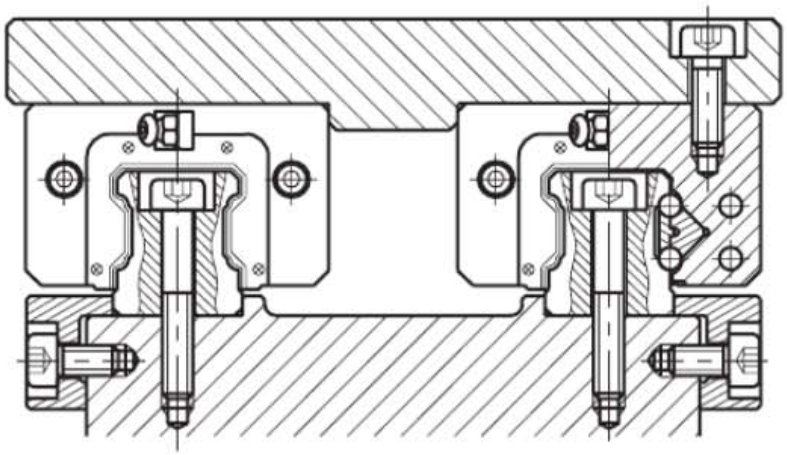


Les cages à aiguilles sont livrées en une seule pièce dans la longueur **K** désirée.

Dw	Lw	h	t	w
2	6,8	10	4	2,9
2,5	9,8	15	4,75	3,4
3	13,8	20	5,2	3,6
3,5	17,8	25	6,1	4,3

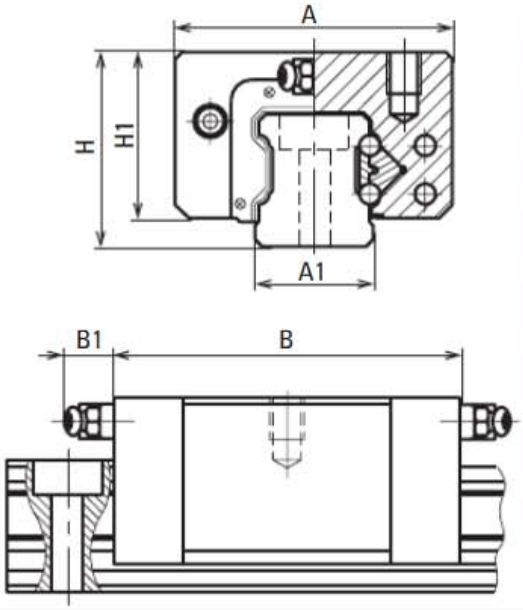


Ces guidages ont été mis au point pour des machines-outils et des robots industriels qui nécessitent des guidages compacts de précision avec des capacités de charge élevées et une grande rigidité.



Ces guidages disposent d'un dispositif intégré assurant une étanchéité complète.
Entretien simplifié par la présence de lubrificateurs.
Fonctionnement souple et silencieux.
Le coefficient de frottement μ du guidage à billes sur rails est d'environ 0,002 à 0,003.

Dimensions

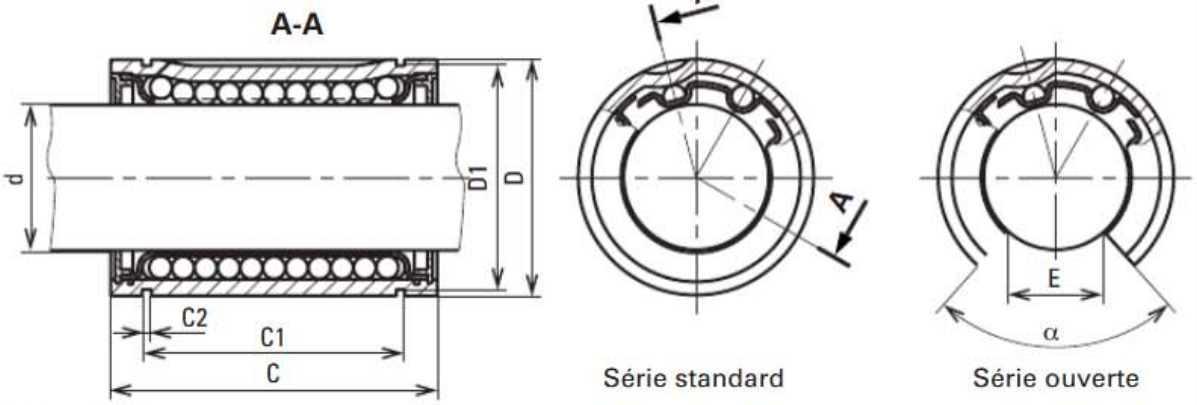


Taille	A	A1	B	B1	H	H1	C* (N)
15	34	15	40,5	8	24	19,8	3 000
20	44	20	52,5	8	30	25,4	7 800
25	48	23	61,5	16	36	29,5	8 800
30	60	28	71,5	16	42	35,0	12 200
35	70	34	79,0	16	48	40,0	16 200
45	86	45	101,0	16	60	50,0	26 200
55	100	50	120,5	16	70	57,0	37 800

* **C** : capacité de charge

Les douilles à billes super A auto-alignantes permettent de réaliser un guidage en translation à partir d'un arbre lisse.
Elles se montent par paire pour les guidages à un seul arbre. Elles sont conçues pour n'accepter que des mouvements de translation et des charges radiales.
Les billes circulent à l'intérieur de cages métalliques ou en plastique et sont lubrifiées, ce qui permet d'obtenir un très faible coefficient de frottement (0,001 à 0,004).
Compensation de défaut d'alignement jusqu'à 30'.

• Douilles à billes standard



Série standard

Série ouverte

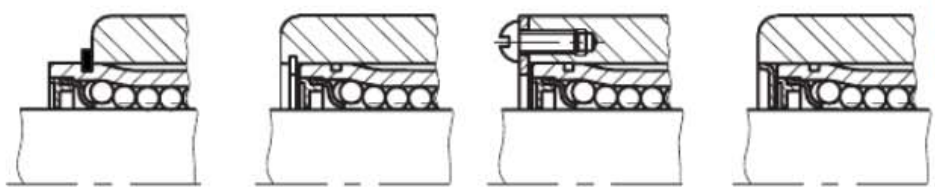
Dimensions

d	Dh5	Ch13	C1 H13	C2	D1	E	α°	C (N)*	C_o (N)*
12	22	32	22,6	1,3	20,5	6,5	66	880	510
16	26	36	24,6	1,3	24,9	9	68	1 060	630
20	32	45	31,2	1,6	30,5	9	55	1 880	1 070
25	40	58	43,7	1,85	38,5	11,5	57	3 680	2 250
30	47	68	51,7	1,85	44,5	14	57	4 470	2 880
40	62	80	60,3	2,15	58	19,5	56	7 680	4 480
50	75	100	77,3	2,65	71	22,5	54	11 200	6 620

* Les capacités de charge indiquées s'appliquent pour une direction principale de la charge θ = 0°. Douilles fermées.

• Montage des douilles à billes

Fixations axiales



Par anneaux élastiques

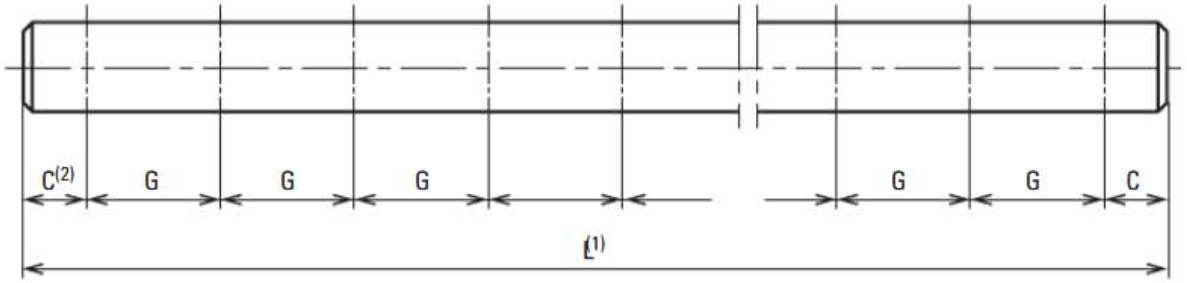
Par rondelle de sécurité fixée par vis

Par capsule métallique

La douille peut être immobilisée en rotation par une vis à téton.

Caractéristiques de l'arbre

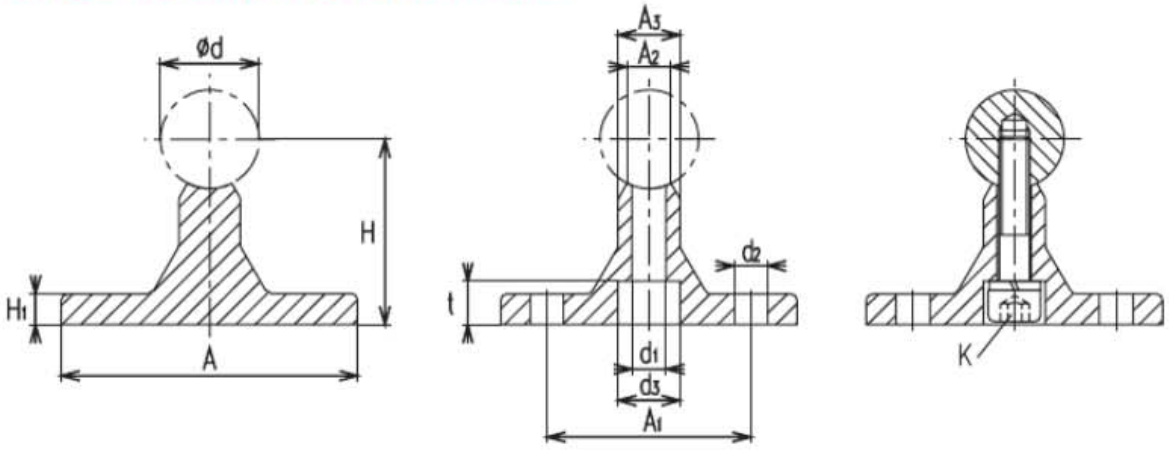
- tolérance sur le diamètre : h6, h7
- circularité : IT6, IT7
- rugosité Ra : 0,32 µm
- acier au chrome trempé



(1) Longueur standard L = 600 mm, autres longueurs sur demande.

(2) Pour des longueurs différentes de 600 mm, C dépend de la longueur du rail et est égal aux deux extrémités avec un minimum de 20 mm $C = \frac{L - NG}{2}$

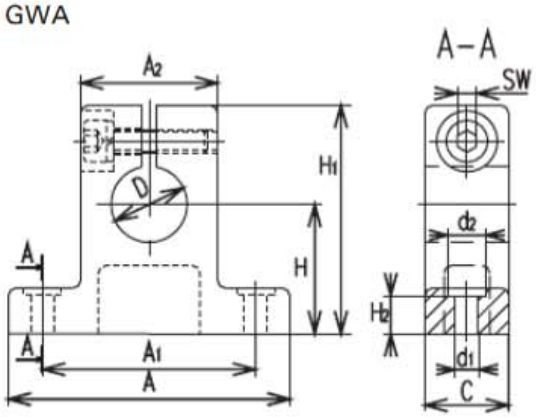
• Supports des arbres et dimensions



Arbre diamètre d	Désignations	Masses (kg/ 600 mm)	Dimensions en mm											
			A	H ± 0,02	H_1	A_2	A_3	d_3	t	d_1	d_2	A_1	G	K
16	TSWWA 16	1,68	48	30	5	7	10	10	7	5,5	5,5	33	100	M5 × 25
20	TSWWA 20	2,47	56	38	8,3	6	11	11	8,5	6,6	6,6	37	100	M6 × 30
25	TSWWA 25	3,5	60	42	6	10,8	14	15	11	9	6,6	42	120	M8 × 35
30	TSWWA 30	5,11	74	53	8	11	14	18	13,5	11	9	51	150	M10 × 40

Les supports d'arbres GWA sont montés en bout d'arbre, en combinaison avec des douilles à billes fermées ou fendues et les paliers correspondants. Ces supports d'arbres sont réalisés en alliage léger.

GWA



Dimensions en mm										
D	H ± 0,015	A_1 ± 0,15	A	A_2	C	H_1	H_2	d_1	d_2	SW
6	15	25	32	16	10	27	5	4,5	9	2,5
8	15	25	32	16	10	27	5	4,5	9	2,5
10	17	28	37	18	11	30	5	4,5	9	2,5
12	20	32	42	20	12	35	5,5	5,5	11	3
14	22	36	46	23	14	38	6	5,5	11	3
16	25	40	50	26	16	42	6,5	5,5	11	3
20	30	45	60	32	20	50	8	5,5	11	3
25	35	60	74	38	25	58	9	6,6	13	4
30	40	68	84	45	28	68	10	9	18	5

Les rails supports d'arbres sont nécessaires pour le montage d'arbres longs et se montent en combinaison avec les douilles à billes ouvertes correspondantes ou des paliers. Ces rails sont réalisés en alliage léger.

• Guidages en rotation : paliers lisses

COUSSINETS OU BAGUES LISSES AUTOLUBRIFIANTS

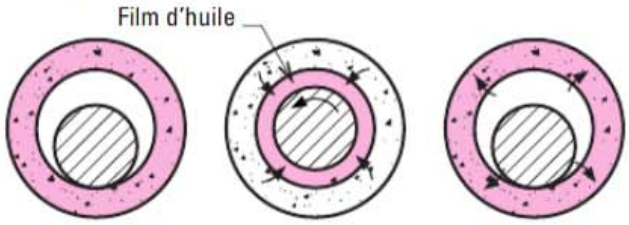
Description

Coussinets ou bagues autolubrifiants : composés d'un alliage fritté BP25 (cuivre + étain) ou FP15 (fer + cuivre + plomb).

Frittage : procédé d'élaboration consistant à compacter et chauffer des poudres métalliques pour obtenir une pièce à structure poreuse pouvant absorber jusqu'à 25 % de son volume en huile.

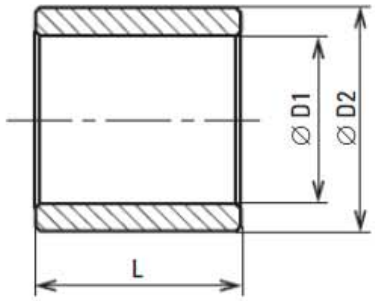
Avantages :
- Très bon coefficient de frottement.
- Bonne résistance à la corrosion.
- Vitesses élevées de l'arbre (30 000 tr/min).
- Charges élevées (1 500 daN/cm²).
- Températures de fonctionnement de 40 à 450 °C.

Principe de fonctionnement



1. **Position repos** : la bague est imprégnée à saturation d'huile à haut pouvoir lubrifiant.
2. **Position en rotation** : l'effet d'aspiration de l'arbre en rotation et le « coin d'huile » créent un film hydrodynamique entre l'arbre et la bague.
3. **Position à l'arrêt** : dès l'arrêt, grâce à la capillarité du matériau, l'huile est réabsorbée par le coussinet.

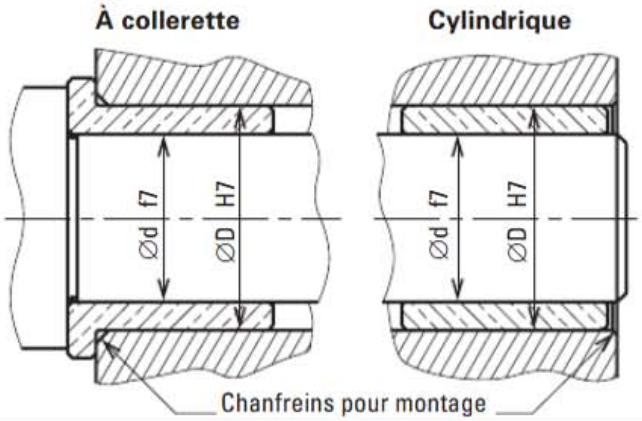
Tolérances sur les coussinets (à l'état libre)



Sur ∅ D1 :
- coussinets cylindriques : **F7**
- coussinets à collerette : **F8**

Sur ∅ D2 :
- coussinets cylindriques : **s7**
- coussinets à collerette : **s8**

Montage des coussinets



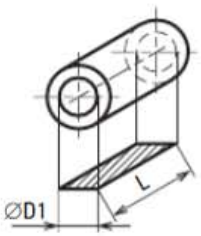
Le coussinet est monté **serré dans l'alésage** :
- tolérance **H7** sur l'alésage du logement (en fonte ou en acier) du coussinet ;
- tolérance **f7** sur l'arbre (rectifié de préférence).

Des chanfreins seront prévus dans les logements pour faciliter le montage.

Choix d'un coussinet autolubrifiant

Les calculs dépendent de la vitesse linéaire de l'arbre et de la charge spécifique.

P.V = 18



P : Charge en kg/cm² de surface projetée.

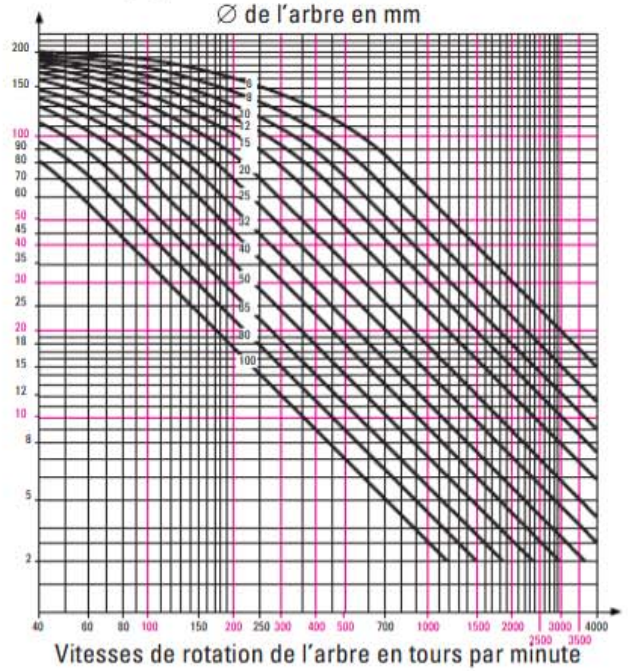
V : Vitesse linéaire d'un point de la périphérie de l'arbre.

18 : Valeur maximale admise pour les nuances BP25 et FP15.

Surface projetée : diam. int. × long. du coussinet

Charges en daN par cm² de surface projetée

ABAQUE des charges/vitesses pour les nuances BP 25 et FP15



Vitesses de rotation de l'arbre en tours par minute

Exemple de calcul

Données : – Charge radiale C = 100 daN
– Diamètre de l'arbre D1 = 20 mm
– Vitesse de rotation de l'arbre = 1 000 tr/min.

Calculs : – La lecture de l'abaque, pour 1 000 tr/min et un diamètre de 20 mm donne une charge de 18 daN/cm² de surface projetée.

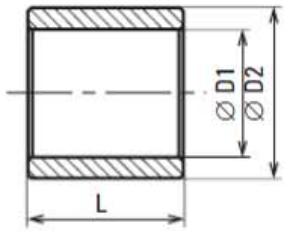
– La charge totale sur le coussinet étant de 100 daN, la surface projetée du coussinet sera :

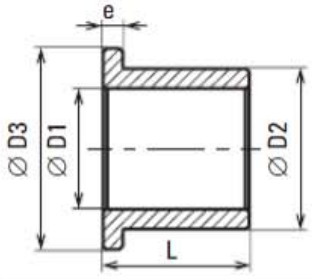
$$s = \frac{C}{p} = \frac{100}{18} = 5{,}6 \text{ cm}^2 = 560 \text{ mm}^2$$

– La longueur de la bague sera :

$$L = \frac{s}{D1} = \frac{560}{20} = 28 \text{ mm} \Rightarrow \text{longueur normalisée } L = 32 \text{ mm.}$$

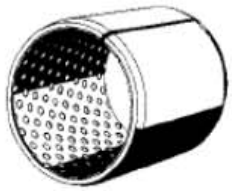
Extraits dimensionnels





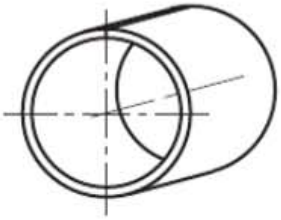
D1	Coussinets cylindriques		Coussinets à collerette			
	D2	L	D2	L	D3	e
5	8-9	4-5-8-10 à 16	–	–	–	–
8	11-12-14	8-12-16-20	12	8-12-16	16	2
10	13-14-15-16	10-16-20-25	13-14-16	8-10-16-20	16-20-22	1,5-2,5-3
12	15-16-17-18	12-16-20-25	15-17-18	8-12-16-20-25	18-22-24	1,5-2,5-3
16	20-22	16-20-25-32	20-22	16-20-25-32	24-28	2-3
20	24-25-26 à 28	16-20-25-32	24-26	16-20-25-32	28-32	2-3
25	30-32	20-25-32-40	30-32	20-25-32	35-39	2,5-3,5
30	38	24-30-38	38	20-25-30	46	4
35	44-45	22-25-28 à 50	–	–	–	–
40	46-50	25-32-40-50	46-50	25-32-40	52-60	3-5
45	51-55	28-36-45 à 65	51-56	28-36-45	57-67	3-5,5
50	–	–	56-60	32-40-50	62-70	3-5
60	–	–	70	50-60	80	5

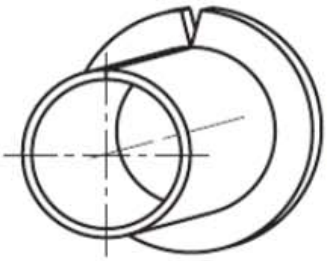
Description



Les paliers lisses comportent un support en tôle d'acier revêtu de cuivre sur lequel est frittée une couche poreuse de bronze et d'étain d'épaisseur 0,2 à 0,35 mm.
Les pores de cette couche sont remplis de polytétrafluoréthylène type **F** (PTFE) ou de polyoxyméthylène type **A** (résine acétal).

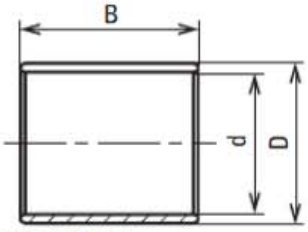
Caractéristiques générales des paliers lisses



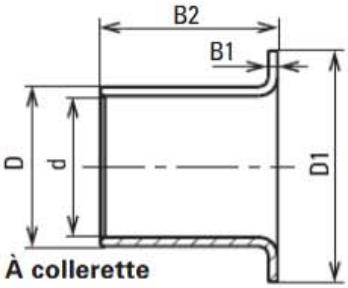


CaRaCTéRISTIqueS	Type F	Type A
Revêtement	PTFE avec additif antifriction (5 à 30 µm)	Résine acétal (0,3 à 0,4 mm)
Pression spécifique admissible statique	250 N/mm²	250 N/mm²
Pression spécifique admissible dynamique	80 N/mm²	120 N/mm²
Vitesse maximale de glissement	2 m/s	2,5 m/s
Température de fonctionnement	– 200 à 250 °C	– 40 à 110 °C
Coefficient de frottement	0,03 à 0,25	0,02 à 0,20
Lubrification	Non	Oui
Rugosité de l'arbre	Ra ≤ 0,4 µm	Ra ≤ 0,8 µm
Tolérance de l'arbre	f7 jusqu'à ∅ 75 mm h8 au-dessus de ∅ 75 mm	h8
Tolérance du logement	H7	H7

Extraits dimensionnels



Cylindrique

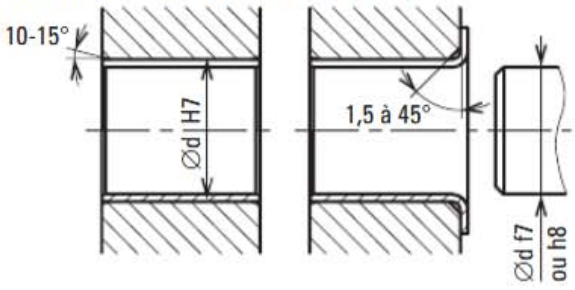


À collerette

d	6	8	10	12	14	15	16	18	20	25	30	35
D	8	10	12	14	16	17	18	20	23	28	34	39
B	6 8 10	8 10 12	8 10 15 20	12 15 20 25	12 15 20 25	12 15 20 25	12 15 20 25	15 20 25	15 20 25 30	15 20 25 30	20 25 30 40	30 35 40 50
D1	12	15	18	20	22	23	24	26	30	35	42	47
B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	2	2
B2	4 8	5,5 7,5 9,5	9 12 17	9 12 15 17	12 17	9 12 17	12 17	12 17 22	11,5 15 16,5 21,5	11,5 16,5 20,5	16 26	16 26

Les coussinets cylindriques existent jusqu'au diamètre d = 300 mm.

Montage des paliers lisses



Les coussinets sont montés serrés dans leur logement.
Des chanfreins sont prévus à l'entrée des logements pour faciliter la mise en place des coussinets.
Un chanfrein est prévu (1,5 mm à 45°) dans le logement côté collerette du coussinet.

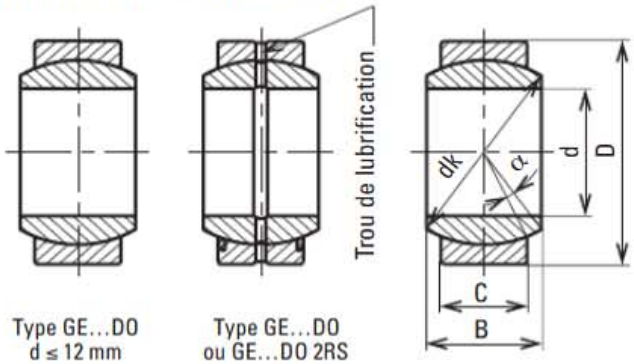
• Articulations sphériques

EXEMPLES D'ARTICULATIONS SPHÉRIQUES

Description

Les rotules permettent de transmettre des mouvements et des charges sans moments parasites.
Elles permettent l'alignement des arbres et des paliers et admettent des mouvements oscillants de faibles vitesses.

Rotules ACIER/ACIER

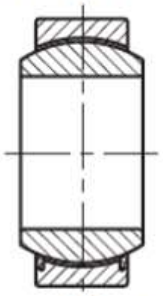


Type GE...DO
d ≤ 12 mm

Type GE...DO
ou GE...DO 2RS

Les rotules sont en acier au chrome traité. Elles peuvent supporter de fortes charges et des chocs importants.
L'angle de déversement α varie en fonction des dimensions relatives des bagues (voir tableau ci-dessous : séries E et F).
Lubrification à la graisse.
Températures admissibles : 60 à 200 °C.
UTILISaTIoNS : articulations de vérins hydrauliques, engins de chantier…

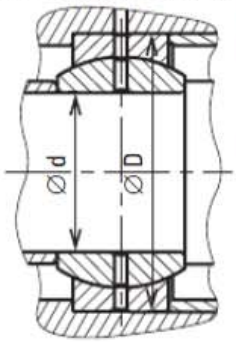
Rotules ACIER/PTFE



Type GE...UK
ou GE...UK-2RS

La bague intérieure est en acier chromé et la bague extérieure comporte un revêtement de PTFE (polytétrafluoréthylène). Pas d'entretien.
Température admissible : 50 à 150 °C.
UTILISaTIoNS : vérins, tables élévatrices, constructions métalliques, flèches de grues…

Montage des rotules



Tolérances
Rotules ACIER/ACIER
– logement **M7**
– arbre **m6**
Rotules ACIER/PTFE
– logement :
si < 300 mm **K7**
si > 300 mm **M7**
– arbre : **j6**

Extraits dimensionnels

Série E						Série G					Rotules ACIER/ACIER série E		Rotules ACIER/PTFE série E	
d	D	B	C	dk	α°	D	B	C	dk	α°	C en kN	C_0 en kN	C en kN	C_0 en kN
6	14	6	4	10	13	16	9	5	13	21	3,4	17	3,6	9
8	16	8	5	13	15	19	11	6	16	21	5,5	27,5	5,85	14,6
10	19	9	6	16	12	22	12	7	18	18	8,15	40,5	8,65	21,6
15	26	12	9	22	8	30	16	10	25	16	17	85	17,6	44
17	30	14	10	25	10	35	20	12	29	19	21,2	106	22,4	56
20	35	16	12	29	9	42	25	16	35,5	17	30	146	31,5	78
25	42	20	16	35,5	7	47	28	18	40,7	17	48	240	51	127
30	47	22	18	40,7	6	55	32	20	47	17	62	310	65,5	166
40	62	28	22	53	7	68	40	25	60	17	100	500	140	280
50	75	35	28	66	6	90	56	36	80	17	156	780	220	440
80	120	55	45	105	5	130	75	50	115	14	400	2 000	570	1 140
100	150	70	55	130	7	160	85	55	140	14	610	3 050	865	1 730
200	290	130	100	250	7	320	165	100	275	15	2 120	10 600	3 000	6 000

C : capacité de charge dynamique. C_0 : capacité de charge statique.

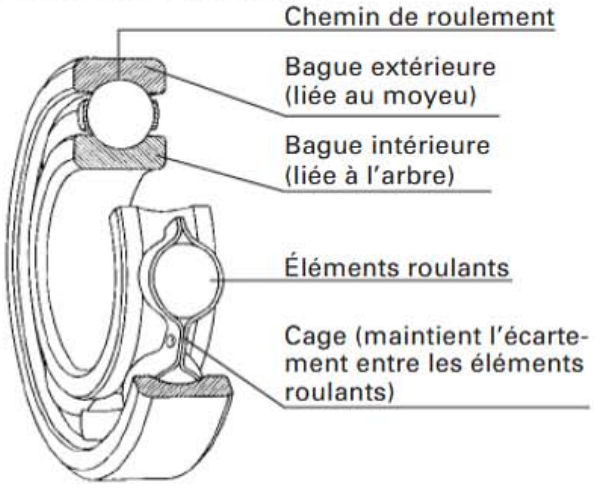
DoC. INA

• Guidages en rotation : roulements à billes et à rouleaux

Fonction

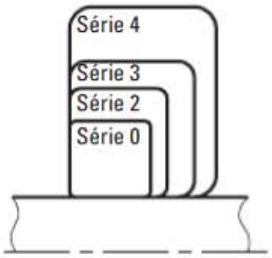
Le roulement est un organe permettant la rotation relative entre un arbre et un moyeu, sous charge, avec précision et avec un frottement réduit.
En fonction des charges transitant dans le palier (axiales ou/et radiales), différents types de roulements sont utilisés.

Éléments constitutifs



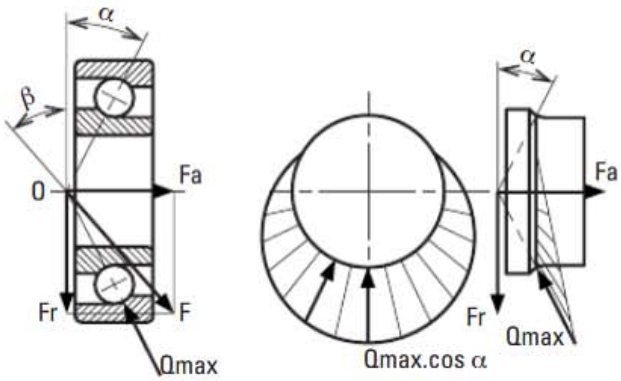
Normalisation des roulements

Les roulements sont codifiés par un code de 4 ou 5 caractères (roulements à billes ou à rouleaux cylindriques) ou 7 caractères (roulements à rouleaux coniques (voir tableaux dimensionnels)).
Normes :
L'International Standard Organisation (**ISO**) qui regroupe l'**AFNOR** (France), **DIN** (RFA), **UNI** (Italie), **BS** (Angleterre), **ANSI** (États-Unis)... permet la standardisation totale des roulements quel que soit le fabricant.
d : diamètre int.
D : diamètre ext.
B : largeur
d, D, B ainsi que les tolérances seront identiques pour un roulement choisi quel que soit le fabricant.



Charges supportées par un roulement

Toute charge agissant sur un roulement est transmise d'un chemin de roulement à l'autre par l'intermédiaire des éléments roulants.
La charge sur un roulement est souvent la résultante de forces axiales **Fa** et radiales **Fr**.
La force axiale **Fa** est une force qui agit suivant l'axe de rotation du roulement.
La force radiale **Fr** est une force perpendiculaire à l'axe de rotation et passant par son centre de pression (point d'intersection de l'axe de rotation et des directions de charge sur les éléments roulants).



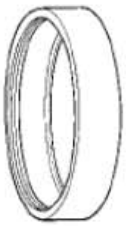
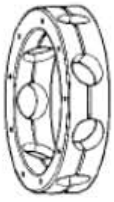
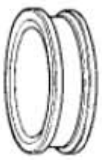
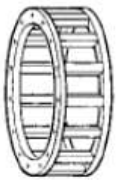
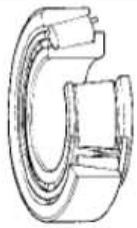
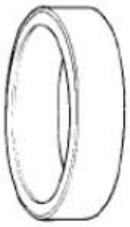
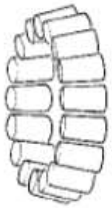
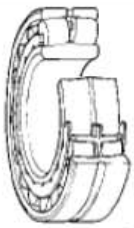
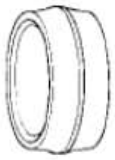
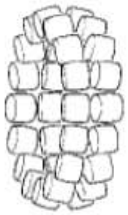
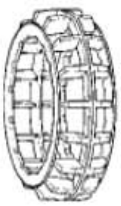
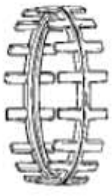
Répartition des charges dans un roulement

α : angle de contact.
β : angle de la ligne d'action de F avec le plan radial.
O : centre de pression.
Q : charge supportée par un élément roulant.

Matériaux utilisés pour la fabrication des roulements

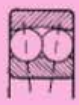
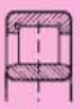
Les nuances d'acier utilisées pour la fabrication des roulements sont normalisées.
Les aciers au chrome à haute teneur en carbone sont les plus utilisés : **100 Cr6**, **100 CrMo17**.
Pour des applications particulières (milieux corrosifs...), les **aciers de cémentation** (20 NiCrMo2, 16 NiCrMo17) ou des **aciers rapides** (80 MoCr U-40) sont utilisés.
Pour les hautes températures, les **oxydes d'aluminium** ou des **céramiques** sont utilisés.
Les matériaux des cages de roulement varient en fonction de l'utilisation du roulement.

Types de roulements

TYPE	BAGUE EXTÉRIEURE	BAGUE INTÉRIEURE	ÉLÉMENTS ROULANTS	CAGE		
				Matière synthétique	Tôle emboutie	Massive usinée
Roulements à billes						
Roulements à rouleaux cylindriques						
 Roulements à rouleaux coniques	 Cuvette	Cône				
 Roulements à rouleaux sphériques						
Roulements à aiguilles						

Doc. SNR

• Guide de choix d'un roulement : aptitudes

Types \ Aptitudes	Aptitude à la charge radiale	Aptitude à la charge axiale	Vitesse limite N. Dm (2)	Défaut angulaire maximum	Prix relatif	Remarques
Roulement à billes à contact radial	=	=	500.10^3	10′	1	C'est le roulement universel, il existe dans de nombreuses variantes (étanchéité, cages…). Il est d'un excellent rapport performances/prix. Il exige toutefois un alignement correct des portées.
Roulement à billes à contact radial à deux rangées de billes	+	=	330.10^3	0	2,5	Il possède une bonne rigidité qui exige un alignement rigoureux des portées. Il est livré graissé.
Roulement à billes à contact oblique	+	++	380.10^3	10′	2	Il supporte des charges radiales et axiales assez importantes. Il se monte par deux en opposition ou en tandem. Il exige un bon alignement des portées. Il exige un réglage du jeu axial.
Roulement à billes à contact oblique à deux rangées de billes	+	+	320.10^3	0	3	Il s'oppose bien aux efforts de déversement. Sa rigidité exige un alignement rigoureux des portées. Seul, il peut être utilisé parfois comme palier remplissant ainsi le rôle de deux roulements.
Roulement à rotule sur billes 	=	–	400.10^3	3°	2,5	Il permet de compenser des défauts d'alignement importants. Avec un manchon de serrage, il peut se monter sur un arbre brut de laminage.
Roulement à rouleaux cylindriques 	++	0 (1)	400.10^3	3′	2,5	Il supporte des charges radiales très élevées mais aucune charge axiale sauf pour les types NJ et NUP (faibles charges). Il exige un bon alignement des portées. Les bagues sont séparables, facilitant ainsi le montage.
Roulement à rouleaux côniques	++	++	250.10^3	5′	1,5	Il supporte des charges radiales et axiales importantes. Il se monte par deux en opposition. Il exige un bon alignement des portées. Ses bagues sont séparables et facilitent le montage. Il exige un réglage du jeu axial.
Roulement à rouleaux sphériques	+++	=	250.10^3	1°	5	Il supporte des charges radiales très élevées. Le chemin sphérique permet de compenser des défauts d'alignement importants. Avec un manchon de serrage, il peut se monter sur un arbre brut de laminage.

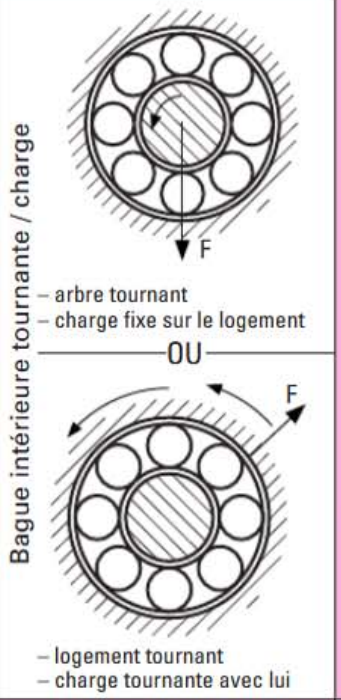
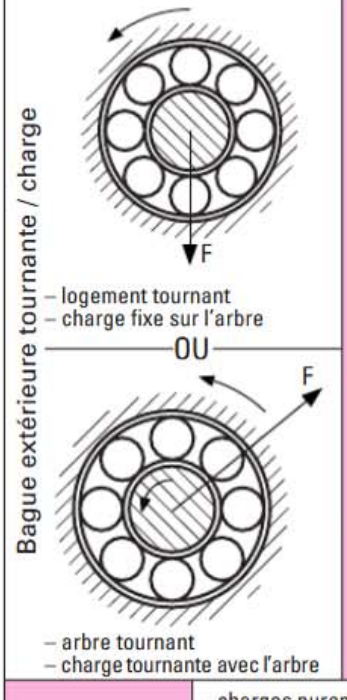
(1) Sauf pour les types NJ et NUP qui admettent une faible charge axiale.

(2) **N.Dm** pour des roulements ouverts ou protégés, lubrifiés à la graisse, avec N la fréquence de rotation en tr/min et Dm le ∅ moyen en mm : Dm = (D + d)/2.

Légende : +++ excellente ; ++ très bonne ; + bonne ; = moyenne ; – faible ; 0 nulle

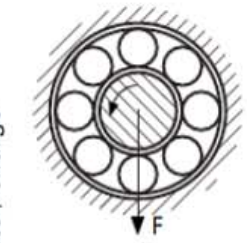
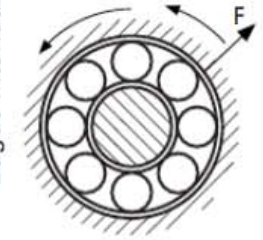
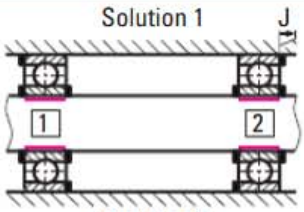
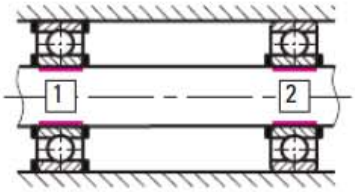
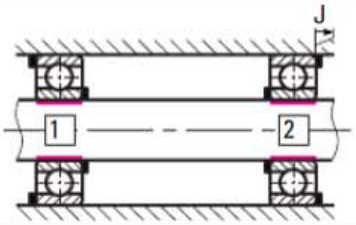
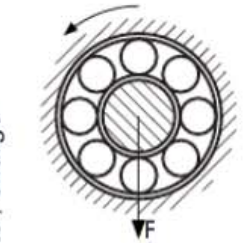
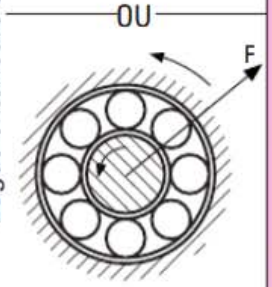
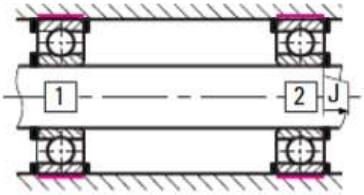
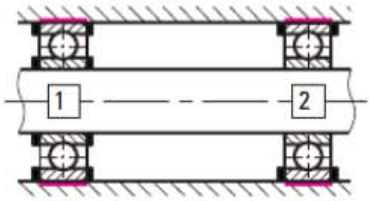
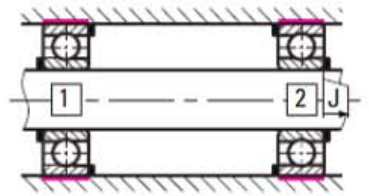
Doc. SNR

• Choix des ajustements

Direction charge/rotation	Montage des bagues	Charge C / P	Ø de l'arbre	Tolérances Arbre – Type de roulement à billes	Tolérances Arbre – Type de roulement à rouleaux	Tolérances Arbre – Type de roulement à rotule sur rouleaux	Alésage	Observations	Exemples d'utilisation
Bague intérieure tournante / charge  – arbre tournant – charge fixe sur le logement OU – logement tournant – charge tournante avec lui	Bagues intérieures montées serrées	faible > 10	< 40	h6	j6	j6	H7	Déplacement de la bague extérieure (B.E.) possible facilement	– Petits moteurs électriques, – machines-outils, – ventilateurs, pompes – mécanique courante – transporteurs
			40-140	j6	k6	k6			
			140-200	k6	m6	m6			
		normale > 5 < 10	< 40	j6	k6	k6			– mécanique générale – moteurs électriques – turbines pompes – réducteurs à engrenages
			40-140	k6	m6	m6	H7		
			140-200	m6	n6	p6			
		élevée < 5	< 40	–	n6	n6	J7	– Déplacement de la bague extérieure (B.E.) encore possible. – M7 pour roulements à rouleaux cylindriques ou coniques.	– boîtes d'essieux pour véhicules sur rails – laminoirs – gros compresseurs
			40-140	–	n6	p6			
			140-200	–	p6	p6			
Direction de charge indéterminée		faible	tous ∅	j6	k6	k6	K7	Déplacement de la bague extérieure (B.E.) impossible	– pompes, paliers de vilebrequin – moteurs de traction
		normale		k6	m6	m6	K7		
		élevée		–	n6	p6	M7		
Bague extérieure tournante / charge  – logement tournant – charge fixe sur l'arbre OU – arbre tournant – charge tournante avec l'arbre	Bagues extérieures montées serrées	faible > 10	tous ∅	g6			K7-M7	Déplacement de la bague extérieure (B.E.) impossible. La bague intérieure (B.I.) peut être déplacée axialement.	– roues folles – rouleaux transporteurs…
		normale > 5 < 10	tous ∅	g6			N7		– poulies-tendeur – têtes de bielles – galets-porteurs
		élevée < 5	tous ∅	g6			P7		– poulies-tendeur – poulies à gorges – têtes de bielles – galets-porteurs
Autres roulements Cas particuliers	– charges purement axiales			j6			H7	tous types de roulements	
	– roulements à alésage conique sur manchon			h9-h10				transmissions, matériel agricole	
	– roulements type N sans B.E.						G7		
	– roulements type NU sans B.I.			f6-g6					

• Choix des fixations radiales et axiales

Cas des roulements à billes à contact radial

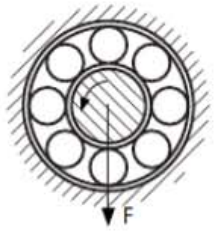
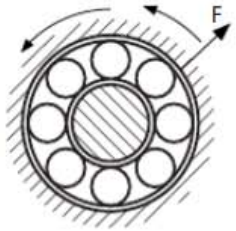
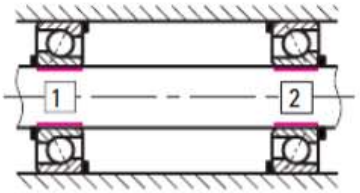
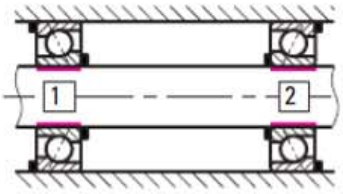
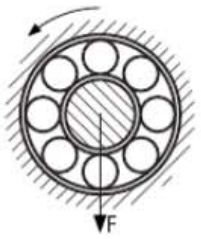
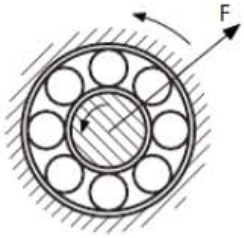
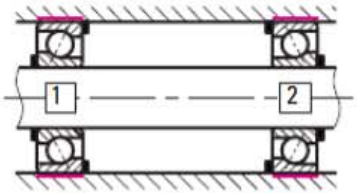
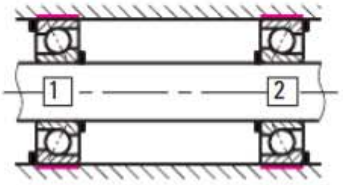
Direction charge/rotation	Montage des bagues	Arrêts axiaux - Serrage des bagues cas type	Montage - Remarques
Bague intérieure tournante / charge  – arbre tournant – charge fixe sur le logement OU  – logement tournant – charge tournante avec le logement	Bagues intérieures montées serrées sur l'arbre	Solution 1  Solution 2  	Montage facile avec roulements identiques. Le jeu **J** permet de compenser les dilatations et évite les oppositions mutuelles entre les roulements. Les arrêts en translation des bagues extérieures peuvent être placés entre les roulements ou à l'extérieur des roulements (attention aux dilatations). Montage facile avec des roulements différents. Permet une dilatation importante de l'arbre, un des deux roulements pouvant coulisser dans le moyeu (alésage). Montage économique. Utilisé pour les paliers peu chargés (**Fa ≃ 0**)
Bague extérieure tournante / charge  – logement tournant – charge fixe sur l'arbre OU  – arbre tournant – charge tournante avec l'arbre	Bagues extérieures montées serrées dans le moyeu	  	Montage facile avec roulements identiques. Le jeu **J** permet de compenser les dilatations. Les arrêts en translation des bagues intérieures peuvent être placés entre les roulements (attention aux dilatations). Un des deux roulements peut coulisser librement sur l'arbre lui permettant ainsi de prendre sa place. Montage très économique. Utilisé pour les paliers peu chargés (**Fa ≃ 0**)

bagues serrées — bagues libres ▮ arrêts axiaux

Règle 1 : Une **bague qui tourne**, par rapport à la direction de la charge exercée sur le roulement, doit être **ajustée serrée**.
Une **bague fixe**, par rapport à la direction de la charge, doit être **ajustée avec jeu**.

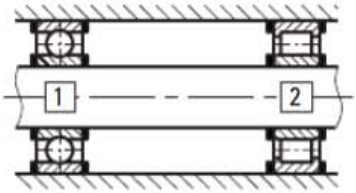
Règle 2 : Les bagues qui tournent par rapport à la direction de la charge exercée sur le roulement doivent être arrêtées en translation.
Les arrêts en translation des bagues ajustées avec jeu permettent :
– d'éliminer les translations possibles de l'arbre par rapport au moyeu ;
– de supporter, au mieux, les charges axiales éventuelles ;
– d'éviter les oppositions mutuelles entre les roulements (éviter les arrêts surabondants).

Cas des roulements à billes à contact oblique ou des roulements à rouleaux coniques

Direction charge/rotation	Montage des bagues	Arrêts axiaux - Serrage des bagues - Cas type	Montage - Remarques
Bague intérieure tournante / charge  – arbre tournant – charge fixe sur le logement OU  – logement tournant – charge tournante avec le logement	Bagues intérieures montées serrées sur l'arbre	 	Montage en **O** ou **indirect**. Montage plus rigide, convient pour des couples de renversement importants (roues automobiles). Utilisé dans le cas de charges en porte-à-faux.
		 	Montage en **X** ou **direct**. Utilisation lorsque le point d'application de la résultante des actions sur l'arbre se situe entre les deux roulements. Réglage du jeu interne sur les bagues extérieures glissantes.
Bague extérieure tournante / charge  – logement tournant – charge fixe sur l'arbre OU  – arbre tournant – charge tournante avec l'arbre	Bagues extérieures montées serrées dans le moyeu	 	Montage en **O** ou **indirect**. Montage rigide du fait de l'écart effectif entre les deux roulements. Utilisé dans le cas de charges en porte-à-faux. Réglage du jeu interne sur les bagues intérieures glissantes.
		 	Montage en **X** ou **direct**. Utilisé lorsque le point d'application de la résultante des actions sur le moyeu se situe entre les deux roulements.

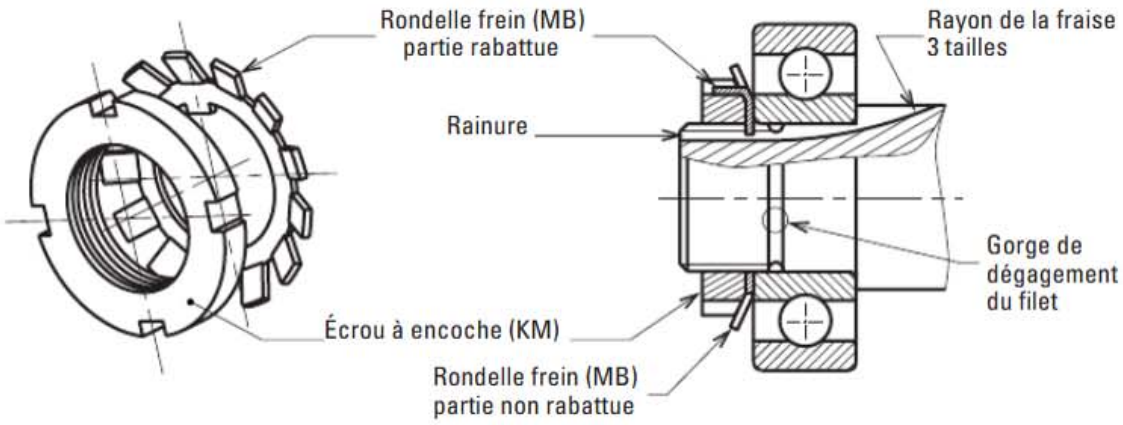
bagues serrées — bagues libres — arrêts axiaux

Cas des roulements à rouleaux cylindriques

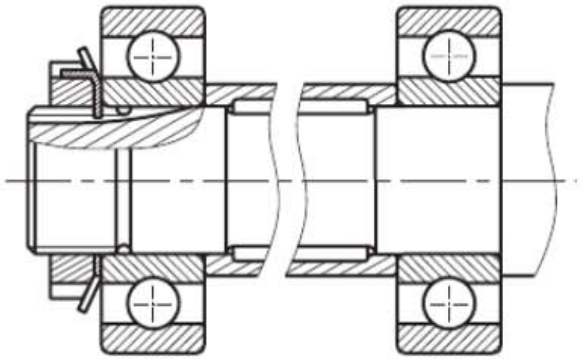
Serrage des bagues	Arrêts axiaux	Montage - Remarques
Mêmes conditions que les cas du tableau ci-dessus.	 	Dans le cas de l'arbre ou du moyeu tournant par rapport à la charge, il faut immobiliser en translation les deux bagues, sauf dans certains cas d'utilisation de roulements à rouleaux cylindriques de type NJ ou NUP.

• Positionnement axial des roulements

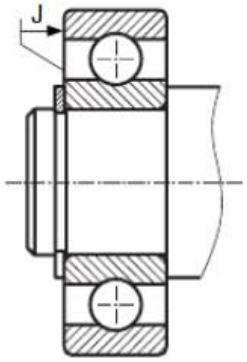
Montage d'un roulement sur arbre avec épaulement et écrou freiné



Montage de deux roulements sur arbre avec épaulement, entretoise et écrou freiné

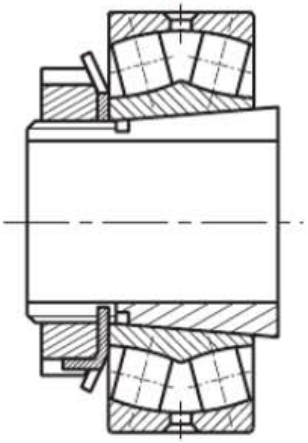


Montage d'un roulement sur arbre avec épaulement et anneau élastique



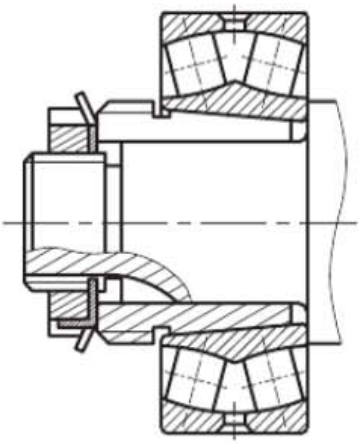
Le jeu **J** détermine le positionnement axial du roulement. C'est un procédé économique et peu encombrant intéressant en bout d'arbre lorsqu'il n'y a pas d'efforts axiaux.

Montage par manchon de serrage



Les manchons de serrage permettent le montage sur un arbre en acier étiré non usiné.
Le manchon fendu peut être positionné indifféremment sur l'arbre. Il se referme sur l'arbre au serrage de l'écrou à encoches.
L'utilisation d'un manchon est réservée pour les roulements à rotules à billes ou les roulements à rouleaux sphériques.

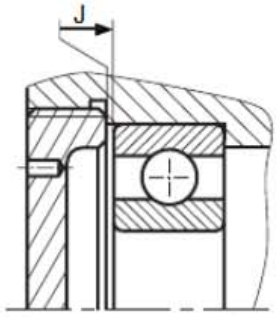
Manchon de démontage



Le manchon de déserrage permet l'immobilisation en translation et en rotation de la bague intérieure du roulement.
Il permet aussi le démontage du roulement en utilisant le filetage usiné sur le manchon.

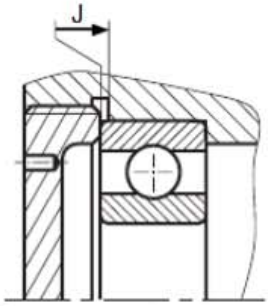
POSITIONNEMENT DES BAGUES EXTÉRIEURES

Montage du roulement dans le moyeu (alésage) par épaulement et bouchon fileté

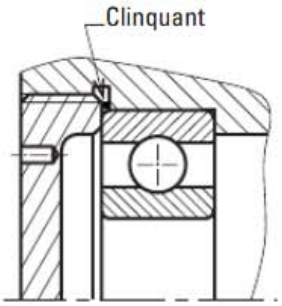


Montage avec jeu entre bouchon et roulement :
- positionnement axial peu précis,
- montage sans contrainte.

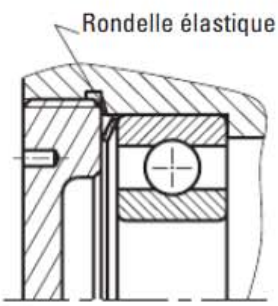
Exécution économique.



Serrage du bouchon sur la bague extérieure :
- bonne précision du positionnement axial de l'arbre,
- exige un serrage calibré.

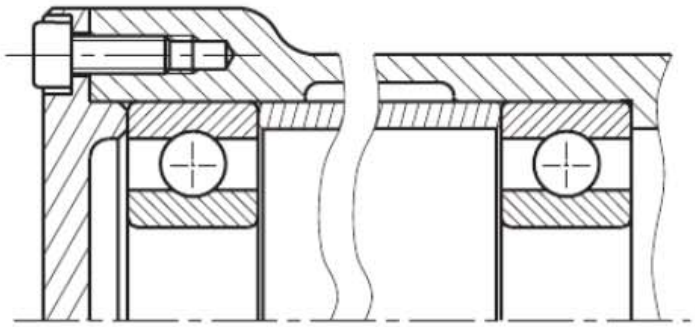


Montage calibré par clinquant :
- l'empilement de clinquants permet d'éliminer le jeu axial et évite une contrainte dans le roulement.

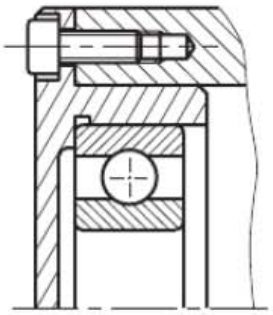


Montage avec rondelle élastique :
- la rondelle élastique assure un positionnement correct s'il n'y a pas d'efforts axiaux s'exerçant sur elle.

Montage de deux roulements dans le moyeu avec épaulement, entretoise et couvercle vissé

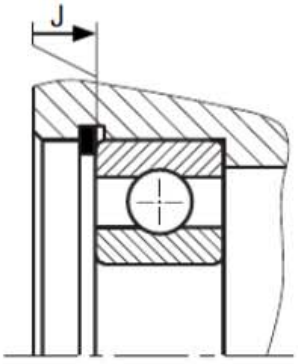


Montage avec boîtier de roulement



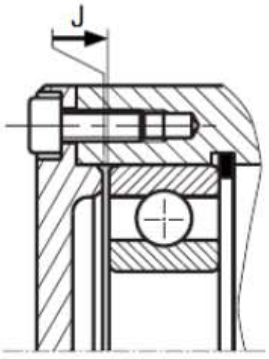
Montage du roulement dans le moyeu avec anneau élastique

Épaulement et anneau élastique



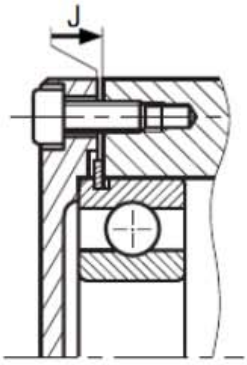
Le jeu **J** est obligatoire pour le montage de l'anneau élastique.

Anneau élastique et couvercle



Le roulement est en appui contre l'anneau élastique qui fait office de butée.
Les efforts axiaux de serrage doivent être faibles ou nuls.

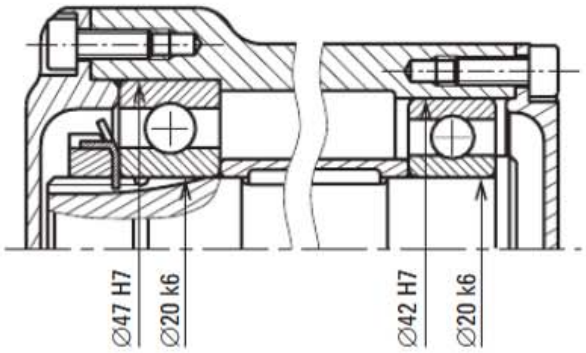
Roulement à rainure pour segment d'arrêt



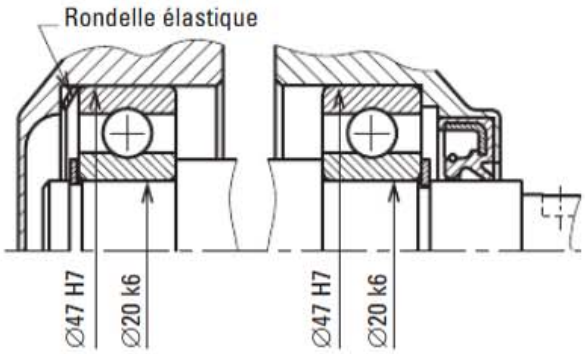
Utilisation d'un roulement à rainure et segment d'arrêt. Roulement type **BC** série **NR**.

EXEMPLES DE MONTAGES

Arbre tournant par rapport à la charge - Roulements à billes

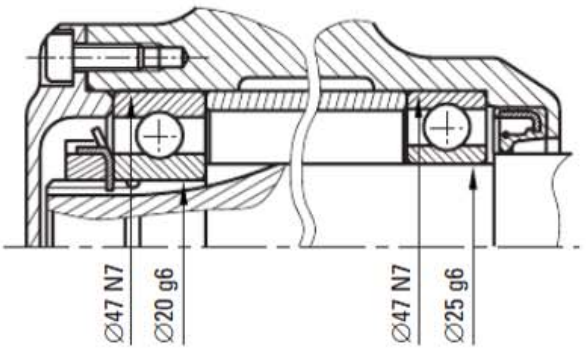


Les roulements sont montés serrés et arrêtés en translation sur l'arbre.
L'arbre est ensuite monté dans le carter, ce qui simplifie le montage.
Les efforts axiaux sont supportés par le roulement le plus gros.

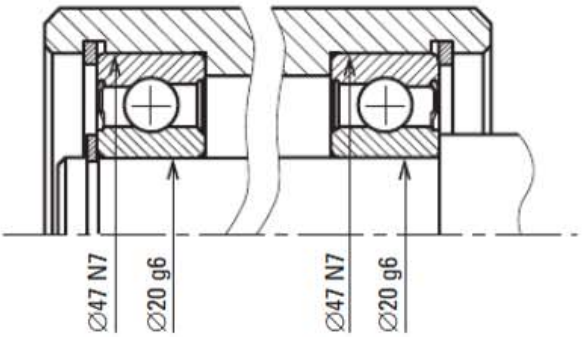


Dans ce cas, les efforts axiaux sont faibles ou inexistants.
La rondelle élastique maintient une pression sur la bague extérieure et absorbe les vibrations en limitant le bruit (cas des montages des rotors des petits moteurs électriques).

Moyeu tournant par rapport à la charge - Roulements à billes

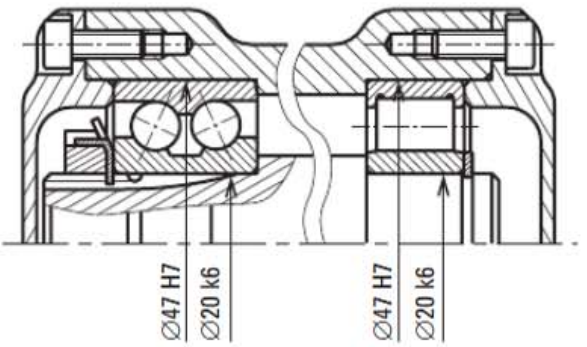


Les roulements sont montés serrés et arrêtés en translation dans le moyeu.
Le moyeu est ensuite monté sur l'arbre.



Ce cas représente un montage économique à l'aide d'anneaux élastiques.
Dans certains cas les arrêts en translation par anneaux élastiques dans le moyeu peuvent être supprimés.

Arbre tournant par rapport à la charge - Roulement à contact oblique à deux rangées de billes plus roulement à rouleaux cylindriques type NU

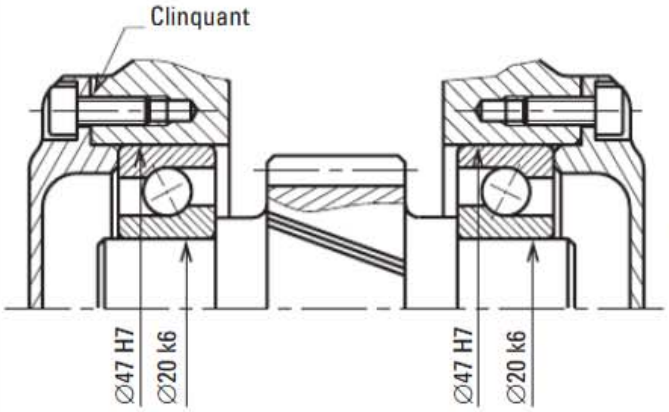


Les efforts axiaux sont supportés par le roulement à contact oblique à deux rangées de billes.
Le roulement à rouleaux cylindriques, dont la bague intérieure peut être désolidarisée, permet de compenser les dilatations.
Toutes les bagues doivent être arrêtées en translation.

EXEMPLES DE MONTAGES (SuITe)

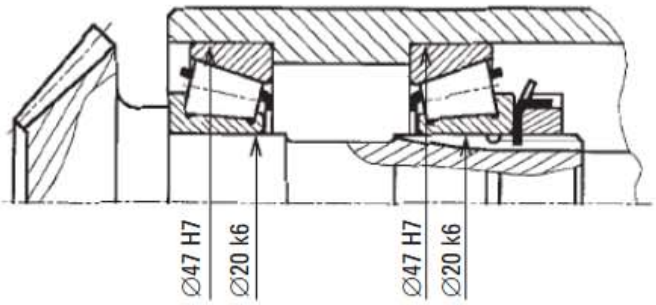
Arbre tournant par rapport à la charge

Roulements à billes à contacts obliques : montage en « X » ou direct



La résultante des charges sur l'arbre est située entre les deux roulements.
Le réglage de la position axiale de l'arbre se fait par les couvercles ainsi que le réglage des jeux internes dans les roulements (clinquant).
Les dilatations ont tendance à surcharger légèrement les roulements.
Montage facile à réaliser puisqu'il se fait par les couvercles solidaires du carter.

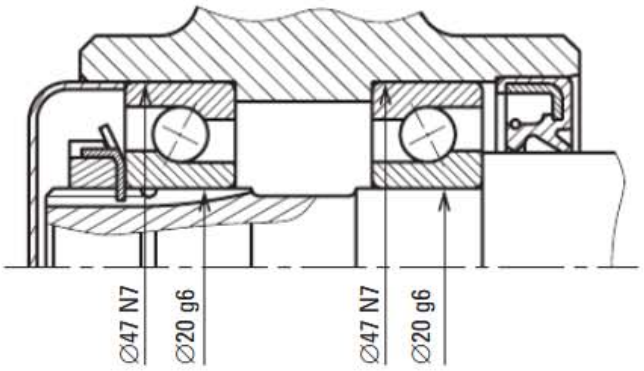
Roulements à rouleaux coniques : montage en « O » ou indirect



La résultante des charges sur l'arbre, située à l'extérieur des roulements, augmente le **couple de renversement** sur l'arbre.
Le montage de l'arbre est plus rigide et admet des **couples de renversement** importants.
Le réglage des jeux internes dans les roulements se fait avec un écrou freiné.
Montage moins sensible aux variations de température que le montage en « **X** ».

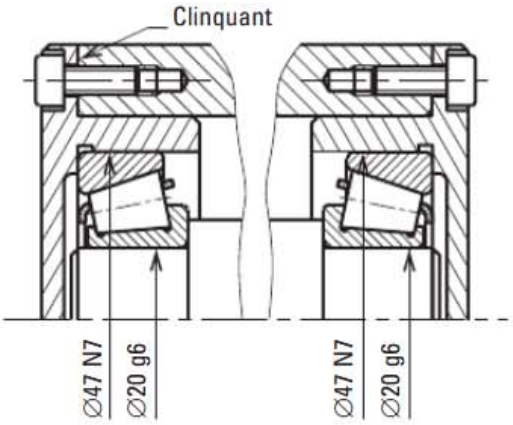
Moyeu tournant par rapport à la charge

Roulements à billes à contact oblique Montage en « O » ou indirect



Ce montage présente une très grande stabilité.
Le réglage des jeux internes dans les roulements se fait par l'écrou freiné sur l'arbre fixe (bague libre).

Roulements à rouleaux coniques Montage en « X » ou direct

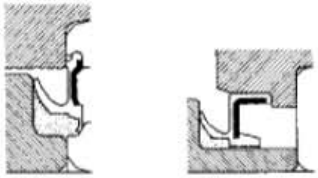


Dans ce cas, les bagues extérieures sont montées serrées dans les boîtiers de roulement qui permettent de régler les jeux internes à l'aide de cales de réglage (clinquant).

• Protection et étanchéité des roulements

Les parties actives du roulement (éléments roulants, chemins de roulement, cage) doivent toujours rester parfaitement propres et lubrifiées. La protection contre les agents polluants extérieurs peut être réalisée par des roulements protégés ou étanches. Dans ce dernier cas les roulements sont remplis à 30 % du volume intérieur libre avec de la graisse.
L'utilisation des roulements étanches simplifie les montages et en baisse les coûts malgré un prix supérieur à un roulement standard.
De nombreux dispositifs d'étanchéité extérieurs peuvent être réalisés (joints à lèvres ou V. Ring, chicanes, déflecteurs...).

Choix d'une protection ou étanchéité intégrée au roulement (d'après doc. SNR)

Aptitudes → / Type de joint ↓	Efficacité relative	Vitesse limite	Température de fonctionnement minimale-maximale	Remarques
Déflecteur suffixe Z Tôle d'acier doux	=	sans changement	Celle du roulement de base non protégé, sauf dans le cas de protection bilatérale, la graisse limite la température à 110 °C.	C'est une protection et non une étanchéité. Elle peut être unilatérale ou bilatérale. Elle n'introduit aucun couple de frottement additionnel.
Joint radial standard E Nitrile acrylique noir	+	70 % de la vitesse limite du roulement ouvert	– 30 à + 110 °C	Ils sont montés sur la bague extérieure et frottent sur la bague intérieure. Ils ne sont pas adaptés aux conditions sévères de pollution et de pression.
Joint haute température E3 Élastomère fluoré rouge	+	sans changement	– 40 à + 200 °C	Excellente résistance aux agents chimiques. Coût plus élevé que celui du joint standard. Ils ne limitent pas la fréquence de rotation.
Étanchéité renforcée pour applications particulières (grande série, grande fiabilité...)				
Joint radial double E32 Nitrile acrylique noir	++	70 % de la vitesse limite du roulement ouvert	– 30 à + 110 °C	Permet un fonctionnement en ambiance polluée. Joint totalement intégré au roulement qui n'est plus standard. Ils exigent un élargissement des bagues du roulement.
Joint à lèvre frontale E10 E16 Nitrile acrylique noir  Joint E10 Joint E16	++	60 % de la vitesse limite du roulement ouvert	– 30 à + 110 °C	Ils assurent une étanchéité à plusieurs niveaux. Ils sont destinés aux applications où la pollution est importante. Le joint E16 est surtout prévu pour les rouleaux coniques. Il est vendu séparément.
Joint intégré à étanchéité renforcée E30 Nitrile acrylique noir Joint E30	++		– 30 à + 110 °C	Étanchéité très performante en milieu pollué (roues de véhicules). Joint totalement intégré au roulement qui n'est plus standard. C'est le plus performant.

Remarque : Ces températures limites sont relatives aux déflecteurs et joints. Ces plages peuvent être modifiées par la nature de la graisse, de la cage ou par l'acier à roulement.
Légende : ++ très bonne ; + bonne ; = moyenne.

• Critères de choix d'un roulement

CHOIX D'UN ROULEMENT

– Nature des charges supportées (axiales, radiales).
– Intensité des charges supportées.
– Fréquence de rotation maximale.
– Fréquence de fonctionnement.
– Conditions d'utilisation (lubrification, atmosphère, chocs...).
– Encombrement disponible.
– Précision du guidage.
– Direction de la charge (fixe ou tournante par rapport à l'arbre ou le moyeu).
– Élément tournant (arbre ou moyeu).
– Matériau de l'arbre et du logement (moyeu).
– Précision du guidage.
– Lubrification.
– Prise (facilité de montage et démontage éventuel).

Démarche de choix

Choix du type de roulement → **Choix du type de montage** → **Détermination des charges sur le roulement** → **Calculs ou vérification des roulements** → **Choix dans les catalogues**

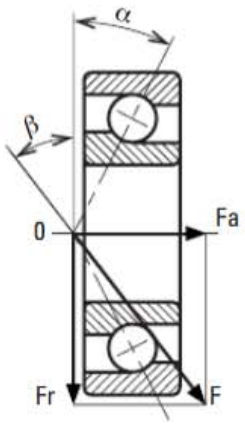
Dimensionnement des roulements NF E 22-391/392/394-ISO 281/1-ISO 76

Le calcul permet de déterminer les caractéristiques dimensionnelles du roulement en fonction des charges supportées pour une durée de vie donnée.

Efforts extérieurs exercés sur le roulement (efforts constants)

La résultante **F** des forces extérieures qui s'exercent sur le roulement est déterminée par une étude mécanique statique ou dynamique.
Tenir compte des conditions de fonctionnement de la machine (chocs, jeu dans les engrenages, tension dans les courroies...) en affectant à **F** un coefficient de service **k**.
La résultante **F** peut être décomposée en une charge radiale constante **Fr** et une charge axiale pure **Fa**.

$$Fr = F \cdot \cos\beta$$
$$Fa = F \cdot \sin\beta$$



Roulement à contact oblique

0 : centre de pression
α = angle de contact
α = 0° pour roulements à gorge symétrique (contact droit)
α = 20 à 40° pour roulements à contact oblique courants

Charge dynamique équivalente P*

C'est la charge radiale fictive donnant la même durée de vie du roulement que la combinaison de **Fa** et **Fr**.

$$P = X \cdot Fr + Y \cdot Fa$$

X et **Y** sont des coefficients radial et axial qui dépendent du type de roulement, du jeu interne, de la valeur du rapport **Fa/Fr** et du rapport **Fa/Co** pour les roulements rigides à une rangée de billes.
Co : charge statique de base définie pour chaque roulement.

Type de fonctionnement	Coef. k
Machines sans à-coups	1 à 1,2
Machines à piston	1,2 à 1,5
Machines avec chocs	1,5 à 3
Engrenages précis	1,05 à 1,1
Engrenages ordinaires	1,1 à 1,3
Courroies trapézoïdales	1,2 à 2,5
Courroies plates	2,5 à 3

* Seul le cas des roulements rigides à billes sera traité.

CHOIX D'UN ROULEMENT (SulTe)

Cas d'une charge radiale pure (Fa = 0)

$$P = Fr$$

Cas d'une charge combinée (Fa ≠ 0 et Fr ≠ 0)

si $Fa/Fr \leq e \Rightarrow P = Fr$
si $Fa/Fr > e \Rightarrow P = X.Fr + Y.Fa$

Voir valeurs de **X**, **Y** et **e** ci-contre.

Roulement à une ou deux rangées de billes ayant un jeu résiduel normal

$\frac{Fa}{Co}$	X	Y	e
0,014		2,30	0,19
0,028		1,99	0,22
0,056		1,71	0,26
0,084		1,55	0,28
0,11	0,56	1,45	0,30
0,17		1,31	0,34
0,28		1,15	0,38
0,42		1,04	0,42
0,56		1,00	0,44

D'après SNR

Détermination de Y
- Évaluer **e** en calculant **Fa/Co**.
- Calculer le rapport **Fa/Fr** et comparer avec **e**.
- Calculer **Y** par interpolation linéaire.

Charge statique équivalente Po

À des vitesses très réduites, on ne tient compte que de la charge statique.
Si la charge supportée par le roulement comporte une composante axiale et une composante radiale, il est nécessaire de calculer une charge statique équivalente **Po**.

$$Po = 0{,}6\,Fr + 0{,}5\,Fa$$
si $Po < Fr$, prendre $Po = Fr$

Durée de vie nominale d'un roulement L_{10}

La formule de base s'exprime en nombre de tours :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n$$

L_{10} : durée de vie nominale (10^6 **tr**).
C : charge dynamique de base (**N**) donnée dans les tableaux dimensionnels.
P : charge dynamique équivalente (**N**).
n : exposant fonction du type de roulement :
- **n** = 3 pour les roulements à billes.
- **n** = 10/3 pour les roulements à rouleaux.

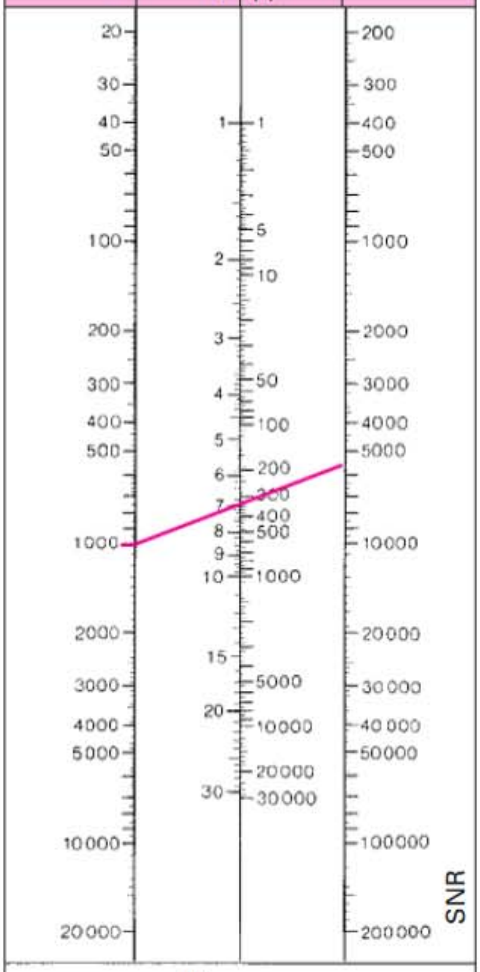
La durée de vie peut aussi s'exprimer en heures de fonctionnement.

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \cdot \frac{10^6}{60\,N}$$

L_{10h} : durée de vie nominale (**h**)
N : fréquence de rotation de l'élément tournant (**tr/min**)

La norme **ISO 281** indique que ces formules ne s'appliquent que si les conditions de fonctionnement sont normales :
- charge convenable,
- bonne précision d'exécution des portées,
- jeu de fonctionnement proche du jeu nul,
- vitesse suffisante mais inférieure à la vitesse limite,
- température de fonctionnement entre **20 °C** et **120 °C**,
- lubrification efficace,
- ambiance non polluée.

DIAGRAMME DE CALCUL DE LA DURÉE DE VIE



$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$ millions de tours

$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \frac{10^6}{60\,N}$ heures

Lecture du diagramme

Le roulement est défini par sa capacité C.
Sa charge radiale équivalente est P.
Sa vitesse de rotation est N.

Pour N = 1 000 tr/min et $\frac{C}{P} = 7$, on a :

L_{10} = 340 millions de tours ou L_{10} = 5 700 heures

CHOIX D'UN ROULEMENT (SulTe)

Exemples de durées de vie requises

À titre d'exemples, le tableau ci-contre donne des ordres de grandeur des durées de vie de machines usuelles.

Type de fonctionnement	Durée de vie en heures	Exemples
Fonctionnement intermittent		
– usage peu fréquent	< 3 000	Appareils ménagers
– usage fréquent	5 000	Outils à main
– 8 h par jour	20 000	Réducteurs…
Fonctionnement continu		Machines-outils
– 8 h par jour	30 000	Compresseurs
– 24 h par jour	50 000	Centrales électriques

Exemples de calculs (cas des roulements rigides à billes)

Roulement SNR 6208 soumis à une charge radiale unique Fr = 280 daN

Fréquence de rotation de 800 tr/min.

Caractéristiques du roulement :
d = 40 mm, **D** = 80 mm, **B** = 18 mm, **C** = 29 000 N, **Co** = 17 900 N.
N maxi = 8 300 tr/min (roulement lubrifié à la graisse)

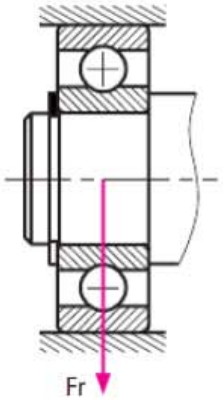
Charge dynamique équivalente P :

$$\mathbf{Fa} = 0 \Rightarrow \mathbf{P} = \mathbf{Fr} = 2\,800\,\text{N} \Rightarrow \frac{\mathbf{C}}{\mathbf{P}} = \frac{29\,000}{2\,800} = 10,36$$

Durée de vie nominale L_{10} :

$$L_{10} = \left(\frac{\mathbf{C}}{\mathbf{P}}\right)^{n} \text{ avec } \mathbf{n} = 3 \quad L_{10} = 1\,111 \text{ millions de tours}$$

ou $L_{10h} = L_{10}\,\dfrac{10^6}{60\,N}$ = **23 146 heures de fonctionnement**

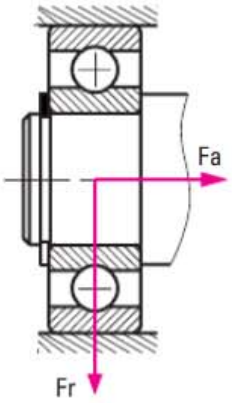


Roulement SNR 6208 soumis à charge axiale Fa = 170 daN et une charge radiale Fr = 280 daN

Fréquence de rotation de 800 tr/min.

Caractéristiques du roulement (voir ci-dessus) :
Afin de définir si la charge axiale intervient dans le calcul de la charge dynamique équivalente, calculer le rapport **Fa/Fr** = 1 700/2 800 = 0,607.
D'après le tableau page 71, 0,19 ≤ **e** ≤ 0,44 donc **Fa/Fr** > **e**, l'effort axial intervient donc dans la détermination de **P**.
Calcul effectif de **e** (facultatif dans ce cas) : **Fa/Co** = 1 700/17 900 = 0,095
d'après le tableau page 71, 0,084 < **Fa/Co** < 0,11 ⇒ 0,28 < **e** < 0,30

Par interpolation linéaire : $\dfrac{\mathbf{e} - 0,28}{0,30 - 0,28} = \dfrac{0,095 - 0,084}{0,11 - 0,084} \Rightarrow \mathbf{e} = 0,288$



Comparaison de **Fa/Fr** et **e** : **Fa/Fr** > **e** d'où **P** = 0,56 **Fr** + **Y Fa**
Détermination du coefficient **Y**
d'après le tableau page 71, 0,084 < **Fa/Co** < 0,11 ⇒ 1,45 < **Y** < 1,55

par interpolation linéaire : $\dfrac{1,55 - \mathbf{Y}}{1,55 - 1,45} = \dfrac{0,095 - 0,084}{0,11 - 0,084} \Rightarrow \mathbf{Y} = 1,51$

Charge dynamique équivalente **P** : **P** = 0,56 **Fr** + 1,51 **Fa**
= 0,56 × 2 800 + 1,51 × 1 700 ⇒ **P** = 4 135 **N**

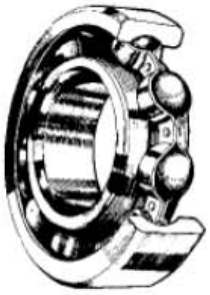
Durée de vie nominale du roulement :

$$L_{10} = \left(\frac{\mathbf{C}}{\mathbf{P}}\right)^{3} = \left(\frac{29\,000}{4\,135}\right)^{3} \Rightarrow L_{10} = \mathbf{345 \text{ millions de tours}}$$

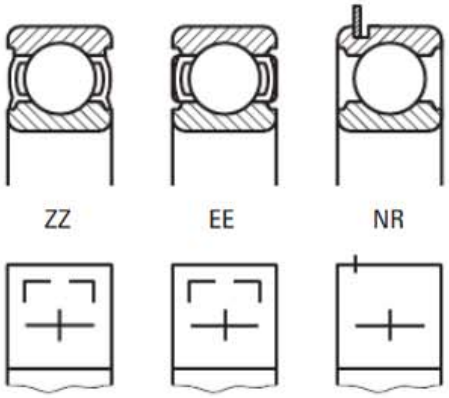
ou $L_{10h} = L_{10}\,\dfrac{10^6}{60\,N}$ = **7 187 heures de fonctionnement**

• Dimensions et caractéristiques des roulements

NF E 22-315
ISO 15



Symbole

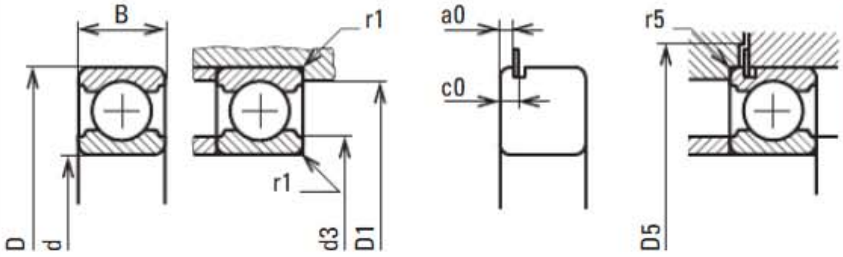


Types protégés ou étanches Z ou E
A rainure pour segment d'arrêt N

Coefficients de calcul

Charge équival. dynamique			
Fa/Fr ≤ e : P = Fr			
Fa/Fr > e : P = 0,56 Fr + Y Fa			
Fa/Co	X	Y	e
0,014	0,56	2,3	0,19
0,028		1,99	0,22
0,056		1,71	0,26
0,084		1,55	0,28
0,11		1,45	0,30
0,17		1,31	0,34
0,28		1,15	0,38
0,42		1,04	0,42
0,56		1,00	0,44

Charge équivalente statique
La plus grande des deux valeurs
Po = Fr et Po = 0,6 Fr + 0,5 Fa



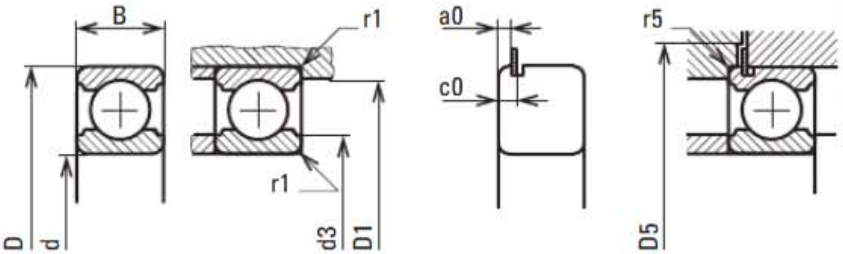
Tolérance sur B du roulement (classe de précision courante 0)

d	Tolérance
10 à 50	0 0,120
50 à 65	0 0,150

ROULEMENTS À UNE RANGÉE DE BILLES À CONTACT RADIAL

DIMENSION (mm)			CHARGE DE BASE (10^3N)		Vitesse (tr/min)			ÉPAULEMENTS ET CONGÉS (mm)					Cotes de montage complémentaires pour roulements type NR (mm)					
					graisse		huile	d3		D1		r1	a_0		c_0		D5	r5
d	D	B	dyn C	stat Co	rouf Z et ZZ	rouf E et EE		mini	maxi	mini	maxi	maxi	maxi	mini	maxi	mini	mini	maxi
10	26	8	4,60	1,97	31 000	21 000	36 000	12,0	12,8	23,6	24,0	0,30						
	30	9	6,00	2,65	25 000	17 000	31 000	14,0	14,6	25,8	26,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	36,0	0,6
	35	11	8,10	3,45	22 000	15 000	27 000	14,0	16,6	29,2	31,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	41,0	0,6
12	28	8	5,10	2,37	27 000	18 000	32 000	14,0	14,8	25,6	26,0	0,30						
	32	10	6,90	3,10	23 000	15 000	28 000	16,0	16,5	27,9	28,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	38,0	0,6
	37	12	9,70	4,20	20 000	13 000	24 000	17,9	18,1	31,3	31,5	1,00	2,06	1,90	3,18	2,92	42,5	0,6
15	32	8	5,60	2,85	23 000		28 000	17,0	18,3	29,1	30,0	0,30						
	32	9	5,60	2,85	23 000	15 000	28 000	17,0	18,3	29,1	30,0	0,30	2,06	1,90	3,18	2,92	38,0	0,3
	35	11	7,70	3,75	20 000	13 000	25 000	19,0	19,6	31,0	31,2	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	41,0	0,6
	42	13	11,30	5,40	18 000	12 000	21 000	21,0	21,2	36,1	36,3	1,00	2,06	1,90	3,18	2,92	47,5	0,6
17	35	8	6,00	3,25	21 000		25 000	19,0	20,7	31,7	33,0	0,30						
	35	10	6,00	3,25	21 000	14 000	25 000	19,0	20,7	31,7	33,0	0,30	2,06	1,90	3,18	2,92	41,0	0,3
	40	12	9,60	4,75	18 000	12 000	22 000	21,0	22,4	35,0	36,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	46,0	0,6
	47	14	13,50	6,60	16 000	11 000	19 000	23,0	24,5	40,3	41,0	1,00	2,46	2,31	3,58	3,33	54,0	0,6
	62	17	22,70	10,80	12 000		15 000	25,0	30,3	48,7	54,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	69,0	0,6
20	42	8	9,40	5,00	15 000		21 000	22,0	25,1	37,1	40,0	0,30						
	42	12	9,40	5,00	18 000	12 000	21 000	24,0	25,1	37,1	38,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	47,5	0,6
	47	14	12,80	6,60	15 000	10 000	19 000	26,0	26,2	41,1	41,3	1,00	2,46	2,31	3,58	3,33	54,0	0,6
	52	15	15,90	7,90	14 000	9 300	17 000	27,0	27,9	44,5	45,0	1,10	2,46	2,31	3,58	3,33	59,0	0,6
	72	19	29,50	15,50	10 000		13 000	28,0	37,4	59,5	64,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	80,0	0,6
22	44	12	14,70	6,50	17 000	11 000	20 000	26,0	26,5	39,9	40,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	49,5	0,6
	50	14	20,80	8,90	14 000	9 300	17 000	28,0	28,4	43,9	44,1	1,00	2,46	2,31	3,58	3,33	57,0	0,6
	56	16	23,90	10,40	13 000	8 700	15 000	29,0	30,7	48,7	49,0	1,10	2,46	2,31	3,58	3,33	63,0	0,6
25	47	8	10,10	5,90	15 000		18 000	27,0	30,1	42,1	45,0	0,30						
	47	12	10,10	5,90	15 000	10 000	18 000	29,0	30,1	42,1	43,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	54,0	0,6
	52	15	14,00	7,90	13 000	8 700	16 000	31,0	31,4	46,3	46,5	1,00	2,46	2,31	3,58	3,33	63,0	0,6
	62	17	23,70	12,20	11 000	7 300	14 000	32,0	34,9	53,1	55,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	69,0	0,6
	80	21	36,00	19,30	9 000		11 000	35,0	42,1	66,3	70,0	1,50	3,28	3,07	4,98	4,67	88,0	0,6

ROULEMENTS À UNE RANGÉE DE BILLES À CONTACT RADIAL (suite)



Tolérance sur B du roulement (classe de précision courante 0)	
d	Tolérance
10 à 50	0 0,120
50 à 65	0 0,150

DIMENSION (mm)			CHARGE DE BASE (10^3N)		Vitesse tr/min			ÉPAULEMENTS ET CONGÉS (mm)					Cotes de montage complémentaires pour roulements type NR (mm)					
					graisse		huile	d3		D1		r1	a_0		c_0		D5	r5
d	D	B	dyn C	stat Co	rouf Z et ZZ	rouf E et EE		mini	maxi	mini	maxi	maxi	maxi	mini	maxi	mini	mini	maxi
28	52	12	19,10	9,30	14 000	9 300	16 000	32,0	33,3	47,1	48,0	0,60	2,06	1,90	3,18	2,92	59,0	0,6
	58	16	23,60	11,10	12 000	8 000	15 000	34,0	35,1	51,3	52,0	1,00	2,46	2,31	3,58	3,33	65,0	0,6
	68	18	36,00	16,40	10 000	6 700	13 000	35,0	38,8	59,7	61,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	76,0	0,6
30	55	9	12,60	8,20	13 000		15 000	32,0	36,2	48,8	53,0	0,30						
	55	13	12,60	8,20	13 000	8 700	15 000	35,0	36,2	48,8	50,0	1,00	2,08	1,88	3,20	2,90	62,0	0,6
	62	16	19,50	11,30	11 000	7 300	14 000	36,0	38,0	54,6	56,0	1,00	3,28	3,07	4,98	4,67	69,0	0,6
	72	19	28,00	15,80	9 800	6 500	12 000	37,0	41,7	62,3	65,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	80,0	0,6
	90	23	43,20	23,80	7 900		9 600	40,0	47,0	73,0	80,0	1,50	3,28	3,07	5,74	5,43	97,5	0,6
32	58	13	22,40	11,20	12 000	8 000	14 000	37,0	37,9	52,5	53,0	1,00	2,08	1,88	3,20	2,90	65,0	0,6
	65	17	30,50	14,60	10 000	6 700	13 000	38,0	39,3	57,5	59,0	1,00	3,28	3,07	4,98	4,67	72,0	0,6
	75	20	41,50	19,40	9 300	6 200	11 000	39,0	43,2	65,6	68,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	83,0	0,6
35	62	9	13,90	9,30	11 000		13 000	37,0	41,2	56,2	60,0	0,30						
	62	14	16,00	10,30	11 000	7 300	13 000	40,0	41,2	56,2	57,0	1,00	2,08	1,88	3,78	3,48	69,0	0,6
	72	17	25,50	15,30	9 300	6 200	12 000	42,0	43,8	63,7	65,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	80,0	0,6
	80	21	33,50	19,10	8 700	5 800	10 000	44,0	46,4	68,4	71,0	1,50	3,28	3,07	4,98	4,67	88,0	0,6
	100	25	55,00	31,00	7 000		8 500	45,0	53,1	81,9	90,0	1,50	3,28	3,07	5,74	5,43	107,5	0,6
40	68	9	15,20	11,10	10 000		12 000	42,0	46,5	61,9	66,0	0,30						
	68	15	17,40	11,50	10 000	6 700	12 000	45,0	46,5	61,9	63,0	1,00	2,49	2,29	4,19	3,89	76,0	0,6
	80	18	29,00	17,90	8 300	5 500	10 000	47,0	49,8	70,7	73,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	88,0	0,6
	90	23	40,50	23,90	7 700	5 100	9 200	49,0	52,9	77,6	81,0	1,50	3,28	3,07	5,74	5,43	97,5	0,6
	110	27	64,00	36,50	6 300		7 700	52,0	59,6	90,4	98,0	2,00	3,28	3,07	5,74	5,43	118,0	0,6
45	75	10	17,50	12,70	9 200		11 000	49,0	52,3	68,7	71,0	0,60						
	75	16	21,00	15,20	9 200	6 100	11 000	50,0	52,3	68,1	70,0	1,00	2,49	2,29	4,19	3,89	83,0	0,6
	85	19	32,50	20,50	7 700	5 100	9 600	52,0	54,4	76,1	78,0	1,10	3,28	3,07	4,98	4,67	93,0	0,6
	100	25	53,00	31,50	6 900	4 600	8 300	54,0	59,2	86,7	91,0	1,50	3,28	3,07	5,74	5,43	107,5	0,6
	120	29	77,00	45,00	5 800		7 000	57,0	66,2	99,8	108,0	2,00	4,06	3,86	6,88	6,58	131,0	0,6
50	80	10	16,10	13,10	8 500		10 000	54,0	57,3	73,1	76,0	0,60						
	80	16	21,80	16,60	8 500	5 700	10 000	55,0	57,3	73,1	75,0	1,00	2,49	2,29	4,19	3,89	88,0	0,6
	90	20	35,00	23,20	7 100	4 700	8 900	57,0	59,4	81,1	83,0	1,10	3,28	3,07	5,74	5,43	97,5	0,6
	110	27	62,00	38,00	6 200	4 100	7 500	61,0	65,8	95,1	99,0	2,00	3,28	3,07	5,74	5,43	118,0	0,6
	130	31	92,00	54,00	5 300		6 400	64,0	72,2	107,8	116,0	2,10	4,06	3,86	6,88	6,58	141,0	0,6
55	90	11	19,50	16,20	7 600		9 000	59,0	63,3	82,5	86,0	0,60						
	90	18	28,50	21,30	7 600	5 100	9 000	61,0	63,3	82,5	84,0	1,10	2,87	2,67	5,33	5,03	97,5	0,6
	100	21	43,50	29,00	6 500	4 300	8 100	64,0	65,9	89,6	91,0	1,50	3,28	3,07	5,74	5,43	107,5	0,6
	120	29	72,00	44,50	5 700	3 800	6 900	66,0	72,1	103,4	109,0	2,00	4,06	3,86	6,88	6,58	131,0	0,6
	140	33	100,00	62,00	4 900		5 900	69,0	76,9	118,1	126,0	2,10	4,90	4,65	7,72	7,37	151,0	0,6
60	95	11	20,0	17,50	7 100		8 400	64,0	68,3	87,5	91,0	0,60						
	95	18	29,50	23,20	7 100	4 700	8 400	66,0	68,3	87,5	89,0	1,10	2,87	2,67	5,33	5,03	103,0	0,6
	110	22	52,00	36,00	5 900	3 900	7 400	69,0	70,9	98,7	101,0	1,50	3,28	3,07	5,74	5,43	118,0	0,6
	130	31	82,00	52,00	5 300	3 500	6 300	73,0	78,7	111,8	117,0	2,10	4,06	3,86	6,88	6,58	141,0	0,6
	150	35	109,00	70,00	4 500		5 500	74,0	84,0	125,5	136,0	2,10	4,90	4,65	7,72	7,37	161,0	0,6
65	100	11	21,20	19,60	6 700		7 900	69,0	73,3	92,5	96,0	0,60						
	100	18	30,50	25,00	6 700	4 500	7 900	71,0	73,3	92,5	94,0	1,10	2,87	2,67	5,33	5,03	107,5	0,6
	120	23	57,00	40,00	5 400	3 600	6 800	74,0	78,1	106,7	111,0	1,50	4,06	3,86	6,88	6,58	131,0	0,6
	140	33	93,00	60,00	4 900	3 300	5 900	78,0	85,2	120,3	127,0	2,10	4,90	4,65	7,72	7,37	151,0	0,6
	160	37	118,00	79,00	4 200		5 100	79,0	90,0	134,0	146,0	2,10	4,90	4,65	7,72	7,37	171,0	0,6

Désignation

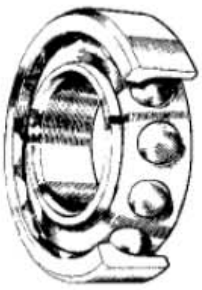
Code de la série du diamètre extérieur (4) ∅ D = 90 mm

Code de l'alésage (06) ∅ d = 30 mm

Code du type de roulement (6)

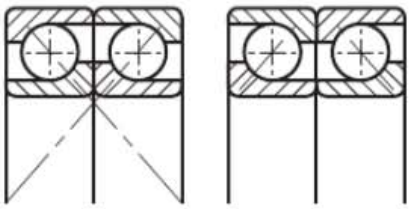
6 4 0 6 ZZ

Roulement protégé (ZZ)



Symbole

Types BG pour montages par paires



X 0

Ils possèdent un angle α de 40° (suffixe B)
Les séries BG peuvent être appariées indifféremment : en X, en O ou en tandem.

Coefficients de calculs

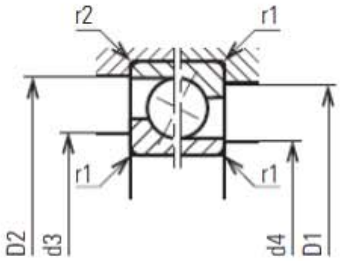
Charge équivalente dynamique

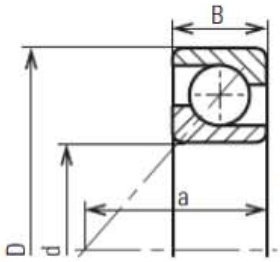
Fa/Fr ≤ 1,14 :
P = Fr
Fa/ Fr > 1,14 :
P = 0,35 Fr + 0,57 Fa*

Charge équivalente statique

La plus grande des deux valeurs :
Po = Fr
Po = 0,5 Fr + 0,26 Fa*

* Calcul de Fa, voir constructeur.





Angle de contact 40°

Tolérance sur B du roulement (classe de précision courante 0)

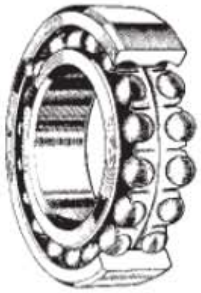
d	Tolérance
10 à 50	0 0,120
50 à 65	0 0,150

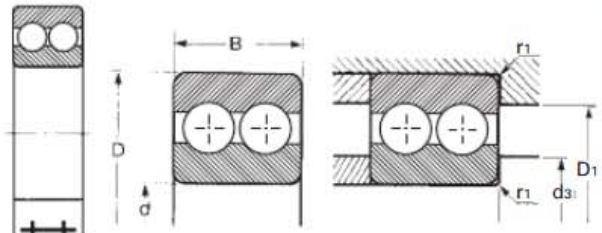
ROULEMENTS À UNE RANGÉE DE BILLES À CONTACT OBLIQUE

DIMENSIONS (mm)				CHARGES DE BASE (10^3N)		Vitesse limite (tr/min)		ÉPAULEMENTS ET CONGÉS (mm)									
								d3		d4		D1		D2		r1	r2
d	D	B	a	dyn C	stat Co	graisse	huile	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi
15B	35	11	16,0	8,10	4,35	18 000	23 000	19,0	22,0	19,0	19,0	28,5	30,0	32,0	32,6	0,6	0,3
17B	47	14	20,5	14,80	8,00	12 500	17 500	23,0	26,0	22,0	23,0	38,0	41,0	41,0	43,0	1,0	0,6
20B	52	15	22,5	17,30	9,70	11 000	15 000	26,0	30,5	25,5	26,5	42,0	46,0	47,0	48,5	1,0	0,6
20BG	52	15	22,5	28,10*	18,80*	11 000	15 000	26,0	30,5	25,5	26,5	42,0	46,0	47,0	48,5	1,0	0,6
25B	62	17	26,5	24,40	14,70	9 200	12 000	31,0	37,5	31,0	32,0	50,0	56,0	56,0	58,5	1,0	0,6
25BG	62	17	26,5	39,70*	29,40*	9 200	12 000	31,0	37,5	31,0	32,0	50,0	56,0	56,0	58,5	1,0	0,6
30B	72	19	31,0	31,00	19,90	7 700	10 000	36,0	45,5	36,0	38,0	59,5	66,0	65,5	68,5	1,0	0,6
30BG	72	19	31,0	50,50*	39,80*	7 700	10 000	36,0	45,5	36,0	38,0	59,5	66,0	65,5	68,5	1,0	0,6
35B	80	21	34,5	36,50	24,10	7 000	9 500	42,0	50,5	42,0	43,0	66,0	73,0	72,5	75,5	1,5	1,0
35BG	80	21	34,5	60,00*	48,00*	7 000	9 500	42,0	50,5	42,0	43,0	66,0	73,0	72,5	75,5	1,5	1,0
40B	90	23	39,0	45,00	30,00	6 300	8 500	47,0	57,0	47,0	48,5	74,0	83,0	82,0	85,5	1,5	1,0
40BG	90	23	39,0	73,00*	60,00*	6 300	8 500	47,0	57,0	47,0	48,5	74,0	83,0	82,0	85,5	1,5	1,0
45B	100	25	43,0	58,00	40,00	5 600	7 500	52,0	63,5	52,0	53,5	82,5	93,0	92,0	95,5	1,5	1,0
45BG	100	25	43,0	95,00*	80,00*	5 600	7 500	52,0	63,5	52,0	53,5	82,5	93,0	92,0	95,5	1,5	1,0
50B	110	27	47,0	68,00	48,00	5 000	6 700	60,0	69,0	59,0	60,0	92,0	100,0	102,0	106,5	2,0	1,0
50BG	110	27	47,0	111,00*	96,00*	5 000	6 700	60,0	69,0	59,0	60,0	92,0	100,0	102,0	106,5	2,0	1,0
55B	120	29	51,0	79,00	56,00	4 500	6 000	65,0	75,0	64,0	65,0	101,0	110,0	111,5	116,5	2,0	1,0
55BG	120	29	51,0	128,00*	113,0*	4 500	6 000	65,0	75,0	64,0	65,0	101,0	110,0	111,5	116,5	2,0	1,0
60B	130	31	55,5	90,00	65,0	4 200	5 600	71,0	81,0	70,0	71,0	109,0	119,0	121,0	124,0	2,0	1,0
60BG	130	31	55,5	146,00*	131,0*	4 200	5 600	71,0	81,0	70,0	71,0	109,0	119,0	121,0	124,0	2,0	1,0
65B	120	23	50,5	64,00	53,0	4 500	5 600	72,0	82,0	72,0	73,5	104,0	113,0	111,0	115,5	1,5	1,0
65BG	140	23	59,6	166,00*	151,0*	4 000	5 200	75,0	90,5	75,0	77,5	118,5	130,0	130,0	135,0	2,1	1,1

* Les roulements du type BG sont vendus à l'unité. Leur montage se fait généralement par paire et les charges de base indiquées sont celles de la paire de roulements.

ROULEMENTS À DEUX RANGÉES DE BILLES À CONTACT RADIAL





Symbole Dimensions

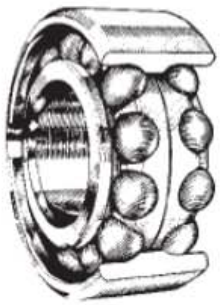
Remarque : Ils sont livrés graissés.
Utilisation : Voir les aptitudes page 53. Ils supportent des charges radiales importantes. Ils possèdent une bonne rigidité qui exige un alignement rigoureux des portées.

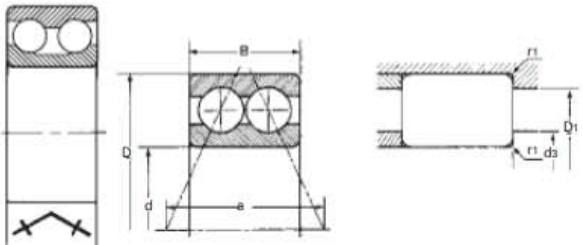
Coefficients de calcul

Charge équival. dynamique			
Fa/Fr ≤ e : P = Fr			
Fa/Fr > e : P = 0,56 Fr + Y Fa			
Fa/Co	X	Y	e
0,014	0,56	2,3	0,19
0,028		1,99	0,22
0,056		1,71	0,26
0,084		1,55	0,28
0,11		1,45	0,30
0,17		1,31	0,34
0,28		1,15	0,38
0,42		1,04	0,42
0,56		1,00	0,44

Charge équivalente statique
La plus grande des deux valeurs
Po = Fr Po = 0,6 Fr + 0,5 Fa

ROULEMENTS À DEUX RANGÉES DE BILLES À CONTACT OBLIQUE





Symbole Dimensions

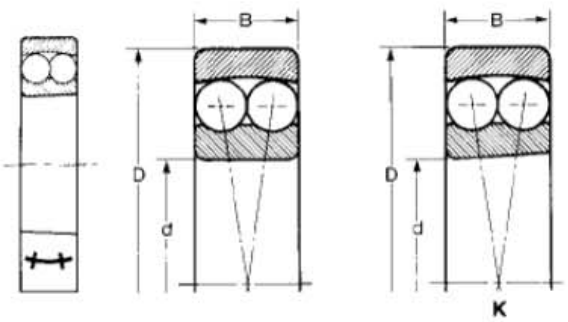
Remarque : Ils supportent des charges radiales et axiales importantes. Ils s'opposent bien aux efforts de déversement. Leur rigidité exige un alignement rigoureux des portées. Deux versions : type **A**, angle de contact 25° ; type **B**, 32°.
Utilisation : Voir les aptitudes page 61. Il est possible de les utiliser seuls comme palier, remplissant le rôle de deux roulements. Ils existent en version étanche dans le type A (suffixe EE) ou version protégée (suffixe ZZ).

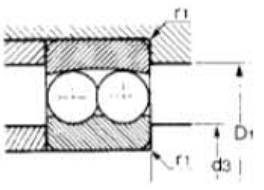
Coefficients de calcul

Charge équivalente dynamique coefficients X et Y					
Fa/Fr ≤ e		Fa/Fr > e			
X	Y	X	Y	e	Type
1	0,92	0,67	1,41	0,68	A
1	0,73	0,62	1,17	0,86	B

Charge équivalente statique		
Xo	Yo	type
1	0,76	A
1	0,63	B

ROULEMENTS À ROTULE DEUX RANGÉES DE BILLES



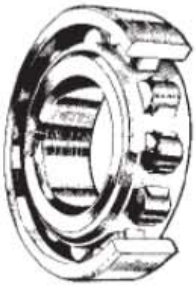


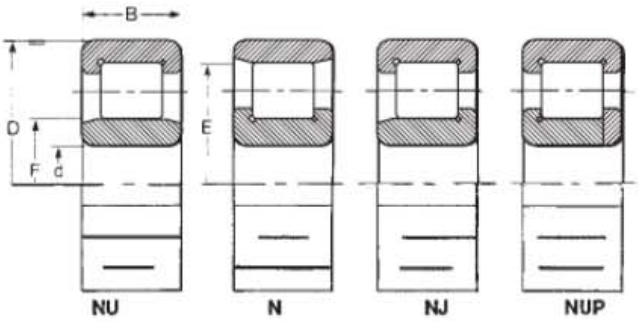
Symbole Dimensions

Coefficients de calculs
Fa/Fr ≤ e : P = Fr + YFa
Fa/Fr > e : P = 0,65 Fr + YFa
Po = Fr + YoFa

Remarque : Ils sont limités en diamètre. Pour les gros diamètres, utiliser des roulements à rotule sur rouleaux.
Utilisation : Voir les aptitudes page 61. Ils permettent de compenser des défauts d'alignement importants (défaut angulaire de 3° maxi). Ils sont fabriqués en alésage cylindrique ou conique (suffixe K - conicité 1/12), ce qui permet leur montage sur un manchon. Le manchon permet leur montage sur un arbre brut de laminage. Ils sont souvent utilisés sur du matériel agricole ou forestier pour des arbres de transmission de grande longueur, là où l'alignement des paliers est difficile à maîtriser.

ROULEMENTS À UNE RANGÉE DE ROULEAUX CYLINDRIQUES





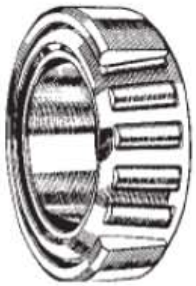
Roulements conçus pour supporter uniquement des charges radiales.

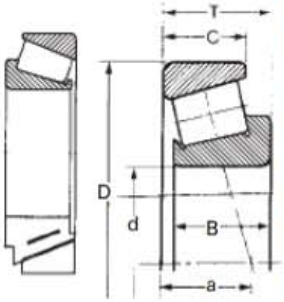
Charge équivalente statique
Po = Fr

Charge équivalente dynamique
P = Fr

Remarques : Ils peuvent être livrés sans bague extérieure (RN) ou sans bague intérieure (RNU).
Utilisation : Voir choix et aptitudes page 61.

ROULEMENTS À UNE RANGÉE DE ROULEAUX CONIQUES





Symbole Dimensions

Symbole ISO

Le code de la norme ISO 355 comporte un chiffre et deux lettres :
- le chiffre indique la classe d'angle à laquelle appartient le roulement (2, 3, 4, 5, 6, 7) ;
- la première lettre se réfère à la série de diamètres exprimant le rapport D/d du roulement ;
- la seconde se rapporte à la série de largeurs exprimant le rapport largeur/section du roulement.

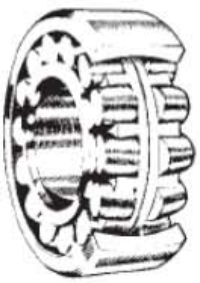
Cœfficients de calculs

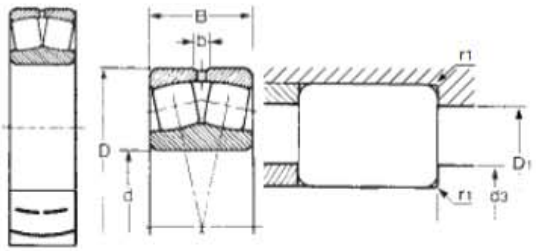
Charge équivalente dynamique
Fa/Fr ≤ e : P = Fr **Fa/ Fr > e : P = 0,4 Fr + Y Fa**

Charge équivalente statique
La plus grande des 2 valeurs : **Po = Fr** **Po = 0,5 Fr + Yo Fa**

Remarques : Ils sont composés de deux éléments séparables, une bague extérieure et un ensemble bague intérieure / corps roulants. Le jeu de fonctionnement est réglable. Ils se définissent par les classes d'angle α en fonction de leur aptitude aux charges axiales, caractérisée par le facteur Y.

ROULEMENTS À DEUX RANGÉES DE ROULEAUX SPHÉRIQUES





Symbole Dimensions

Remarques :
- Roulement à alésage cylindrique ou alésage conique (conicité 1/12 - suf. **K**).
- Roulement acceptant un déversement de la bague intérieure par rapport à la bague extérieure (1/2° maxi).

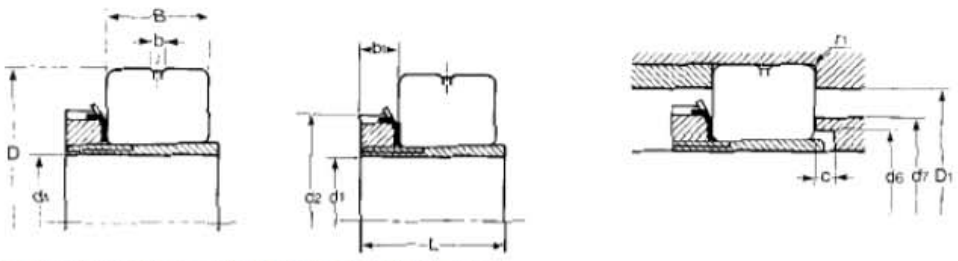
Utilisation : Roulement supportant des charges radiales très élevées. Avec un manchon (suffixe **K**), il peut se monter sur un arbre brut de laminage.

Coefficients de calculs

Charge équivalente dynamique
Fa/Fr ≤ e : P = Fr + Y Fa **Fa/ Fr > e : P = 0,67 Fr + Y Fa**

Charge équivalente statique
Po = 0,5 Fr + Yo Fa

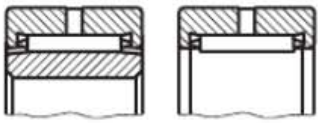
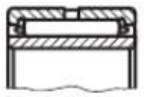
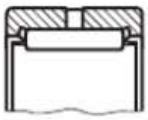
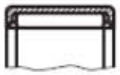
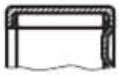
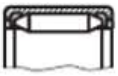
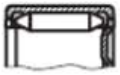
Roulements à rotule à deux rangées de rouleaux sphériques montés sur manchon de serrage



Remarque : pour les dimensions, voir catalogues constructeurs.

• Roulements, cages et douilles à aiguilles. Guide de choix

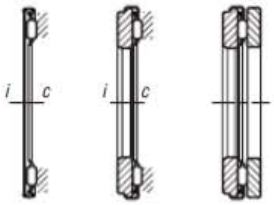
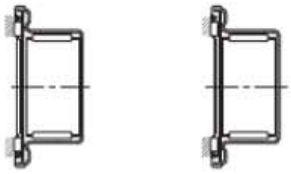
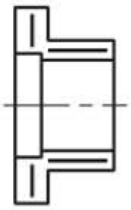
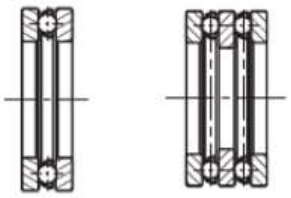
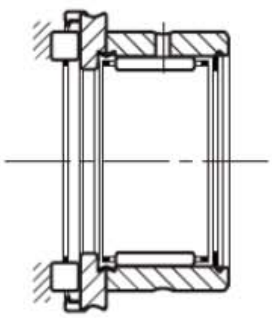
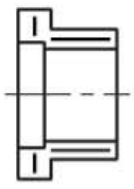
DIMENSIONS ET CARACTÉRISTIQUES DES ROULEMENTS À AIGUILLES

Aptitudes / Types	Caractéristiques	Représentations complète	Représentations simplifiée	Applications
Roulement à aiguilles jointives	Diamètre de l'arbre : de 7,3 mm à 344 mm. Charge dyn. : 3 950 N à 727 000 N Charge sta. : 2 930 N à 1 330 000 N. Vitesse : 58 000 min^{-1} à 1 100 min^{-1}	 NA RNA	Bague extérieure	• Supportent une charge radiale élevée mais pas de charge axiale. • Acceptent de grandes vitesses de rotation. • Nécessitent un bon alignement de l'arbre et du moyeu. • Peuvent être utilisés sans bague intérieure si la portée de l'arbre présente une dureté suffisante et un état de surface convenable (58 à 64 HRC). • Occupent un faible encombrement. ***Emploi :*** axes à articulation, têtes de bielles, galets de cames.
Roulement à aiguilles à cage	Diamètre de l'arbre : de 7 mm à 130 mm Charge dyn. : 3 200 N à 112 000 N Charge sta. : 2 000 N à 147 000 N. Vitesse : 57 000 min^{-1} à 3 100 min^{-1}	 NBI, NA 48/49 NB, RNA 48/49  RNA…Δ NA…Δ	Bague intérieure	
Cage à aiguilles	Diamètre de l'arbre : de 5 mm à 100 mm. Charge dyn. : 2 230 N à 7 400 N. Charge sta. : 1 270 N à 112 000 N. Vitesse : 70 000 min^{-1} à 4 000 min^{-1}	B BB		• Grande rigidité évitant ainsi les déformations lors des manipulations. • Insensibilité aux composants synthétiques présents dans les lubrifiants. • Masse faible diminuant les effets des accélérations et des forces centrifuges. • Fonctionnement silencieux.
Douille à aiguilles	Diamètre de l'arbre : de 6 mm à 55 mm. Charge limite : 1 450 N à 32 000 N. Vitesse : 50 000 min^{-1} à 5 500 min^{-1}	 SL sans fond  CN avec fond  DL sans fond  DLF avec fond		• Faible encombrement et un emploi économique. • Capacité de charge élevée. • Fonctionnement sans bague intérieure (dureté de l'arbre 650 HV mini) tout en gardant la capacité de charge maximale admise. • Emploi de l'arbre au diamètre optimal.

Doc. NADELLA

• Butées à aiguilles, à billes et roulements combinés. Guide de choix

DIMENSIONS ET CARACTÉRISTIQUES DES ROULEMENTS À AIGUILLES (suite)

Aptitudes / Types	Caractéristiques	Représentations complète	Représentations simplifiée	Applications
Butée à aiguilles	Diamètre de l'arbre : de 5 mm à 240 mm. Charge dyn. : 2 600 N à 232 000 N. Charge sta. : 2 500 N à 974 000 N. Vitesse : 25 000 min⁻¹ à 900 min⁻¹	 AR ARZ		• Supporte de très fortes charges axiales et est peu sensible aux chocs. • Encombrement réduit. • Deux butées simple effet peuvent réaliser une butée double effet. • Plus grandes capacités que les butées à billes.
Roulement combiné aiguilles-aiguilles	Diamètre de l'arbre : de 12 mm à 45 mm. Charge limite radiale : 2 500 N à 17 000 N. Charge limite axiale : 11 000 N à 32 000 N. Vitesse : 13 000 min⁻¹ à 4 500 min⁻¹	 À aiguilles sans fond À aiguilles avec fond		• Ils peuvent être munis d'une contre-plaque mince ou épaisse. • Ils peuvent être utilisés avec une bague intérieure avec ou sans trou de graissage. • Ils supportent des charges axiales et radiales importantes. • Vitesse de rotation élevée. • Peu encombrant, il assure le guidage en rotation.
Butée à billes simple effet	Diamètre de l'arbre : de 10 mm à 100 mm. Charge dyn. : 12 500 N à 83 000 N. Charge sta. : 8 500 N à 200 000 N. Vitesse : 15 000 min⁻¹ à 2 100 min⁻¹	 Simple effet Double effet	Simple effet	• Butée simple effet : encaisse les poussées axiales dans un seul sens. • Butée double effet : encaisse les poussées axiales dans les deux sens. • Vitesse de rotation limitée. • N'assure pas le guidage en rotation (nécessité d'un roulement). • Utilisée pour les arbres verticaux à faible vitesse et forte charge axiale.
Roulement combiné aiguilles-rouleaux	Diamètre de l'arbre : de 10 mm à 70 mm. Charge dyn. axiale : 4 860 N à 68 000 N. Charge sta. axiale : 5 300 N à 130 000 N. Vitesse : 15 500 min⁻¹ à 3 000 min⁻¹			• Ils peuvent être munis d'une contre-plaque mince ou épaisse. • Ils peuvent être utilisés avec une bague intérieure avec ou sans trou de graissage. • Ils supportent des charges axiales et radiales importantes. • Vitesse de rotation élevée. • Peu encombrant, il assure le guidage en rotation.

Doc. NADELLA

• La lubrification des roulements

ÉTUDE DE LA LUBRIFICATION DES ROULEMENTS

• Rôle de la lubrification

La lubrification est un élément essentiel pour le bon fonctionnement du roulement. En interposant un film d'huile entre les éléments roulants et les chemins de roulement, l'usure et l'échauffement des éléments en contact sont réduits.
La lubrification assure une protection contre l'oxydation et la pollution extérieure.

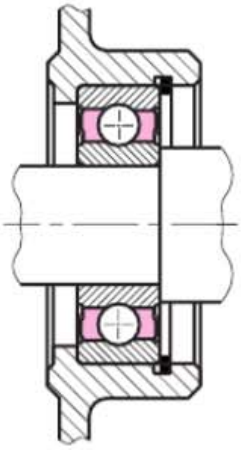
• Comparaison des lubrifications à l'huile et à la graisse

	La lubrification à l'huile	La lubrification à la graisse
Intérêt principal	Elle est généralement employée lorsque le roulement est intégré dans un mécanisme déjà lubrifié à l'huile (réducteur, boîte de vitesses).	Elle est de plus en plus utilisée : la graisse devient un composant à part entière du roulement. Elle permet dans certains cas le graissage à vie. Le choix de la graisse doit être rigoureux.
Limites de température	– en continu : 20 °C à + 140 °C – conditions exceptionnelles : 200 °C	– en continu : 30 °C à + 90 °C – conditions exceptionnelles : 200 °C
Avantages	– bonne pénétration dans le roulement – bonne stabilité physico-chimique – bon refroidissement (évacuation de la chaleur) – évacuation des corps étrangers – contrôle aisé du lubrifiant (état et niveau) – bonne tenue à la température	– graissage facile en des points éloignés du mécanisme – propreté du mécanisme – étanchéité plus facile qu'à l'huile – simplicité de mise en œuvre – utilisation possible de roulements prégraissés – démarrage doux
Inconvénients	– bonne étanchéité nécessaire – en cas d'arrêt prolongé, mauvaise protection contre l'oxydation – retard au démarrage (dans le cas de mise en circulation) – nécessite une centrale dans le cas de lubrification dispersée	– mauvaise tenue dans le roulement et limitation de la fréquence de rotation – coefficient de frottement plus élevé qu'avec de l'huile – contrôle de la lubrification délicate (nécessité d'un apport périodique) – température limite de fonctionnement
Dispositif de lubrification	– bain d'huile (mécanisme fermé) – à l'huile perdue (évacuation nécessaire) – ruissellement-projection (engrenage) – circulation d'huile (pompe) – brouillard d'huile (sous pression)	– garnissage manuel – roulement prégraissé – graissage par pompe et graisseurs – circuit de graissage centralisé – soupape à graisse

EXEMPLES DE LUBRIFICATION DES ROULEMENTS

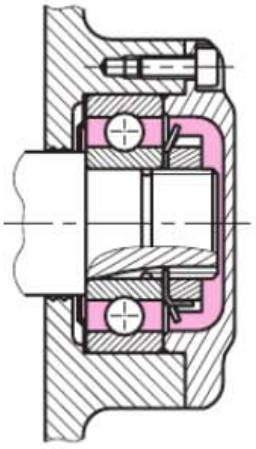
Exemples de lubrification à la graisse

Roulement étanche



Le roulement est garni de graisse à sa fabrication.
Il est donc lubrifié à vie.

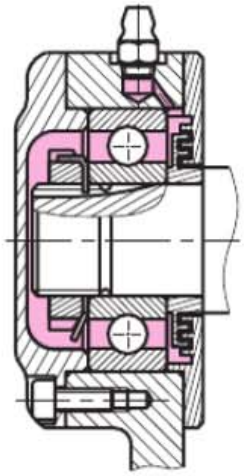
Graissage au montage



Le graissage s'effectue lors du montage ou des interventions de maintenance.

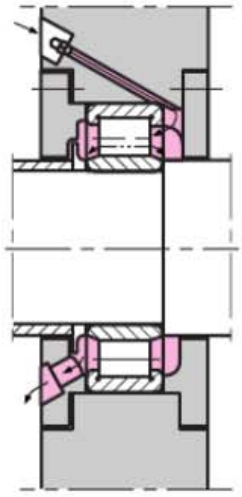
Exemples de lubrification à la graisse (suite)

Graissage par graisseur



Le graissage s'effectue de façon périodique.
La graisse usagée doit être évacuée en cas de graissages fréquents.

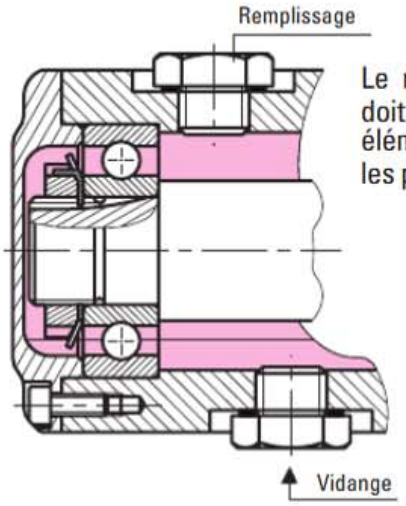
Graissage par pompe avec évacuation



Graissage par pompe qui est utilisé dans le cas de graissage périodique et éventuellement automatique.
Système de graissage muni d'un système d'évacuation et de récupération de la graisse usée.

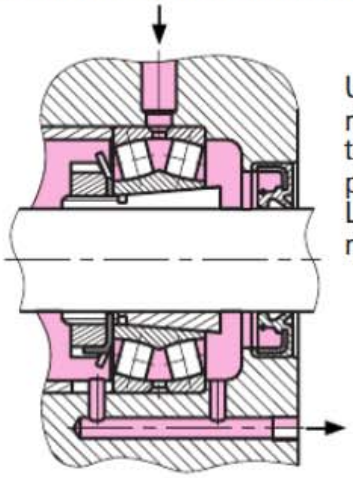
Exemples de lubrification à l'huile

Lubrification par bain d'huile



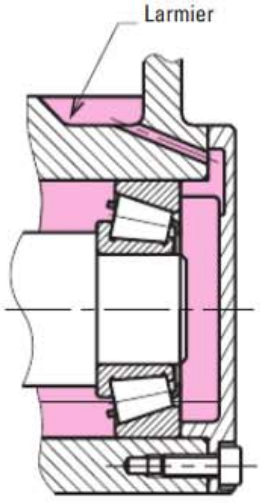
Le niveau d'huile doit atteindre les éléments roulants les plus bas.

Lubrification par circulation d'huile



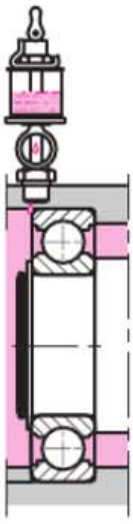
Une pompe assure un débit constant de l'huile sous pression.
L'huile peut être refroidie et filtrée.

Lubrification par ruissellement



Un larmier rapporté ou moulé dans le carter permet de récupérer l'huile des projections et la dirige vers les roulements.

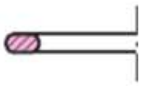
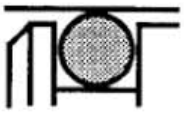
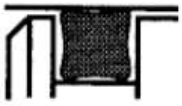
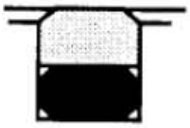
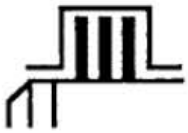
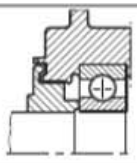
Lubrification par huile perdue



Une réserve d'huile placée dans la partie supérieure du système libère goutte à goutte le lubrifiant dans la boîte à roulement.
L'huile usée s'évacue par la partie inférieure.

• Étanchéité et protection des liaisons

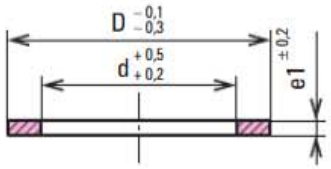
GUIDE DE CHOIX

Types \ Aptitudes		Type d'utilisation: Dynamique Trans.	Dynamique Rota.	Statique	Limites d'utilisation: Pression MPa	Temp. °C	Vitesse m/s
Joint circulaire				X		en fonction de la matière	
Joint métalloplastique				X		300 à 500	
Joint U. séal				X		60 à + 200	
Joint V. ring. S			X			40 à + 100 20 à +180	15
Joint torique		X	Joint spécial	X	10 à 35	60 à + 260	0,5
Joint quatre lobes		X	Joint spécial	X	10 à 40	60 à + 260	1
Joint à lèvre, radial			X		0,05 à 0,4	30 à + 200	12
Joint bague + torique		X			80	60 à + 200	0,2
Joint à lèvre U		X			15	30 à + 100	0,5
Joint à lamelles			X			+ 300 limitée par la température de la graisse	Très élevée
Joint à chicanes			X				

Matière ↓	Portée ↓ Ra µm	Remarques – Utilisation
Toutes		Bouchons de vidange. Passage de vis.
Cuivre plus amiante		Bouchons de vidange. Passage de vis.
Acier plus élastomère	1	Étanchéité des têtes de boulons et ajustement de bride. Ne peut pas être utilisé comme élément de sécurité.
Nitrile (NBR) fluoro-carbone (FPM)	0,3 à 1,5	Ce joint assure une étanchéité dynamique axialement (sur une surface, perpendiculairement à l'arbre) ; très utilisé dans les montages des roulements, idéal pour les roulements à rotule. Peut renforcer une étanchéité.
Nitrile fluoro-carbone	0,2 à 1	Applications nombreuses en statique et en dynamique. À partir de 50 MPa, il est conseillé de les monter avec des bagues anti-extrusion en PTFE.
Nitrile fluoro-carbone	0,2 à 0,6	Comme le joint torique il est utilisé pour les étanchéités dynamiques et statiques. Tiges, pistons. Bonne tenue en translation. Bonne durée de vie.
Nitrile fluoro-carbone	0,2 à 0,5	Assure l'étanchéité radiale des arbres tournants. Très utilisé dans le montage des roulements. Supporte une excentration maximale de 0,3 mm. La dureté de l'arbre doit être de : 45 HRC si $V < 5$ m/s, 60 HRC si $V \geq 5$ m/s.
Bague : PTFE Torique : élastomère	0,05 à 0,6	Étanchéité de pistons et tiges en mouvement linéaire alternatif. Vérins supportant de fortes pressions. Non recommandé pour les applications à mouvement hélicoïdal ou de rotation. Aucune usure de l'arbre.
Élastomère plus textile	0,2 à 0,3	Utilisé en général pour des vérins de moyenne pression, huile et autres fluides gras. Bonne étanchéité sous pression moyenne. Autoétanche dans un sens. Nécessité de deux joints dans le cas de pression alternée.
Acier à ressort	Sans contact	Étanchéité de paliers lubrifiés à la graisse. Utilisé comme complément de protection par exemple d'un joint à lèvre radial. Protègent contre les pénétrations d'impuretés. Bonne tenue aux hautes températures. Frottement très faible.
	Sans contact	Protègent contre les pénétrations d'impuretés. Pas de frottement au niveau des chicanes. Souvent associé avec un joint tournant. Sert de couvercle de la « boîte à graisse » des paliers à roulements.

JOINTS CIRCULAIRES
JOINTS MÉTALLO-PLASTIQUES

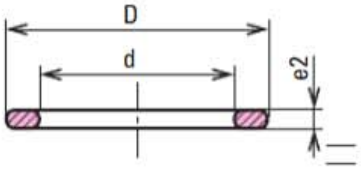
Joints circulaires



d	4	5	6		8		10		12	
D	8	9	10	12	12	14	14	16	16	18
e1		1							1,5	
e2	–	1,5							2	

d	14		15	16		18		20		21	
D	18	20	19	20	22	22	24	24	26	28	
e1	1,5										
e2	2										

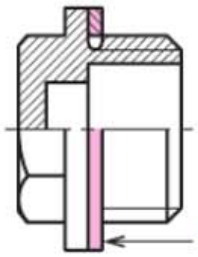
Joints métalloplastiques



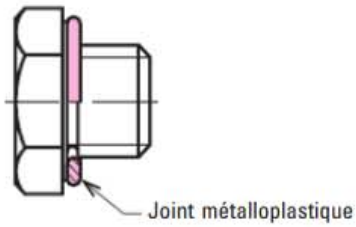
d	24	26	28	30	32	36	38	40	48
D	32	34	36	38	38	42	44	47	55
e1	2								
e2	2,5								

Exemples de montages

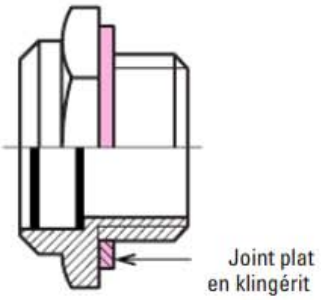
Bouchon de carter



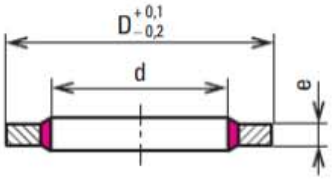
Bouchon de vidange



Voyant de niveau



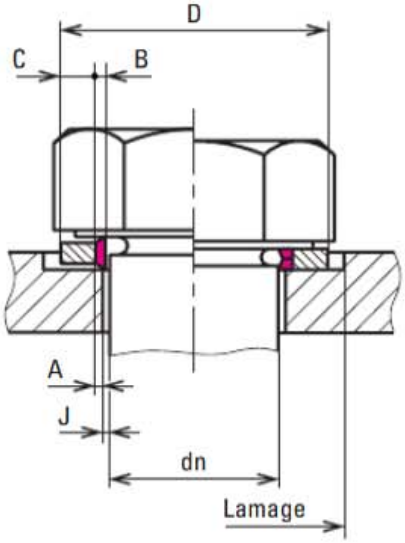
JOINTS U-SEAL



d	4,1	5,7	6,2	6,7	7	7,3	9,3
D	7,2	9	9,2	11	13,4	10,2	13,3
e	1	1	1	1	1,3	1	1

d	10,7	11,4	11,8	12,7	14	18,7	22,7
D	16	16,3	19,1	20	18,7	26	30
e	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2

Exemple de montage

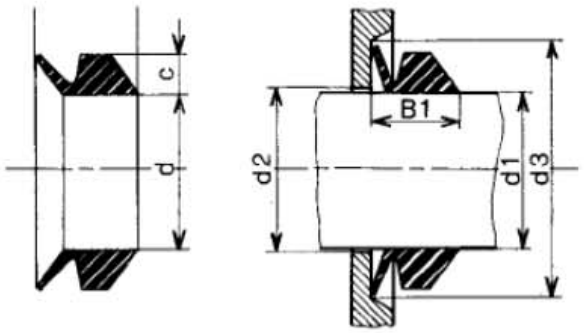


dn : diamètre nominal
A : plus grand que 75 % de **B**
B : largeur de la partie élastique du joint avant serrage.

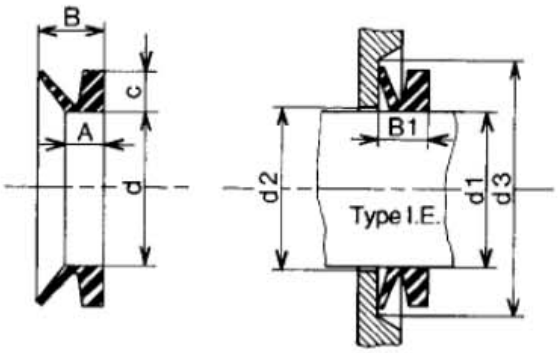
Dans le cas d'un jeu **J** important, le centrage du joint est rendu possible par un lamage dont le diamètre sera fonction du diamètre extérieur **D** du joint.

La portée **C** de la bague métallique du joint doit avoir une valeur minimale de 1 mm.

Joints V-ring S



Joint V-ring A

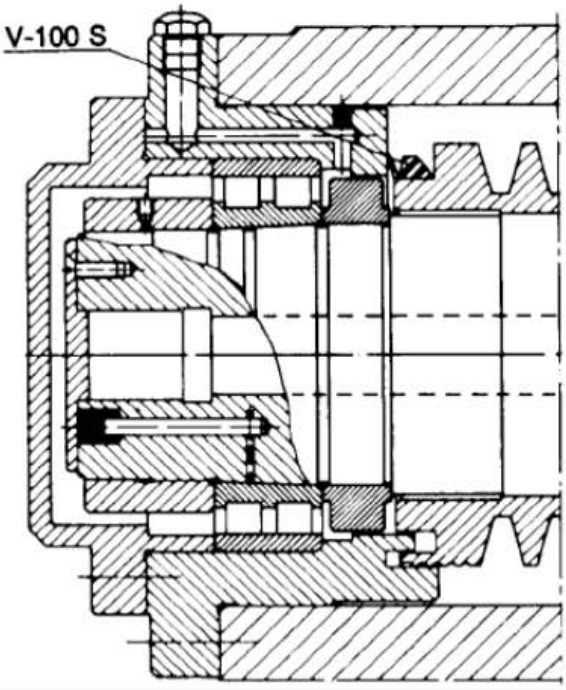


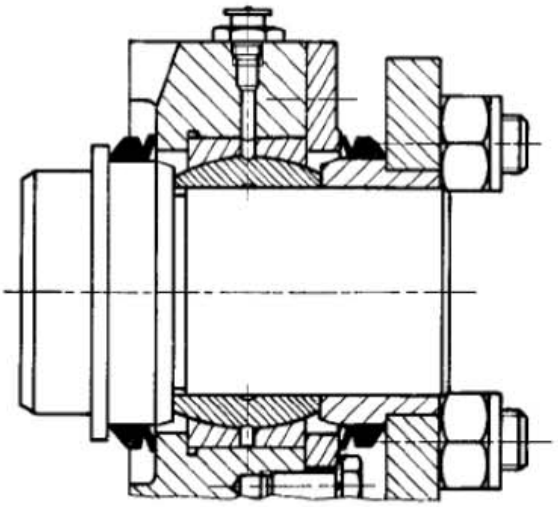
Conseils de montage
Le joint **V-ring** se monte sur l'arbre avec lequel il tourne. Il supporte un gros défaut de perpendicularité axe/surface frottante, c'est le joint idéal pour la protection des roulements à rotule.
Il admet un faux-rond de rotation.
Il peut subir un allongement important, jusqu'à 200 %, ce qui permet de le passer au-dessus des flasques ou des épaulements pour sa mise en place. Il fait facilement office de soupape de graisse.

- **Surface d'appui** : 0,3 < Ra ≤ 3 µm
- **Arbre** : très large tolérance, voir d1.
- **Excentration** : 0,4 à 3,6 mm avec 1,1 mm pour un ∅ 60 mm.
- **Obliquité** : 0 à 4° avec 2° pour un ∅ 60 mm.
- **Vitesses périphériques limites, joint tournant :**
  - décollement de la lèvre si V > 12 m.s^{-1} ; au-delà, il est nécessaire de maintenir le joint ;
  - nitrile (NBR) : sans blocage axial si V < 8 m.s^{-1} ;
  - fluorocarbone (FPM) : sans blocage axial si V < 6,5 m.s^{-1} ;
  - si le joint est fixe, la vitesse peut atteindre 20 m.s^{-1}.

∅ arbre d1	∅ joint d	hauteur c	d2 maxi	d3 mini	B1	∅ arbre d1	∅ joint d	hauteur c	d2 maxi	d3 mini	B1
4,5- 5,5	4	2	d1+1	d1+6	4,5±0,4	19-21	18	4	d1+2	d1+12	9,0±0,8
5,5- 6,5	5	2				21-24	20	4			
6,5- 8,0	6	2				24,27	22	4			
8,0- 9,5	7	2				27,29	25	4	d1+3		
9,5-11,5	9	3	d1+2	d1+9	6,7±0,6	29-31	27	4			
11,5-13,5	10,5	3				31-33	29	4			
13,5-15,5	12,5	3				33-36	31	4			
17,5-19,0	16	3				36-38	34	4			

V-100 S





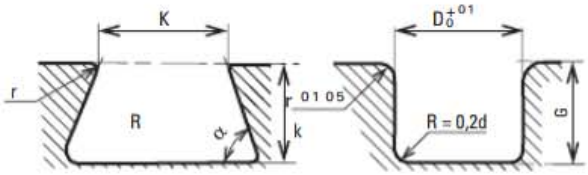
Joints V-ring

Doc. SKF

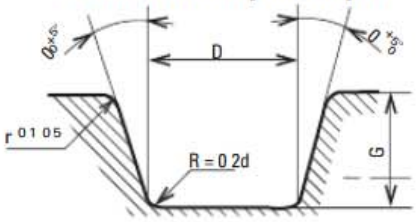
Caractéristiques

Utilisation statique

Gorges trapézoïdales ($\alpha = 60°$) **Gorges rectangulaires**

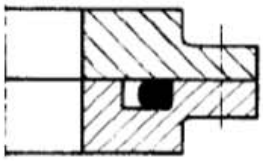


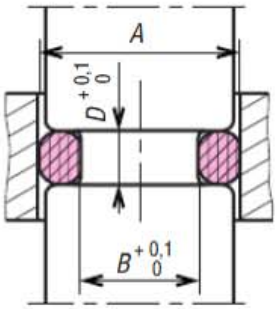
Utilisation dynamique

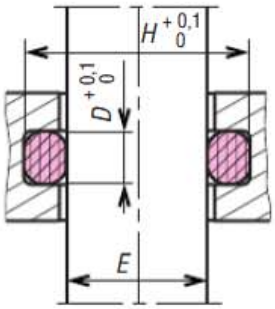


Ød (mm)	K ± 0,05 (mm)	k 0 0,05 (mm)	R (mm)	r (mm)
1,90	1,75	1,4	0,2	0,1
2,70	2,45	1,9	0,3	0,15
3,60	3,3	2,6	0,3	0,15
5,33	4,9	4	0,5	0,25
6,99	6,4	5,2	0,7	0,3
8,00	7,3	6	0,8	0,4

B = A 2 G G = Ød Xd X = 12 à 18 %
H = E + 2 G D = Ød + xd x = 27 à 35 %





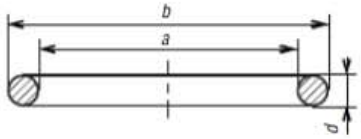


États de surface :
- radial (tige, cylindre) 0,2 < Ra < 1 µm
- axial (plan en statique) 0,2 < Ra < 1 µm

Parois de la gorge :
- en statique 1,5 < Ra < 4 µm
- en dynamique 1,5 < Ra < 2,5 µm

Ajustements moyeu/arbre :
- p < 8 MPa H7f7
- p ≥ 8 MPa H7g6

Dimensions du joint



Dimensions (extrait)

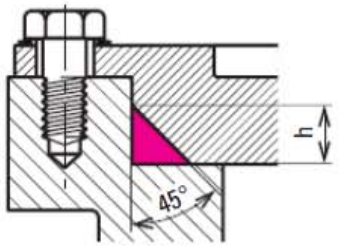
Ø int. a	Ø ext. b	Ø joint d
2,4	6,2	1,90
4,9	8,7	
7,2	11,0	
16	19,8	
8,9	14,3	2,70
12,1	17,5	

Ø int. a	Ø ext. b	Ø joint d
15,1	20,50	2,70
27,3	32,70	
18,3	25,50	3,60
24,6	31,80	
30,8	38,00	
43,4	50,60	

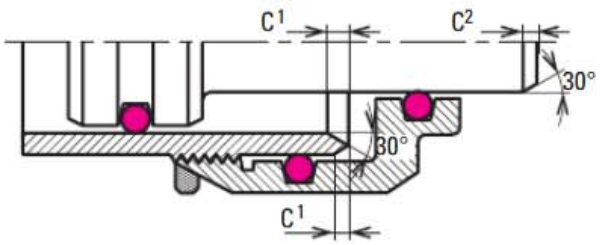
Ø int. a	Ø ext. b	Ø joint d
37,47	48,13	5,33
50,17	60,83	
69,22	79,88	
85,09	95,75	
100,97	111,63	
113,67	127,66	

Ø int. a	Ø ext. b	Ø joint d
113,67	127,65	6,99
135,89	149,87	
151,77	165,75	
189,87	203,85	
240,67	254,65	
354,97	368,95	

Exemples de montages



Montage sur couvercle
h = Ø du tore (d) × 1,32 à 1,35

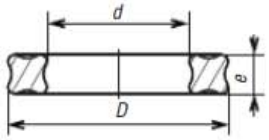


Ø d du joint jusqu'à 3,6	C1 (cylindre) 1,5	C2 (piston) 2,5
de 3,6 à 5,33 inclus	2,5	4
au-delà de 5,33	3	4

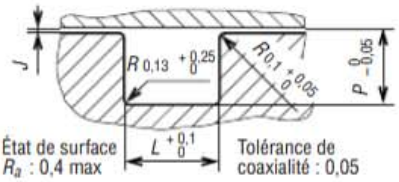
Caractéristiques

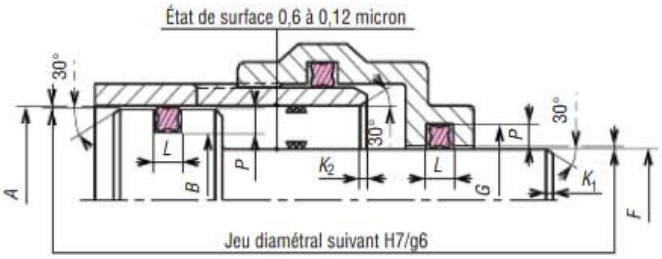
Dimensions du joint

Joint



Gorge





Montages

Calcul du diamètre de fond de gorge

Tolérances

Joint (e)	Compression radiale				Excentration maxi	Tolérances			
	Dynamique		Statique			B	G	L	e
	maxi	mini	maxi	mini					
1,78	0,360	0,175	0,460	0,275	0,05	+0,1 0	0 −0,1	2 +0,2	± 0,08
2,62	0,400	0,215	0,450	0,265	0,05	+0,1 0	0 −0,1	3 +0,2	± 0,08
3,53	0,430	0,205	0,530	0,305	0,076	+0,12 0	0 −0,12	4 +0,2	± 0,10
5,33	0,560	0,250	0,710	0,400	0,10	+0,15 0	0 −0,15	6 +0,2	± 0,13

États de surface

Rugosité Ra (µm)
Radial (tige cylindrique) 0,12 < Ra < 0,6 Gorges – statique : 1 < Ra < 4 – dynamique : 1 < Ra < 2,5

Remarque
Le tableau suivant donne les dimensions d'implantation des joints dans le cas de serrages minimaux et à partir d'ajustement cylindre / tige ou cylindre / piston H7 g6. Le tableau de calcul ci-dessus permet de traiter d'autres montages particuliers.

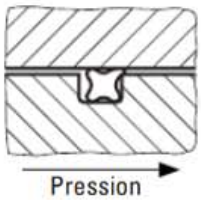
JOINTS À QUATRE LOBES

Dimensions (extrait)

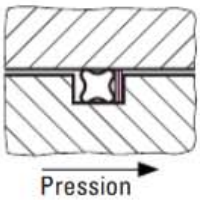
Montage dans l'arbre		Montage dans l'alés.		Gorge		Joint		
A (H7)	B	F (g6)	G	L	P	d	D	e
5	2,500	1		1,7		2		1,5
9	4,875	4	7,128	2	1,57	4,47	8,03	1,78
10	6,875	6	9,128	2	1,57	6,07	9,63	1,78
16	11,198	11	15,803	2,9	2,41	10,78	16,02	2,62
20	15,201	14	18,803	2,9	2,41	13,95	19,19	2,62
24	19,201	18,5	23,303	2,9	2,41	18,72	23,96	2,62
27	20,461	20	26,540	3,9	3,28	20,22	27,28	3,53
32	25,465	25	31,540	3,9	3,28	24,99	32,05	3,53

Montage dans l'arbre		Montage dans l'alés.		Gorge		Joint		
A (H7)	B	F (g6)	G	L	P	d	D	e
35	28,465	27,5	34,040	3,9	3,28	28,17	35,23	3,53
40	33,465	32	38,535	3,9	3,28	32,92	39,98	3,53
42	35,465	34	40,535	3,9	3,28	34,52	41,58	3,53
45	38,465	37	43,535	3,9	3,28	37,70	44,75	3,53
50	40,025	40	49,975	6,1	5	40,64	51,30	5,33
57	47,030	47	56,975	6,1	5	46,99	57,65	5,33
59	49,030	49	58,975	6,1	5	50,16	60,83	5,33
69	59,030	59	68,971	6,1	5	59,69	70,35	5,33

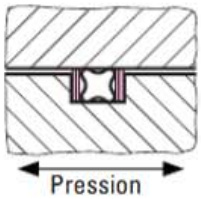
Exemples de montages



Quad-Ring sans bague anti-extrusion.

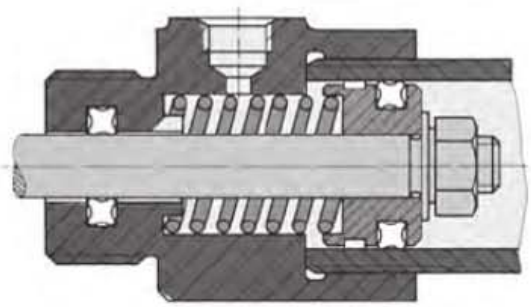


Quad-Ring avec 1 bague anti-extrusion.



Quad-Ring avec 2 bagues anti-extrusion.

Pour un meilleur maintien du joint quatre lobes, on peut monter une bague anti-extrusion dans le sens opposé à la pression.

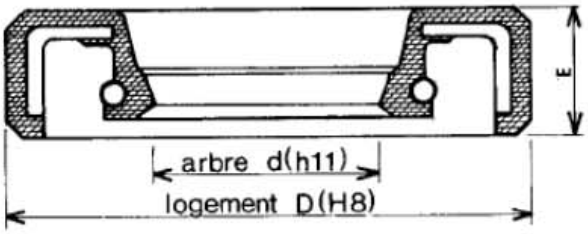


Vanne de régulation

Étanchéité de la commande pneumatique d'une **vanne de régulation** par des joints Quad-Ring et un segment de guidage de piston. Ce dispositif travaille d'une manière satisfaisante dans une large plage de pression et reste prêt à servir, même après une longue immobilisation, grâce aux Quad-Rings avec revêtement Xsel.
Le frottement de décollement est très bas.

Doc. BUSAK-SHAMBON

Caractéristiques



Dimensions

Type I.E.

Type I.E.L.

Conseils de montage

Cas des montages des roulements :

– lubrification à l'huile : les lèvres d'étanchéité sont dirigées vers l'intérieur du mécanisme ;

– lubrification à la graisse : dans le cas de renouvellement de la graisse par graisseur, au moins un des joints a sa lèvre d'étanchéité dirigée vers l'extérieur du mécanisme afin de permettre l'évacuation des graisses usagées.

– **Logement** : ∅ D H8 avec Ra ≤ 2,5 µm.

– **Arbre** : ∅ h11 avec 0,1 < Ra < 0,3, dureté 45 HRC si V < 5 m/s, de 60 HRC si V ≥ 5 m/s.

– Profondeur du logement ≥ E.

– **Fréquences de rotation limites** : pour des diamètres d < 60 mm et pour des différences de pression faibles :

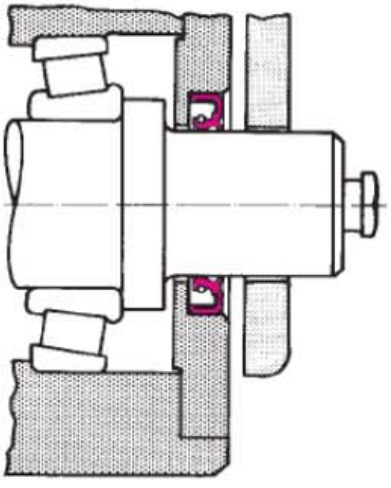
- nitrile (NBR) : V < 3 000 tr. min^{-1} ;
- fluorocarbone (FPM) : V < 10 000 tr. min^{-1}.

Dimensions (extrait)

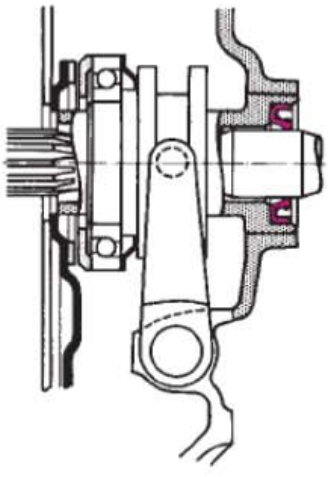
Dimensions			Type		Matière	
d	D	E	IE	IEL	NBR	FPM
8	22	8	•		•	•
10	25	8	•		•	
12	28	8	•	•	•	
15	30	8	•		•	
18	35	8	•		•	
20	38	8	•	•	•	
22	40	8	•	•	•	
25	42	8	•		•	•
32	50	8	•		•	
38	55	10	•	•	•	•
42	60	12	•		•	
48	68	12	•		•	
52	75	12	•			•

Dimensions			Type		Matière	
d	D	E	IE	IEL	NBR	FPM
28	45	8	•		•	•
30	48	8	•		•	•
35	52	10	•	•	•	•
40	58	10	•	•	•	•
45	62	12	•		•	
50	72	12	•		•	•
55	75	12	•	•	•	•
58	80	12	•		•	•
60	80	12	•		•	•
70	90	12	•	•	•	
62	85	12	•		•	•
65	85	12	•	•	•	•
75	95	12	•		•	•

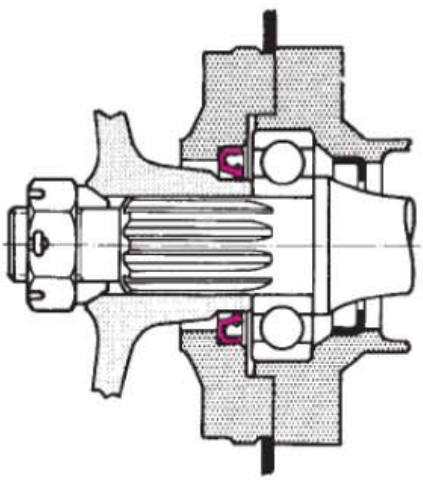
Exemples de montages pour automobiles



Joint IEL sur axe de rouleaux porteurs



Joint IE en sortie d'embrayage



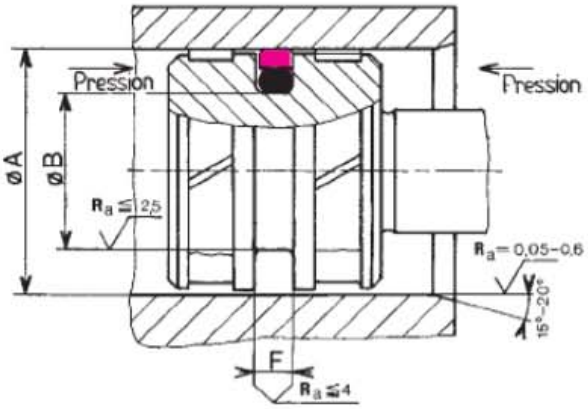
Joint IE de moyeu de roues arrière

Doc. PAULSTRA

BAGUE PTFE PLUS JOINT TORIQUE

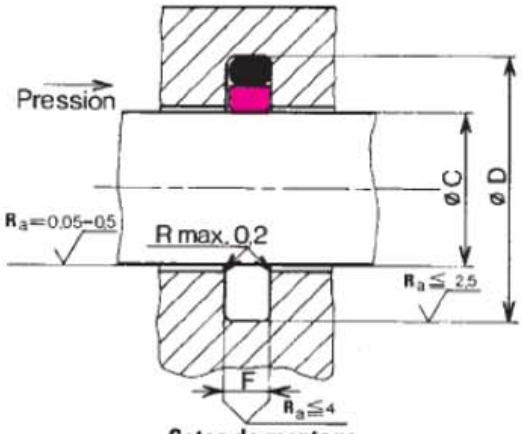
Doc. BUSAK-SHAMBON

Étanchéité extérieure double effet



Cotes de montage

Étanchéité intérieure double effet

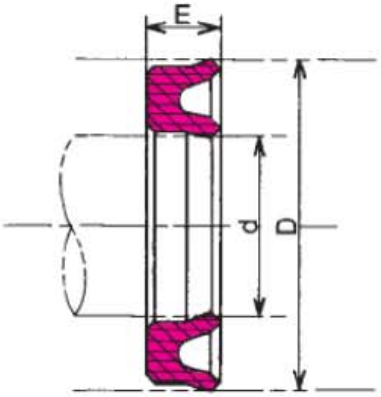


Cotes de montage

BAGUE À LÈVRES U POUR ARBRES COULISSANTS

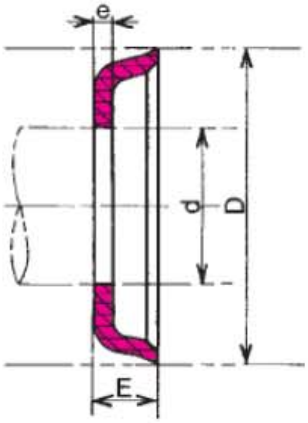
Doc. PAULSTRA

Type symétrique

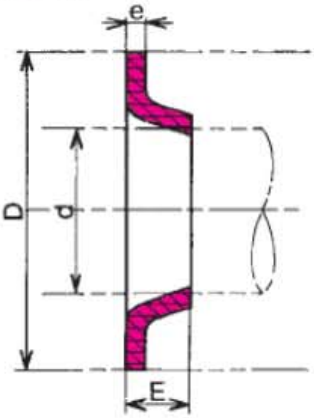


Largeur de gorge E + 1 mm

Type simple lèvre



Coulissant extérieur

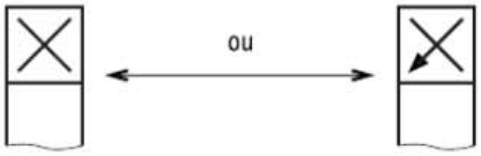


Coulissant intérieur

REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DES JOINTS À LÈVRES

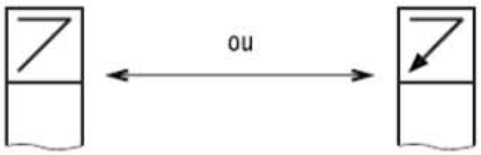
Doc. NILOS-SKF

Représentation générale

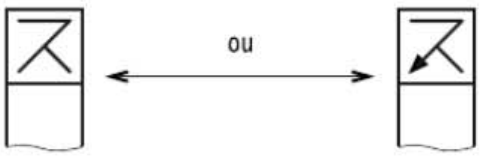


Tracer le logement exact du joint et représenter une croix située au centre.
Préciser par une flèche l'étanchéité principale à assurer.

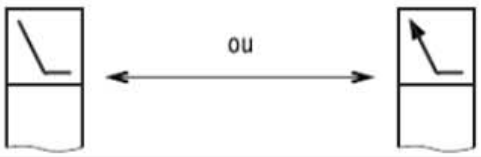
Représentation particulière



Joint d'étanchéité à lèvre **à frottement radial.**



Joint d'étanchéité à lèvre **à frottement radial avec lèvre antipoussière.**

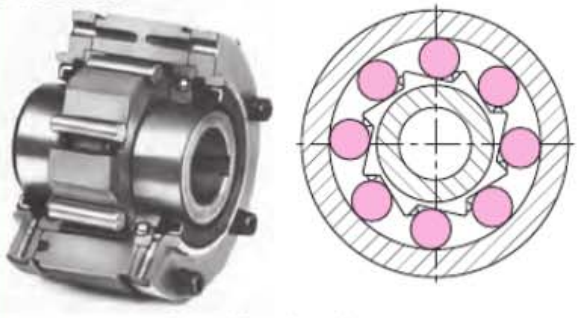


Joint d'étanchéité annulaire **en V à frottement radial** V-Ring S ou A.

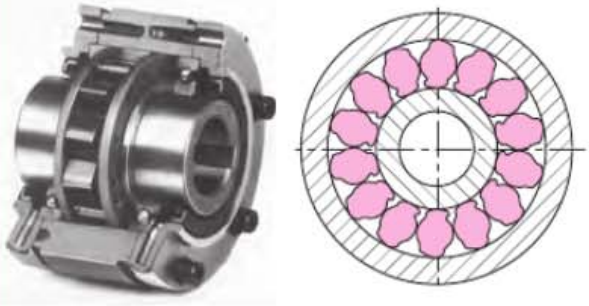
• Roues libres

FONCTION ET EXEMPLES DE MONTAGES

Fonction



Roue libre à rouleaux



Roue libre à galets à profil complexe

Les roues libres sont des composants mécaniques de sécurité unidirectionnels utilisés en transmission de puissance. On peut les assimiler à des accouplements ne pouvant fonctionner que dans un seul sens ; ils ne présentent cependant pas une sécurité « absolue » car leur fonctionnement est basé sur l'adhérence entre les pièces en contact.

Dans un sens de rotation, la roue libre tourne librement sans solidariser la bague intérieure avec la bague extérieure.

Dans l'autre sens de rotation, les bagues intérieure et extérieure sont solidarisées ; il y a alors accouplement de l'arbre et du moyeu entre lesquels est montée la roue libre.

Les roues libres utilisent différentes formes de galets :

– *des rouleaux cylindriques ou des aiguilles :* la bague intérieure comporte des rampes de blocage et la bague extérieure possède une piste cylindrique ou inversement

– *des galets à profils complexes :* les bagues intérieures et extérieures comportent des pistes cylindriques concentriques.

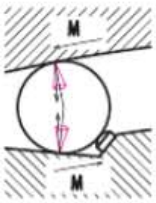


Figure 1

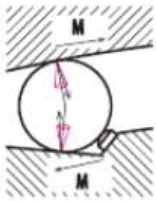


Figure 2

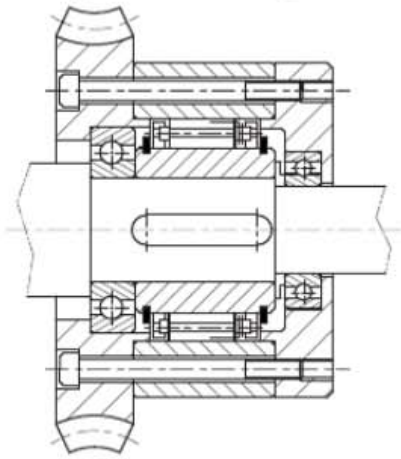
Principe de fonctionnement

Les roues libres à rouleaux ou aiguilles peuvent comporter des rampes de blocage soit dans la bague extérieure soit sur la bague intérieure. La figure 1 représente une roue libre avec les rampes réalisées sur la bague intérieure. Dans ce cas, la bague extérieure peut tourner en « phase roue libre » dans le sens horaire.

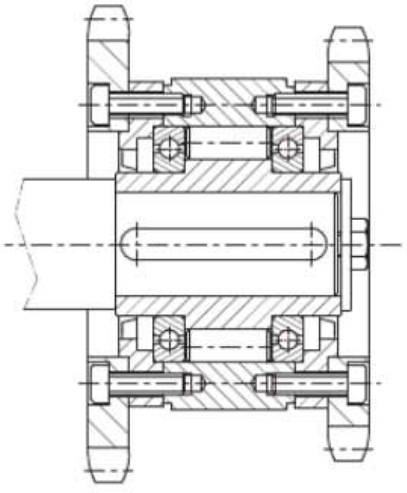
Dans le cas de la figure 1, si on maintient la bague intérieure immobile, on engendre l'auto-blocage en essayant de faire tourner la bague extérieure en sens opposé ; le rouleau est en équilibre sous l'action des bagues (le poids du galet et l'action du ressort ont été négligés car ils sont faibles devant les actions de contact des bagues sur le rouleau).

Dans le cas de la figure 2, si on maintient la bague intérieure immobile et si on fait tourner la bague extérieure dans le sens horaire, le système se comporte en « roue libre » ; le rouleau n'est plus en équilibre et il y a mouvement relatif entre les éléments.

Exemples de montage



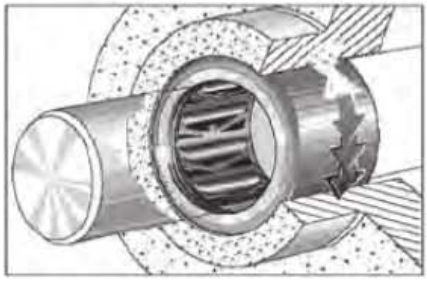
Roue libre incorporée sur système roue et vis sans fin



Roue libre incorporée sur système roue à chaînes

D'après SIAM RINGSPANN

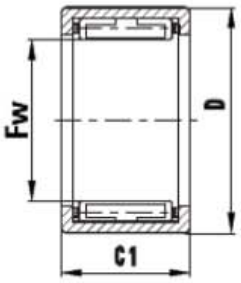
Les roues libres INA ont un encombrement radial très réduit et permettent d'exploiter au mieux l'espace disponible. Elles possèdent une bague extérieure en tôle emboutie comportant des surfaces de blocage sur sa face interne. Les aiguilles prennent appui sur cette surface. Elles sont maintenues et guidées par une cage en matière plastique.
Des ressorts métalliques ou en matière plastique assurent un positionnement précis des aiguilles prêtes au blocage. Une flèche gravée sur la face de la roue libre indique le sens du blocage.

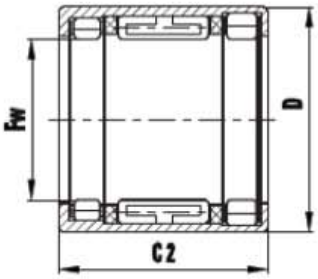


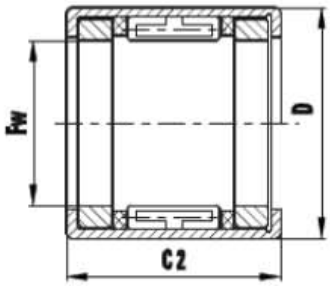
Roue libre INA

Roue libre combinée avec roulements INA

Roue libre combinée avec bagues lisses INA







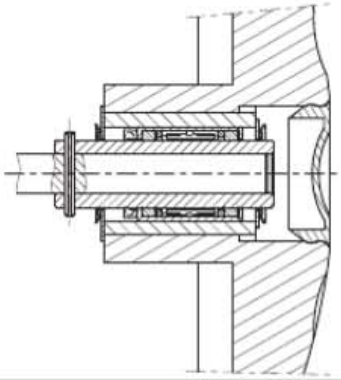
Extraits dimensionnels

Arbre, diamètre	Dimensions (mm)				Vitesse limite tr/min (1)		Couple admissible Nm
	Fw	D	C1	C2	Arbre tournant	Bague extérieure tournante	
3	3	6,5	6	8	45 000	8 000	0,18
4	4	8	6	8	34 000	8 000	0,34
6	6	10	12	15	23 000	13 000	1,76
8	8	12	12	22	17 000	12 000	3,15
10	10	14	12	22	14 000	11 000	5,3
12	12	18	16	26	11 000	8 000	12,2
14	14	20	16	26	9 500	8 000	17,3
16	16	22	16	26	8 500	7 500	20,5
16	16	24	16	26	7 500	7 500	24,1
20	20	26	16	26	7 000	6 500	28,5
25	25	32	20	30	5 500	5 500	66
30	30	37	20	30	4 500	4 500	90

(1) : pour lubrication à la graisse ou à l'huile

Exemple de montage

Montage d'une roue libre combinée INA entre un axe et un moyeu de roue.

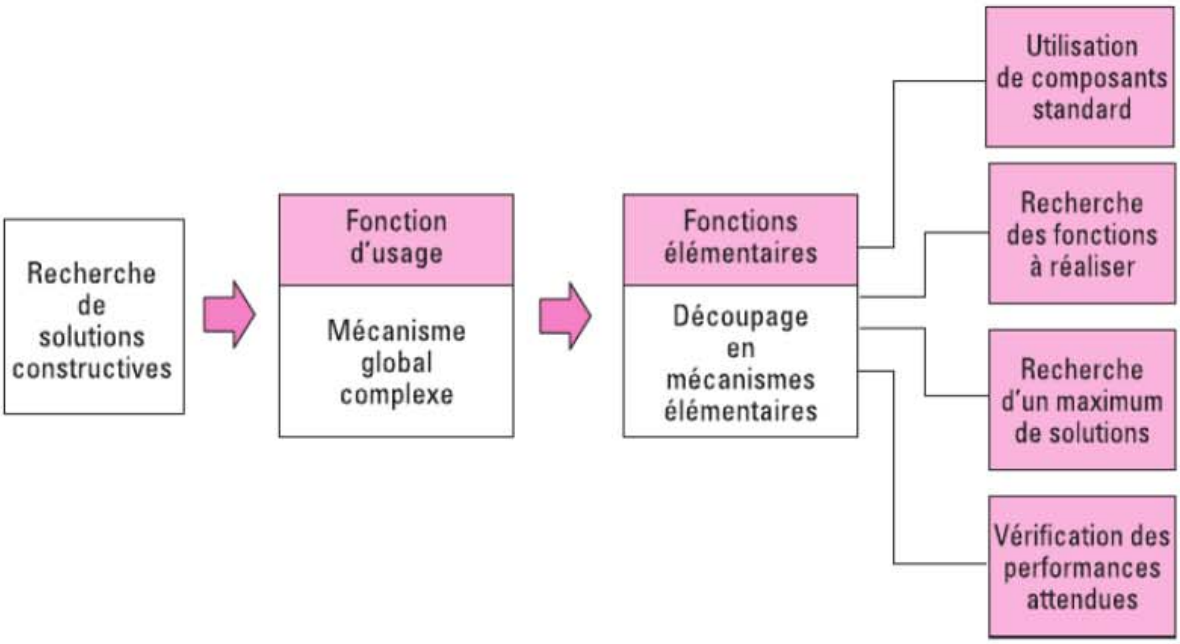


Doc. INA

• Recherche de solutions constructives

AVANT-PROJET : RECHERCHE DE SOLUTIONS CONSTRUCTIVES

La recherche de **solutions constructives** conduit à l'étude de plusieurs **avant-projets**.



CONSTRUCTION PAR ASSEMBLAGE DE MONTAGES FONCTIONNELS

Module fonctionnel : mécanisme qui permet un assemblage avec d'autres mécanismes, réalisant ainsi une fonction technique spécifique (paliers, guidages linéaires, mouvements croisés...).

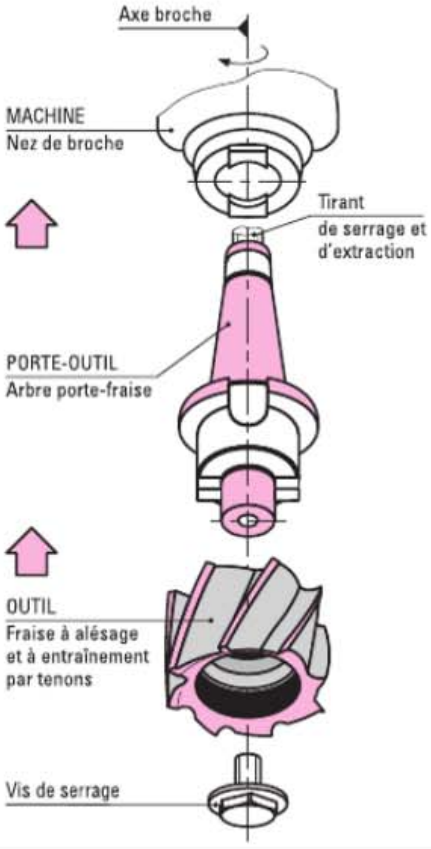
Interface : zone commune permettant l'assemblage de deux mécanismes ou modules ou pièces (manchons d'accouplement sur un arbre, bride de moteur sur boîtier de moteur, vérins sur mécanisme...).

Construction modulaire : assemblage de plusieurs modules réalisant une fonction globale (montages d'usinage modulaires, robots électroménagers...).

La construction modulaire permet :
- une rapidité à la conception,
- à partir d'un module de base, d'obtenir une variété de solutions technologiques adaptatives,
- une grande rapidité de réalisation,
- une grande flexibilité,
- une maintenabilité aisée et rapide,
- une démarche rapide pour une éventuelle réutilisation.

La mise en œuvre d'une construction modulaire se réalise à l'aide des catalogues dimensionnels des composants ou de « bibliothèques » pour les postes DAO.

Exemple d'un montage modulaire ci-contre : **outil (fraise), porte-outil, nez de broche.**



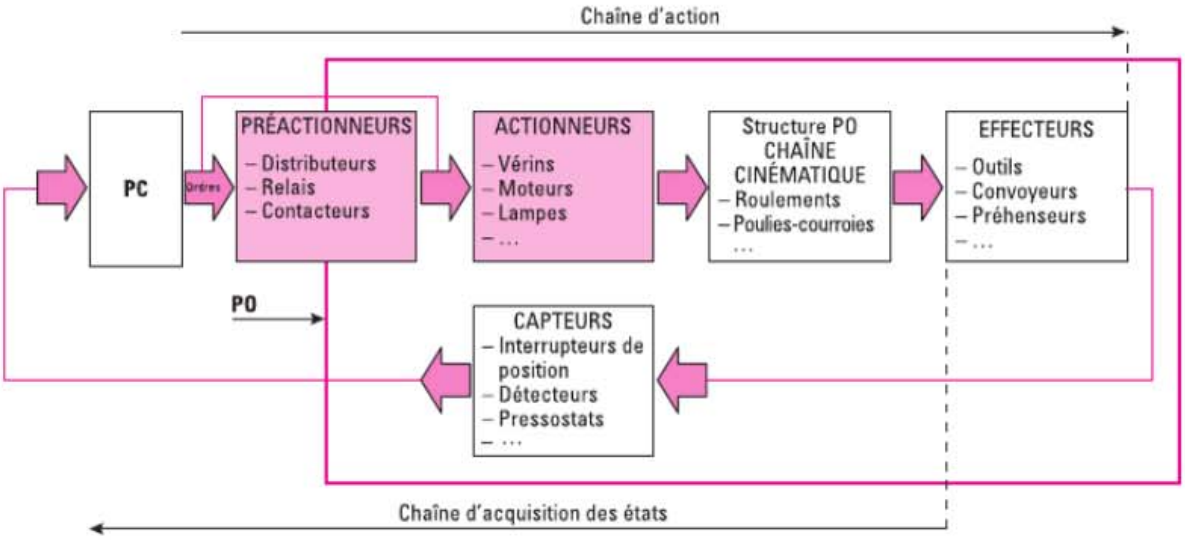
3 Transmission de puissance

3.1. TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE 94
3.2. LES VÉRINS 95
3.2.1. Description d'un vérin et de ses accessoires 95
3.2.2. Guide de choix d'un vérin 96
3.2.3. Détermination du diamètre d'un vérin 98
3.2.4. Exemple de distributeur 99
3.2.5. Alimentation d'une installation pneumatique 99
3.2.6. Mise en situation des vérins 100
3.2.7. Symboles pneumatiques et hydrauliques 101
3.3. TRANSMISSION DE PUISSANCE SANS TRANSFORMATION DE MOUVEMENT 103
3.3.1. Les engrenages 103
– Caractéristiques générales 103
– Engrenages cylindriques à denture droite 104
– Engrenages cylindriques à denture hélicoïdale 106
– Engrenages coniques à denture droite à axes concourants 108
– Roues et vis sans fin 109
– Représentation des engrenages 111
3.3.2. Réducteurs de vitesse à engrenages 112
– Réducteur à un engrenage 112
– Réducteurs étagés 112
– Réducteurs à trains épicycloïdaux 114
3.3.3. Embrayages 116
3.3.4. Freinage 117
3.3.5. Transmission par pignons – chaînes 119
3.3.6. Transmission par poulies – courroies 121
– Caractéristiques de la transmission 121
– Guide de choix d'une courroie 122
– Poulies et courroies trapézoïdales 123
– Poulies et courroies synchrones 124
3.3.7. Variateurs de vitesse à courroie 125
3.3.8. Accouplements 126
– Accouplements rigides 126
– Accouplements élastiques (Guide de choix) 128
– Accouplements élastiques, dimensionnement 129
– Joints de cardan 130
3.4. TRANSMISSION DE PUISSANCE AVEC TRANSFORMATION DE MOUVEMENT 131
3.4.1. Système vis – écrou 131
3.4.2. Systèmes bielle-manivelle 133
3.4.3. Cames industrielles 134

3.1. TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE

PRÉACTIONNEURS ET ACTIONNEURS DANS LA CHAÎNE FONCTIONNELLE

• Transformation de l'énergie (préactionneurs et actionneurs)



La figure ci-dessus montre que la partie commande PC transmet des ordres vers la partie opérative PO,

- soit directement à l'actionneur si sa puissance est faible (voyant, moteur faible puissance) ;
- soit, et beaucoup plus généralement, par l'intermédiaire d'un préactionneur qui remplit ainsi son rôle d'interface dans ce dialogue.

CONVERSIONS ÉNERGÉTIQUES AVEC ACTIONNEURS ASSOCIÉS

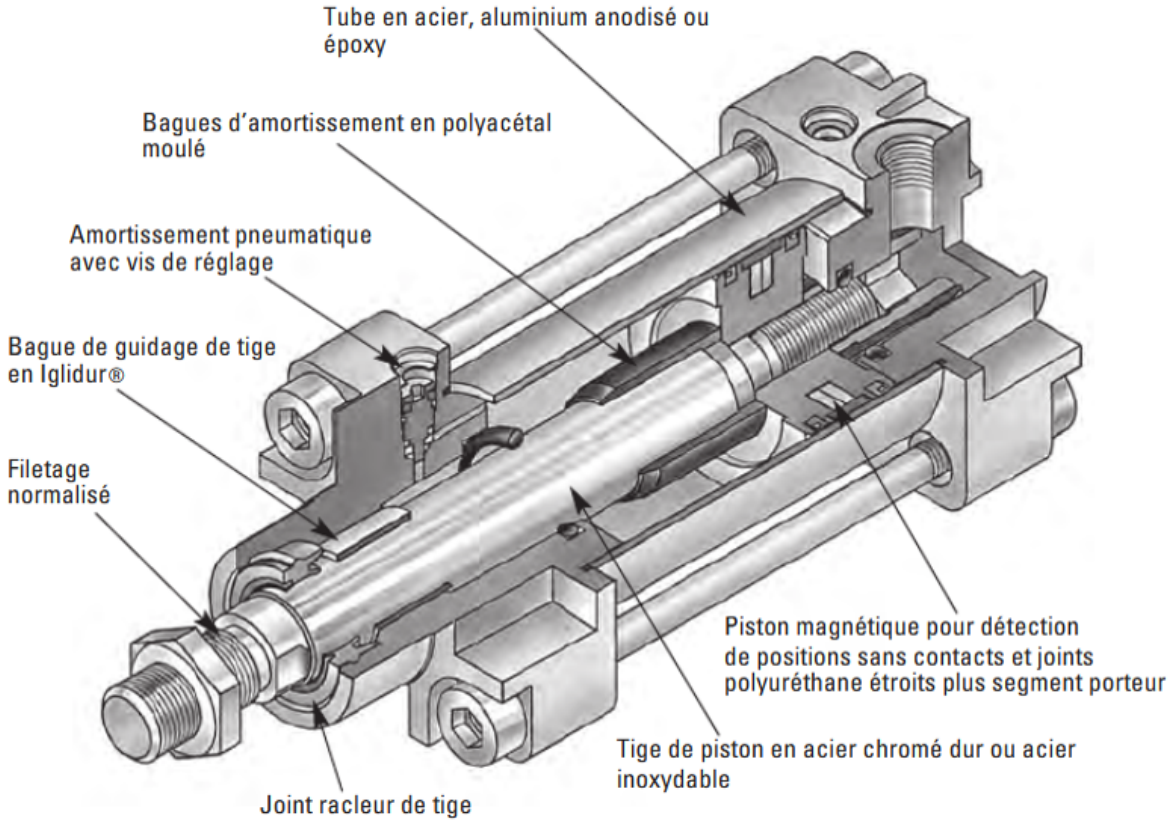
Énergie convertie (A) / Énergie d'entrée (E)	Mécanique (S)	Électrique (S)	Calorifique (S)	Chimique (S)	Rayonnante (S)	Pneumatique (S)	Hydraulique (S)
Électrique (E)	Moteur électrique	Onduleur Transformateur	Résistance chauffante	Accumulateur	Lampes à incandescence		
Calorifique (E)	Turbine à vapeur		Échangeur thermique	Réacteur chimique			
Chimique (E)	Moteur à combustion	Piles Accumulateur	Brûleur	Réacteur chimique de synthèse			
Rayonnante (E)		Cellules solaires	Chaudière	Photosynthétiseur	Laser		
Mécanique (E)		Générateur	Pompe à chaleur				
Pneumatique (E)	Vérin pneumatique					Ventouse pneumatique	Accumulateur hydropneumatique
Hydraulique (E)	Vérin hydraulique					Accumulateur hydropneumatique	Amplificateur de pression
Travail actions mécaniques (E)	Mécanisme de transmission					Compresseur pneumatique	Pompe hydraulique

3.2. LES VÉRINS

3.2.1. DESCRIPTION D'UN VÉRIN ET DE SES ACCESSOIRES

PRINCIPAUX COMPOSANTS

Vérins normalisés ISO 6431, NF E 49-003



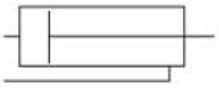
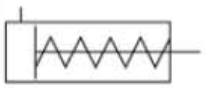
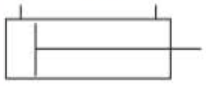
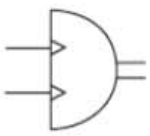
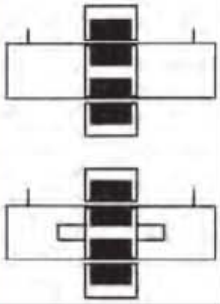
FIXATIONS ET EMBOUTS

Fixation des vérins et embouts de tige

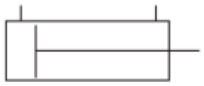
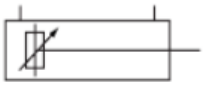
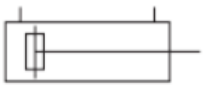
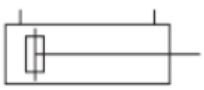
DoC. NORGREN-HERION

3.2.2. GUIDE DE CHOIX D'UN VÉRIN

Doc. JOUCOMATIC

Type / Aptitudes		Symboles	Caractéristiques physiques	Observations-Applications
Vérins spéciaux	Vérins filetés	Simple effet	– Fluide de commande : air ou gaz neutre filtré, lubrifié ou non. – Pression d'utilisation : - 3 à 7 bars (simple effet), - 1,5 à 7 bars (double effet). – Température d'utilisation : de + 5 à 60 °C. – Corps en laiton nickelé. – Tige en acier inox. – Raccordement par canules.	– Vérins compacts avec orifices d'alimentation sur la face arrière. – Grande facilité d'adaptation sur tous supports par trous lisses ou taraudés. – Possibilité de réglage axial de la position du corps par rapport au support : – Diamètres : 6-10-16 mm. – Course : 5-10-15 mm.
	Vérins filetés	 Double effet		
	Vérins à faible course	 Simple effet  Double effet	– Fluide de commande : air ou gaz neutre filtré, lubrifié ou non. – Pression d'utilisation : 2 à 10 bars. – Corps en alliage léger – Tige en acier inox ou acier chromé.	– Force à la poussée à 6 bars : de 2,5 à 285 daN. – Diamètres : de 8 à 80 mm. – Courses : 4-5-10-25 mm. – Fixation frontale ou arrière. – Utilisés en serrage, verrouillage, positionnement…
	Vérins rotatifs		– Fluide de commande : air ou gaz neutre filtré, lubrifié ou non. – Pression d'utilisation : 1 à 7 bars. – Température d'utilisation : de + 5 à + 60 °C. – Corps en aluminium. – Tige en acier.	– Versions simple tige et double tige traversante. – Fixations diverses. – Possibilité d'adaptation d'un détecteur magnétique. – Diamètres : 12-20 mm. – Rotation : 90 ou 180°.
	Vérins sans tige		– Fluide de commande : air ou gaz neutre filtré, lubrifié ou non. – Pression d'utilisation : 8 bars maximum. – Diamètres : 25 à 63 mm. – Courses : 100 à 3 500 mm. – Température d'utilisation : 10 à + 65 °C.	– Utilisés pour les mouvements à grande course. – Réduisent de moitié l'espace d'évolution grâce à l'absence de tige. – Simplifient la conception grâce à l'absence de tige. – Utilisations diverses.

GUIDE DE CHOIX D'UN VÉRIN (suite)

Aptitudes / Type		Symboles	Caractéristiques physiques	Observations-Applications
Vérins à tirants double effet	Vérins standard à tirants affleurants	 double effet	– Fluide de commande : air ou gaz neutre filtré, lubrifié ou non. – Pression d'utilisation : 10 bars maximum. – Température d'utilisation : de – 10 à + 70 °C. – Tube acier étiré glacé ou chromé dur. – Tige acier chromé dur. – Flasques alliage léger. – Paliers métalliques auto-lubrifiants. – Amortissement pneumatique, réglable des deux côtés ou non amorti. – Diamètres : de 32 à 250 mm. – Courses : de 50 à 600 mm.	– Normalisation : ISO-CÉTOP ou CNOMO-AFNOR. – Fixations diverses. – Possibilité d'adaptation de détecteurs magnétiques de position. – Longueurs d'amortissement : - Ø 32 : 15 mm - Ø 40-50 : 20 mm - Ø 63-80 : 21 mm - Ø 100-125 : 24 mm - Ø 160-200 : 30 mm
	Vérins standard à tirants dépassants	 double effet avec amortissement pneumatique réglable		
Vérins cylindriques sans tirants d'assemblage	Vérins ISOCLAIR	simple effet SES  double effet amortisseur élastique	– Fluide de commande : air ou gaz neutre filtré, lubrifié ou non. – Pression d'utilisation : 2 à 10 bars. – Température d'utilisation : de – 10 à + 70 °C. – Tube acier (sans détecteur). – Tube amagnétique (avec détecteur magnétique). – Tige acier chromé dur. – Flasques alliage léger. – Amortissement pneumatique, réglable des deux côtés ou non amorti.	– Normalisation ISO-CÉTOP. – Possibilité d'adapter des détecteurs magnétiques. – Fixations diverses. – Diamètres : de 8 à 25 mm. – Course simple effet : 25 à 50 mm. – Course double effet : 25 à 160 mm.
	Vérins ISOCLAIR	simple effet SER  double effet amortisseur élastique		– Normalisation ISO-CÉTOP. – Possibilité d'adapter des détecteurs magnétiques. – Fixations diverses. – Diamètres : de 32 à 63 mm. – Course simple effet : 25 à 50 mm. – Course double effet : 25 à 500 mm.

Doc. JOUCOMATIC

3.2.3. DÉTERMINATION DU DIAMÈTRE D'UN VÉRIN

• Effort dynamique développé par un vérin

F = Pression × Surface du piston × Rendement

F en N, S en mm^2, P en Pa
ou F en daN, S en cm^2, P en bars
Le rendement d'un vérin dépend du diamètre du vérin, de la pression et de paramètres d'ordre mécanique.
Les abaques et tableaux ci-dessous définissent les efforts dynamiques développés par les vérins en sortie et rentrée de tige, en fonction de la pression d'alimentation.

• Taux de charge
C'est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la charge réelle à déplacer par le vérin et l'effort dynamique disponible en bout de tige.

$$\text{Taux de charge (en \%)} = \frac{\text{charge réelle}}{\text{effort dynamique}} \times 100$$

Pour une utilisation optimale du vérin, il est recommandé de définir un vérin tel que le taux de charge soit inférieur ou égal à 75 %.

Exemple : Définition d'un vérin pour soulever une charge de 130 daN à une pression de 7 bars relatifs (manométriques).

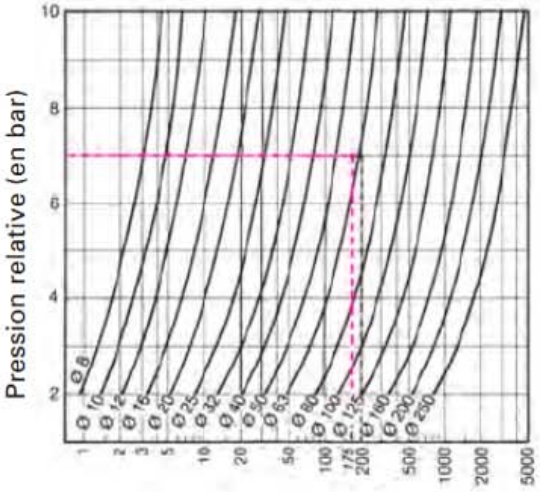
$$\text{Effort dynamique théorique} = \frac{\text{charge réelle}}{\text{taux de charge}} = \frac{130}{0{,}75} = 175 \text{ daN}$$

Dans l'abaque « sortie de tige », définir le point de rencontre entre l'effort dynamique ainsi calculé et la pression d'alimentation. Le diamètre du vérin nécessaire sera celui dont la courbe passe par ce point ou celui développant un effort immédiatement supérieur.
Dans l'exemple cité : 175 daN est situé entre ∅ 50 et le ∅ 63 mm. Le vérin recommandé est le ∅ 63 mm qui développe 200 daN à 7 bars et le taux de charge réel est de :

$$\frac{130 \text{ daN}}{200 \text{ daN}} \times 100 = 65\ \%$$

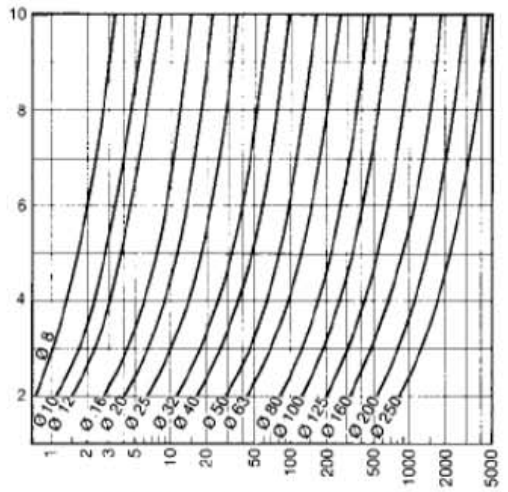
Efforts développés par les vérins (abaques)

EFFORTS DÉVELOPPÉS EN SORTIE DE TIGE



Efforts dynamiques (en daN)

EFFORTS DÉVELOPPÉS EN RENTRÉE DE TIGE



Efforts dynamiques (en daN)

Efforts développés par les vérins (tableau)

Ø vérin (mm)	Ø tige (mm)	Section du piston (cm^2)		Efforts dynamiques développés, en daN, en fonction de la pression d'alimentation (bar)									
				2		4		6		8		10	
		●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○
8	4	0,5	0,4	0,8	0,3	1,7	1,3	2,7	2	3,6	2,7	4,6	3,4
10	4	0,8	0,6	1,4	1,1	2,6	2,3	4,2	3,4	5,7	4,6	7,5	6
12	6	1,1	0,8	2,2	1,5	4,1	3,1	6	4,4	8,5	6,2	10,5	8
16	6	2	1,7	3,4	2,8	7,5	6	10	9,2	15	12	19	15
20	10	3,1	2,3	5,5	4,2	12	9	16	13,5	23	18	30	22
25	12	4,9	3,8	8,5	6,5	18	14	27	22	38	29	48	36
32	12	8	6,9	13	11,5	30	25	46	40	62	52	77	66
40	18	12,6	10	21	16	46	37	70	57	95	77	122	97
50	18	19,6	17	33	29	70	62	110	97	150	130	190	165
63	22	31,2	27,4	50	44	110	97	170	150	230	200	290	260
80	22	50,3	46,5	88	82	185	170	285	262	385	360	480	450
100	30	78,5	71,5	135	125	290	260	440	400	600	550	750	675
125	30	123	115,7	210	200	460	420	700	650	925	875	1 150	1 100
160	40	201	188	350	320	750	700	11 500	1 100	1 550	1 500	1 900	1 800
200	40	314	301	550	530	1 150	1 100	1 800	1 700	2 400	2 300	3 000	2 900
250	50	491	471	825	800	1 800	1 700	2 800	2 750	3 700	3 600	4 800	4 500

● Efforts développés en sortie de tige (côté fond). ○ Efforts développés en rentrée de tige (côté tige).
Nota : Les vérins à double tige traversante développent des efforts identiques dans les deux sens de fonctionnement, correspondant aux valeurs définies ci-dessus en rentrée de tige.

3.2.4. EXEMPLE DE DISTRIBUTEUR

Constitution d'un distributeur bistable 5/2 à commande pneumatique

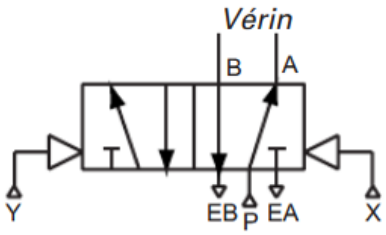
Cette coupe représente un distributeur 5/2 bistable.

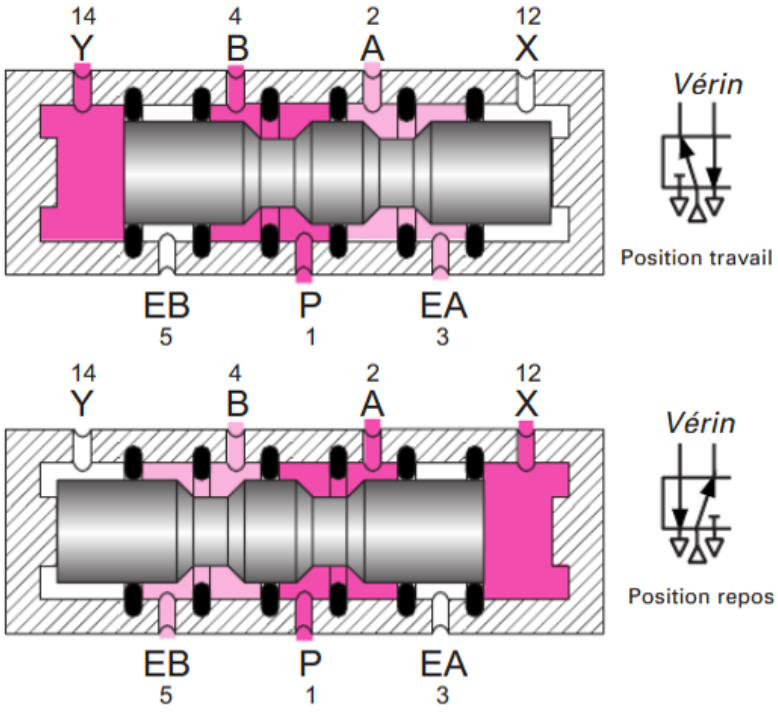
P Orifices d'arrivée d'air. (1)

A & B Orifices d'utilisation. (2, 4)

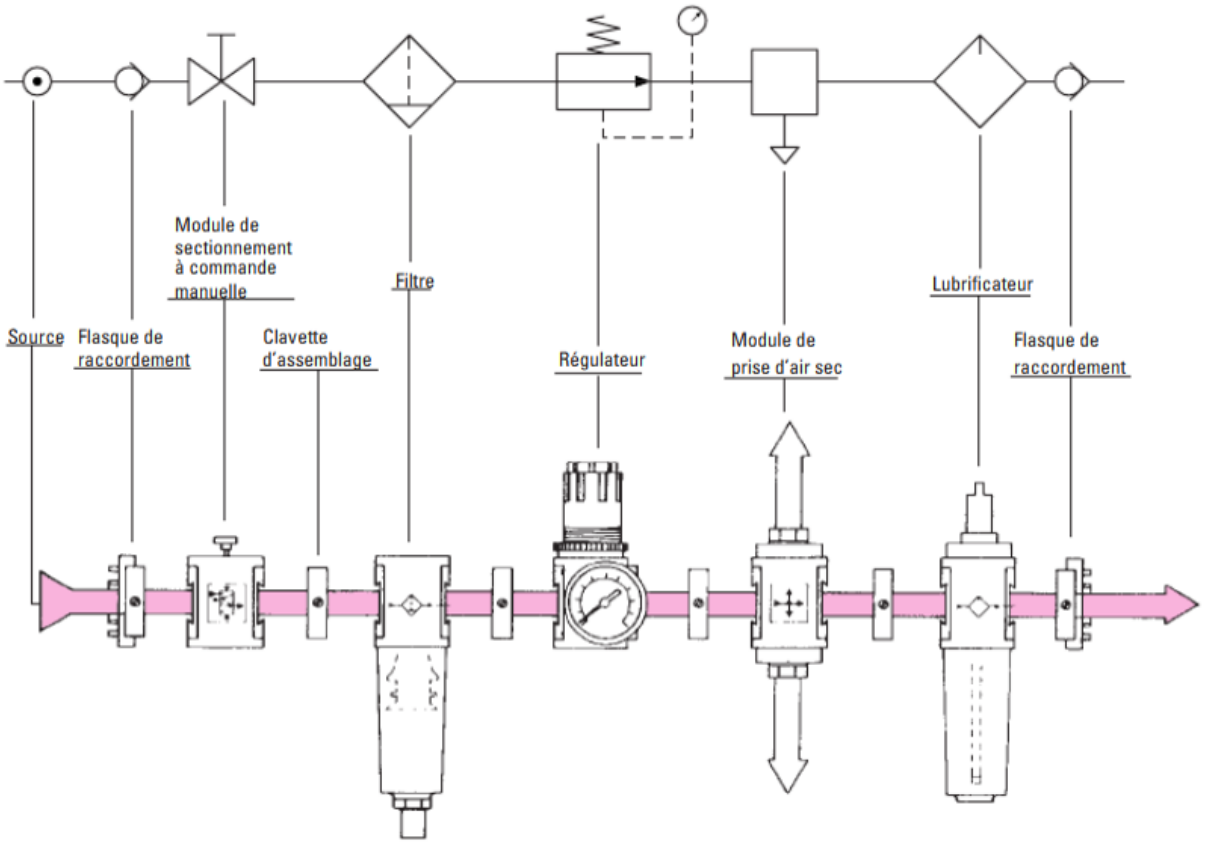
EA & AB Échappements de A et B (3 et 5) (mise à l'atmosphère).

X & Y Orifices de pilotage (12 et 14)





3.2.5. ALIMENTATION D'UNE INSTALLATION PNEUMATIQUE

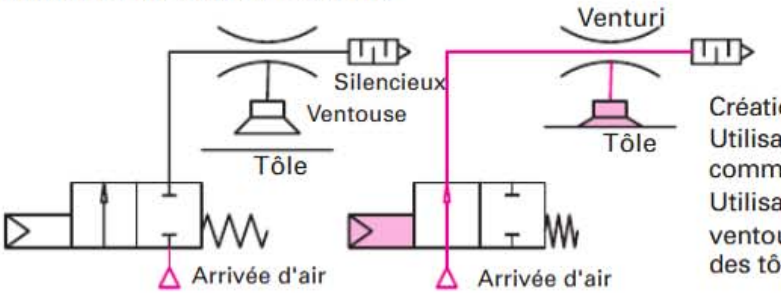


Le module de sectionnement à commande manuelle permet l'isolement de l'installation.
Le filtre élimine les impuretés dans l'air.
Le régulateur maintient une pression secondaire constante en fonction des variations de la pression primaire.
L'alimentation des vérins nécessite un air filtré et lubrifié (10 bars maximum).
Dans le cas d'une commande pneumatique, les pilotages et autres unités de commande se font par air non lubrifié (module de prise d'air sec).

3.2.6. MISE EN SITUATION DES VÉRINS

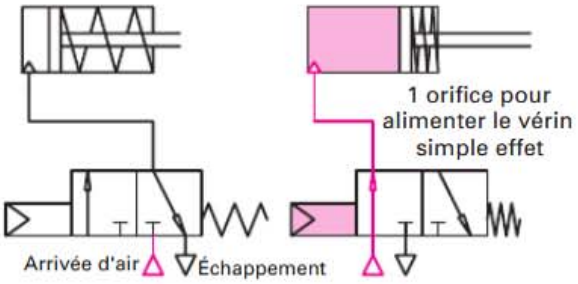
Mise en situation des vérins avec leur distributeur associé

Utilisation d'un distributeur 2/2



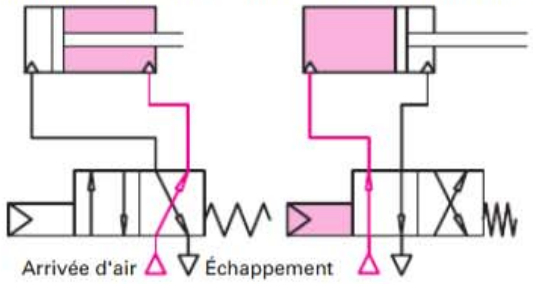
Création de vide par effet Venturi.
Utilisation d'un distributeur 2/2 appelé communément électrovanne.
Utilisation du vide pour alimenter une ventouse permettant de manipuler des tôles.

Vérin simple effet piloté par distributeur 3/2



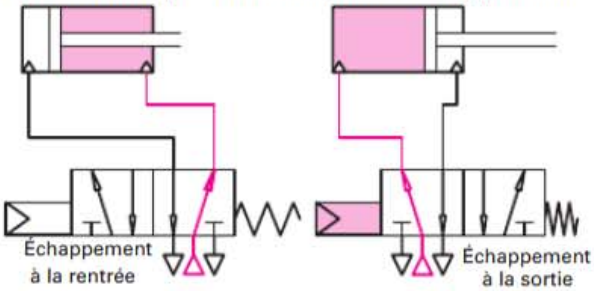
Vérin double effet piloté par distributeur 4/2

Le distributeur permute l'admission et l'échappement.



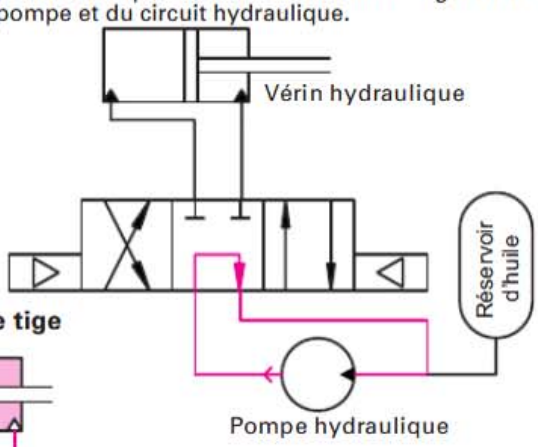
Vérin double effet piloté par distributeur 5/2

Le distributeur permet d'utiliser deux échappements.

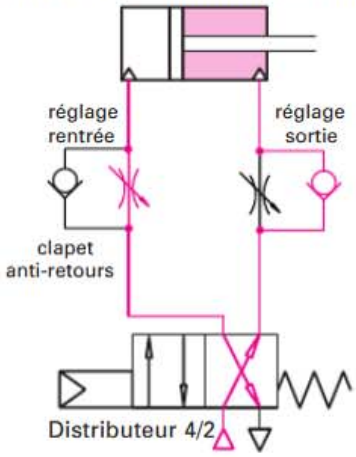


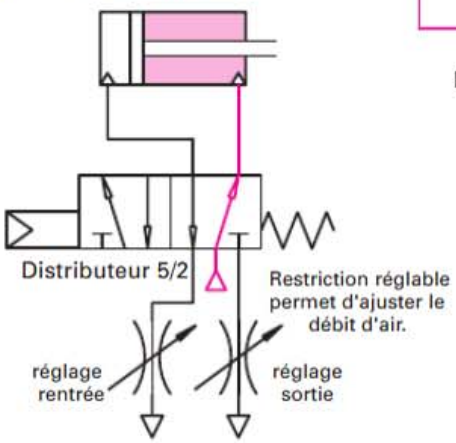
Vérin hydraulique piloté par distributeur 4/3

Le distributeur permet la circulation du fluide en position bloqué afin d'éviter des surcharges de la pompe et du circuit hydraulique.

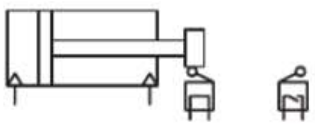


Mise en situation de régleurs de vitesse de sortie de tige

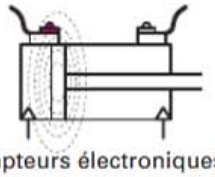




Mise en situation des capteurs sur vérins



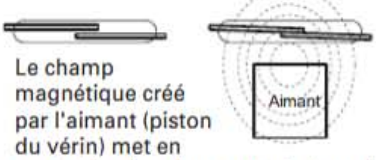
Capteurs sur la partie opérative.



Capteurs électroniques ou ILS sur le vérin, le piston du vérin est magnétique.

Interrupteur ILS :

Interrupteur à Lames Souples



Le champ magnétique créé par l'aimant (piston du vérin) met en contact les deux lames d'acier (souples).

3.2.7. SYMBOLES PNEUMATIQUES ET HYDRAULIQUES

REPRÉSENTATIONS CONVENTIONNELLES

Transformation de l'énergie — NF E 04-056

	Compresseur à cylindrée fixe à un sens de flux		Moteur pneumatique à cylindrée fixe à un sens de flux

Appareils de mesure — NF E 04-056

(1) (2)	Mesure de pression (1) – manomètre (2) – manomètre différentiel	(1) (2)	Mesure de débit (1) – débimètre (2) – compteur

Distributeurs (préactionneurs) — NF E 04-056

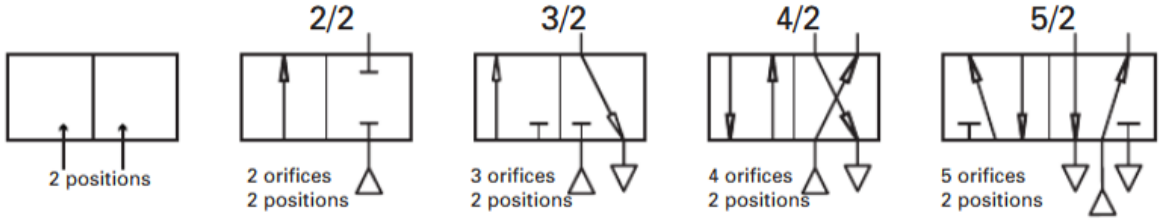
La symbolisation complète d'un distributeur tient compte de trois fonctions :

1 - Les positions : chaque position est représentée par une case. Il y a autant de cases que de positions.

2 - Les orifices : nécessaires au passage de l'air comprimé

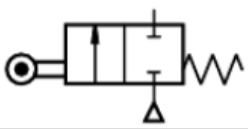
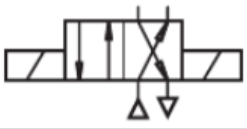
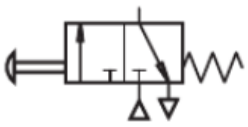
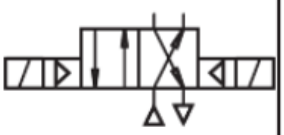
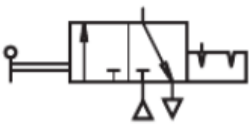
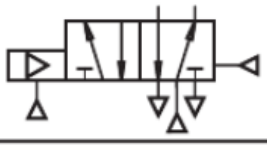
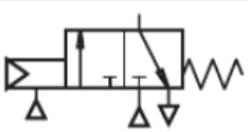
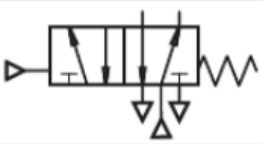
admission échappement

On remarquera que la désignation d'un distributeur prend en compte ces deux premières fonctions ; exemple : distributeur 3/2 (3 orifices, 2 positions)



3 - Les organes de commande qui précisent la manière dont le distributeur est piloté

Exemples de symbolisations complètes

	Distributeur 2/2 **monostable** Commande par galet Rappel par ressort		Distributeur 4/2 **bistable** Commande électromagnétique
	Distributeur 3/2 **monostable** Commande par bouton-poussoir Rappel par ressort		Distributeur 4/2 **bistable** Commande et rappel électropneumatique
	Distributeur 3/2 **bistable** Commande par levier Bistable, grâce à la butée deux positions		Distributeur 5/2 **bistable** Commande pneumatique Rappel par pression
	Distributeur 3/2 **monostable** Commande pneumatique Rappel par ressort		Distributeur 5/2 **monostable** Commande par pression Rappel par ressort

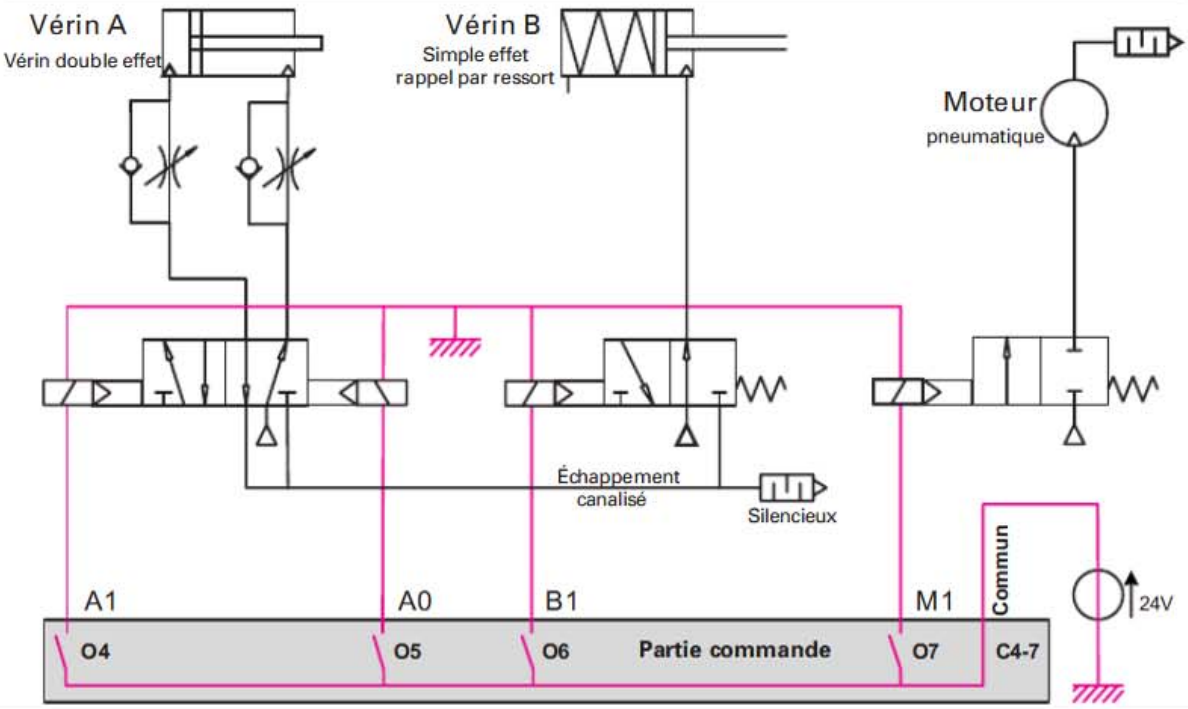
DoC. NORGREN-HERION

Symboles pneumatiques et hydrauliques

REPRÉSENTATIONS CONVENTIONNELLES (SulTe)

Accessoires — NF E 04-056

(1) (2)	Clapets de non-retour (1) sans ressort (2) avec ressort	(1) (2)	Clapets de non-retour (1) piloté pour ouvrir (2) piloté pour fermer
	Clapet de non-retour avec étranglement		Sélecteur de circuit
	Réducteur de pression ou détendeur	(1) (2)	Réducteur de débit (1) non réglable (2) réglable
	Diviseur de débit		Robinet d'isolement
(1) (2) (3)	Sources de pression (1) pneumatique (2) hydraulique (3) ancien symbole		Purge d'air
(1) (2)	Orifices d'évacuation d'air (1) non connectable (2) connectable	(1) (2)	Prises (1) bouchée (2) avec conduite branchée
(1) (2)	Raccordements rapides (1) sans clapet (2) avec clapet		Silencieux
	Réservoir sous presssion	(1) (2)	Accumulateurs (1) à ressort à poids (2) hydropneumatique
	Filtre – crépine	(1) (2)	Purgeur (1) à commande manuelle (2) automatique



3.3. TRANSMISSION DE PUISSANCE SANS TRANSFORMATION DE MOUVEMENT

3.3.1 LES ENGRENAGES

CARACTÉRIS-TIQUES GÉNÉRALES

Définition

Un engrenage est un ensemble de deux roues dentées qui permet de transmettre une puissance d'un **arbre moteur** à un **arbre récepteur** avec un très bon rendement.
En fonction du rapport de transmission, la vitesse de rotation et le couple sur l'arbre récepteur seront modifiés.

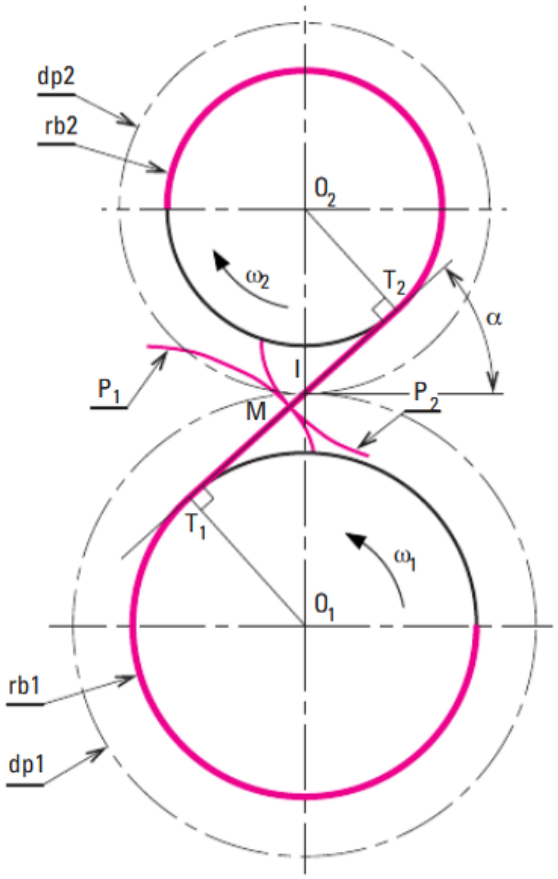
Boîte de transmission de ACCARY-LECHNER

Profil de denture

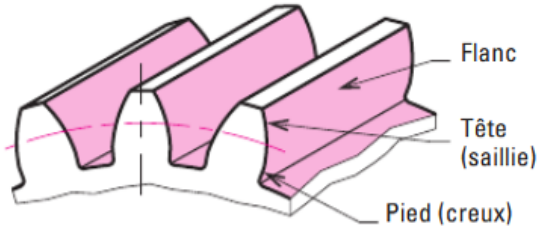
Par analogie aux roues de friction, les cercles primitifs de diamètres dp1 et dp2 roulent l'un sur l'autre sans glisser au point I.
Par analogie au système poulies-courroie, un point M de la courroie décrit un profil P1 dans un plan lié à la roue 1 et un profil P2 dans un plan lié à la roue 2.
Ces deux profils sont en **développante de cercle** et roulent l'un sur l'autre. Ces deux profils sont dits **conjugués**.
En remplaçant le système poulies-courroie par un système de roues dentées dont les dents ont le profil P1 ou P2, on obtient un engrenage à denture en développante de cercle.
Ce profil de denture est le plus utilisé car il peut être usiné à l'aide d'outils simples. Il accepte des variations d'entraxe sans perturber le fonctionnement et l'usure des flans est plus régulièrement répartie que sur d'autres types de profils.
Il subsiste cependant un glissement au contact entre les dents :

$$\vec{V}_M 1/0 = \vec{V}_M 1/2 + \vec{V}_M 2/0$$

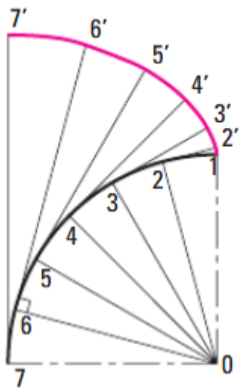
Vitesse de glissement (nulle si M en I)



Description de la denture



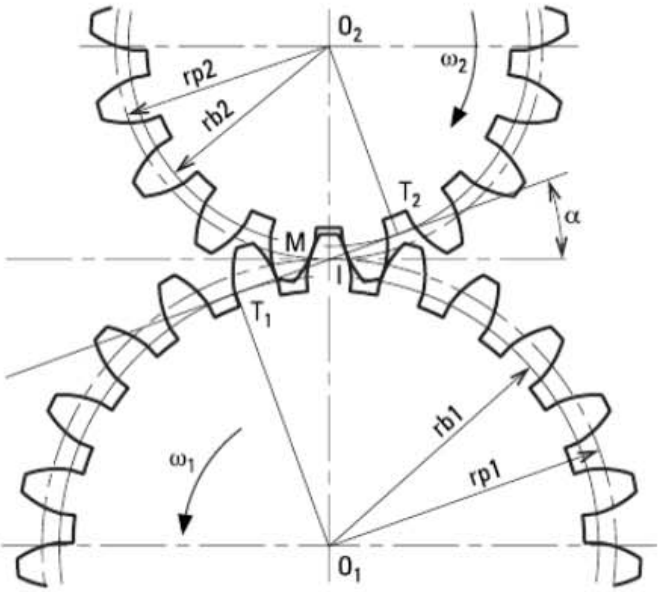
Développante du cercle



CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES (suite)

Engrènement

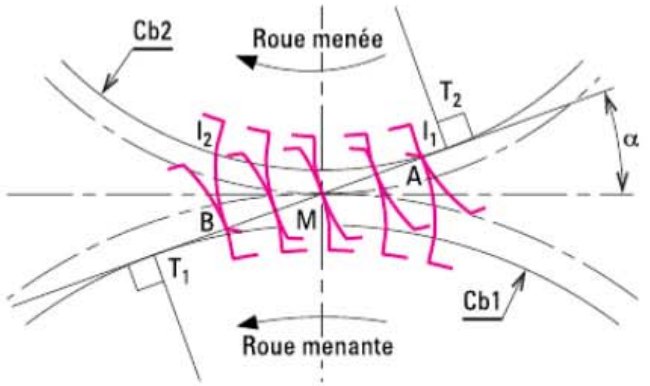
rp1, rp2 : rayons primitifs (cercles tangents en I).
rb1, rb2 : rayons de base (cercles dont la développante donne le profil).
(T_1 T_2) : droite d'action (tangente aux cercles de base et support de l'action d'une dent sur l'autre).
α : angle de poussée (20° cas général).



Condition d'engrènement

Pour assurer la continuité de l'engrènement, il faut qu'un couple de dents entre en contact avant que le précédent ne perde le contact.
Dans un cas général il faut :

$$AB < T_1\ T_2$$
$$I_1\ I_2 > p$$
$$\frac{I_1\ I_2}{p} = \varepsilon \qquad \varepsilon > 1,3$$



AB : longueur de conduite.
I1 I2 : arc de conduite sur le cercle de base **Cb_2**.
p : pas circonférentiel sur le cercle primitif :

$$p = \pi\ m$$

ε : rapport de conduite
Prendre : $2 < \varepsilon < 3$

Dans un cas général (**α = 20°**), l'engrènement se fera dans de bonnes conditions si le nombre de dents **Z** de la roue est supérieur à **13** (il n'y a aucun problème d'engrènement si **Z > 17**). En dessous de **13** dents il y a risque d'interférence (usure et affaiblissement de la base de la dent).

ENGRENAGES CYLINDRIQUES À DENTURE DROITE

Caractéristiques générales

Les engrenages cylindriques à denture droite supportent les déplacements axiaux.
Ils ne supportent pas les efforts axiaux.

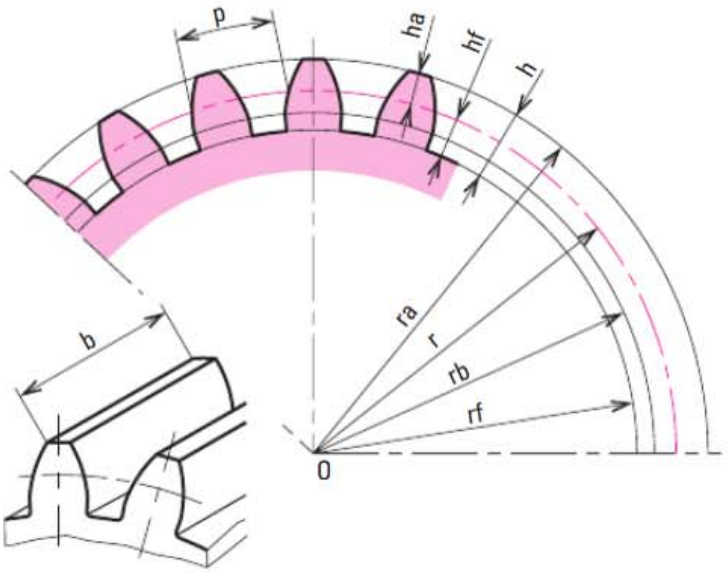
Rapports d'engrenage:
- de 1 à 8: transmission de puissance.
- de 1 à 40: applications cinématiques.

Applications :
- réducteurs,
- boîtes de vitesses à pignons baladeurs, etc.

Doc. ACCARY-LECHNER

Caractéristiques dimensionnelles

m	(1)	Module en mm
Z		Nombre de dents
p	$m.\pi$	Pas primitif ou circonférentiel
d	m.Z	Diamètre primitif (dp)
ha	m	Hauteur de tête de la dent
hf	1,25 m	Hauteur de creux de la dent
h	2,25 m	Hauteur de la dent
da	d + 2 m	Diamètre de tête
df	d - 2,5 m	Diamètre de pied
db	d cos α	Diamètre de base
b	km (2)	Largeur de denture
α	20°	Angle de pression
a	$\frac{d1+d2}{2}$	$\frac{m\,(Z1+Z2)}{2}$ Entraxe
r	d1/d2	= ω2/ω1 = Rapport de transmission



(1) : **m** est calculé en **RDM** $\Rightarrow m = 2,34\sqrt{\frac{T}{k.Rp}}$

avec T effort tangentiel sur la dent pris au diamètre primitif en newtons.
k : coefficient de largeur de denture.
Rp : résistance pratique en traction.
Rp ≃ Re/2 en newtons par millimètre carré.

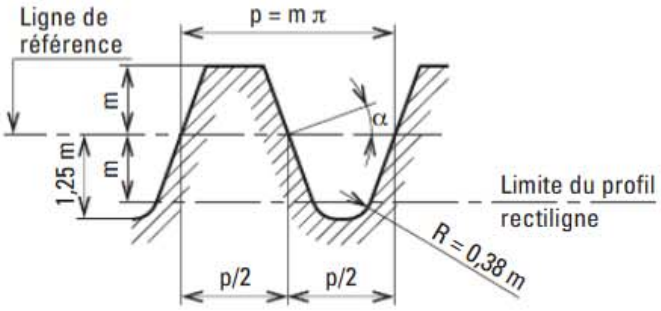
(2) : **k** coefficient de largeur de denture : $5 < k < 15$ (en général k = 10)

Valeurs normalisées de m — NF E 23-011

Valeurs principales (mm)	0,5-0,6-0,8-1-1,25-1,5-2-2,5-3-4-5-6-8-10-12-16-20-25
Valeurs secondaires (mm)	0,55-0,7-0,9-1,125-1,375-1,75-2,25-2,75-3,5-4,5-5,5-7-9-11-14-18-22

Crémaillère de référence — NF E 23-011

Une roue est dite à **denture normale** si elle est engendrée par une crémaillère dont la ligne de référence est tangente au cercle primitif.
Elle est dite à **denture déportée** dans le cas contraire.



Caractéristiques mécaniques

$\vec{Ft}$: effort tangentiel : $|\vec{Ft}| = |\vec{M}_{1/2}|.\cos\alpha$

$\vec{Fr}$: effort radial : $|\vec{Fr}| = |\vec{Ft}|\,tg\,\alpha$

Cm : couple moteur : $Cm = |\vec{Ft}|.d1/2$

r : rapport de transmission : $r = \frac{\omega 2}{\omega 1} = \frac{d1}{d2} = \frac{Z1}{Z2}$

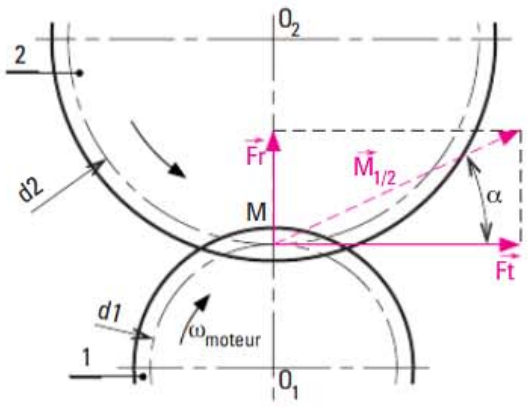
P1 : puissance sur la roue motrice : $P1 = C1.\omega 1$

P2 : puissance sur la roue réceptrice : $P2 = C2.\omega 2$

η : rendement de l'engrenage

$P2 = \eta.P1 \quad (0,95 < \eta < 0,98)$

$$C2 = C1.\eta.\frac{1}{r}$$



Caractéristiques générales

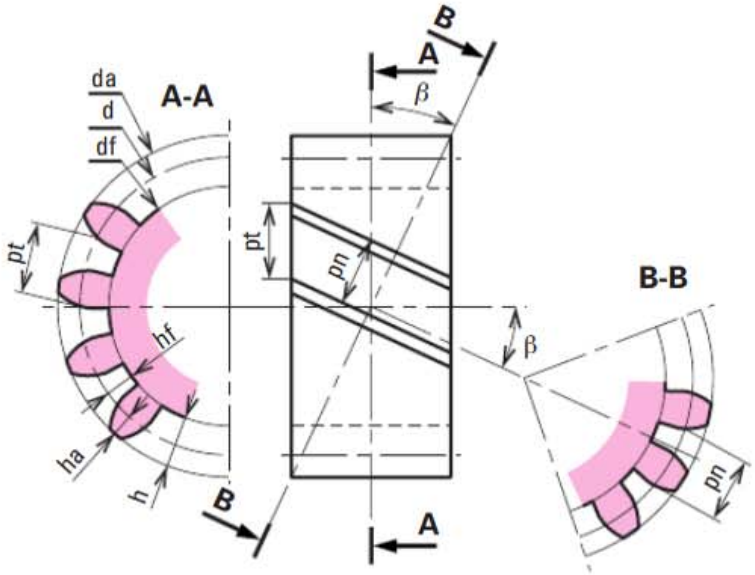
– *Avantages de la denture hélicoïdale*
Plus de dents en prise, donc bonne continuité de mouvement.
Possibilité d'utilisation de roue à moins de 13 dents.
Transmission moins bruyante qu'avec une denture droite.
Possibilité de variation d'entraxe sans modification du rapport de transmission en faisant varier l'angle d'hélice β.
Très bon rendement (≃ 0,98).

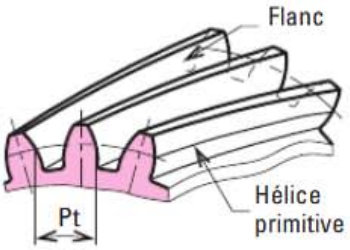
– *Inconvénients de la denture hélicoïdale*
L'inclinaison β de la denture engendre un effort axial sur les arbres, ce qui oblige à prévoir des paliers appropriés (à butée, à roulements à contact oblique, etc.).
L'effort axial peut être réduit ou neutralisé si deux roues à dentures hélicoïdales opposées sont montées côte à côte sur l'arbre ou par l'emploi de denture à chevrons.

– *Applications*
Boîtes de vitesses automobiles.
Réducteurs de vitesses étagés.

Doc. COMÉLOR

Caractéristiques dimensionnelles

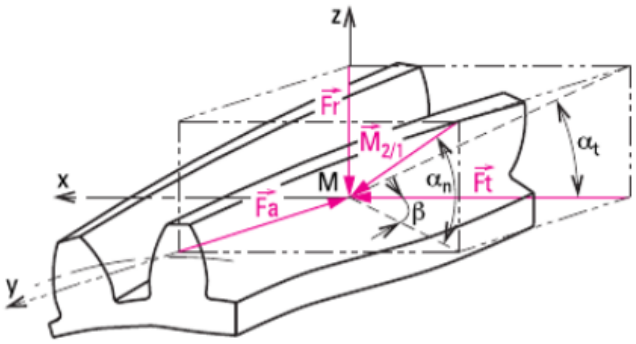


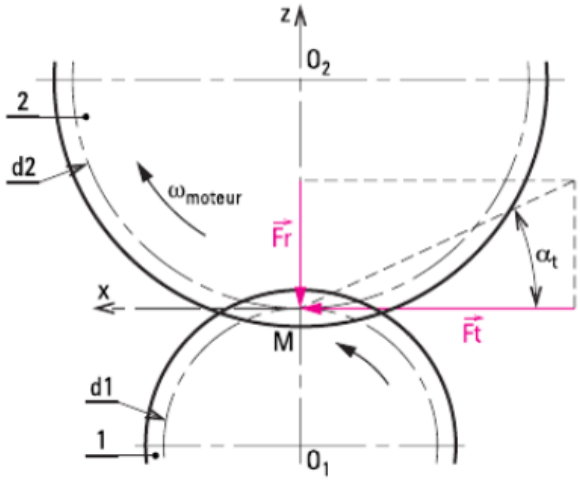


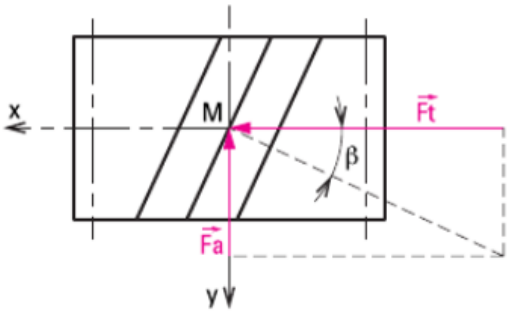
m_n	(1)	Module réel en mm	ha	m_n	Hauteur de tête
Z		Nombre de dents	hf	1,25 m_n	Hauteur de pied
pn	$\pi\ m_n$	Pas réel	h	2,25 m_n	Hauteur de la dent
β	$20° \leq \beta \leq 30°$	Angle d'hélice	d	mt. Z	Diamètre primitif
αn	20°	Angle de pression réel	da	$d + 2\ m_n$	Diamètre de tête
mt	$m_n / \cos\beta$	Module apparent	df	$d - 2{,}5\ m_n$	Diamètre de pied
pt	$\pi\ m_t$	Pas apparent	a	$(d1 + d2)/2$	Entraxe
pz	π d. cotan β	Pas de l'hélice	b	$b \geq \frac{\pi\ m_n}{\sin\beta}$	Largeur de la denture

(1) m_n est calculé en **RDM**.

Caractéristiques mécaniques







$\vec{Ft}$ = effort tangentiel : $\|\vec{Ft}\| = 2\ C2/d2$

$\vec{Fa}$ = effort axial : $\|\vec{Fa}\| = \|\vec{Ft}\| \cdot \tan\beta$

$\vec{Fr}$ = effort radial : $\|\vec{Fr}\| = \|\vec{Ft}\| \cdot \tan\alpha_n / \cos\beta$ avec $\alpha_n = 20°$ dans un cas général

$\vec{M}_{2/1}$ = effort d'une dent de (2) sur une dent de (1) en M

$$\|\vec{M}_{2/1}\| = \sqrt{\|\vec{Ft}\|^2 + \|\vec{Fa}\|^2 + \|\vec{Fr}\|^2}$$

ou $\|\vec{M}_{2/1}\| = \|\vec{Ft}\| / \cos\alpha_n \cdot \cos\beta$

r : rapport de transmission $= \dfrac{\omega 1}{\omega 2} = \dfrac{d2}{d1} = \dfrac{z2}{z1}$

Remarque

Une roue à denture hélicoïdale **inclinée à gauche engrène** avec une roue à denture hélicoïdale **inclinée à droite**.

ENGRENAGES CONIQUES À DENTURE DROITE À AXES CONCOURANTS

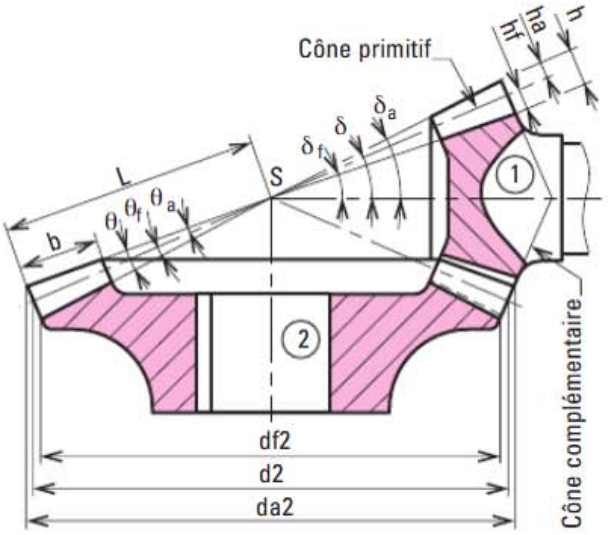
Caractéristiques dimensionnelles

m	(1)	Module en mm
Z		Nombre de dents
p	πm	Pas primitif
δ	(2)	Angle primitif
δa	$\delta + \theta a$	Angle de tête
δf	$\delta - \theta f$	Angle de creux
θ	$\theta a + \theta f$	Angle de hauteur de la dent
θa	$\tan \theta a = 2\ m \cdot \sin \delta / d$	Angle de tête de la dent
θf	$\tan \theta f = 2{,}5\ m \cdot \sin \delta / d$	Angle de creux de la dent
α	20°	Angle de pression
h	2,25 m	Hauteur de la dent
ha	m	Saillie
hf	1,25 m	Creux
d	$m \cdot Z$	Diamètre primitif
da	$d + 2\ m \cdot \cos \delta$	Diamètre de tête
df	$d - 2{,}5\ m \cdot \cos \delta$	Diamètre de pied
b	$L/4 \leqslant b \leqslant L/3$	Largeur de la denture
L	$d/2 \sin \delta$	Longueur génératrice primitive

(1) m est calculé en **RDM**.

(2) $\tan \delta 1 = \frac{z1}{z2}$, $\tan \delta 2 = \frac{z2}{z1}$.

Doc. ACCARY-LECHNER



Caractéristiques mécaniques

$\vec{Ft}$ = effort tangentiel
$\|\vec{Ft}\| = C/r\ moy$

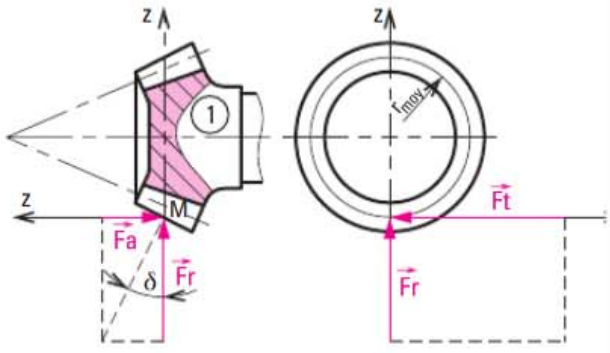
$\vec{Fa}$ = effort axial
$\|\vec{Fa}\| = \|\vec{Ft}\| \cdot \tan\alpha \cdot \sin\delta$

$\vec{Fr}$ = effort radial
$\|\vec{Fr}\| = \|\vec{Ft}\| \cdot \tan\alpha \cdot \cos\delta$

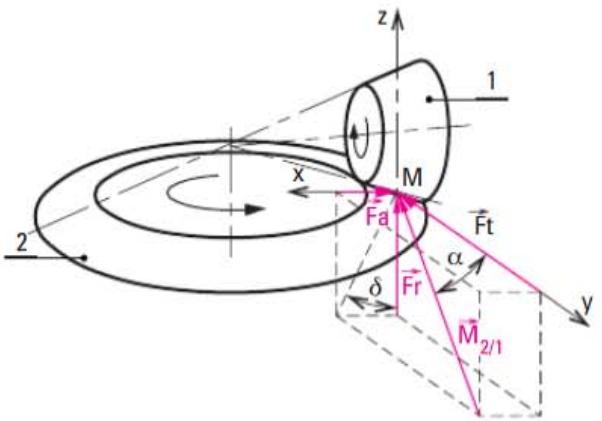
$\vec{M}_{2/1}$ = effort d'une dent du pignon 2 sur une dent du pignon 1 en M.

$$\|\vec{M}_{2/1}\| = \sqrt{\|\vec{Ft}\|^2 + \|\vec{Fa}\|^2 + \|\vec{Fr}\|^2}$$

$$\|\vec{M}_{2/1}\| = \|\vec{Ft}\| / \cos\alpha$$



Dans le cas où les deux pignons ont des axes perpendiculaires, l'effort axial sur le pignon 1 devient l'effort radial sur la roue 2 et réciproquement.
La présence d'un effort axial sur les arbres oblige à prévoir des paliers appropriés (à butées, à roulements à contact oblique, etc.).
Le réglage axial des deux pignons est obligatoire pour obtenir la tangence des deux cônes primitifs.



Caractéristiques générales

Avantages :
Grand rapport de vitesses pour un encombrement réduit.

Inconvénients :
Rendement souvent faible.

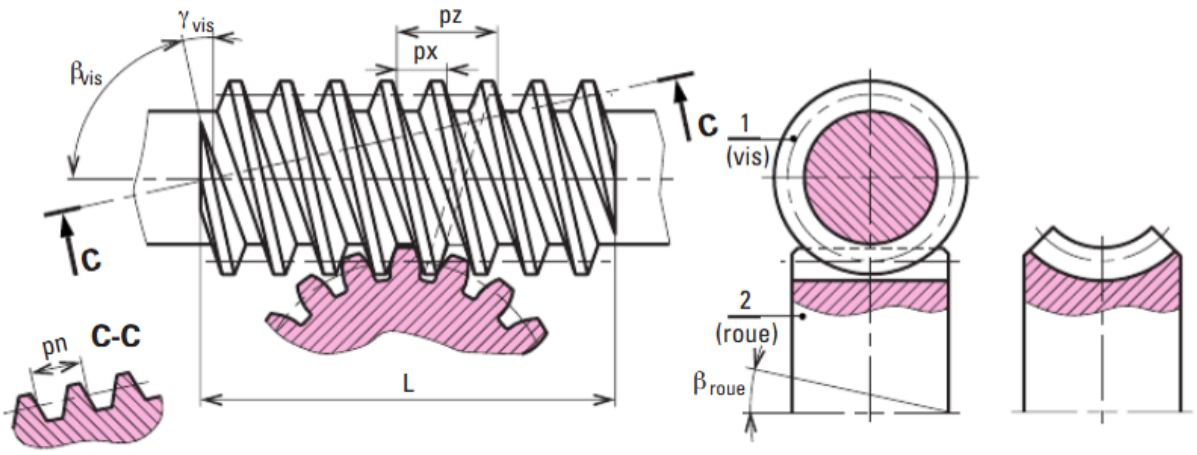
$$\eta = \frac{\tan \beta \text{ roue}}{\tan (\beta \text{ roue} + \varphi)}$$

avec **φ** : coefficient de frottement au contact roue-vis.
Le rendement dépend de l'angle **β** et du coefficient de frottement.

$$0{,}3 < \eta < 0{,}7$$

Doc. ACCARY-LECHNER

Caractéristiques dimensionnelles



Vis à hélice à droite à 2 filets — **Roue cylindrique** — **Roue creuse**

Caractéristiques de la vis

m_n	(1)	Module réel en mm
Z vis		Nombre de filets
β vis		Angle d'hélice
γ vis	γ vis = β roue	Angle complémentaire à β vis
pn	$\pi\ m_n$	Pas réel
mx	m_n / cos γ vis	Module axial ($mx = m_n$ / cos β roue)
px	π mx	Pas axial
pz	px · Z vis	Pas de l'hélice
d	pz / π tan γ vis	Diamètre primitif ($d = m_n \cdot Z$ / sin γ vis)
ha	m_n	Hauteur de tête
hf	1,25 m_n	Hauteur en creux
h	2,25 m_n	Hauteur du filet
da	d + 2 m_n	Diamètre extérieur
df	d – 2,5 m_n	Diamètre de fond de filet
α	20°	Angle de pression
L	≈ 5 px	Longueur de la vis

(1) m_n est calculé en **RDM**.

Caractéristiques de la roue

Les caractéristiques de la roue sont similaires à celles d'une roue à denture hélicoïdale d'angle d'hélice **β** roue = **γ** vis de même sens pour la vis et la roue.

L'entraxe est défini par :

$$a = \frac{d1 + d2}{2}$$

Le rapport de transmission **r** se calcule de la même façon que pour un autre engrenage.

$$r = \frac{\omega 2}{\omega 1} = \frac{z1}{z2}$$

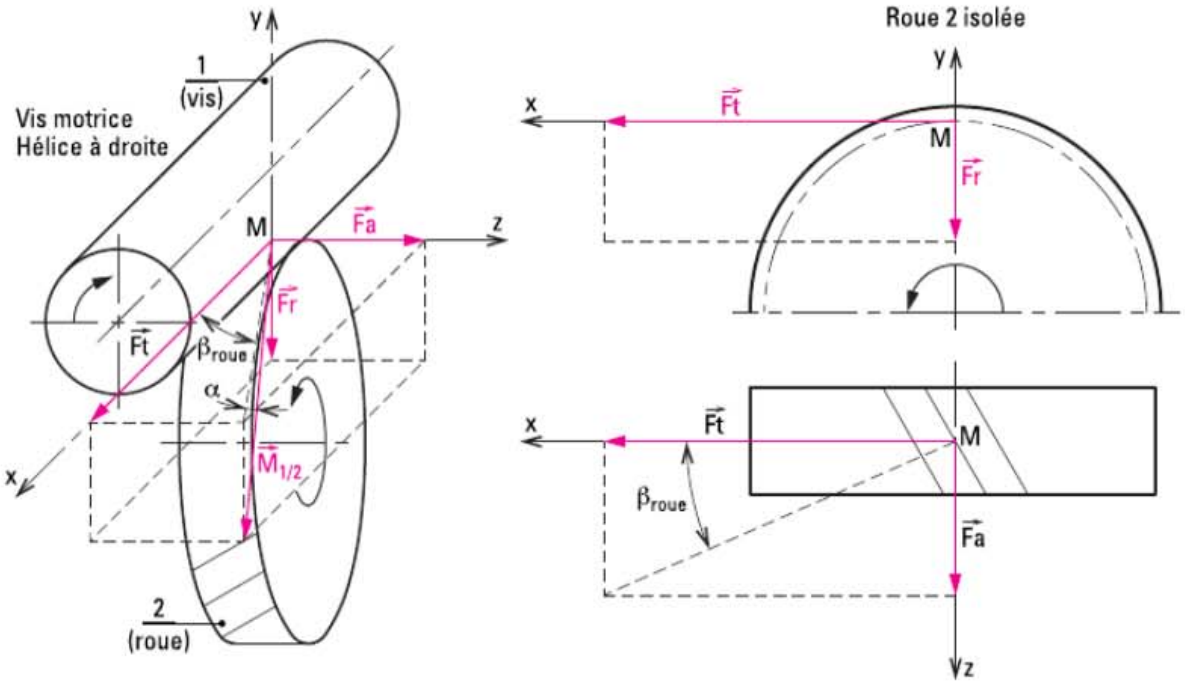
z1 : nombre de filets de la vis.
z2 : nombre de dents de la roue.

La roue peut être cylindrique (faibles efforts transmissibles).

La roue peut être creuse (efforts transmissibles importants).

ROUES ET VIS SANS FIN (suite)

Caractéristiques mécaniques



$\vec{F}tv$ = effort tangentiel sur la vis : $\|\vec{F}tv\| = C_v / r_{vis} = \|\vec{F}ar\|$
$\vec{F}tr$ = effort tangentiel sur la roue : $\|\vec{F}tr\| = \|\vec{F}tv\| / \tan \beta$ roue $= \|\vec{F}av\|$
$\vec{F}r$ = effort radial : $\|\vec{F}r\| = \|\vec{F}tv\| \tan \alpha / \sin \beta$ roue
$\vec{M}_{1/2}$ = effort d'un filet de la vis sur une dent de la roue $\|\vec{M}_{1/2}\| = \|\vec{F}r\| / \sin \alpha$
Le frottement dans le système roue et vis sans fin est très important, les relations ci-dessus ne prennent pas en compte ce frottement.

Condition d'irréversibilité du système roue et vis sans fin

Dans le système roue et vis sans fin, la vis est en général motrice : si la roue est motrice, un effort tangentiel important sur la roue entraîne un effort tangentiel faible sur la vis :

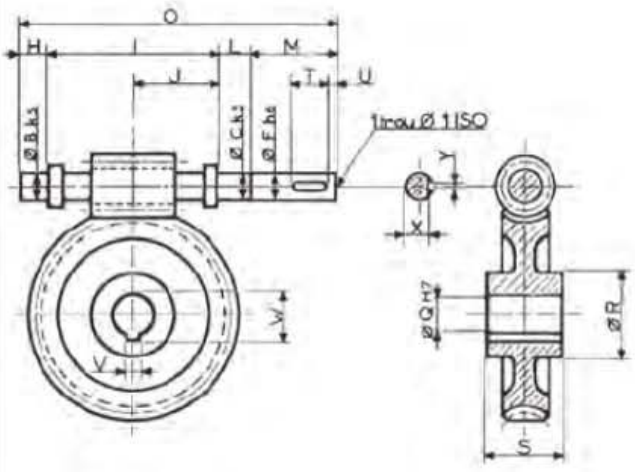
$$\|\vec{F}tr\| = \|\vec{F}tv\| / \tan \beta \text{ roue}$$

Le frottement entre la vis et la roue risque d'interdire la rotation de la vis ⇒ il y a alors **irréversibilité du système**.

La vis peut être motrice mais pas la roue (utilisée dans les appareils de levage).

Si β vis $\geqslant 87°$, l'**irréversibilité** du système est en général assurée (utilisation d'une vis à un seul filet).

Si l'on veut obtenir la **réversibilité**, il faut diminuer le coefficient de frottement au contact vis-roue (roue en bronze et vis en acier), lubrifier abondamment et diminuer l'angle β vis.

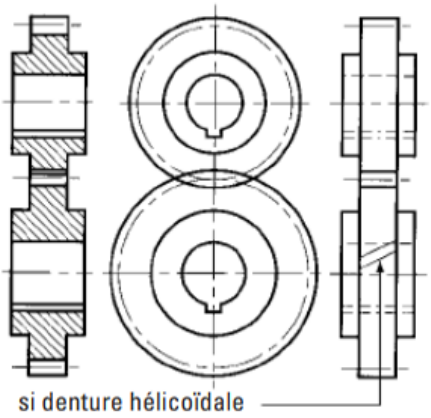


Système roue et vis sans fin
La roue est en bronze spécial.
La vis en acier 16 Ni Cr 6 cémentée, trempée à filets rectifiés.

Doc. ACCARY-LECHNER

Transmission de puissance sans transformation de mouvement

REPRÉSEN-TATION DES ENGRENAGES



Engrenage cylindrique extérieur

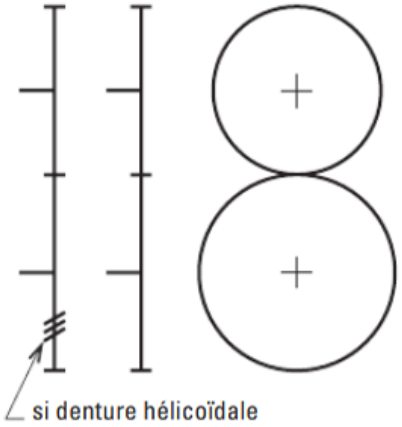
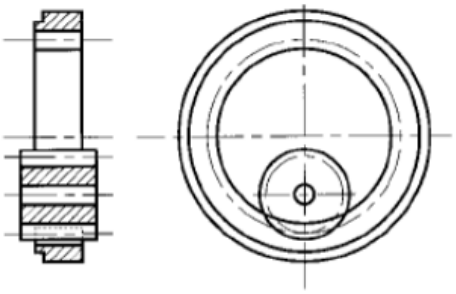


Schéma cinématique



Engrenage cylindrique intérieur

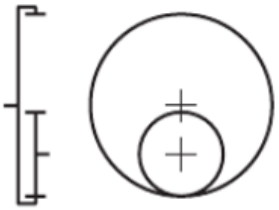
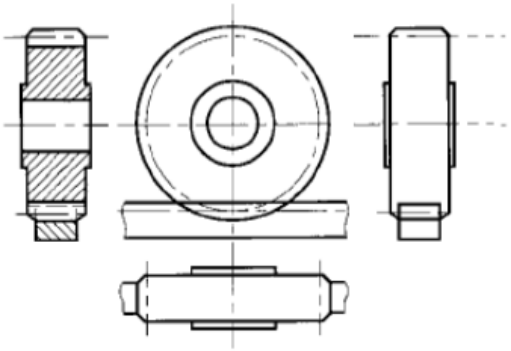


Schéma cinématique



Pignon - crémaillère

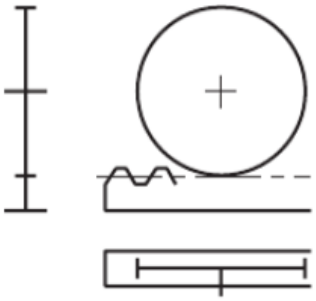
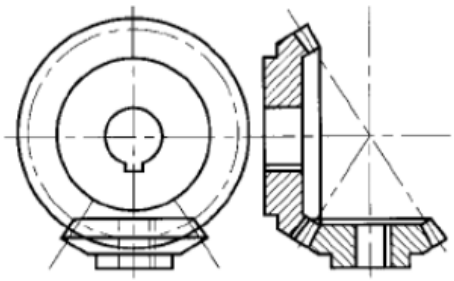


Schéma cinématique



Engrenage conique

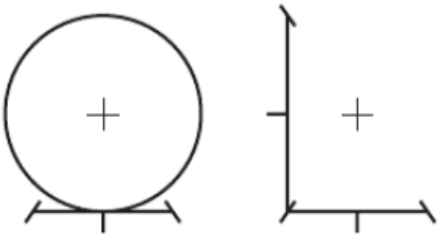
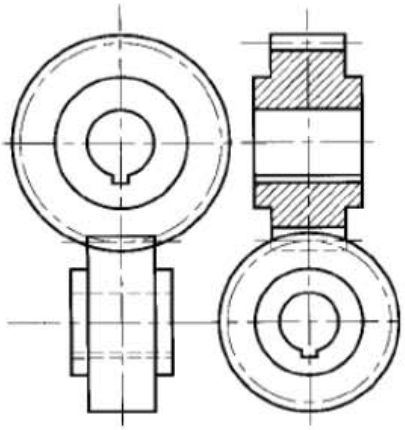


Schéma cinématique

Les engrenages

REPRÉSENTATION DES ENGRENAGES (suite)



Roue et vis sans fin

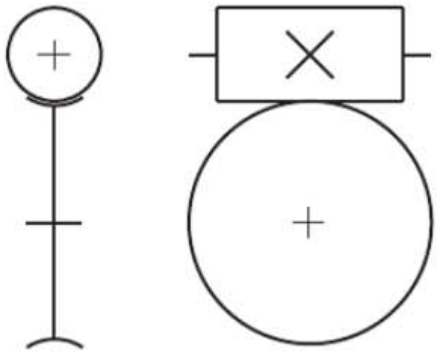
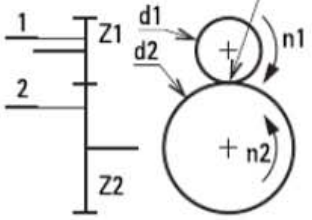


Schéma cinématique

3.3.2. RÉDUCTEURS DE VITESSE À ENGRENAGES

RÉDUCTEUR À UN ENGRENAGE

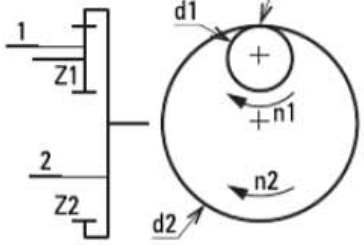
Contact extérieur



$$r = \frac{n2}{n1} = \frac{d1}{d2} = -\frac{z1}{z2}$$

Engrenage extérieur

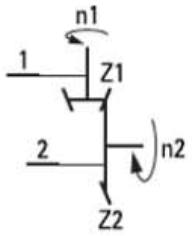
Contact intérieur



$$r = \frac{n2}{n1} = \frac{d1}{d2} = \frac{z1}{z2}$$

Engrenage intérieur

Renvoi d'angle



$$r = \frac{n2}{n1} = \frac{d1}{d2} = -\frac{z1}{z2}$$

Engrenage conique

Le signe - indique une inversion du sens de rotation entre l'entrée et la sortie.

RÉDUCTEURS ÉTAGÉS

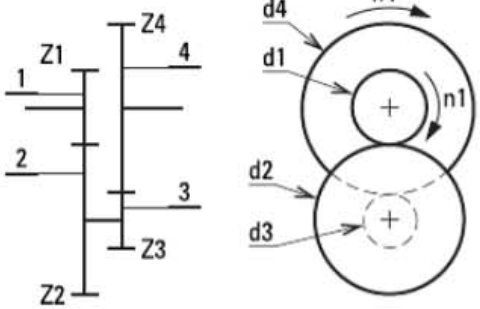
Réducteur bi-étagé à engrenages cylindriques

SEW-USOCOME

$$r = \frac{ns}{ne} = (-1)^k \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues menantes}}{\text{Produit des nombres de dents des roues menées}}$$

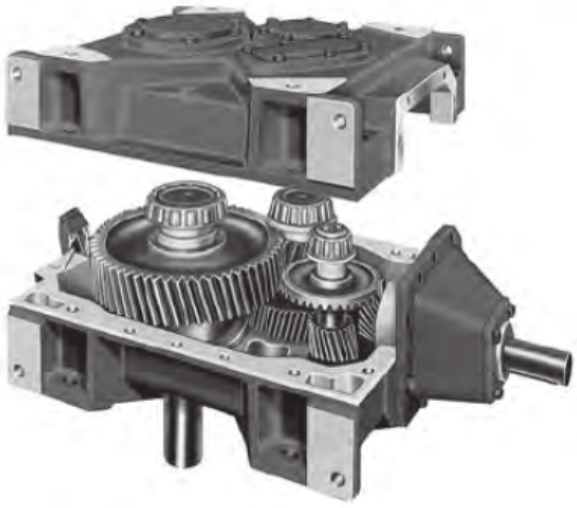
$$r = \frac{n4}{n1} = \frac{z1 \cdot z3}{z2 \cdot z4}$$

k : nombre de contacts extérieurs entre les roues (voir ci-dessus).
Z menantes : nombre de dents des roues qui créent le mouvement dans les engrenages.
Z menées : nombre de dents des roues qui subissent le mouvement dans les engrenages.
ns : fréquence de rotation de sortie.
ne : fréquence de rotation d'entrée.

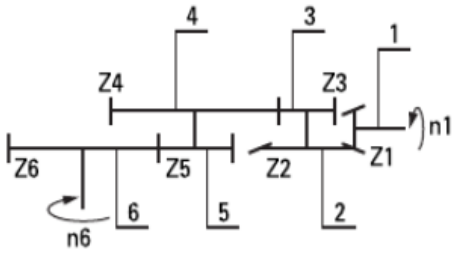


RÉDUCTEURS ÉTAGÉS (suite)

Réducteur tri-étagé à engrenages coniques et cylindriques



Doc. BROOK-HANSEN



$$r = \frac{n6}{n1} = -\frac{z1 \cdot z3 \cdot z5}{z2 \cdot z4 \cdot z6}$$

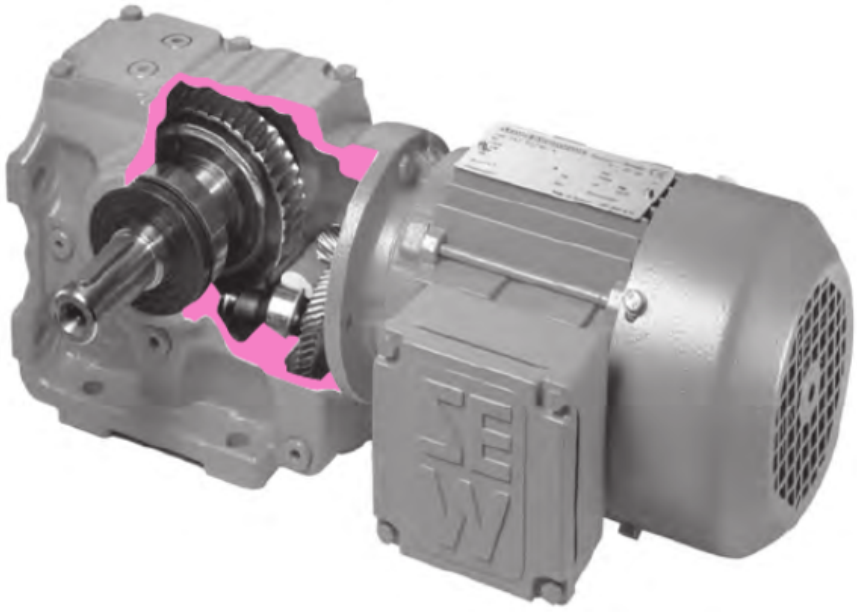
Les arbres entrée/sortie sont perpendiculaires.

En multipliant le nombre d'engrenages, on obtient de plus grands rapports de transmission.

Pour un engrenage, le rendement $\eta_1 \simeq 0{,}99$.

Pour n engrenages $\eta_T = \eta_1^n$.

Réducteur bi-étagé à engrenages cylindriques et roue et vis sans fin

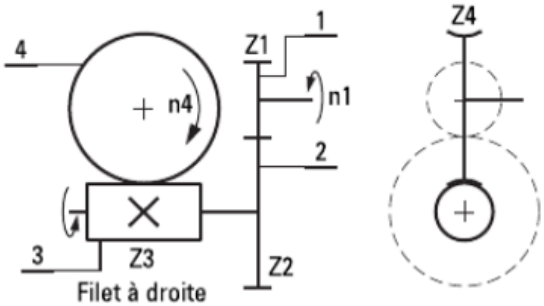


Doc. SEW-USOCOME

$$r = \frac{n4}{n1} = \frac{z1 \cdot z3}{z2 \cdot z4}$$

Avec z3 : nombre de filets de la vis.

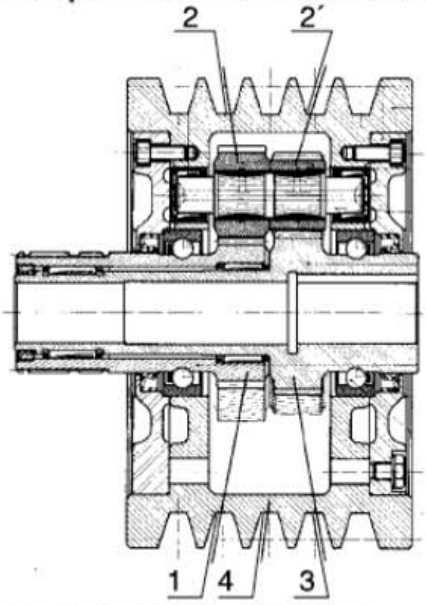
Rendement faible mais très grand rapport pour un encombrement réduit.

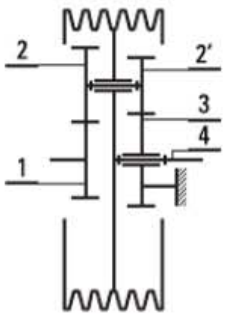


Avantages

Les réducteurs à trains épicycloïdaux permettent d'obtenir de très grands rapports de transmission dans un encombrement réduit.

Exemple d'utilisation d'un réducteur à trains épicycloïdaux (poulie REDEX)





Le mouvement entre par le pignon arbre (1) et sort par le porte-satellite (4) (poulie).
Le train épicycloïdal est du type **3** (voir page suivante).

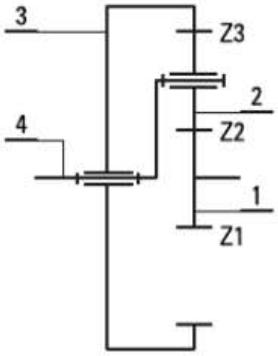
Train épicycloïdal de type 1

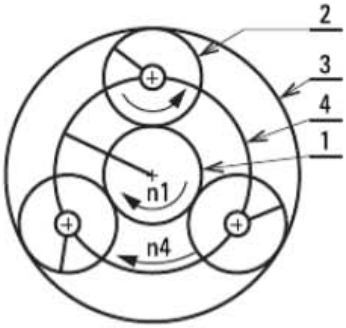
1 : planétaire d'entrée (arbre moteur).

2 : satellites (2, 3 ou 4).

3 : planétaire (fixe ou mobile).

4 : porte-satellites (ps).





Principe de calcul du rapport de transmission

a) Repérer les éléments sur le dessin d'ensemble.

b) Réaliser le schéma cinématique du train épicycloïdal.

c) Bloquer le porte-satellites et calculer le rapport de transmission du train simple associé.

$$\frac{n3/4}{n1/4} = -\frac{z1}{z3} = \frac{n3/0 - n4/0}{n1/0 - n4/0}$$

0 : repère lié au carter fixe.

d) Analyser les conditions de fonctionnement.

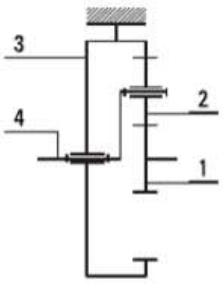
Exemple : Cas n° 1 : $n1/0 = n_e$
$n4/0 = n_s$
$n3/0 = 0$

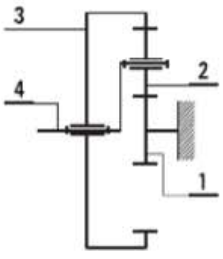
e) Calculer le rapport de transmission.

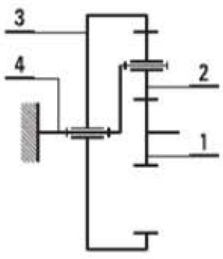
$$i = \frac{n_s}{n_e} = \frac{n4/0}{n1/0} = \frac{z1}{z1 + z3}$$

f) Condition géométrique :
$z3 = z1 + 2\,z2$

Différents modes de fonctionnement



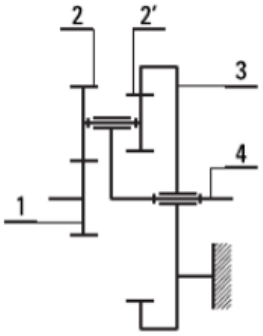




Cas n° 1	Cas n° 2	Cas n° 3
Planétaire **3** bloqué $n3/0 = 0$	Planétaire **1** bloqué $n1/0 = 0$	Porte-satellites bloqué $n4/0 = 0$
$\frac{n4/0}{n1/0} = \frac{z1}{z1 + z3}$	$\frac{n4/0}{n3/0} = \frac{z3}{z1 + z3}$	$\frac{n3/0}{n1/0} = -\frac{z1}{z3}$

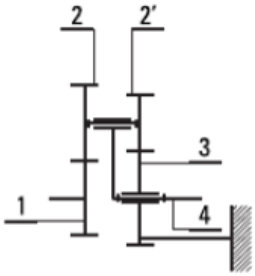
Autres dispositions usuelles (n3/0 = 0)

Train épicycloïdal de type 2



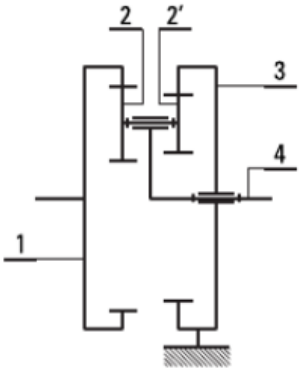
$$\frac{n1/0}{n4/0} = 1 + \frac{z2 \cdot z3}{z1 \cdot z2'}$$

Train épicycloïdal de type 3



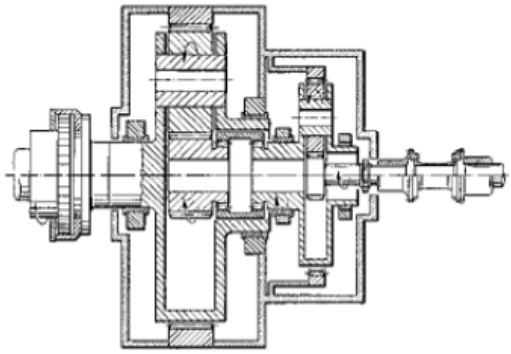
$$\frac{n1/0}{n4/0} = 1 - \frac{z2 \cdot z3}{z2' \cdot z1}$$

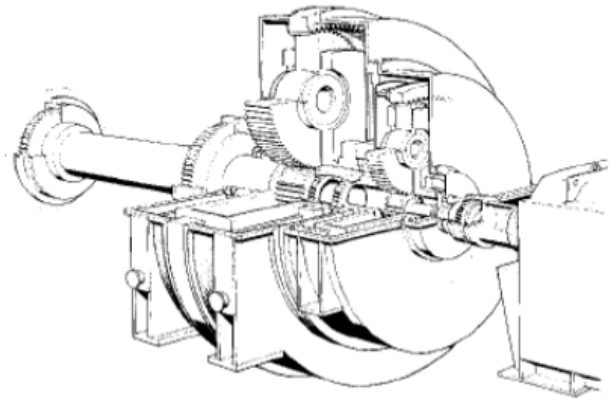
Train épicycloïdal de type 4



$$\frac{n1/0}{n4/0} = 1 - \frac{z2 \cdot z3}{z2' \cdot z1}$$

Trains d'engrenages épicycloïdaux en série





Doc. MAAG

Réducteur planétaire pour broyeur

Les réducteurs à trains épicycloïdaux en série permettent de réduire considérablement la fréquence de rotation à la sortie et permettent d'obtenir des couples de sortie importants.

Exemple de détermination du rapport de transmission du réducteur MAAG.

$$\frac{n7/0}{n1/0} = \left(\frac{z1}{z1+z3}\right) \cdot \left(\frac{z4}{z4+z6}\right)$$

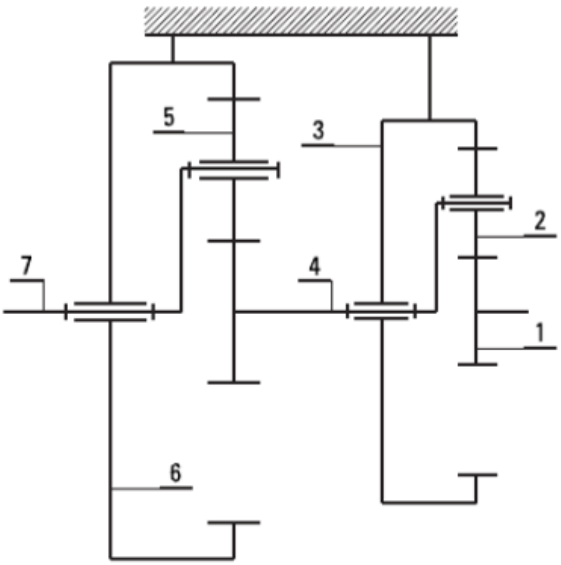
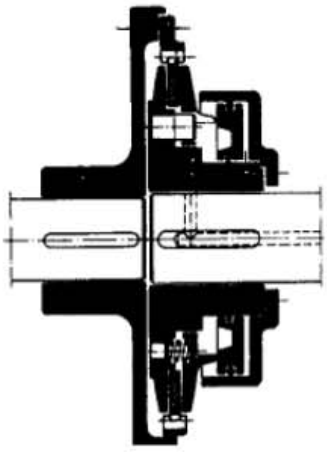


Schéma cinématique du réducteur MAAG

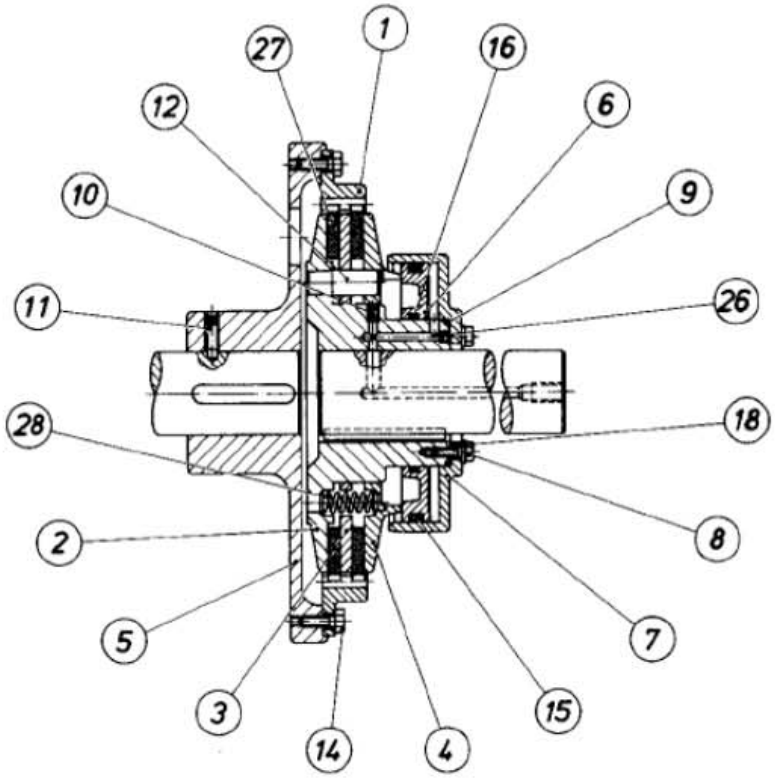
3.3.3. EMBRAYAGES

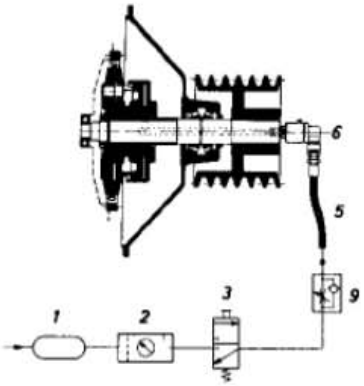
EMBRAYAGES À FRICTION À DISQUES

Embrayage à friction à disques à **commande pneumatique**
Il transmet le couple par friction sèche et permet une accélération continue des machines et une très bonne transmission des couples.
L'air comprimé est introduit dans le cylindre annulaire par l'arbre creux.
L'élément d'embrayage composé du cylindre et du piston est étanchéifié par des joints toriques et des joints rainurés.

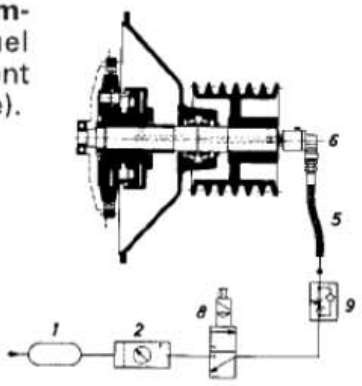


1 : couronne dentée
2 : moyeu d'embrayage
3 : disque intérieur
4 : disque de pression
5 : moyeu à flasque
6 : piston
7 : cylindre
8 : vis hexagonale
9 : joint torique
10 : vis de fermeture
11 : vis sans tête
12 : doigt de positionnement
14 : vis hexagonale
15 : joint torique
16 : joint torique
18 : rondelle
26 : canal de lubrification
27 : disques extérieurs
28 : ressorts de pression

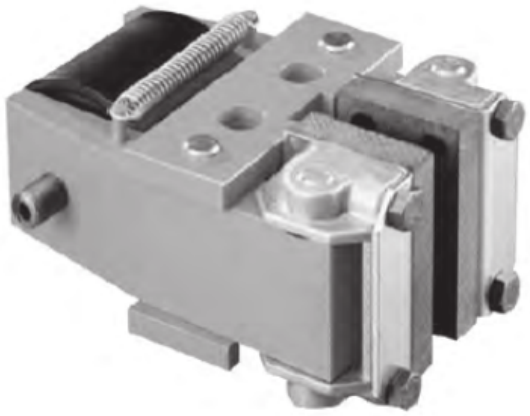




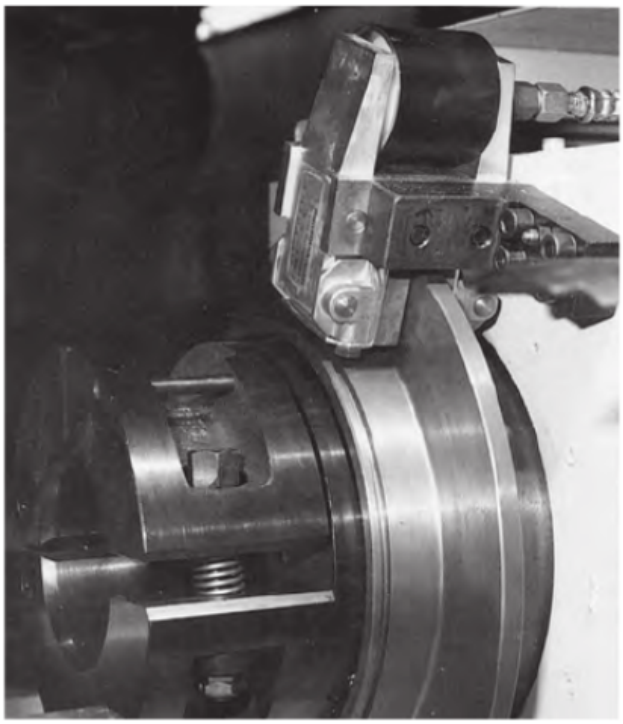
Commande pneumatique d'un embrayage à actionnement manuel (fig. de gauche) et à actionnement électromagnétique (fig. de droite).
1 : réservoir d'air comprimé
2 : unité d'entretien
3 : vanne à 3 voies
5 : flexible
6 : raccord de rotor
8 : vanne électromagnétique à 3 voies
9 : soupape d'étranglement de retenue



Doc. BROOK-HANSEN



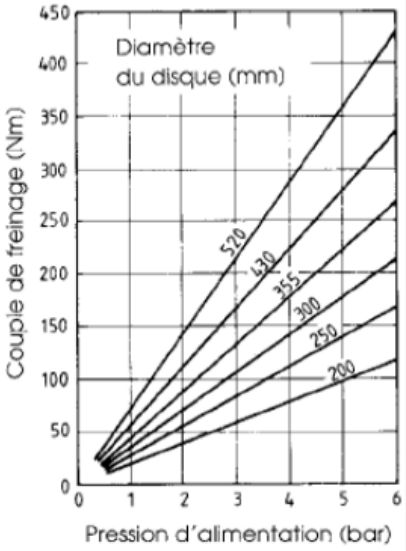
- Pince à commande pneumatique.
- Serrage pneumatique.
- Rappel par ressort.
- Cylindre à piston.
- Garniture sans amiante.
- Garnitures articulées pour assurer un contact parfait avec toute la surface du disque.



Système de frein à disque installé sur machine à imprimer.

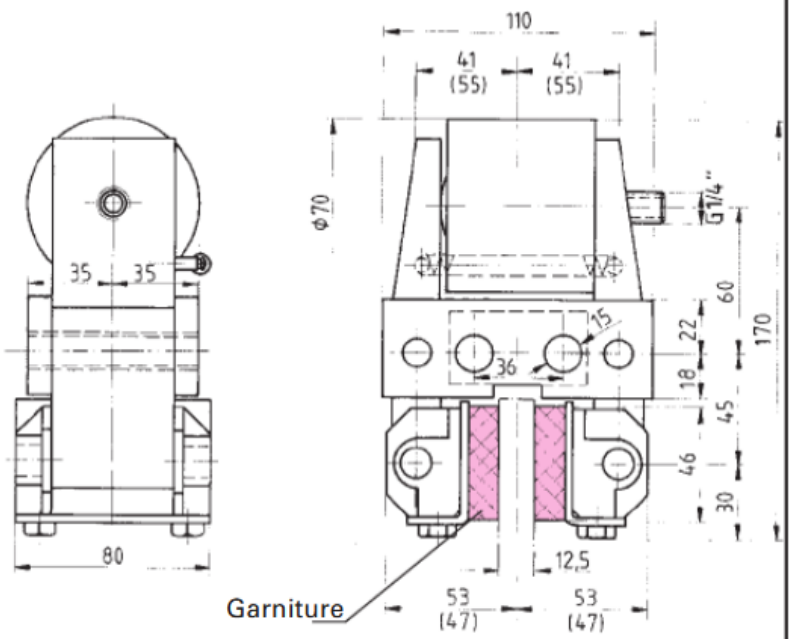
FREINS À DISQUES

Couples de freinage



Le couple de freinage obtenu par le système vérin-disque est fonction du diamètre du disque et de la pression d'alimentation du vérin.

Dimensions et description

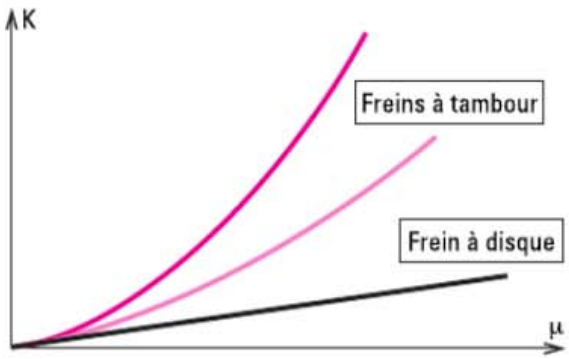


( ) valeurs des garnitures usées au maximum.
- Plan de fixation perpendiculaire au disque.
- Raccord d'alimentation G 1/4".
- Pression d'alimentation maximum : 6 bars.
- Poids : 4,6 kg.
- Épaisseur du disque : 12,5 mm.

DoC. RINGSPANN

AUTRES TYPES DE FREINAGE (VÉHICULES AUTOMOBILES)

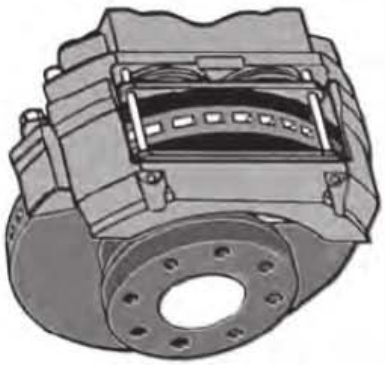
Force de freinage entre le pneu et le sol



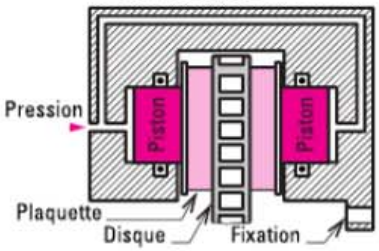
$$C = R \cdot F_r$$
$$C = r_e \cdot S \cdot p \cdot K$$
$$K = f(\mu)$$
$$F_r = M \cdot \gamma$$
$$K = \frac{R \cdot M \cdot \gamma}{r_e \cdot S \cdot p}$$

C : couple de freinage (Nm).
R : rayon de roulement (m).
F_r : force de freinage (N).
r_e : rayon efficace du frein (rayon intérieur pour un frein tambour (m).
S : surface de la commande soumise à l'action du fluide (piston dans un frein à disque (m^2).
p : pression du fluide (pascal).
μ : coefficient de friction de la garniture contre le disque.
γ : décélération du véhicule (m/s^2).
M : masse supportée par la roue (kg).
K : efficacité du frein.

Frein à disque

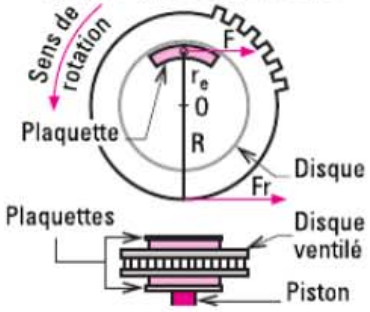


Étrier fixe



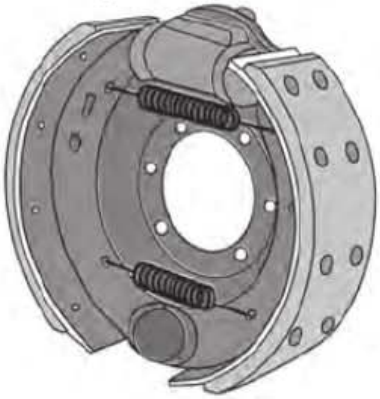
Le fluide sous pression vient pousser les pistons. Les deux plaquettes sont poussées simultanément.

Force de frottement

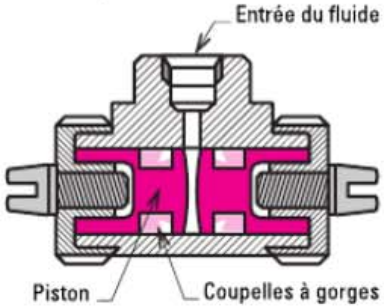


Frottement plaquettes sur disque

Frein hydraulique à tambour

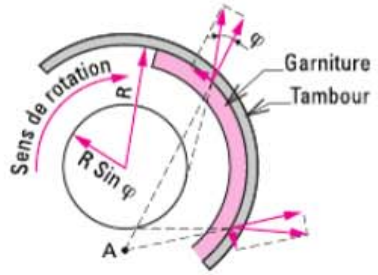


Cylindre de frein



Cylindre à deux pistons, qui comprime et tend les garnitures.

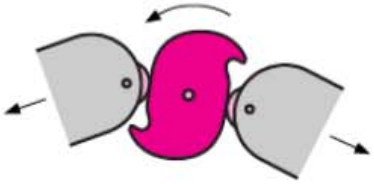
Efforts lors du freinage



$\mu = \tan \varphi$

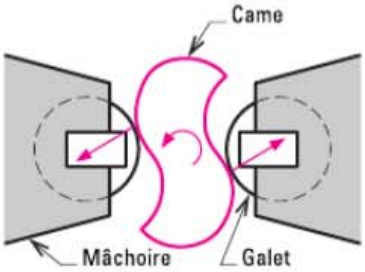
Frein à came en « S »

Actionneur du frein



Freins très répandus sur les poids lourds.
La came comprime et tend les garnitures. Peu efficace en marche arrière.

Commande frein



Pour éviter des vibrations lors du freinage, la came doit tourner dans le même sens que le tambour.

Doc. FÉRODO-ABEX

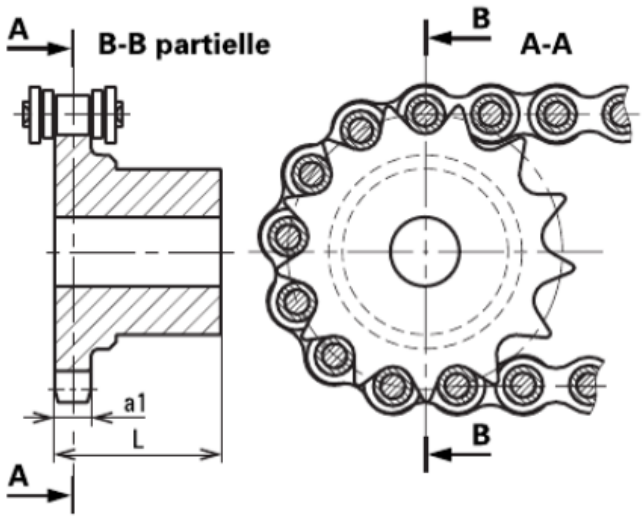
Documents réalisés par Jean-Paul Pompon, département Recherche et Développement FERODO ABEX - T&N Friction Product Group AfterMarket.

3.3.5. TRANSMISSION PAR PIGNONS-CHAÎNES

NF E 26-100/101/102. ISO 606

PRINCIPES GÉNÉRAUX

Le système **pignon-chaîne** permet de transmettre un mouvement de rotation sans glissement à une distance pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres. Contrairement aux courroies, une tension initiale n'est pas nécessaire pour obtenir l'adhérence, ce qui diminue l'effort.



Contraintes d'utilisation

Le rapport de transmission :

$$r = \frac{\omega 2}{\omega 1} = \frac{z1}{z2}$$

doit être, de préférence, inférieur à **1/8**.

L'angle d'enroulement de la chaîne sur le pignon doit être supérieur à 120°.

Éviter d'employer un pignon de moins de 13 dents.

L'entraxe de la transmission doit être réglable.

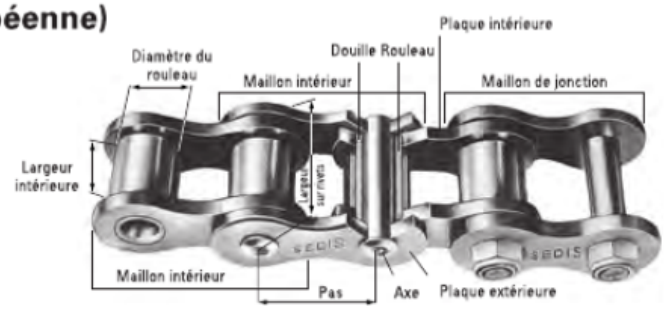
Il est indispensable d'assurer une bonne lubrification des parties frottantes, ce qui permet une utilisation à des vitesses jusqu'à 28 m/s et des puissances pouvant atteindre plusieurs centaines de kilowatts.

• Chaînes à rouleaux (série européenne)

La chaîne est constituée alternativement d'un **maillon intérieur** et d'un **maillon extérieur**.

Un **maillon de jonction** assure la fermeture de la chaîne.

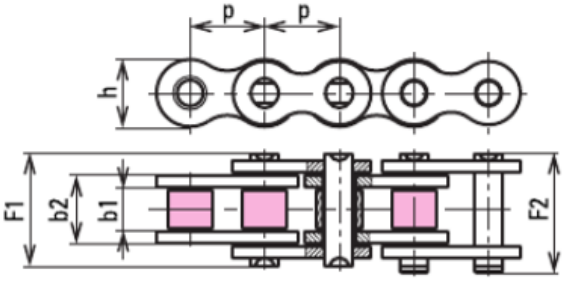
Les **maillons intérieurs** sont constitués de deux pièces en acier traité réunies entre elles par deux douilles emmanchées à force. Des rouleaux montés sur les douilles facilitent l'engrènement de la chaîne sur les pignons.



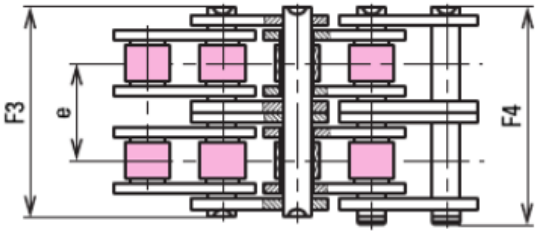
Doc. SÉDIS

Les **maillons extérieurs** sont constitués de deux plaques réunies entre elles par deux axes emmanchés à force et rivés.

• Dimensions des chaînes à rouleaux (extrait)



Chaîne simple B.1



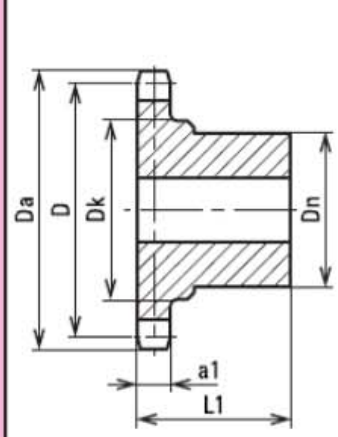
Chaîne double B.2

N° ISO*	Pas p	b1 mini	b2 maxi	h maxi	F1	F2	F3	F4	e
06 B	9,525	5,72	8,53	8,2	13,4	15,1	22,5	24,6	10,24
08 B	12,7	7,75	11,30	11,8	17,0	19,3	31,0	32,7	13,92
10 B	15,875	9,65	13,28	14,7	19,1	21,5	35,9	37,3	16,59
12 B	19,05	11,68	15,62	16,1	22,3	25,1	41,9	43,5	19,46
16 B	25,4	17,02	24,40	21,0	35,8	40,1	67,7	72,1	31,88
20 B	31,75	19,56	29,01	26,4	40,6	46,1	77,1	83,1	36,45
24 B	38,1	25,40	37,90	33,4	53,4	60,1	101,8	109,1	48,36

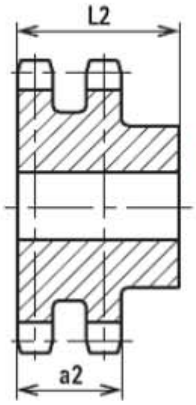
* 1.2. suivant le type de chaîne.

PIGNONS STANDARD

• Exemples de pignons



Pignon pour chaîne simple à rouleaux B.1



Pignon pour chaîne double à rouleaux B.2

Dp = p/sin(180°/z)

Dp : diamètre primitif
p : pas
z : nombre de dents

Doc. SÉDIS

Dimensions des pignons standard (extrait)

CHAÎNES Réf.	Pas (p)	Z	13	15	17	19	20	21	23	25	30	38	57	76
06 B.1	9,525	D	39,8	49,81	51,84	57,87	60,89	63,91	69,95	76,0	91,12	115,34	172,91	230,49
		Da	43	49	55	61	65	67	73	80	95	119	177	234
		Dk	28	34	40	46	49	52	58	64	80	104	162	219
		Dn	28	34	40	46	49	52	58	64	80	70	70	70
		a1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
		L1	24	24	28	28	28	28	28	28	28	32	32	32
06 B.2		a2	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	–	15,4	15,4	15,4
		L2	28	28	28	28	28	28	28	28	–	38	38	38
08 B.1	12,7	D	53,07	61,08	69,12	77,16	81,18	85,21	93,27	101,33	121,50	153,79	230,54	307,32
		Da	58	66	74	82	86	90	98	106	126	159	235	312
		Dk	37	45	53	61	66	70	78	86	106	139	216	292
		Dn	33	45	53	60	60	60	60	60	60	90	90	90
		a1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
		L1	24	24	24	28	28	28	38	38	38	38	38	38
08 B.2		a2	21	21	21	21	21	21	21	21	–	21	21	21
		L2	34	34	34	38	38	38	38	38	–	45	50	55
10 B.1	15,875	D	66,34	76,36	86,39	96,45	101,48	106,51	116,58	126,66	151,87	192,24	288,18	384,15
		Da	73	83	93	104	108	114	124	134	158	198	295	391
		Dk	50	60	70	80	85	90	100	110	135	176	270	367
		Dn	50	60	70	70	70	70	70	70	70	95	95	95
		a1	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
		L1	28	28	28	33	33	33	33	33	33	48	48	48
10 B.2		a2	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	–	25,5	25,5	25,5
		L2	40	40	40	45	45	45	45	45	–	60	60	65
12 B.1	19,05	D	79,60	91,62	103,67	115,74	121,78	127,82	139,90	151,99	182,25	230,69	345,81	460,98
		Da	88	101	113	125	131	136	148	161	191	240	355	470
		Dk	59	71	83	95	101	107	119	130	162	252	325	440
		Dn	59	65	77	85	85	85	85	85	90	100	100	100
		a1	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8
		L1	32	32	32	38	38	38	38	38	57	57	57	57
12 B.2		a2	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	–	30,3	30,3	30,3
		L2	45	45	50	50	50	50	50	50	–	60	60	65

3.3.6. TRANSMISSION PAR POULIES-COURROIES

CARACTÉRISTIQUES DE LA TRANSMISSION

Le système **poulies-courroies** permet de réaliser une transmission de puissance entre deux arbres éloignés avec modification de la fréquence de rotation et du couple transmis.
Transmission souple et silencieuse.

Rapport de transmission

$$r = \frac{\omega 2}{\omega 1} = \frac{d1}{d2}$$ (au glissement près)

Glissement de l'ordre de 1 à 3 % entre la poulie et la courroie.

Rapport des couples transmissibles

$$\frac{C2}{C1} = \frac{\omega 1}{\omega 2}$$ (au rendement près)

Le rendement dépend des matériaux utilisés, de la longueur de l'arc d'enroulement de la courroie. Il est défini par des facteurs correctifs (donnés par les constructeurs) qui modifient la puissance transmissible.

Tension de la courroie
En fonctionnement normal, la tension de la courroie dans les deux brins dépend du sens de rotation de la poulie motrice.

$$T = t \cdot e^{\mu\alpha}$$

t : tension dans le brin mou.
T : tension dans le brin tendu.
μ : coefficient de frottement.
α : angle d'enroulement.

Relation entre couple moteur et tension dans la courroie

$$Cm = C1 = (T - t) \cdot d1/2$$

Tension de pose (au montage)

$$To = (T + t)/2$$

Longueur de la courroie et entraxe **E**

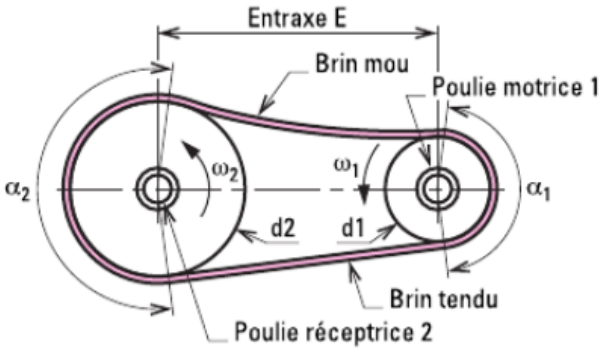
$$Lo = 2E + 1{,}57\ (d2 + d1) + \frac{(d2 - d1)^2}{4E}$$

Lo : longueur théorique compte tenu de l'entraxe de départ.
Il conviendra d'adopter une longueur de courroie normalisée **L**.
Le nouvel entraxe devient alors :

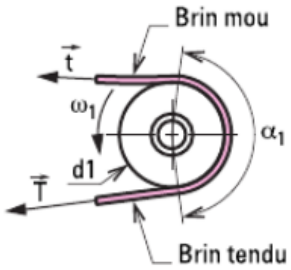
$$E' = E + \frac{(L - Lo)}{2}$$ si $L > Lo$

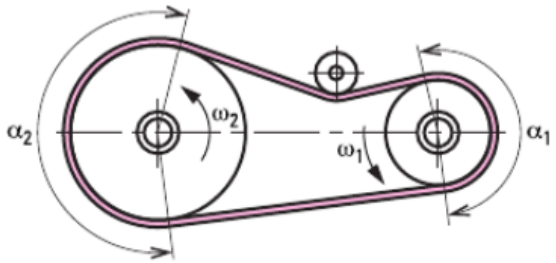
ou

$$E' = E - \frac{(L - Lo)}{2}$$ si $L < Lo$

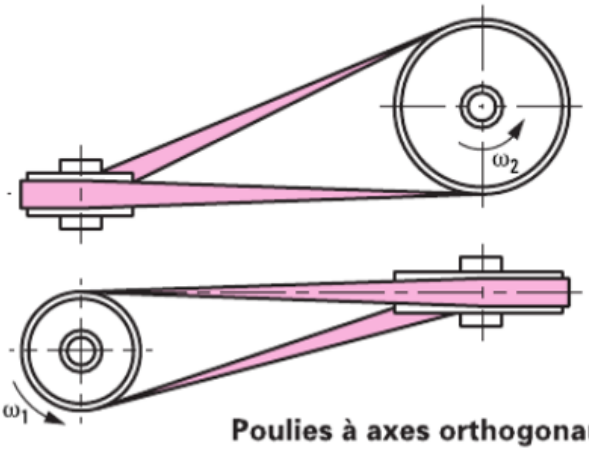


Poulie motrice 1 isolée





Un **galet tendeur** permet d'augmenter l'angle d'enroulement donc le couple transmissible.



Poulies à axes orthogonaux

Transmission par poulies-courroies

Guide de choix d'une courroie

Aptitudes / Type	Puissance transmissible (kW)	Rapport de transmission	Vitesse de courroie (m/s)	Allongement	Rendement (%)	Tenue en température (°C)	Régularité de fonctionnement	Observations - Utilisation
Courroie crantée synchrone*	jusqu'à 95 kW pour une largeur b = 100 mm	⩽ 1/10	⩽ 60	ne s'allonge pas	⩽ 98	– 40 à + 100	++	– Machines de bureau. – Rotatives (imprimeries). – Outils portatifs. – Réducteurs de vitesse. – Commande d'ascenseur. – Entraînement arbres à cames. – Mécanismes de positionnement. – Compteurs.
Courroie trapézoïdale série classique	jusqu'à 30 kW pour une largeur b = 22 mm	⩽ 1/15	⩽ 30	faible	⩽ 96	– 55 à + 70	+	– Concasseurs à mâchoires. – Industries minières. – Variateurs de vitesse. – Groupes entraîneurs. – Machines agricoles. – Convoyeurs - Transporteurs. – Accepte les contraintes brusques. – Force circonférentielle élevée.
Courroie trapézoïdale* série étroite lisse	jusqu'à 65 kW pour une largeur b = 22 mm	⩽ 1/10	⩽ 40	faible	⩽ 96	– 55 à + 70	+	– Machines de génie civil. – Industrie minières (mines de fond). – Groupe entraîneur. – Machines à bois (scie à cadre). – Élévateurs de décharge. – Accepte les rudes conditions de service.
Courroie trapézoïdale série étroite crantée	jusqu'à 80 kW pour une largeur b = 22 mm	⩽ 1/10	⩽ 50	très faible	⩽ 98	– 30 à + 80	++	– Compacteurs - Déchiqueteuses. – Rotatives (imprimeries). – Groupe électrogène de soudure. – Bandes transporteuses. – Machines à bois (raboteuse, dégauchisseuse). – Extrudeuse - Compresseurs à piston. – Ventilateurs - Pompe centrifuge.
Courroie à stries	jusqu'à 20 kW	⩽ 1/40	⩽ 60	faible	⩽ 98	– 30 à + 80	+++	– Machines à affranchir. – Machines offset. – Raboteuses portatives. – Machines à laver. – Fraiseuses - Cireuses. – Entraîneurs de broches. – Broyeurs - Effiloir. – Véhicules automobiles.
Courroie plate	jusqu'à 10 kW pour une largeur b = 10 mm	⩽ 1/20	⩽ 60	très faible	⩽ 98	– 30 à + 80	+++	– Mémoire à disque (informatique). – Machines de nettoyage des sols. – Courroies de fermeture.

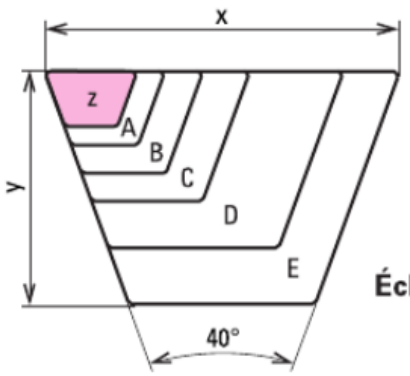
+++ : Excellente. ++ : Très bonne. + : Bonne.

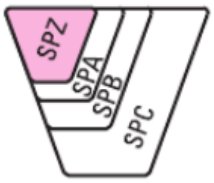
* Seuls ces types de courroies sont développés dans cet ouvrage.

POULIES ET COURROIES TRAPÉZOÏDALES

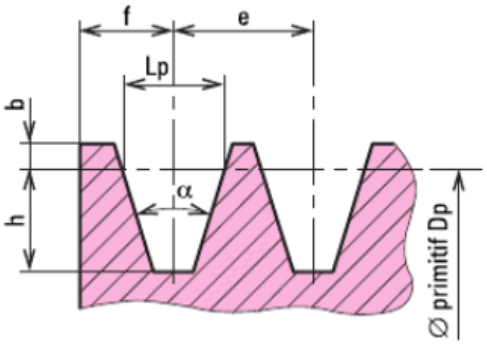
NF T 47-117
ISO 4181

Dimensions des courroies et des gorges





Échelle 1/1

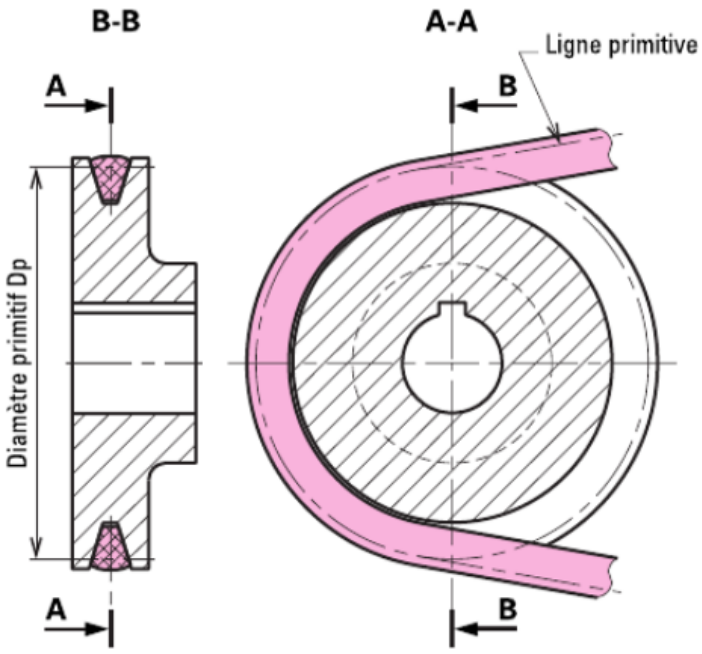


$34° < \alpha < 38°$ en fonction du diamètre primitif et du type de courroie utilisé.

	Série classique						Série étroite			
	Z	A	B	C	D	E	SPZ	SPA	SPB	SPC
X	10	13	17	22	32	38	10	13	16	22
Y	6	8	11	14	19	25	8	10	13	18
Lp	8,5	11	14	19	27	32	8,5	11	14	19
f	8	10	12	16	23	29	8	10	12	16
e	12	19	19	25	36	44	12	15	19	25
h	7	8,7	10,8	14,3	19,1	23,4	8,5	11	14	19
b	2,5	3,3	4,2	5,7	8,1	9,6	2,1	2,8	3,5	4,8
Lr	355 à 2 025	455 à 4 040	690 à 9 160	1 120 à 12 320	2 075 à 19 260	3 085 à 19 270	500 à 3 550	750 à 4 500	1 250 à 8 000	2 000 à 12 500

Diamètres primitifs des poulies pleines (extraits)

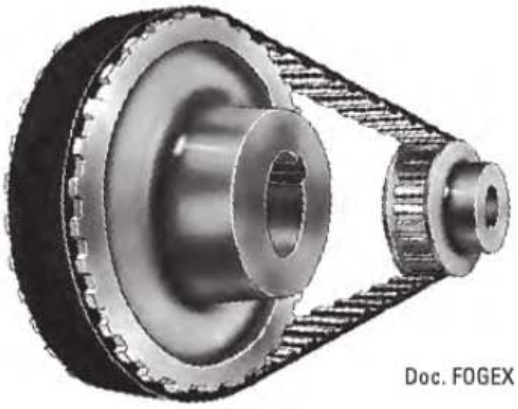
Z SPZ		A SPA	B SPB	C SPC
50	160	idem à Z à partir de 63 plus 800 1 000	idem à A à partir de 90 plus 710 800 900 1 000 1 250	idem à B à partir de 100
56	180			
63	200			
71	225			
75	250			
80	280			
85	315			
90	355			
95	400			
100	450			
106	500			
112	630			
118				
125				
132				
140				



En fabrication standard, on trouve des poulies de 1, 2, 3 ou 4 gorges.

Les **courroies synchrones sont dentées.** Ce mode de transmission de puissance allie les avantages des engrenages (transmission intégrale du mouvement) et des courroies (transmission souple et silencieuse). C'est une transmission sans glissement, la tension dans la courroie est plus faible, car la transmission s'effectue par obstacle et non plus par adhérence.

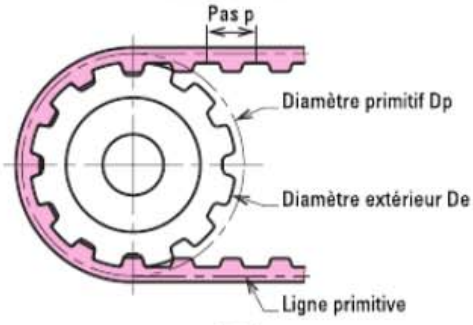
$$\frac{\omega 2}{\omega 1} = \frac{Dp1}{Dp2} = \frac{z1}{z2}$$



Doc. FOGEX

Dimensions des courroies crantées (extrait)

Pas 1/5" = 5,08		Pas 3/8" = 9,52		Pas 1/2" = 12,7	
XL		L		H	
Long. prim.	Z	Long. prim.	Z	Long. prim.	Z
152,4 à 660,4	30 à 130	314,3 à 1524	33 à 160	609,6 à 4318	48 à 340
Pas 7/8" = 22,22		Pas 1" 1/4 = 31,75			
XH		XXH			
1289 à 4445	58 à 200	1778 à 4572	56 à 144		



Largeurs des courroies standard

XL	L	H	XH	XXH
6,35	12,70	19,05	50,80	50,80
9,52	19,05	25,40	76,20	76,20
	25,40	38,10	101,60	101,60
		50,80		127,00
		76,20		

pas MXL 2/25" Mini pitch (2,032 mm)

pas XL 1/5" (5,08 mm)

pas L 3/8" (9,52 mm)

pas H 1/2" (12,70 mm)

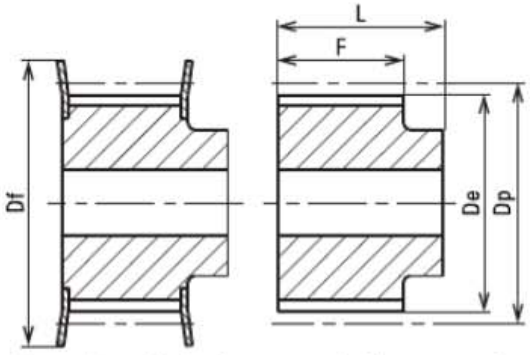
Dimensions des poulies

XL					
Z	De	Dp	Df	L	F
10 à 72	15,66 à 115,92	16,17 à 116,42	23 à 61	20 à 25	14,3
L					
z	De	Dp	Df	L	F
10 à 96	29,56 à 290,30	30,33 à 291,06	37 à 150	28 à 42	19 25,4 31,8
H					
z	De	Dp	Df	L	F
14 à 120	55,22 à 483,73	56,59 à 485,12	64 à 168	40 à 45	25,4-31,8 46-58,7 85,7
XH					
z	De	Dp	Df	L	F
18 à 120	124,55 à 846,14	127,34 à 848,93	142 à 267	80 à 100	65 90,5 116
XXH					
z	De	Dp	Df	L	F
18 à 90	178,87 à 906,52	181,91 à 909,57	198 à 240	100 à 120	64,2-91,4 118-145,3

pas XH 7/8" (22,23 mm)

pas XXH 1 1/4" (31,75 mm)

Échelle 1/1



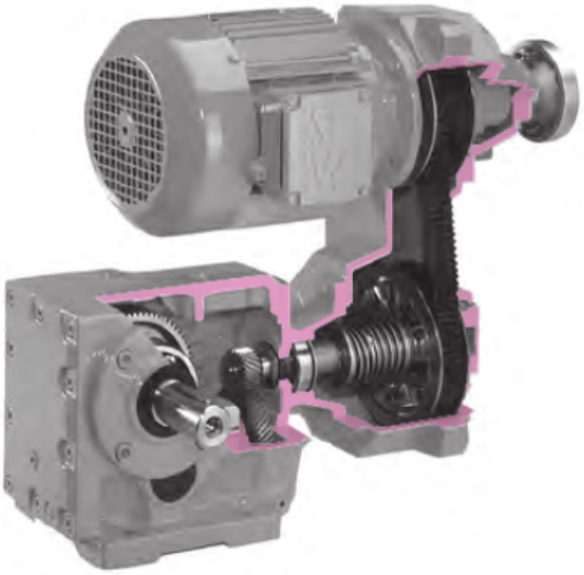
F : fonction de la largeur de la courroie.

3.3.8. VARIATEURS DE VITESSE À COURROIE

PRINCIPES

Principe : modification de la vitesse par modification du diamètre de la poulie montée sur l'arbre-moteur.
Moteur électrique équipé d'un variateur à courroie.

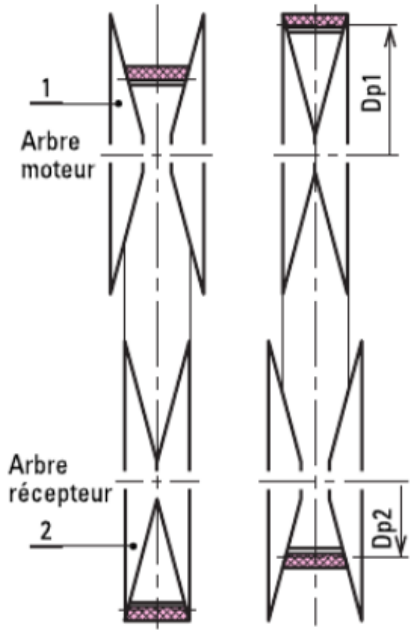
Doc. BROOK-HANSEN



Moteur électrique équipé d'un variateur à courroie et d'un réducteur à engrenages

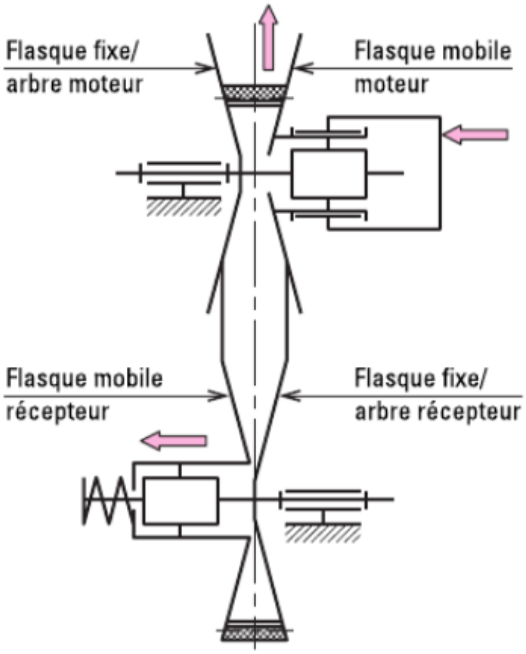
Doc. SEW-USOCOME

Principe de la variation de vitesse



Les poulies sont à diamètre variable.
Le rapport de transmission dépend du rayon d'enroulement de la courroie trapézoïdale :

$$\frac{\omega 2}{\omega 1} = \frac{Dp1}{Dp2}$$

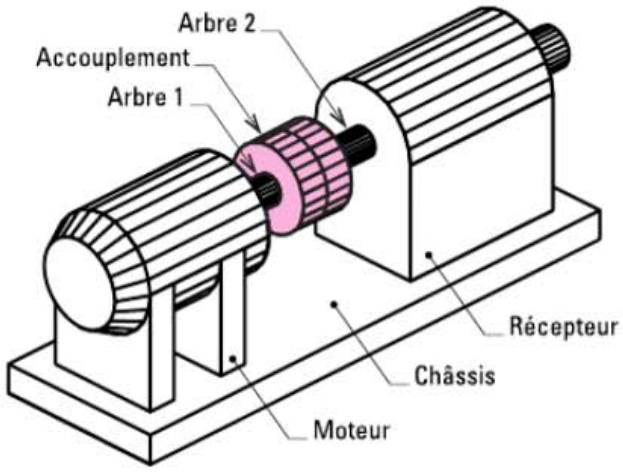


Le réglage de la variation de vitesse s'opère sur la poulie motrice, soit manuellement, soit par un servomoteur asservi.
Domaine d'utilisation :
– Mélangeurs, agitateurs.
– Machines-outils.
– Bobineuses - séchoirs.
– Trains à fils - laminoirs...

3.3.8. ACCOUPLEMENTS

PRINCIPES

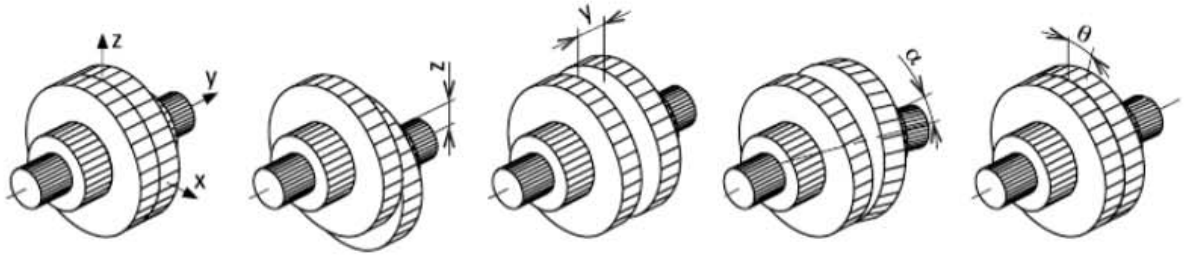
Les accouplements permettent de transmettre une puissance entre deux arbres colinéaires ou pouvant admettre des défauts d'alignement. On distingue deux catégories d'accouplements :
– les accouplements temporaires (liaison débrayable entre les deux arbres), les accouplements à glissement temporaire (embrayages, limiteurs de couple) ou à glissement permanent (coupleurs hydrauliques) ;
– les accouplements permanents (liaison rompue entre les deux arbres uniquement en cas de démontage de l'accouplement).



Choix d'un type d'accouplement

Ce choix dépend essentiellement :
– des défauts d'alignement entre les arbres,
– des irrégularités des couples transmissibles,
– des fréquences de rotation des arbres,
– des conditions extérieures de fonctionnement (milieu ambiant, température...).

Désalignements autorisés par un accouplement

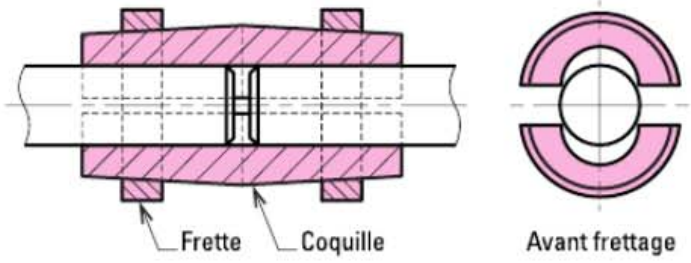


Alignement parfait (coaxialité des deux arbres) | Désalignement radial | Désalignement axial | Désalignement angulaire | Désalignement torsionnel

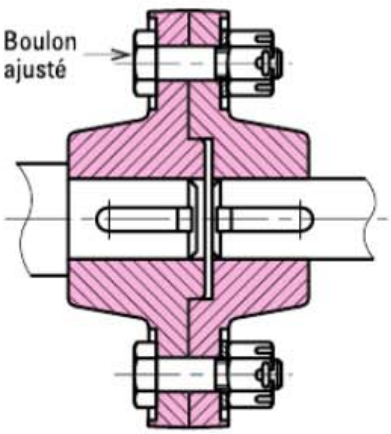
ACCOUPLEMENTS RIGIDES

Caractéristiques générales

Les accouplements rigides ne supportent aucun défaut d'alignement des deux arbres.
L'accouplement peut être réalisé par adhérence (manchons à frettes) ou par obstacles (manchons à plateaux, manchons cannelés ou profils **polygon**).

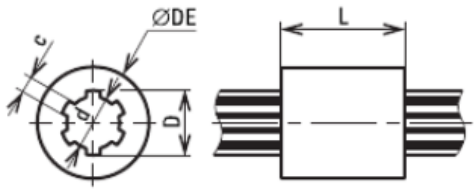


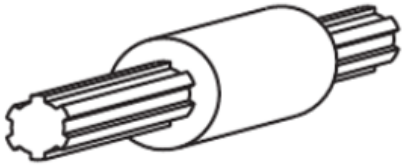
Manchon à frettes
(transmission de puissance faible)



Manchon à plateaux (les boulons ajustés transmettent la puissance d'un plateau à l'autre)

Manchons cannelés



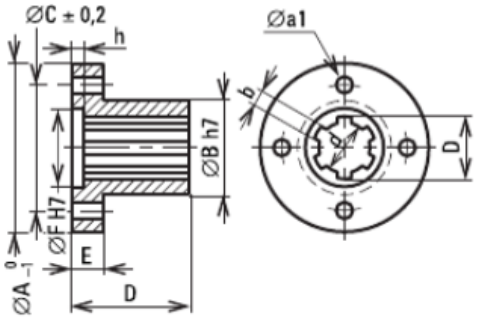


D		d −0 −0,08	c −0 −0,08	Z	DE	L
14	−0,07	11	3	6	21,5	25
16	−0,20	13	3,5	6	27,5	30
20	−0,07	16	4	6	31,5	35
22	−0,25	18	5	6	35,5	40
25		21	5	6	39,5	40
28		23	6	6	39,5	45
32	−0,07	26	6	6	44,5	50
38	−0,27	32	6	8	54	60
42		36	7	8	59	60
48		42	8	8	64	70
54		46	9	8	80	90

Matière : acier étiré, acier inox.

Utilisation : tracteurs, machines agricoles, engins de travaux publics.

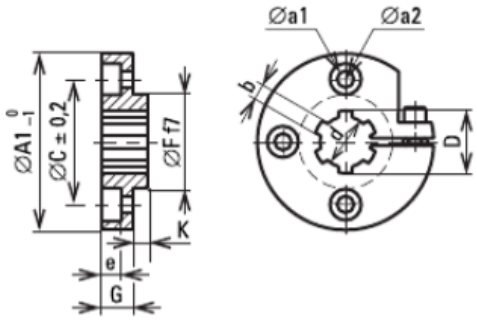
Manchons cannelés à flasque



D	Tolérances b	Tolérances d_1	Tolérances d_2	A	B	C	D 0 −1	E	F	h	a_1
14	+0,045 +0,020		+0,11 +0	38	20	28	30	8	18	3	4,3
16		+0,018 +0		43	24	32	30	8	20	3	4,3
20			+0,13 +0	52	28	38	35	9	26	3	5,3
22	+0,060 −0,030			54	30	40	40	9	28	3	5,3
25		+0,021 +0		62	34	48	50	10	35	3,5	6,4
28				64	36	50	55	10	35	3,5	6,4
32				69	42	56	60	10	40	3,5	6,4
38	+0,060 +0,030			82	50	65	70	14	45	4	8,4
42		+0,025 +0	+0,16 +0	90	54	70	80	16	55	4	10,5
48	+0,076 −0,040			95	60	75	90	16	60	4	10,5
54			+0,19 +0	99	65	80	100	16	65	4	10,5

Matière : acier nitruré, bronze.
Peut être utilisé comme guide d'arbre cannelé.

Bagues de blocage

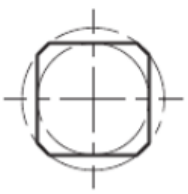


D	A_1	C	F	G	K	e	a_1	a_2
14	40	28	18	11	2	5	4,3	8
16	45	32	20	12				
20	52	38	26	14		6	5,3	10
22	54	40	28	14				
25	62	48	35	14	3	7	6,4	11
28	65	50	35	14				
32	70	56	40	15				
38	82	65	45	20		9	8,4	15
42	90	70	55	22		11	10,5	18
48	95	75	60	22				
54	99	80	65	24				

Permet de réaliser un arrêt en translation sur un arbre cannelé.

Arbres et manchons polygonaux

Le profil **polygon** permet des transmissions de puissances supérieures aux arbres cannelés à des vitesses élevées, l'arbre étant plus rigide qu'un arbre cannelé.



ACCOUPLEMENTS ÉLASTIQUES

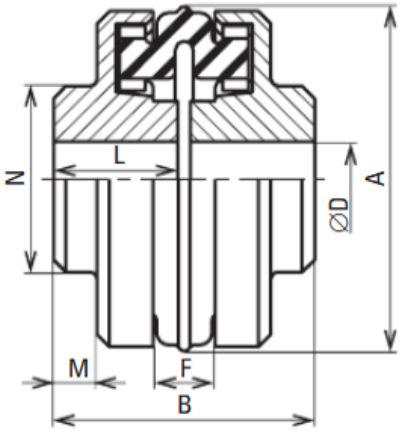
Guide de choix d'accouplements élastiques

Les accouplements élastiques tolèrent, en fonction de leur conception, différents défauts d'alignement, ce qui permet de compenser les défauts de montage entre les deux arbres.

Type / Aptitudes	Désalignement radial en %	Désalignement axial en %	Désalignement angulaire en degré	Désalignement torsionnel en degré	Couple transmissible en Nm	Matériaux de la garniture	Remarques Utilisation
* Sure-flex	0,3 à 0,4	3	0,15 à 1	7 à 15	50 à 8 000	Hytrel *** EPOM + Néoprène	Accouplement super-élastique. Absorbe de fortes vibrations. Entraînement de compresseurs.
* Texoflex	0,3	1,5	0,5	5	100 à 10 000	EPOM	Plateaux en fonte. Tampons élastiques logés dans des alvéoles. Pompes centrifuges.
* Pencoflex	0,08	0,8	0,1	2	250 à 600 000	Caoutchouc	Plateau femelle et plateau mâle sur lequel sont montées des broches munies de douilles en caoutchouc. Pour surcharges importantes. Concasseurs.
* Hatéco	0,3	1,5	0,5 à 1,5	0	200 à 1 500 000	–	Accouplement flexible de grande rigidité. Deux plateaux à denture bombée reliés par un manchon à denture intérieure. Laminoirs.
** HUCO	11	Jusqu'à 6,3 mm selon la taille	1	0	0,3 à 45	Acétal Nylon 11	L'accouplement est constitué de deux plateaux rainurés et d'un disque de transmission du couple. Tables de positionnement. Systèmes pas à pas.
** HUCO-POL	15,5 mm pour cardan double	–	45	0	0,11 à 10,7	–	Nombreuses versions : – Cardan simple : non homocinétique. – Cardan double : homocinétique. – Cardan double à arbre télescopique. – Équipement de laboratoire.

* Accouplements **BROOK-HANSEN** ** Accouplement **ACMÉ** *** **EPOM** : Éthylène Propylène Diène Monomère

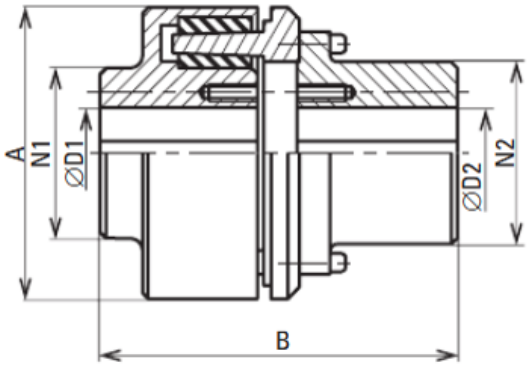
Accouplement Sure-flex



A	B	F	L	M	N	D min.	D max.	M maxi tr/min	C maxi Nm*
83	75	$22^{\pm1,5}$	34	11,5	48	13	29	7 600	27
103	92	$26^{\pm1,5}$	41	15,5	64	16	38	6 000	51
120	104	$30^{\pm2}$	47	17	71	16	44	5 250	82
139	117	$33^{\pm2}$	53	19	83	19	51	4 500	128
164	133	$40^{\pm2}$	61	20	92	22	62	3 750	204
231	186	$53^{\pm2,5}$	87	28,5	133	38	85	3 600	510
310	240	$73^{\pm3}$	110	33,5	156	45	110	2 400	1 280
492	367	$125^{\pm4}$	150	51	205	51	150	1 500	5 350

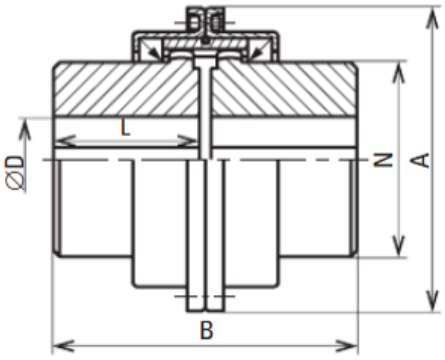
* C maxi pour une garniture de l'accouplement en EPOM.

Accouplement Texoflex



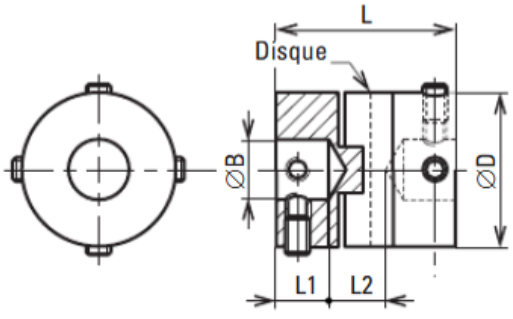
A	B	N1	N2	D1 min.	D1 max.	D2 min.	D2 max.	M maxi en tr/min	C maxi en Nm
108	118,5	69	69	20	48	20	48	5 800	106
125	137	79	79	24	55	24	55	5 100	184
142	153,5	86	89	27	60	28	63	4 500	305
165	172	95	100	30	67	32	71	3 900	490
190	193,5	106	112	34	75	37	80	3 400	775
210	216	112	125	37	80	42	90	3 100	1 200
269	274	142	160	49	102	55	115	2 400	2 800
404	389	199	219	71	145	80	160	1 600	9 400

Accouplement Hatéco type TJ



A	B	N	D min.	D max.	M maxi en tr/min	C maxi en Nm
76,5	58	40	0	25	6 300	200
94	75	54	16	38	4 800	450
109	95	64	19	45	4 100	800
134,5	135	89	26	65	3 000	2 000

Accouplement Huco-Oldham



Exemple de montage

D	L	L1	L2	B maxi	Vis	C maxi en Nm
9,5	12,7	3,8	5,1	5	M3	2
12,7	15,9	4,3	7,3	6,35	M3	4
19,1	22	6,3	9,4	8	M3	10
25,4	28,4	8,6	11,2	10	M4	13
33,3	48	13	22	14,29	M4	53
41,3	50,8	16,7	17,4	16	M5	57

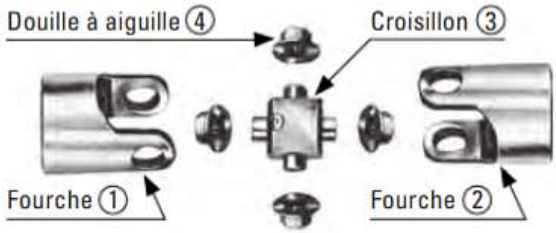
Matériaux : moyeu laiton ou alliage léger suivant les dimensions.
Les disques peuvent être à alésage traversant.

JOINTS DE CARDAN

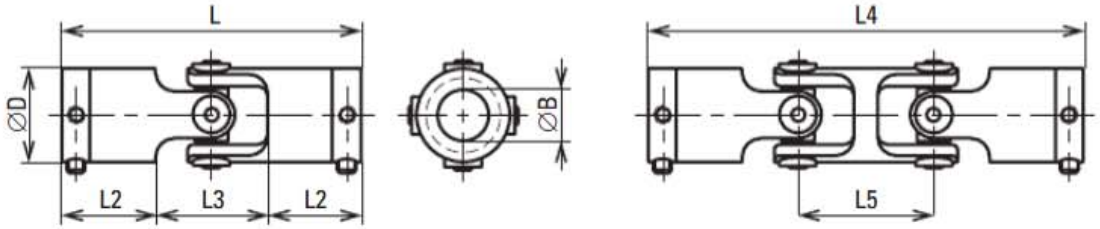
Accouplements par joints homocinétiques (cardans)

Le joint de cardan est composé de deux fourches **1** et **2**, d'un croisillon **3**.
La liaison entre les deux éléments est assurée par quatre douilles à aiguilles **4**.

Matériaux :
– croisillon en laiton,
– fourche en acétal.

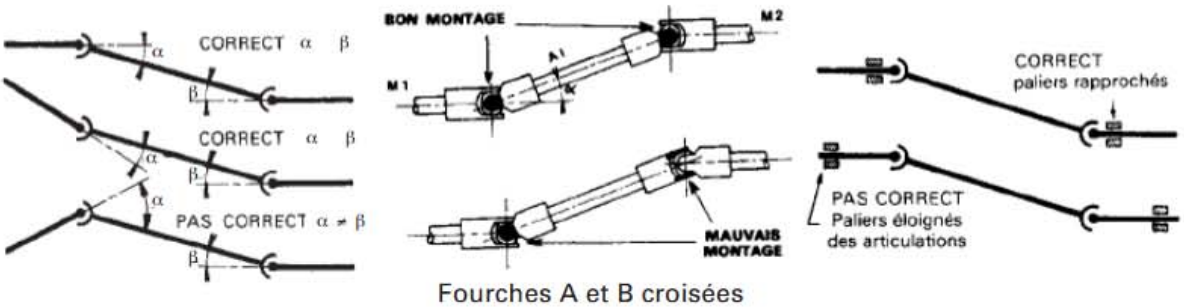


Dimensions (Extraits ACME)



Cardan simple								Cardan double			
Taille	D	B maxi	L	L2	L3	Vis	C maxi en Nm	L4	L5	C maxi en Nm	Désalignement radial maxi en mm
06	7,1	3,18	27,2	9,3	8,6	M3	0,11	35,3	8,1	0,08	5,6
09	11,1	5	37,6	13,1	11,4	M3	0,36	50,8	13,2	0,16	9,1
13	14,3	6,35	46,2	15,7	14,8	M3	0,85	62,1	15,9	0,59	10,9
16	17,5	10	67,6	22,3	23	M4	1,6	89,8	22,2	1,3	15,5
Angle de travail maxi 45° Fréquence de rotation maxi 1 000 tr/min								Angle de travail maxi 90° Fréquence de rotation maxi 1 000 tr/min			

Conditions d'homocinétisme – Conditions de montage



Fourches A et B croisées

Symboles des accouplements

Accouplements permanents		Accouplements temporaires			
	Accouplement (cas général)		Embrayage (cas général)		Coupleur automatique
	Accouplement rigide		Coupleur hydraulique		Embrayage centrifuge
	Accouplement élastique		Coupleur électrique		Roue libre
	Accouplement à cardan		Frein (cas général)		Limiteur de couple

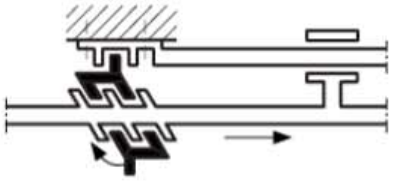
3.4. TRANSMISSION DE PUISSANCE AVEC TRANSFORMATION DE MOUVEMENT

3.4.1. SYSTÈME VIS-ÉCROU

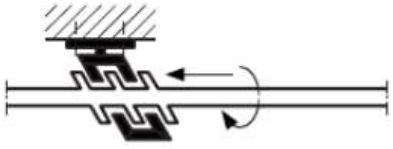
COMPARAISON DES SYSTÈMES VIS-ÉCROUS

VIS		ÉCROU	
TRANSLATION	ROTATION	TRANSLATION	ROTATION
0	0	1	1

VIS		ÉCROU	
TRANSLATION	ROTATION	TRANSLATION	ROTATION
0	1	1	0



VIS		ÉCROU	
TRANSLATION	ROTATION	TRANSLATION	ROTATION
1	0	0	1



VIS		ÉCROU	
TRANSLATION	ROTATION	TRANSLATION	ROTATION
1	1	0	0

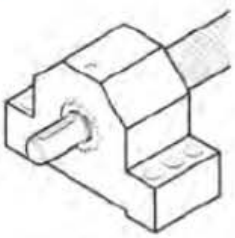
VIS ET ÉCROUS À BILLES

Vis et écrous à billes

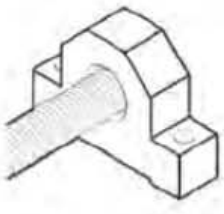
On définit le **système vis et écrous à billes** comme un élément mécanique capable de transformer un mouvement de rotation en mouvement de **translation** et vice-versa.
Le guidage s'effectue sur plusieurs rangées de billes et la circulation continue de ces billes est assurée par un canal de transfert.
Fonctionnement particulièrement silencieux.
Étanchéité efficace.
Grand rendement.

Paliers et écrous divers

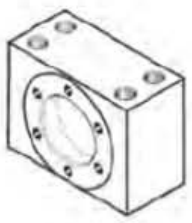
Roulement fixe



Palier à roulement fixe



Palier à roulement libre

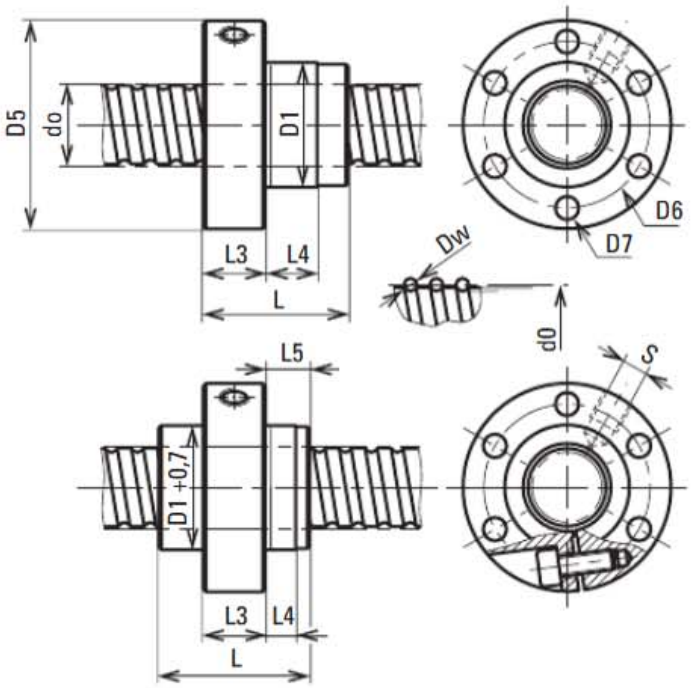


Boîtier d'écrou

DoC. ALMÉ-STAR

Avantages par rapport au système vis-écrou conventionnel sans billes

Rendement mécanique jusqu'à 98 % (90 % maxi pour un système conventionnel).
Usure réduite.
Durée de vie élevée.
Positionnement précis.
Vitesse de déplacement élevée.
Faible échauffement.
Réduction de puissance d'entraînement plus faible.



Désignation

Vis de précision rectifiée :
– do × Pas : 25 × 5,
– longueur totale L : 1500,
– longueur filetée L1 : 1 200,
– Extrémité : pour palier fixe,
– Degré de tolérance : T3.

Écrou à billes :
Simple à bride FEM-E-S.

Écart de déplacement toléré

Degré de tolérance T				
1	3	5	7	9
6	12	23	52	130
Écart toléré du déplacement e sur une course de 300 mm en µm.				

Écart de variation de déplacement sur la course totale C :

$$e_T = \frac{C}{300} e$$

Exemple : C = 1 000 mm, T3

$$e_T = \frac{1000}{300} \times 12 = 40\ \mu m$$

Dimensions

do × P	D1 g 6	D5	D6	L	L3	L4	L5	Trous n	Trous D7	L6	L7	S	Cap. de charge C (N)	Cap. de charge C_o (N)
8 × 2,5	16	30	23	16	8-13*	8-3*	3*	6-5*	3,4	1 500	–	3,9	2 900	3 100
12 × 5	24	40	24	28	12	10-8*	8*	6-5*	4,5	1 500	–	M6	6 500	7 500
16 × 5	28	53	40	40-35*	12-10*	10	10*	4-5*	6,6	1 500	1 000	M6	12 300	16 100
16 × 10	28	53	40	45	12-15*	16-15*	15*	4,5*	6,6	1 500	1 000	M6	9 600	12 300
20 × 5	33	58	50	45	12	10	–	6	6,6	1 800	1 200	M6	14 300	21 600
25 × 5	38	63	50	45	12-20*	10	12,5*	6,5*	6,6	1 800	1 500	M6	15 900	27 200
25 × 10	38	63	50	64	12-20*	16	22*	6-5*	6,6	2 500	1 500	M6	15 800	27 000
32 × 5	46	73	60	48	13-20*	10	14*	6-5*	6,6	2 500	3 000	M6	21 500	40 000
32 × 20	56	80	60	64	15-20*	25-22*	22*	6-5*	6,6	2 500	3 000	M6	13 500	21 700
40 × 5	56	80	68	54	15-20*	10	17*	6-5*	6,6	5 600	5 000	M8 × 1	29 100	64 300
40 × 20	63	95	78	88	15-25*	25	31,5*	6-5*	9	5 600	5 000	M8 × 1	37 800	62 800

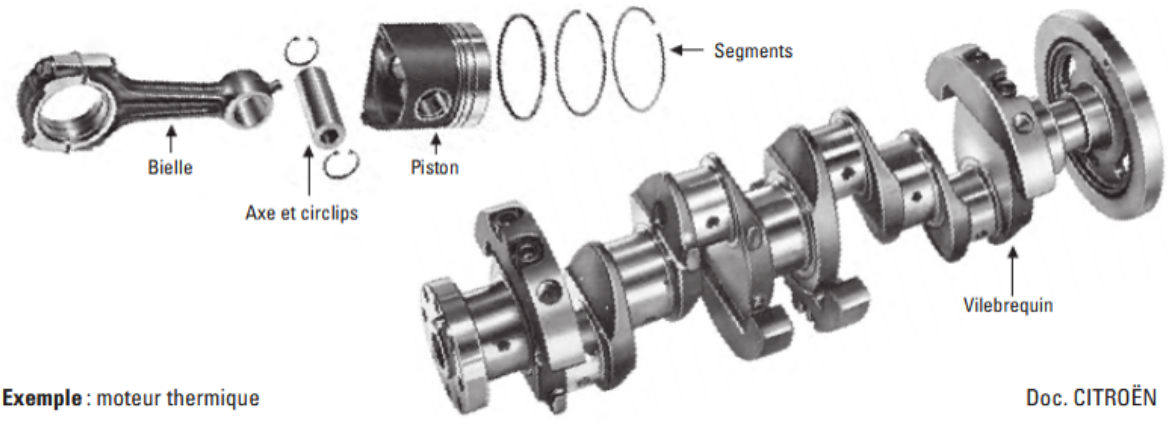
L6 : Longueur maximale standard de vis roulée.
L7 : Longueur maximale standard de vis rectifiée.
C : Capacité de charge axiale dynamique.
Ç : Capacité de charge axiale statique.
* : Pour écrou à billes à précharge réglable.

3.4.2. SYSTÈMES BIELLE-MANIVELLE

PRINCIPE

Le système **bielle-manivelle** permet principalement, la transformation d'un **mouvement circulaire** en un **mouvement rectiligne alternatif**, ou inversement.

Système bielle-manivelle double effet



Exemple : moteur thermique

Doc. CITROËN

Étude cinématique

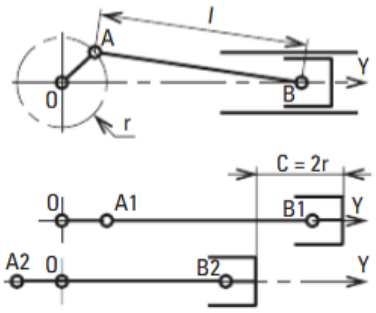
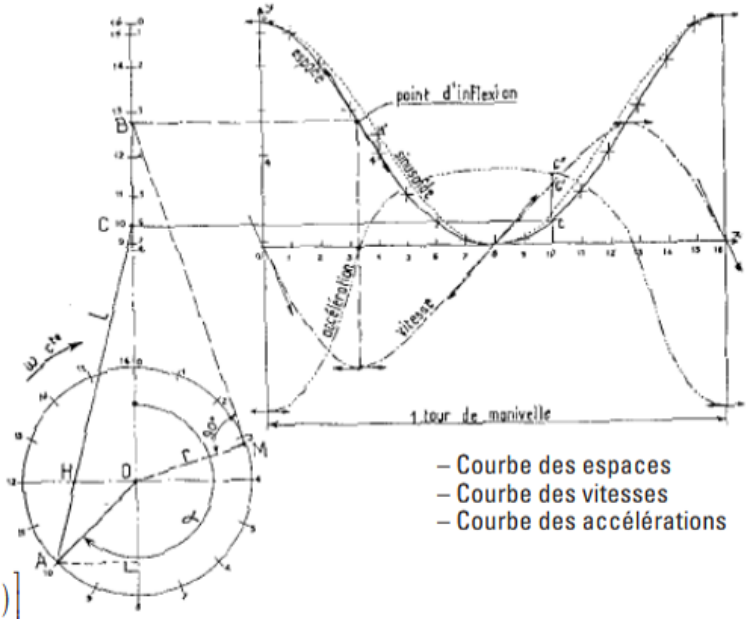


Schéma cinématique



- Courbe des espaces
- Courbe des vitesses
- Courbe des accélérations

Équations des courbes

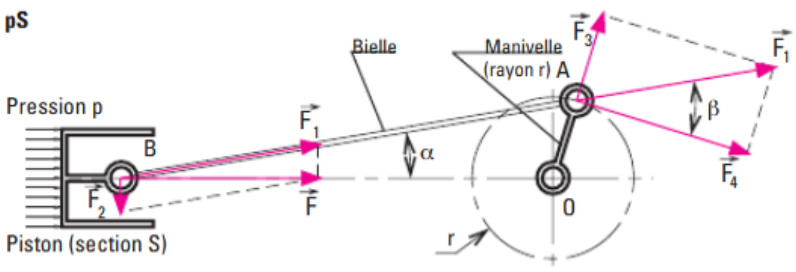
Espace $r\cos\alpha + l\left[1 - \frac{r^2}{4l^2}\left(1 - \cos 2\alpha\right)\right]$

Vitesse $-r\omega\left(\sin\alpha + \frac{r}{2l}\sin 2\alpha\right)$

Accélération $-r\omega^2\left(\cos\alpha + \frac{r}{l}\cos 2\alpha\right)$

Étude des efforts et réversibilité

F = pS



$\vec{F}$: $\vec{F_1}$: Compression de la bielle. $\vec{F_2}$: Effort d'ovalisation.

$\vec{F_1}$: $\vec{F_3}$: Extension de la manivelle. $\vec{F_4}$: Effort tangentiel moteur.

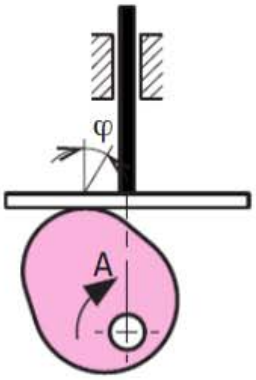
Expression du couple moteur

$$C = F_4.r = F_1.r.\cos\beta = F.r.\frac{\cos\beta}{\cos\alpha}$$

3.4.3. CAMES INDUSTRIELLES

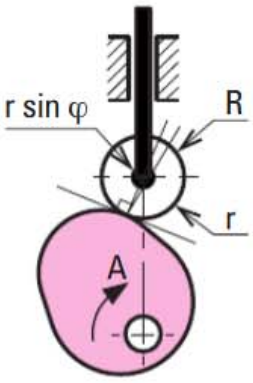
EXEMPLES

Tige à plateau



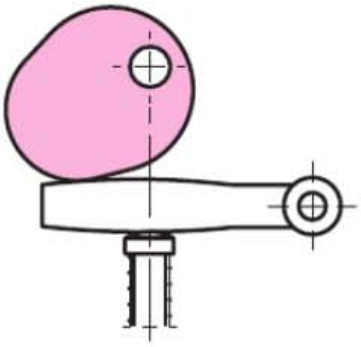
Transformation d'un mouvement circulaire en mouvement rectiligne.
La course dépend de la variation de rayon de la came.

Tige à galet



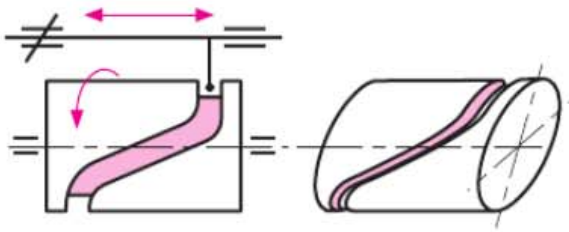
Le frottement au contact poussoir-came est remplacé par un roulement du galet sur la came.

Levier intermédiaire



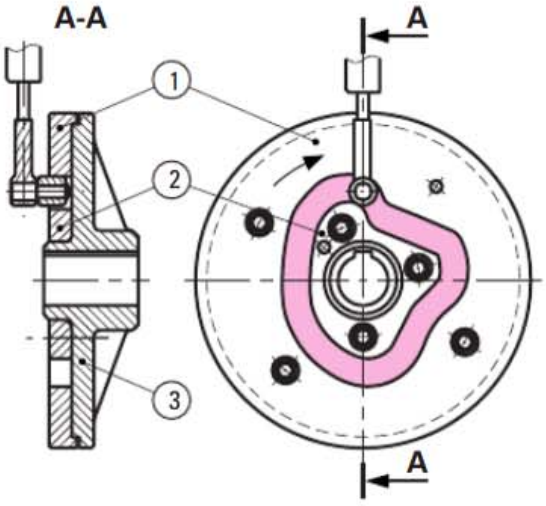
Suppression de tout risque d'arc-boutement.

Came à rainure

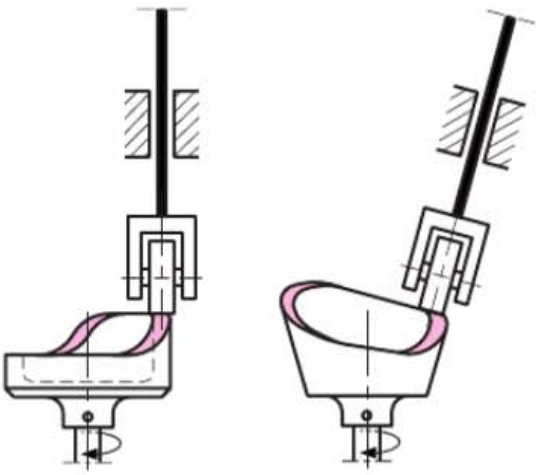


Le galet roule dans une rainure.
Le maintien du contact tige-came est obtenu, en général, à l'aide d'un ressort.

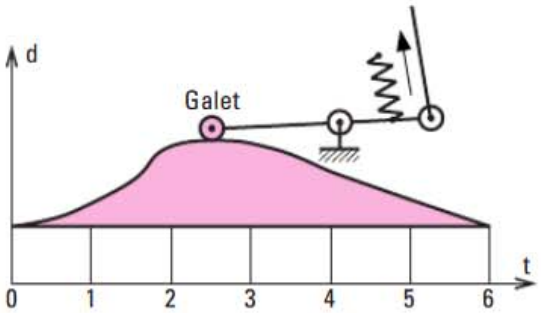
Exemple de came à rainure



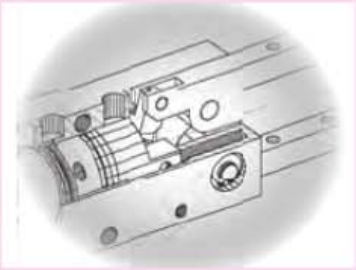
Cames à axe parallèle ou concourant à la tige



• Came à déplacement rectiligne



4 Dessin et Matériaux



4.1. DÉFINITION GRAPHIQUE DU PROJET 136
4.1.1. Dessin d'ensemble 136
4.1.2. Éléments standards de construction 136
– Vis d'assemblage, guide de choix, dimensions des vis d'assemblage 136
– Vis de pression 139
– Classes de qualité de la visserie 140
– Goujons 141
– Boulons 141
– Implantation des vis, boulons et goujons 142
– Chambrages ou lamages 142
– Écrous standards 143
– Écrous freins 144
– Inserts 145
– Écrous à sertir pour tôle 145
– Écrous et rondelles à encoches 146
– Rondelles et freins d'écrous 147
– Rondelles à portée sphérique 150
– Plaquettes arrêtoir 150
– Rondelles fendues amovibles 150
– Clavettes parallèles 151
– Clavettes disques 152
– Cannelures 153
– Anneaux élastiques 155
– Goupilles 157
– Ressorts 160

4.2. DÉFINITION DES ÉLÉMENTS 164
4.2.1. Surfaces fonctionnelles 164
4.2.2. Procédés d'élaboration des pièces mécaniques 165
– Procédés de mise en forme. Matériaux associés 165
– Moulage en sable 165
– Moulage en moule métallique 166
– Moulage des matières plastiques par injection 166
– Règles de tracé 167
– Frittage 168
– Estampage et matriçage 168
– Procédés d'usinage 169
– Prototypage rapide 170
– Impression 3D 171
– Usinage par électro-érosion 174
– Usinage par rayon laser 174
– Procédés de soudage 175
– Symboles élémentaires 177
– Cotation des soudures 178
– Le collage 179

4.3. LES MATÉRIAUX 181
4.3.1. Traitements des matériaux 181
4.3.2. Les fontes 182
4.3.3. Les aciers 183
4.3.4. L'aluminium et ses alliages 185
4.3.5. Le cuivre et ses alliages 186
4.3.6. Les matières plastiques 187
4.3.7. Les composites 188
4.3.8. Les céramiques 190
4.3.9. Caractéristiques des matériaux isolants thermiques 191
4.3.10. Symboles, caractéristiques physiques des métaux purs et alliages 193
4.3.11. Essais mécaniques des matériaux 194

4.4. DÉFINITION D'UNE PIÈCE : PROJET DE DESSIN DE DÉFINITION D'UN PRODUIT 199
4.4.1. Règles et méthodes d'élaboration des dessins de définition 199
– formats, cartouche, nomenclature, traits, représentations, projections et vues, coupes, sections, perspectives, formes géométriques usuelles, filetages 199
4.4.2. Cotation fonctionnelle 223
– Exécution graphique, tolérances, écarts et ajustements 223
4.4.3. Moyens de mesurage et de contrôle 233
– Le calibre ou pied à coulisse, le micromètre ou Palmer, le comparateur 233
– Machines à mesurer unidimensionnelle et tridimensionnelle, mesures électroniques 235
4.4.4. Moyens de contrôle des états de surface 236
4.4.5. Moyens de mesurage des forces et des pressions 237
4.4.6. Utilisation d'un logiciel de DAO 238

4.1 DÉFINITION GRAPHIQUE DU PROJET

4.1.1. DESSIN D'ENSEMBLE

– Dessin d'ensemble et nomenclature, voir chapitre **4.4.1.**
– Représentation des ensembles mécaniques, utilisation d'un logiciel **DAO** voir chapitre **4.4.6.**

4.1.2. ÉLÉMENTS STANDARDS DE CONSTRUCTION

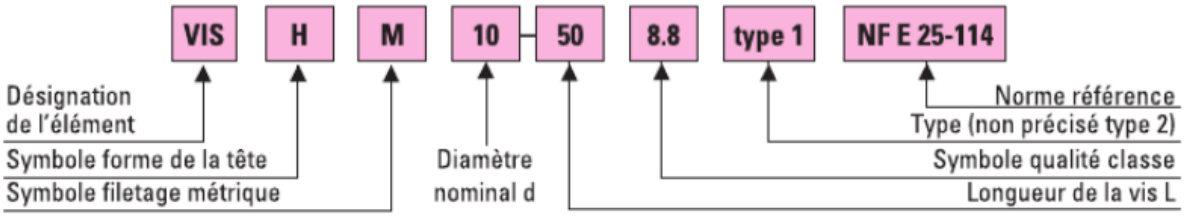
• Vis d'assemblage

GUIDE DE CHOIX

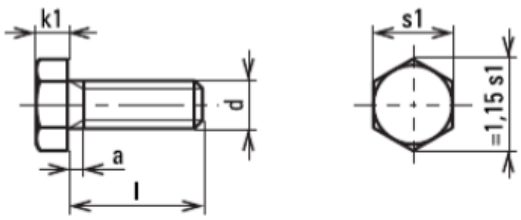
Type		Aptitudes → Symboles	Dégagement nécessaire autour de la tête de l'outil	Capacité de transmission du couple	Aptitude au montage automatisé	Aptitude au vissage et au dévissage	Absence de risque de blessure	Observations et utilisation
Entraînement externe	**Hexagonal**	H	Oui	++	+	++	+	– Vis à métaux – Vis à bois – Écrous – Utilisations diverses
	Carré	Q	Oui	–	=	=	=	– Vis à métaux – Vis à bois – Écrous – Matériel agricole, charpentes bois
	Six lobes externes		Peu	++	+	++	–	– Faible encombrement – Très bonne capacité de couple – Vis de bordage (caisses d'emballage)
Empreintes	**Six pans creux**	HC	Non	+	=	=	+	– Vis à métaux et tôle – Construction mécanique – Tête noyée
	Six lobes internes	X	Peu	++	+	++	++	– Vis à métaux – Très bonne capacité de couple – Très bonne pour les montages de vissage automatisé
	Cruciforme (dite « Pozidriv »)	Z	Non	=	++	=	+	– Vis à métaux – Vis à bois – Écrous – Vissage mécanisé (appareils ménagers, garniture automobile)
	Cruciforme (dite « Phillips »)	H	Non	–	++	=	+	– Mêmes performances que les vis cruciformes Pozidriv
	Fente (tournevis)	S	Non	–	=	–	=	– Vis à métaux et tête – Vis à bois – Utilisation très variée
	Fente (pièce de monnaie)		Peu	–	=	++	++	– Produits grand public
	Encoches		Peu	=	–	++	–	– Écrous – Permet l'arrêt avec rondelles freins (montage des roulements)

Légende : ++ très bon, + bon, = moyen, – passable, 0 nulle. **Extrait NF E 25-031**

Désignation des vis

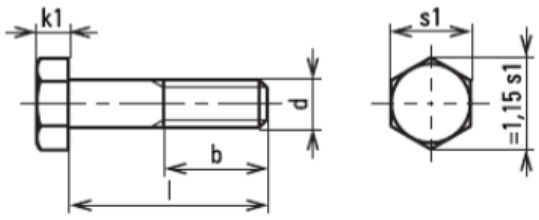


Vis à tête hexagonale H



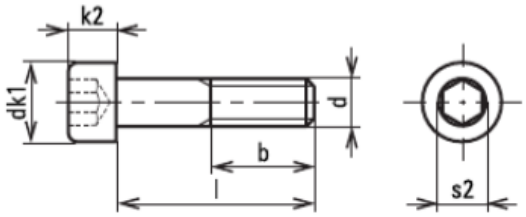
Vis H M6-16. NF E 25-114 (filetage complet)

Vis à tête hexagonale H



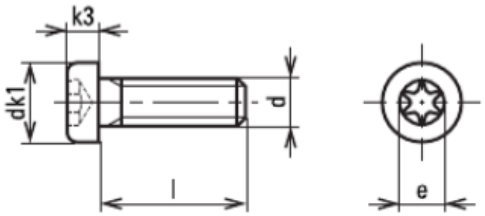
Vis H M6-30. NF E 25-112 (filetage réduit)

Vis à tête cylindrique à 6 pans creux CHC



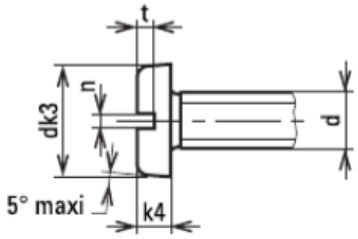
Vis CHC M6-28. NF E 25-125

Vis à tête cylindrique basse à 6 lobes internes CZX



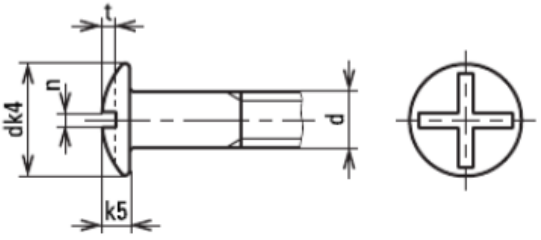
Vis CZX M6-16. NF E 27-111

Vis à tête cylindrique large fendue CLS



Vis CLS M8-30. NF E 25-128

Vis à tête poelier fendue RLS



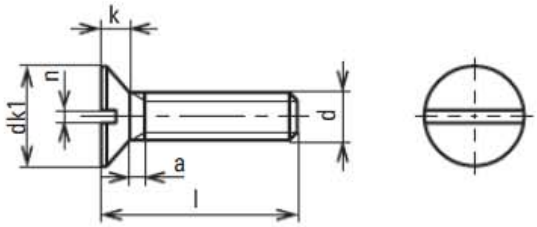
Vis RLS M8-30. NF E 25-125

d	pas	a	b*	e	dk1	dk3	dk4	k1	k2	k3	k4	k5	l*	n	s1	s2	t
2	0,4	–		1,75	3,8	4	–	–	2	1,4	1,3	–		0,5	–	1,5	
2,5	0,45	–		2,4	4,5	5	–	–	2,5	1,7	1,5	–		0,6	–	2	
3	0,5	1,5		2,8	5,5	5,6	–	2	3	2	1,8	–		0,8	5,5	2,5	
4	0,7	2,1		3,95	7	8	10	2,8	4	2,8	2,4	2		1,2	7	3	1
5	0,8	2,4		3,95	8,5	9,5	12,5	3,5	5	3,5	3	2,5		1,2	8	4	1,2
6	1	3		5,8	10	12	15	4	6	4	3,6	3		1,6	10	5	1,5
8	1,25	3,75		6,75	13	16	20	5,3	8	5	4,8	4,1		2	13	6	2
10	1,5	4,5		11,35	16	20	25	6,4	10	6	6	5,2		2,5	16	8	2,4
12	1,75	5,25		11,35	18	–	–	7,5	12	7	–	–		–	18	10	–
16	2	6		–	24	–	–	10	16	–	–	–		–	24	14	–
20	2,5	7,5		–	30	–	–	12,5	20	–	–	–		–	30	17	–
24	3	9		–	36	–	–	15	24	–	–	–		–	36	19	–
30	3,5	10,5		–	45	–	–	19	30	–	–	–		–	46	22	–

* Cotes **b** et **l**, voir page suivante

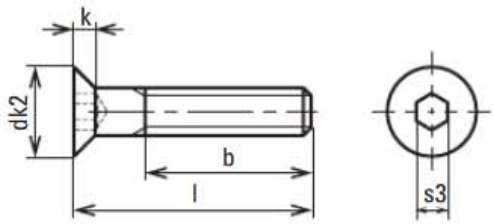
DÉSIGNATION, FORMES ET DIMENSIONS DES VIS (SulTe)

Vis à tête fraisée fendue plate FS



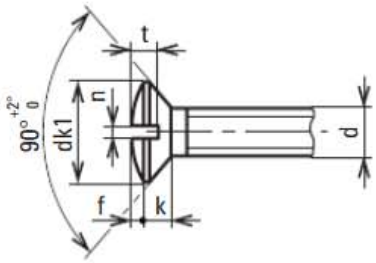
Vis FS M6-25. NF E 25-123

Vis à tête fraisée à 6 pans creux FHC

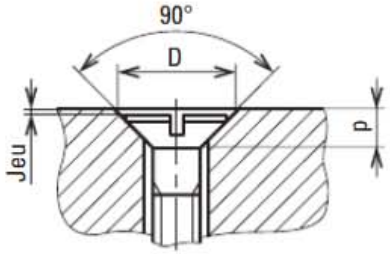


Vis FHC M6-35. NF E 27-160

Vis à tête fraisée bombée fendue FBS



Vis FS M6-25. NF E 25-123



Jeu supérieur à 0

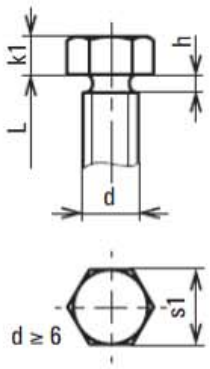
d	pas	a	b*	dk1	dk2	f	k	l*	n	p	D	t	s3
2	0,4	–		3,8	4,4	0,5	1,20		0,5	–	–	0,5	1,5
2,5	0,45	–		4,7	5,5	0,6	1,50		0,6	–	–	0,6	2
3	0,5	1		5,5	6,3	0,7	1,65		0,8	1,65	6,8	0,8	2
4	0,7	1,4		8,4	9,4	1	2,70		1	2,70	9,8	1,2	2,5
5	0,8	1,6		9,3	10,4	1,2	2,70		1,3	2,70	10,9	1,2	3
6	1	2		11,3	12,6	1,4	3,30		1,5	3,30	13,2	1,6	4
8	1,25	2,50		15,8	17,3	2	4,65		2	4,65	18,1	2	5
10	1,50	3		18,3	20	2,3	5		2,5	5	21	2,5	6
12	1,75	–		22,5	–		6		–	6	25,2	–	8
16	2	–		30	–		8		–	8	33,6	–	–

Longueurs des vis et des goujons

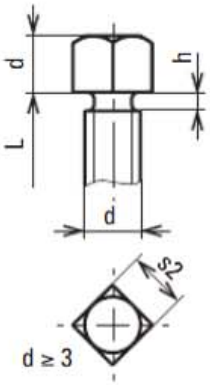
d	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	24	30
Longueur l	Longueur filetée b												
4.5.6.8.10.12													
16			12	14		vis							
18			12	14	16								
20			12	14	16	18		filetées					
25			12	14	16	18	22						
30			12	14	16	18	22	26		sur			
35				14	16	18	22	26	30				
40	Longueurs			14	16	18	22	26	30		toute la		
45	non				16	18	22	26	30	38			
50	normalisées				16	18	22	26	30	38		longueur	
55						18	22	26	30	38	46		
60						18	22	26	30	38	46	54	
65							22	26	30	38	46	54	
70							22	26	30	38	46	54	
75							22	26	30	38	46	54	66
80							22	26	30	38	46	54	66

Têtes des vis de pression

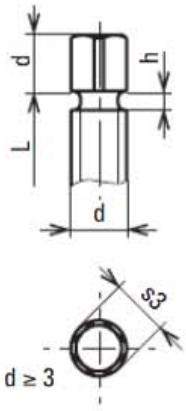
Tête hexagonale HZ réduite



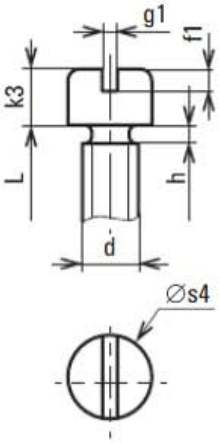
Tête carrée QZ



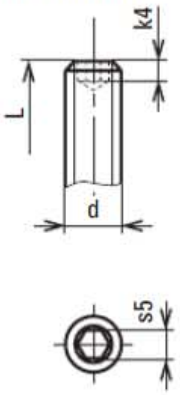
Tête carrée petite QZ



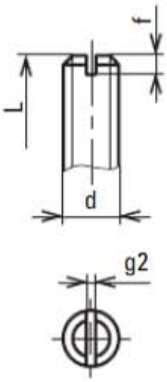
Cylindrique fendue CZ



Sans tête, empreinte 6 pans creux HC

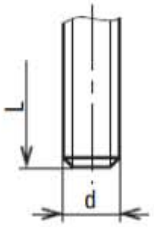


Sans tête fendue

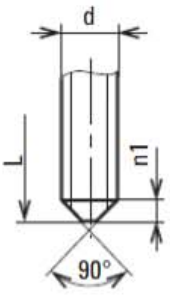


Extrémités des vis de pression

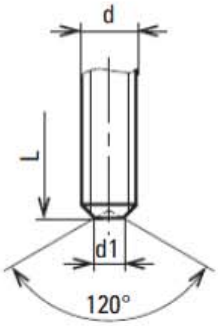
Bout plat PL



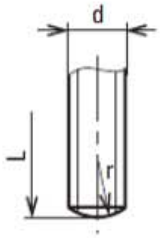
Bout tronconique TR



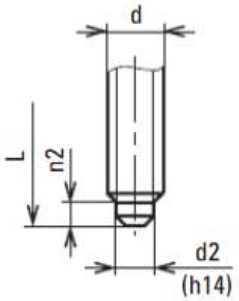
Bout cuvette CU



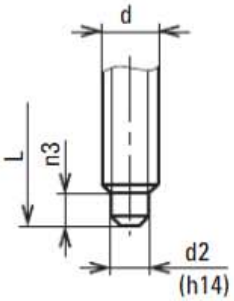
Bout bombé BB



Téton court TC



Téton long TL



d	s1	s2	s3	s4	s5	k1	k3	k4	h	f	f1	g1	g2	n1	n2	n3	d1	d2
2	–			3,5	0,9	–	2	1,7	0,8	1	0,8	0,6	0,5	0,8	0,8	1,5	1	1
2,5	–			4	1,3	–	2,5	2	0,9	1,2	1	0,6	0,5	1	0,9	1,8	1,2	1,5
3	–	3,2	2,2	4,5	1,5	–	3	2,5	1	1,4	1,2	0,8	0,6	1,1	1	2	1,4	2
4	–	4	3,2	6	2	–	4	3	1,4	1,6	1,6	1	0,8	1,5	1,5	2,5	2	2,5
5	–	5	4	7	2,5	–	4,5	3,5	1,6	2,2	2	1,2	1	1,9	1,5	3,5	2,5	3,5
6	8	6	5	9	3	4	5	4	2	2,4	2	1,3	1	2,3	2	4,5	3	4
8	11	8	6	11	4	5,5	5	5	2,5	3,2	3	2	1,6	3	3	6	5	5,5
10	13	10	8	14	5	7	6	6	3	4	4	2	2	3,8	3	7	6	7
12	16	13	10	18	6	9	7	8	3,5	4	4	2,5	2	4,5	4	9	7	8,5
16	18	16	13	22	8	11	12	10	4	5	6	3	2,5	6	5	12	10	12

Longueurs L, voir page précédente.

• Classes de qualité de la visserie

DÉFINITION

Les classes de qualité de la visserie définissent les matériaux utilisés d'après leurs caractéristiques mécaniques.

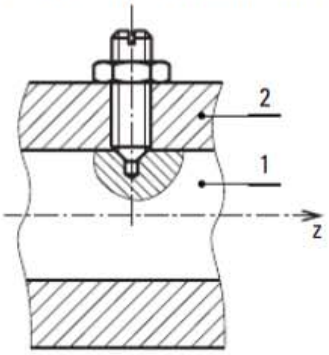
• **Vis et goujons** : la classe de qualité d'une vis ou d'un goujon est définie par deux nombres (marqués sur la tête de la vis)
– le premier correspond au centième de la résistance minimale à la rupture à la traction en MPa (N/mm^2)
– le second multiplié par le premier donne le dixième de la limite élastique minimale à la traction en MPa.
Principales classes de qualité :
3.6-4.8-5.6-5.8-6.6-6.8-6.9-8.8-10.9-12.9

• **Écrous** : la classe de qualité d'un écrou est définie par un seul nombre, qui correspond au centième de la contrainte minimale exercée sur la vis lors des essais, en MPa. Généralement, l'écrou est assemblé avec une vis de qualité identique (exemple : 10 pour une vis 10.9).

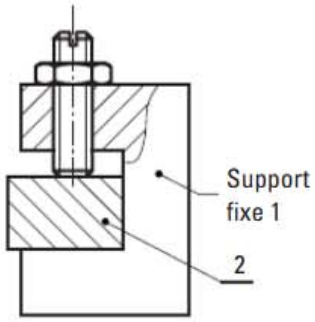
EXEMPLES DE MONTAGE

• Montage des vis de serrage, de guidage et de pression

Localisation et serrage de l'arbre (1) par rapport au moyeu (2) par une **vis sans tête fendue à bout tronconique TR.**

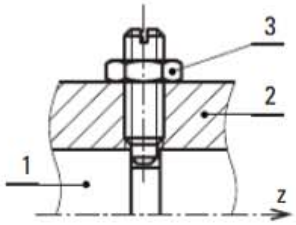


Serrage d'une pièce (2) par rapport à la pièce (1) par une vis **sans tête fendue à bout plat PL**



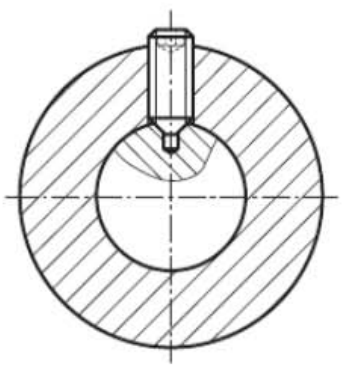
Arrêt en translation avec vis sans tête fendue à bout téton long TL

(3) Contre-écrou de blocage de la vis.
Tenon dans une gorge circulaire.

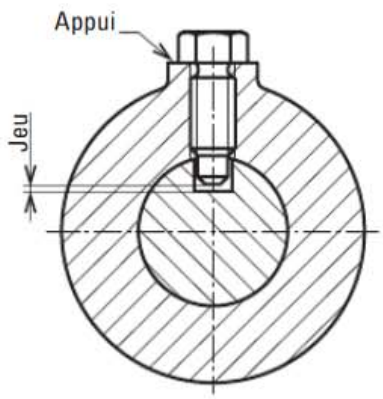


Nota : Ce montage d'arrêt en translation ne supprime pas la rotation de l'arbre (1) par rapport au moyeu (2).
C'est une **liaison pivot.**

Vis d'arrêt HC à bout tronconique TR



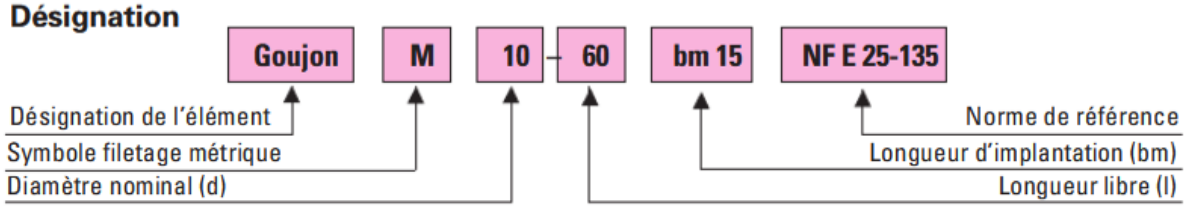
Vis de guidage en translation HZ à téton long TL



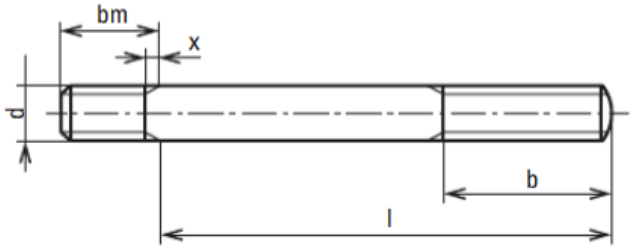
DÉFINITION

• Goujons

Désignation



Dimensionnement



Goujon taillé par usinage

Nota : l'implantation bm est définie pour un matériau dur.

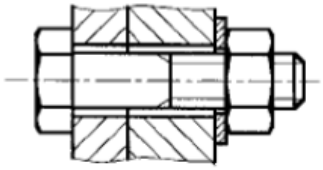
d	bm	x	b	l
M5	7,5	2	16	30-35-40-45-50
M6	9	2,5	18	30-35-40-45-50-55-60
M8	12	3,2	22	35 à 80
M10	15	3,8	26	40 à 100
M12	18	4,4	30	45 à 120
M16	24	5	38	55 à 120
M20	30	6,3	46	70-80-90-100-110-120

DÉFINITION

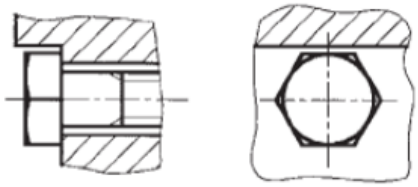
• Boulons

Composition :
– une vis ou un goujon
– une ou deux rondelles
– un écrou

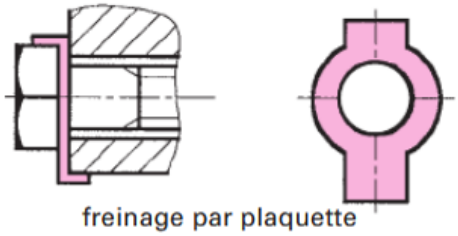
Cette solution technologique d'assemblage supprime un taraudage dans une des pièces.



Boulon à tête hexagonale

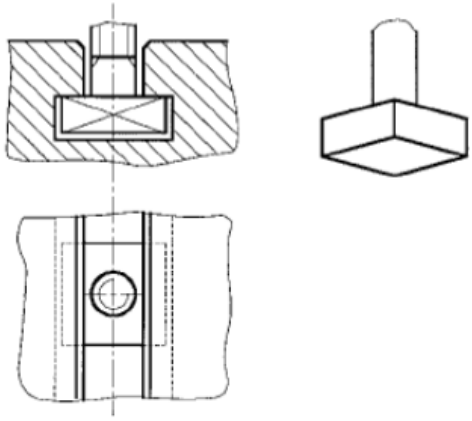


freinage par épaulement



freinage par plaquette

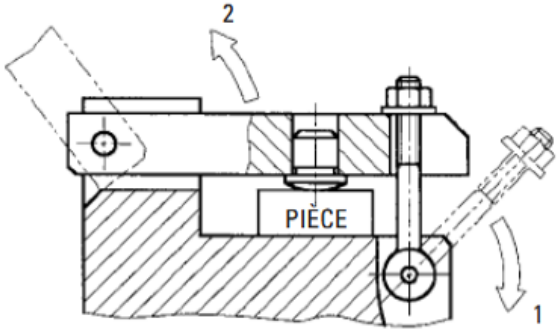
Boulon à tête carrée



Très utilisé pour les ablocages de pièces sur machines disposant de rainures à T.

Boulon à œil

Très utilisé sur les montages d'usinage disposant de bride articulée. La rotation autour de l'axe permet un dégagement rapide du boulon (1) puis de la bride (2).



DIMENSIONNEMENT

• Implantations des vis, boulons et goujons

NF E 25-017

La longueur (j) définit la longueur de filetage en prise pour l'assemblage considéré :

– Vis : – métaux durs : $j \geq d$
– métaux tendres : $j \geq 1{,}5\ d$

– Goujons : – métaux durs : $j \geq 1{,}5\ d$
– métaux tendres : $j \geq 2\ d$

La longueur (p) définit la profondeur de taraudage :

$p = j + 3$ à 4 pas

La longueur (q) définit la profondeur du trou percé avant taraudage :

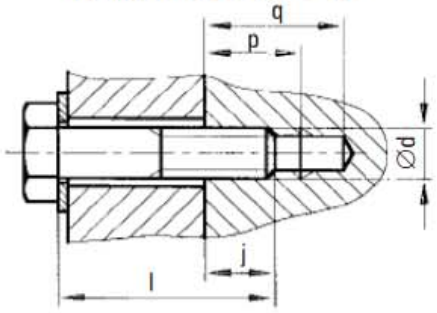
$q = j + 8$ à 9 pas

Pour des facilités d'usinage et dans la mesure du possible, faire déboucher les taraudages.
Les diamètres des trous lisses sont définis ci-dessous.

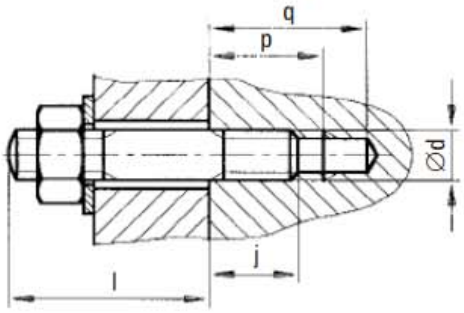
Trous de passage des vis à métaux NF E 25-017

Diamètre nominal d	Diamètre du trou de passage D séries		
	fine H12	moyenne H13	large H14
M 3	3,2	3,4	3,6
(M 3,5)	3,7	3,9	4,2
M 4	4,3	4,5	4,8
M 5	5,3	5,5	5,8
M 6	6,4	6,6	7,0
(M 7)	7,4	7,6	8,0
M 8	8,4	9,0	10,0
M 10	10,5	11,0	12,0
M 12	13	13,5	14,5
(M 14)	15	15,5	16,5
M 16	17	17,5	18,5

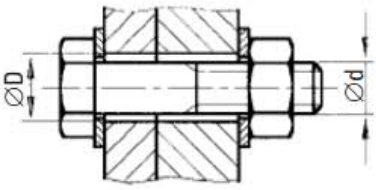
Implantation d'une vis



Implantation d'un goujon



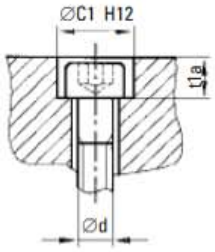
Implantation d'un boulon



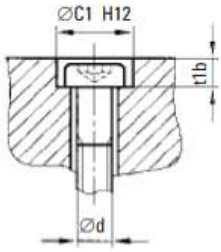
DIMENSIONNEMENT

• Chambrages ou lamages

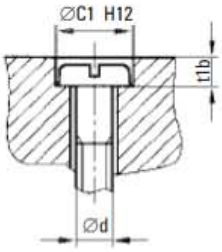
Vis tête CHC



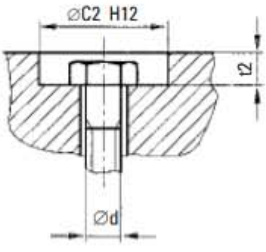
Vis tête CZX



Vis tête CS

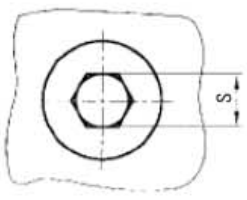


Vis tête H



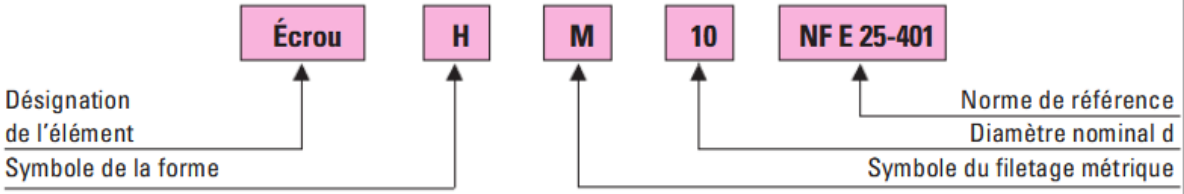
Diamètre nominal d	Vis à tête cylindrique			Vis à tête hexagonale et écrous hexagonaux		
	C1 mini	t1a mini	t1b mini	S sur plats nominal	C2 mini	t2 mini
M 3	8	3,2	2,1	5,5	12	2,3
M 4	10	4,2	3	7	16,5	3,1
M 5	11	5,3	3,7	8	19,5	4,1
M 6	13	6,3	4,2	10	22	5,6
M 8	18	8,4	5,3	13	28,5	6,0
M10	20	10,5	6,3	16	37	7,2

Vis tête H

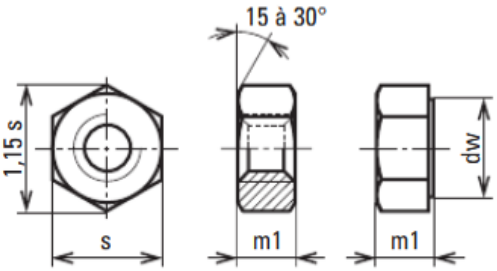


• Écrous standards

Désignation

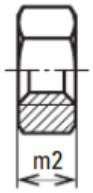


Écrous H



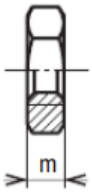
NF E 25-401 — avec collerette

Écrou haut HH



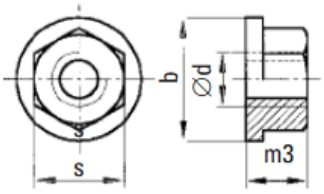
NF E 25-407

Écrou bas HM



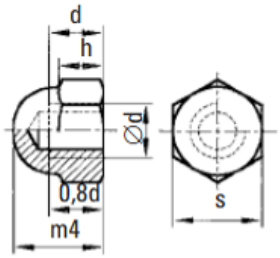
NF E 25-405

Écrou à embase



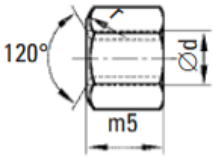
NORELEM

Écrou borgne



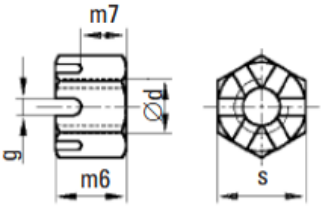
NF E 27-453

Écrou à portée sphérique



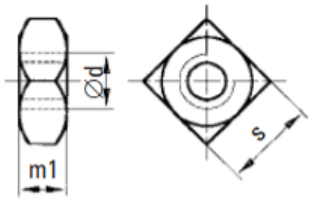
NF E 27-458

Écrou à créneaux HK



Utilisation avec goupille V cylindrique fendue de ∅ dg
NF E 27-414

Écrou carré Q



NF E 25-403

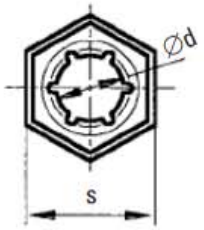
Dimensions (extraits)

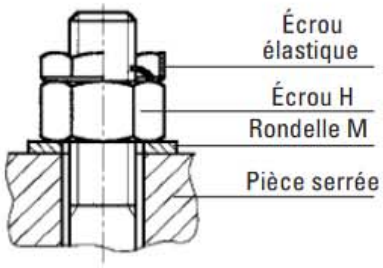
d	pas	s	m	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	g	dw	h	b	r	dg
2	0,4	4	1,2	1,6	–	–	–	–	–	–	–	3,1	–	–	–	–
2,5	0,45	5	1,6	2	–	–	–	–	–	–	–	4,1	–	–	–	–
3	0,5	5,5	1,8	2,4	–	–	5,1	–	–	–	–	4,6	2,4	–	–	–
4	0,7	7	2,2	3,2	–	–	6,7	–	5,6	3,2	1,2	5,9	3,2	–	–	1
5	0,8	8	2,7	4,7	5,1	–	8	6	6,6	4	1,4	6,9	4,7	–	7	1,2
6	1	10	3,2	5,2	5,7	7	10	8	8,1	5	2	8,9	5,2	14	14	1,6
8	1,25	13	4	6,8	7,5	9	13	11	10,3	6,5	2,5	11,6	6,8	18	14	2
10	1,5	16	5	8,4	9,3	11	16,5	13	12,8	8	2,8	14,6	8,4	22	22	2,5
12	1,75	18	6	10,8	12	13,5	19,5	15	16	10	3,5	16,6	10,8	27	22	3,2
16	2	24	8	14,8	16,4	17	25	18	20	13	4,5	22,5	14,8	33	30	4
20	2,5	30	10	18	20,3	21	31	25	23,2	16	4,5	27,7	18	42	44	4
24	3	36	12	21,5	23,9	25	37	29	28,2	19	5,5	33,2	21,5	48	44	5
30	3,5	46	15	25,6	28,6	31	47	35	34,2	24	7	42,7	25,6	60	66	6,3

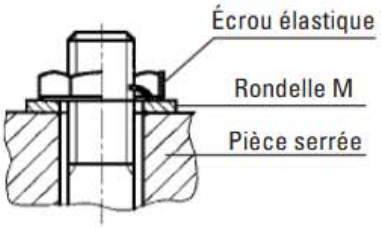
• Écrous freins

Écrous élastiques en tôle « PAL »

NF E 27-460





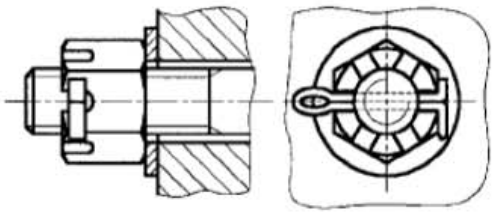


d	3	4	5	6	8	10	12	14	16
pas	0,5	0,7	0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2
s	5,5	7	8	10	13	16	18	21	24
h	2	2,2	2,5	3	3,5	4,2	4,5	5	5

S'utilise comme contre-écrou dans le cas de vibrations.

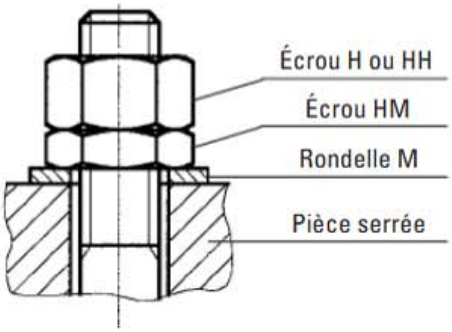
S'utilise comme écrou avec des efforts de serrage faibles.

Écrous HK avec goupille V fendue



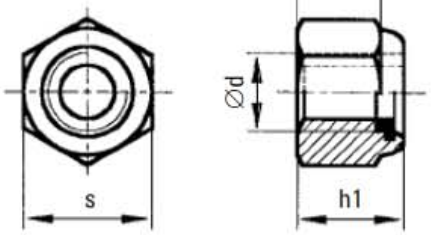
Le freinage est obtenu à l'aide d'une goupille V fendue traversant le créneau de l'écrou et la vis préalablement percée.

Utilisation de deux écrous



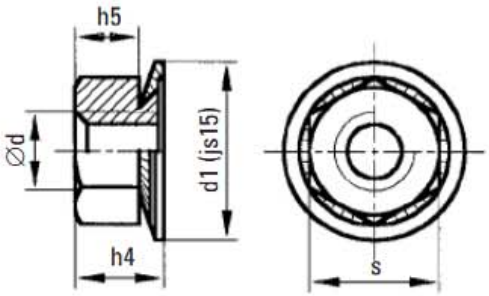
Écrous autofreinés

Écrou à frein incorporé « Nylstop » HFR



NF E 25-409 SIMMONDS

Écrous à rondelle sertie « Twolok »



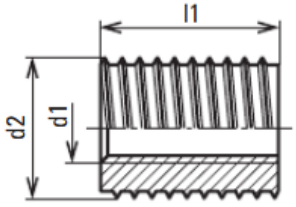
NF E 25-417 NOMEL

Dimensions

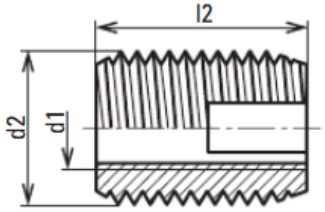
d	pas	s	h	h1 maxi	h3 mini	h4	h5	d1
4	0,7	7	2,2	5,7	2,3	4,55	3,2	10,2
5	0,8	8	2,5	6,3	3,5	5,6	4	12,2
6	1	10	3	8	3,9	6,8	5	14,2
8	1,25	13	3,5	10,8	5,1	8,9	6,5	18,2
10	1,5	16	4,2	12,4	6,4	10,7	8	20,2
12	1,75	18	4,5	14,2	8,3	13	10	27,2
16	2	24	5	18,8	11,3	–	–	–
20	2,5	30	6,2	22,7	13,5	–	–	–

• Inserts

Autotaraudeurs



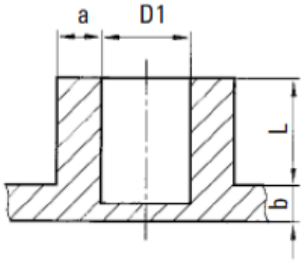
Inserts pour les moulages en alliages légers

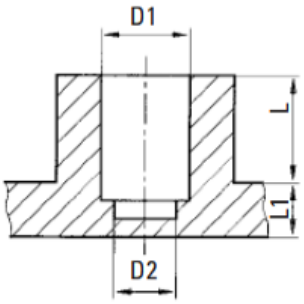


Inserts pour matières plastiques

d1 H6	d2	l1 (2 valeurs possibles)		Ø perçage alliages légers	l2	Ø perçage plastique
M 2,5	–	–	–	–	6	–
M 3	–	–	–	–	6	–
M 4	6,5	6	8	6,1	8	5,5
M 5	8	7	10	7,5	10	7
M 6	10	8	12	9,4	14	9
M 8	12	9	14	11,2	15	11
M 10	14	10	18	13,2	18	13
M 12	16	12	22	15,1	22	15
M 14	18	14	24	17,1	24	17
M 16	20	14	24	19,1	24	19
M 18	22	–	–	–	24	21
M 20	26	–	–	–	27	25

Logement de l'insert



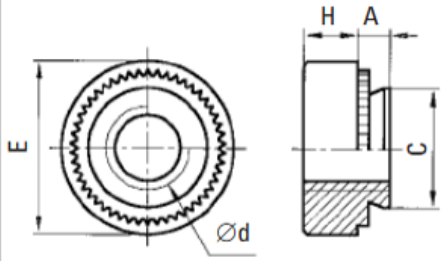


Épaisseur de paroi minimum : a ≈ 0,5 à 2
b ≈ 0,05 L
D2 ≈ d1 + 0,25
L1 correspond au dépassement de la vis

Matière

– Acier doux zingué chromaté jaune.
– Acier cémenté trempé zingué chromaté blanc.
– Laiton.

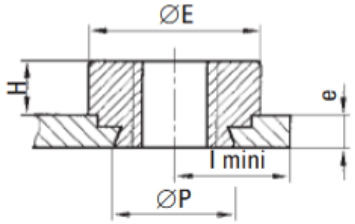
• Écrous à sertir pour tôle



Doc. BÖLLHOFF

Version acier							
d	l mini	Épaisseur e de tôle	A	C maxi Ø centrage	Ø P perçage tôle	E	H
M 2,5	5	0,8-1	0,75	3,98	$4^{+0,05}_{0}$	6	1,5
		≥ 1	0,95				
M 3	5	0,8-1	0,75	4,98	$5^{+0,07}_{0}$	7	1,8
		≥ 1	0,95				
M 4	6	0,8-1	0,75	5,98	$6^{+0,08}_{0}$	8	2,1
		≥ 1	0,95				2,4
M 5	7	0,8-1	0,75	6,98	$7^{+0,10}_{0}$	9	3
		≥ 1	0,95				
M 6	8	1-1,4	0,95	8,48	$8,5^{+0,12}_{0}$	11	4
		≥ 1,5	1,45				
M 8	10	1,5-1,9	1,45	10,48	$10,5^{+0,15}_{0}$	14	6
		≥ 2	1,45				
Version inox monoplage							
M 3	5	≥ 1	0,95	4,22	$4,25^{+0,07}_{0}$	6	2
M 4	6	≥ 1	0,95	5,38	$5,4^{+0,08}_{0}$	8	2

Logement de l'écrou



Sens de montage de la vis

Remarque

Cet écrou permet d'obtenir des taraudages résistants dans des tôles minces.

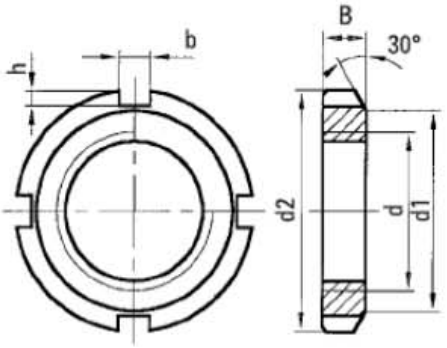
Matière

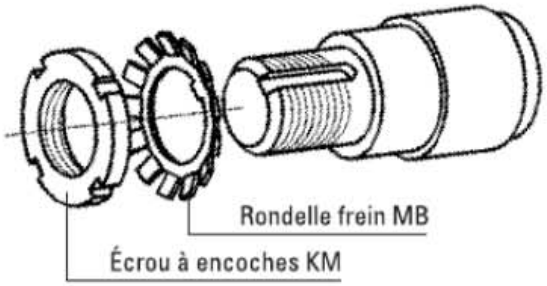
– Acier doux zingué chromaté jaune.
– Acier cémenté trempé zingué chromaté blanc.
– Laiton.

• Écrous et rondelles à encoches

Écrous à encoches série légère KM

NF E 22-306

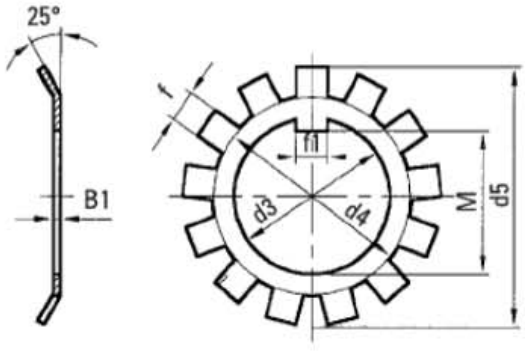


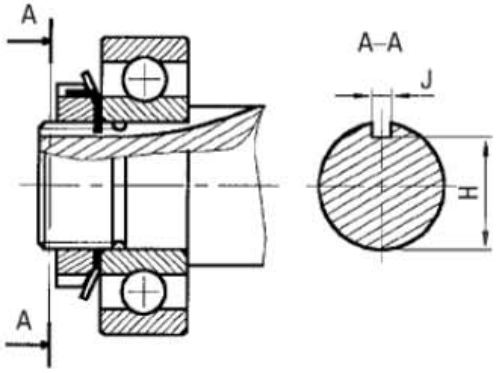


d nom.	Pas	d2 js 13	B js 13	d1 js 13	h js 13	b H 13	d nom.	Pas	d2 js 13	B js 13	d1 js 13	h js 13	b H 13
10	0,75	18	4	13,5	2	3	**32**	1,50	48	8	40	2	5
12	1	22	4	17	2	3	**35**	1,50	52	8	44	2	5
15	1	25	5	21	2	4	**40**	1,50	58	9	50	2,5	6
17	1	28	5	24	2	4	**45**	1,50	65	10	56	2,5	6
20	1	32	6	26	2	4	**50**	1,50	70	11	61	2,5	6
22	1	34	6	28	2	4	**55**	2	75	11	67	3	7
25	1,50	38	7	32	2	5	**60**	2	80	11	73	3	7
28	1,50	42	7	36	2	5	**70**	2	92	12	85	3,5	8
30	1,50	45	7	38	2	5	**75**	2	98	13	90	3,5	8

Rondelles freins pour écrous à encoches série légère MB

NF E 22-307





N : nombre de languettes extérieures

Ø nom.	d3 C11	d4 d13	d5	f1 b14	M C11	f b14	B1	N	H h13	J H13	Ø nom.	d3 C11	d4 d13	d5	f1 b14	M C11	f b14	B1	N	H h13	J H13
10	10	13,5	21	3	8,5	3	1	9	8,5	3	**32**	32	40	52	5	29,5	5	1,25		30,0	6
12	12	17	25	3	10,5	3	1		10,5	4	**35**	35	44	57	6	32,5	6	1,25		31,0	6
15	15	21	28	4	13,5	4	1		13,5	5	**40**	40	50	62	6	37,5	6	1,25	13	37,5	8
17	17	24	32	4	15,5	4	1	11	15,5	5	**45**	45	56	69	6	42,5	6	1,25		42,5	8
20	20	26	36	4	18,5	4	1		18,0	5	**50**	50	61	74	6	47,5	6	1,25		47,5	8
22	22	28	38	4	20,5	4	1		20,0	6	**55**	55	67	81	8	52,5	7	1,5		52,5	8
25	25	32	42	5	23,0	5	1,25		23,0	6	**60**	60	73	86	8	57,5	7	1,5	17	57,5	8
28	28	36	46	5	26,0	5	1,25	13	26,0	6	**65**	65	79	92	8	62,5	7	1,5		62,5	8
30	30	38	49	5	27,5	5	1,25		28,0	6	**70**	70	85	98	8	66,5	8	1,5		67,0	10

GUIDE DE CHOIX

• Rondelles et freins d'écrous

Guide de choix **Extrait NF E 25-031**

Le choix et le domaine d'application concernent essentiellement les rondelles normalisées destinées aux assemblages comportant des vis sous tension.

Fonctions / Type de rondelles		Normes de référence	Protection contre les meurtrissures	Diminution de la pression moyenne	Répartition de la force de serrage	Trous de passage élargis	Opposition au dévissage	Opposition au desserrage	Observations
Plates		NF E 25-513 NF E 25-514	++	++	0	+	0	0	Fonction essentielle de protection contre les meurtrissures.
Grower sans bec		NF E 25-515 NF E 25-516	+	0	0	0	0	=	Souvent utilisées, par habitude, dans les assemblages non optimisés.
Grower avec becs		NF E 25-515 NF E 25-516	0	0	0	0	+	=	
À dents chevauchantes extérieures forme concave		NF E 27-627	0	0	0	0	++	+	Elles sont exclusivement utilisées avec des vis à tête fraisée.
À dents chevauchantes plane		NF E 27-624 NF E 27-625	0	0	0	0	++	+	Fixation de petites pièces, accessoires automobile, cycles, électroménager.
Ondulées à deux ondes		NF E 27-620	++	++	0	+	0	+	Serrage de matériaux tendres.
Coniques à dents intérieures		NF E 27-512	+	+	0	++	++	+	Fixation des tôles minces en carrosserie automobile et électroménager.
À double denture		NF E 27-626	0	0	0	+	++	+	Utilisées sur les glissières des moteurs électriques, alternateurs.
Coniques striées		NF E 27-511	++	++	+	++	++	+	Permettent de maintenir la tension dans les assemblages optimisés.
Coniques lisses		NF E 27-510	++	++	++	++	+	++	Recommandés pour les assemblages des vis très courtes (risque de tassement)
Coniques striées à picots		non normalisée	0	++	+	++	++	+	Assurent dans de bonnes conditions la liaison électrique des masses.
Plates trempées épaisses		non normalisée	++	++	+	++	0	0	Assemblage des pièces de très bonne géométrie.

Légende : ++ très bon, + bon, = moyen, – passable, 0 nul.

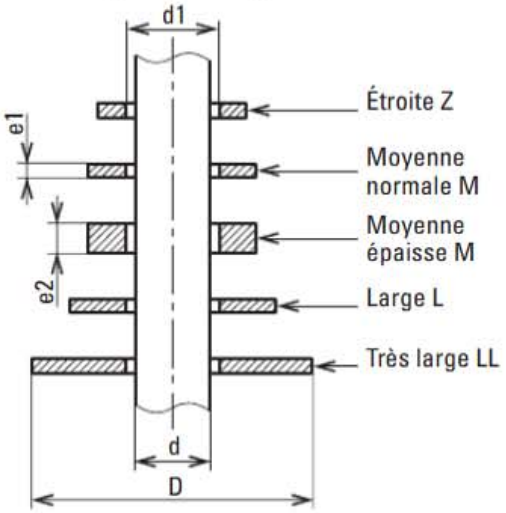
RONDELLES D'APPUI

Désignation

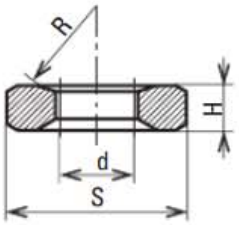
Rondelle plate | **M** | **U** | **12** | **NF E 25-514**

- Désignation de l'élément : Rondelle plate
- Symbole de forme : M
- Qualité (Usinée U, Brute N) : U
- Diamètre nominal : 12
- Norme de référence : NF E 25-514

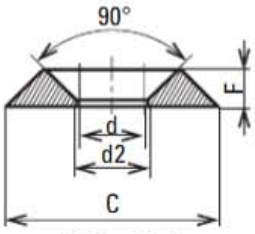
Rondelles plates d'appui



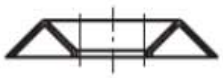
Rondelles à portée sphérique



Rondelles cuvettes



90° usinée



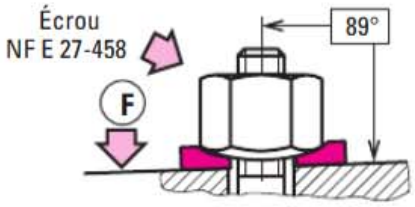
Emboutie

NF E 27-619

d	d1	D				e1	e2	H	S	R	C	F	d2
		Z	M	L	LL								
2	2,2	4	6	7	–	0,5	–	–	–	–	–	–	–
2,5	2,7	5	7	10	12	0,5	–	–	–	–	–	–	–
3	3,2	6	8	12	14	0,8	–	–	–	–	9	2	3,5
4	4,3	8	10	14	16	0,8	–	3	10	8	11	2,5	4,5
5	5,3	10	12	16	20	1	–	–	–	–	14	3	5,5
6	6,4	12	14	18	24	1,2	2	4	14	14	16	3,5	7
8	8,4	16	18	22	30	1,5	3	5	20	14	22	4,5	9
10	10,5	20	22	27	36	2	3	6	24	22	28	5,5	11
12	13	24	27	32	40	2,5	3,5	7	27	22	32	6,5	14
16	17	30	32	40	50	3	4,5	8	36	30	–	–	–
20	21	36	40	50	60	3	5	10	45	44	–	–	–
24	25	45	50	60	70	4	6	10	55	44	–	–	–
30	31	52	60	70	80	4	7	12	65	66	–	–	–

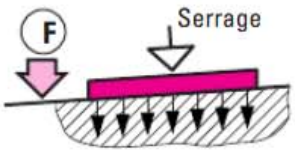
Exemples d'utilisation

Rondelles à portée sphérique



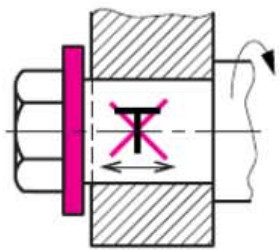
Elles permettent de rattraper un défaut de perpendicularité de la surface d'appui F par rapport à l'axe de serrage.

Rondelles plates



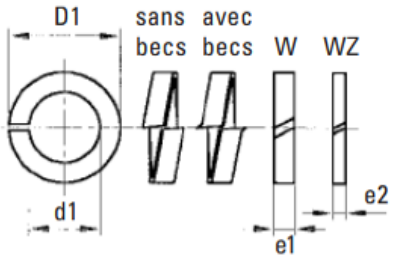
Elles permettent une répartition correcte des pressions de serrage et évitent le marquage de la surface d'appui F.

Rondelles plates

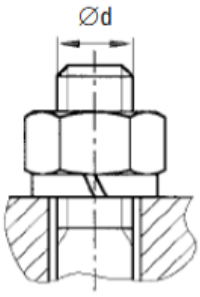


Elles peuvent constituer un arrêt en translation peu coûteux (matérialisé par une liaison pivot).

Rondelles Grower W, NF E 25-515/516

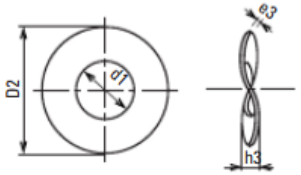


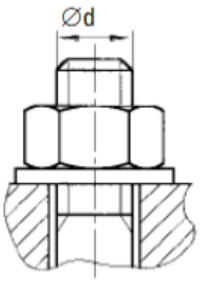
W : série courante
WZ : série réduite



Montage rondelle W

Rondelles ondulées, NF E 27-620



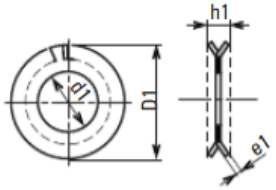


Montage rondelle ondulée

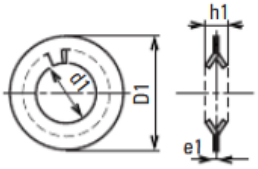
d	d1	D1	D2	h3	e1	e2	e3	d	d1	D1	D2	h3	e1	e2	e3
2	2,2	–	4,5	0,9	–	–	0,3	10	10,5	16,5	21	3,4	3	1,8	1
2,5	2,7	–	5	1	–	–	0,3	12	13	20	24	3,8	3,5	2	1,2
3	3,2	5,2	6	1,2	1	0,6	0,4	16	17	25	30	4,8	4	2,5	1,5
4	4,3	7,3	9	1,5	1	1	0,5	20	21	31	36	5,6	5	3	1,6
5	5,3	8,3	10	1,7	1,5	1	0,5	24	25	37	44	6,4	6	3,5	1,8
6	6,4	10,4	12	2	2	1,2	0,52	30	31	45	–	–	7	4,5	–
8	8,5	13,4	17	2,8	2,5	1,5	0,8								

Rondelles à dents chevauchantes (éventail)

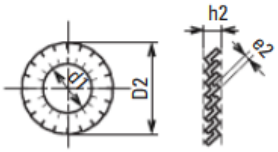
Dents extérieures DEC



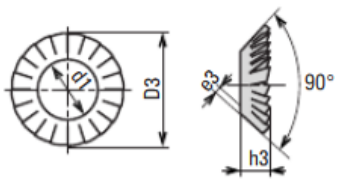
Dents intérieures DIC



Double denture DD



Concaves DEFC



NF E 27-624

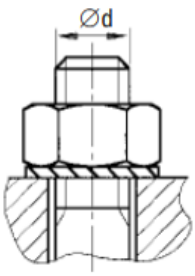
NF E 27-625

NF E 27-626

NF E 27-627

d	d1	D1	e1	h1*	D2	e2	h2*	D3	e3	h3*
2	2,05	4,5	0,3	0,6	–	–	–	4,5	0,15	0,3
2,5	2,55	5,5	0,3	0,6	–	–	–	5,5	0,2	0,45
3	3,05	6	0,4	0,7	12	0,5	1	6	0,2	0,45
4	4,1	8	0,5	0,9	15,5	0,8	1,5	8	0,25	0,6
5	5,1	9,2	0,6	1	17,5	0,8	1,6	10	0,3	0,7
6	6,1	11	0,7	1,1	18	0,9	1,8	12	0,3	0,8
8	8,2	14	0,8	1,3	22	1	1,9	15,5	0,4	1,1
10	10,2	18	0,9	1,4	26	1,1	2	19	0,4	1,2
12	12,3	20	1	1,5	30	1,2	2	23	0,5	1,5
16	16,3	26	1,2	1,8	36	1,4	2	31	0,6	1,9
20	20,5	33	1,4	2	–	–	–	–	–	–
24	24,5	38	1,5	2,2	–	–	–	–	–	–
30	30,6	48	1,6	2,4	–	–	–	–	–	–

* h1, h2, h3 : hauteurs après serrage.

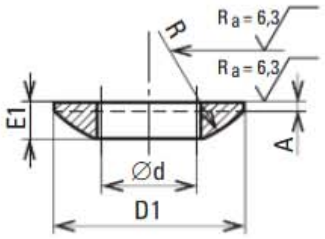


Montage rondelle DEC

L'incrustation des dents et leur élasticité assurent le freinage.
Obligation de changer la rondelle éventail à chaque démontage.

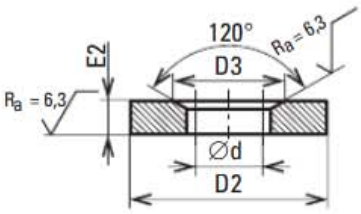
RONDELLES À PORTÉE SPHÉRIQUE

Rondelle convexe



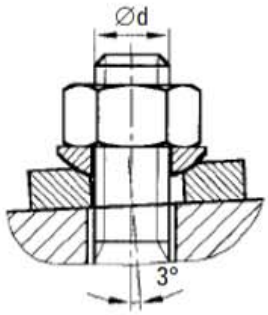
NF E 27-615

Rondelle concave large



NF E 27-615

Montage



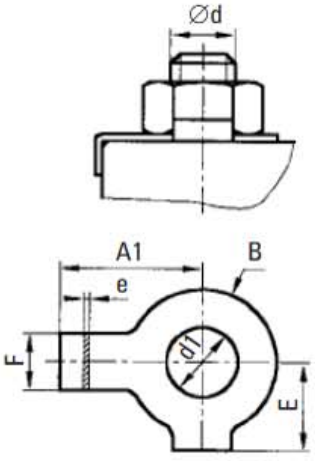
d	D1	D2	D3	R	A	E1	E2
5	10,5	15	9,25	7,5	0,4	2	2,5
6	12	17	11	9	0,6	2,3	4
8	17	23	14,5	12	0,7	3,2	5
10	21	28	18,5	15	0,8	4	5
12	24	35	20	17	1,1	4,6	6
16	30	45	26	22	1,3	5,3	7
20	36	50	31	27	2	6,3	8
24	44	60	37	32	2,4	8,2	10
30	56	68	48	41	3,6	11,2	10
36	68	80	60	50	4,6	14	12

La rondelle concave peut être utilisée seule avec un écrou à portée sphérique (page 143) ou avec une rondelle convexe.
Cette technique est souvent utilisée sur les systèmes d'ablocage de pièces comportant des défauts angulaires.

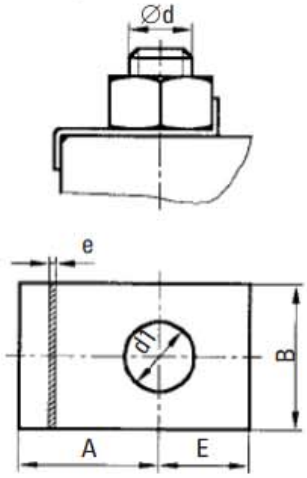
PLAQUETTES ARRÊTOIR

NF E 27-614

À ailerons



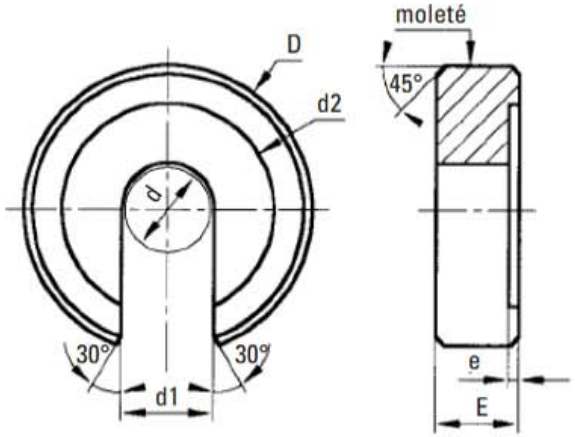
Rectangulaire



d	A	A1	B	E	e	d1	F
5	14	13	10	7	0,5	5,5	5
6	16	16	16	8	0,5	7	6
8	18	18	20	11	1	9	8
10	22	23	23	14	1	11	9
12	25	25	28	17	1	14	12
16	32	32	34	21	1	18	15
18	36	36	36	23	1	20	16
20	40	40	40	26	1	22	18
24	48	48	45	31	1,5	27	20
30	60	60	55	38	1,5	33	26

RONDELLES FENDUES AMOVIBLES

NF E 27-616

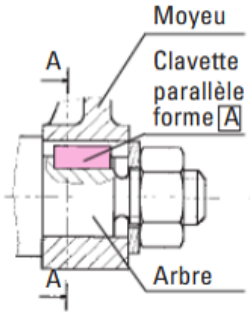


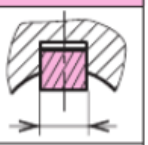
d	D	E	d1	d2	e
4	16	6	4,25	12	0,75
6	22	8	6,25	16	1
8	28	9	8,25	20	1,25
10	34	10	10,25	25	1,50
12	40	11	12,50	30	1,75
14	48	12	14,50	33	2
16	56	13	16,50	37	2
20	64	14	21	45	2,5
24	74	16	25	55	3
30	86	18	31	65	3
36	100	20	37	75	3

• Désignation

CLAVETTE PARALLÈLE	A	10 × 8	40	NF E 27-656
Désignation de l'élément	Symbole de la forme	Section	Longueur	Norme de référence

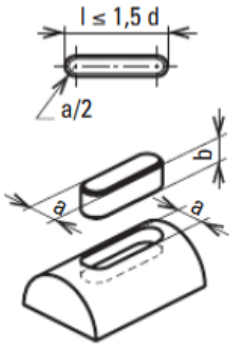
L'assemblage par **CLave-TaGe** est une liaison par obstacle d'un moyeu sur un arbre.
Cette liaison rend solidaire en rotation un organe de machine et un arbre. Elle peut être complète ou partielle (translation).
Le couple transmissible est supérieur à celui obtenu par goupillage.



AJUSTEMENTS		
Type clavetage		
Libre	H9 h9	D10 h9
Normal	N9 h9	Js9 h9
Serré	P9 h9	P9 h9

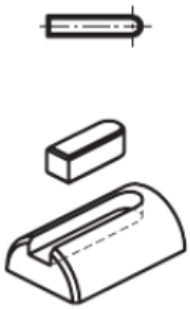
Différentes formes

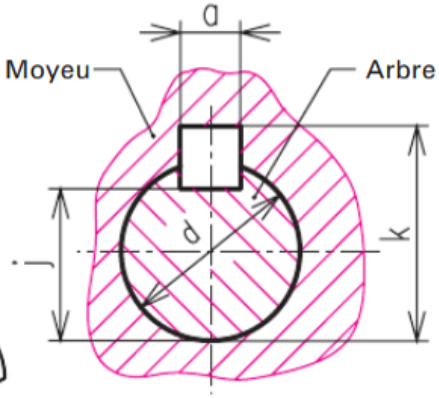
Forme A



Forme B

Forme C





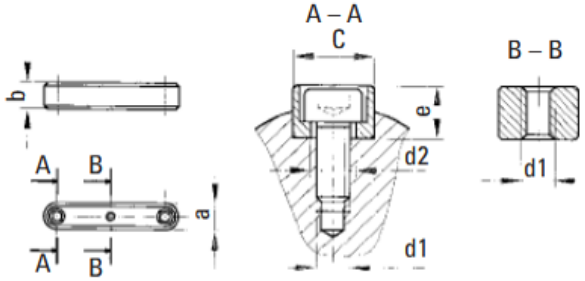
Principales dimensions — NF E 22-177

d	Clavette a h9	Clavette b ≤ 6 h9 b > 6 h11	Arbre a H9, N9 P9	Arbre j valeur	Arbre j Tol.	Moyeu a D10, JS9 P9	Moyeu k valeur	Moyeu k Tol.
8 à 10*	3	3	3	d - 1,8		3	d + 1,4	
10 à 12	4	4	4	d - 2,5	+ 0,1	4	d + 1,8	0
12 à 17	5	5	5	d - 3	0	5	d + 2,3	– 0,1
17 à 22	6	6	6	d - 3,5		6	d + 2,8	
22 à 30	8	7	8	d - 4	+ 0,2	8	d + 3,3	0
30 à 38	10	8	10	d - 5	0	10	d + 3,3	– 0,2

d	Clavette a h9	Clavette b ≤ 6 h9 b > 6 h11	Arbre a H9, N9 P9	Arbre j valeur	Arbre j Tol.	Moyeu a D10, JS9 P9	Moyeu k valeur	Moyeu k Tol.
38 à 44	12	8	12	d - 5		12	d + 3,3	
44 à 50	14	9	14	d - 5,5		14	d + 3,8	
50 à 58	16	10	16	d - 6	+ 0,2	16	d + 4,3	0
58 à 65	18	11	18	d - 7	0	18	d + 4,4	– 0,2
65 à 75	20	12	20	d - 7,5		20	d + 4,9	
75 à 85	22	14	22	d - 9		22	d + 5,4	

* de 8 à 10 inclus

Clavettes fixées sur l'arbre



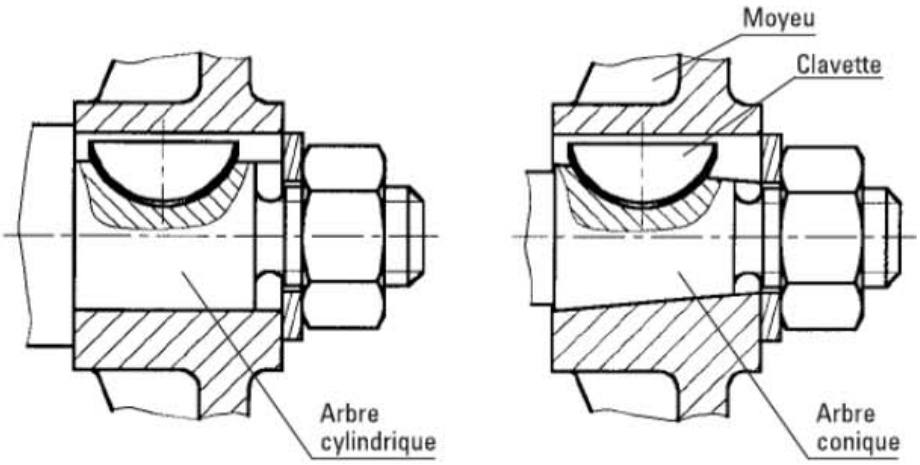
Section a × b	c	d1	Vis C ou CHC	d2	e
6 × 6	5	M 2,5	M 2,5 × 6	2,9	3
8 × 7	5,5	M 3	M 3 × 8	3,4	3,5
10 × 8	8	M 4	M 4 × 10	4,6	4,5
12 × 8	10	M 5	M 5 × 10	5,5	5,5
14 × 9	12	M 6	M 6 × 10	6,5	6,5
16 × 10	12	M 6	M 6 × 10	6,5	6,5
18 × 11	16	M 8	M 8 × 12	9	8,5
20 × 12	16	M 8	M 8 × 12	9	8,5

Désignation

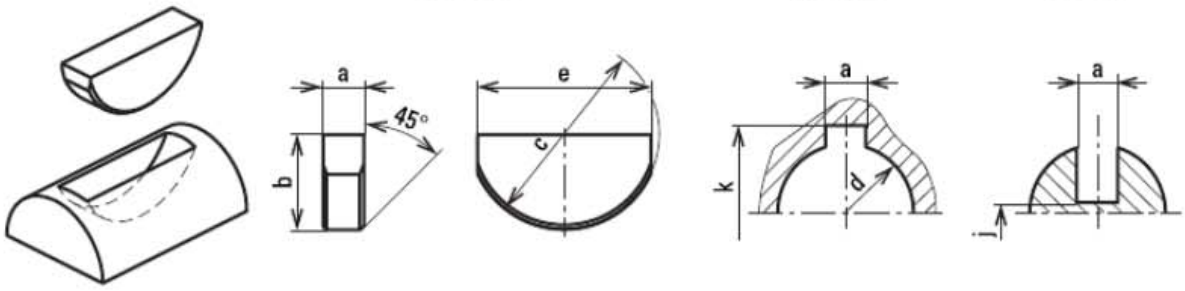
CLAVETTE DISQUE | 8 | 15 | NF E 27-653

- CLAVETTE DISQUE : Désignation de l'élément
- 8 : Épaisseur **a**
- 15 : Hauteur **b**
- NF E 27-653 : Norme de référence

La clavette disque a une utilisation limitée de par la difficulté à usiner l'empreinte profonde dans l'arbre (affaiblit la résistance de l'arbre).
Le couple transmissible est faible.
Utilisée lorsque la portée sur l'arbre est faible.



Dimensions



a h9	Clavette b h11	Clavette c h11	Clavette e h11	Arbre a P9	Arbre j h11	Moyeu a E9	Moyeu k H13
4	5	13	11,5	4	d – 3,5	4	d + 1,8
	6,5	16	15		d – 5		d + 1,8
	7,5	19	17,5		d – 6		d + 1,8
5	6,5	16	15	5	d – 4,5	5	d + 2,3
	7,5	19	17,5		d – 5,5		d + 2,3
	9	22	20,5		d – 7		d + 2,3
6	9	22	20,5	6	d – 6,5	6	d + 2,8

a h9	Clavette b h11	Clavette c h11	Clavette e h11	Arbre a P9	Arbre j h11	Moyeu a E9	Moyeu k H13
6	10	25	23	6	d – 7,5	6	d + 2,8
	11	28	25,5		d – 8,5		d + 2,8
	13	32	30		d – 10,5		d + 2,8
8	11	28	25,5	8	d – 8	8	d + 3,3
	13	32	30		d – 10		d + 3,3
	15	38	35		d – 12		d + 3,3
	16	45	41		d – 13		d + 3,3

Nota : Le choix de l'épaisseur **a** est fonction du diamètre de l'arbre **d** (voir page précédente).

Ajustements

a	Moyeu-clavette jeu maxi*	Moyeu-clavette jeu mini*	Clavette-arbre jeu maxi*	Clavette-arbre serrage maxi*
1,5-2-2,5-3	64	14	19	31
4-5-6	80	20	18	42
8-10	97	25	21	51

* jeux en µm.

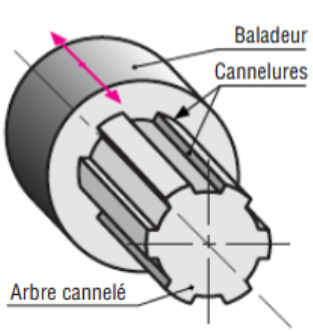
• Désignation

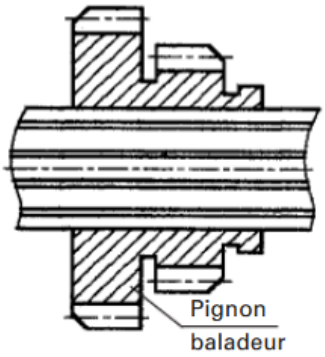
ARBRE CANNELÉ À FLANCS PARALLÈLES	8	42	46	GLISSANT	NF E 22-131
Désignation de l'élément	Nombre de cannelures **n**	Diamètre intérieur **d**	Diamètre extérieur **D**	Montage	Norme de référence

Les arbres cannelés sont utilisés pour transmettre des efforts ou des couples importants.

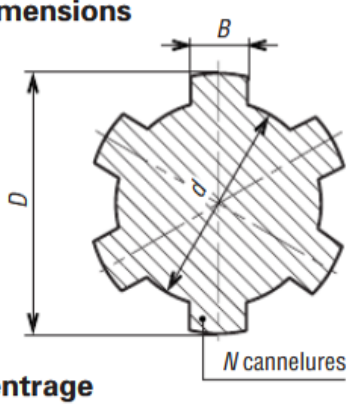
Les arbres peuvent comporter 6, 8, 10 ou 20 cannelures.
Le moyeu est obtenu par brochage.

Les cannelures de l'arbre sont fraisées ou obtenues par déformation plastique de l'arbre.





Dimensions

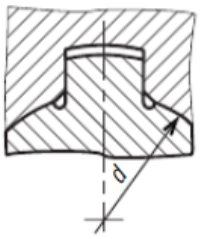


N	d	B	Série légère		Série moyenne	
			D	S*	D	S*
6	11	3			14	5
6	13	3,5			16	5
6	16	4			20	7,2
6	18	5			22	7,2
6	21	5			25	7,2
6	23	6	26	5	28	9,5
6	26	6	30	7,2	32	10,8
6	28	7	32	7,2	34	10,8
8	32	6	36	8,4	38	14,4
8	36	7	40	8,4	42	14,4
8	42	8	46	8,4	48	14,4
8	46	9	50	8,4	54	18
8	52	10	58	12	60	18
8	56	10	62	12	65	21
8	62	12	68	12	72	24
10	72	12	78	15	82	30
10	82	12	88	15	92	30
10	92	14	98	15	102	30
10	102	16	108	15	112	30
10	112	18	120	22,5	125	41

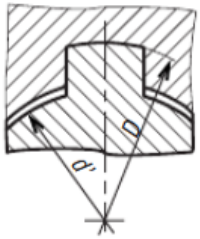
* S : surface d'appui des cannelures par millimètre de longueur.

Centrage

intérieur

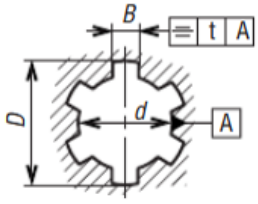


extérieur

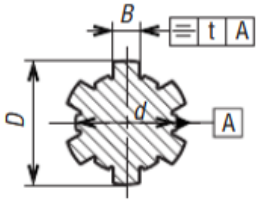


Tolérances

Moyeu



Arbre
(centrage intérieur)



Suivant la destination et les fonctions de l'assemblage, les tolérances dimensionnelles peuvent changer.

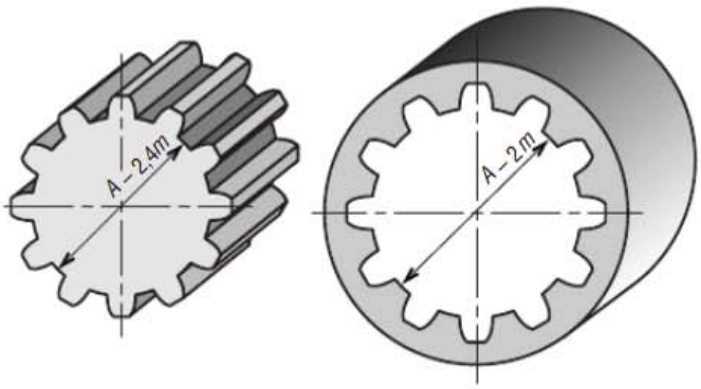
Moyeu (Tolérances obligatoires)						Arbre (Tolérances recommandées)						Type de montage
Non traité après brochage			Traité après brochage			Centrage intérieur			Centrage extérieur (à éviter)			
B	D	d	B	D	d	B	D	d	B	D	d	
H9	H7	H7	H11	H10	H7	h10	a11	h7	h10	h7	a11	Fixe
						d10	a11	f7	d10	f7	a11	Glissant

Désignation

ARBRE CANNELÉ À FLANCS EN DÉVELOPPANTE	30	22	1,25	GLISSANT	NF E 22-141
Désignation de l'élément	Diamètre nominal de l'alésage **A**	Nombre de dents **N**	Module **m**	Montage	Norme de référence

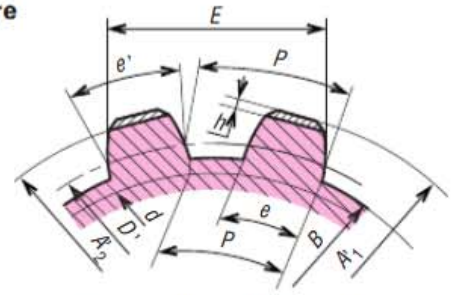
Ces cannelures relèvent des concepts d'une denture des engrenages. Ils permettent d'obtenir **l'autocentrage** de l'arbre et du moyeu sur les flancs des cannelures et de transmettre des couples importants à de grandes vitesses.
Les procédés de fabrication sont ceux employés pour les dents d'engrenages.

Arbre **Moyeu**

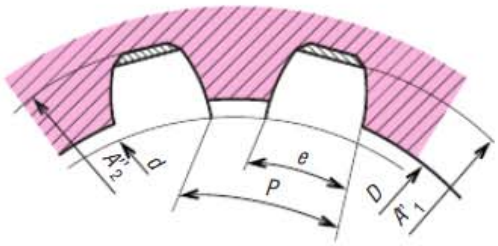


Dimensions

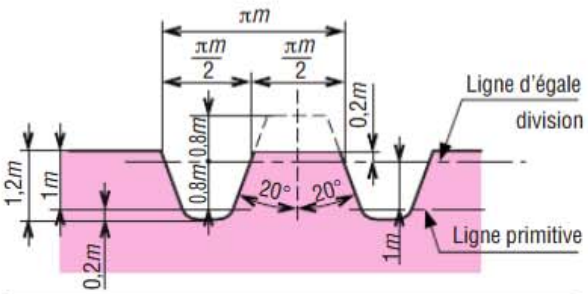
Arbre



Moyeu



Crémaillère de référence



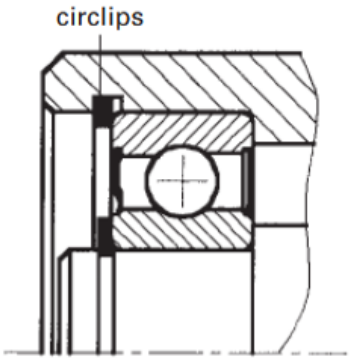
DIMENSIONS								
m = 1,00 $A'_2 = A - 0,20$ $A''_2 = A + 0,30$			m = 1,25 $A'_2 = A - 0,25$ $A''_2 = A + 0,37$			m = 1,667 $A'_2 = A - 0,33$ $A''_2 = A + 0,50$		
A	*N*	*D*	*A*	*N*	*D*	*A*	*N*	*D*
8	6	6	10	6	7,5	15	7	11,7
9	7	7	12	8	9,5	17	8	13,7
10	8	8	15	10	12,5	20	10	16,7
12	10	10	17	12	14,5	25	13	21,7
15	13	13	20	14	17,5	30	16	26,7
17	15	15	25	18	22,5	35	19	31,7
20	18	18	30	22	27,5	40	22	36,7
25	23	23	35	26	32,5	45	25	41,7
30	28	28	40	30	37,5	50	28	46,7
35	33	33	45	34	42,5	55	31	51,7

CARACTÉRISTIQUES		
Symb.	**Désignation**	**Valeur**
m	module	voir tableau ci-contre
N	nb de dents	voir tableau ci-contre
A	∅ nom. alésage de roul. à billes	voir tableau ci-contre
A'_1	∅ extérieur	$A'_1 = A$
A'_2	∅ extérieur arbre	$A'_2 = A - 0,2\ m$
A''_1	∅ extérieur	$A''_1 = A$
A''_2	∅ extérieur moyeu	$A''_2 = A + 0,3\ m$
B	∅ int. de l'arbre	$B = A - 2,4\ m$
D	∅ int. moyeu	$D = A - 2\ m$
D'	∅ prim. taillage	$D' = N \cdot m$
d	∅ de base	$d = D' \cos \alpha$
E	écartement K dents	
e	épais. curviligne de base	$e = e' \cos \alpha + 0,0149\ d$
e'	épais. curviligne au prim. taillage	$e' \quad \frac{pm}{2} + 2\ X m \tan \alpha$
h	haut. chanfreins	$h \quad \frac{A'_1 - A'_2}{2}$
K	nb de dents pour la mesure de E	
P	pas au ∅ prim.	$P = \pi \cdot m$
p	pas au ∅ curviligne de base	$p = \pi \cdot m \cos \alpha$
α	angle de pression	$\alpha = 20°$
X	déport de profil de l'outil à tailler	$X \quad \frac{A - m(N + 0,4)}{2\ m}$

• Anneaux élastiques

• Fonctions générales

Les anneaux élastiques permettent l'arrêt en translation des éléments sur des arbres ou sur des alésages (roulements, bagues...).
Ces anneaux élastiques sont « ouverts », ils sont montés à l'aide d'une pince spéciale à ergots et maintenus en position grâce à leur élasticité.
Peu onéreux, ils sont faciles d'emploi (montage et démontage). L'usinage des gorges de logement est aisé.



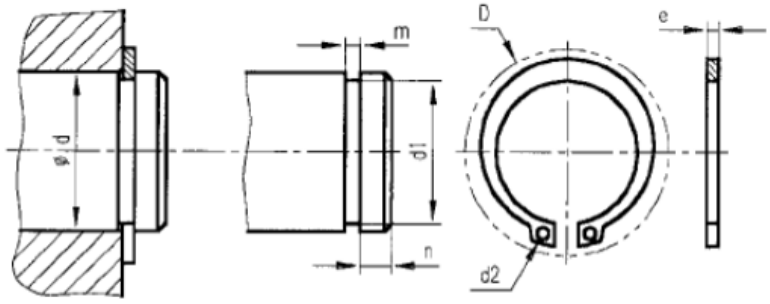
• Anneaux élastiques pour arbres

• Désignation

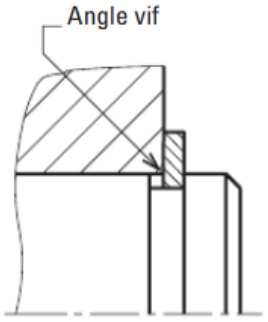
ANNEAU ÉLASTIQUE POUR ARBRE	30	1,5	NF E 22-163

Désignation de l'élément
Diamètre de l'arbre
Épaisseur
Norme de référence

• Dimensions



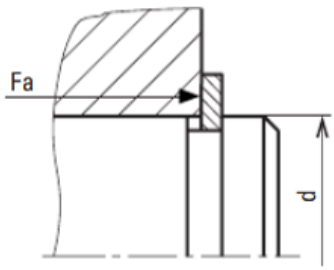
D : ∅ extérieur au montage



Exemple de montage

Remarque
Sans angle vif sur l'alésage (présence d'un chanfrein), interposer une rondelle plate au montage.

d	5	6	8	10	12	14	15	17	18	20	22	25	30
d1	4,8	5,7	7,6	9,6	11,5	13,4	14,3	16,2	17,8	19	21	23,9	28,6
	0 0,075		0 0,09		0 0,11					0 0,21			
m H13	0,7	0,8	0,9	1,1					1,3				1,6
n mini	0,3	0,45	0,6		0,75	0,9	1,05	1,2		1,5	1,5	1,65	2,1
e h11	0,6	0,7	0,8	1					1,2				1,5
D	10,7	12,2	15,2	17,6	19,6	22	23,2	25,6		29	31,4	34,8	41
d2	1	1,2		1,5	1,7					2			



1 daN = 10 N

d	5	10	15	20	30
Fa	37	150	390	755	1 590

Effort axial **Fa** maximum (daN).

ANNEAUX ÉLASTIQUES À MONTAGE AXIAL

CIRCLIPS (SulTe)

• Anneaux élastiques pour alésage

• Désignation

ANNEAU ÉLASTIQUE POUR ALÉSAGE	20	1	NF E 22-165

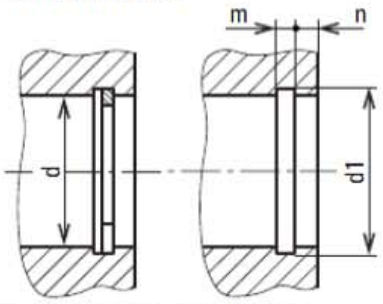
Désignation de l'élément

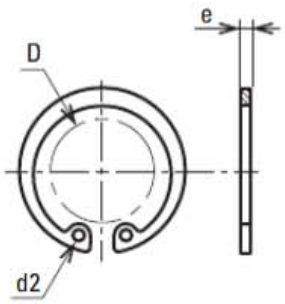
Diamètre intérieur de l'alésage

Épaisseur

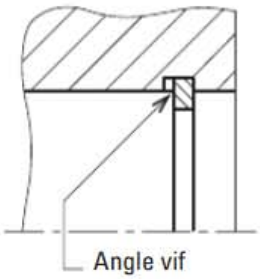
Norme de référence

• Dimensions





D : ∅ intérieur au montage



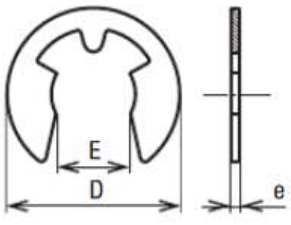
Exemple de montage

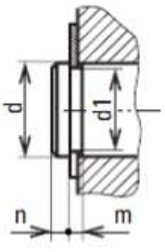
d	8	10	12	14	15	17	18	20	22	25	28	30	32	35	40	45	50	55	60
d1	8,4	10,4	12,5	14,6	15,7	17,8	19	21	23	26,2	29,4	31,4	33,7	37	42,5	47,5	53	58	63
	+0,09 0	+ 0,11 0					+ 0,21 0					+ 0,25 0					+ 0,30 0		
m H13	0,9	1,1								1,3				1,6	1,85		2,15		
n mini	0,6		0,75	0,9	1,05	1,2	1,5			1,8	2,1		2,55	3	3,75		4,5		
e h11	0,8	1								1,2				1,5	1,75		2		
D	2,9	3,7	4,7	6	7	8,4	9,8	10,6	12,6	15	18,4	19,4	20,2	23,2	27,4	31,6	36	40,4	44,4
d2	1	1,2	1,5	1,7			2						2,5						

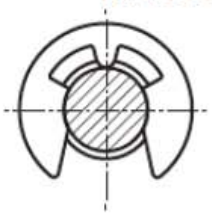
ANNEAUX ÉLASTIQUES À MONTAGE RADIAL

L'effort axial admissible sur ce type d'anneau est nettement inférieur à celui que peuvent supporter les anneaux à montage axial.
Le montage doit se faire sur des arbres tournant à faible vitesse.

NF L 23-203





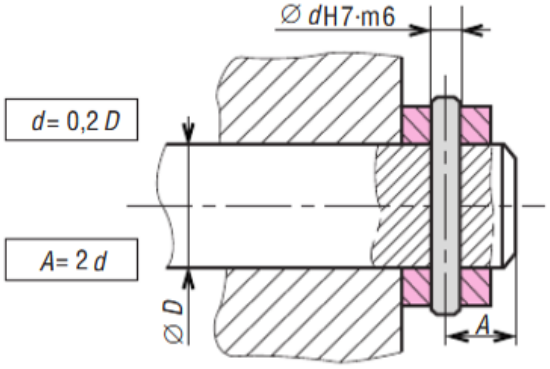


d	Arbre de	Arbre à	d1 h11	D	E H10	e		m mini	n mini	d	Arbre de	Arbre à	d1 h11	D	E H10	e		m mini	n mini
1	1	1,4	0,8	2	0,58	0,2		0,24	0,4	8	8	11	7	14	5,84	0,9		0,94	1,5
2	2	2,5	1,5	4	1,28	0,4		0,44	0,8	10	10	14	9	18,5	7,63	1,1		1,15	2
3	3	4	2,3	6	1,94	0,6	± 0,02	0,64	1	13	13	18	12	23	10,45	1,3	± 0,03	1,35	2,5
4	4	5	3,2	7	2,7	0,6		0,64	1	16	16	24	15	29	12,61	1,5		3	3
5	5	7	4	9	3,34	0,7		0,74	1,2	20	20	31	19	37	15,92	1,75		3,5	3,5
6	6	8	5	11	4,11	0,7		0,74	1,2	25	25	38	24	44	21,88	2		4	4

GOUPILLES CYLINDRIQUES

• Goupillage

Le goupillage a pour buts :
- d'immobiliser une pièce par rapport à une autre ;
- d'assurer un positionnement relativement précis d'une pièce par rapport à une autre ;
- de transmettre un mouvement (rotation, translation...) ;
- d'assurer un rôle de sécurité en cas de surcharge de mécanisme (cisaillage de la goupille) ;
- de permettre un montage ou un démontage du mécanisme relativement facilement (prévoir l'évacuation de la goupille par un trou de dégagement).



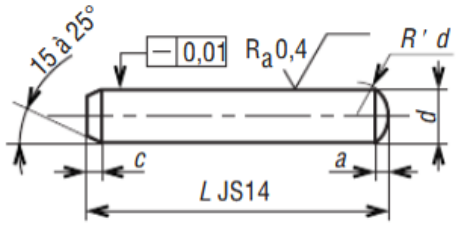
• Goupilles cylindriques non trempées NF E 27-484

• Désignation

GOUPILLE CYLINDRIQUE	Type A	5	25	NF E 27-484
Désignation de l'élément	Type	Diamètre	Longueur	Norme de référence

• Dimensions

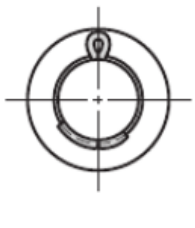
Type A



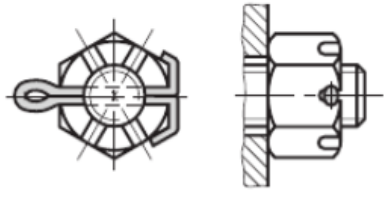
d	a	c	Longueurs L
2	0,25	0,35	6 - 8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 20 - 25
3	0,4	0,5	8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 20 - 25 - 30
4	0,5	0,63	8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45
5	0,63	0,80	10 - 12 - 14 - 16 - 20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50
6	0,8	1,2	12 - 14 - 16 - 20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50 - 55 - 60
8	1	1,6	14 - 16 - 20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50 - 55 - 60 - 65 à 80
10	1,2	2	20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 à 100

GOUPILLES CYLINDRIQUES FENDUES V

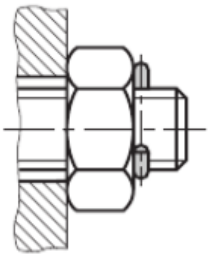
NF E 27-487



Goupille derrière la rondelle

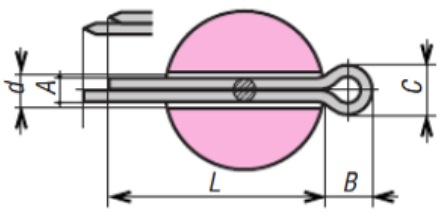


Goupille à travers l'écrou



Goupille derrière l'écrou

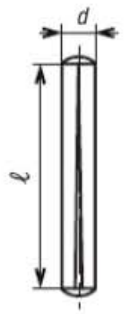
• Dimensions



d	A mini	A maxi	C	B	Longueur L mini	Longueur L maxi	Longueurs disponibles
2	1,7	1,8	4,6	5	10	40	8 - 10 - 12 - 14 - 18 - 20 - 22 - 25 - 28 - 32 - 36 - 40 - 45 - 50 - 56 - 63 - 71 - 80 - 90 - 110 - 112 - 125
2,5	2,1	2,3	5,8	6,4	12	50	
3,2	2,7	2,9	7,4	8	14	63	
4	3,5	3,7	9,2	10	18	80	
5	4,4	4,6	11,8	12,6	22	100	
6,3	5,7	5,9	15	16	32	125	

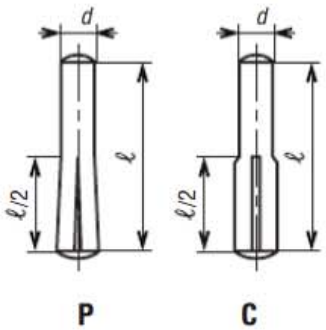
Éléments standards de construction

GOUPILLES CANNELÉES



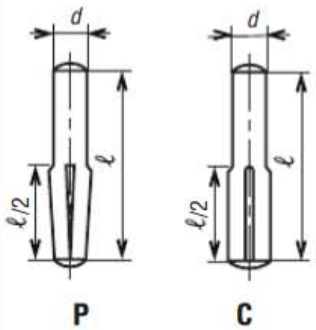
P

Type G 1
NF E 27-492



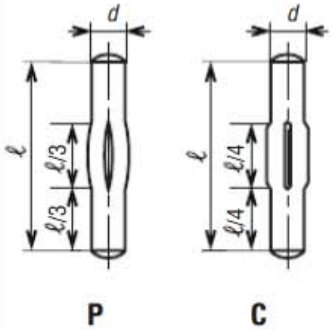
P **C**

Type G 2
NF E 27-493
Trous débouchants



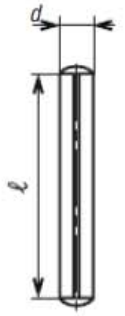
P **C**

Type G 5
NF E 27-494
Trous borgnes



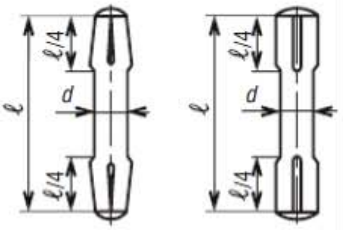
P **C**

Type G 6
NF E 27-495
Axe de chape



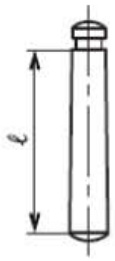
C

Type G 7
NF E 27-496

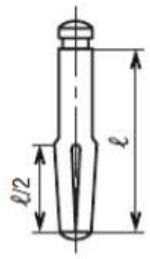


P **C**

Type G 8
NF E 27-497
Axe de rouleau

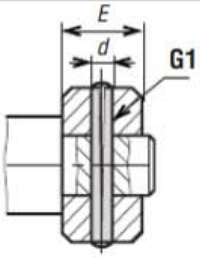


Type GGP 2
NF E 27-498
Trous débouchants

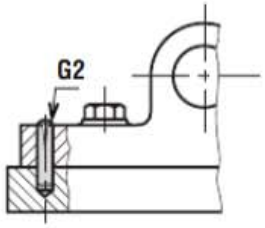


Type GGR 5
NF E 27-498
Trous borgnes

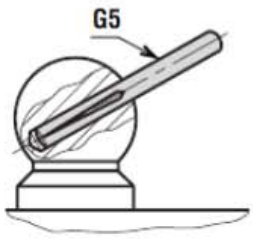
• Exemples de montages



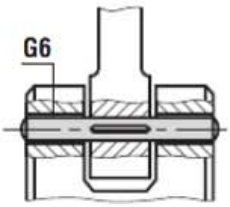
Fixation d'une bague d'arrêt



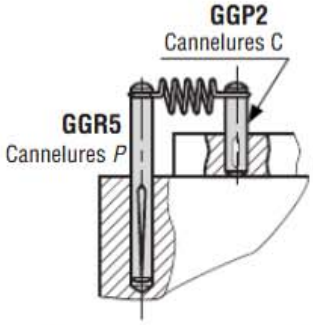
Goujon de centrage



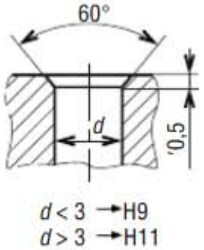
Doigt de commande



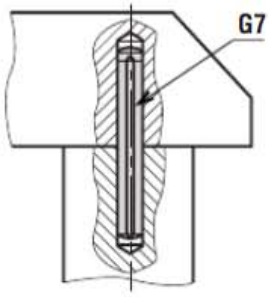
Axe de chape



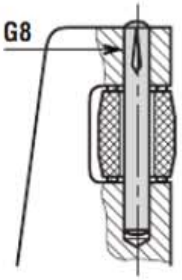
Attache-ressort



Préparation des trous



Assemblage invisible de 2 pièces



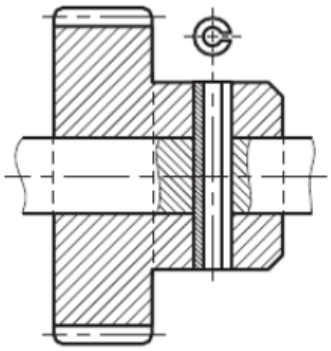
Axe de rouleau

C : cannelures constantes **P** : cannelures progressives

• Généralités

Les **goupilles élastiques** sont obtenues par enroulement d'une bande d'acier de résistance à la rupture très élevée (acier traité et revenu pour Rr ≃ 1 400 MPa).

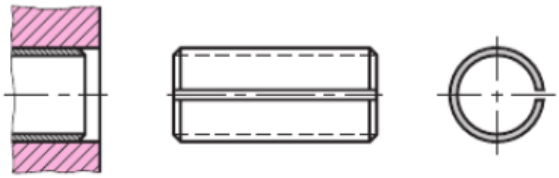
Avantages des montages avec goupilles élastiques :
– facilité de montage,
– très résistants dans la transmission des efforts,
– très résistants dans la transmission des charges vibrantes,
– très résistants à l'usure,
– faible coût.



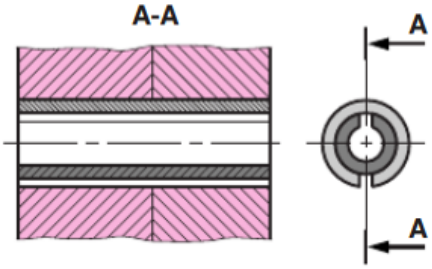
• Désignation

GOUPILLE ÉLASTIQUE	ÉPAISSE	8	30	NF E 27-489
Désignation de l'élément	Type	Diamètre	Longueur	Norme de référence

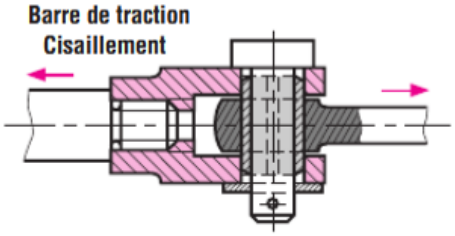
• Exemples de montages



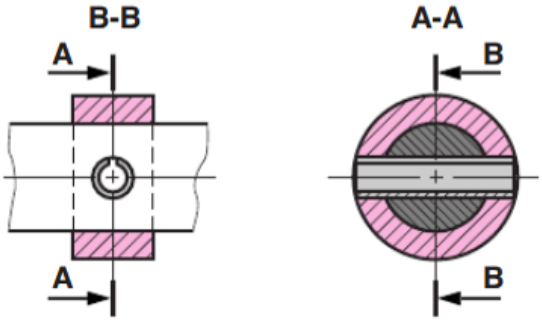
Montage normal



Montage « compound »

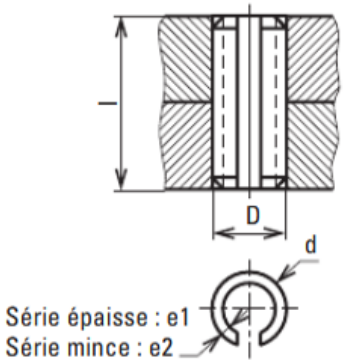


Barre de traction (cisaillement)



Bague d'arrêt (liaison fixe)

• Dimensions



D H12	2	3	4	5	6	7	8	9	10	l disponible
d	2,2	3,3	4,35	5,35	6,4	7,45	8,45	9,5	10,5	5 - 6 - 8 - 10 - 12 - 15 - 18 - 20 - 22 - 25 - 28 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50 - 55 - 60 - 70 - 80 - 90 - 100 - 110 - 120 - 130 - 140
e1	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,2	1,5	2	2	
e2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,75	1	1	
l	5 à 40	6 à 50	8 à 60	10 à 80	10 à 80	10 à 100	12 à 120	12 à 120	15 à 140	

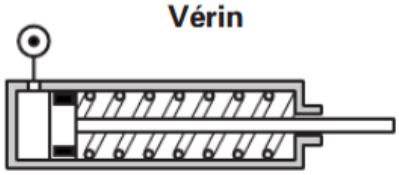
RESSORTS DÉSIGNATION ET FORMES

• Ressorts cyclindriques, rondelles ressorts

• Généralités

Un ressort est un élément élastique d'un système mécanique qui reprend sa forme à l'état repos. Selon sa forme, il peut être de traction, de compression, de torsion.
Il peut limiter les efforts, rattraper un jeu dû à l'usure, compenser une dilatation, amortir les vibrations...

Vérin

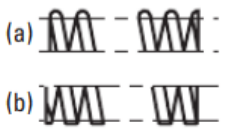
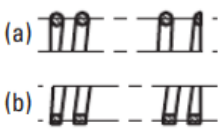
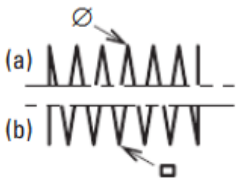
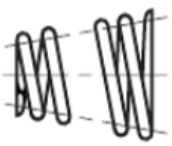
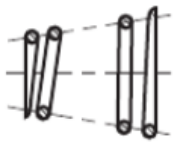
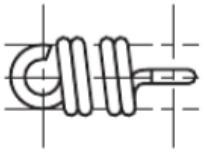
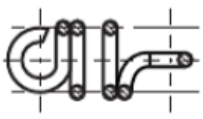
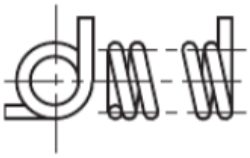
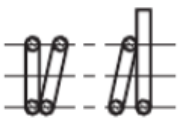


Ressort de compression

• Désignation

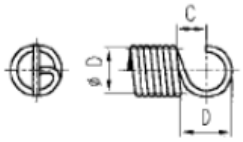
RONDELLE RESSORT	25	2e SéRIe	NF E 25-104
Désignation de l'élément	Diamètre nominal	Numéro de série	Norme de référence

• Symboles

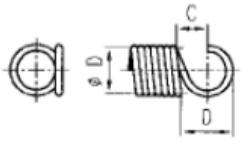
	DéSIGNaTIoN	Vue de faCe	Vue eN Coupe	SCHéMa
COMPRESSION	Ressort cylindrique de compression : (a) Section circulaire (b) Section rectangulaire			
COMPRESSION	Ressort conique de compression en fil de section circulaire			
COMPRESSION	Rondelle ressort conique simple (type « Belleville »)			
TRACTION	Ressort cylindrique de traction en fil de section circulaire			
TORSION	Ressort cylindrique à action angulaire			

RESSORTS DE TRACTION

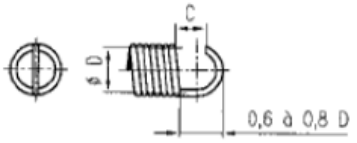
• Formes des boucles



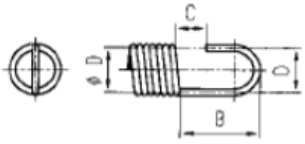
A. Boucle complète normale (œillet anglais)



B. Boucle sur le côté

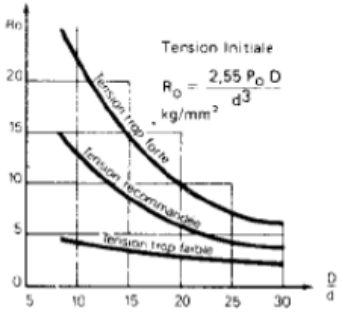


C. Demi-boucle relevée (œillet allemand)



D. Boucle allongée au centre

• Détermination de la tension initiale



Ce graphique est tracé pour un fil de 100 daN/mm². Le résultat peut être corrigé par une règle de trois pour les autres fils.

Relations à observer

Boucles **A** et **B** : $L = (n + 1)\ d + 2\ D$
Boucle **C** : $L = (n + 1)\ d + 1,4\ D$
Boucle **D** : $L = (n + 1)\ d + 2b$

L = Longueur totale extérieure
n = Nombre de spires utiles
D = Diamètre moyen du ressort
d = Diamètre du fil

RESSORTS DE COMPRESSION

• Formes des extrémités

Simplement coupé

Simplement meulé

Rapproché non meulé

Rapproché et meulé

• Relations à observer

Forme des extrémités		Simplement coupées	Simplement meulées
Nombre de spires utiles	(n)	$n = N - 1/2$	$n = N - 1$
Nombre de spires totales	(N)	$N = n + 1/2$ $N = \frac{L - d}{P}$	$N = n + 1$ $N = \frac{L - d/2}{P}$
Hauteur comprimée à bloc	(H)	$H = d\,(N + 1)$	$H = d\,(N + 1/2)$
Longueur libre	(L)	$L = d + Np$	$L = d/2 + Np$
Pas	(p)	$p = \frac{L - d}{N}$	$p = \frac{L - d/2}{N}$

Forme des extrémités		Rapprochées non meulées	Rapprochées et meulées
Nombre de spires utiles	(n)	$n = N - 2$	$n = N - 2$
Nombre de spires totales	(N)	$N = n + 2$ $N = 2 + \frac{L - 3d}{P}$	$N = n + 2$ $N = 2 + \frac{L - 2d}{P}$
Hauteur comprimée à bloc	(H)	$H = d\,(N + 1)$	$H = d\,N$
Longueur libre	(L)	$L = 3d + np$	$L = 2d + np$
Pas	(p)	$p = \frac{L - 3d}{n}$	$p = \frac{L - 2d}{n}$

Flèche : $f = \frac{8P.n.D^3}{G.d^4}$

Raideur : $K = \frac{P}{f} = \frac{G.d^4}{8\ n.\ D^3}$

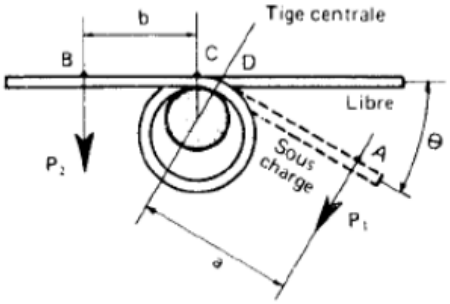
– f : flèche du ressort en mm
– P : charge appliquée au ressort en N
– D : diamètre moyen du ressort en mm
– n : nombre de spires utiles
– G : module d'élasticité transversal en N/mm²
– d : diamètre du fil en mm
– K : raideur du ressort en N/mm

RESSORTS DE TORSION

• Déformation

$$\theta = \frac{465\ M\ l}{G d^4}$$

θ : angle de rotation
M : couple appliqué au ressort en N·mm
M = a × P1 = b × P2
l : longueur du fil participant à la déformation



$$l = n\,\pi\,D + \frac{BC}{3} + \frac{DA}{3}$$

n : nombre de spires
D : ∅ moyen en mm

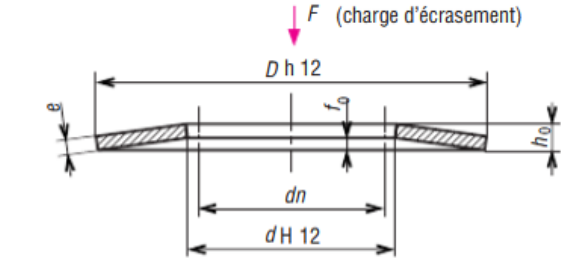
Taux de travail

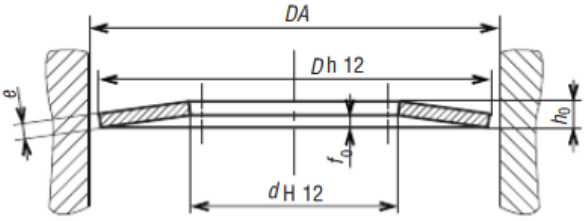
$$R = \frac{10{,}4\ M}{d^3}$$

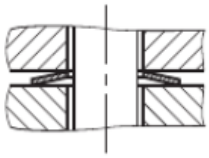
G : module d'élasticité transversal du fil en N/mm²
d : diamètre du fil en mm
R : contrainte développée dans le fil en N/mm²

RONDELLES RESSORTS CONIQUES (BELLEVILLE)

• Éléments de calcul

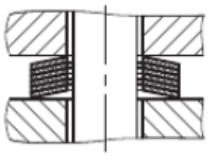






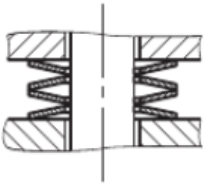
Charge et flèche correspondant à la rondelle

Rondelle montée seule



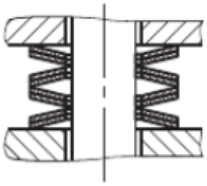
Addition des charges
Flèche unitaire divisée par le nombre de rondelles

Rondelles montées empilées dans le même sens



Charge correspondant à une rondelle
Addition des flèches

Rondelles montées empilées en sens contraire



Addition des charges
Addition des flèches

Montage mixte

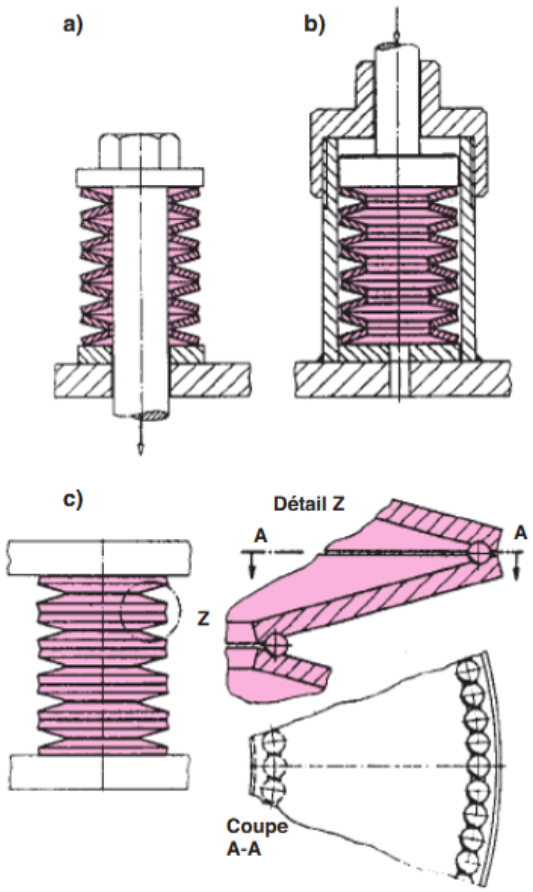
• Valeurs des charges en fonction des flèches

dn nom.	d H12	D h12	DA	1re série (série épaisse) $\frac{D}{e} \approx 18$ et $\frac{fo}{e} \approx 0{,}4$				2e série (série mince) $\frac{D}{e} \approx 28$ et $\frac{fo}{e} \approx 0{,}75$			
				e	fo	ho	Fa (daN) pour Δf = 3/4 fo	e	fo	ho	Fa (daN) pour Δf = 3/4 fo
5	5,2	10	10,5	0,5	0,25	0,75	32	0,4	0,3	0,70	20
6	6,2	12,5	13	0,7	0,3	1	66	0,5	0,35	0,85	29
8	8,2	16	16,5	0,9	0,35	1,25	101	0,6	0,45	1,05	41
10	10,2	20	20,5	1,1	0,45	1,55	152	0,8	0,55	1,35	74
12	12,2	25	25,6	1,5	0,55	2,05	296	0,9	0,7	1,60	87
16	16,3	31,5	32,4	1,75	0,7	2,45	387	1,25	0,9	2,15	191
18	18,3	35,5	36,4	2	0,8	2,80	518	1,25	1	2,25	169
20	20,4	40	41	2,25	0,9	3,16	651	1,5	1,15	2,65	262
22	22,4	45	46	2,5	1	3,50	774	1,75	1,3	3,05	365
25	25,4	50	51	3	1,1	4,10	1197	2	1,4	3,40	470
30	31	63	64,5	3,5	1,4	4,90	1503	2,5	1,75	4,25	719
35	36	71	72,5	4	1,6	5,60	2049	2,5	2	4,50	871
40	41	80	81,5	5	1,7	6,70	3356	3	2,3	5,30	1052

• Guidages des rondelles élastiques

Guidage de l'empilage alterné

Paquets et empilages de rondelles ressorts sont guidés. Cela est assuré par des éléments de guidage tels que, par exemple :
– une broche de guidage (guidage intérieur, voir fig. a),
– un manchon de guidage (guidage extérieur, voir fig. b),
– ou par des mesures autocentreuses (guidage par billes, voir fig. c, ou par des segments en fil métallique écroui, sans figure).



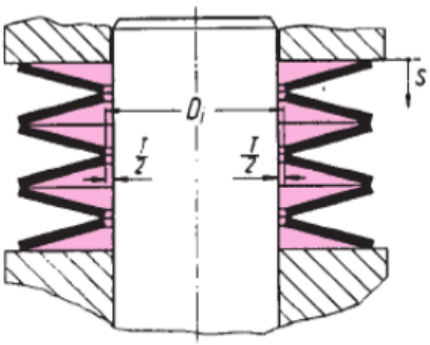
Divers guidages d'empilages alternés

Guidage des rondelles élastiques et jeu conseillé

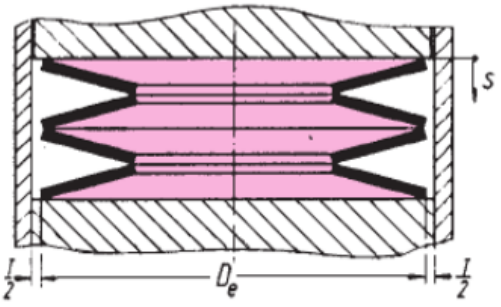
Quand les rondelles ressorts sont empilées en colonnes, il faut alors qu'elles soient guidées sur le bord intérieur ou extérieur.
Dans le cas d'un guidage intérieur, l'axe de guidage devrait avoir une surface lisse avec dureté de 52 HRC.
Pour le jeu entre l'élément de guidage et le ressort, on conseille les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous.
Les ressorts devraient travailler, dans la mesure du possible, entre $s = 0{,}1 \cdot h_o$ et $s = 0{,}75 \cdot h_o$.
L'introduction de la force dans le ressort ou dans l'empilage de ressorts devrait, dans la mesure du possible, être effectuée par le bord extérieur du ressort.

D_i ou D_e mm	Jeu T mm
jusqu'à 16	0,2
plus de 16 à 20	0,3
plus de 20 à 26	0,4
plus de 26 à 31,5	0,5
plus de 31,5 à 50	0,6
plus de 50 à 80	0,8
plus de 80 à 140	1,0
plus de 140 à 250	1,6
plus de 250	2,0

a)



b)



Guidages des ressorts (a) intérieur, (b) extérieur. Jeu T entre les ressorts et l'élément de guidage

4.2. DÉFINITION DES ÉLÉMENTS

4.2.1. SURFACES FONCTIONNELLES

SURFACES

• Schématisation des fonctions mécaniques

– Voir schématisation, chapitre 2.
– Voir schémas des liaisons entre pièces, chapitre 2.
– Voir symboles divers : roulements, engrenages, accouplements, vérins, etc., voir chapitre 2 et 3.

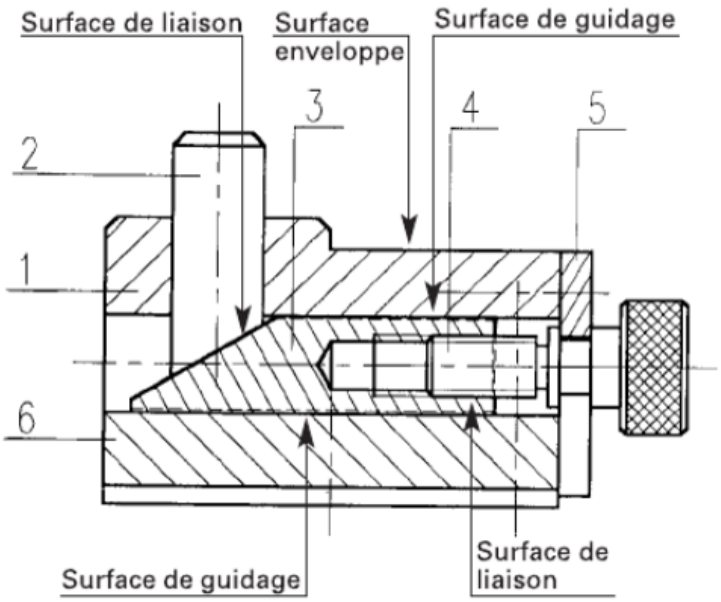
• Surfaces fonctionnelles d'une pièce

Surfaces fonctionnelles

Elles sont déterminées par les fonctions à réaliser :

– Surfaces fonctionnelles terminales. Elles sont conditionnées par un jeu ou un serrage.

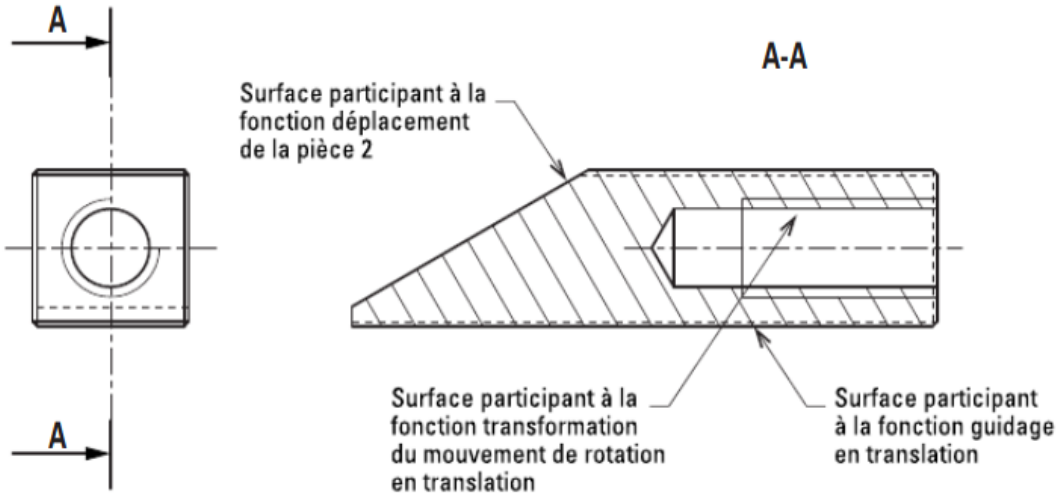
– Surfaces fonctionnelles de liaison. Elles sont conditionnées par un contact temporaire ou par un contact permanent en situation de fonctionnement.



Surfaces enveloppes de matière

Surfaces dépendantes de leur mode d'obtention (fonderie, matriçage, usinage...) et participant à l'agencement des éléments liés par des surfaces fonctionnelles.

Exemples de surfaces définissant une pièce mécanique



Cale pentée 3

Caractéristiques d'une surface

Voir chapitre 4 : cotation fonctionnelle.

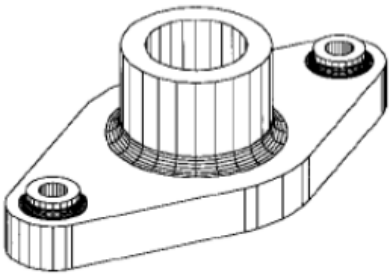
4.2.2. PROCÉDÉS D'ÉLABORATION DES PIÈCES MÉCANIQUES

• Procédés de mise en forme. Matériaux associés

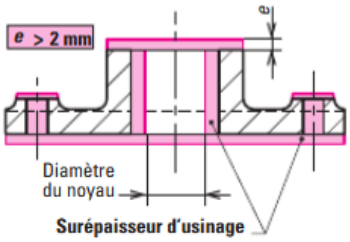
• Moulage en sable

Procédé permettant d'obtenir des pièces à l'état brut par coulée du métal en fusion dans l'empreinte du moule.
Métaux les plus couramment utilisés : **fonte** et **Alpax** (alliage d'aluminium).
Après chaque démoulage, il faut reprendre la préparation du moule (changement du sable, formation d'une nouvelle empreinte dans le sable, mise en place d'un noyau…).

Pièce brute à obtenir (bride)

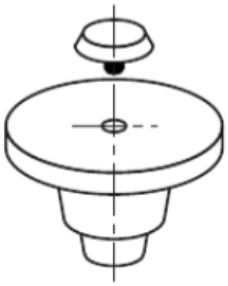


Dessin de la pièce brute



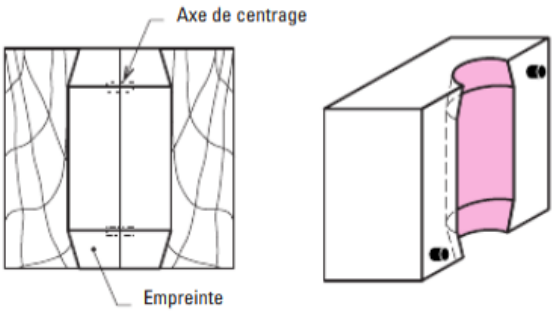
Les **surépaisseurs** (en couleur) permettent l'usinage pour l'obtention des cotes définitives.

Modèle de la pièce en deux parties



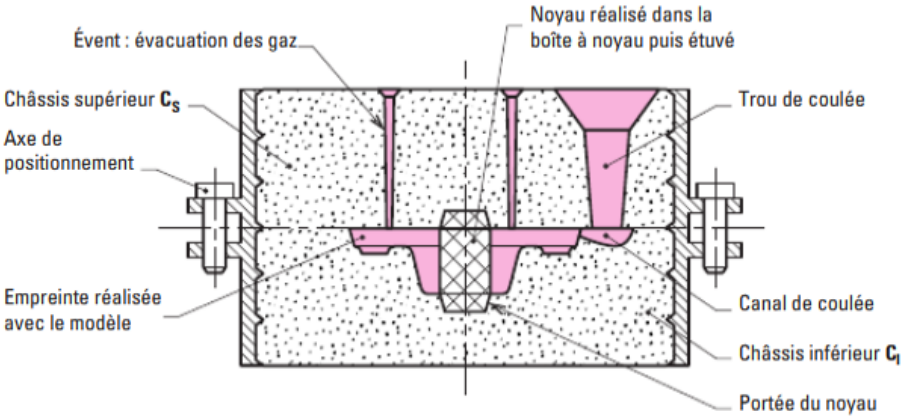
En moulage série, les deux parties du modèle sont liées à des **plaques modèles**.

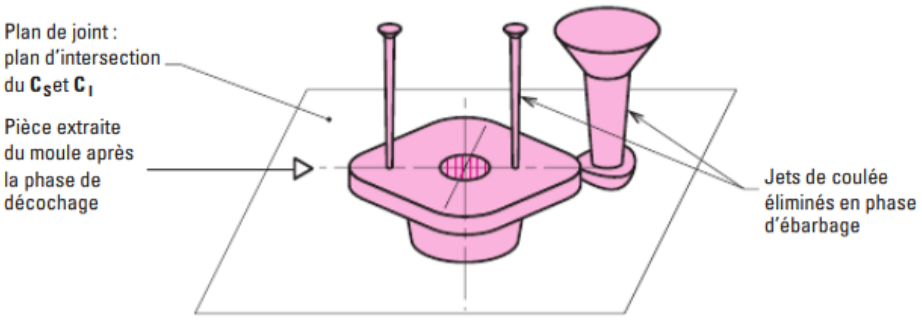
Boîte à noyau en deux parties



Réalisation du moule

Bureau d'étude (BE)
↓
Bureau des méthodes (BM)
↓
Modèlerie
↓
Fonderie
↓
Contrôle de qualité
↓
Traitement thermique

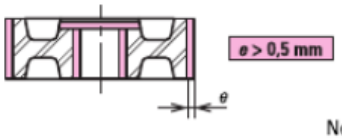




MOULAGE (suite)

• Moulage en moule métallique (moulage en coquille)

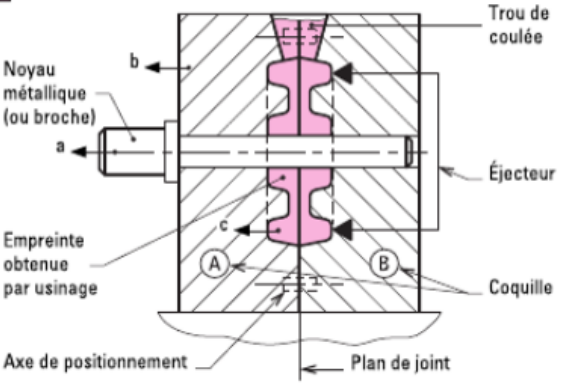
Le métal en fusion est coulé dans un moule métallique en fonte ou en acier spécial à haute résistance thermique.
Le moule est réutilisable après chaque coulée. Utilisé pour les grandes séries.

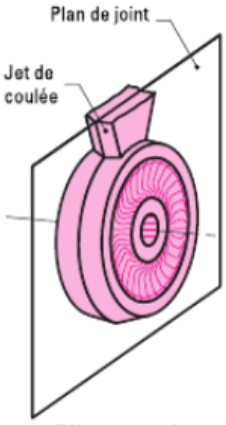


Dessin du brut partiel

Remarque :
Les surépaisseurs sont plus faibles qu'en sable

Structure du moule métallique





Pièce extraite du moule selon l'ordre de démoulage a, b, c

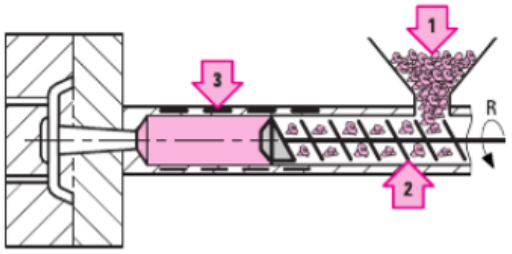
Exemple : 5 000 poulies en AS13

• Moulage des matières plastiques par injection

• Phase de préparation

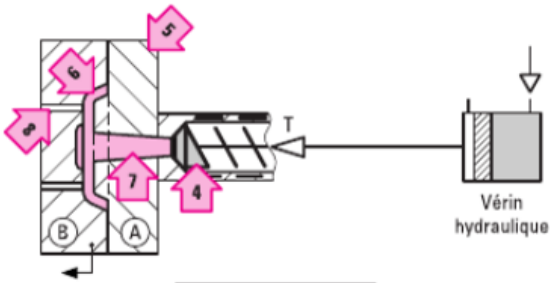
Chauffer progressivement la matière pour la rendre plastique (130 à 350 °C).

1. Matériaux de base en poudre ou granulés.
   Exemple de polymères TP :
   – PVC (polychlorure de vinyle) ;
   – Polyamide PA (Nylon, Rilsan).
2. Vis sans fin, en rotation dans cette phase, permettant le transfert vers la partie chauffante du cylindre.
3. Cylindre avec résistance chauffante.



• Phase d'injection

4. Le piston terminal de la vis, piloté par un vérin hydraulique, injecte sous pression la matière dans l'empreinte.
5. Coquille fixe Ⓐ et coquille mobile Ⓑ.
6. Empreinte aux formes de la pièce avec fortes dépouilles. Pas d'angles vifs. Épaisseur normale 1 à 4 mm.
7. Trou ou « carotte » de coulée.
8. Éjecteur pour extraction de la pièce.



Précision pour $D > 100$ ± 0,05 à 0,3

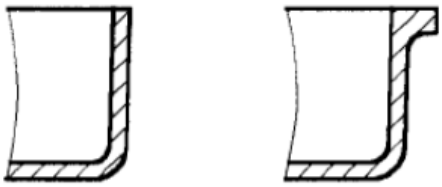
• Phase de solidification

Les coquilles refroidies assurent le durcissement du produit moulé puis l'extraction de la pièce.

MOULAGE (suite)

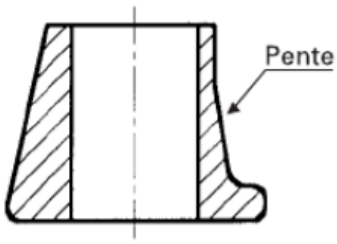
• Règles de tracé favorisant l'obtention de pièces moulées métalliques saines

Augmenter l'épaisseur pour diminuer la « dureté » due à la trempe que subissent les faibles épaisseurs (faciliter l'usinage).



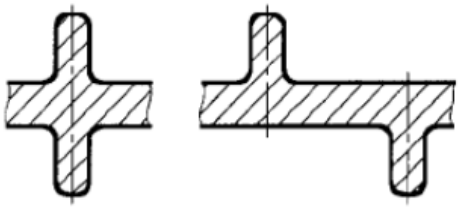
Mauvais Bon

Éviter le changement brutal de l'épaisseur



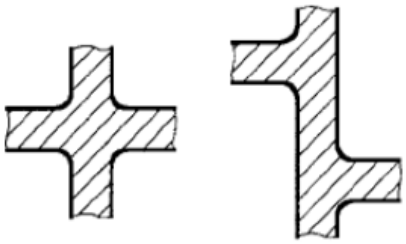
Mauvais Bon

Décaler les nervures



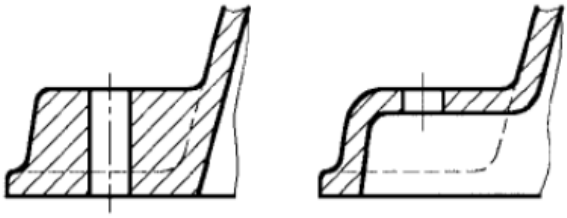
Mauvais Bon

Décaler les raccordements des parois



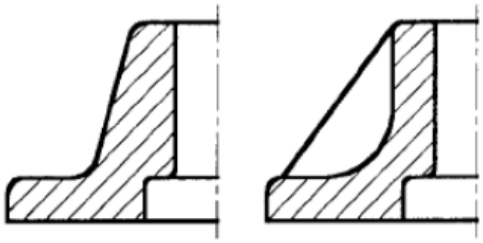
Mauvais Bon

Réduire l'épaisseur massive



Mauvais Bon

Réduire la masse d'une paroi



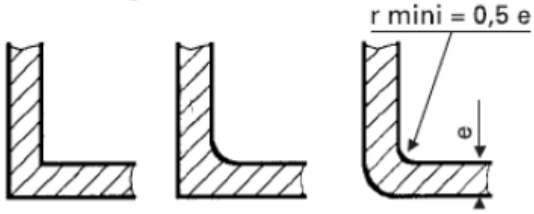
Mauvais Bon

• Règles de tracé favorisant l'obtention de pièces moulées plastiques saines

Épaisseur constante

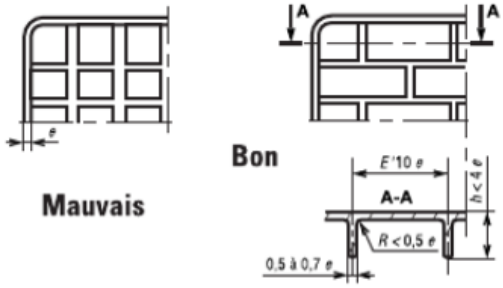
Mauvais Bon

Éviter les angles vifs



Mauvais Bon

Prévoir des nervures judicieusement réparties



Mauvais Bon

Éviter les déformations au démoulage

Mauvais Bon

Nota : Dans tous les cas de figure, prévoir de fortes dépouilles pour le démoulage.

Procédés d'élaboration des pièces mécaniques

FRITTAGE

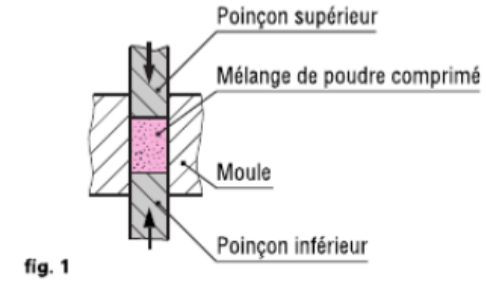


fig. 1

Le procédé consiste à :
- **préparer** une poudre ou un mélange de poudre généralement métallique ;
- **comprimer** cette poudre dans un moule (phase de compression (fig. 1) ;
- **chauffer** dans un four sous vide ou à atmosphère contrôlée à une température inférieure à celle de l'élément principal (phase de frittage).

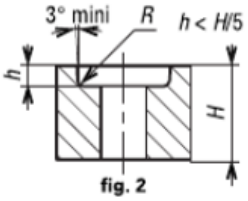


fig. 2

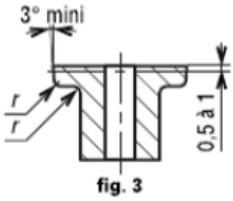


fig. 3

Épaulement et dépouilles : pour les pièces non épaulées, la dépouille n'est pas nécessaire (les forces d'éjection sont supérieures aux forces de frottement) (fig. 2). Pour les pièces épaulées ou comportant des embrèvements, des dépouilles minimales de 3° sont nécessaires (fig. 3).

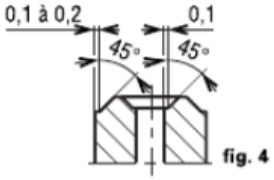


fig. 4

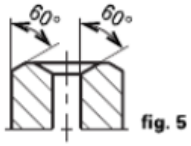


fig. 5

Chanfreins : casser l'angle vif par un méplat de 0,1 (on diminue la fragilité des poinçons) (fig. 4). De préférence choisir des chanfreins à 60° (fig. 5).

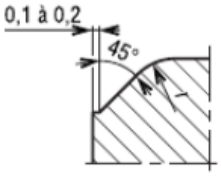


fig. 6

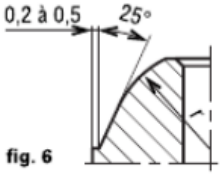
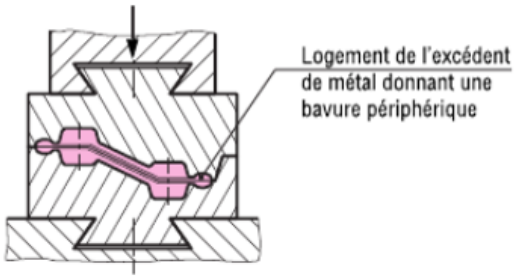


fig. 7

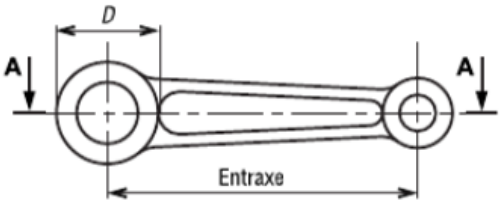
Rayons : comme pour les chanfreins, on réalise un méplat de 0,1 (fig. 6).
Le dessinateur peut exécuter des rayons tangents à la face et au cylindre au lieu et place des chanfreins (fig. 7).

D'après la Fédération des Chambres Syndicales des Minerais et des Métaux non ferreux.

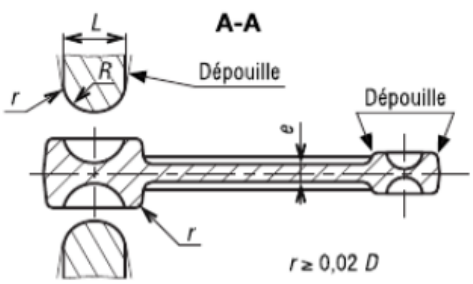
ESTAMPAGE ET MATRIÇAGE



Le **matriçage** s'applique au forgeage mécanique des métaux non ferreux.
L'**estampage** s'applique au forgeage mécanique des aciers.
Le procédé consiste à chauffer un lopin de métal à une température adaptée et à l'écraser entre deux matrices gravées conformément aux formes définitives à obtenir.



Engin	Dépouille intérieure	Dépouille extérieure
Pilon	9°	7°
Presse sans éjecteur	7°	3°
Presse avec éjecteur	3°	1°

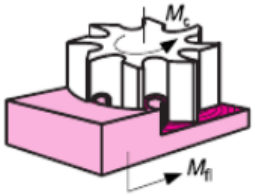


Variation de sections :
- Raccorder les différentes sections de la pièce par des congés.
- Supprimer les variations brusques de sections.

Arrondi d'arêtes : choisir $r \geqslant 0{,}02\ D$
Rayons des noyaux : $R = L$
Toile : $r = L/4$
Prendre $e = 2$ à 5 mm
Surépaisseur d'usinage :
1 à 2 mm sur chaque face usinée en sus de la dépouille.

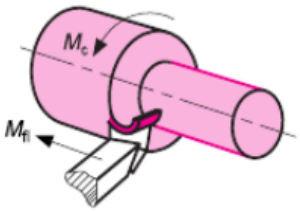
• Procédés d'usinage

Fraisage



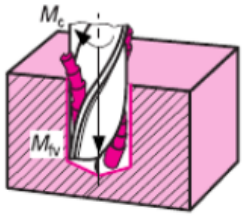
M_c : mouvement circulaire donné à l'outil.
M_{fl} : mouvement rectiligne donné à la pièce.
Autres mouvements disponibles :
M_f : transversal.
M_{fv} : vertical.

Tournage



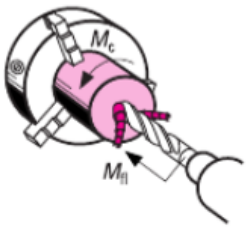
M_c : mouvement circulaire donné à la pièce.
M_{fl} : mouvement longitudinal rectiligne donné à l'outil.
Autre mouvement disponible :
M_f : transversal.

Perçage sur perceuse sensitive



M_c : mouvement circulaire donné à l'outil.
M_{fv} : mouvement vertical rectiligne donné à l'outil par l'opérateur.

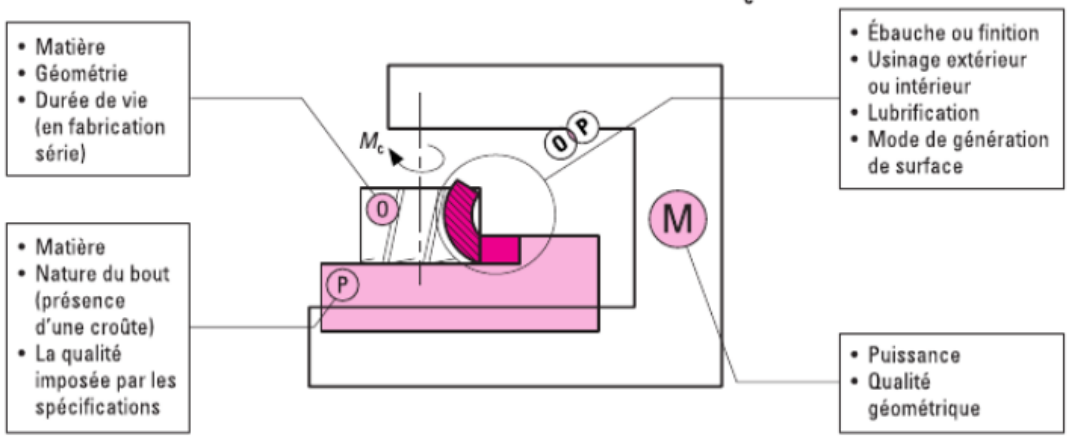
Perçage sur tour



M_c : mouvement circulaire donné à la pièce.
M_{fl} : mouvement longitudinal rectiligne donné à l'outil.

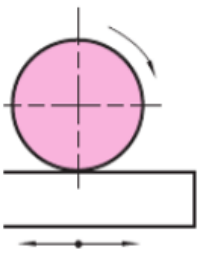
Vitesse de coupe V_c

La **vitesse de coupe V_c** constitue la grandeur cinématique de base du couple **Outil/Pièce** (O)(P). Elle est exprimée en **m/min**. De nombreux paramètres liés au système de fabrication conditionnent la détermination de V_c :

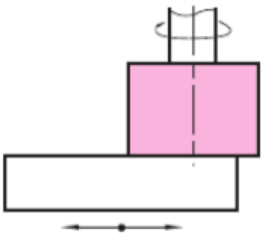


• Rectification ou usinage par abrasion

Plane

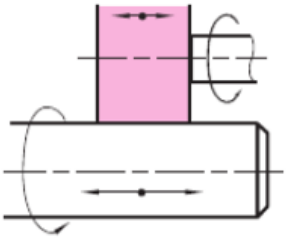


Plane

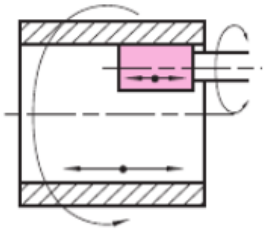


Procédé d'usinage pour l'obtention d'une **superfinition**. Cette opération est généralement précédée d'un usinage conventionnel (tournage, fraisage...).
L'outil de coupe est une meule qui permet l'usinage de matériaux très durs.

Cylindrique extérieure



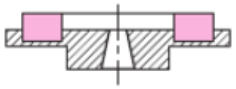
Cylindrique intérieure



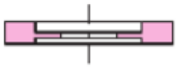
Principaux types de meules

Meule plate

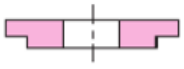
Meule lapidaire



Meule plate à deux embrèvements



Meule plate à un moyeu



Meule boisseau conique

Meule boisseau droit

PROTOTYPAGE RAPIDE

FABRICATION ADDITIVE

• **Le prototypage rapide**

Le **prototypage rapide** désigne de nombreuses techniques permettant l'obtention rapide à un stade précoce de la conception, de prototypes matériels.

Il permet à partir de la modélisation informatique qu'est la CAO, la réalisation rapide de formes en trois dimensions par couches.

Il permet très rapidement de juger l'impact esthétique, le degré de difficulté de la fabrication et du montage. Il permet de préparer l'outillage, l'emballage, le marketing...

• **Réalisation du prototype**

La réalisation du prototype nécessite quatre conditions de base :

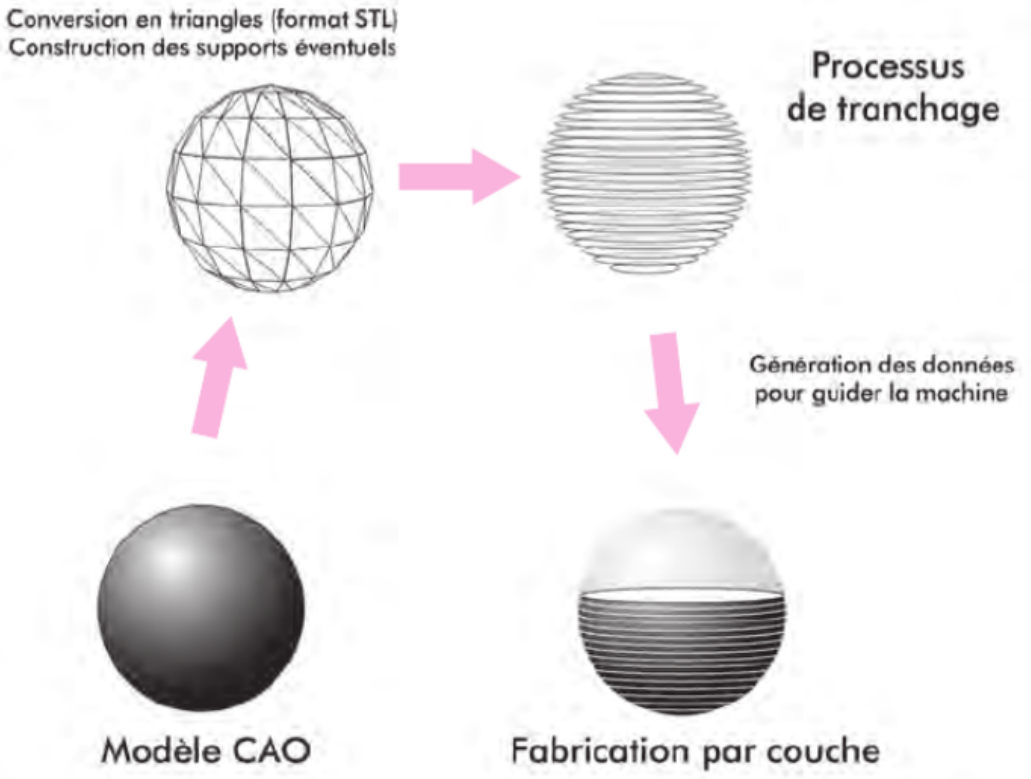
– L'obtention rapide des formes 3D doit être réalisable.

– Une modélisation CAO doit être utilisée dès le stade initial de conception.

– La chaîne informatique ne doit pas être rompue.

– La réalisation doit faire appel aux procédés de fabrication par couches (PFC).

Étapes de réalisation d'un prototype par le procédé de fabrication par couches ou **fabrication additive**.



• **Méthodes de fabrication additive**

On peut classer les procédés de fabrication additive en fonction de l'état du matériau de base :

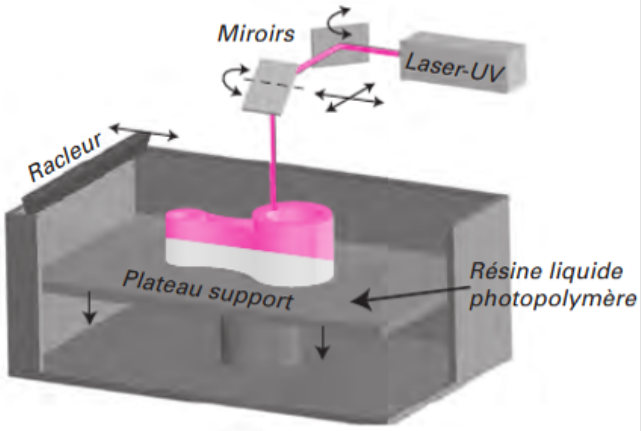
– Les procédés de fabrication par couche liquide/solide :
la polymérisation de résine point par point par laser UV : stéréolithographie (SLA)

– Les procédés de fabrication par couche solide/solide :
  • l'impression 3D par encollage de papier : *Laminated Object Manufacturing* (LOM) ;
  • la découpe : stratoconception ;
  • le dépôt de fil fondu : *Fused Deposing Modeling* (FDM).

– Les procédés de fabrication par couches poudre/solide :
  • le frittage sélectif par laser (*Selective Laser Sintering* : SLS) ;
  • le frittage laser direct de métal (DMLS) ;
  • l'agglomération de poudre par collage (3DP).

• La Stéréolithographie (SLA)

La **stéréolithographie** est un procédé qui consiste à polymériser localement une résine liquide photosensible (photopolymère) à l'aide d'une source lumineuse UV (ultra-violets).
La source lumineuse de type laser UV (hélium-cadmium, HeCd et argon ionisés, Ar+) est dirigée dans le plan XY grâce à deux miroirs galvanométriques.
Le laser UV dessine une coupe transversale couche après couche. Le rayon lumineux frappe le liquide qui se solidifie sous l'effet des rayons UV.
Le plateau immergé dans le bac est le support de la pièce solidifiée. Il descend pour passer d'une couche à la suivante (couches de 0,05 mm à 0,10 mm). Un traitement de postpolymérisation est ensuite réalisé par une exposition aux UV pour rigidifier la pièce.



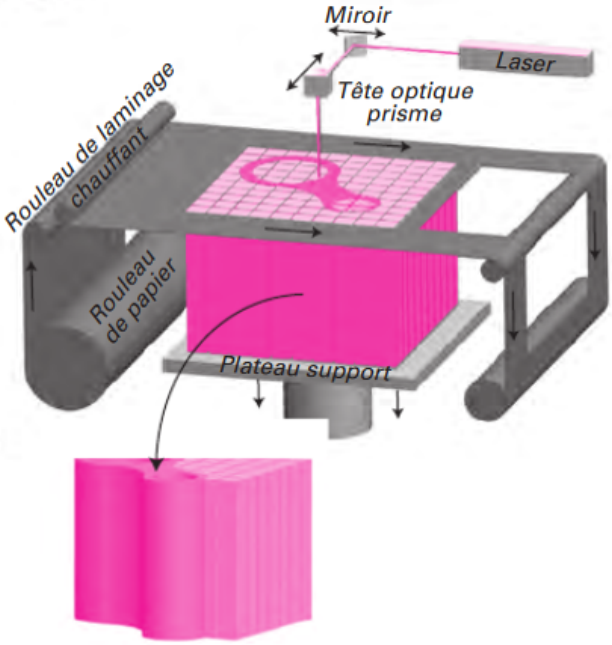
Avantages :
- Faible finition
- Bonne précision des machines
- Productivité correcte
- Prototypes de faibles dimensions
- Possibilité d'obtenir des modèles pour fonderie cire perdue.

Inconvénients :
- Machine et matériaux coûteux
- Prototypes coûteux et fragile

Photos Formlabs

• Procédé par encollage de papier (LOM)

Le **procédé LOM**, développé par la société Helisys, consiste à découper par l'intermédiaire d'un laser les différentes sections d'un objet que l'on veut créer, dans une fine couche de papier thermocollable.
Les différentes couches (0,5 à 1,5 mm) sont empilées et sont assemblées par fusion du polyester. Le laser découpe le contour de la pièce et les bords de la feuille pour former un bloc, il hachure également les zones extérieures pour faciliter l'extraction des pièces.



Avantages :
- Matériau peu coûteux.
- Prototypes de tailles moyennes.
- Bonne productivité.
- Possibilité d'obtenir des modèles et plaques modèles pour fonderie.

Inconvénients :
- Finition importante (décubage).
- Tenue des prototypes.
- Formes géométriques limitées à cause de l'extraction des parties creuses.

Photo Mcor Technologies

Procédé d'élaboration des pièces mécaniques

• La Stratoconception®

Procédé français, breveté et développé par le centre de recherche CIRTES à Saint-Dié-des-Vosges.

Le procédé consiste à décomposer la pièce en couches élémentaires 2D ou 3D appelées strates, dans lesquelles sont introduits des inserts. Les couches élémentaires sont automatiquement découpées dans un matériau en plaques à partir des procédés d'usinage avancé en 2,5 axes (microfraisage rapide ou laser).

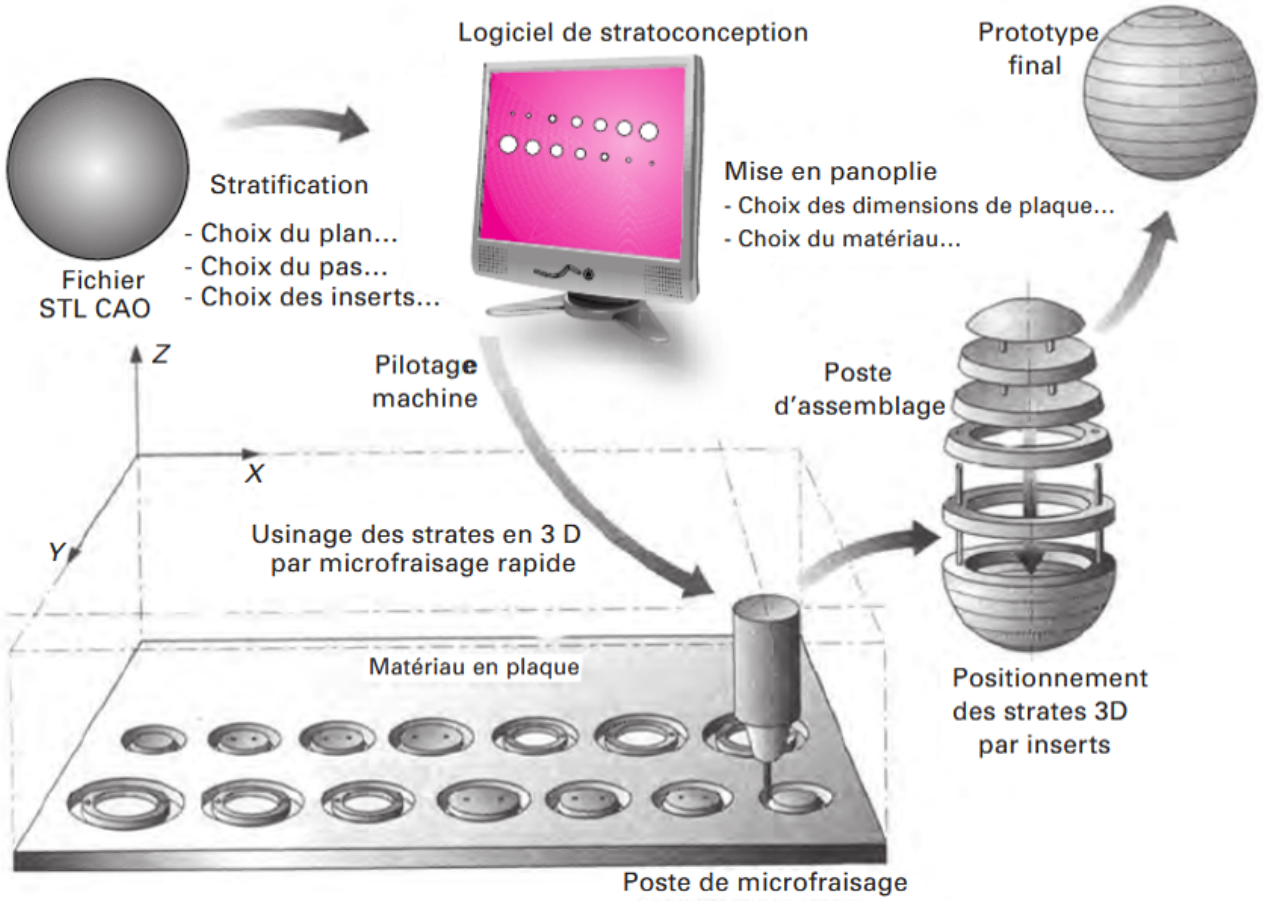
Les strates sont ensuite assemblées à l'aide des inserts pour constituer la pièce finale.

L'assemblage est pris en compte dès la décomposition de l'objet, il participe à la tenue mécanique des pièces.

Le procédé est très rapide, il est sans limitation de formes, ni de matériaux (bois, plastiques, métaux,...).

Il s'applique indifféremment aux maquettes (aspect bois ou plastique), aux prototypes technologiques, aux outillages (pour la fonderie, pour la plasturgie, pour la mise en forme) jusqu'à plusieurs mètres.

Principe du procédé de Stratoconception®



La pièce est virtuellement stratifiée en couches 3D et les strates sont mises en panoplies puis découpées. L'assemblage, prévu dès la conception, est effectué sur poste spécial par inserts et collage des feuilles découpées.

La précision est de plus ou moins 0,05 mm en X-Y.

Ce procédé breveté permet, dans la phase amont de conception, le positionnement d'inserts et de renforts dans l'objet, afin de garantir des sollicitations mécaniques et de participer à l'assemblage des couches.

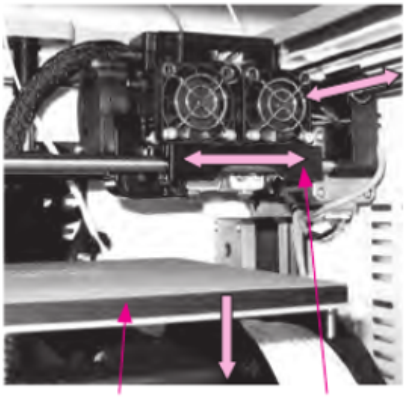
• Procédé par dépôt de filament fondu (FDM)

Procédé développé par la société Stratasys qui consiste à déposer un cordon de matériau thermofusible. C'est le procédé d'impression le plus populaire ; il est financièrement très abordable.

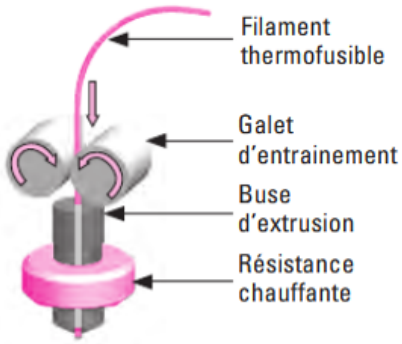
Le **procédé FDM** consiste à extruder un filament de matériau thermofusible (Ø 1,75 à 3 mm) à l'intérieur d'une buse chauffante afin de le liquéfier. La tête d'impression, support de cette buse, est pilotée suivant deux axes et un plateau mobile suivant le troisième axe ; la tête dépose le matériau par couches successives sur le plateau chauffé légèrement pour former le prototype final.

La finition dépend de l'épaisseur des couches.

Certaines imprimantes 3D FDM disposent de plusieurs têtes d'impression pouvant ainsi imprimer en différentes couleurs ou avec des matériaux différents.



MATÉRIAU	Type de plastique	Caractéristiques
PLA	Acide polylactique (amidon)	Biodégradable
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène	Résistance aux chocs, UV et HT
PETG	Polyéthylène téréphtalate	Translucide, léger, résistant
HIPS	Polystyrène d'impact	Bon rendu de finition
FLEXIBLE	Élastomère thermoplastique	Flexible, élastique
NYLON	Polyamide	Résistant, flexible, bon coefficient de frottement
PC	Polycarbonate	Résistant, résistance au feu
ASA	Terpolymère d'impact	Résistance UV et produits chimiques
SPÉCIAUX	Acide polylactique chargé (bois, métaux ...)	Résistant, résistance UV, produits chimiques et HT



Détail tête d'impression

Avantages :
- Finition moyenne

Inconvénients :
- Prototypes de petites tailles
- Matière coûteuse
- Productivité moyenne

Modèle de différentiel

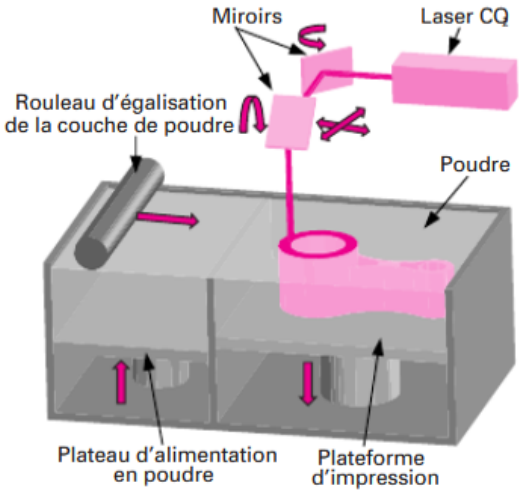
• Procédé par frittage laser de poudre (SLS)

Le **procédé SLS** consiste à réaliser le frittage local d'un matériau sous forme de poudre de plastique (PA, PA+Alu), de céramique, de verre ou de métal (Ti, Al, Co, Ag, Au, aciers etc.) en le faisant fondre sous l'action d'un laser de forte puissance.

Un bac contient la poudre et un rouleau vient déposer une fine couche (0,1 mm) sur la plateforme d'impression.

Le laser est dirigé par deux miroirs galvanométriques sur la zone à solidifier. L'opération se répète pour chaque couche.

L'enceinte est sous azote, elle est thermostatée en fonction du matériau. En général un post-traitement thermique est nécessaire pour améliorer les caractéristiques de la pièce obtenue. Les domaines d'application sont nombreux : industrie, design, bijouterie, biotechnologie, etc.



Avantages :
- Bonne précision machine.
- Bonne productivité.
- Peu de déchet (poudre non fusionnée réutilisée).
- Grande diversité de matériaux. Possibilité d'obtenir des empreintes métalliques pour outillage.
- Possibilité d'obtenir des moules ou noyaux sable, ou modèles cire perdue.

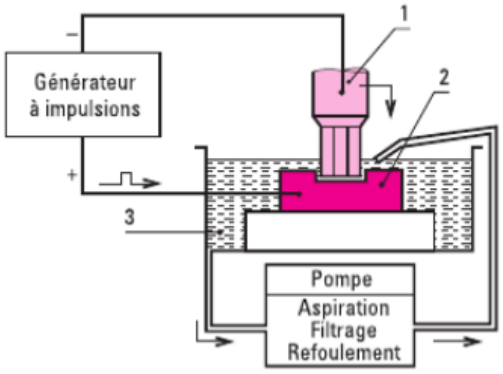
Inconvénients :
- Machines et matériaux coûteux
- Prototypes de petites tailles et coûteux
- Post traitement

Photo Additive 3D

USINAGE PAR ÉLECTRO-ÉROSION

Enfonçage par étincelage

D'après SOFETEC

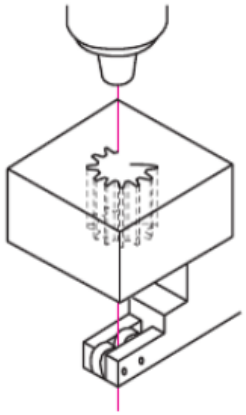


Les deux électrodes 1 et 2 sont plongées dans un liquide diélectrique 3 (fluide à haute résistivité). La pièce 2 est reliée à l'anode et l'outil 1 à la cathode.

Un générateur à impulsions fournit des décharges électriques dont la durée et la tension sont fonction du matériau de la pièce et de la précision demandée.

À chaque impulsion, la décharge électrique produite (température variant de 30 000 à 50 000°) provoque l'érosion de l'empreinte à réaliser dans la pièce.

Découpage par fil



L'**électro-érosion** permet d'usiner des métaux ou alliages durs ou réfractaires (usinage de matrices, outillages en acier trempé ou en carbure de tungstène).

L'**électro-érosion** permet de reproduire automatiquement des formes très diverses à condition qu'elles soient **démoulables**.

USINAGE PAR RAYON LASER

Principe

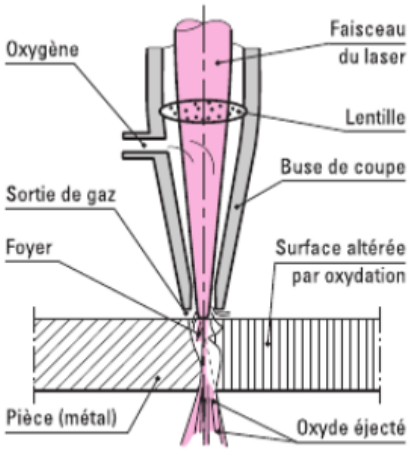
D'après INDUSTRIE ET TECHNIQUES

Le faisceau est localisé à la surface du matériau.

Au point d'impact se forme un puits capillaire dont les parois sont constituées d'un matériau (métal, plastique)...

Un gaz injecté sous pression par une buse dans la zone de découpage évacue le matériau en fusion.

70 % des applications des usinages par laser concernent le découpage des tôles métalliques, des planches en matières plastiques, en matériaux composites ou en caoutchouc.



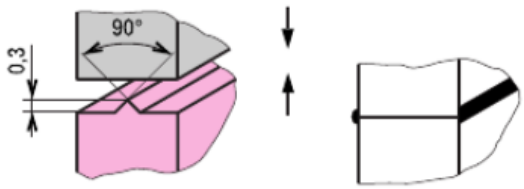
C'est une technique souple. Les formes de la pièce à découper résultent d'une programmation et non de la réalisation d'un outillage spécifique.
Elle réalise un travail de qualité. Lors du découpage, les pièces ne sont soumises à aucun effort (découpage de pièces fines et complexes sans déformations).
La découpe des pièces permet une utilisation immédiate.
Le procédé est facilement automatisable. Un calculateur peut facilement commander les mouvements de la machine. Sous réserve d'automatiser le chargement et le déchargement des pièces, il est possible de faire fonctionner, de façon autonome, un système de découpe au laser.
Du point de vue conception, la découpe au laser diminue les contraintes de formes donc donne accès à des pièces plus fonctionnelles, à des ensembles mécaniques plus performants, plus esthétiques et moins chers.
Du point de vue organisation de la production, des lancements en petites séries deviennent possibles.

SOUDAGE PAR ULTRASONS

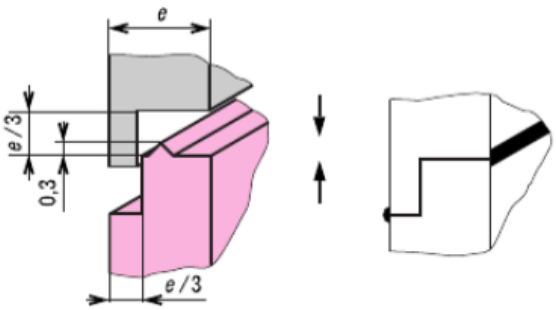
NF E 04-020

• Procédés de soudage

Joint bout à bout



Joint en escalier



Les **matières thermoplastiques** chauffées localement en dessous de la température de décomposition passent à l'**état plastique** ou à l'**état visqueux** et se solidifient à nouveau après refroidissement.

Ce sont ces propriétés qui sont utilisées pour assurer les **assemblages par soudage**.

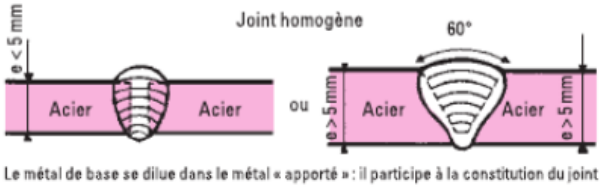
Le **soudage par ultrasons** s'applique uniquement aux **thermoplastiques**.

L'état de la matière obtenue après soudage est homogène et la résistance de la zone soudée est similaire à celles des pièces assemblées.

MÉTHODES DE SOUDAGE

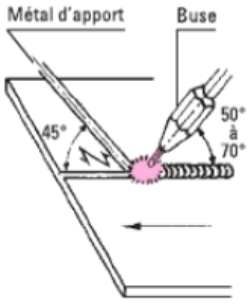
NF E 04-020

Soudage autogène



Le métal de base se dilue dans le métal « apporté » : il participe à la constitution du joint

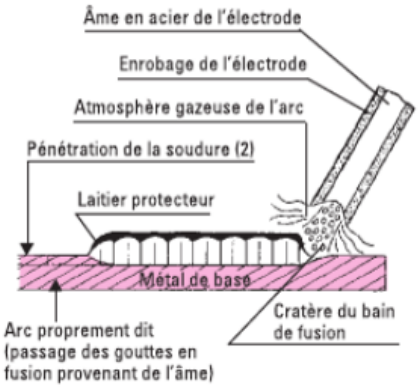
Opération de fusion localisée de deux pièces de même nature en vue d'assurer leur liaison grâce à un métal d'apport de nature presque identique à celle des pièces de base (chaudières, charpentes métalliques...).



Chalumeau oxyacétylénique

La fusion est provoquée par la chaleur dégagée par la combustion d'un mélange d'acétylène et d'oxygène.

Ce mélange est réalisé par le **chalumeau**.

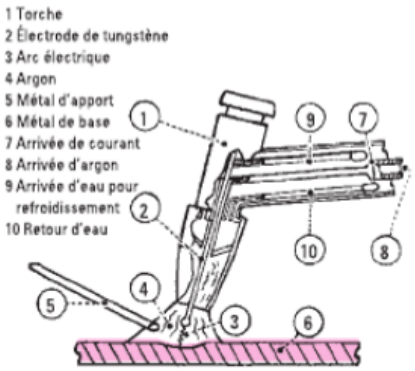


Soudage à l'arc avec électrodes enrobées

L'**âme** en acier de l'électrode conduit le courant électrique et constitue le cordon de soudure.

L'**enrobage** participe à la stabilité de l'arc et protège le cordon de soudure contre l'oxydation et apporte des éléments à la soudure (nickel, chrome, manganèse...) pour en améliorer la qualité.

Le **laitier** est éliminé après refroidissement de la soudure.

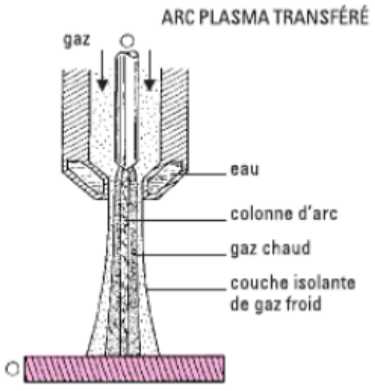


Procédé TIG (Tungstène Inert Gaz)

À l'aide d'un courant approprié dont la nature varie avec le métal de base et fourni par un poste de soudage, on fait jaillir dans un gaz inerte (argon), entre une électrode de tungstène infusible et la pièce, un arc électrique.

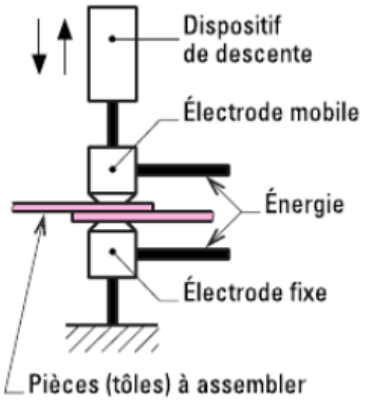
La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce et le métal d'apport, formant ainsi le joint soudé.

MÉTHODES DE SOUDAGE (suite)



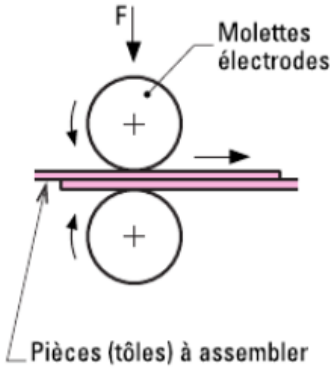
Procédé Miniplasma

Le plasma, atmosphère gazeuse ionisée (conductrice) et chaude, forme une colonne d'un arc. À travers cette colonne circule le courant électrique.
Le plasma est donc employé pour obtenir une source de chaleur très intense et très concentrée.
Ce procédé permet d'assembler dans d'excellentes conditions des tôles très minces (quelques centièmes de mm à des épaisseurs de quelques mm) grâce à l'arc très stable.
Utilisé dans l'industrie nucléaire, aéronautique et spaciale, prothèses dentaires...



Soudage par résistance par points

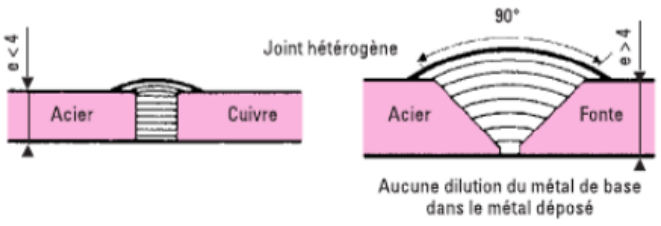
Pièces à assembler maintenues en pression entre les électrodes.
L'énergie électrique fournit la chaleur par effet Joule.
Soudure par points utilisée pour les petites et grandes séries (assemblage de carrosserie à l'aide de robots pinces).



Soudage par résistance à la molette

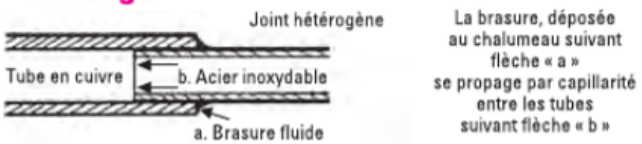
Pièces à assembler maintenues en pression entre les molettes.
L'énergie électrique fournit la chaleur par effet Joule.
Procédé permettant les assemblages plans, cylindriques...
La soudure peut être continue ou par points.

• Soudo-brasage



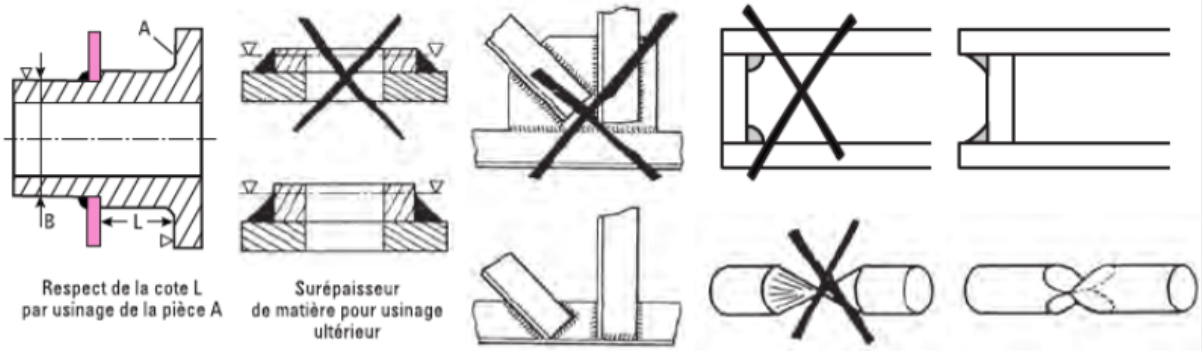
Opération de liaison de deux pièces de même nature ou de natures différentes, sans fusion, mais mouillage à l'aide d'un métal d'apport de soudo-brasage ayant une température de fusion inférieure à celle des deux pièces de base (soudure appelée aussi à basse température).

• Brasage



Opération identique au soudo-brasage mais avec une température encore inférieure et avec des produits fluides à l'état liquide (brasure d'argent, soudure à l'étain).

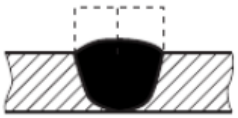
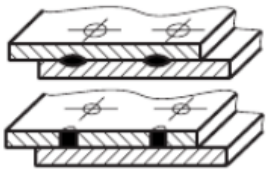
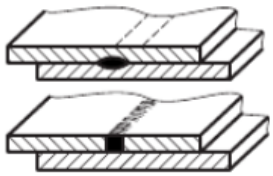
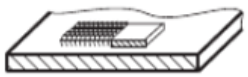
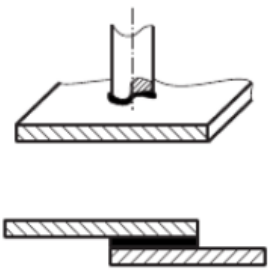
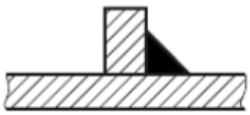
• Conseils pour réaliser une construction soudée



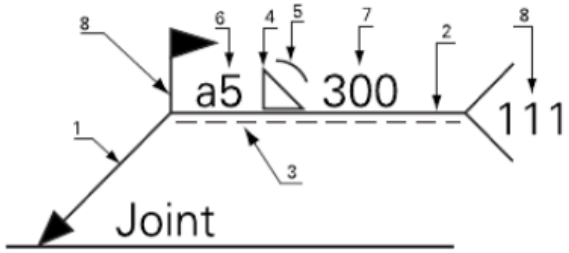
SYMBOLES ÉLÉMENTAIRES

• Représentation et symboles élémentaires

NF EN 22-553 ISO 2553

Désignation	Représentation simplifiée	Symbole	Désignation	Représentation simplifiée	Symbole
Soudure sur bords relevés complètement fondus			Soudure par points		
Soudure sur bords droits			Soudure en ligne continue avec recouvrement		
Soudure en V			Soudure en V à flancs droits		
Soudure en demi-V			Soudure en demi-V à flancs droits		
Soudure en Y			Soudure sur chant		
Soudure en demi-Y			Soudure par rechargement		
Soudure en U (ou en tulipe)			Assemblage de surface		
Soudure en demi-U					
Reprise à l'envers					
Soudure d'angle			Assemblage oblique		

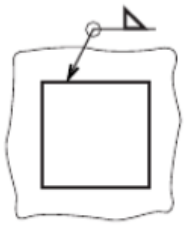
• Position du symbole sur le dessin



1 : ligne de repère.
2 : ligne de référence.
3 : ligne d'identification.
4 : symbole de soudure.
5 : symbole supplémentaire.
6 : cotes principales relatives à la section transversale du cordon de soudure.
7 : cotes relatives aux dimensions longitudinales du cordon de soudure.
8 : indications complémentaires.

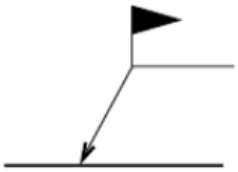
INDICATIONS ET PROCÉDÉS DE SOUDAGE

Soudures périphériques



Lorsque la soudure doit être exécutée sur le pourtour d'une pièce, l'indiquer en traçant un cercle comme indiqué.

Soudures faites sur chantier



Lorsque la soudure doit être exécutée sur chantier, ajouter un drapeau comme indiqué.

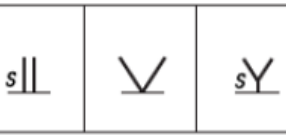
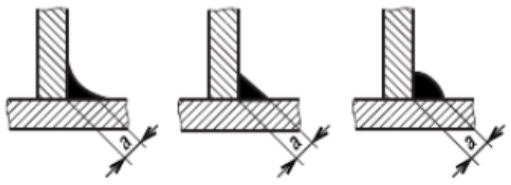
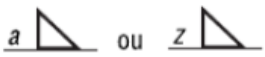
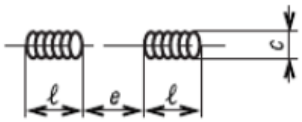
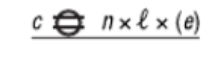
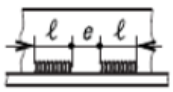
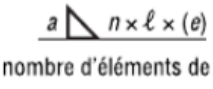
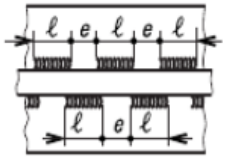
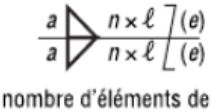
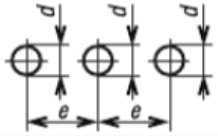
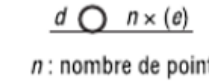
Indication du procédé de soudage

Lorsqu'il est nécessaire de préciser le procédé de soudage, le nombre qui indique le procédé est inscrit entre deux branches d'une fourche terminant la ligne de référence.

Exemples d'indications de procédés de soudage (Extrait ISO 4063)

1	Soudage électrique à l'arc ; soudage à l'arc	2	Soudage par résistance	31	Soudage oxygaz
11	Soudage à l'arc avec électrode fusible sans protection gazeuse	21	Soudage par points (par résistance)	311	Soudage oxyacétylénique
		3	Soudage aux gaz	9	Brasage

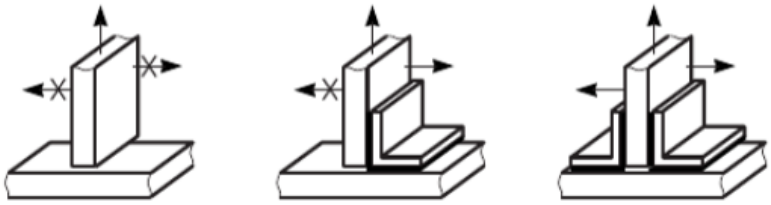
COTATION DES SOUDURES

Désignation	Représentation	Inscription
Soudure sur bords relevés complètement pénétrée		
Soudures bout à bout		
Soudure d'angle continue		
Soudure en ligne		 n : nombre d'éléments de soudure
Soudure d'angle discontinue		 n : nombre d'éléments de soudure
Soudure d'angle à éléments alternés		 n : nombre d'éléments de soudure
Soudure par points		 n : nombre de points

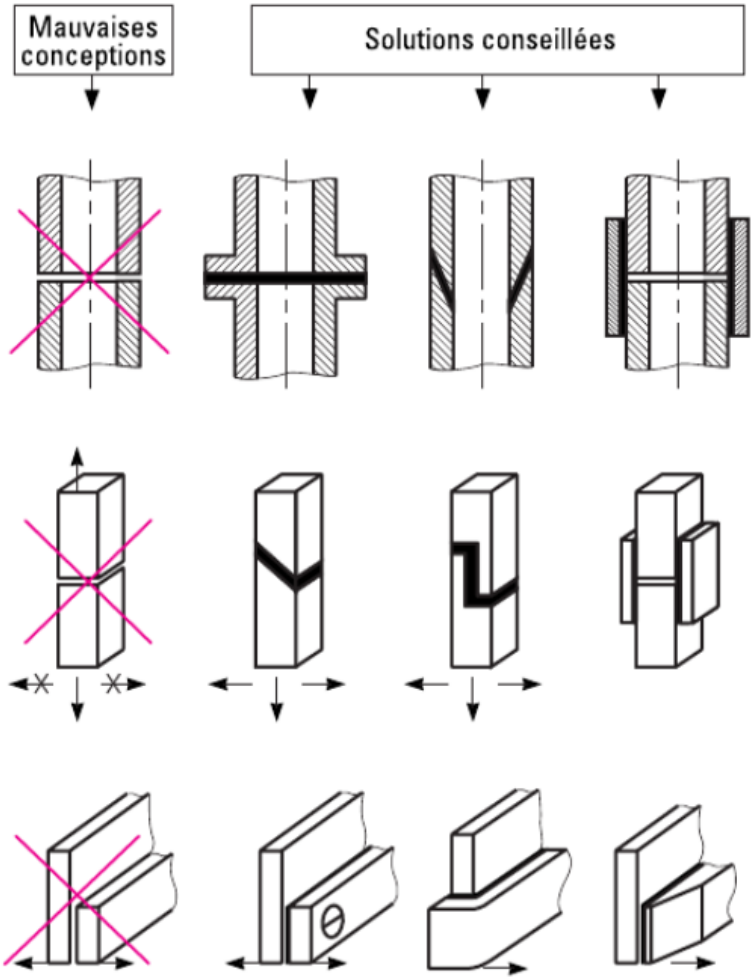
• Limites du collage

Paramètres	Limites			Représentation
Température	θ (°C)	– 60 à	+ 250	
Contrainte normale en traction	σ (N/mm²)	à 20 °C	40	
Contrainte tangentielle en cisaillement	τ (N/mm²)		35	
Contrainte normale en compression	σ (N/mm²)		450	
Pelage	R pelage (N/mm)	à 20 °C	10	

• Exemples d'assemblages en fonction des sollicitations

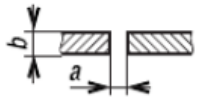


Les différents types d'assemblages classiques ne conviennent pas toujours pour assurer une liaison collage, aussi quelques géométries conseillées sont proposées ci-contre.

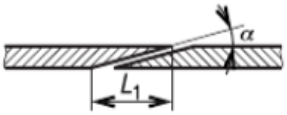


Calculs des joints (exemples)

Bout à bout
$S = a \cdot b$



S = surface de collage
a = épaisseur du substrat
b = largeur du substrat

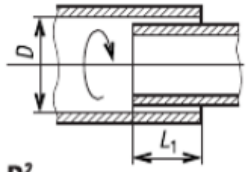


Biseautage $S = \frac{L1 \cdot b}{\cos \alpha}$

L_1 = longueur du recouvrement
α = angle de biseautage

Simple recouvrement
$S = L_1 \cdot b$

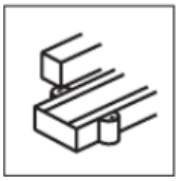
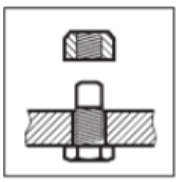
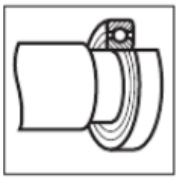
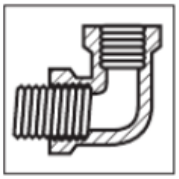
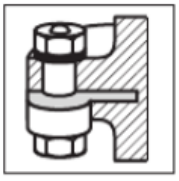
Emmanchement
$S = \pi \cdot D \cdot L_1$



Torsion
$Mt = \frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot L_1$

LE COLLAGE (suite)

• Principales colles et leurs utilisations

Familles de produits	Références	Caractéristiques principales	Types d'applications
Le collage instantané Jeu : < 0,2 mm. Temps de prise : 2 à 6 s. Traction cisaillement : 14 à 30 MPa. Temp. de pointe : – 50 à + 120 °C. Adhésifs cyanocrylates monocomposants polymérisant par l'humidité présente sur les surfaces.	PRISM 401 PRISM 405 PRISM 454 PRISM 460 PRISM 480	Multi-usages, matériaux poreux. Métaux traités ou non. Multi-usages gel. Odeur et trace faibles. Grande résilience.	Tissu pour abat-jour. Bilame de thermostat. Huisserie ameublement. Stylos, sigles, façonnages. Membrane de haut-parleur.
 **Le collage rigide** Jeu : 0,05 à 3 mm. Temps de prise : 0,5 à 3 min. Traction cisaillement : 12 à 30 MPa. Temp. de pointe : – 50 à + 150 °C. Adhésifs anaérobies durcissant en absence d'air (317-326), acryliques (329-330), époxy 1/1 (EPS).	Loctite 317 Loctite 326 Multibond 329 Multibond 330 Poxycomet EP 5 Système PLX	Multi-usages. Ferrites, céramiques. Tolérant aux surfaces grasses. Résistant au pelage. Jeux importants, remplissage.	Charnière de porte en verre. Moteur de lave-glace. Armoire métallique. Raidisseurs de cloison. Bijouterie.
Le collage souple Jeu : 0,05 à 10 mm. Temps de prise : 5 min à 3 heures. Traction cisaillement : 1 à 3,5 MPa. Temp. de pointe : – 55 à + 300 °C. Élastomère silicone et polyuréthane vulcanisant par l'humidité ou grâce à un accélérateur.	Silicomet AS 310 Silicomet AS 318 Silicomet AS 320 Silicomet AX 330 Flexcomet PU 60 Système PLX	Multi-usages. Neutre, non corrosif. Neutre, auto-adhérent. Prise rapide, système activé. Jeux importants, potting.	Aquarium. Optique de phare. Four à micro-onde électronique. Réservoir de fer à repasser. Sertis de tôles.
Le collage U.V. Jeu : 0,05 à 3 mm. Temps de prise : 1 à 60 s. Traction cisaillement : 3 à 30 MPa. Temp. de pointe : – 50 à + 150 °C. Résines acryliques anaérobies polymérisant sous l'effet des rayons ultraviolets.	Loctite 350 Loctite 302 Loctite 360 Loctite 369 Loctite 372	Multi-usages. Spécial plastique. Montage de composants de surface. Marquage, inviolabilité. Revêtement, protection.	Flacon de parfum. Aiguille hypodermique. Composants électroniques. Vis de réglage. Boucle de ceinture.
 **Le freinage** Jeu : < 0,5 mm. Temps de prise : 10 à 30 min. Traction cisaillement : 3 à 24 MPa. Temp. de pointe : – 50 à + 150 °C. Résines anaérobies durcissant en absence d'air et en présence de métal.	Freinfilet 222 Freinfilet 243 Freinfilet 270	Résistance faible. Résistance normale. Résistance forte.	Visserie. Boulonnerie. Goujons.
 **La fixation** Jeu : < 0,25 mm. Temps de prise : 5 à 10 min. Traction cisaillement : 18 à 40 MPa. Temp. de pointe : – 50 à + 180 °C. Résines anaérobies durcissant en absence d'air et en présence de métal.	Scelroulement 603 Blocpresse 638 Blocpresse 648 Quickmétal 660	Tolérant aux surfaces grasses. Très forte résistance. Forte résistance. Gel thyxo.	Roulements, bagues. Pignons, axes. Frettes. Clavettes, cannelures.
 **L'étanchéité filetée** Jeu : < 1 mm. Temps de prise : 15 à 45 min. Traction cisaillement : 3 à 7,5 MPa. Temp. de pointe : – 65 à + 225 °C. Résines anaérobies durcissant en absence d'air et en présence de métal (542-572-577), élastomère silicone vulcanisant par l'humidité (JS 533).	Colorétanche 542 Colorétanche 572 Tubétanche 577 Silicomet JS 533	Pressions élevées. Faible résistance. Multi-usages. Spécial plastique.	Asservissement capteur. Bouchons, pas fins et gros diamètre. Canalisation, tubes. Raccords.
 **L'étanchéité plane** Jeu : < 3 mm. Temps de prise : 20 à 45 min. Traction cisaillement : 2 à 15 MPa. Temp. de pointe : – 65 à + 225 °C. Résines anaérobies durcissant en absence d'air et en présence de métal (510-518), élastomère silicone vulcanisant par l'humidité ou grâce à un accélérateur (5554-JX530).	Masterjoint 510 Unijoint 518 Silicone JS 545 Silicone JX 530	Rigide. Semi-flexible. Souple. Souple accélérable.	Brides. Carters. Couvercles. Portes de visite.

Doc. HENKEL-LOCTITE

4.3.1. TRAITEMENTS DES MATÉRIAUX

	Désignation	Métal support	Apport	Épaisseur revêtement	Dureté Vickers	Propriétés Domaines d'application
Traitements thermiques	Trempe superficielle	Aciers non ou faiblement alliés.	–	0,5 mm à 5 mm	Variable suivant acier	Grande dureté superficielle. Faibles déformations. (Pièces de frottement, dents d'engrenages...)
	Revenu	Aciers non ou faiblement alliés.	–	–	Variable suivant acier	Amène les caractéristiques mécaniques à un niveau souhaité après la trempe.
	Recuit	Acier ou fonte de coulée.	–	–	–	Fait disparaître les états hors équilibre provenant des traitements antérieurs. Chauffage de la pièce et refroidissement lent.
Traitements thermo-chimiques	Cémentation	Acier à faible % de carbone (0,2 % maxi.).	Carbone ou carbure de fer	0,5 à 1 mm	800	Dureté superficielle augmentée. (Pièces d'usure : cames, galets...)
	Nitruration	Aciers alliés ou fontes GL.	Azote Nitrure de fer (Fe4N)	0,1 à 0,5 mm	600 à 1 200	Augmente la résistance à l'usure et à la corrosion. (Pignons, broches de machines-outils...)
	Chromisation	Acier à faible % de carbone.	Chrome	25 µm à 500 µm	1 000 à 1 600	Inoxydables, réfractions, bonne résistance au frottement. (Outils, fraises à dents, moules...)
Revêtements métalliques par voie électrolytique	Chromage	Métaux ferreux. Aluminium et ses alliages. Zinc et ses alliages.	Chrome	0,05 mm à 0,5 mm	500 à 1 000	Bonne résistance au frottement. Esthétique. (Cycles, moules, machines, automobiles...)
	Nickelage		Nickel	2 µm à 25 µm	180 à 450	Protection contre l'oxydation et les agents chimiques. (Industrie chimique, alimentaire.)
	Cuivrage		Cuivre	5 µm à 25 µm	50 à 100	Permet les dépôts de nickel ou chrome sur les aciers. (Industrie électronique...)
	Zinguage		Zinc	5 µm à 25 µm	70 à 240	Protection contre la corrosion atmosphérique. (Tôles, fils, tubes et profilés...)
	Dépôt d'or ou d'argent	Métaux ferreux. Alliages cuivre. Plastiques.	Or ou argent	0,2 µm à 33 µm	25 à 80	Industrie électronique, contacts, composants. Objets d'art. Matières plastiques. Nécessité d'une métallisation préalable.
Traitements chimiques	Phosphatation	Métaux ferreux. Fontes.	Acide phosphorique	10 µm à 20 µm		Trempage dans un bain de sel. Utilisé en sous-couche à une peinture. Bonne résistance au frottement.
	Chromation	Zinc. Cuivre. Argent. Cadmium. Aluminium.	Chrome hexavalent	50 µm		Améliore la résistance à la corrosion et à l'usure. Adhérence des peintures. Collage métal/métal.
	Anodisation électrochimique	Aluminium et ses alliages		10 µm à 50 µm	500 à 600	Résistance à la corrosion. Isolation électrique. Durcissement superficiel. (Pièces d'usure, décoration...)
Revêtements – Peinture	Pistolet. Au trempé. Électrophorèse	Tous supports conducteurs de l'électricité.		10 µm à 20 µm suivant les techniques	600 à 1 200	Résistance à la corrosion (automobiles, cycles, électroménager...). Isolation. Esthétique. Décoration.
Revêtements – Thermo-plastique	Polyamides	Métaux ferreux. Aluminium et ses alliages. Verres.		80 µm à 600 µm		Protection contre la corrosion atmosphérique. Isolement électrique. Insonorisation. Décoration.
	PVC* Thermo-plastiques			200 µm à 300 µm		Isolation des conducteurs électriques. Esthétique. Décoration. Protection contre la corrosion chimique.

* PVC : polychlorure de vinyle.

4.3.2. LES FONTES

• Désignation et Propriétés (à partir des données du CIFOM)

Nuances		Normes	Propriétés recherchées	Principaux emplois
Fontes non alliées		**NF EN 1560**		
À graphite lamellaire	Type « Album »		Excellente coulabilité Bel aspect, bonne rigidité.	**Pièces minces de grandes dimensions :** baignoires, balcons, grilles, radiateurs, trémies...
	EN-GJL-150 EN-GJL-200		Très bonne usinabilité. Bonne étanchéité, bonne résistance à l'usure par frottement.	**Mécanique générale, machines agricoles, travaux publics :** bagues, boîtiers, brides, bâtis, berceaux, marbres, poulies, roues... **Automobiles, compresseurs, moteur, tracteur :** blocs-cylindres, boîtes de vitesses, corps divers, culasses de moteurs, cylindres divers, freins, pistons, poulies, turbines, variateurs. **Machines-outils, matériel hydraulique et pneumatique :** bâtis, chemises de moteurs, corps, couronnes dentées, distributeurs hydrauliques, engrenages, mandrins de tours, pignons, poulies, volants.
	EN-GJL-250 EN-GJL-300		Très bonne usinabilité. Bonne résistance à l'usure par frottement.	
	EN-GJL-350 EN-GJL-400		Bonnes caractéristiques mécaniques. Bonne résistance à l'usure par frottement.	
Malléables	EN-GJMW-350-10 EN-GJMW-400-7 EN-GJMB-350-10 EN-GJMB-450-6		Caractéristiques mécaniques élevées, très grande ductilité. Perméabilité magnétique élevée, grande résilience. Excellente usinabilité. Bonne capacité d'amortissement des vibrations.	**Automobiles, cycles, machinisme agricole, matériel de travaux publics, quincaillerie :** bielles, boîtes de ponts, boîtiers, brides, carters, chaînes, clés diverses, écrous à oreilles, fourchettes de renvoi, leviers, mâchoires de freins, manivelles, moyeux de roues, outillage à main, pédales, pignons, poignées, poulies, raccords de chauffage, trompettes de ponts, volants...
	EN-GJMB-550-4 EN-GJMB-630-3 EN-GJMB-700-2		Caractéristiques mécaniques très élevées. Bonne résistance à l'usure. Faible coefficient de frottement.	
À graphite sphéroïdal	EN-GJS-350-22 à EN-GJS-450-10 EN-GJS-500-7 EN-GJS-600-3		Caractéristiques mécaniques élevées, très grande ductilité. Perméabilité magnétique élevée, grande résilience. Excellente usinabilité. Bonne capacité d'amortissement des vibrations.	**Automobiles, machinisme agricole, machines-outils, matériel hydraulique :** arbres à cames, bielles, blocs-moteurs, boîtes de machines-outils, carters, corps divers, disques de freins, distributeurs hydrauliques H.P., engrenages, fourchettes, mâchoires de freins, mandrins de machines-outils, matrices d'emboutissage, moyeux de roues de camions, pignons, segments de freins, tambours, tuyaux, vilebrequins, pivots de freins...
	EN-GJS-700-2 à EN-GJS-900-2		Caractéristiques mécaniques très élevées. Bonne résistance à l'usure.	
Blanches	EN-GJN (FBO) EN-GJN (FBA)		Résistance à l'usure par érosion et par abrasion, même à chaud et par frottement sous forte pression.	**Briqueterie, cimenterie, sidérurgie :** arbres à cames, blindages divers, boulets de broyeurs, buses de sablage, cames, cylindres d'imprimerie, de laminoirs, disques de broyeurs, filières, galets...
Fontes alliées		**NFA***	Amagnétique. Très bonne résistance à la chaleur et à la corrosion dans de nombreux milieux très agressifs. Bonne résilience à très basse température. Résistivité électrique élevée. Coefficient de dilatation très haut ou très bas, suivant nuance.	**Construction navale, industrie alimentaire, industrie pétrolière, matériel frigorifique, moteurs :** collecteurs de diesel, condenseurs, conduites de vapeur, culasses de diesel, dragueurs de mines, électro-aimants, grilles de foyers et chaudières, hachoirs à viande, hélices marines, moules de verrerie, plaques chauffantes, pompes, pompes pour liquides corrosifs et gaz liquéfiés, segments de pistons, tambours de treuils, turbines à vapeurs, turbo-compresseurs.
Austénitiques	S-NM 13 7 à S-NC 35 3	NF A 32-301		
	L-NM 13 7 à L-N 35			
Blanches	FB Ni 4 Cr 2 à FB Cr 26 Mo Ni	NF A 32-401	Excellente résistance à l'abrasion, même aux températures élevées.	**Cimenterie, mines, sidérurgie, travaux publics :** bandages de meules, becs de godets, blindages divers, boulets de broyeurs, cames, cylindres de concasseurs et broyeurs, cylindres de laminoirs...
			Très bonne résistance à l'abrasion et bonne résistance à l'oxydation à chaud.	**Fours, métallurgie, papeterie :** barreaux de grilles, buses de sableuse et de grenailleuse, cylindres pour l'étirage des tubes, filières, galets de roulement, godets de drague, pales de ventilateur, éléments de pompe.

* Ancienne désignation en vigueur

4.3.3. LES ACIERS

• Désignation symbolique des aciers

Aciers désignés à partir de leur emploi et leurs caractéristiques mécaniques ou physiques

Aciers de construction* (y compris les aciers à grains fins)

S 235 — Le symbole **S** est suivi d'un nombre égal à la valeur minimale de la limite élastique en MPa.

Aciers de construction mécanique*

E 335 — Le symbole **E** est suivi d'un nombre égal à la valeur minimale de la limite élastique en MPa.

Symboles	Caractéristiques et utilisations
B	Aciers à béton
D	Produits plats pour formage à froid
H	Produits plats laminés à froid en acier à haute résistance pour emboutissage à froid
L	Aciers pour tubes de conduite
M	Aciers magnétiques
P	Appareils soumis à la pression (bouteilles de gaz, chaudières…)
R	Aciers pour ou sous la forme de rails
T	Fer noir, fer blanc, fer chrome
Y	Acier pour béton précontraint

• Exemples de désignations

Nuances	Ancienne désignation	Re (MPa)	R (MPa)	Utilisations
S 185	A 33	185	300	Constructions métalliques en tôle pour pliage à froid
S 235	E 24	235	340	
S 275	E 28	275	400	
S 355	E 36	355	500	
E 295	A 50	295	470	Poutrelles métalliques Profilés obtenus par laminage à chaud
E 335	A 60	335	600	
E 360	A 70	360	700	

• Aciers non alliés * (sauf les aciers de décolletage)

La teneur moyenne en manganèse est inférieure à 1 %.

C 30 — Le symbole **C** est suivi d'un nombre égal au centuple de la teneur moyenne en pourcentage de carbone (**30** ⇒ 0,30 % de carbone).

Nuances	Ancienne désignation	Re (MPa)	R (MPa)	A %	Utilisations
C 22	XC 18	250	400	20	Petits axes, cames
C 25	XC 25	290	460	19	
C 30	–	320	500	17	Visserie traitée Aciers pour traitements thermiques
C 35	XC 38	340	570	16	
C 40	XC 42	360	630	15	
C 45	XC 48	370	660	14	
C 55	–	420	730	12	Pièces résistantes à l'usure Ressorts
C 60	XC 60	440	800	10	

* Les désignations sont précédées de la lettre **G** lorsque l'acier est spécifié sous forme d'une pièce moulée : **GS 235, GE 335.**

• Aciers faiblement alliés (la teneur de l'élément principal d'addition est < 5 %)

20 Mn Cr 5

20 : centuple de la teneur moyenne en pourcentage de carbone.
Mn Cr : symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre décroissant de leur teneur.
5 : teneur des éléments d'addition dans l'ordre décroissant. Ces teneurs sont multipliées par un coefficient ci-dessous.

Teneur multipliée par **4** pour **Cr**, **Co**, **Mn**, **Ni**, **Si** et **W**.
Teneur multipliée par **10** pour les autres sauf :
– par **100** pour **Ce**, **N**, **P** et **S** ;
– par **1 000** pour **B**.

Nuances*		Re (MPa)	R (MPa)	A %	Utilisations
NF EN 10027	NF A 35-501				
16 Mn Cr 5	16 MC 5	800	1 000	17	Engrenages
20 Mn Cr 5	20 MC 5	600	900	17	
25 Cr Mo 4	25 CD 4	600	890	13	
42 Cr Mo 4	42 CD 4	850	1 100	9	Boulonnerie haute résistance Organes de transmission Éléments de sécurité
50 Cr V 4	–	800	1 000	12	
20 Ni Cr 6	20 NC 6	600	900	14	
55 Si 7	55 S 7	750	1 000	10	Aciers à ressort
45 Si Cr Mo 6	45 SCD 6	870	1 100	9	
30 Cr Ni Mo 8	30 CND 8	900	1 150	11	Arbres

• Aciers fortement alliés (l'un, au moins, des éléments d'addition a une teneur supérieure à 5 %)

X 6 Cr Ni 18-9

X : précise qu'il s'agit d'un acier fortement allié.
6 : centuple de la teneur moyenne en pourcentage de carbone.
Cr Ni : symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre décroissant de leur teneur.
18-9 : teneurs, séparées par un trait d'union, des éléments d'addition dans le même ordre.

Nuances*		Re (MPa)	R (MPa)	A %	Utilisations
NF EN 10027	NF A 35-501				
X 8 Cr 13	Z 8 Cr 13	220	–	–	Décoration intérieure Cuves alimentaires Coutellerie
X 8 Cr 17	–	250	450	18	
X 12 Cr 13	–	440	–	–	
X 30 Cr 30	Z 30 C 30	650	940	10	
X 4 Cr Ni Mo 16-4-1	Z 7 CND 16-4	–	–	–	
X 2 Cr Ni 18-10	Z 3 CN 18-10	175	540	45	Alimentation Orfèvrerie
X 6 Cr Ni 18-9	–	200	590	45	
X 6 Cr Ni Ti 18-10	Z 6 CNT 18-10	210	600	40	
X 6 Cr Ni Mo 17-11	Z 6 CNDT 17-11	190	600	45	

• Aciers rapides

H S 2-9-1-8

H S : précise qu'il s'agit d'un acier rapide.
2-9-1-8 : les quatre nombres, séparés par des traits d'union, indiquent les valeurs des éléments d'addition dans l'ordre : **W**, **Mo**, **V** et **Co**.

* Dans certains cas, la correspondance entre la nouvelle et l'ancienne n'est qu'approchée.

• Aluminium moulé non allié

A 7

A : représente le symbole abrégé de l'aluminium.
7 : indique l'indice de pureté chimique qui croît avec la pureté.
A7 : aluminium à 99,7 % de pureté.

• Alliage d'aluminium moulé

Al Cu4 Mg

Al : représente le symbole chimique abrégé de l'aluminium.
Cu4 Mg : précise les principaux éléments d'addition (symboles chimiques) respectivement suivis de leur teneur centésimale.

• Aluminium et alliages d'aluminium corroyés*

EN AW 2017

EN : préfixe.
A : symbole abrégé de l'aluminium.
W : définition des produits corroyés.
2017 : composition chimique.
[Al Cu 4 Mg Si] : désignation chimique facultative placée entre [ ] indiquant la teneur nominale de l'élément considéré.

• Aluminium

Nuances	État**	Re (MPa)	R (MPa)	A %	Utilisations
A 5	Y 30	75	120	40	Appareils ménagers
A 8	Y 30	80	95	40	Industrie chimique et alimentaire
EN AW 1050 [Al 99,5]	H 14	105	115	11	Emboutissage
EN AW 1100	0	–	90	35	Chaudronnerie, tuyauterie Ustensiles de cuisine
EN AW 1200	H 14	105	125	10	

• Alliages d'aluminium

Nuances	État**	Re (MPa)	R (MPa)	A %	Utilisations
Al Cu4 Mi Ti	Y 24	160	230	0,5	Aéronautique, automobile
Al Cu5 Mg Ti	Y 34	250	400	19	
Al Si7 Mg	Y 20	90	170	4	Cycle, marine, pièces mécaniques
Al Si2 Mg Ti	Y 33	180	290	10	
Al Si13	Y 30	95	195	9	Pièces soudées
Al Mg6 Be	Y 30	120	220	9	
EN AW 2014 [Al Cu]	T 4	280	420	18	Armement
EN AW 2014 [Al Cu]	T 6	420	480	12	
EN AW 2017 [Al Cu 4 Mg Si]	T 6	390	440	8,5	Aéronautique. Mécanique générale
EN AW 3003 [Al Mn]	0	–	115	38	Radiateur automobile
EN AW 5086 [Al Mg]	0	135	278	25	Construction navale
EN AW 6061 [Al Mg Si]	T 6	270	305	13	Transports. Menuiserie
EN AW 7075 [Al Zn]	T 6	495	565	11	Articles de sport

* Désignation numérique : étirés, filés, forgés ou laminés.
** Concernant les significations « **état** » consulter la norme **NF A 02**.

Signification du chiffre dans la colonne « mille » :
– la série 1000 concerne des alliages dont le titre en aluminium est supérieur à 99 % ;
– la série 2000 est caractérisée par la présence de cuivre comme élément principal d'addition ;
– la série 3000 est caractérisée par la présence du manganèse comme élément principal d'addition ;
– la série 5000 est caractérisée par la présence de magnésium comme élément principal d'addition ;
– la série 6000 est caractérisée par la présence de magnésium associé au silicium comme principaux éléments d'addition ;
– la série 7000 est caractérisée par la présence de zinc comme principal élément d'addition.

4.3.5. LE CUIVRE ET SES ALLIAGES

• Cuivre affiné non allié

Cu-ETP

Cu : symbole chimique du cuivre.
ETP : séparé du **Cu** par un tiret, définit le type de cuivre.

• Cuivre allié

Cu Sn 8 P

Cu : symbole chimique du cuivre.
Sn 8 P : précise les principaux éléments d'addition (symbole chimique) respectivement suivis de leur teneur.
Ils sont rangés par ordre décroissant.

Types de cuivres affinés

ETP	Affiné électrolytiquement, non désoxydé, à conductivité garantie.
FRHC	Affiné thermiquement, non désoxydé, à conductivité garantie.
FRTP	Affiné thermiquement, à conductivité non garantie.
DHP	Affiné thermiquement ou électrolytiquement, phosphore résiduel fort.
DLP	Affiné thermiquement ou électrolytiquement, phosphore résiduel faible.
OF	Désoxydé.
OFE	Exempt d'oxygène, de haute pureté.

• Cuivre

Nuances	État*	Re (MPa)	R (MPa)	A %	Utilisations
Cu-ETP	0		200	30	Câbles, bobinages électriques Contacts électriques
Cu-FHRC	0	70	230	20	

• Alliages de cuivre

Nuances	État	Re (MPa)	R (MPa)	A %	Utilisations	
Cu Zn 20	H 12	140	280	28	Décolletage	Laitons
Cu Zn 40	Y 30	–	340	8	Robinet. Pompe	
Cu Zn 38 Pb 2	H 14	100	160	6	Décolletage dans barres creuses	
Cu Zn 23 Al 4	Y 20	250	500	8	Industries chimiques	
Cu Sn 8 P	0	220	450	35	Bagues. Douilles	Bronzes
Cu Sn 7 Pb 6 Zn 4	Y 30	100	220	12	Robinetterie	
Cu Sn 12 Zn 1 P	H 14	–	200	–	Pignons et roues d'engrenages	
Cu Be 2	Y 23	800	1 000	2	Ressorts	
Cu Ni 10 Fe 1 Mn	Y 20	120	280	20	Construction navale	
Cu Al 9	Y 30	200	500	20	Quincaillerie. Robinetterie Constructions navales Industrie chimique	
Cu Al 9 Ni 3 Fe 2	Y 30	250	650	20		
Cu Al 12 Fe 5 Ni 5	Y 20	400	750	7		

* Concernant la signification « **état** », consulter la norme **NF A 02**.

4.3.6. LES MATIÈRES PLASTIQUES

Les matières **thermoplastiques** se **ramollissent** sous l'action de la chaleur et **durcissent** en se refroidissant de façon **réversible**. Elles sont **réutilisables**.

Nuances et symboles	TLU / TRP	R (MPa) / E (MPa)	Usinage / Montage	Utilisations
Acétate de cellulose CA	60 / 4	30-60 / 2 000	3 / 4	Jouets. Emballages.
Acrylonitrile butadiène styrène ABS	70 / 2	18-65 / 2 600	4 / 3	Carrosserie automobile. Jouets. Armoires de toilette. Planches à voile.
Polyamide (Nylon) PA 6,6	120 / 1	65 / 1 100 2 800	4 / 4	Roues. Engrenages. Coussinets. Clipsage.
Polycarbonate PC	120 / 4	60 / 2 240	4 / 2	Visières de casques. Vitres de sécurité. Biberons.
Polyéthylène haute densité PEhd	80 / 2-3	25-39 / 600 1 100	4 / 4	Films agricoles. Rails de glissement. Tuyaux souples. Flacons. Bidons.
Polyméthacrylate de méthyle PMMA	90 / 4	49-77 / 3 200	4 / 4	Plaques pour vitres. Hublots. Optique. Éclairage automobile (Plexiglas).
Polyoxythylène POM	110 / 1	70 / 3 000	4 / 2	Éléments de machine. Robinets. Engrenages.
Polypropylène PP	100 / 1-4	31 / 1 200	4 / 4	Tuyaux. Gaines. Cordes. Films alimentaires.
Polytétrafluoroéthylène PTFE	260 /	14-50 / 2 700 7 500	4 / –	Bagues. Patins de glissement. Joints. Tuyauterie.
Polychlorure de vinyle PVC souple	35 / 1-4	10-20 / 25	– / –	Tubes. Tuyaux. Gaines de fils électriques.
PVC rigide	50 / 1-4	50 / 2 800	3 / 3	Gouttières. Fenêtres. Flacons.

Matières thermodurcissables

Les matières **thermodurcissables** se **ramollissent** sous l'action de la chaleur et **durcissent** en se refroidissant de manière **irréversible**. Elles ne sont **pas réutilisables**.

Nuances et symboles	TLU / TRP	R (MPa) / E (MPa)	Usinage / Montage	Utilisations
Polyépoxydes EP	120 / 2	28 / 2 400	3 / 3	Avions. Bateaux. Matériels électrotechniques. Colles puissantes.
Phénoplaste PF	120 / 1	30 / 7 000	3 / 4	Bakélite. Garnitures de freins. Enrobage. Isolateurs.
Polyester UP	150 / 1	30 / 700	3 / 4	Bateaux. Carrosserie. Cuves.
Polyuréthane PUR rigide	105 / 2	1,2 / 700	4 / –	Pare-chocs. Volants. Bandages de roues.
Silicones SI	220 / 1	7 / –	2 / 1	Isolants. Étanchéité. Agents de démoulage.

TLU : température limite d'utilisation
TRP : transparence

1 : mauvais **2** : possible
3 : moyen **4** : bon

4.3.7. LES COMPOSITES

Un **matériau composite** résulte de l'assemblage de plusieurs constituants à structures différentes. Les qualités de chacun d'eux se combinent et se complètent pour former un matériau hétérogène dont les caractéristiques globales sont meilleures que celles de ses composants.

• **Les constituants d'un composite sont :**

– la **matrice** qui assure le lien entre les différents constituants, répartit les efforts et protège les renforts,

– les **renforts** composés en général de fibres à haute résistance (fibres de verre, de carbone, kevlar,...) qui, judicieusement implantées, constituent l'âme de la pièce et en supportent les efforts.

• **Principales matrices :**

MATRICES ORGANIQUES	**Polyesters**	Résines standards et les plus courantes. Bonnes propriétés mécaniques ; tenue thermique 60 à 120° C.
	Phénoliques	Résines à faible prix ; propriétés mécaniques moyennes ; excellentes propriétés de tenue au feu et d'isolation électrique.
	Époxydes	Résines coûteuses (2 à 5 fois supérieur aux polyesters) bonnes à très bonnes propriétés mécaniques ; adhérence remarquable sur les fibres et tous types de supports ; très bon contrôle dimensionnel.
MATRICES MINÉRALES	La mise en œuvre des **matrices minérales** (carbone,...) est beaucoup plus difficile que celle des matrices organiques. Cependant ces matrices présentent de nombreux avantages, en particulier pour les applications à haute température.	
MATRICES MÉTALLIQUES	Les **matrices métalliques** pallient assez bien les principaux inconvénients des matrices organiques. Elles présentent : – des caractéristiques mécaniques plus élevées (rigidité, résistance aux chocs,...) qu'elles conservent à température relativement haute, – une conductivité électrique et thermique élevée.	
MATRICES CÉRAMIQUES	Les **matrices céramiques** conviennent à des applications à très hautes températures. Elles présentent, par ailleurs, des caractéristiques spécifiques très intéressantes (résistance au frottement,...).	

• **Renforts fibreux**

LES PRINCIPALES FIBRES		
MINÉRAL	**FIBRES DE VERRE**	Bon rapport performance/prix ; Performances spécifiques moyennes ; Faibles coefficients de dilatation et de conductivité thermique ; Bonne adhérence avec toutes les résines.
ORGANIQUE	**FIBRES D'ARAMIDE KEVLAR**	Excellente résistance spécifique à la traction (la meilleure de toutes les fibres) ; très bonne tenue aux chocs et à la fatigue ; – adhérence aux résines faible excepté aux résines époxydes ; – tenue thermomécanique relativement faible (température maximale d'utilisation 250 °C) ; – résistance médiocre à la compression, au cisaillement, aux UV,...
	FIBRES DE CARBONE	Très coûteuses ; – caractéristiques mécaniques très élevées (valeur record du module d'élasticité **E** tous matériaux confondus) ; – tenue thermique exceptionnelle ; – stabilité dimensionnelle exceptionnelle ; – cœfficient de dilatation faible.

• Renforts fibreux (suite)

Différentes structures de renfort

Renfort :

– à base de particules **(a)**

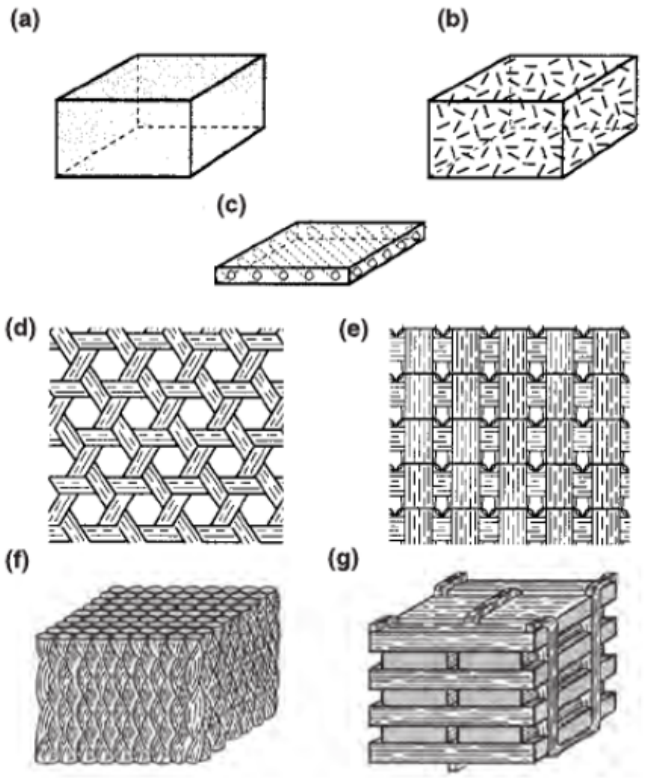
– à base de fibres courtes **(b)**

Renfort à base de fibres continues :

– fibres continues parallèles dans des couches de faible épaisseur (composite stratifié) **(c)**

– maillage tissé **(d)** ou tricoté **(e)** qui renforce chaque couche d'un composite

– tressage tridimensionnel **(f)** ou assemblage orthogonal tridimensionnel **(g)**. Ils constituent très souvent la forme finale du composite.



Remarque : le choix des renforts est conditionné par le coût et les caractéristiques mécaniques recherchées.

• Propriétés des matériaux composites :

Les propriétés des matériaux composites résultent :

– **du choix des constituants** (**matrice**, **renfort**) en tenant compte :
  – de la compatibilité entre matrice et renfort (par exemple les polyesters renforcés fibre de verre constituent la grosse majorité des composites structuraux),
  – de leurs propriétés spécifiques (résistance, module d'élasticité en traction,…),
  – de certaines caractéristiques (conductivité thermique et électrique,…).

– **de la forme et de l'architecture du renfort :**
  – Recherche du renfort fibreux optimal en tenant compte des efforts,
  – Prise en compte des techniques de mise en œuvre.

D'une manière générale les composites offrent de **nombreuses propriétés avantageuses** comparativement aux matériaux classiques :

– propriétés mécaniques élevées combinées à un faible poids ;
– résistance élevée à la corrosion et aux agressions chimiques ;
– grande possibilité de formes,
– …

• Applications :

– Des composites familiers (béton armé, bois,…) aux composites à hautes performances, les domaines d'applications des composites sont très vastes (applications dans l'aéronautique, l'industrie spatiale, dans le domaine du sport à haut niveau (perche de saut, mât de voilier,…), dans le domaine des équipements de loisir (cannes à pêche, skis, raquettes de tennis,…).

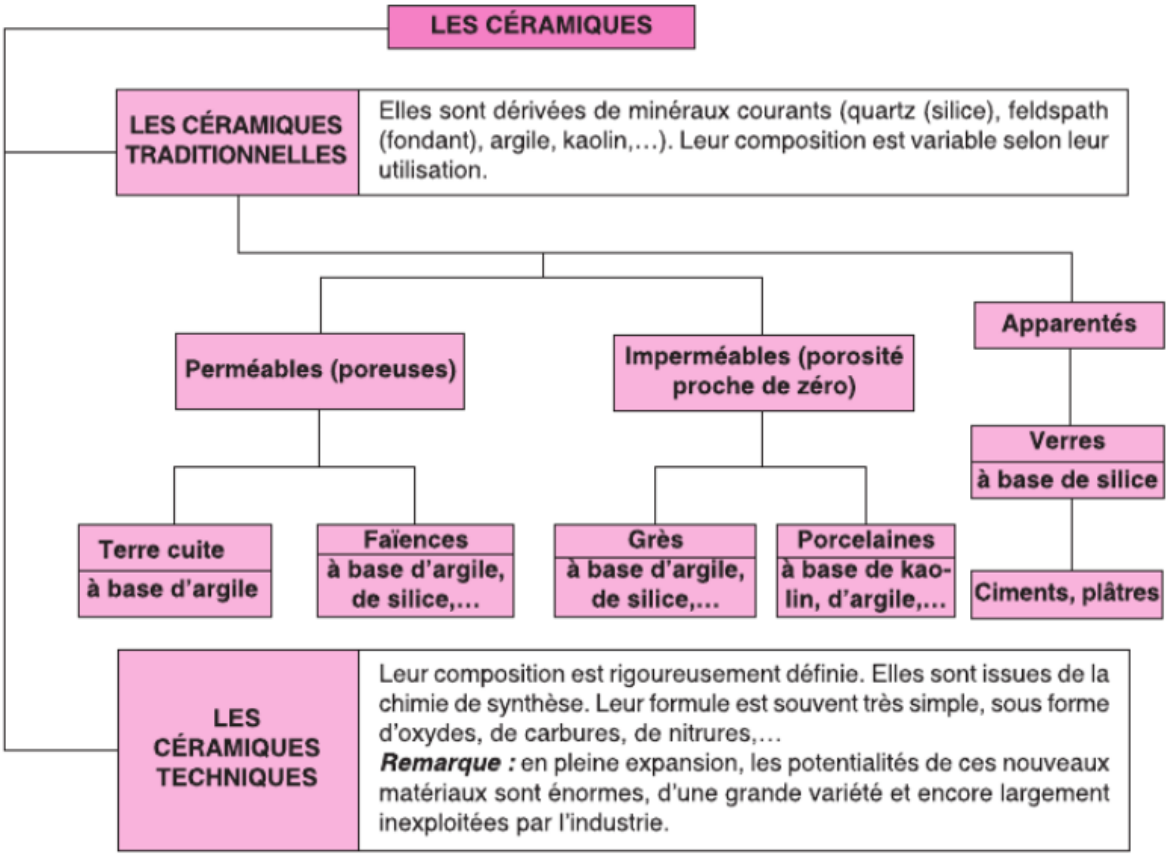
Le développement des composites s'accélère et c'est dans ce secteur que l'on trouvera beaucoup de nouveaux matériaux du futur.

4.3.8. LES CÉRAMIQUES

Une **céramique** est un matériau inorganique, non métallique, dont la fabrication est réalisée par cuisson à haute température.

D'une manière générale, c'est un matériau dur, résistant à la chaleur, à l'usure, à la corrosion et à l'attaque des agents chimiques mais présentant une certaine fragilité.

• **Classification :**



• **Mode d'obtention :**

En général la fabrication d'une céramique comprend deux phases :

– une phase de mise en forme (moulage, injection,…),

– suivie d'une phase de traitement thermique (cuisson, frittage).

• **Principales applications**

	Nuances	Exemples d'applications
CÉRAMIQUES TRADITIONNELLES	Terre cuite	Briques, tuiles, art
	Faïences	Vaisselle, carrelages muraux, art
	Grès	Sanitaires (éviers, lavabos, baignoires)
	Porcelaines	Vaisselles, génie électrique, art
CÉRAMIQUES TECHNIQUES	**Secteur d'activité**	**Exemples d'application**
	Mécanique	Hélices de turbines, éléments de moteur, outils, abrasifs,…
	Thermique	Revêtements de fours, matériaux pour électrodes,…
	Nucléaire	Combustibles nucléaires, revêtements, protection,…
	Optique	Fibres de communication optique, diodes pour laser,…
	Électro-magnétique	Capteurs, piles solaires, récepteurs HIFI, antennes,…
	Chimie, biologie	Réacteurs, catalyseurs, implants dentaires et prothèses,…

4.3.9. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ISOLANTS THERMIQUES

Sont considérés comme matériaux isolants thermiques les matériaux dont la conductivité thermique λ est inférieure à 0,12 W/m °C.

APTITUDES → / TYPE ↓	FORME ↓	MASSE VOLUMIQUE DU MATÉRIAU CONSTITUTIF ↓ kg/m³	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (λ) DU MATÉRIAU CONSTITUTIF ↓ W/m °C	COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE (k) ↓ W/m² °C	RÉSISTANCE THERMIQUE UTILE (R) ↓ m² °C	RÉACTION AU FEU (M) ↓	AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE (R) (en dB) ↓	UTILISATIONS-OBSERVATIONS
ACIER	Diverses	7780	52	Dépendent de l'épaisseur	Dépendent de l'épaisseur	M_0	*R* à calculer par « loi masse » et « loi fréquence » *R* = 40 dB à 500 Hz pour masse surfacique (Q_s) = 100 kg/m²	Eléments planchers. Poutrelles. Bacs acier.
ALUMINIUM	Diverses	2700	230			M_0		Menuiseries.
PIERRES	Diverses	≈ 2500	≈ 3			M_0		Murs porteurs. Parements.
BÉTON	–	≈ 2200	≈ 1,5			M_0		Murs porteurs. Planchers
BÉTON CELLULAIRE	–	400	0,16			M_0		Murs porteurs. Bonne isolation thermique.
AMIANTE-CIMENT	–	≈ 1500	≈ 0,8			–		
PLÂTRE	–	≈ 1000	≈ 0,4			M_0		Enduits.
BOIS	–	≈ 500	≈ 0,2			–		Menuiseries.
VERRE	–	2700	1,15			M_0		Baies vitrées.
VERRE CELLULAIRE	–	≈ 150	≈ 0,050			M_0		
FIBRES MINÉRALES FEUTRES BÂTIMENT ISOVER		20 à 300	0,041		de 1,5 à 6,5 pour épaisseur de 60 à 260 mm	M1	*R* (bruit routier) 1 dB (A) par cm d'épais.	Isolation des combles. Économique. Pose facile. Une face papier kraft.
LAINE DE VERRE COLLÉE SUR PLÂTRE «CALIBEL» ISOVER		120 à 180	0,050 à 0,063		de 0,9 à 2,45 pour épaisseur de 40 à 90 mm	M1	*R* (bruit rose) 57 dB (A) avec CALIBEL 10 + 50 sur béton de 100 mm	Isolation thermo-acoustique des murs. Collage sur murs. Gain utile de place
POLYSTYRÈNE EXPANSÉ ISOVER		9 à 35	0,036 à 0,044		de 0,27 à 2,21 pour épaisseur de 15 à 100 mm	–	« Loi masse » et « loi fréquence » identiques	Isolation thermique. Coffrage perdu de dalles.
POLYSTYRÈNE EXTRUDÉ ISOVER		28 à 40	0,029 à 0,035		–	M1		

APTITUDES → / TYPE ↓	FORME ↓	MASSE VOLUMIQUE DU MATÉRIAU CONSTITUTIF ↓ kg/m³	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (λ) DU MATÉRIAU CONSTITUTIF ↓ W/m °C	COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE (*k*) ↓ W/m² °C	RÉSISTANCE THERMIQUE UTILE (*R*) ↓ m² °C/W	RÉACTION AU FEU (*M*) ↓	AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE (*R*) (en dB) ↓	UTILISATIONS-OBSERVATIONS
BRIQUE ALVÉOLÉE « ISO » STURM		750	0,136 à 0,300	ISO 30 = 0,65 ISO 40 = 0,55 ISO 42 = 0,42	–	M_0	≅ 48 (dB) à *f* = 500 Hz	Murs porteurs monolithes. Doublage isolant non nécessaire. Propriétés isolantes stables dans le temps.
POLYSTYRÈNE EXPANSÉ MOULÉ Polyform.com		16	0,042	–	de 1,47 à 3,54 suivant type et dimensions	M_1	–	Éléments préfabriqués de planchers à isolation thermique intégrée.
FIBRASTYRÈNE COUPE-FEU FIBRALITH		193	–	–	de 0,94 à 2,06 pour épaisseur de 50 à 100 mm	M_1	–	Isolation thermique des parois (murs et plafond). Fonds de coffrage de dalles béton de planchers d'habitation.
POLYSTYRÈNE COLLÉ SUR UNE PLAQUE DE PLÂTRE ISOVER		10 à 40	0,036 à 0,044	–	–		–	
LAINE DE ROCHE PANNEAU RIGIDE « PANOTOIT SOUDABLE » ISOVER		150	0,041	–	de 0,80 à 3,15 pour épaisseur de 30 à 120 mm	M_1	–	Soudable, particulièrement bien adapté aux revêtements d'étanchéité. Facilité de pose.
VERMICULITE EXFOLIÉE ELF		70 à 80	0,06 à 0,11	–	–	M_1	–	
ENTREVOUS POLYSTYRÈNE EXPANSÉ FIBRALITH		9 à 25	0,036 à 0,044	VOIR PLANCHERS FRICKER		M_1	–	Se pose entre poutrelles pour la réalisation des planchers.

M_0 : incombustible.
M_1 : non inflammable.
M_2 : difficilement inflammable.
M_3 : moyennement inflammable.
M_4 : facilement inflammable.
M_5 : très facilement inflammable.

4.3.10. SYMBOLES - CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES MÉTAUX PURS ET DES ALLIAGES

Symboles chimiques internationaux, symboles AFNOR et principales caractéristiques physiques des métaux purs et des éléments d'alliages

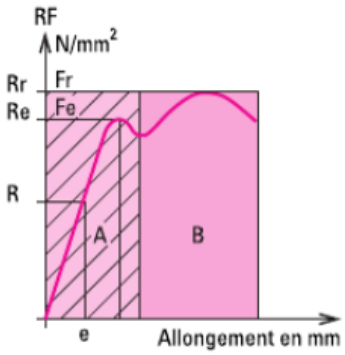
Éléments	Symbole chimique	Symbole AFNOR	Masse volumique à 20 °C (kg.dm^{-3})	Température de fusion (°C)	Coefficient de dilatation (10^{6} °C ^{1})	Conductibilité thermique (W cm ^{1} °C ^{1})
A um n um	A	A	2,7	660	25	2,37
Ant mo ne	Sb	R	6,7	630	13	2,3
Argent	Ag	-	10,5	960	19	4,1
Béry um	Be	Be	1,85	1 287		
B smuth	B	B	9,78	271		
Bore	B	B	2,35	2 200		
Cadm um	Cd	Cd	8,65	321	30	0,93
Chrome	Cr	C	7,19	1 857	6	0,91
Coba t	Co	K	8,9	1 495	12	0,69
Cu vre	Cu	U	8,96	1 080	16,6	3,98
Éta n	Sn	E	5,75-7,31	232	20	0,64
Fer	Fe	Fe	7,87	1 535	12	0,803
Magnés um	Mg	G	1,74	649	25	1,59
Manganèse	Mn	M	7,43	1 245	22	
Mo ybdène	Mo	D	10,22	2 617	5	1,4
N cke	N	N	8,9	1 453	13	0,899
N ob um	Nb	Nb				0,5
Phosphore	P	P	1,88	44		
P omb	Pb	Pb	11,35	327	29	0,346
Sé én um	Se	Se				
S c um	S	S	2,4	1 430		
Soufre	S	F	2,1	113		
Tanta e	Ta	Ta	16,69			
T tane	T	T	4,54	1 660	8,5	0,2
Tungstène	W	W	19,3	3 410	4,5	1,78
Vanad um	V	V	6,11	1 890	8	0,60
Z nc	Z	Z	7,14	420	35	1,15
Z rcon um	Zr	Zr	6,5	1 750		

Caractéristiques physiques de quelques matériaux courants

Matériaux	Masse volumique à 20 °C (kg dm ^{3})	Température de fusion (°C)	Coefficient de dilatation (10^{6} °C ^{1})	Conductibilité thermique (W cm ^{1} °C ^{1})
Ac er	7,8-7,85	1 510	10-14	
A pax	2,65	580	20	1,65
Bronze	8,85-9,3	900	17,4-18,8	0,4-0,7
Dura um n	2,79	650	22,6	1,29
Fonte	6,8-7,8	1 100-1 300	5-15	0,21-0,63
Invar		1 500	0,8	
La ton	8,3-8,9	920	18-21	0,84-1,21
Zamak	6,6-6,7	380-410	39,7	1,13
Ny on	1,14	220	7	
Téf on	2,2	300	18	

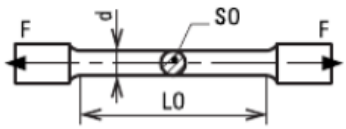
• Essais de traction

Les résultats obtenus par les essais de traction permettent d'appliquer une loi de similitude pour les transposer aux calculs des éléments d'un mécanisme.
La force mesurée est reportée sur un diagramme en fonction de l'allongement.



A : déformation élastique
B : déformation permanente

Allongement	A %	A % = (Lu – Lo)/Lo	Lu : allongement après rupture
Coeff. de striction	Z %	Z % = (Su – So)/So	Su : section après rupture
Module d'élasticité longitudinale	E	E = R/e	E en MPa, e = (L – Lo)/Lo E : module de Young
Limite apparente d'élasticité	Re	Re = Fe/So	Re en MPa ou N/mm²
Résistance à la rupture à la traction	Rr	Rr = Fr/So	Rr en MPa ou N/mm²



Les éprouvettes ont des dimensions proportionnelles telles que :

$Lo = 5,65\sqrt{So}$ soit $Lo = 50$ et $\varnothing\ 10$ soit $Lo = 100$ et $\varnothing\ 20$

Photo : Zwick/Roell

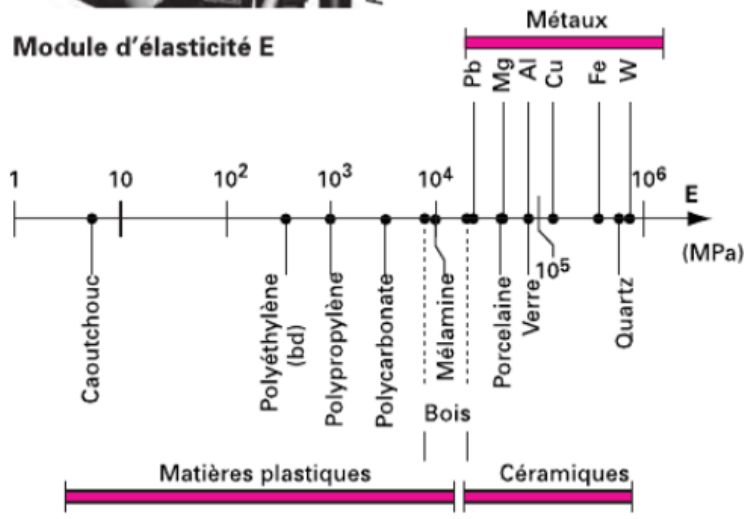
– **Propriétés mécaniques statiques déduites d'un essai de traction :**
– **Résistance R_m** : contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de rompre. On peut lui associer la contrainte R_e atteinte à la limite élastique.
– **Rigidité (module d'élasticité E)** : capacité du matériau à se déformer de façon élastique, donc réversible (voir graphe ci-dessous).
– **Ductilité (allongement à la rupture A %)** : Propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer fortement de façon permanente avant de se rompre.
– **Fragilité** : Un matériau se déforme jusqu'à la rupture sans aucune déformation plastique, c'est-à-dire uniquement de façon élastique (exemple : verre, céramique).

Un matériau fragile est non ductile.

– **Élasticité** : caractérisé par la capacité à une forte déformation élastique. Concerne aussi bien un matériau fragile qu'un matériau ductile.
– **Ténacité** : caractérisée par l'énergie nécessaire pour casser un matériau. Un matériau tenace combine donc une bonne capacité d'allongement et une bonne résistance à la rupture. Dans un essai de traction, cette énergie est représentée par l'aire sous la courbe.

Elle se caractérise aussi par la résistance à la propagation de fissures.
Sa mesure peut être aussi obtenue par des essais de **résilience** (Charpy, chute de billes…)

Module d'élasticité E

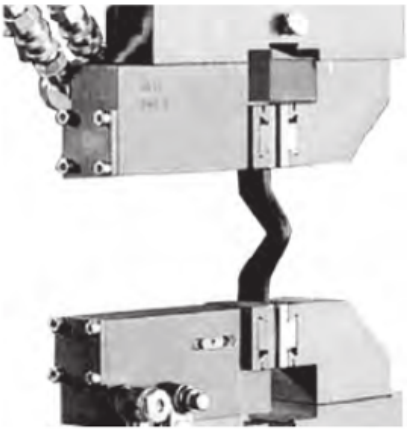


• Essais de compression

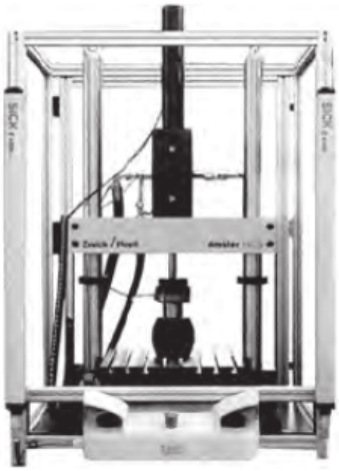
– Deux effets peuvent apparaître : le flambage ou la déformation en barillet.

– Essais surtout utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux fragiles (béton, céramiques, ...) qui supportent mal la traction.

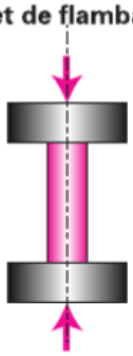
Photos Zwick/Roell

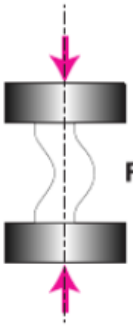


Effet de flambage

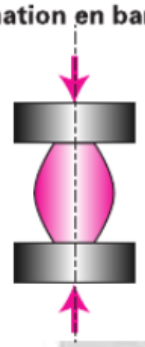


Effet de déformation en barillet





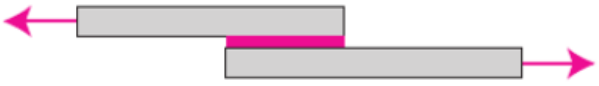
Flambage



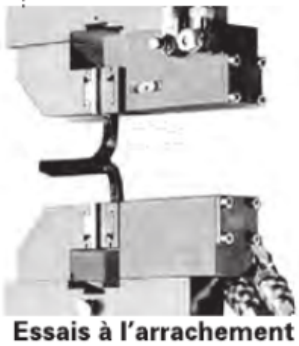
Déformation en barillet

• Essais de cisaillement

Le cisaillement peut être caractérisé de façon simple sur des joints de colle. L'éprouvette est constituée de supports non déformables par rapport au joint de colle, et est testée à la façon d'une simple éprouvette de traction.



Matériaux collés



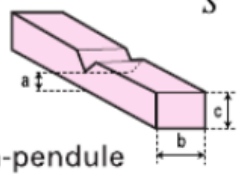
Essais à l'arrachement

• Essais de tenue aux chocs

L'essai de résilience met en évidence la ténacité du matériau ; celle-ci est caractérisée par l'énergie nécessaire pour casser une éprouvette.

La résilience K est définie par : $K = \frac{E}{S}$

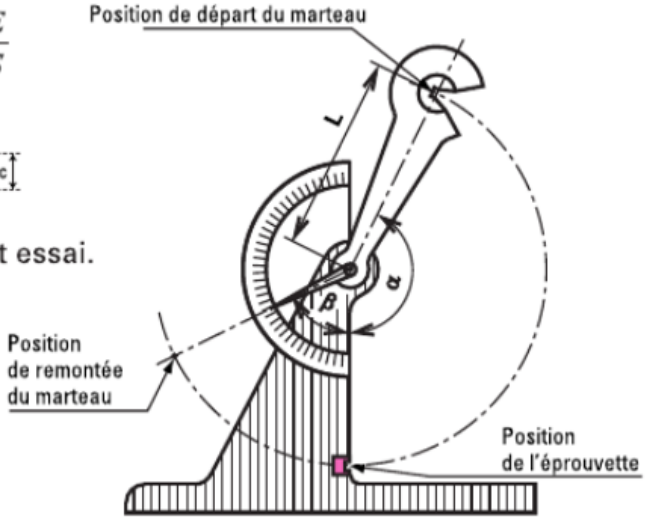
S = section percutée;
S = a . b



On utilise un mouton-pendule (mouton de Charpy) pour réaliser cet essai.

$$E = MgL(\cos\alpha - \cos\beta)$$

M = masse bras+percuteur
L = longueur du bras jusqu'au point d'impact



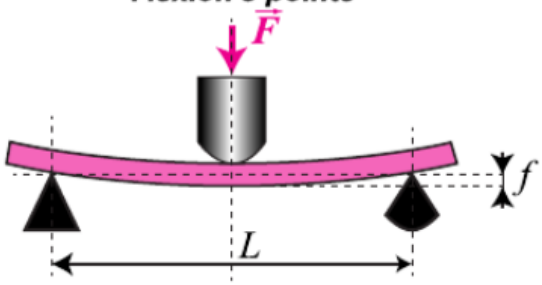
ESSAIS MÉCANIQUES

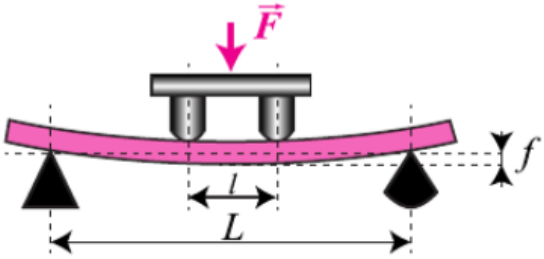
• Essais de flexion

-Essais permettant, comme pour la compression, de tester des matériaux tels que les verres et les céramiques, difficiles à tester en traction.
- Cet essai ne permet pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles, car l'essai n'aurait plus de signification physique au-delà d'une certaine **flèche (*f*)**, les formules ne seraient plus exploitables (contraintes, allongements, ...) du fait de la trop grande courbure atteinte par le matériau.
On se limitera donc à des déformations élastiques, avant tout pour tester la rigidité et déterminer la limite élastique.

Flexion 3 points

Flexion 4 points





La contrainte σ_{maxi}

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

b est la largeur de la poutre
h est la hauteur ou épaisseur de la poutre

$$\sigma = \frac{3F(L-l)}{2bh^2}$$

Le module d'élasticité E

$$E = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{F}{f}$$

$$E = \frac{L^2(L-l)}{8bh^3}\left(3 - \frac{(L-l)^2}{L^2}\right)\frac{F}{f}$$

Le module d'élasticité E est une valeur importante caractérisant le matériau. Avec des conditions opératoires optimales, et dans la mesure où le matériau testé est peu anisotrope, peu hétérogène, les valeurs obtenues se recoupent dans les quatre essais vus précédemment.
Les modules d'élasticité en **traction** et en **compression** sont en principe identiques. Avec l'essai de **flexion**, la valeur obtenue est plus dépendante de la portée et des dimensions de l'éprouvette.
Les différences sont cependant minimes, **E** est généralement légèrement plus faible.

Dans tous les cas, **E**, encore appelé module de **module d' Young** est défini par la formule ci-dessous (**loi de Hooke**). σ et ε sont parallèles à la force appliquée (valeurs normales).

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{avec} \quad \sigma = \frac{F}{S} \text{ et } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Dans le cas de l'essai de **cisaillement**, le module d'élasticité noté G est appelé **module de Coulomb**, et est défini par une loi similaire, la loi de Coulomb. τ est une contrainte de cisaillement, et γ est une déformation de cisaillement.

$$\tau = G\gamma \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{F}{S} \text{ et } \gamma = \frac{\Delta l}{l_0}$$

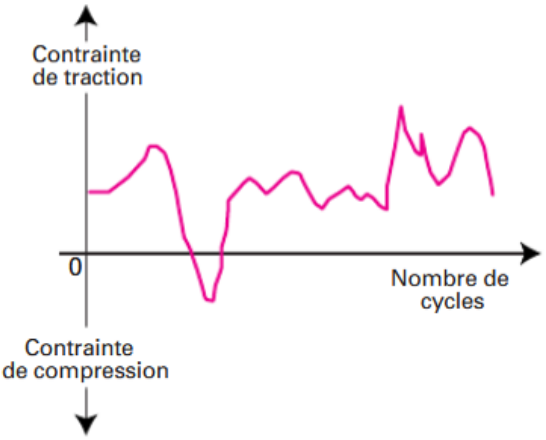
On peut démontrer que **G** et **E** sont reliés par la formule suivante: $E = 2G(1+\nu)$
ν est le **coefficient de Poisson**. C'est un paramètre qui caractérise la façon dont le matériau se déforme transversalement, lorsqu'il est sollicité en traction ou compression.
Pour la plupart des matériaux, ν ≈ 0,3. En théorie, il peut varier de 0 à 0,5.

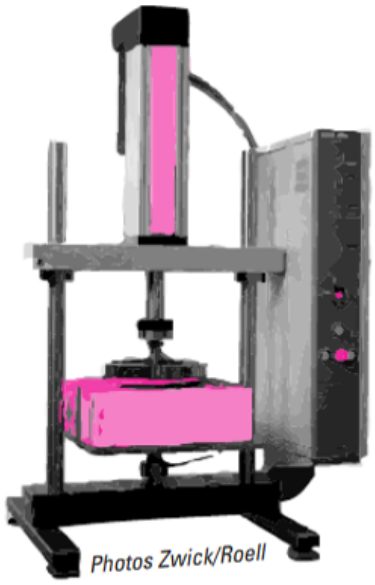
• Essais de fatigue

Principe des essais de fatigue

On réalise un essai de fatigue en comptant le nombre de cycles nécessaires jusqu'à la rupture, en fonction d'un cycle de charge donné, tout en conservant des déformations élastiques. En fait, les essais de fatigue sont très variables et très difficiles à réaliser, pour plusieurs raisons :

– Ils sont très longs, c'est-à-dire qu'il faut réaliser un très grand nombre de cycles avant d'aboutir à une rupture éventuelle.
– Ils ne peuvent véritablement simuler les cas tirés de la pratique, qui ont des cycles d'une grande complexité. Exemple, la courbe ci-contre.
– La rupture éventuelle fait appel à la notion de probabilité, ce qui implique un grand nombre d'essais vérificatifs.
– Un grand nombre de paramètres interviennent :
  – la température,
  – le degré d'agressivité chimique,
  – l'amplitude de variation des contraintes $\Delta\sigma$,
  – la contrainte moyenne $\overline{\sigma}$, ...

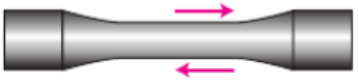



Photos Zwick/Roell

Il existe un grand nombre de modes de sollicitation, on trouve parmi les plus fréquents :

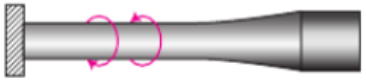
– flexion rotative

– traction/compressions uniaxiale



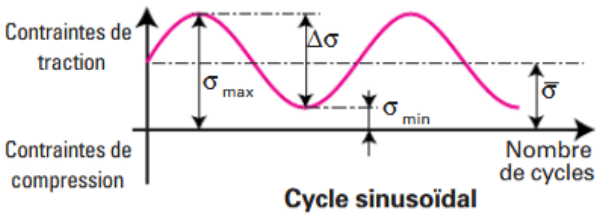
– flexion plane

– torsion alternée



Ainsi, un essai de fatigue se rencontre sous un grand nombre de variantes. Voir exemple ci-contre.

On note cependant que ce cycle est généralement fonction des contraintes σ imposées au matériau, et non pas les déformations ε. Les contraintes sont plus faciles à contrôler.



Cycle sinusoïdal

On peut faire les observations suivantes :

– Certains matériaux sont insensibles à la fatigue. C'est le cas du verre et des céramiques qui cassent toujours au même niveau de contrainte. En fait, on ne peut dépasser **N** = 1, et cette contrainte est égale à $\mathbf{R_m}$. D'autres matériaux tels que le bois, les matières plastiques sont peu sensibles à la fatigue, et le niveau de contrainte atteint pour un nombre de cycles donné est peu différent de $\mathbf{R_m}$.
– Certains matériaux tels que le PMMA, l'acier doux possèdent une **limite d'endurance** notée σ_d. En dessous de ce niveau de contrainte, le matériau est insensible à la fatigue, c'est-à-dire que la rupture de l'éprouvette ne sera jamais atteinte, quel que soit le nombre de cycles de fatigue appliqués.

Pour ce type de matériau, il suffit donc de dimensionner la structure de façon à ce que σ_d ne puisse être atteinte.

La présence d'une limite d'endurance est un avantage considérable par rapport aux autres matériaux qui n'en ont pas. Pour ceux-ci, on sait que la rupture sera atteinte quoi qu'il arrive dans la mesure où le nombre de cycles critique est atteint, même à des niveaux de contrainte très faibles. C'est le cas en particulier des alliages non ferreux (Al, Mg, Cu, etc.)

ESSAIS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX (suite)

• Essais de dureté

La dureté d'un matériau est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un corps plus dur.
Les essais de dureté sont particulièrement utilisés pour caractériser les matériaux métalliques, en particulier parce que ce sont des essais rapides à effectuer. Ils permettent ainsi de réaliser un contrôle qualité du matériau en ayant une première approche des caractéristiques mécaniques statiques (résistance, rigidité, etc.), sans être obligé de réaliser un essai de traction, long et coûteux.
Il existe un grand nombre d'essais possibles, dont **Brinell, Rockwell, Vickers**, utilisés chacun sur différentes surfaces brutes ou usinées.

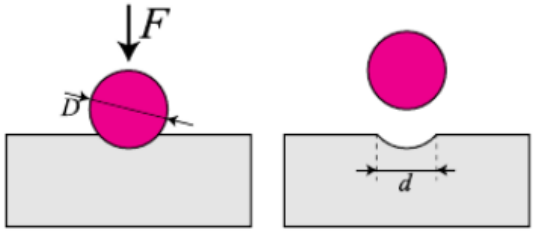
Les essais de dureté sont également très utilisés pour les matériaux plastiques (moins durs), mais avec d'autres essais que ceux mentionnés ci-dessus, **Shore et Barcol**, essentiellement.
Quant aux verres et céramiques, ce sont des matériaux trop durs et trop fragiles pour être testés en dureté sous cette forme.

Les essais de dureté donnent des valeurs conventionnelles et sans unité. Pour permettre un contrôle qualité, ce sont des valeurs comparatives.
Dans le cas des essais **Brinell, Rockwell** et **Vickers**, le symbole de dureté est respectivement **HB, HR, HV**.

Machine de dureté universelle

Essai Brinell (HB)

L'essai consiste à imprimer dans le matériau une bille en acier de diamètre **D** sous une charge **F** et à mesurer l'empreinte de diamètre **d** laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge.
La dureté **Brinell HB** est un nombre proportionnel au rapport à la force **F** sur la surface **S** de l'empreinte.



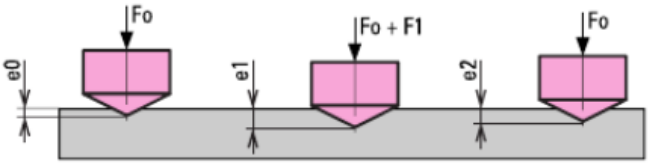
$$HB = \frac{F_{(N)}}{S_{(mm^2)}} = \frac{0{,}102 \times 2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

Remarque : $HB \approx 3\,Rr$ *HB en daN/mm²*
Rr, résistance à la rupture en traction en daN/mm²

Essai Rockwell (HR)

Essai rapide dont le résultat est donné directement sur un cadran. Cependant il est moins précis que les essais **Brinnell** et **Vickers**.

Principe :
• application sur le pénétrateur d'une charge initiale F_0. Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale e_0 ;
• application d'une force supplémentaire F_1. Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur e_1 ;
• relâchement de la force F_1 ; le pénétrateur remonte légèrement et définit e_2.

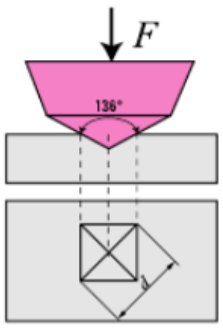


$$HRc = 100 - (e_2 - e_0)/0{,}002$$

déformation rémanente — *correspondance pour une division du cadran*

Essai Vickers (HV)

L'essai consiste à appliquer dans le matériau un pénétrateur diamant en forme de pyramide à base carrée, d'angle au sommet 136°, sous l'action d'une charge **F**, et à mesurer la diagonale **d** de l'empreinte après l'enlèvement de la charge. La dureté **Vickers** est le rapport de la charge sur l'aire de l'empreinte.



$$HV = \frac{2F.\sin\left(\frac{136°}{2}\right)}{d^2} \approx \frac{1{,}854F}{d^2}$$

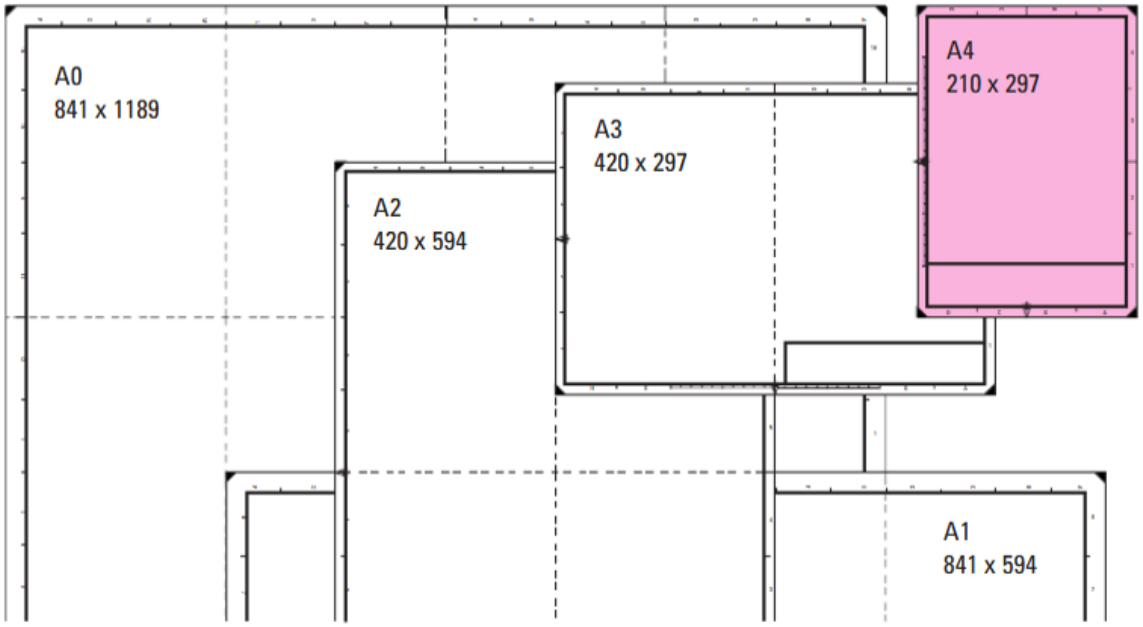
• *La dureté **Vickers** s'exprime par un nombre sans unité.*
• ***d**, diagonale de l'empreinte en **mm**.*
• ***F**, charge appliquée en **N**.*

FORMATS

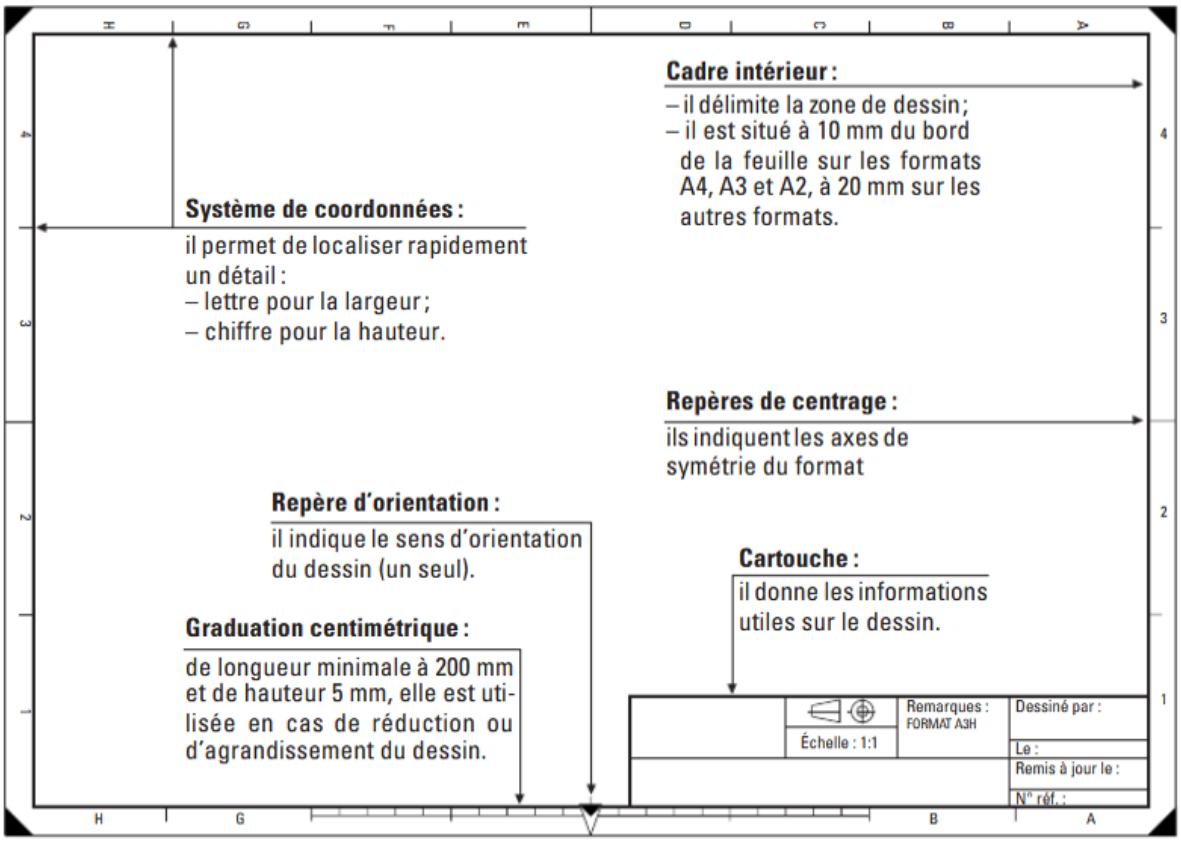
• Formats usuels

Les formats se déduisent les uns des autres à partir du format **A0** (1 m^2) en divisant le plus grand côté par deux.

Le rapport de la longueur sur la largeur est de $\sqrt{2}$.
Les formats peuvent être utilisés horizontalement ou verticalement.

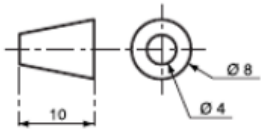


• Indications portées sur les formats



Le cartouche doit comporter :

- l'échelle du dessin (1:1, 1:2, 5:1),
- le nom de l'auteur,
- la raison sociale du donneur d'ordre,
- le titre du dessin,
- les dates des mises à jour,
- le symbole de la disposition des vues.



La **nomenclature** est la liste de tous les éléments constitutifs de l'ensemble représenté sur le dessin.
Elle est liée au dessin par des repères.
Elle est en général constituée de plusieurs colonnes définissant les informations concernant chaque pièce de l'ensemble : repères, nombre de pièces identiques, désignation des pièces, matériaux...
Elle peut être représentée sur le dessin lui-même, au-dessus du cartouche comme ci-dessous, ou sur une feuille séparée.
De nombreux logiciels de CAO-DAO ou tableurs permettent d'établir les nomenclatures.

Rep.	Nbre	Désignation	Matière	Observation
14	1	Joint à lèvre	NBR	
13	2	Ressort de rappel	C 60	
12	1	Segment d'arrêt	C 55	
11	1	Joint torique 23,47 x 2,62	NBR	
10	1	Fond de cylindre	Cu Zn39 Pb2	
9	1	Manchette de protection	Caoutchouc	
8	4	Anneau élastique 6 x 0,7		NF E 22 - 163
7	1	Axe de piston et de biellette	37 Cr4	
6	1	Axe de biellette	37 Cr4	
5	2	Axe de doigt	35 Cr4	
4	2	Biellette	C 40	
3	2	Doigt	C 40	
2	1	Piston	C 40	
1	1	Corps de pince	C 40	

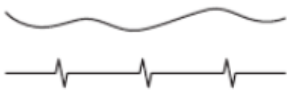
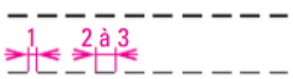
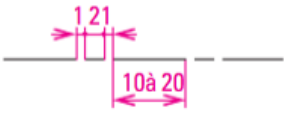
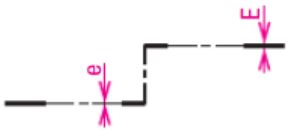
Echelle:
Remarques:
NOMENCLATURE
Dessiné par:
Le :
Remis à jour le :
N° réf.:

PINCE SIMPLE EFFET

TRAITS

• Principaux types de traits

NF E 04-520

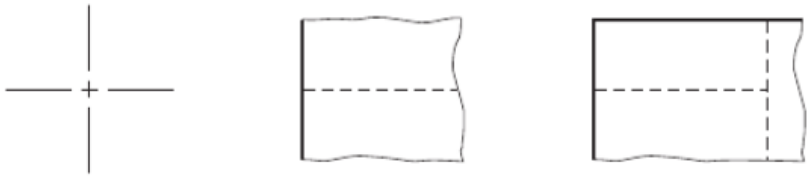
TRaIT	DéSIGNaTIoN	AppLICaTIoNS GéNéRaLeS
	Continu **foRT**	Contours vus Arêtes vues
	Continu fin (aux instruments)	Arêtes fictives vues Lignes de cote Lignes d'attache Lignes de repère Hachures Contours de sections rabattues sur une vue
	Continu fin (1) à main levée Continu fin (1) droit avec zigzags (2)	Limites de vue ou coupes partielles ou interrompues
	Interrompu (1) **foRT** Interrompu (1) fin	Contours cachés Arêtes cachées Contours cachés Arêtes cachées
	Mixte fin (3)	Axes de révolution Traces de plans de symétrie Trajectoires
	Mixte fin, avec éléments longs **foRTS** aux extrémités et aux changements de plans de coupe	Traces de plans de coupe
	Mixte fin à deux tirets (3)	Contours de pièce voisine Parties situées en avant du plan de coupe Demi-rabattement

(1) Sur un même dessin, il est recommandé de n'utiliser qu'une seule des deux possibilités offertes.
(2) Ce type de trait est utilisé en particulier pour les dessins exécutés d'une façon automatisée. Il est souhaitable de le faire légèrement dépasser de la pièce.
(3) Un trait mixte commence et se termine de préférence par un élément long.

Deux largeurs de traits sont utilisées (fort et fin).
Le rapport entre ces largeurs E/e est supérieur ou égal à 2.
Gamme de traits : 0,18 - 0,25 - 0,50 - 0,70 - 1 - 1,4 - 2 mm.

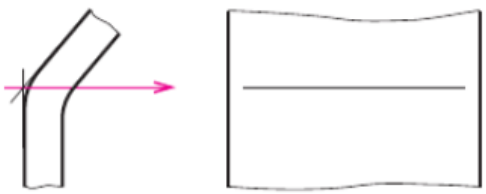
• Intersection de traits

L'intersection des traits interrompus doit se faire sur un élément tracé.



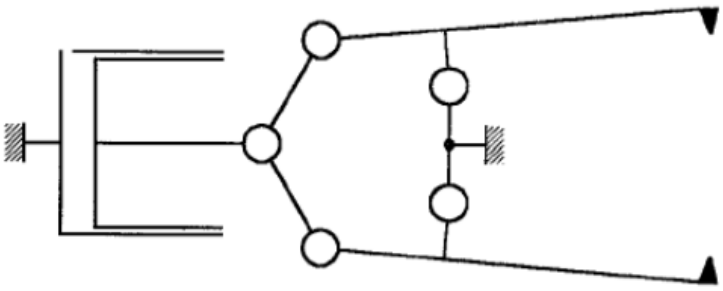
• Arêtes fictives

Pour un changement de forme non représentable par une arête réelle (cas des pièces moulées, forgées ou pliées...) représenter les arrondis ou congés par des traits continus fins s'arrêtant à quelques millimètres des contours forts.
Une arête fictive cachée ne se représente pas.



• Schéma cinématique

Le **schéma cinématique** met en évidence la fonction globale de l'ensemble en faisant apparaître les différentes liaisons entre les éléments.

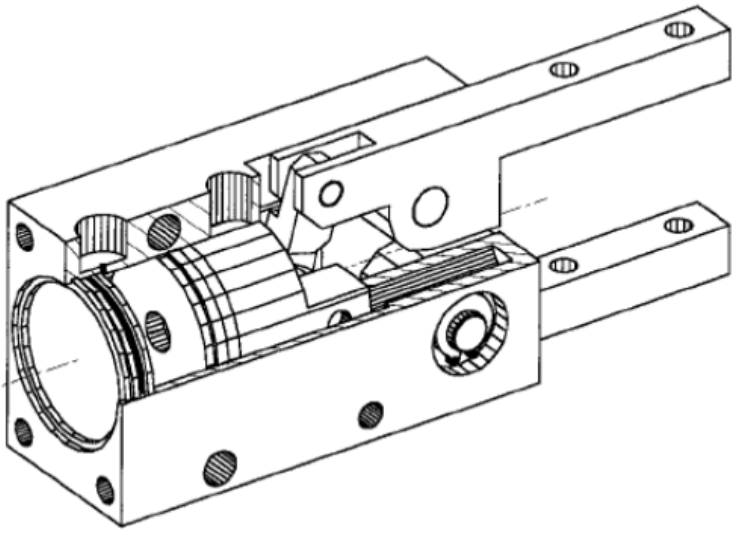


• Photo

La **photo** est surtout utilisée à des fins publicitaires.
Elle donne une vision globale et esthétique du produit.

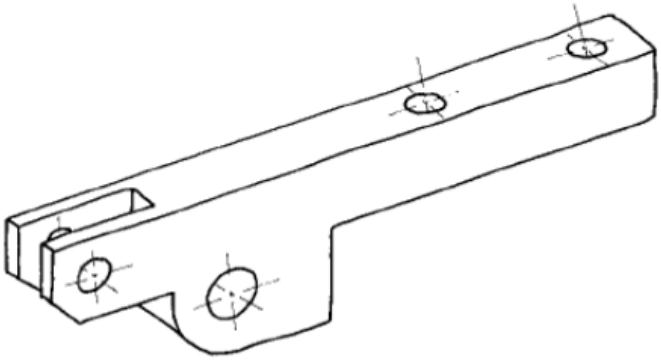
• Vue en écorché

La **vue en écorché** permet de visualiser de façon volumique un système en montrant l'ensemble monté en coupe partielle.
Elle permet d'en comprendre le fonctionnement global et situe l'emplacement et le rôle des principaux composants.



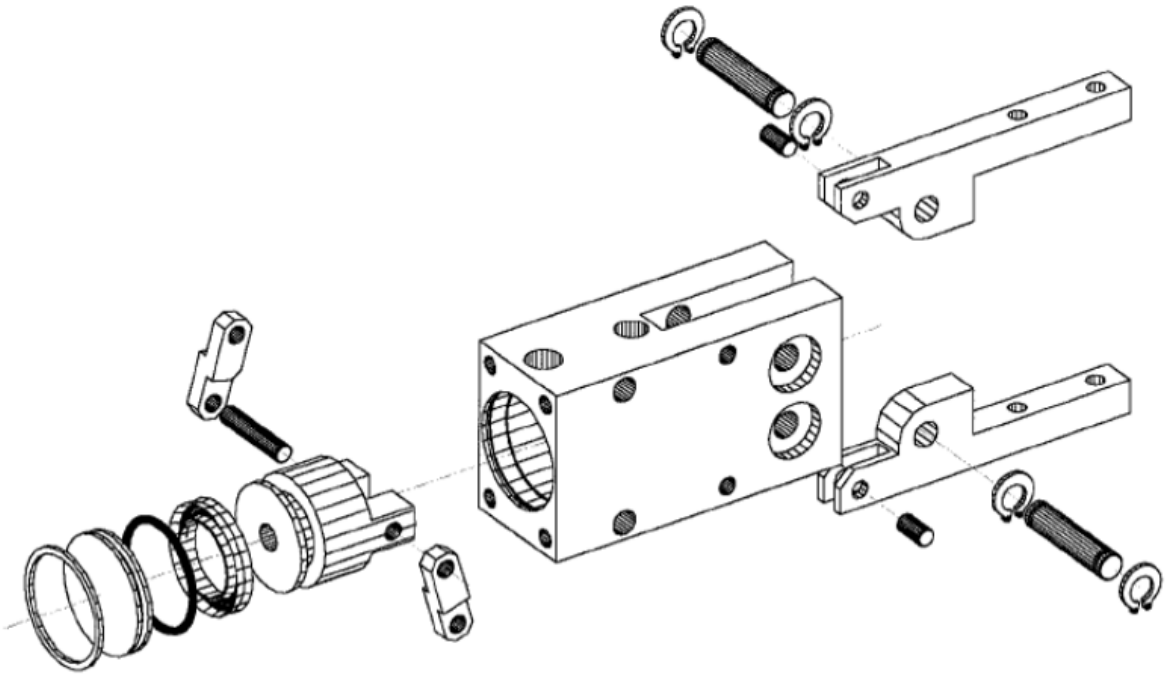
• Dessin à main levée

Le **dessin à main levée**, malgré son manque de précision, permet de représenter rapidement, sur le site, une pièce afin d'en assurer une modification, un remplacement.



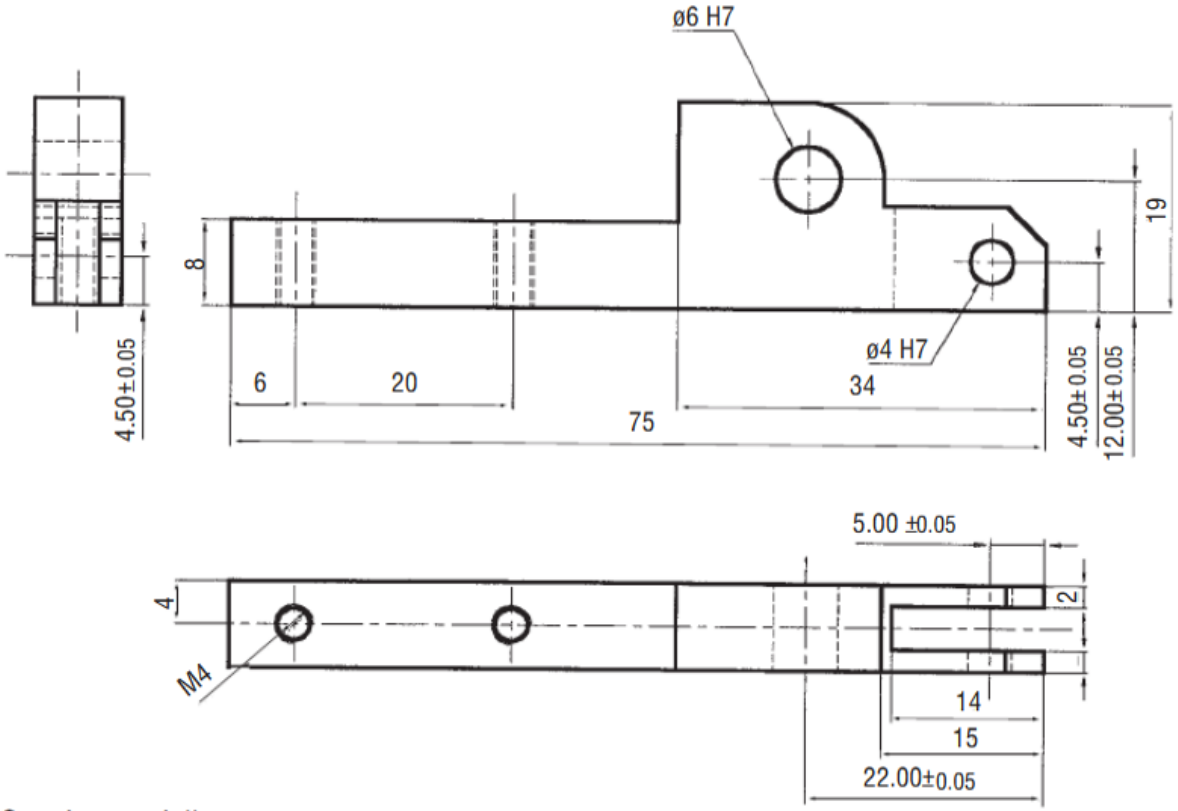
• Vue éclatée

La **vue éclatée** permet de visualiser les composants d'un système afin d'en appréhender l'agencement.
Utilisée pour les catalogues et les notices de maintenance.



• Dessin de définition

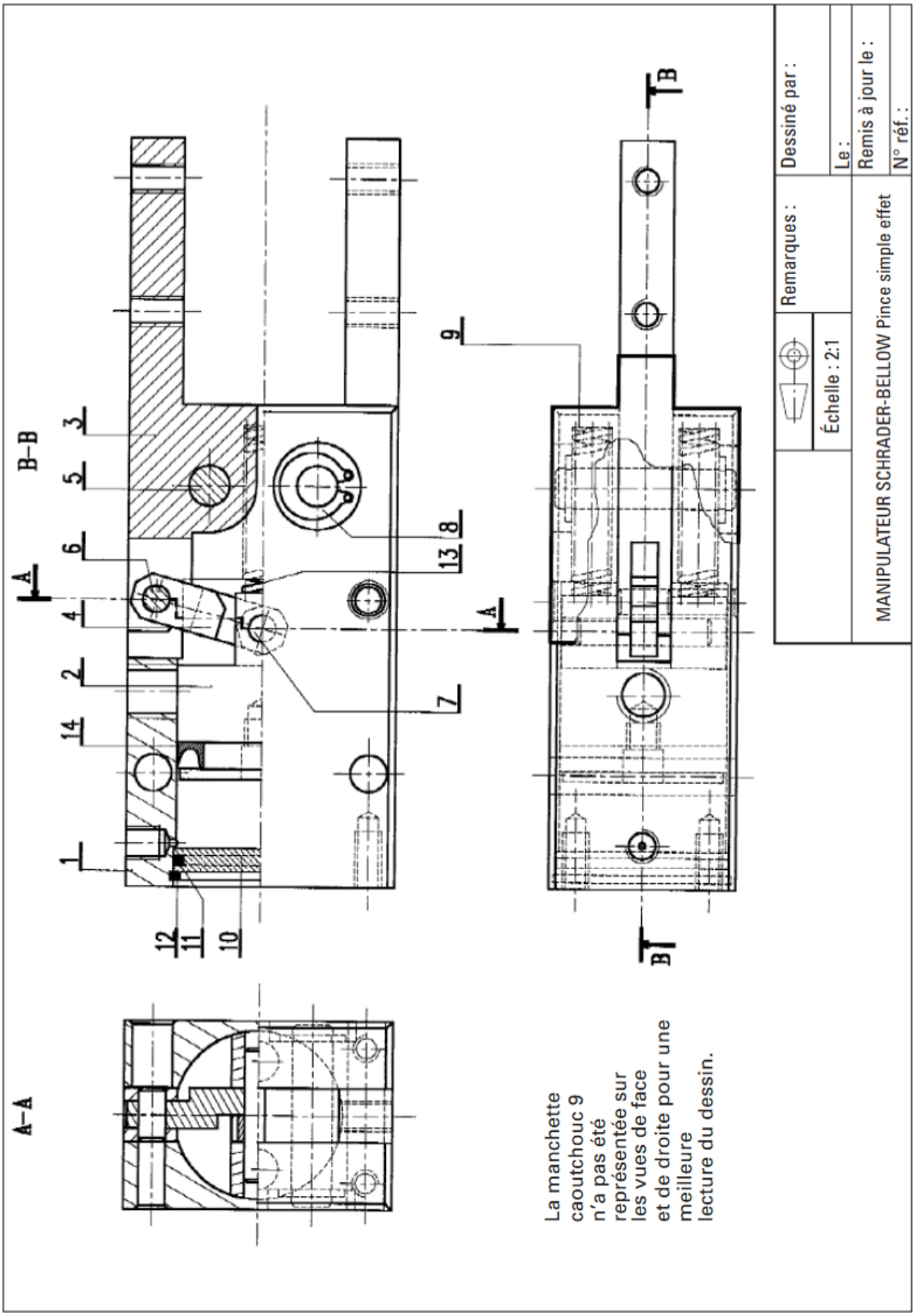
Le **dessin de définition** définit complètement une pièce en vue de sa fabrication.
Il comportera toutes les vues utiles à sa compréhension ainsi que la cotation complète.



Cotation partielle
Tolérance générale sauf contre-indication : +/ 0,1 Matière : C40

• Dessin d'ensemble

Le **dessin d'ensemble** indique de façon détaillée la représentation normalisée de tout ou partie du système ou de l'objet technique en avant-projet.
Il sera accompagné, dans le cas du projet final, des notices de calculs définissant les différents éléments.

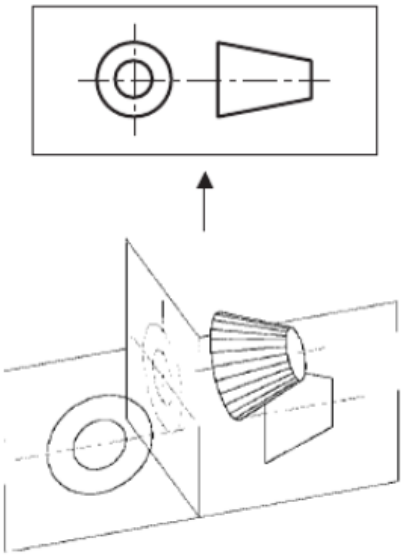


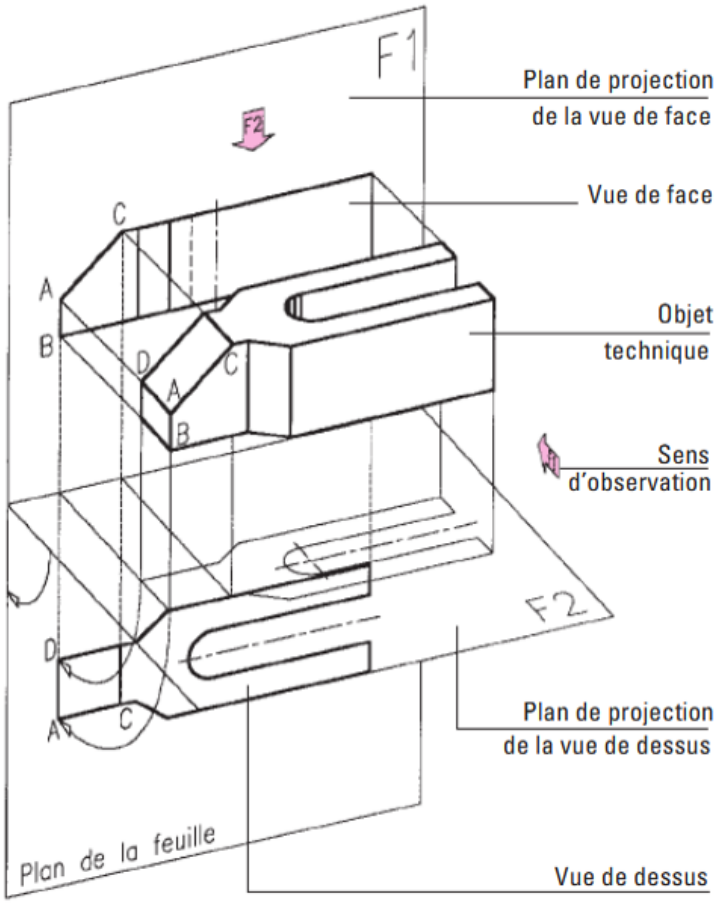
Nota : En fonction de la place disponible sur le format, la nomenclature peut être incluse dans ce format ou séparée.

• Principe de projection orthogonale (méthode européenne)

L'opérateur se place perpendiculairement à une face de l'objet à représenter et la projette sur un plan parallèle à cette face situé en arrière de l'objet.

La méthode européenne de projection, ou méthode du premier dièdre, est définie par le symbole ci-dessous.



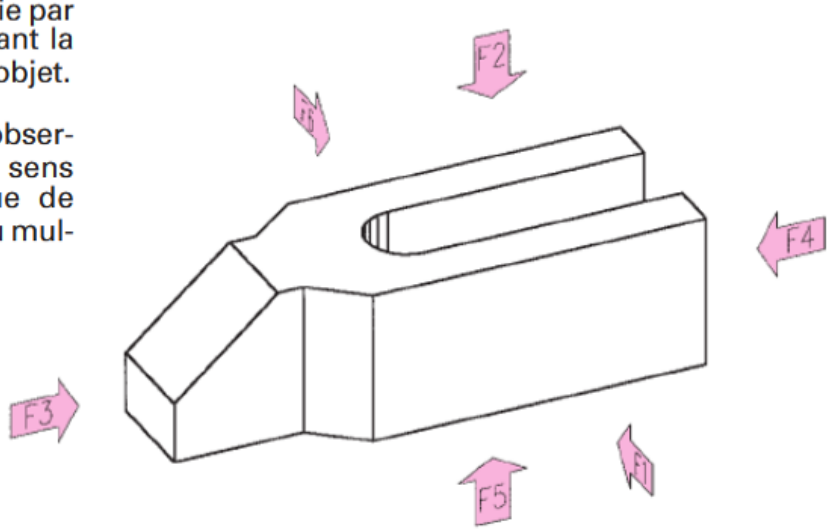


• Position des vues

La vue de face sera définie par l'observateur comme étant la plus représentative de l'objet.

Les autres directions d'observation forment, avec le sens d'observation de la vue de face, des angles de 90° ou multiples de 90°.

F1 : vue de face.
F2 : vue de dessus.
F3 : vue de gauche.
F4 : vue de droite.
F5 : vue de dessous.
F6 : vue arrière.



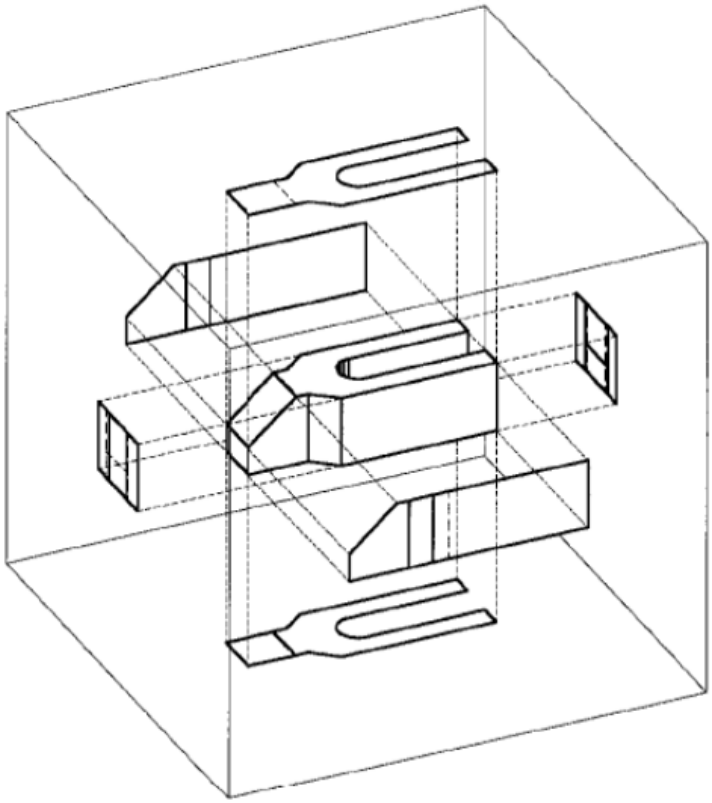
• Position relative des vues

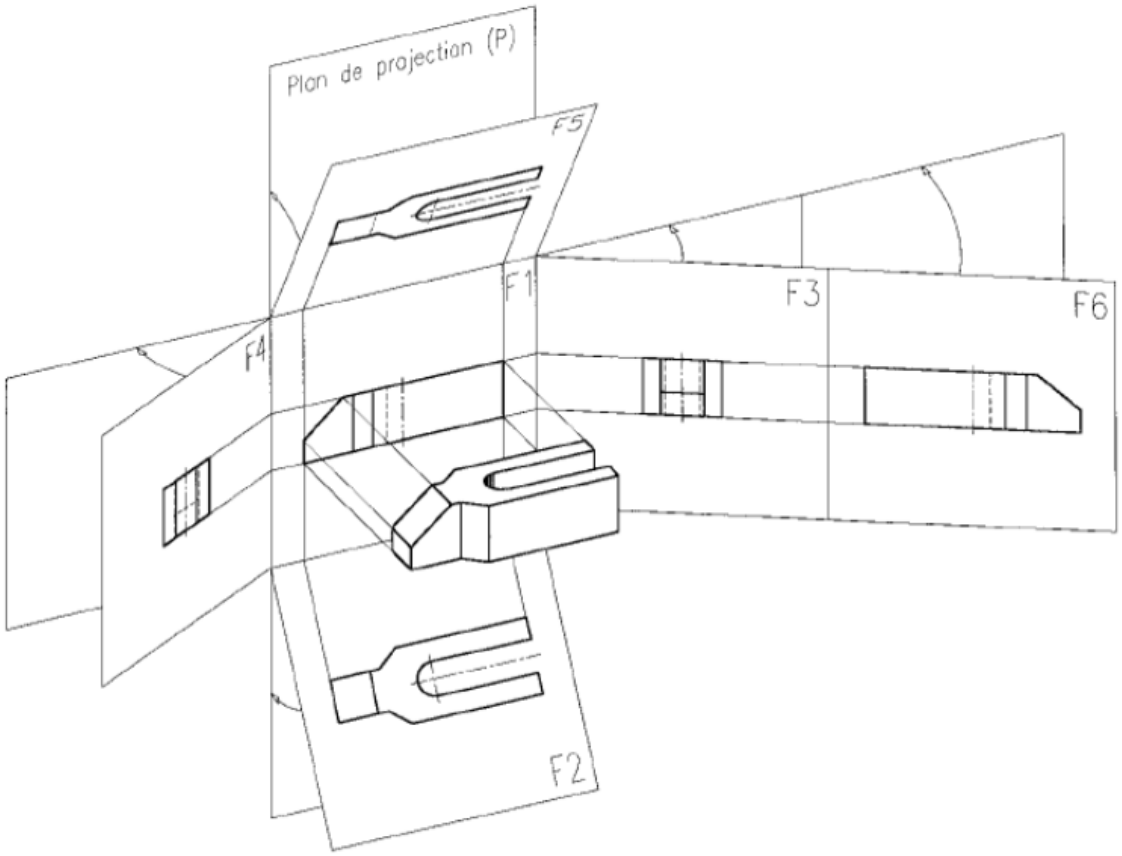
L'objet à représenter est supposé être placé à l'intérieur d'un cube dans sa position normale d'utilisation.

Les six faces du cube sont les six plans de projection de l'objet.

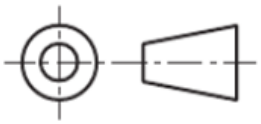
Le développement du cube autour de la vue de face (plan de projection F1) permet de définir la position des cinq autres vues.

La vue d'arrière est située indifféremment à droite de la vue de gauche ou à gauche de la vue de droite.

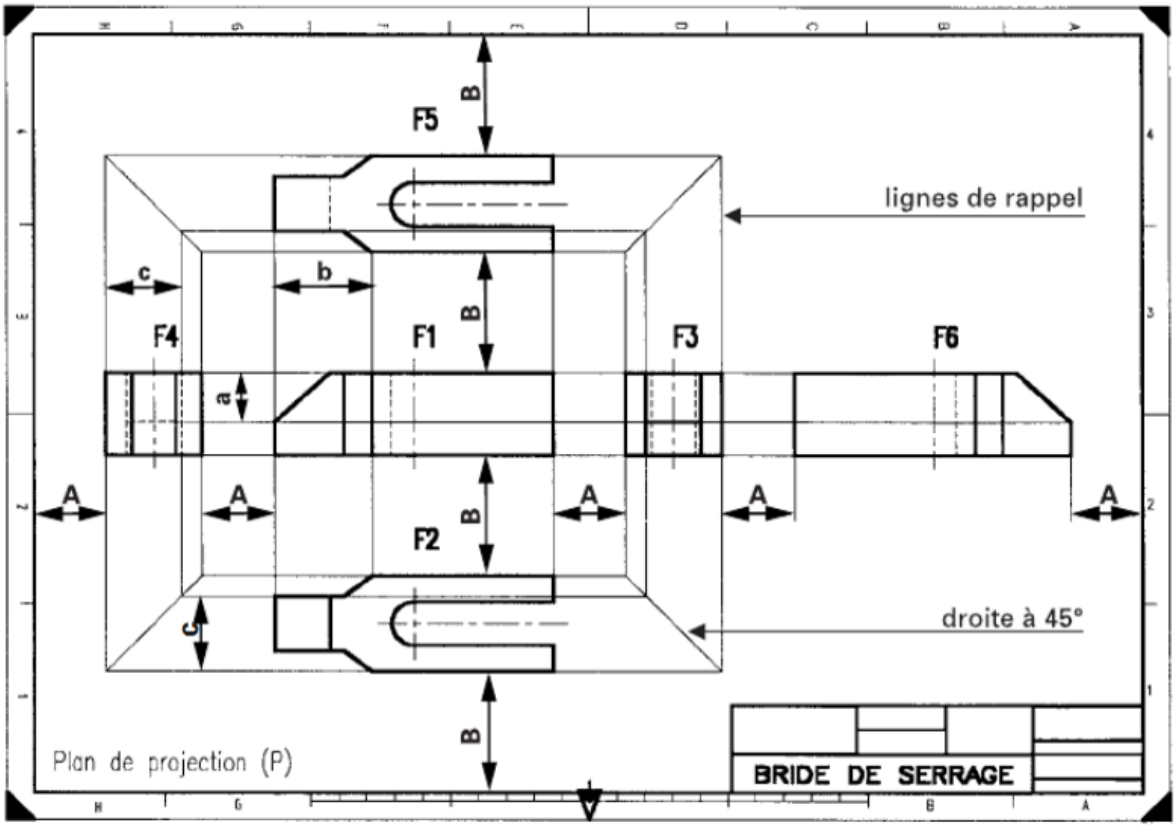




Remarque
La méthode du troisième dièdre, ou méthode de projection américaine, caractérisée par le symbole ci-contre, inverse la position des vues définie par la méthode européenne.



• Correspondance entre les vues



Les vues, construites à partir des plans de projection perpendiculaires entre eux, sont alignées les unes par rapport aux autres.

On définit les trois règles de correspondances suivantes :

– Correspondances horizontales
Une dimension verticale sur la vue de face (exemple **a**) se retrouve verticale sur les vues de droite, de gauche et d'arrière.

– Correspondances verticales
Une dimension horizontale sur la vue de face (exemple **b**) se retrouve horizontale sur les vues de dessus et de dessous.

– Correspondances en équerre ou à 90°
Une dimension horizontale sur la vue de gauche ou de droite (exemple **c**) se retrouve verticale sur les vues de dessus ou de dessous.

Remarques
– Les lignes de rappel et les droites à 45° sont des aides efficaces lors de la construction de l'esquisse du dessin.
– Les cotes **A** et **B** indiquent le positionnement des vues dans le format. Elles se déduisent des dimensions « hors tout » de la pièce.

• Choix des vues

Dans la plupart des cas, trois vues permettent de définir un objet (fig. 1).

Pour des objets simples, deux vues peuvent suffire (fig. 2).

Pour des objets de révolution, des plaques de faible épaisseur, une seule vue suffit (fig. 3).

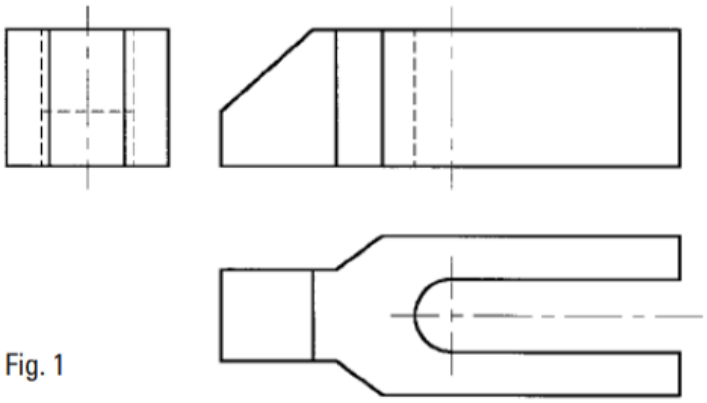


Fig. 1

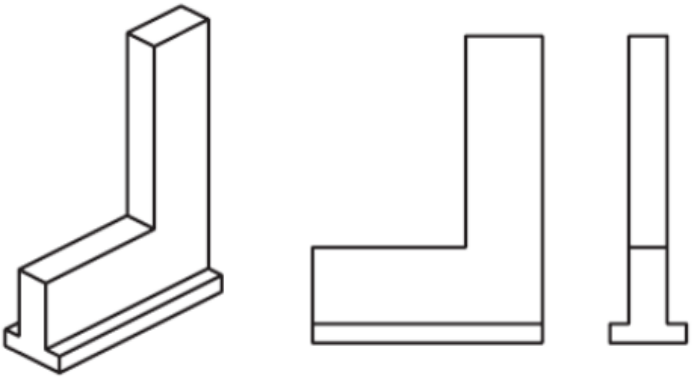


Fig. 2

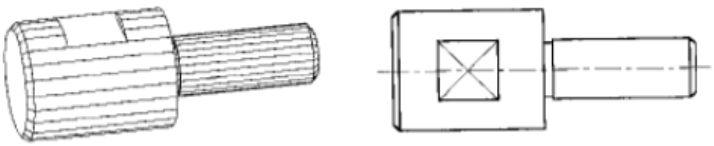
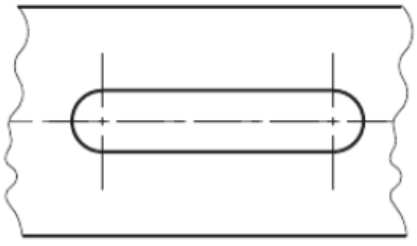


Fig. 3

• Vues particulières

Vue partielle

Pour représenter une partie d'un élément, on peut remplacer la vue complète par une partie de cette vue limitée par des traits continus fins tracés à main levée ou des traits en zigzag tracés à la règle.

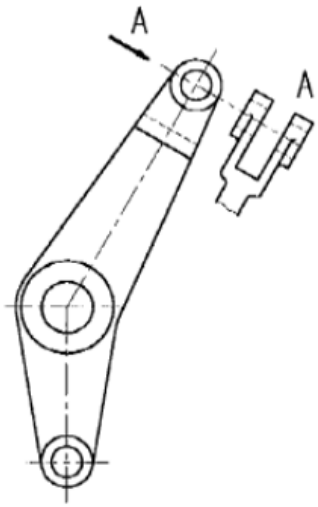


Vue auxiliaire (ou vue déplacée)

Les plans de projection usuels ne permettent pas toujours de décrire un objet.

Pour simplifier la lecture on utilise des vues auxiliaires entières ou partielles.

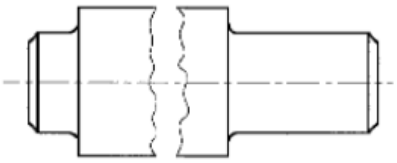
On repère la direction d'observation par une flèche et l'on désigne la vue correspondante.



• Vues particulières (suite)

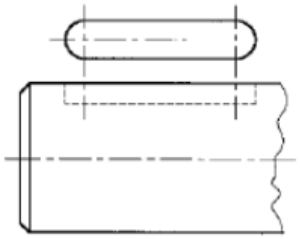
Vue interrompue

C'est une vue partielle utilisée dans le cas de pièces longues.
La forme étudiée doit être constante et définie par les formes représentées.
Les parties conservées sont rapprochées les unes des autres et limitées comme une vue partielle.



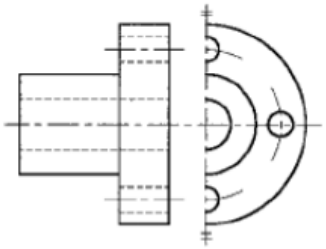
Vue locale

S'il n'y a pas de confusion possible, on peut représenter une forme par une vue locale au lieu d'une vue complète.
Cette vue sera reliée à la vue principale par un **trait mixte fin**.



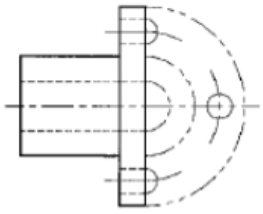
Demi-vue

Les pièces symétriques peuvent être représentées par une fraction de leur vue complète si il n'y a pas de risque d'ambiguïté.
La trace du plan de symétrie est repérée par **deux petits traits fins perpendiculaires à l'axe de symétrie**, représentés aux extrémités de cet axe.



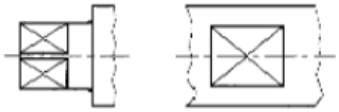
Rabattement

Le rabattement est une vue auxiliaire qui permet de montrer la forme d'une face perpendiculaire au plan de projection de la vue représentée.
Le rabattement évite une vue supplémentaire ; il sera tracé en **traits mixtes fins à deux tirets**.



Méplat sur surface de révolution

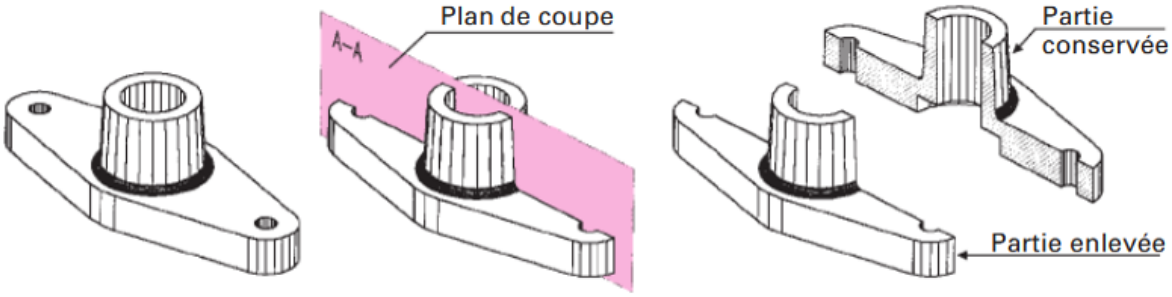
Pour représenter un méplat ou un carré sur une forme de révolution, on fait ressortir les faces planes en traçant leurs **diagonales en traits fins**.



COUPES

Afin de faciliter la lecture et la compréhension des dessins de pièces creuses ou des dessins d'ensembles montés, on peut utiliser les **coupes**.

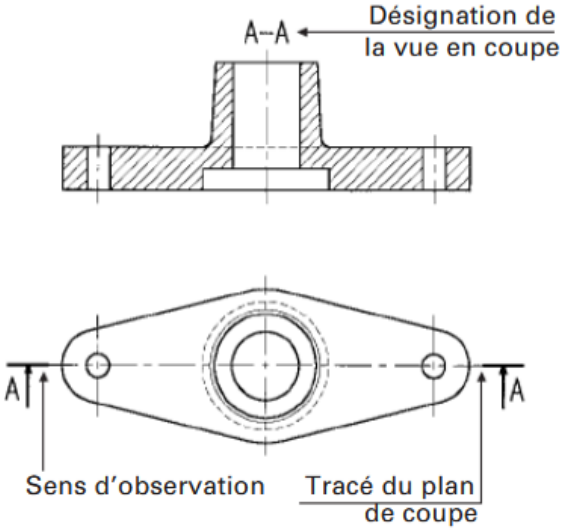
• Démarche pour l'exécution d'une coupe



Choisir un plan de coupe (**A-A**) et couper virtuellement la pièce suivant ce plan.
Ôter la partie choisie et représenter la partie restante suivant la méthode de projection orthogonale.
Une coupe est **une vue** représentant la fraction d'une pièce située dans le plan sécant et située en arrière de ce plan.

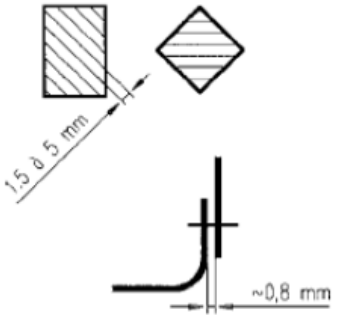
• Le plan de coupe

La **trace du plan de coupe** est indiquée sur une vue adjacente par un **trait mixte fin** renforcé par un **trait fort** aux extrémités.
Le **sens d'observation** est indiqué par des **flèches** en **trait fort**.
Le plan de coupe est repéré par **deux lettres majuscules en gras** situées à côté des flèches et au-dessus de la vue coupée.



• Hachures

Les hachures matérialisent l'endroit où la matière a été coupée.
Elles sont tracées en **traits fins continus** inclinés, en général, à 45° par rapport aux lignes générales du contour dans le cas de la définition d'une seule pièce.
Elles sont espacées d'un intervalle régulier fonction de la grandeur de la surface à hachurer.
Pour les pièces de faible épaisseur, on utilise un trait de l'épaisseur de la pièce ; on distinguera deux pièces voisines hachurées en laissant un liseré blanc d'environ 0,8 mm de large entre les pièces.
Les hachures ne traversent jamais un trait continu fort (sauf dans le cas de sections rabattues).
Les hachures ne s'arrêtent jamais sur un trait interrompu court.



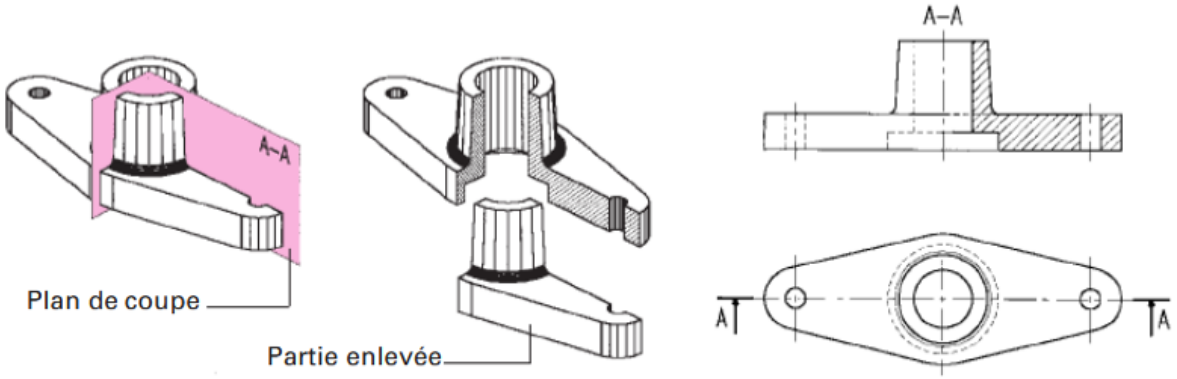
• Hachures (suite)

Dans le cas d'un dessin d'ensemble, de nombreux motifs de hachures peuvent être utilisés pour différencier les pièces.
Ces motifs ne peuvent en aucun cas préciser la nature des matériaux, mais par convention certains types de hachures pourront définir les familles des matériaux (alliages ferreux, alliages d'aluminium, de cuivre…).

Tous matériaux sauf ceux prévus ci-dessous	Matières plastiques ou isolantes	Bois en coupe longitudinale
Métaux et alliages légers	Isolant thermique	Béton
Cuivre et alliages de cuivre	Antifriction et toute matière coulée sur une pièce	Verre

• Demi-coupes

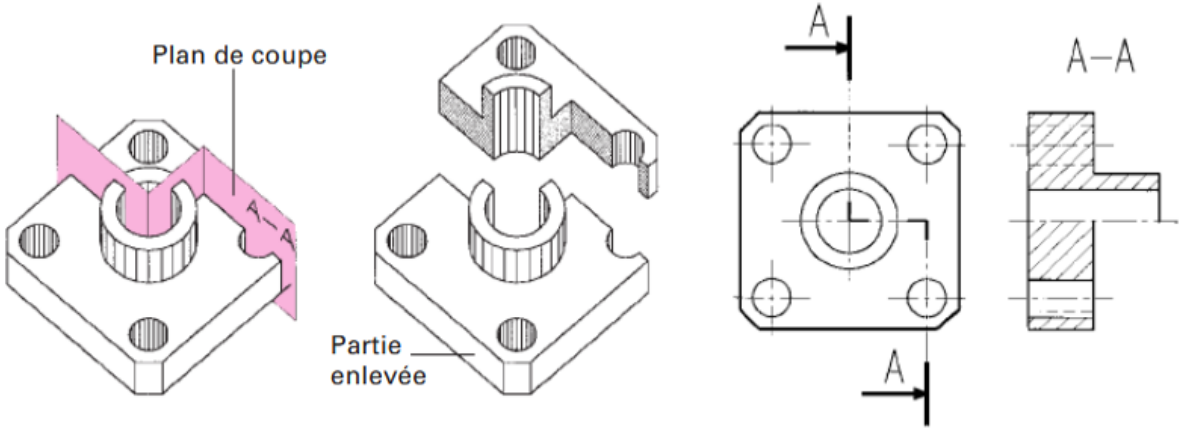
La moitié de la vue est représentée en coupe pour définir les contours et les formes intérieures et l'autre moitié de la vue en vue extérieure.



L'indication du plan de coupe reste inchangée.
Les deux demi-vues sont séparées par un **trait mixte fin**.

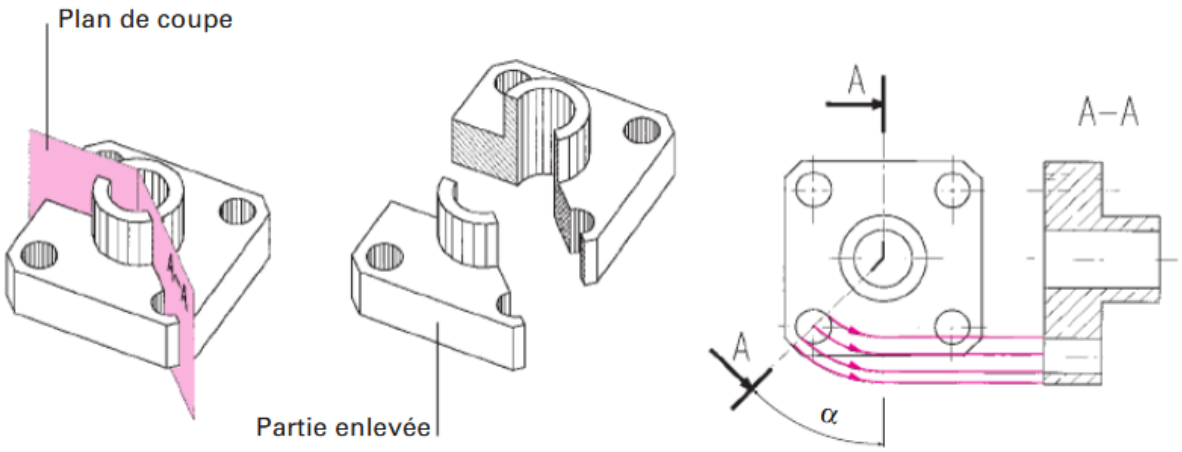
• Coupes brisées à plans parallèles

La trace du plan de coupe est toujours matérialisée par un trait mixte fin.
Le changement d'orientation du plan de coupe est défini par des « équerres » en trait fort.



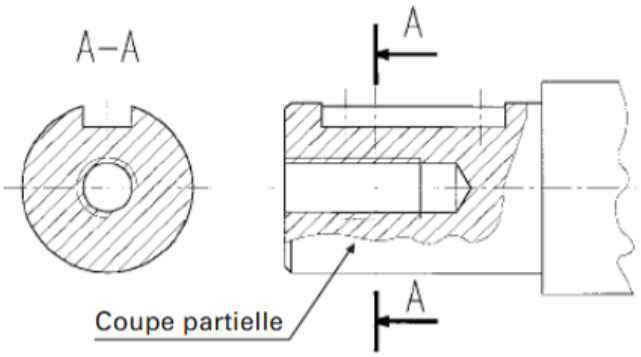
• Coupes brisées à plans sécants

À l'aide d'une rotation d'angle α, le plan de coupe est ramené dans le prolongement du plan de projection de la vue coupée.



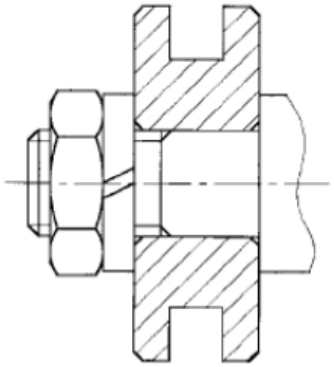
• Coupes partielles

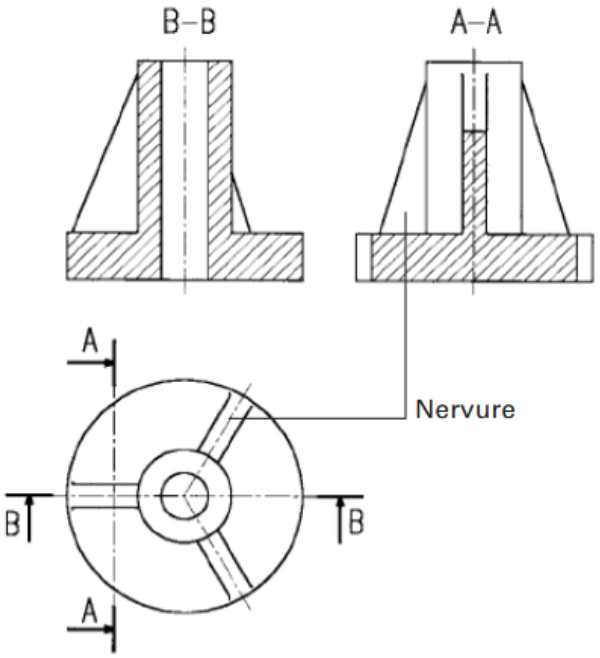
Les coupes partielles peuvent être utilisées pour mettre en évidence un détail.
Elles sont déterminées par un trait fin continu à main levée.
Il n'est pas utile d'indiquer le plan de coupe.



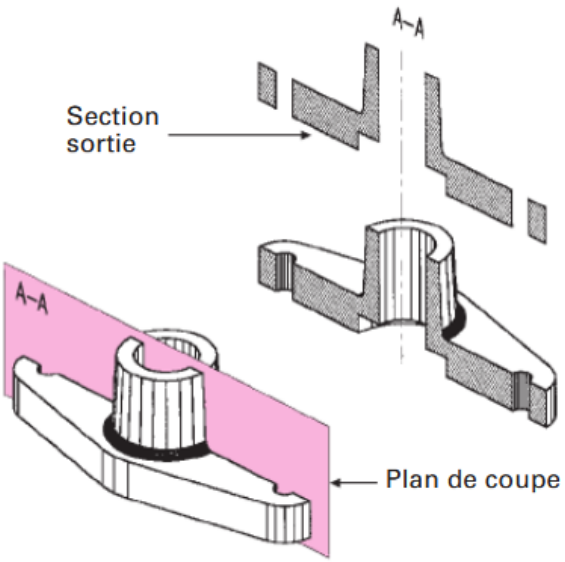
• Pièces non coupées

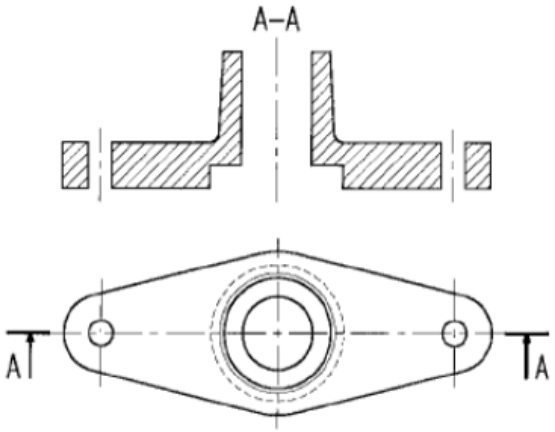
On ne coupe jamais une nervure par un plan parallèle à sa plus grande surface.
On ne coupe jamais longitudinalement des **pièces pleines** :
– arbres pleins,
– vis + écrou dans la plupart des cas,
– billes,
– clavettes,
– bras de volants.





Une **section** est une vue auxiliaire permettant de définir avec précision un contour ou un profil. Seule la partie située dans le plan de coupe est représentée.





La démarche, pour l'exécution d'une section, est la même que celle pour une coupe.
Remarque : il n'y aura **jamais de traits interrompus courts** dans une section.

• Sections rabattues

Méthode

Choix de la position du plan sécant **B-B**.
Rotation du plan sécant pour obtenir une projection frontale.
Dessiner la partie contenue dans le plan sécant en **trait fin continu** et hachurer la ou les surfaces obtenues.
Préciser le sens d'observation si il y a risque de confusion.

Remarques

Les hachures de la section peuvent couper un trait fort.
Ne pas représenter une section rabattue sur une pièce coupée.

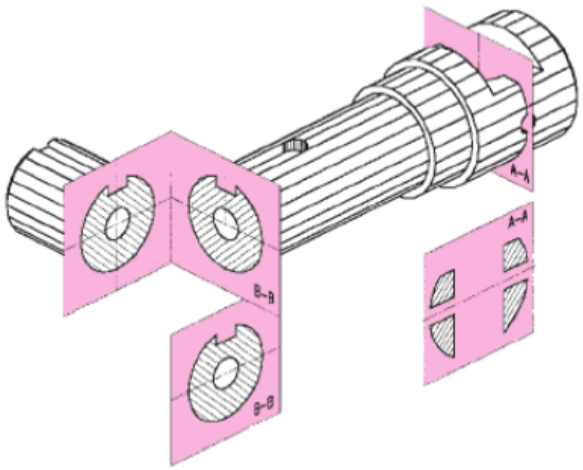
• Sections sorties

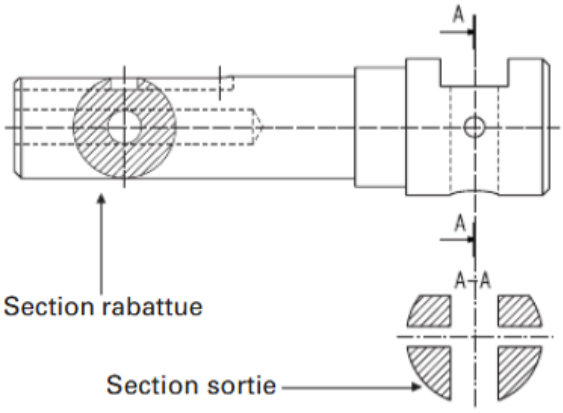
Méthode

Choix de la position du plan sécant **A-A**, repéré par sa trace, en **trait mixte fin renforcé aux extrémités**.
Translation du plan sécant contenant la section de la pièce.
Rotation du plan sécant autour d'un axe de la section pour obtenir une projection frontale.
Enlever la partie située en arrière du plan de coupe et représenter la partie contenue dans le plan sécant en **trait fort** et hachurer la ou les surfaces obtenues.
Désigner les sections par les lettres majuscules indiquées au plan sécant.

Remarque

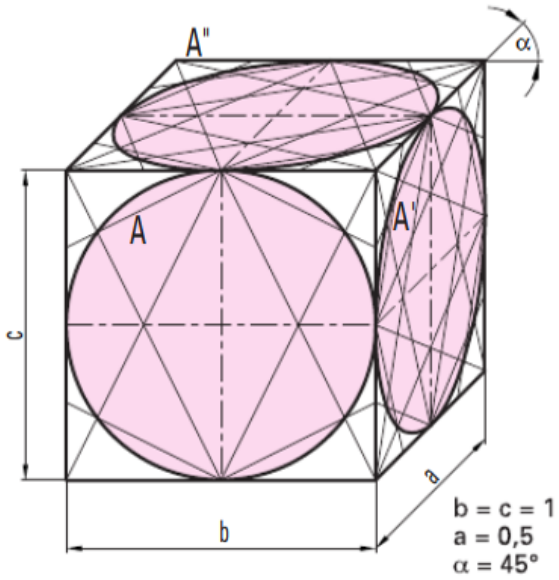
Aucun trait interrompu court n'apparaîtra dans une section sortie.



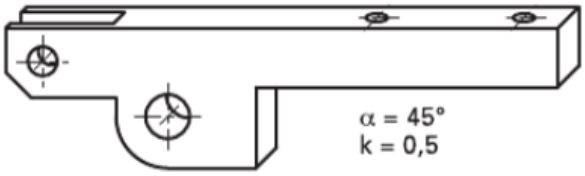


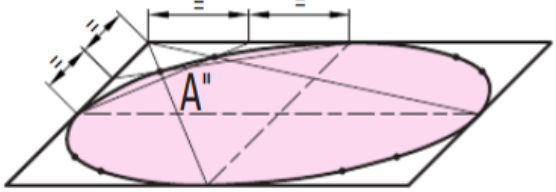
• Perspective cavalière

C'est une projection oblique, parallèlement à une direction donnée, sur un plan de projection parallèle à une face de l'objet.
Les faces parallèles au plan de projection se projettent en vraie grandeur (**b** = **c** = **1**).
Les arêtes perpendiculaires au plan de projection se projettent suivant des droites parallèles nommées **fuyantes** :
– angle des fuyantes : **α** = 45°
– rapport de réduction sur les fuyantes : **k** = 0,5
Sur les faces non parallèles au plan de projection, les cercles deviennent des **ellipses**.



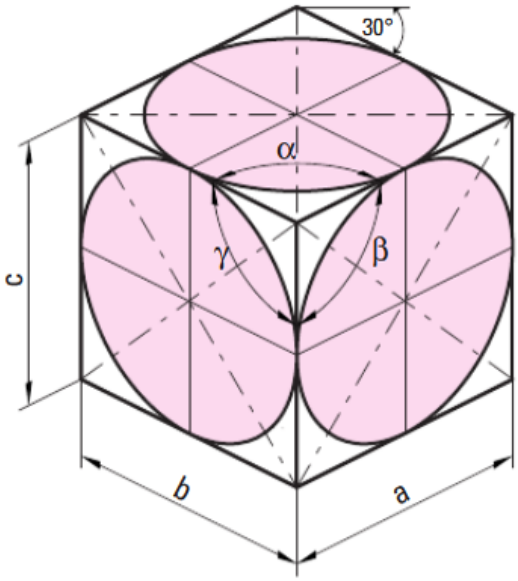
Méthode de tracé des ellipses

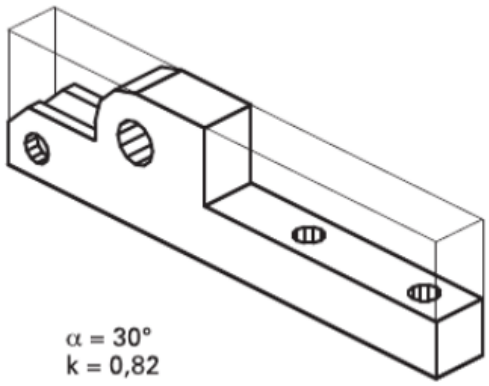




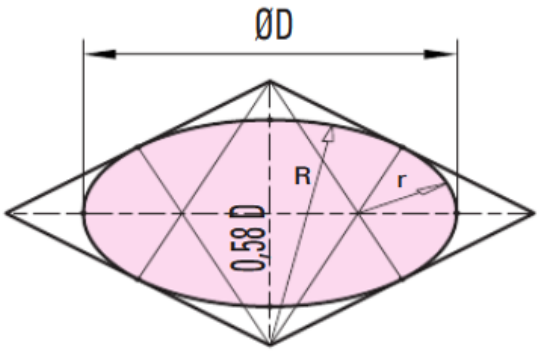
• Perspective isométrique

Les axes isométriques sont à 120° les uns des autres (**α** = **β** = **γ** = 120°).
Les dimensions parallèles aux axes isométriques sont multipliées par k = 0,82.
Les cercles apparaissent en projection suivant des ellipses.
Les grands axes sont égaux aux diamètres **D** des cercles que les ellipses représentent.
Les petits axes sont égaux à 0,58 **D**.

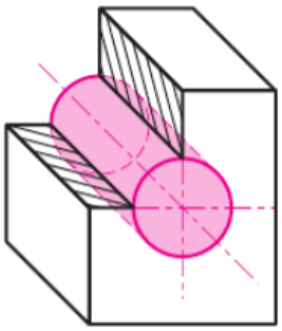
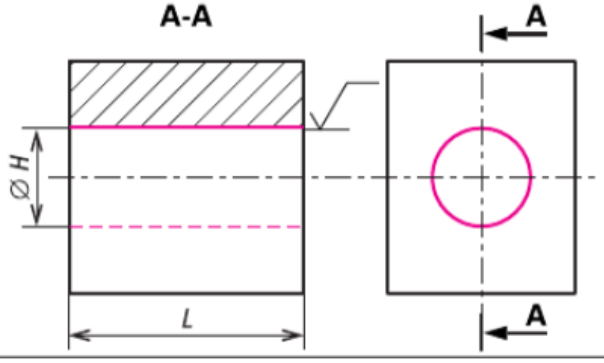
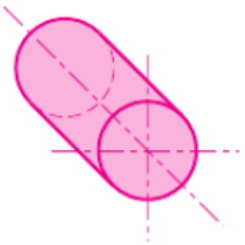
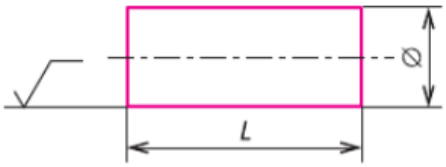
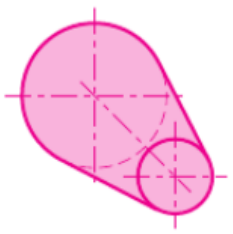
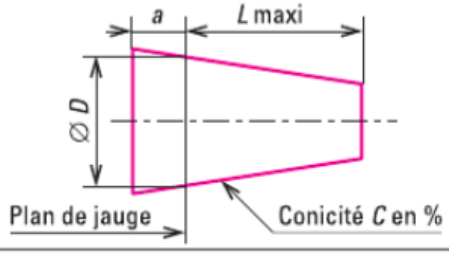
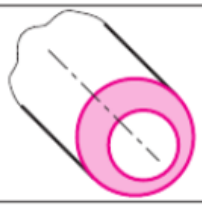
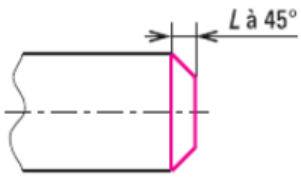
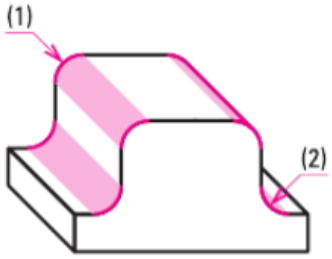
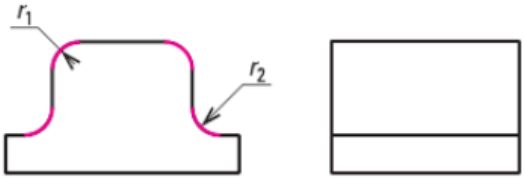
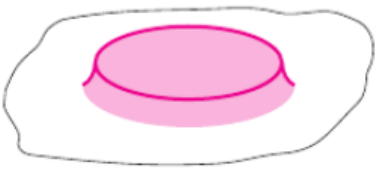
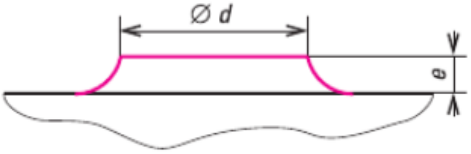
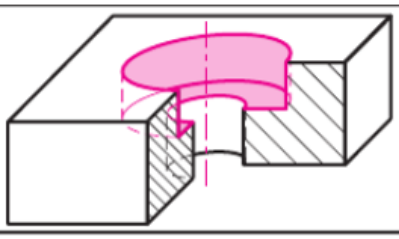
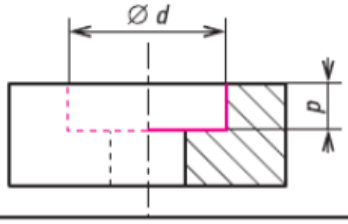




Méthode de tracé des ellipses

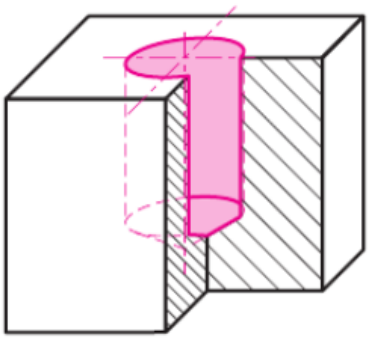
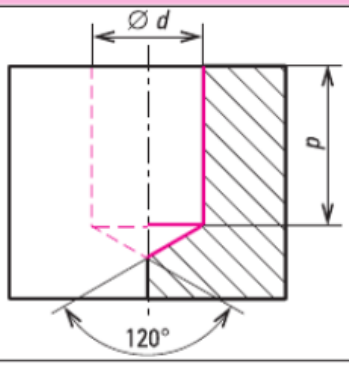
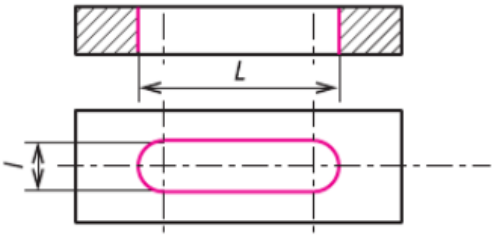
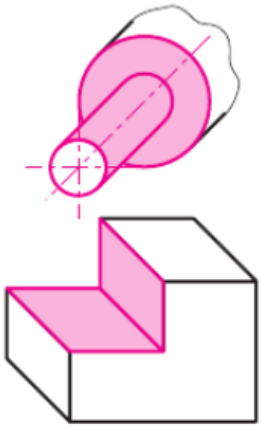
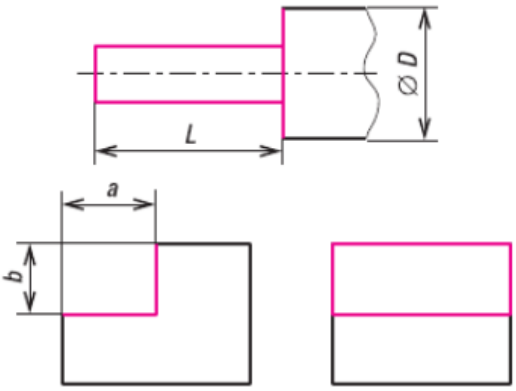
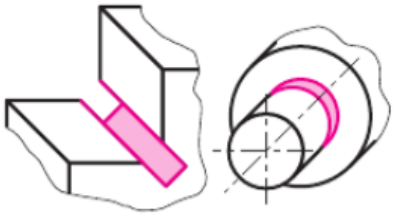
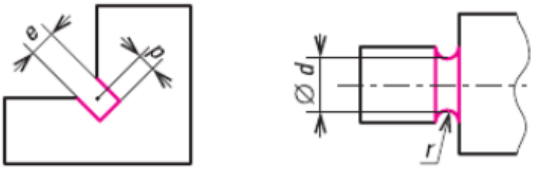
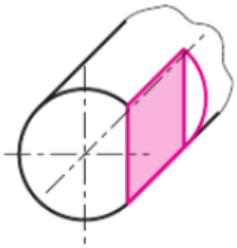
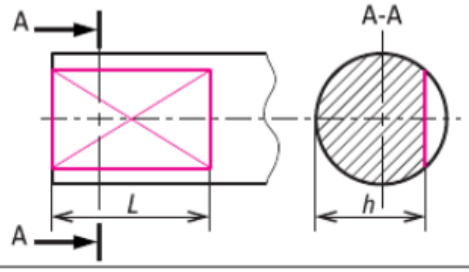
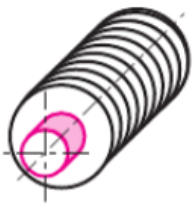
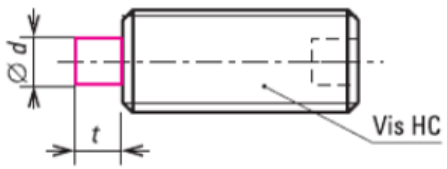


• Formes géométriques usuelles

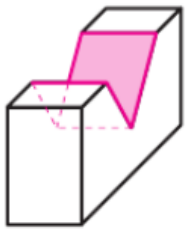
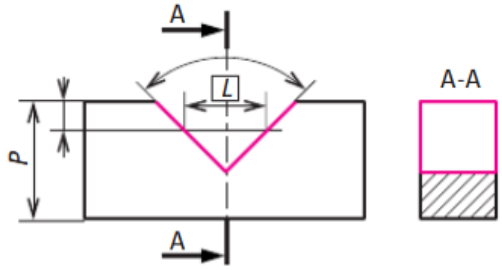
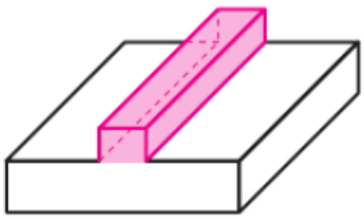
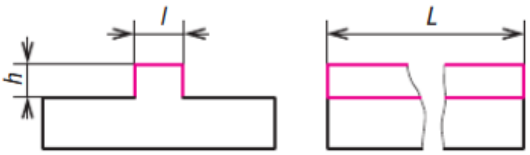
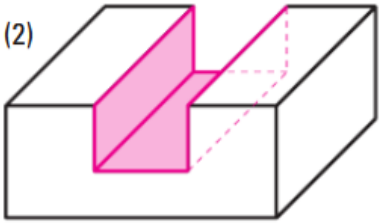
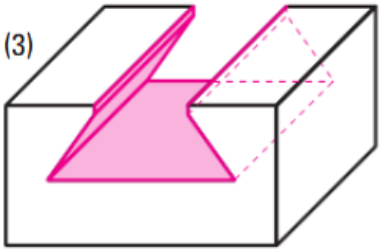
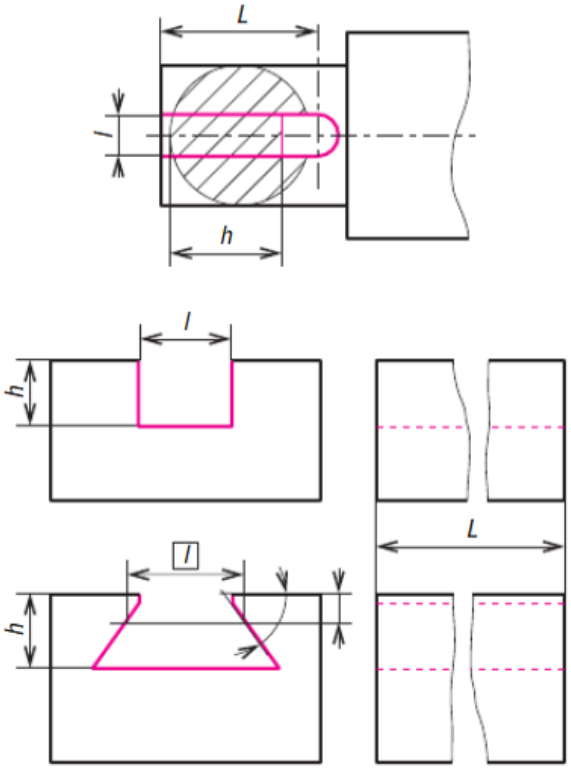
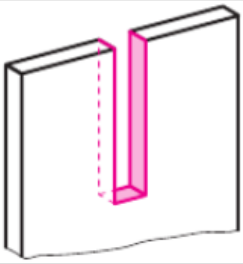
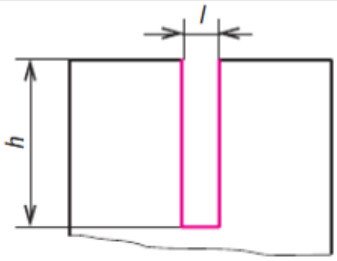
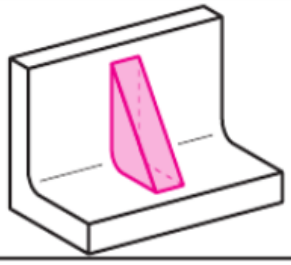
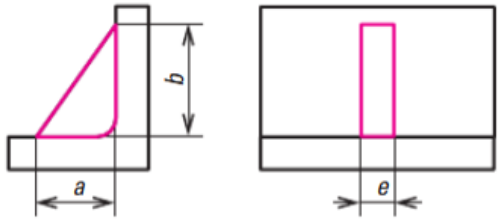
Désignation et définition succincte	Visualisation 3 D	Représentation 2 D
ALÉSAGE Cylindre droit de révolution intérieur précis défini selon normes ISO. (∅ *H*) alésage normal.		
ARBRE Cylindre droit de révolution extérieur précis s'ajustant sur l'alésage (normes ISO). (∅ selon ajustement : voir cotation fonctionnelle).		
CÔNE D'EMMANCHEMENT Cône droit de révolution assurant un centrage précis.		
CHANFREIN Petit cône permettant de supprimer une arête vive.		
ARRONDI (1) CONGÉ (2) Portion de cylindre droit de révolution : • supprimant une arête vive (1) • raccordant deux surfaces (2) sur pièces moulées.		
BOSSAGE Volume en saillie permettant de limiter une surface usinée sur pièces moulées.		
LAMAGE Logement de forme cylindrique à fond plat destiné, en général, à « noyer » une tête de vis CHC.		

Règles et méthodes d'élaboration des dessins de définition

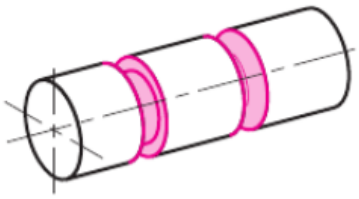
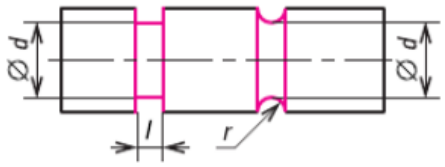
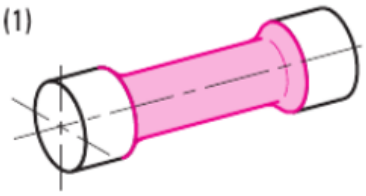
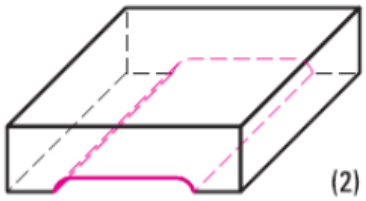
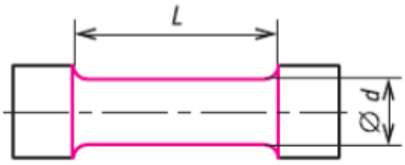
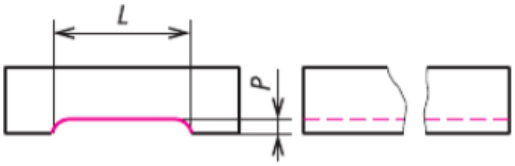
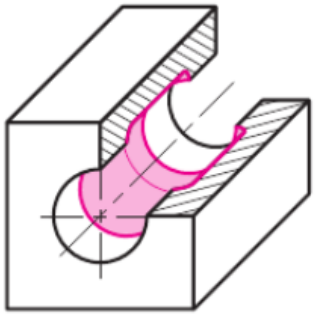
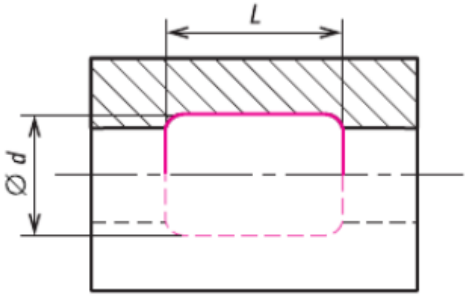
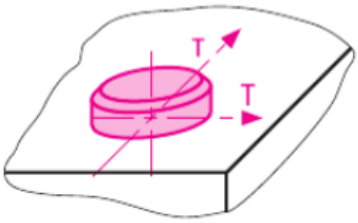
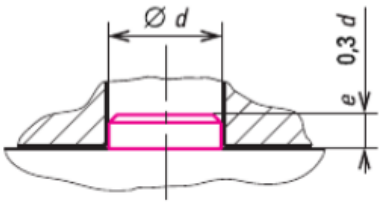
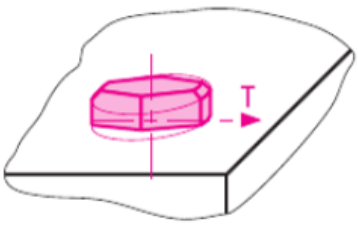
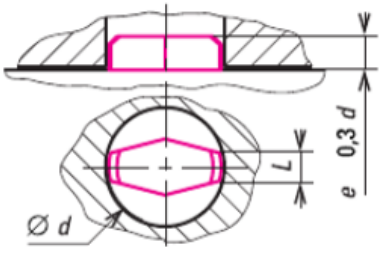
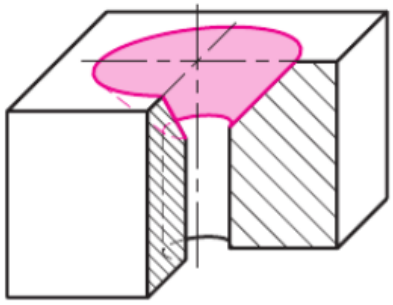
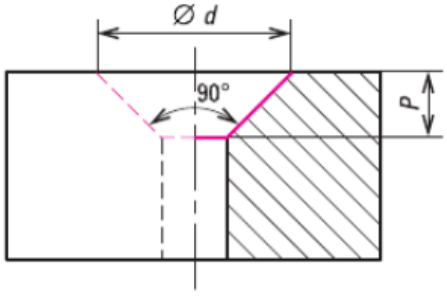
• Formes géométriques usuelles (suite)

Désignation et définition succincte	Visualisation 3 D	Représentation 2 D
TROU BORGNE Cylindre droit de révolution intérieur non débouchant obtenu généralement par perçage.		
BOUTONNIÈRE (ou trou oblong, ou lumière) Cavité composée de deux plans parallèles raccordés par deux demi-cylindres de révolution.		
ÉPAULEMENT Composé, en général, de deux plans ou d'un plan et d'une surface cylindrique implicitement perpendiculaires. Ces surfaces peuvent servir d'appui ou de butées.		
DÉGAGEMENT Petit évidement à l'intersection de deux surfaces pour assurer la liaison.		
MÉPLAT Plan coupant un cylindre droit de révolution parallèlement à son axe.		
TÉTON Saillie de forme cylindrique de petites dimensions.		

• Formes géométriques usuelles (suite)

DéSIGNaTIoN eT défINITIoN SuCCINCTe	VISuaLISaTIoN 3 D	RepRéSeNTaTIoN 2 D
ENCOCHE Entaille en forme de V.		
LANGUETTE Tenon de grande longueur s'ajustant sur une rainure pour assurer une liaison glissière.		
RAINURES Entailles de différentes formes et de différentes dimensions selon le rôle fonctionnel. (1) Rainure de clavetage. (2) Rainure recevant un tenon ou une languette. (3) Queue d'aronde rainure en forme de trapèze pour une liaison glissière.	(1) (2)  (3) 	
SAIGNÉE Entaille profonde et de faible largeur.		
NERVURE En général, volume à base triangulaire rapporté ou moulé sur une pièce en équerre pour augmenter sa rigidité.		

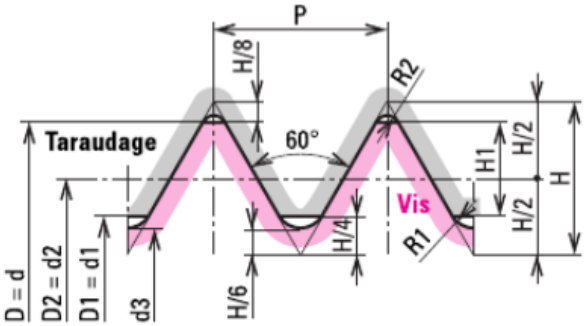
• Formes géométriques usuelles (suite)

Désignation et définition succincte	Visualisation 3 D	Représentation 2 D
GORGE Dégagement de faibles dimensions.		
ÉVIDEMENT Circulaire (1) ou sur semelle (2) Dégagement de plus ou moins grandes dimensions permettant de réduire l'étendue de la surface d'appui.	(1)  	 
CHAMBRAGE Évidement intérieur permettant de réduire la longueur de portée d'un alésage.		
MACARON Centreur cylindrique de faible épaisseur permettant de positionner une pièce selon deux translations.		
LOCATING Centreur cylindrique dégagé de faible épaisseur permettant de positionner une pièce selon une translation.		
FRAISURE Petit cône droit de révolution intérieur, utilisé en général pour noyer une vis FS.		

Un filetage est une rainure hélicoïdale réalisée sur un cylindre (**tige filetée**) ou à l'intérieur d'un alésage (**trou taraudé**).
Un ensemble fileté permet d'assurer une liaison complète rigide démontable entre pièces et permet de transformer un mouvement de rotation en mouvement de translation ou inversement (**liaison hélicoïdale**).

• Filetage métrique-Profil ISO — NF E 03-001

C'est le profil le plus utilisé surtout pour la visserie.
Le profil ISO est défini à partir d'un triangle équilatéral.



Diamètre nominal	D = d
Pas du filetage	P (normalisé)
Hauteur du filetage	H = 0,866 P
Diamètre sur flanc	D2 = d2 = d – 3/4 H = d – 0,649 5 P
Diamètre intérieur du taraudage	D1 = d1 = d2 – 2 (H/2 – H/4) = d – 1,082 5 P
Diamètre intérieur du filetage	d3 = d2 – 2 (H/2 – H/6) = d – 1,226 8 P
Hauteur utile du filetage	H1 = (D – D1)/2 = 0,541 2 P
Rayon à fond de filet	R1 = H/6 = 0,144 3 P
Rayon à fond de taraudage	R2 = H/12 = 0,0721 5 P

Désignation d'un filetage ISO

Taraudage — NF E 03-051

M 10 – 4 H 5 H
- 4 H 5 H : Classe de tolérance du filetage
- M 10 : Diamètre nominal
- Filetage ISO

Filetage extérieur
M 16 – 6 g
- 6 g : Classe de tolérance du filetage
- M 16 : Diamètre nominal
- Filetage ISO

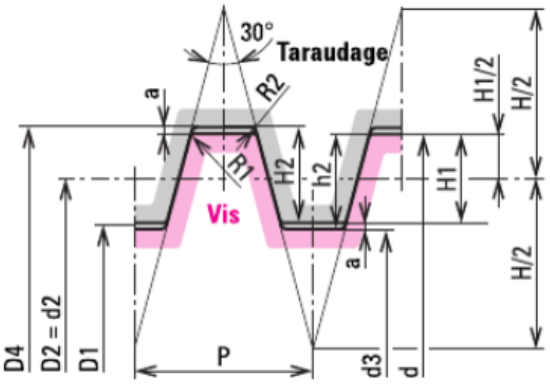
Classes de tolérances pour filetage extérieur				
Longueur en prise		Normale	Longue	Courte
Qualité fine		4 h	5 h 4 h	3 h 4 h
Qualité moyenne	avec écart	6 g	7 g 6 g	5 g 6 g
	à écart nul	6 h	7 h 6 h	5 h 6 h
Qualité grossière		8 g	9 g 8 g	–

Classes de tolérances pour filetage intérieur			
Longueur en prise	Normale	Longue	Courte
Qualité fine	4 H 5 H	6 H	4 H
Qualité moyenne	6 H	7 H	5 H
Qualité grossière	7 H	8 H	–

d ou D	Filetage à pas gros (boulonnerie et autres applications courantes) - Tolérances 6H/5 g (µ)								Filetage à pas fins
	Pas	Section du noyau mm²	$d_2 = D_2$	Tolérances sur d_2 Maxi / Mini	Tolérances sur D_2 Maxi / Mini	D_1	Tolérances sur D_1 Maxi / Mini		Pas fins recommandés
1,6	0,35	1,08	1,373	– 19 / – 82	+ 85 / 0	1,221	+ 100	0	0,2
2	0,4	1,79	1,740	– 19 / – 86	+ 90 / 0	1,567	+ 112	0	0,25
2,5	0,45	2,98	2,208	– 20 / – 91	+ 95 / 0	2,013	+ 125	0	0,35
3	0,5	4,47	2,675	– 20 / – 95	+ 100 / 0	2,459	+ 140	0	0,35
4	0,7	7,75	3,545	– 22 / – 112	+ 118 / 0	3,242	+ 180	0	0,5
5	0,8	12,7	4,480	– 24 / – 119	+ 125 / 0	4,134	+ 200	0	0,5
6	1	17,9	5,350	– 26 / – 138	+ 150 / 0	4,918	+ 235	0	0,75
8	1,25	32,9	7,188	– 28 / – 146	+ 160 / 0	6,647	+ 265	0	0,75-1
10	1,5	52,3	9,026	– 32 / – 164	+ 180 / 0	8,376	+ 300	0	0,75-1-1,25
12	1,75	76,2	10,863	– 34 / – 184	+ 200 / 0	10,106	+ 335	0	1-1,25-1,5
16	2	144	14,701	– 38 / – 198	+ 212 / 0	13,835	+ 375	0	1-1,5
20	2,5	225	18,376	– 42 / – 212	+ 224 / 0	17,294	+ 450	0	1-1,5-2
24	3	324	22,051	– 48 / – 248	+ 265 / 0	20,752	+ 500	0	1-1,5-2
30	3,5	519	27,727	– 53 / – 265	+ 280 / 0	26,211	+ 560	0	1-1,5-2

• Filetage trapézoïdal — NF E 03-615

Le filetage trapézoïdal est surtout utilisé pour les vis de transformation de mouvement (système **vis-écrou**) avec efforts importants (vis mère de tour, étau...).



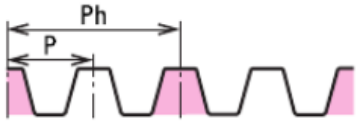
Diamètre nominal (diamètre extérieur de la vis)	d
Hauteur du triangle de définition	H = 1,866 P
Hauteur du filetage en contact	H1 = 0,5 P
Hauteur du filetage de la vis (h2) ou du taraudage (H2)	H2 = h2 = H1 + a = 0,5 P + a
Diamètre sur flancs	D2 = d2 = d – H1 = d – 0,5 P
Diamètre du noyau de la vis	d3 = d – 2 h 2 = d – P – 2 a
Diamètre intérieur de l'écrou (sommet du taraudage)	D1 = d – 2 H1 = d – P
Diamètre extérieur de l'écrou (fond de taraudage)	D4 = d + 2 a
Vide à fond de filet	a : voir tableau ci-contre
Rayon au sommet	R1 maxi = 0,5 a
Rayon au fond des filets	R2 maxi = a

Valeurs du vide à fond de filet

P (mm)	1,5	2 à 5	6 à 12	14 à 40
a (mm)	0,15	0,25	0,5	1

Les filetages à un seul filet, définis dans le tableau ci-dessus, sont en principe **irréversibles.**
Pour les vis à plusieurs filets, il n'y a plus irréversibilité dès que le pas hélicoïdal ≥ 0,2 d.

Profil trapézoïdal à 2 filets



Définition des pas

Ph : pas hélicoïdal (avance axiale par tour)
P : pas du profil
– vis à un filet : **Ph = P**
– vis à n filets : **Ph = n.P**

Définition des pas en fonction du diamètre nominal NF E 03-616

d		P
8	(9)	**1,5**
10	(11)	(1,5)-**2**
12	(14)	(1,5)-**2**
16	(18)	(2)-**3**
20	(22)	(2)-**3**-(4)
25	(28)	(3)-**4**-(5)
32	(36)	(4)-**5**-(6)
40	(45)	(4)-**6**-(8)
50	(56)	(5)-**8**-(10)
63	(70)	(5)-**8**-(12)
80	(90)	(5)-**10**-(16)
100	(110)	(6)-**12**-(20)

Les valeurs entre ( ) sont à éviter

Tolérances

Tolérances	Écrou	Vis
Qualité moyenne	7 H	7 e
Qualité grossière	8 H	8 e

Désignation d'un filetage trapézoïdal

Filetage à un filet

Tr 32 × 5 - 7e

- Tr : Filetage trapézoïdal
- 32 : Diamètre nominal
- 5 : Pas du profil
- 7e : Classe de tolérance du filetage

Filetage à plusieurs filets

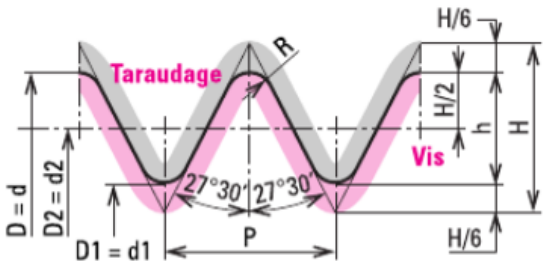
Tr 25 × 12 P4 - 7e

- Tr : Filetage trapézoïdal
- 25 : Diamètre nominal
- 12 : Pas hélicoïdal Ph
- P4 : Pas P
- 7e : Classe de tolérance du filetage

• Filetage GAZ — NF E 03-004/005

Le filetage GAZ est utilisé pour des raccords d'installation utilisant les fluides gazeux ou liquides.

Profil GAZ cylindrique



Dans le cas d'un **assemblage non étanche**, la vis et le taraudage ont un profil cylindrique.

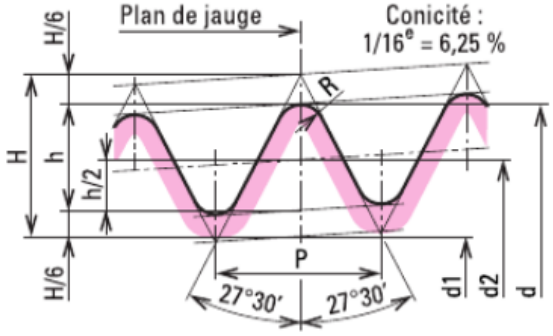
$H = 0{,}960491 \times P$
$h = 0{,}640327 \times P$
$R = 0{,}137329 \times P$

Désignation des filetages GAZ non étanches

G 1 1/2 A NF E 03-005

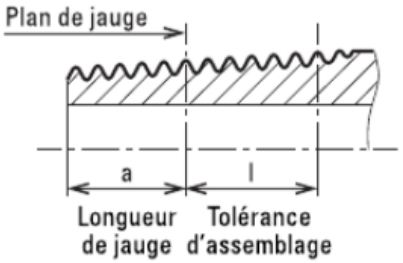
- NF E 03-005 : Norme de référence
- A : Classe de tolérance (A ou B) — A plus précis que B
- 1 1/2 : Dimension du tube en pouces
- G : Filetage GAZ (vis ou taraudage)

Profil GAZ conique



Dans le cas d'un **assemblage étanche**, le profil de la vis est conique et celui du taraudage est cylindrique. L'étanchéité est assurée par le contact entre filets et une adjonction éventuelle de pâte à joint.

$H = 0{,}960237 \times P$
$h = 0{,}640327 \times P$
$R = 0{,}137278 \times P$



1 pouce = 25,4 mm

Désignation des filetages GAZ étanches

Taraudage cylindrique

Rp 1 1/2 NF E 03-004

- NF E 03-004 : Norme de référence
- 1 1/2 : Dimension de l'alésage en pouces
- Rp : Taraudage GAZ cylindrique

Filetage extérieur conique

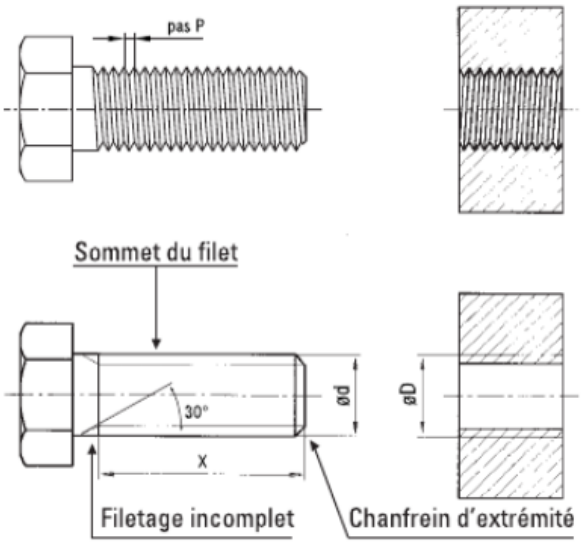
R 1 1/2 NF E 03-004

- NF E 03-004 : Norme de référence
- 1 1/2 : Dimension du tube en pouces
- R : Filetage GAZ conique

Dénomination	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2
Pas	0,907	1,337	1,337	1,814	1,814	2,309	2,309	2,309	2,309	2,309	2,309	2,309
Nb de pas par pouce	28	19	19	14	14	11	11	11	11	11	11	11
d = D	9,73	13,15	16,66	20,96	26,44	33,25	41,91	47,80	59,61	75,18	87,88	100,3
d1 = D1	8,56	11,44	14,95	18,63	24,11	30,29	38,95	44,84	56,65	72,22	84,92	97,37
d2 = D2	9,14	12,30	15,80	19,79	25,27	31,77	40,43	46,32	58,13	73,70	86,40	98,85
a	4	6	6,4	8,2	9,5	10,4	12,7	12,7	15,9	17,5	20,6	22,2
l mini	2,5	3,7	3,7	5	5	6,4	6,4	6,4	7,5	9,2	9,2	9,2

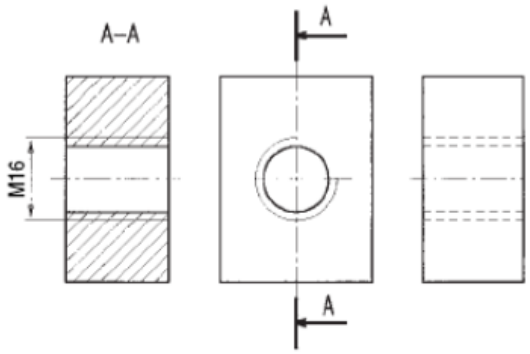
• Représentation des éléments filetés

NF E 04-012-ISO 6410

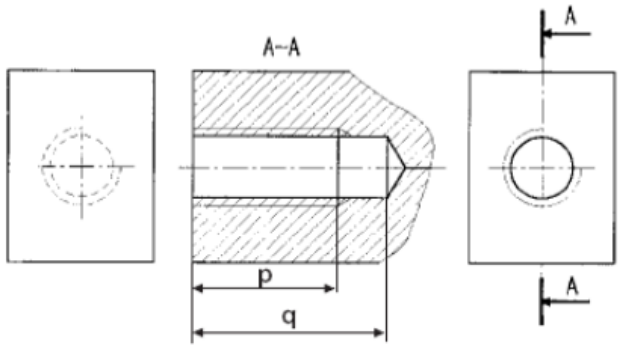


Un élément fileté est défini par son diamètre nominal, **d** pour une tige filetée, **D** pour un trou taraudé et **p** pour le pas du filetage.
Pour simplifier la représentation :
– le **sommet du filet** est représenté en **trait continu fort**,
– le **fond du filet** est représenté en trait continu fin,
– la **fin du filetage** est représentée par un **trait continu fort**,
– les **filets incomplètement formés** sont représentés par un **trait fin incliné à 30°** par rapport au contour apparent,
– les vis dont le filetage est usiné présentent un chanfrein, ce qui n'est pas le cas pour les vis « roulées » (mode d'obtention).

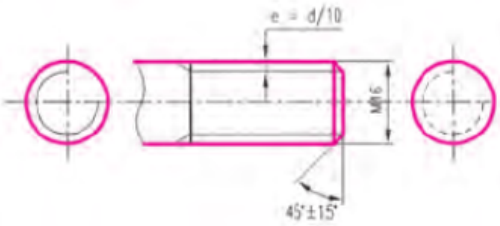
Trou taraudé débouchant



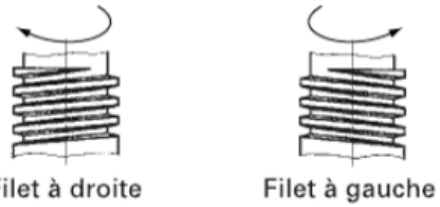
Trou taraudé borgne

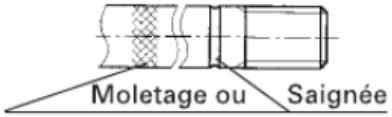


Tige filetée



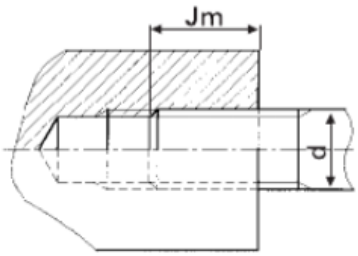
Repérage d'un filetage à gauche





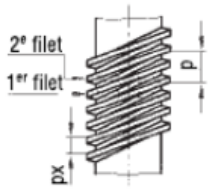
Assemblage d'éléments filetés

Les filetages extérieurs cachent toujours les filetages intérieurs.
Dans l'acier :
Jm = d.
Dans la fonte et les alliages de cuivre :
Jm = 1,5 d.
Dans l'aluminium et ses alliages :
Jm = 2 d.



Vis à plusieurs filets

px : pas axial
p : pas de l'hélice du filet



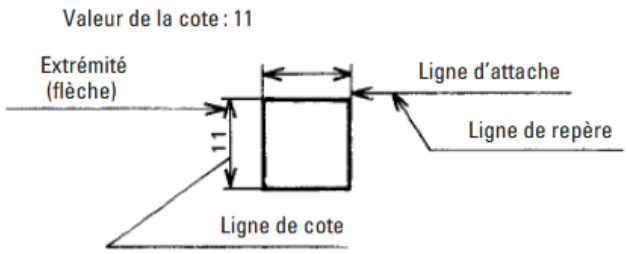
p = N . px

N : nb de filets

Déplacement axial par tour de vis

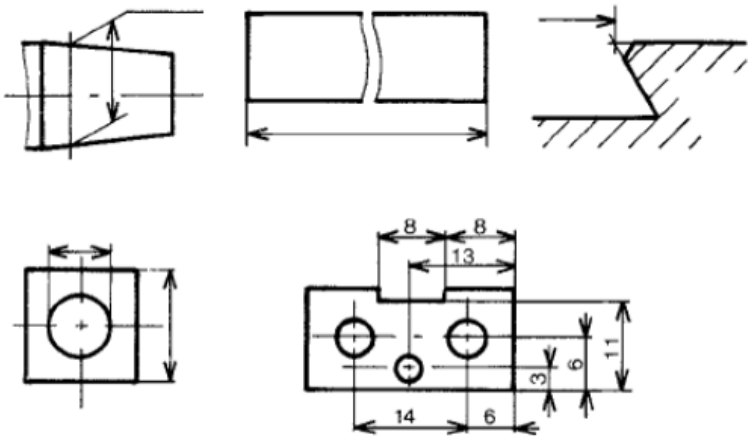
Déplacement/tour = N . p

• Inscription



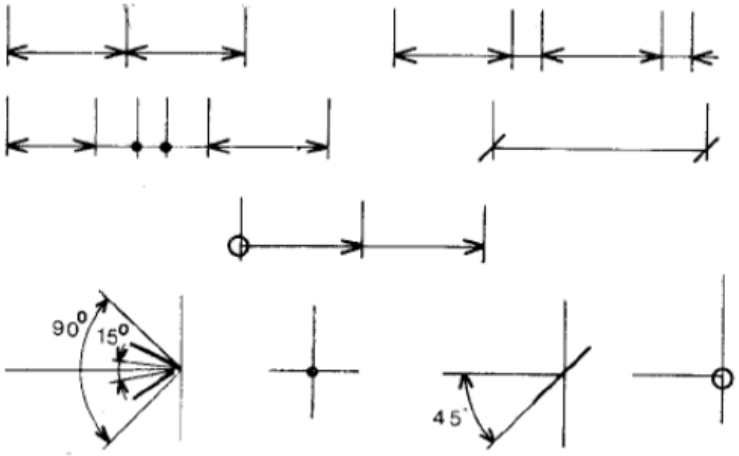
Les cotes doivent être placées sur les vues ou coupes qui représentent le plus clairement les éléments correspondants.
Les lignes d'attache, de cote et de repère sont en traits continus fins.
Les lignes de cotes doivent être parallèles à l'élément coté.

• Lignes d'attache et lignes de cote



Les lignes de cote se référant à un élément représenté en vue interrompue sont tracées sans interruption.
Les lignes d'attache doivent être prolongées légèrement au-delà des lignes de cote.
Un axe peut être utilisé comme ligne d'attache ; son prolongement peut être tracé comme une ligne d'attache.
Les intersections de lignes de cote doivent être évitées. Toutefois, en cas d'impossibilité, elles ne doivent pas être interrompues.

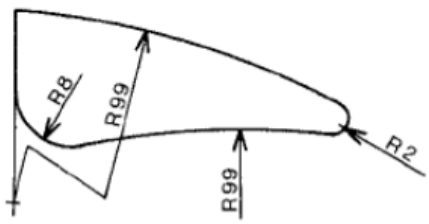
• Extrémités des cotes - Flèches - Points - Barres obliques - Cercles d'origine commune



15° ≤ α ≤ 90°; L proportionnelle au dessin

Les flèches doivent être représentées à l'intérieur des lignes de cote.
Par manque de place, elles peuvent être reportées à l'extérieur.
Dans le cas d'une cotation en série, les barres ou les flèches situées à la jonction de deux cotes peuvent être, si l'espace est très limité, remplacées par des points.
Quatre types d'extrémités :
– la flèche,
– le point,
– la barre oblique,
– le cercle d'origine commune.

• Cotation d'un rayon

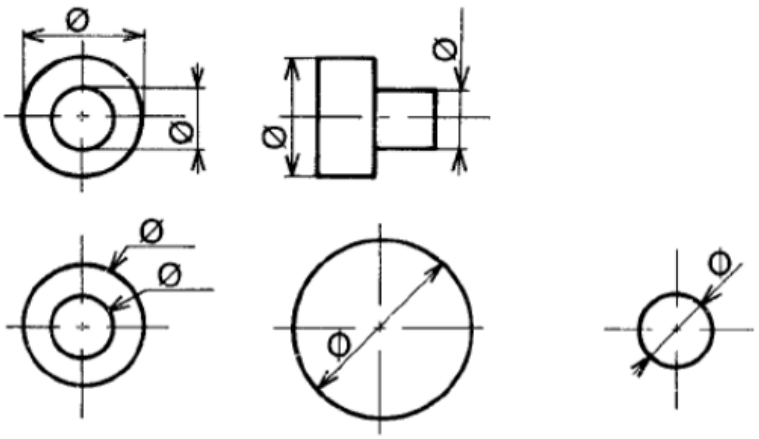


Pour coter un rayon, on doit tracer une ligne de cote ayant pour direction le rayon et terminée par une flèche pointée sur l'arc du cercle.
Ligne et flèche sont normalement situées à l'intérieur des cercles, sauf pour les faibles rayons.

NF E 04-521
ISO 129

EXÉCUTION GRAPHIQUE (suite)

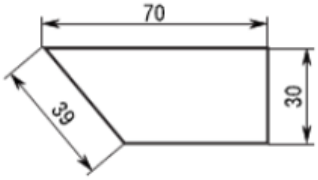
• Cotation des diamètres



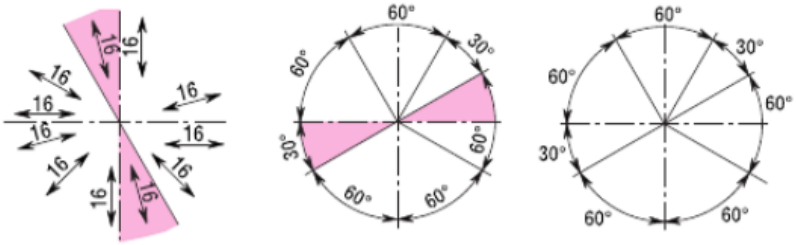
Pour coter un diamètre, on peut utiliser l'une quelconque des dispositions présentées sur les figures ci-contre.

• Position et inscription des cotes

Méthode

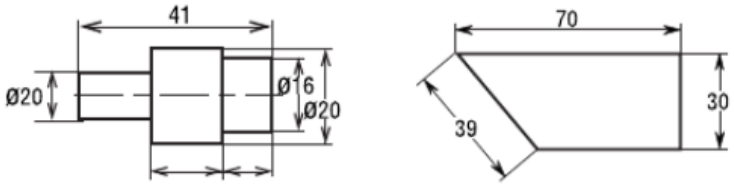


Les valeurs sont disposées parallèlement à leur ligne de cote, et de préférence au milieu, au-dessus, légèrement espacées de celles-ci.

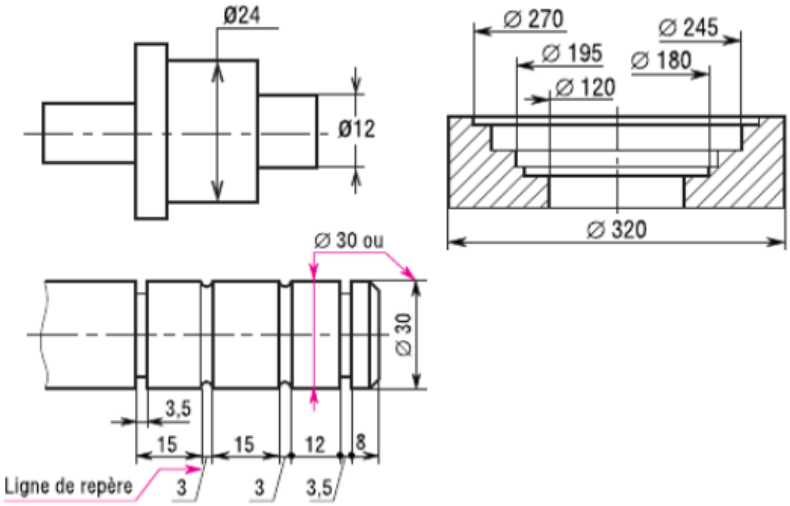


Les valeurs doivent être inscrites depuis le bas ou depuis la droite du dessin. Les valeurs angulaires peuvent être orientées conformément aux deux figures ci-contre.

Autre méthode d'inscription aidant à la lisibilité



Les valeurs sont inscrites pour être lues depuis le bas de la feuille.
Les lignes de cote non horizontales sont interrompues vers le milieu pour l'intersection de la valeur.



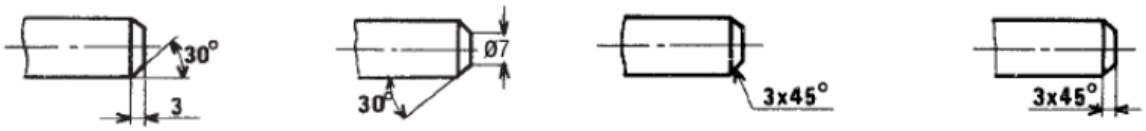
Par manque de place les valeurs peuvent être inscrites :
– au-dessus d'un prolongement horizontal d'une ligne de cote,
– au-dessus d'une ligne de repère,
– près de l'extrémité d'une ligne de cote partielle dans le cas des diamètres.

NF E 04-521
ISO 129

• Zones de spécifications particulières

Si la position et les dimensions ressortent clairement, il n'est pas nécessaire de les coter.

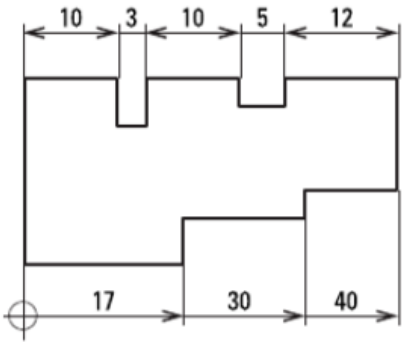
• Chanfreins



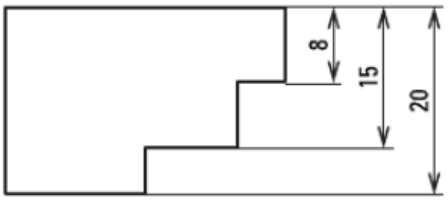
Angle différent de 45°

Angle à 45°

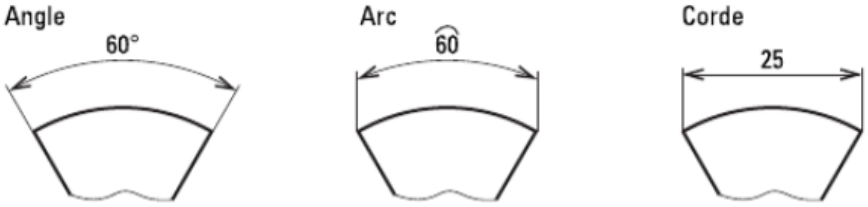
• Cotation en série et superposée



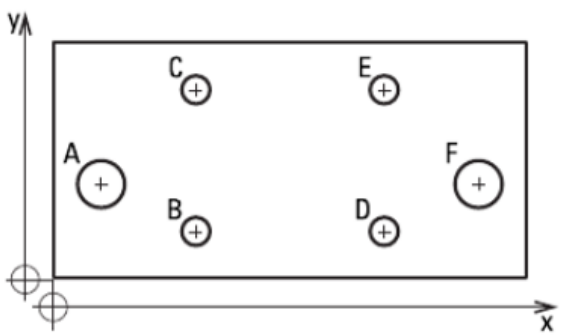
Cotation en parallèle



• Indications particulières



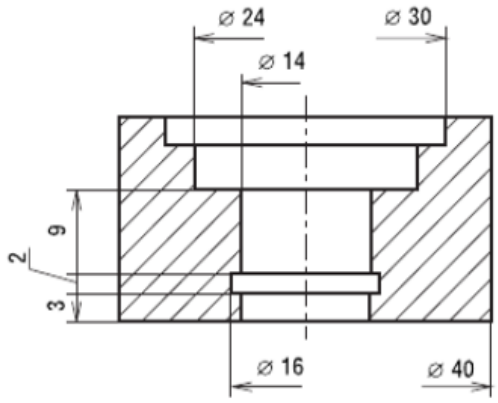
• Cotation en coordonnées cartésiennes



	A	B	C	D	E	F
Ø	5	3	3	3	3	5
X	5	15	15	35	35	45
Y	10	5	20	5	20	10

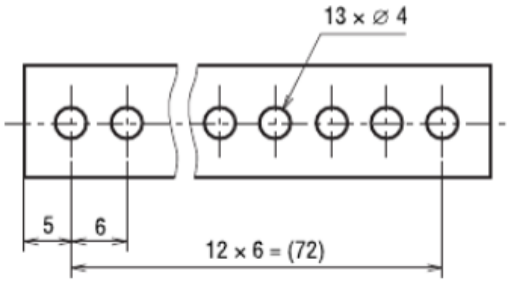
EXÉCUTION GRAPHIQUE (suite)

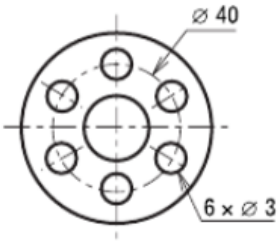
• Cotation par manque de place ou pour une meilleure lisibilité

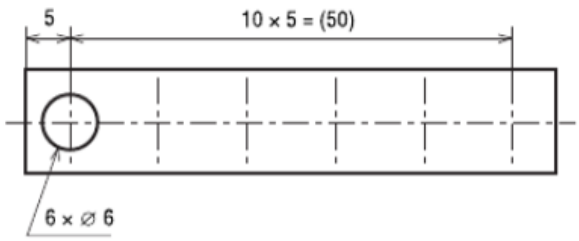


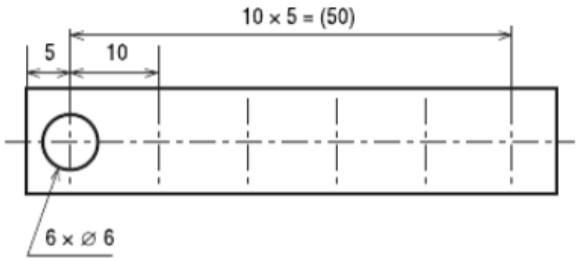
Inscrire les valeurs vers une extrémité, la ligne de cote étant tracée partiellement. Utiliser une ligne de repère.

• Cotation d'éléments équidistants

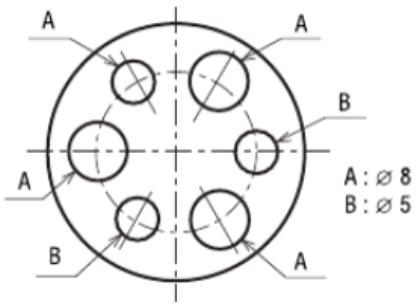




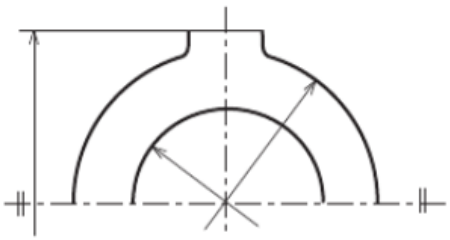




• Autres formes de disposition et d'indication des cotes



Pour éviter de répéter la même cote ou d'avoir de longues lignes d'attache, des lettres de référence peuvent être utilisées en les associant avec un tableau explicatif ou une note.



Dans les vues ou les coupes de pièces symétriques partiellement dessinées, on doit prolonger légèrement au-delà de l'axe de symétrie la partie conservée des lignes de cote, la deuxième flèche étant supprimée.

NF E 04-521
ISO 129

• Tolérances dimensionnelles. Ajustements. Système ISO

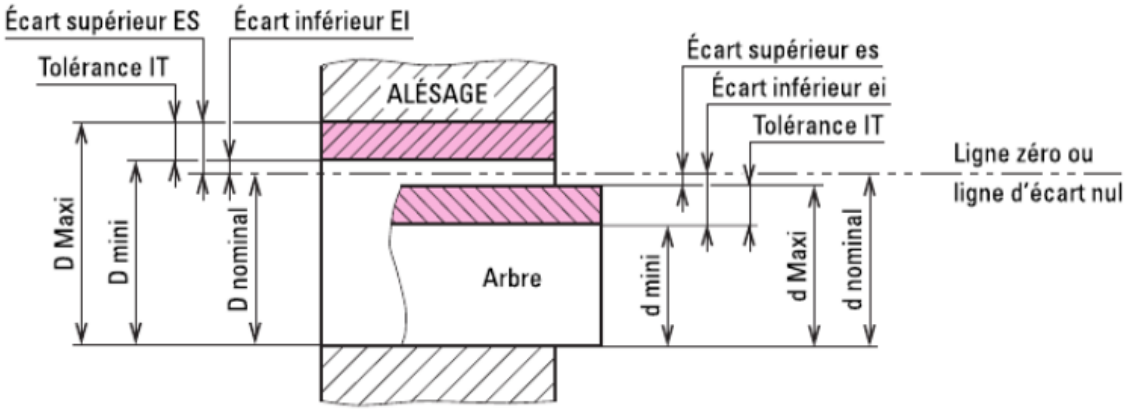
Compte tenu des imprécisions des moyens de fabrication, il est impossible d'obtenir une pièce à une **cote absolue**.
Une incertitude existe donc sur les dimensions propres et sur l'assemblage des pièces : il est donc nécessaire de fixer des limites maxi et mini d'usinage pour une cote donnée.
La différence entre les deux limites d'usinage s'appelle **la tolérance**.

• Cote ISO. Écarts. Définition

La **cote ISO** est caractérisée par une **cote nominale** avec des **limites supérieure** et **inférieure** appelées **écarts** par rapport à cette **cote nominale**.

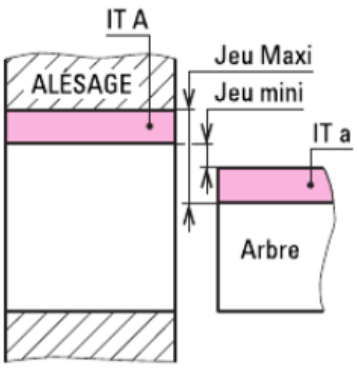
Pour un alésage : cote nominale + écart supérieur + écart inférieur — ex. : D $^{+ES}_{+EI}$

pour un arbre : cote nominale + écart supérieur + écart inférieur — ex. : d $^{+es}_{+ei}$



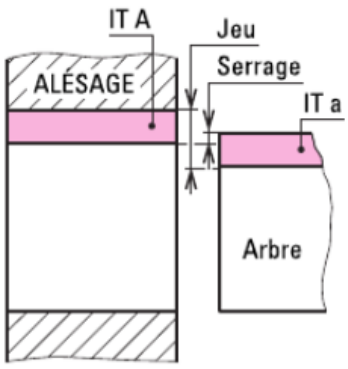
• Visualisation des principaux ajustements

Avec jeu



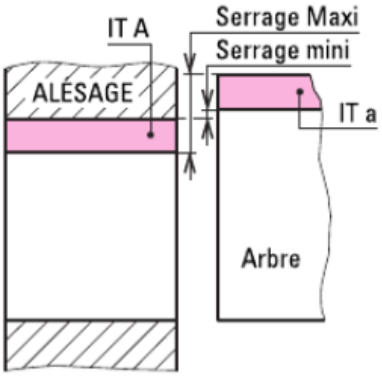
La zone de tolérance de l'arbre est entièrement en dessous de la zone de tolérance de l'alésage.
Quelles que soient les limites de l'usinage de l'arbre et de l'alésage, le montage se fera avec un **jeu**.

Incertain



La zone de tolérance de l'arbre chevauche la zone de tolérance de l'alésage.
En fonction des dimensions obtenues à l'usinage de l'arbre et de l'alésage, dans les limites des tolérances, le montage sera avec **jeu** ou avec **serrage**.
C'est un ajustement **incertain**.

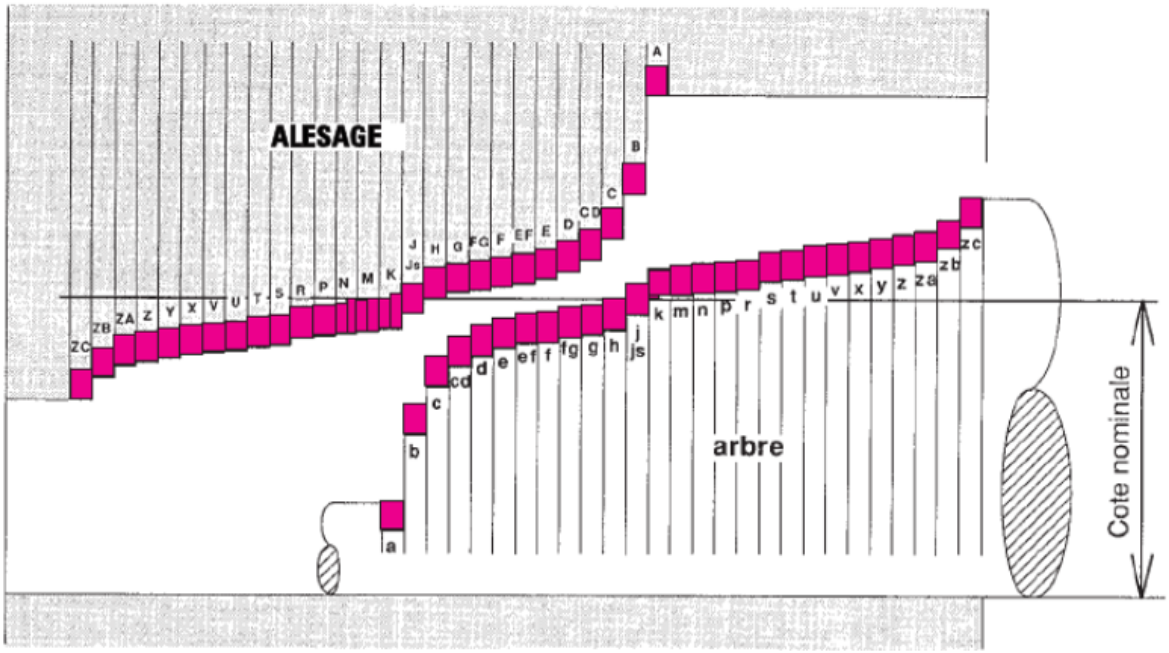
Avec serrage



La zone de tolérance de l'arbre est entièrement au-dessus de la zone de tolérance de l'alésage.
Quelles que soient les limites de l'usinage de l'arbre et de l'alésage, le montage se fera avec **serrage**.

• Position des écarts

La position des écarts par rapport à la cote nominale est signifiée par une ou deux lettres : **minuscules** pour les arbres, **MAJUSCULES** pour les alésages.



• Tolérances des pièces lisses. Qualité

Paliers de dimensions en mm	Qualités																	
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14*	15*	16*
≤ 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
> 3 à 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
> 6 à 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
> 10 à 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1 100
> 18 à 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1 300
> 30 à 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1 000	1 600
> 50 à 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1 200	1 900
> 80 à 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1 400	2 200
> 120 à 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1 000	1 600	2 500
> 180 à 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1 150	1 850	2 900
> 250 à 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1 300	2 100	3 200
> 315 à 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1 400	2 300	3 600
> 400 à 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1 550	2 500	4 000
	tolérances fondamentales en micromètres (μm)																	

* Les qualités 14, 15, 16 ne sont prévues qu'au-delà de 1 mm.

• Ajustement

L'assemblage de deux pièces peut être caractérisé par un ajustement.
Cet ajustement est désigné par la cote nominale commune aux deux pièces (ci-contre **30**) suivie, dans l'ordre, des symboles correspondant à l'alésage **(H7)** et l'arbre **(g6)**.

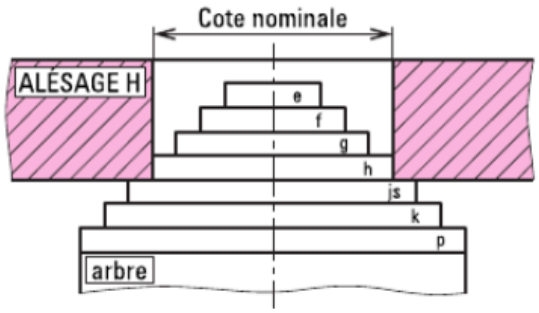
30 H7 g6

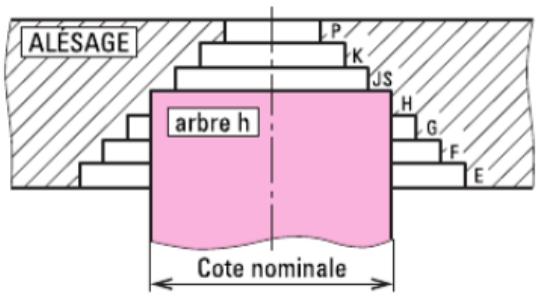
• Alésage normal

C'est un système d'ajustement pour lequel la position de la tolérance de l'alésage est donnée par la lettre **H** (écart inférieur nul).

• Arbre normal

C'est un système d'ajustement pour lequel la position de la tolérance de l'arbre est donnée par la lettre **h** (écart supérieur nul).





Conseils pour la réalisation des pièces (alésages et arbres)

Il est plus facile d'usiner un arbre qu'un alésage, aussi est-il recommandé :
– de choisir le système d'ajustement à alésage normal (**H**),
– de choisir une qualité plus précise pour l'arbre que pour l'alésage.
Les montages avec jeu ou avec serrage sont équivalents sur des ajustements homologues.
Exemple : 30 H7 f6 et 30 F7 h6.
Les coûts d'usinage sont proportionnels à la précision de la qualité.

• Ajustements couramment utilisés en mécanique

Cas d'emploi			Arbres (position)	Alésages				
				H6	H7	H8	H9	H11
				Arbres (qualités)				
Pièces mobiles l'une par rapport à l'autre	Pièces dont le fonctionnement nécessite un grand jeu (dilatation, mauvais alignement, portées très longues, …)		c				9	11
			d				9	11
	Cas ordinaire des pièces tournantes ou glissantes dans une bague un ou palier (bon graissage assuré)		e		7	8	9	
			f	6	6-7	7		
	Pièces avec guidage précis pour mouvements de faible amplitude		g	5	6			
Pièces immobiles l'une par rapport à l'autre	Démontage et remontage possibles sans détérioration des pièces. L'emmanchement ne peut pas transmettre d'effort	Mise en place « à la main »	h	5	6	7	8	
			js	5	6			
		Mise en place « au maillet »	k	5				
			m		6			
	Démontage et remontage impossibles sans détérioration des pièces. L'emmanchement peut transmettre des efforts	Mise en place « à la presse »	p		6			
		Mise en place à la presse ou par dilatation	s			7		
			u			7		
			x			7		
			z			7		

TOLÉRANCES, ÉCARTS ET AJUSTEMENTS (suite)

• Alésages usuels

Qualités	Positions																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	J_s	K	M	N	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z
1								+		+												
2								+		+												
3								+		+												
4								+		+												
5					+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+						
6				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
7				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+							+
9	+	+	+	+	+	+		+		+			+	+								
10				+	+			+		+			+									
11	+	+	+	+				+		+			+									
12								+		+												
13								+		+												
14								+		+												
15								+		+												
16								+		+												

•Arbres usuels

Qualités	Positions																			
	a	b	c	d	e	f	g	h	j	j_s	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z
1								+		+												
2								+		+												
3								+		+												
4						+	+	+		+	+	+	+	+	+	+						
5				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
6				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8		+	+	+	+	+		+		+								+		+		
9	+	+	+	+	+	+		+		+												
10				+				+		+												
11	+	+	+	+				+		+												
12								+		+												
13								+		+												
14								+		+												
15								+		+												
16								+		+												

• Principaux écarts des alésages en micromètres (µm)

Au-delà de		3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400
Jusqu'à	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	500
D10	+ 60 + 20	+ 78 + 30	+ 98 + 40	+ 120 + 50	+ 149 + 65	+ 180 + 80	+ 220 + 100	+ 260 + 120	+ 305 + 145	+ 355 + 170	+ 400 + 190	+ 440 + 210	+ 480 + 230
F7	+ 16 + 6	+ 22 + 10	+ 28 + 13	+ 34 + 16	+ 41 + 20	+ 50 + 25	+ 60 + 30	+ 71 + 36	+ 83 + 43	+ 96 + 50	+ 108 + 56	+ 119 + 62	+ 131 + 68
G6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 14 + 5	+ 17 + 6	+ 20 + 7	+ 25 + 9	+ 29 + 10	+ 34 + 12	+ 39 + 14	+ 44 + 15	+ 49 + 17	+ 54 + 18	+ 60 + 20
H6	+ 6 0	+ 8 0	+ 9 0	+ 11 0	+ 13 0	+ 16 0	+ 19 0	+ 22 0	+ 25 0	+ 29 0	+ 32 0	+ 36 0	+ 40 0
H7	+ 10 0	+ 12 0	+ 15 0	+ 18 0	+ 21 0	+ 25 0	+ 30 0	+ 35 0	+ 40 0	+ 46 0	+ 52 0	+ 57 0	+ 63 0
H8	+ 14 0	+ 18 0	+ 22 0	+ 27 0	+ 33 0	+ 39 0	+ 46 0	+ 54 0	+ 63 0	+ 72 0	+ 81 0	+ 89 0	+ 97 0
H9	+ 25 0	+ 30 0	+ 36 0	+ 43 0	+ 52 0	+ 62 0	+ 74 0	+ 87 0	+ 100 0	+ 115 0	+ 130 0	+ 140 0	+ 155 0
H10	+ 40 0	+ 48 0	+ 58 0	+ 70 0	+ 84 0	+ 100 0	+ 120 0	+ 140 0	+ 160 0	+ 185 0	+ 210 0	+ 230 0	+ 250 0
H11	+ 60 0	+ 75 0	+ 90 0	+ 110 0	+ 130 0	+ 160 0	+ 190 0	+ 220 0	+ 250 0	+ 290 0	+ 320 0	+ 360 0	+ 400 0
H12	+ 100 0	+ 120 0	+ 150 0	+ 180 0	+ 210 0	+ 250 0	+ 300 0	+ 350 0	+ 400 0	+ 460 0	+ 520 0	+ 570 0	+ 630 0
H13	+ 140 0	+ 180 0	+ 220 0	+ 270 0	+ 330 0	+ 390 0	+ 460 0	+ 540 0	+ 630 0	+ 720 0	+ 810 0	+ 890 0	+ 970 0
J7	+ 4 − 6	+ 6 − 6	+ 8 − 7	+ 10 − 8	+ 12 − 9	+ 14 − 11	+ 18 − 12	+ 22 − 13	+ 26 − 14	+ 30 − 16	+ 36 − 16	+ 39 − 18	+ 43 − 20
Js13	± 70	± 90	± 110	± 135	± 165	± 195	± 230	± 270	± 315	± 360	± 405	± 445	± 485
K6	0 − 6	+ 2 − 6	+ 2 − 7	+ 2 − 9	+ 2 − 11	+ 3 − 13	+ 4 − 15	+ 4 − 18	+ 4 − 21	+ 5 − 24	+ 5 − 27	+ 7 − 29	+ 8 − 32
K7	0 − 10	+ 3 − 9	+ 5 − 10	+ 6 − 12	+ 6 − 15	+ 7 − 18	+ 9 − 21	+ 10 − 25	+ 12 − 28	+ 13 − 33	+ 16 − 36	+ 17 − 40	+ 18 − 45
M7	− 2 − 12	0 − 12	0 − 15	0 − 18	0 − 21	0 − 25	0 − 30	0 − 35	0 − 40	0 − 46	0 − 52	0 − 57	0 − 63
N7	− 4 − 14	− 4 − 16	− 4 − 19	− 5 − 23	− 7 − 28	− 8 − 33	− 9 − 39	− 10 − 45	− 12 − 52	− 14 − 60	− 14 − 66	− 16 − 73	− 17 − 80
P7	− 6 − 16	− 8 − 20	− 9 − 24	− 11 − 29	− 14 − 35	− 17 − 42	− 21 − 51	− 24 − 59	− 28 − 68	− 33 − 79	− 36 − 88	− 41 − 98	− 45 − 108

Normes complémentaires NF E 02-113 à NF E 02-118.

• Principaux écarts des arbres en micromètres (µm)

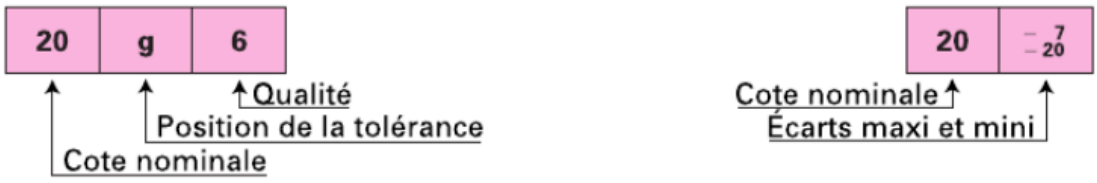
Au-delà de		3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400
Jusqu'à	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	500
d9	− 20 − 45	− 30 − 60	− 40 − 76	− 50 − 93	− 65 − 117	− 80 − 142	− 100 − 174	− 120 − 207	− 145 − 245	− 170 − 285	− 190 − 320	− 210 − 350	− 230 − 385
d10	− 20 − 60	− 30 − 78	− 40 − 98	− 50 − 120	− 65 − 149	− 80 − 180	− 100 − 220	− 120 − 260	− 145 − 305	− 170 − 355	− 190 − 400	− 210 − 440	− 230 − 480
d11	− 20 − 80	− 30 − 105	− 40 − 130	− 50 − 160	− 65 − 195	− 80 − 240	− 100 − 290	− 120 − 340	− 145 − 395	− 170 − 460	− 190 − 510	− 210 − 570	− 230 − 630
e8	− 14 − 28	− 20 − 38	− 25 − 47	− 32 − 59	− 40 − 73	− 50 − 89	− 60 − 106	− 72 − 126	− 85 − 148	− 100 − 172	− 110 − 191	− 125 − 214	− 135 − 232
e9	− 14 − 39	− 20 − 50	− 25 − 61	− 32 − 75	− 40 − 92	− 50 − 112	− 60 − 134	− 72 − 159	− 85 − 185	− 100 − 215	− 110 − 240	− 125 − 265	− 135 − 290
f6	− 6 − 12	− 10 − 18	− 13 − 22	− 16 − 27	− 20 − 33	− 25 − 41	− 30 − 49	− 36 − 58	− 43 − 68	− 50 − 79	− 56 − 88	− 62 − 98	− 68 − 108
f7	− 6 − 16	− 10 − 22	− 13 − 28	− 16 − 34	− 20 − 41	− 25 − 50	− 30 − 60	− 36 − 71	− 43 − 83	− 50 − 96	− 56 − 106	− 62 − 119	− 68 − 131
f8	− 6 − 20	− 10 − 28	− 13 − 35	− 16 − 43	− 20 − 53	− 25 − 64	− 30 − 76	− 36 − 90	− 43 − 106	− 50 − 122	− 56 − 137	− 62 − 151	− 68 − 165
g5	− 2 − 6	− 4 − 9	− 5 − 11	− 6 − 14	− 7 − 16	− 9 − 20	− 10 − 23	− 12 − 27	− 14 − 32	− 15 − 35	− 17 − 40	− 18 − 43	− 20 − 47
g6	− 2 − 8	− 4 − 12	− 5 − 14	− 6 − 17	− 7 − 20	− 9 − 25	− 10 − 29	− 12 − 34	− 14 − 39	− 15 − 44	− 17 − 49	− 18 − 54	− 20 − 60
h4	0 − 3	0 − 4	0 − 4	0 − 5	0 − 6	0 − 7	0 − 8	0 − 10	0 − 12	0 − 14	0 − 16	0 − 18	0 − 20
h5	0 − 4	0 − 5	0 − 6	0 − 8	0 − 9	0 − 11	0 − 13	0 − 15	0 − 18	0 − 20	0 − 23	0 − 25	0 − 27
h6	0 − 6	0 − 8	0 − 9	0 − 11	0 − 13	0 − 16	0 − 19	0 − 22	0 − 25	0 − 29	0 − 32	0 − 36	0 − 40
h7	0 − 10	0 − 12	0 − 15	0 − 18	0 − 21	0 − 25	0 − 30	0 − 35	0 − 40	0 − 46	0 − 52	0 − 57	0 − 63
h8	0 − 14	0 − 18	0 − 22	0 − 27	0 − 33	0 − 39	0 − 46	0 − 54	0 − 63	0 − 72	0 − 81	0 − 89	0 − 97
h9	0 − 25	0 − 30	0 − 36	0 − 43	0 − 52	0 − 62	0 − 74	0 − 87	0 − 100	0 − 115	0 − 130	0 − 140	0 − 155
h10	0 − 40	0 − 48	0 − 58	0 − 70	0 − 84	0 − 100	0 − 120	0 − 140	0 − 160	0 − 185	0 − 210	0 − 230	0 − 250
h11	0 − 60	0 − 75	0 − 90	0 − 110	0 − 130	0 − 160	0 − 190	0 − 220	0 − 250	0 − 290	0 − 320	0 − 360	0 − 400
h13	0 − 140	0 − 180	0 − 220	0 − 270	0 − 330	0 − 390	0 − 460	0 − 540	0 − 630	0 − 720	0 − 810	0 − 890	0 − 970
j6	+ 4 − 2	+ 6 − 2	+ 7 − 2	+ 8 − 3	+ 9 − 4	+ 11 − 5	+ 12 − 7	+ 13 − 9	+ 14 − 11	+ 16 − 13	+ 16 − 16	+ 18 − 18	+ 20 − 20
j7	+ 6 − 4	+ 8 − 4	+ 10 − 5	+ 12 − 6	+ 13 − 8	+ 15 − 10	+ 18 − 12	+ 20 − 15	+ 22 − 18	+ 25 − 21	+ 26 − 26	+ 29 − 28	+ 31 − 32
Js5	± 2	± 2,5	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 7,5	± 9	± 10	± 11,5	± 12,5	± 13,5
Js6	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 8	± 9,5	± 11	± 12,5	± 14,5	± 16	± 18	± 20
js7	± 5	± 6	± 7	± 9	± 10	± 12	± 15	± 17	± 20	± 23	± 26	± 28	± 31
js9	± 12	± 15	± 18	± 21	± 26	± 31	± 37	± 43	± 50	± 57	± 65	± 70	± 77
js11	± 30	± 37	± 45	± 55	± 65	± 80	± 95	± 110	± 125	± 145	± 160	± 180	± 200
js13	± 70	± 90	± 110	± 135	± 165	± 195	± 230	± 270	± 315	± 360	± 405	± 445	± 485
k5	+ 4 0	+ 6 + 1	+ 7 + 1	+ 9 + 1	+ 11 + 2	+ 13 + 2	+ 15 + 2	+ 18 + 3	+ 21 + 3	+ 24 + 4	+ 27 + 4	+ 29 + 4	+ 32 + 5
k6	+ 6 0	+ 9 + 1	+ 10 + 1	+ 12 + 1	+ 15 + 2	+ 18 + 2	+ 21 + 2	+ 25 + 3	+ 28 + 3	+ 33 + 4	+ 36 + 4	+ 40 + 4	+ 45 + 5
m5	+ 6 + 2	+ 9 + 4	+ 12 + 6	+ 15 + 7	+ 17 + 8	+ 20 + 9	+ 24 + 11	+ 28 + 13	+ 33 + 15	+ 37 + 17	+ 43 + 20	+ 46 + 21	+ 50 + 23
m6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 15 + 6	+ 18 + 7	+ 21 + 8	+ 25 + 9	+ 30 + 11	+ 35 + 13	+ 40 + 15	+ 46 + 17	+ 52 + 20	+ 57 + 21	+ 63 + 23
p6	+ 12 + 6	+ 20 + 12	+ 24 + 15	+ 29 + 18	+ 35 + 22	+ 42 + 26	+ 51 + 32	+ 59 + 37	+ 68 + 43	+ 79 + 50	+ 88 + 56	+ 98 + 62	+ 108 + 68
p7	+ 16 + 6	+ 24 + 12	+ 30 + 15	+ 36 + 18	+ 43 + 22	+ 51 + 26	+ 62 + 32	+ 72 + 37	+ 83 + 43	+ 96 + 50	+ 108 + 56	+ 119 + 62	+ 131 + 68

Normes complémentaires NF E 02-105 à NF E 02-111.

• Exemples de désignation de tolérances

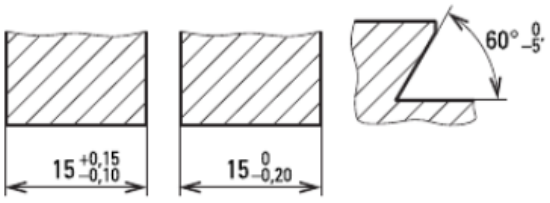
Alésages

Arbres

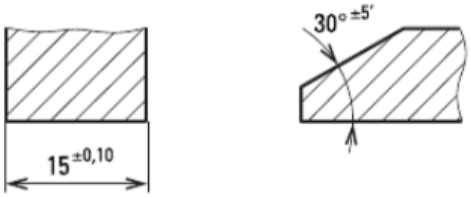


Alésages et arbres (ajustements)

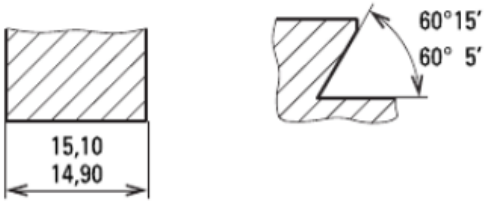
Inscription des tolérances dimensionnelles chiffrées NF E 04-551 ISO 406



Inscrire les valeurs des écarts supérieur et inférieur à la suite de la dimension nominale.
Placer ces valeurs en superposition.
La valeur de la limite supérieure est inscrite au-dessus de la valeur de la limite inférieure.



Tolérances à écarts symétriques
En cas d'égalité dans les valeurs des écarts supérieur et inférieur, n'inscrire qu'une valeur précédée des signes ±.



Tolérances indiquées par des dimensions limites
Il est admis d'inscrire les deux dimensions limites.

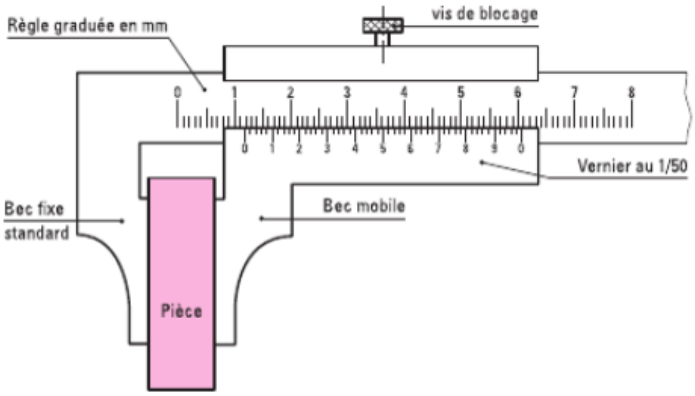
4.4.3. MOYENS DE MESURAGE ET DE CONTRÔLE

• Le calibre ou pied à coulisse

Pied à coulisse à vernier au 1/50

Le vernier inventé par le mathématicien Pierre Vernier en 1631 est une réglette graduée apposée sur le pied à coulisse qui permet d'améliorer la précision de lecture (0,02 mm) Il est remplacé aujourd'hui par des systèmes à lecture digitale plus précis (0,01 mm) et à lecture simplifiée.

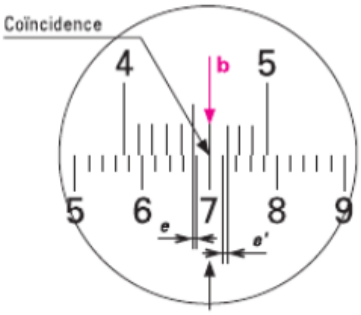
• Principe de la mesure au pied à coulisse à vernier au 1/50



Un coulisseau portant un vernier au 1/50 et un bec mobile se déplacent sur une règle en fonction de la grandeur de la pièce à mesurer. La position de mesurage peut être stabilisée par une vis de blocage.

Pied à coulisse à lecture digitale (lecture directe)

Photo TESA Technology



Jauge de profondeur à lecture digitale

Photo TESA Technology

Repérer la coïncidence des graduations entre la règle et le vernier en appliquant la méthode des écarts symétriques

$$e = e'$$

Puis multiplier le nombre de graduations lues sur le vernier du 0 à la coïncidence par 1/50 ou 0,02

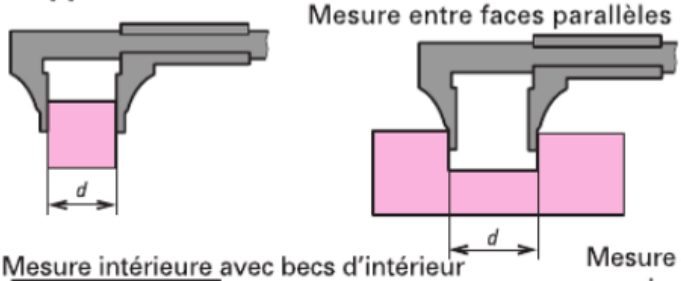
$$35 \times 0{,}02 = \boxed{0{,}70}$$

Expression du résultat brut de mesurage :

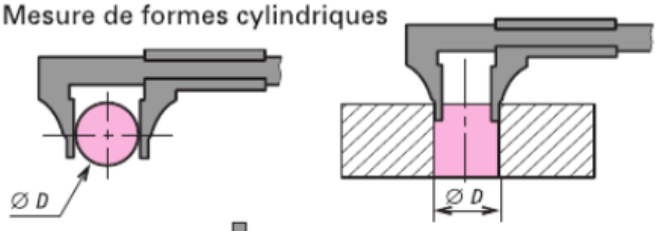
$$\boxed{M = 11{,}70 \pm 0{,}02}$$

• Applications courantes :

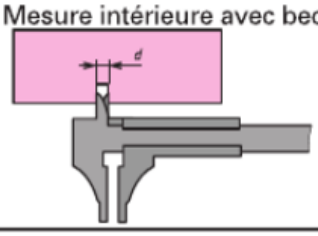
Mesure entre faces parallèles



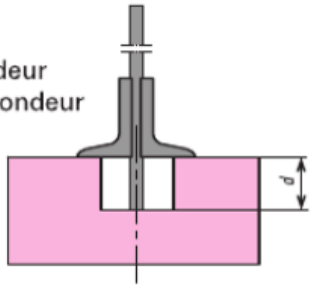
Mesure de formes cylindriques



Mesure intérieure avec becs d'intérieur



Mesure de profondeur avec jauge de profondeur



• Le micromètre ou Palmer

Micromètre analogique à vernier au 1/1000 mm

Photo TESA Technology

Micromètre d'intérieur analogique à vernier au 1/100 mm

Photo TESA Technology

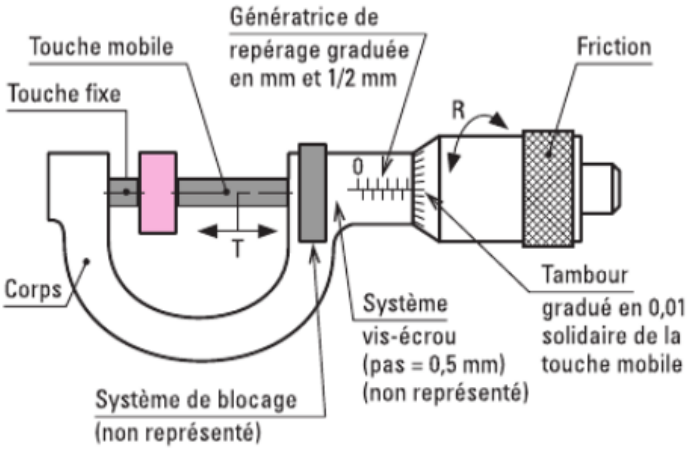
Micromètre à affichage digital au 1/1000 mm

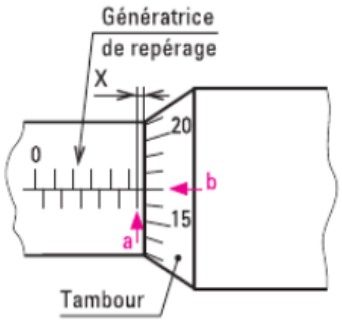
Photo TESA Technology

Micromètre de profondeur à affichage digital au 1/1000 mm

Photo TESA Technology

Le micromètre, ou « palmer », est un appareil de mesure des longueurs. Il est très utilisé en mécanique pour mesurer des épaisseurs, des diamètres de portées cylindriques (micromètre d'extérieur) ou des diamètres d'alésage (micromètre d'intérieur).
La vis micrométrique a été inventée par William Gascoigne au XVII[e] siècle et c'est Jean-Laurent Palmer qui en a appliqué le principe à la mesure des petites distances en 1848, d'où son nom.





a) Lire le nombre entier de millimètres et de1/2 mm sur la génératrice de repérage (dernière graduation découverte par le tambour): **5,5**

b) Lire la fraction de millimètre (X) sur le tambour gradué en 0,01: 17 × 0,01 = **0,17**

Expression du résultat brut de mesurage **$M = 5{,}67 \pm 0{,}01$**

• Le comparateur

Photo TESA Technology

Comparateur à cadran Précision 1/1000 mm

Comparateur à affichage digital Précision 1/1000 mm

Le comparateur est constitué d'un cadran gradué avec une aiguille pivotant en son centre. Autour du cadran une lunette comportant un ou plusieurs index peut pivoter manuellement. L'index permet à l'utilisateur de matérialiser le point zéro. Le palpeur est constitué de deux parties : la tige et la touche vissée au bout de la tige.

Principe de mesure

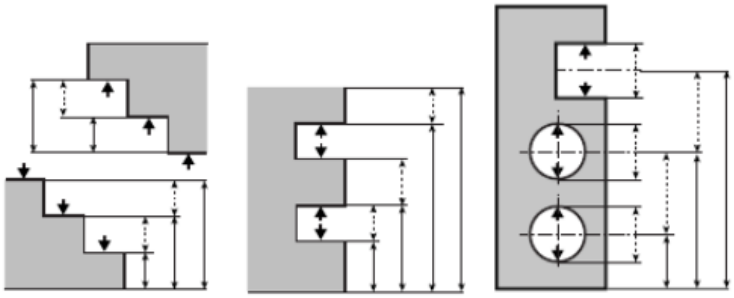
Le comparateur est constitué d'une tige mobile en translation. Le déplacement de cette dernière est transmis à un dispositif pignon-crémaillère transformant la translation de la tige en rotation de l'aiguille. Une amplification du mouvement de rotation par un train d'engrenages permet d'augmenter la précision (1/100 ou 1/1000 mm). L'angle total de rotation est proportionnel au déplacement en translation de tige.
Pour effectuer une mesure on fait un point zéro à l'aide par exemple d'une cale étalon. Le corps du comparateur étant fixe, on place la pièce à mesurer sous la touche qui indique alors la différence entre le point de référence et la dimension de la pièce mesurée.

Cales étalons

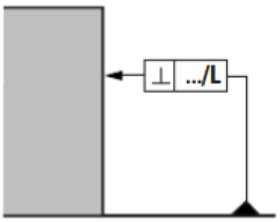
• Machine à mesurer unidimensionnelle

La machine à mesurer unidimensionnelle ou colonne de mesure est constituée d'une table ou marbre, d'une colonne dans laquelle se déplace une touche de mesure. Elle permet de mesurer dans une seule direction Z des dimensions extérieures, intérieures, étagées, de hauteur, de profondeur et de distance. Les nouvelles colonnes de mesures intègrent aujourd'hui une seconde dimension. Un programme permet d'exécuter la totalité des calculs nécessaires. La précision de mesure est de 0,001 à 0,0001 mm.

Mesure dans une direction de coordonnées



Mesure de la perpendicularité



Mesure du parallélisme

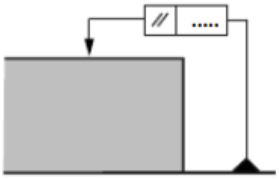


Photo TESA Technology

• Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

Les machines à mesurer tridimensionnelles sont installées dans les salles climatisées de métrologie ou proches de la production ; elles sont le moyen de mesure 3D par excellence.
Elles garantissent une précision au dixième de micron près avec un déplacement automatique du bras très rapide (jusqu'à 2 m/s).

Elles permettent d'obtenir les coordonnées des points mesurés (palpés) sur une pièce mécanique. Ces coordonnées permettent de vérifier la validité dimensionnelle de la pièce, de vérifier que les cotes sont respectées.
Une MMT est constituée :
– d'une table ou marbre ;
– de trois glissières orthogonales équipées de règles graduées (optiques ou électriques) permettant de positionner la tête de mesure selon les 3 axes X, Y et Z ;
– d'une tête de mesure équipée d'un palpeur de haute précision qui vient en contact avec la surface de la pièce à mesurer.

La MMT est connectée à un ordinateur disposant d'un logiciel d'interprétation des coordonnées qui assurent de nombreuses fonctions comme la commande des déplacements du palpeur, le traitement statistique des résultats de mesures obtenus ou la compensation des défauts géométriques de la machine.
Il autorise le calcul rapide d'un défaut de tolérance géométrique (localisation, parallélisme, coaxialité ...).

Palpeur pour MMT

Photo TESA Technology

Photo TESA Technology

• Mesures électroniques

Contrôle par palpeur

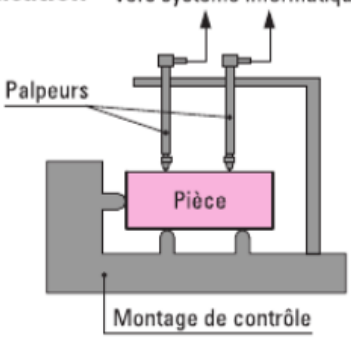
Dans les systèmes de fabrication actuels, il est indispensable de connaître et de communiquer au plus tôt la conformité du produit. C'est pourquoi des postes de contrôle informatisés sont intégrés à chaque étape de la fabrication.
De nombreux instruments numérisés sont équipés de liaisons séries permettant la connexion au système informatique.
Sur certains montages de contrôle, la mesure est effectuée par l'intermédiaire de palpeurs.

Palpeur inductif

Palpeur photo-électrique

Doc. MAHR

Application Vers système informatique



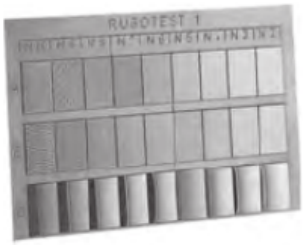
Mesure par rayon laser

Mesure micrométrique optimisée

– Utilisation universelle pour diamètres extérieurs de 0,5 à 100 mm.
– Précision hors du commun :
  - Répétabilité ± 0,2 microns
  - Linéarité à ± 0,1 micron sur toute la plage de mesure
– Utilisée pour la mesure de pièces délicates et sensibles avec une surface fragile.
– Suivi simplifié de la qualité.

4.4.4. MOYENS DE CONTRÔLE DES ÉTATS DE SURFACE

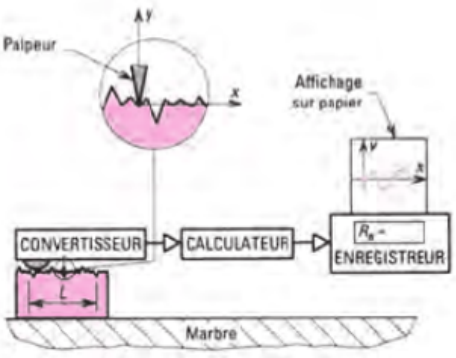
• Contrôle viso-tactile avec plaquettes étalons de rugosité



Le contrôle de la qualité de surface se fait à l'œil et au toucher en utilisant des plaquettes échantillons de surfaces fonctions de l'usinage réalisé (fraisage en bout, fraisage en roulant, tournage, rabotage, rodage, rectification, superfinition) avec des qualités allant de 0,05 à 12,5 Ra.
Cette méthode est réservée à la vérification de rugosité peu ou moyennement précise.

• Le rugosimètre

Le rugosimètre permet de mesurer et de définir les principaux critères de rugosité notamment le Ra (écart moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne) très employé.



Principe de mesure
Un palpeur se déplace à vitesse constante suivant **x** sur une longueur d'évaluation minimale L. Ses variations verticales selon **y** (en fonction des stries) sont transformées en signaux électriques par un convertisseur puis traitées par un calculateur. Les résultats de ce mesurage peuvent être affichés à l'écran ou sur papier.

4.4.5. MOYENS DE MESURAGE DES FORCES ET DES PRESSIONS

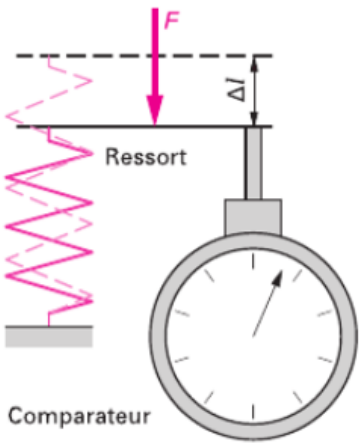
• Le dynamomètre (mesure d'efforts)

Le dynamomètre mécanique

Le dynamomètre est en général constitué d'un ressort de raideur **k** et dont une extrémité est attachée à un point fixe. On applique la force à mesurer sur l'autre extrémité du ressort et l'on mesure la variation de longueur **Δl**, du ressort.
La mesure de la longueur **Δl** est souvent réalisée par un comparateur. La force F étant directement proportionnelle à **Δl**, il suffit de graduer le cadran du comparateur en Newtons plutôt qu'en mètres.

On en déduit la force **F** par la relation : **F = k x Δl**

L'effort **F** est donné en Newton (N), **kN** ou **mN**.



Dynamomètre mécanique (Photo ANDILOG)

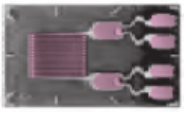
Le dynamomètre numérique

Le dynamomètre numérique est un instrument composé d'un capteur de force, d'un dispositif électronique et d'un afficheur.
Lorsque ce capteur se déforme, les jauges de contraintes (*fil métallique en zigzag collé sur une barre et dont la résistance électrique varie avec l'allongement relatif*) se déforment et émettent une tension électrique proportionnelle à la force. L'électronique du dynamomètre interprète alors cette tension pour l'afficher en unités de force.

Le capteur de force

C'est un barreau équipé de jauges de contraintes. Le capteur peut être intégré dans un système et donner en temps réel des informations mécaniques sur une partie sollicitée du système.

Capteur de force (photo AHLBORN



Jauge de contraintes

Dynamomètre numérique (Photo ANDILOG)

• Le couplemètre (mesure de couple)

Le couplemètre mécanique est basé sur le principe de la clé dynamomètre (ressort spiral ou barre métallique déformable). Il permet de mesurer un couple appliqué en fonction de la déformation en torsion d'un matériau.
La mesure est donnée en **Nm** ou **mNm**.

Couplemètre mécanique (Photo ANDILOG)

Le couplemètre numérique contient un capteur de couple, une carte électronique, un logiciel et un afficheur. Le capteur de couple utilise des jauges de contraintes ; la déformation de celles-ci est convertie en signal électrique et traitée par un logiciel qui permet l'affichage du couple.

Quelques exemples de mesure de couple : couple de vis ou fixations, bouchons, ressorts de torsion... mais des essais beaucoup plus compliqués peuvent aussi être réalisés comme des essais de couple dynamique sur moteur à l'aide d'appareillages plus complexes comme des couplemètres à transformateurs tournants...

Couplemètre numérique (Photo ANDILOG)

• Le manomètre (mesure de pression)

Le manomètre est l'appareil de mesure de pression. Il existe plusieurs méthodes de mesures directes et indirectes. La plus répandue est basée sur la mesure directe d'une force, exercée sur une membrane par exemple.
Les méthodes indirectes reposent sur la mesure d'une autre grandeur physique (résistivité, température...) qu'on peut relier à la pression par un étalonnage.
Pour la pression atmosphérique, on utilise le baromètre.
La mesure est donnée en **Pa**, **HPa** ou **bar**.

photo Jeulin

4.4.6. UTILISATION D'UN LOGICIEL DE DAO

DAO

• Organisation matérielle

Dessin sur table...

Station de travail informatique

Scanner 3D

Traceur grand format

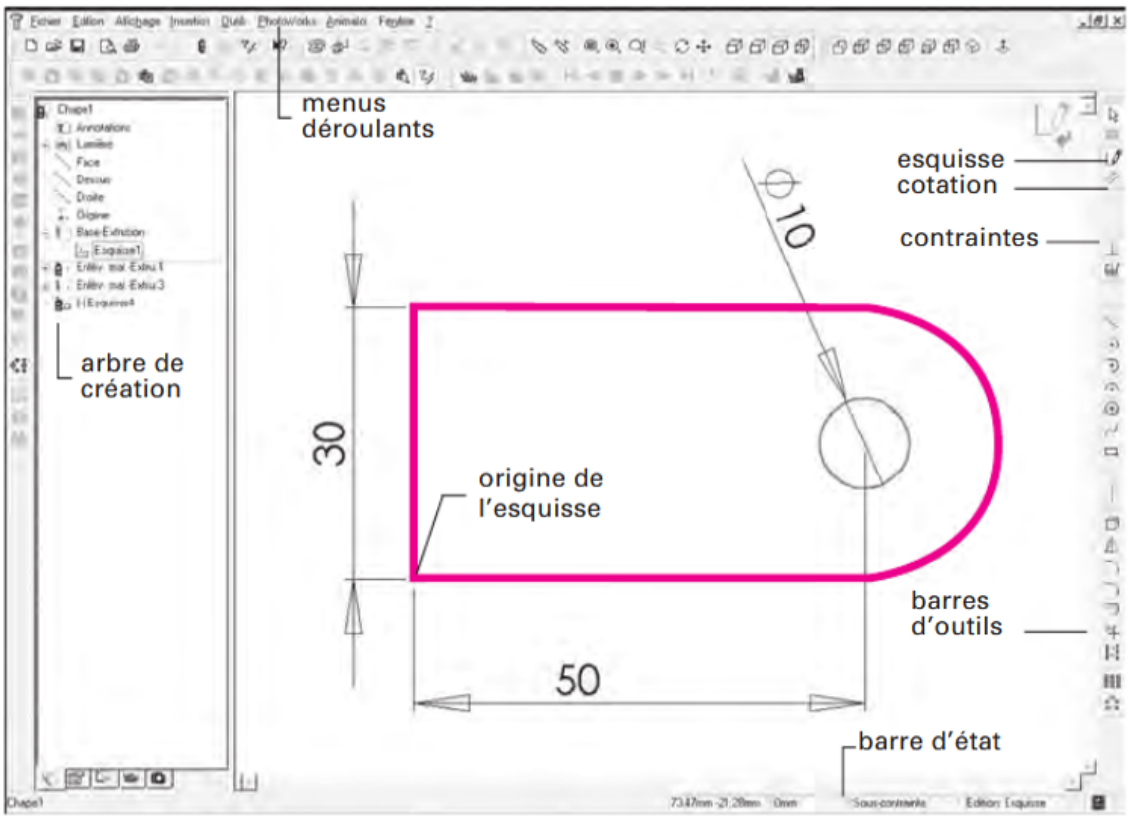
Tablette graphique

Prototypage rapide

La conception des produits industriels passe dans la plupart des cas par une conception assistée par ordinateur (CAO) en utilisant des logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO).
Le DAO permet de réaliser tous types de dessins (plans ou spatiaux) avec une définition parfaite. Le stockage en mémoire, sur CD-Rom, sur disque dur ou sur clé USB permet un échange de fichiers dans le monde entier et en temps réel. Il est possible de concevoir un produit en un endroit et le réaliser dans un autre avec une interaction permanente entre le concepteur et le réalisateur via le réseau Internet.

• Dessin volumique paramétré

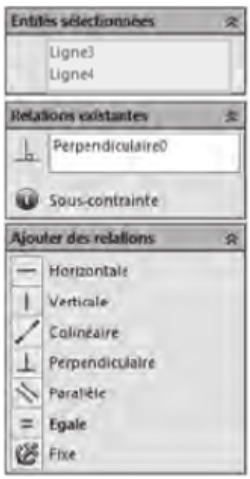
Le dessin 3D paramétré permet de réaliser une représentation spatiale d'un objet qui pourra, ensuite, être visualisé d'un point de vue quelconque. Les dessins réalisés sont récupérables dans les logiciels de CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur) pour la réalisation des pièces sur une machine à commande numérique ou dans des logiciels d'imagerie de synthèse pour la réalisation de films, de publicité ou d'animations virtuelles.



Principe de conception d'un dessin volumique paramétré

La conception d'un dessin volumique paramétré diffère peu selon le modeleur utilisé ; seules les terminologies utilisées varient.
La base de tout dessin 3D paramétré est la création d'une esquisse (fig. 1) qui est réalisée avec des outils classiques tels que : cercle, arc, ligne, rectangles, spline, etc. Cette esquisse est affinée grâce à des fonctions telles que ajuster, symétrie, congé, chanfreins, etc.

Fig. 1



L'esquisse doit être ensuite cotée et contrainte (fig. 2) : les cotes permettent de dimensionner l'esquisse et les contraintes permettent d'imposer des relations géométriques entre les éléments de cette esquisse. Il sera possible ultérieurement de modifier les cotes sans changer les contraintes ce qui permettra, par exemple, de concevoir des familles de pièces.

Fig. 2

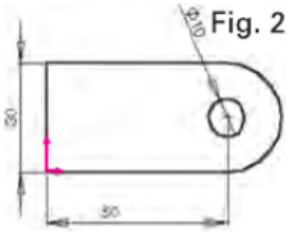


Fig. 3

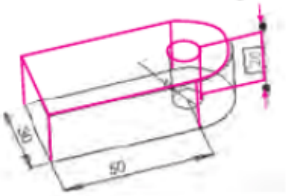
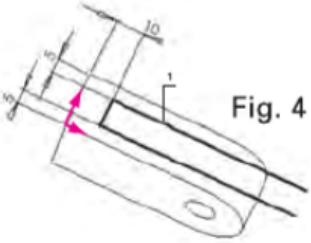
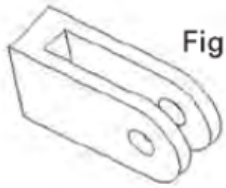


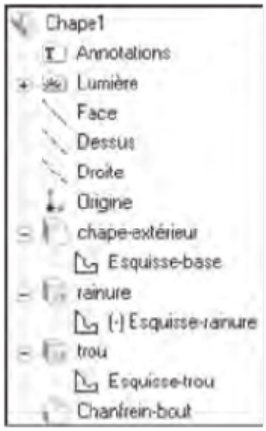
Fig. 4



Pour donner du volume, il suffit d'**extruder** l'esquisse réalisée avec une certaine hauteur (fig. 3).
Le volume de base étant réalisé, on choisit une surface (1) sur laquelle la nouvelle esquisse sera dessinée : sur la figure 4 un rectangle coté et positionné au milieu de la surface d'esquisse définira une entaille obtenue par un **enlèvement de matière** (fig. 5).
On a procédé de la même façon pour réaliser le trou sur la surface (2) (fig. 6).

Fig. 5





De nombreuses fonctions telles que chanfrein, congé, coque... permettent de compléter les formes de l'objet (fig. 7).
L'arborescence, ou arbre de création, est la base de données du dessin.
On peut intervenir à tout instant dans cette arborescence pour en modifier un paramètre, modifier la hauteur d'une extrusion, modifier une dimension d'une esquisse, etc.

Fig. 6

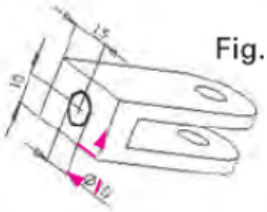


Fig. 7

La visualisation de l'objet réalisé peut être en mode filaire ou ombré avec ou sans arêtes cachées et dans de nombreuses positions grâce à des fonctions d'orientation de la vue comme le montrent les représentations ci-dessous (fig. 8).

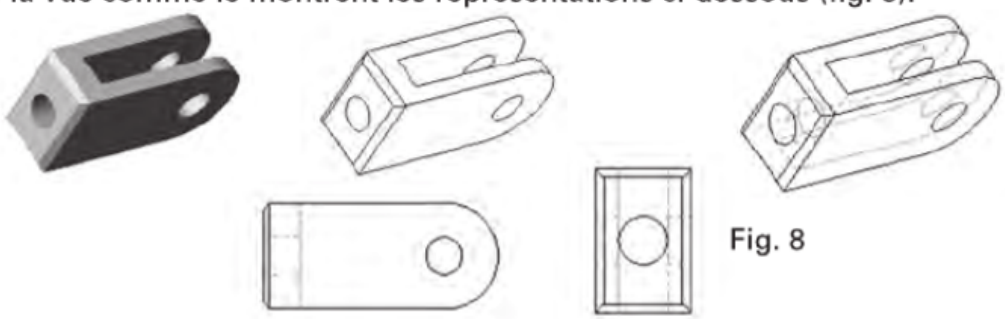


Fig. 8

Il est aussi possible de visualiser une image de synthèse de l'objet en plaçant des éclairages, en choisissant des matériaux et en effectuant un rendu de l'objet (fig. 9). Cette image de synthèse peut être travaillée ou récupérée dans de nombreux logiciels de traitements d'images. Il est aussi possible de créer une animation de cet objet dans un ensemble en utilisant le logiciel de dessin ou d'autres plus spécialisés.

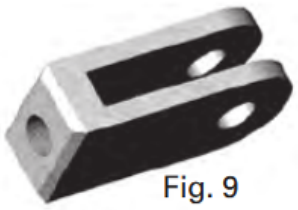


Fig. 9

• Dessin 2D paramétré

Les modeleurs volumiques paramétrés permettent de réaliser la mise en plan des dessins 3D (fig. 10).
Il est possible de choisir les vues désirées ainsi que toutes les coupes utiles à la compréhension du dessin.
Toute modification du dessin 3D entraînera automatiquement une modification du dessin 2D.

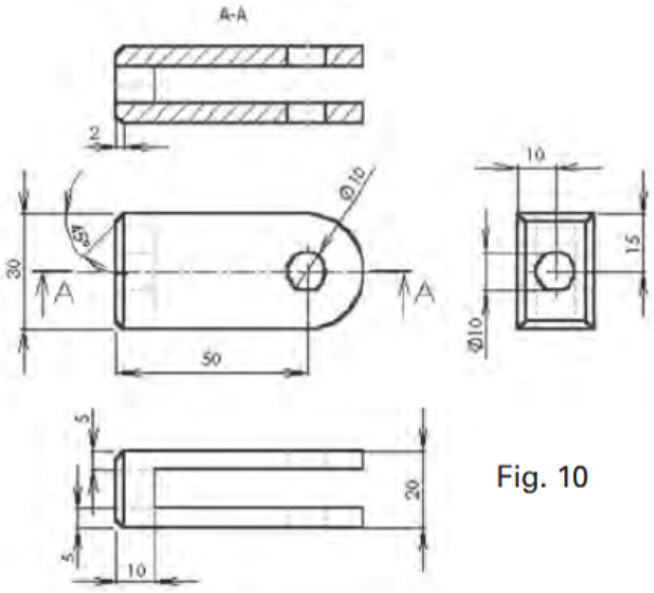


Fig. 10

• Dessin d'assemblage

DAO (SulTe)

La réalisation des dessins des pièces étant effectuée, le montage de l'ensemble s'effectue dans un dessin d'assemblage (fig. 11).

Fig. 11

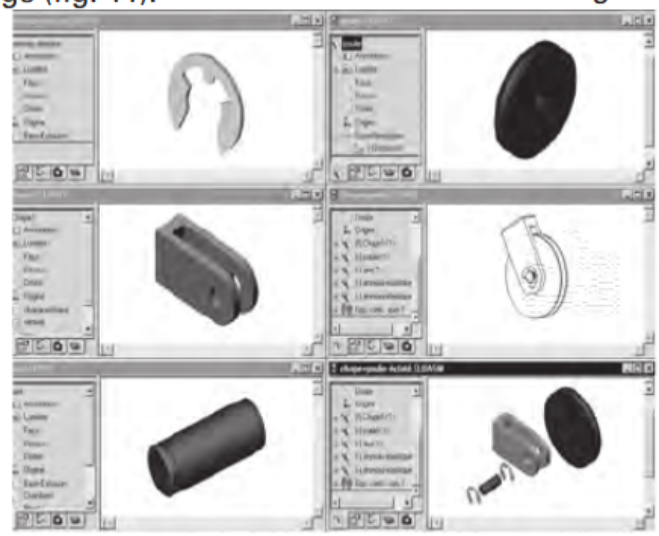


Fig. 12

Des contraintes (fig. 12) permettent de positionner les pièces les unes par rapport aux autres.
La modification du dessin d'une des pièces de l'ensemble modifie l'assemblage.

Des éclatés, des assemblages 3D et des dessins d'ensemble 2D sont ainsi réalisables (fig. 13-14-15). Ils pourront être utilisés dans des processus de fabrication, des animations ou des documents de présentation.

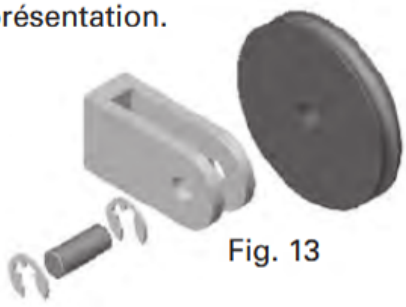


Fig. 13

Fig. 14

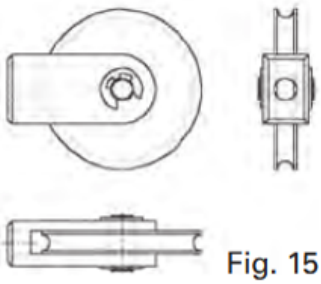
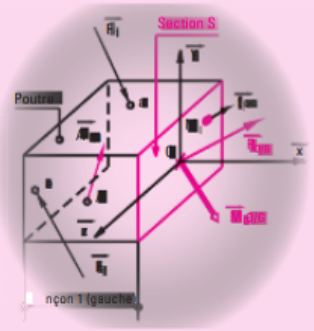


Fig. 15

5 Mécanique



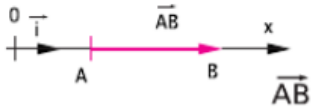
5.1. CHAÎNE ÉNERGÉTIQUE 242
5.1.1. Préliminaire : calculs vectoriels 242
5.2. COMPORTEMENT DU SOLIDE INDÉFORMABLE 243
5.2.1. Comportement statique des mécanismes (étude analytique) 243
5.2.2. Moment d'une force par rapport à un point fixe dans un repère galiléen 244
5.2.3. Modélisation de l'action mécanique d'une force appliquée à un solide 244
5.2.4. Modélisation d'un système de forces appliquées à un solide 244
5.2.5. Changement du centre de réduction d'un torseur 244
5.2.6. Torseur des actions transmissibles par une liaison 245
5.2.7. Principe fondamental de la statique 245
5.2.8. Exemple de résolution d'un problème de statique (cas d'un problème plan) 246
5.2.9. Comportement statique des mécanismes (étude graphique) 249
5.2.10. Comportement statique des mécanismes (adhérence) 251
5.2.11. Comportement statique des mécanismes (torseurs transmissibles par les liaisons) 252
5.2.12. Comportement cinématique des mécanismes (cinématique du point) 254
5.2.13. Comportement cinématique des mécanismes (cinématique du solide) 257
5.2.14. Comportement dynamique d'un solide 260
5.2.15. Principe fondamental de la dynamique 260
5.2.16. Exemples de moments d'inertie 261
5.2.17. Travail et puissance 262
5.3. COMPORTEMENT DU SOLIDE DÉFORMABLE 263
5.3.1. Propriétés mécaniques des matériaux 263
5.3.2. Hypothèses de travail en résistance des matériaux 263
5.3.3. Torseur de cohésion et contrainte 263
5.3.4. Les différentes sollicitations 265
5.3.5. Les contraintes 265
5.3.6. Rigidité des éléments déformables (traction) 266
5.3.7. Rigidité des éléments déformables (cisaillement) 268
5.3.8. Rigidité des éléments déformables (torsion) 270
5.3.9. Rigidité des éléments déformables (flexion) 272
5.3.10. Moments quadratiques par rapport à l'axe Gz de quelques sections de poutres 274

5.1. CHAÎNE ÉNERGÉTIQUE

5.1.1. PRÉLIMINAIRE : CALCULS VECTORIELS

Ce chapitre n'est pas un cours complet de mécanique, mais il permettra de retrouver les éléments de base pour résoudre un problème de mécanique.

• **Le vecteur** : Un vecteur $\overrightarrow{AB}$ est défini géométriquement dans un repère par les caractéristiques suivantes :
– son origine : point A
– son support ou direction (AB)
– son sens (de A vers B)
– son module ou norme $\|\overrightarrow{AB}\|$ (longueur du bipoint AB)



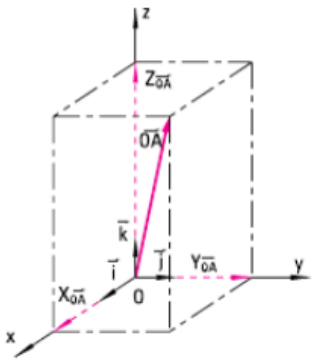
$\overrightarrow{AB} = \|\overrightarrow{AB}\|.\vec{i}$

Le vecteur utilisé en statique est glissant car son origine pourra être prise indifféremment sur son support.

• Coordonnées cartésiennes d'un vecteur

Dans l'espace

Soit un repère orthonormé $\mathcal{R}(O,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$ direct



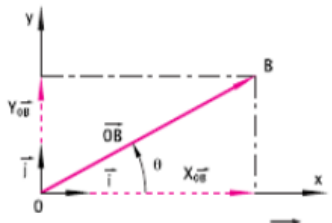
$$\overrightarrow{OA} = X_{\overrightarrow{OA}}.\vec{i} + Y_{\overrightarrow{OA}}.\vec{j} + Z_{\overrightarrow{OA}}.k$$

$$\overrightarrow{OA} = \begin{vmatrix} X_{\overrightarrow{OA}} \\ Y_{\overrightarrow{OA}} \\ Z_{\overrightarrow{OA}} \end{vmatrix}$$

$$\|\overrightarrow{OA}\| = \sqrt{X^2_{\overrightarrow{OA}} + Y^2_{\overrightarrow{OA}} + Z^2_{\overrightarrow{OA}}}$$

Dans le plan

Soit un repère orthonormé direct $\mathcal{R}(O,\vec{i},\vec{j})$



$$\overrightarrow{OB} = X_{\overrightarrow{OB}}.\vec{i} + Y_{\overrightarrow{OB}}.\vec{j}$$

$$\overrightarrow{OB} = \begin{vmatrix} X_{\overrightarrow{OB}} \\ Y_{\overrightarrow{OB}} \end{vmatrix}$$

$$\|\overrightarrow{OB}\| = \sqrt{X^2_{\overrightarrow{OB}} + Y^2_{\overrightarrow{OB}}}$$

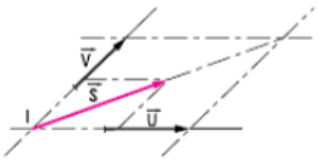
$$X_{\overrightarrow{OB}} = \cos\theta \; \|\overrightarrow{OB}\|$$

$$Y_{\overrightarrow{OB}} = \sin\theta \; \|\overrightarrow{OB}\|$$

Coordonnées polaires dans le plan : $\overrightarrow{OB} = \begin{vmatrix} \rho = \|\overrightarrow{OB}\| \\ \theta \end{vmatrix}$
ρ = rayon polaire
θ = angle orienté à partir de l'axe Ox dans le sens trigonométrique

• Opérations sur les vecteurs

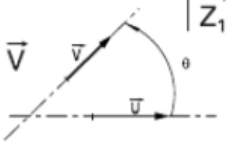
Addition vectorielle : on appelle somme vectorielle de deux vecteurs $\vec{U}$ et $\vec{V}$, le vecteur $\vec{S}$ tel que : $\vec{U}\begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1, \\ Z_1 \end{vmatrix} \; \vec{V}\begin{vmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{vmatrix} \Rightarrow \vec{S}\begin{vmatrix} X_1 + X_2 \\ Y_1 + Y_2 \\ Z_1 + Z_2 \end{vmatrix}$



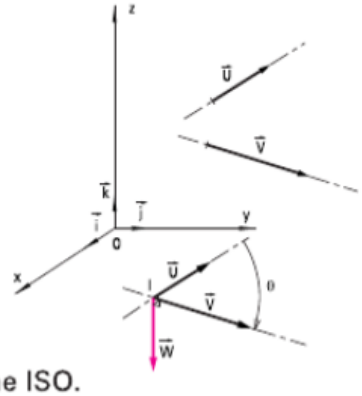
Produit scalaire de deux vecteurs : on appelle produit scalaire de deux vecteurs $\vec{U}\begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1, \\ Z_1 \end{vmatrix} \; \vec{V}\begin{vmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{vmatrix}$ le scalaire tel que :

$\vec{U} \bullet \vec{V} = \|\vec{U}\| \bullet \|\vec{V}\| \bullet \cos\theta$ avec $\theta = (\vec{U},\vec{V})$ = angle orienté de $\vec{U}$ vers $\vec{V}$

$\vec{U} \bullet \vec{V} = X_1.X_2 + Y_1.Y_2 + Z_1.Z_2$



Produit vectoriel de deux vecteurs : on appelle produit vectoriel de deux vecteurs $\vec{U}\begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1, \\ Z_1 \end{vmatrix} \; \vec{V}\begin{vmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{vmatrix}$ le vecteur $\vec{W}$ dont un représentant du point I est tel que :
– son support soit perpendiculaire au plan $(I,\vec{U},\vec{V})$,
– son sens soit tel que le trièdre $(\vec{U},\vec{V},\vec{W})$ soit direct,
– sa norme soit définie par : $\vec{W} = \|\vec{U}\| \bullet \|\vec{V}\| \bullet \sin\theta$
avec $\theta = (\vec{U},\vec{V})$ = angle orienté de $\vec{U}$ vers $\vec{V}$.



Détermination des coordonnées du vecteur $\vec{W}$:

$$\vec{W} = \vec{U} \wedge \vec{V} = \begin{vmatrix} Y_1.Z_2 - Y_2.Z_1 \\ -(X_1.Z_2 - X_2.Z_1) \\ X_1.Y_2 - X_2.Y_1 \end{vmatrix}$$

Remarque : le symbole $\wedge$ est équivalent à $\times$ d'après la norme ISO.

5.2. COMPORTEMENT DU SOLIDE INDÉFORMABLE

5.2.1. COMPORTEMENT STATIQUE DES MÉCANISMES (ÉTUDE ANALYTIQUE)

La statique est l'étude mécanique des solides ou systèmes de solides au repos pris dans un repère considéré comme galiléen.

• Les actions mécaniques

Définition : une action mécanique est une « cause » capable :
- de modifier ou d'interdire le mouvement d'un corps,
- de déformer un corps.

Notion de force : elle génère ou interdit un mouvement suivant une droite ; on représentera une force par un vecteur glissant défini par :
- sa direction (Δ) : $\Delta\vec{F}$,
- son sens,
- sa norme (intensité ou module) $\|\vec{F}\|$ dont l'unité est le Newton (N).

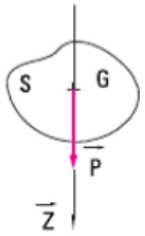
• Différents types de forces

Actions à distance :

- les effets magnétiques, électriques ou électrostatiques ;

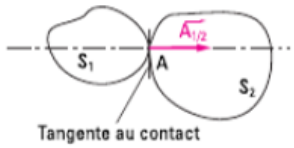
- les effets de la pesanteur : $\vec{P} = m.g.\vec{z}$

avec $\vec{P}$ = poids du corps en N
m = masse du corps en kg
g = accélération de la pesanteur (9,81 m/s² à Paris)

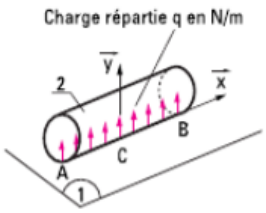


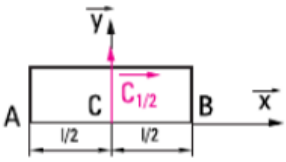
Actions de contact :

– contact ponctuel : l'action passe par le point de contact A.
La direction de l'action mécanique de S_1 sur S_2 notée $\overrightarrow{A_{1/2}}$ est perpendiculaire à la tangente au contact A si on néglige les frottements au contact.
Le sens est dirigé vers le solide 2.
Le module $\|\overrightarrow{A_{1/2}}\|$ est défini par la longueur du vecteur $\overrightarrow{A_{1/2}}$; l'unité est le Newton.

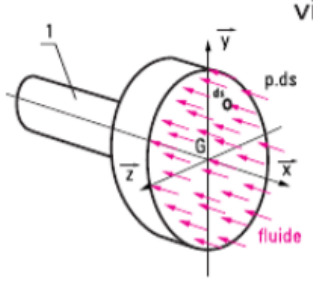


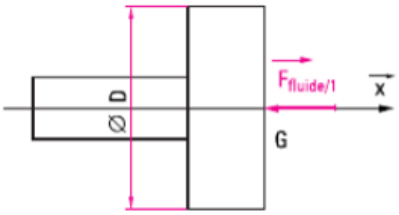
– contact linéique : on supposera l'action répartie uniformément au contact.
Dans le cas d'une répartition uniforme, on remplacera cette charge répartie par une action unique concentrée appliquée au milieu du segment AB telle que $\|\overrightarrow{C_{1/2}}\| = q.l$





– contact surfacique : exemple des forces de pression.
Dans le cas d'une répartition uniforme du fluide sur le piston, on remplacera l'ensemble des micro-actions par une action unique appliquée au centre de gravité de la surface : $\|\overrightarrow{F_{fluide/1}}\| = p.S$ avec p = pression du fluide en pascal (Pa)
S = surface sur laquelle s'exerce le fluide en m²
$\|\overrightarrow{F_{fluide/1}}\|$ = résultante des forces de pression en N



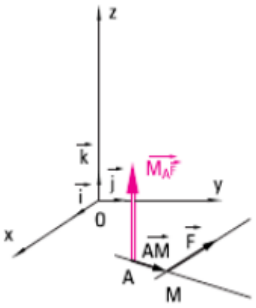


5.2.2. MOMENT D'UNE FORCE PAR RAPPORT À UN POINT FIXE DANS UN REPÈRE GALILÉEN

Définition :

Soit : un repère galiléen $\mathcal{R}(O,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$,
un point A quelconque,
une force $\vec{F}$ appliquée en un point M.

$\theta = (\overrightarrow{AM}, \vec{F})$ = angle orienté de $\overrightarrow{AM}$ vers $\vec{F}$.



On appelle moment par rapport au point A de la force appliquée en M, le vecteur défini par : $\overrightarrow{M_AF} = \overrightarrow{AM} \wedge \vec{F}$

Remarque : – le support du vecteur $\overrightarrow{M_AF}$ est perpendiculaire au plan contenant A et F.
– le sens de $\overrightarrow{M_AF}$ est tel que le trièdre $(\overrightarrow{AM}, \vec{F}, \overrightarrow{M_AF})$ soit direct ;
– le module est tel que : $\|\overrightarrow{M_AF}\| = \|\vec{F}\| \bullet \|\overrightarrow{AM}\| \bullet \sin\theta$; l'unité est le N.m.

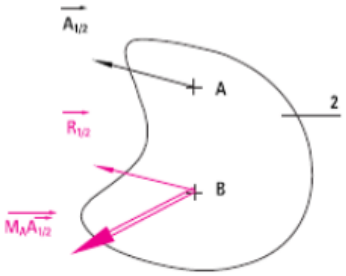
Cas de nullité du moment : $\overrightarrow{M_AF} = \vec{0}$ si $\vec{F} = \vec{0}$ ou si la direction de $\vec{F}$ passe par le point A.

Transfert d'un moment d'une force en un autre point

Soit une force $\vec{F}$ appliquée en M et deux points A et B quelconques ; $\overrightarrow{M_BF} = \overrightarrow{M_AF} + \overrightarrow{BA} \wedge \vec{F}$

5.2.3. MODÉLISATION DE L'ACTION MÉCANIQUE D'UNE FORCE APPLIQUÉE À UN SOLIDE

Soit $\overrightarrow{A_{1/2}}$, une force appliquée en A par un solide 1 sur un solide 2.
L'action mécanique de la force $\overrightarrow{A_{1/2}}$ est modélisable en tout point B de 2 par :
– une action que l'on notera $\overrightarrow{R_{1/2}}$ appelée résultante générale,
– un moment $\overrightarrow{M_BA_{1/2}}$ qui est le moment de la force $\overrightarrow{A_{1/2}}$ en B.
L'ensemble des deux vecteurs définit le torseur au point B de l'action mécanique $\overrightarrow{A_{1/2}}$ qui s'exerce sur le solide 1 isolé.

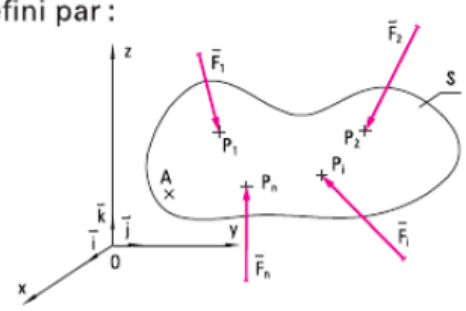


On le notera : $\{T_{1\to2}\} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{R_{1/2}} = \overrightarrow{A_{1/2}} \\ \overrightarrow{M_BF} = \overrightarrow{M_AF} + \overrightarrow{BA} \wedge \vec{F} \end{Bmatrix}_{B,\mathcal{R}}$

5.2.4. MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE FORCES APPLIQUÉES À UN SOLIDE

Le torseur du système de forces appliquées au solide S est défini par :

$$\{T_{\bar{S}\to S}\} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i \\ \overrightarrow{M_A\bar{S}/S} = \sum_{i=1}^{n} \overrightarrow{AP_i} \wedge \vec{F}_i \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}}$$



$\bar{S}/S$: ensemble des éléments extérieurs agissant sur S isolé.

5.2.5. CHANGEMENT DU CENTRE DE RÉDUCTION D'UN TORSEUR

Soit $\{T_{1\to2}\} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{R_{1/2}} \\ \overrightarrow{M_A1/2} \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}}$; le torseur en B aura pour éléments de réduction :

$$\{T_{1\to2}\} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{R_{1/2}} \\ \overrightarrow{M_B1/2} \end{Bmatrix}_{B} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{R_{1/2}} \\ \overrightarrow{M_A1/2} + \overrightarrow{BA} \wedge \overrightarrow{R_{1/2}} \end{Bmatrix}_{B,\mathcal{R}}$$

5.2.6. TORSEUR DES ACTIONS TRANSMISSIBLES PAR UNE LIAISON

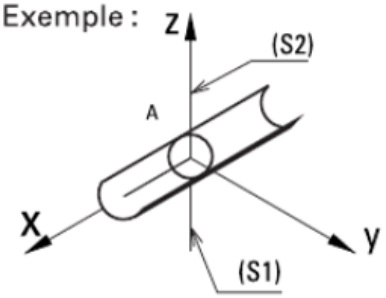
Une liaison est constituée de deux solides ou systèmes de solides (solides encastrés les uns par rapport aux autres). Les liaisons sont considérées comme parfaites :
– les surfaces sont géométriquement parfaites ;
– le jeu dans les liaisons est nul ;
– le contact entre les surfaces est sans adhérence.

Soit un repère $\mathcal{R}(A,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$ où $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont les vecteurs unitaires portés par les axes (Ax), (Ay) et (Az) ; les éléments de réduction du torseur des actions mécaniques du solide 1 sur le solide 2 (1 et 2 en liaison) sont définis au centre A de la liaison comme suit :

$$\{T_{1\to2}\} = \left\{\begin{matrix}\overrightarrow{A1/2} \\ \overrightarrow{M_A1/2}\end{matrix}\right\}_{A,\mathcal{R}} \quad \text{avec} \quad \overrightarrow{A_{1/2}} \left|\begin{matrix}X\vec{A}_{1/2} \\ Y\vec{A}_{1/2} \\ Z\vec{A}_{1/2}\end{matrix}\right. \quad \text{et} \quad \overrightarrow{M_A1/2} \left|\begin{matrix}L_A1/2 \\ M_A1/2 \\ N_A1/2\end{matrix}\right. \quad \{T_{1\to2}\} = \left\{\begin{matrix}X\vec{A}_{1/2} & L_A1/2 \\ Y\vec{A}_{1/2} & M_A1/2 \\ Z\vec{A}_{1/2} & N_A1/2\end{matrix}\right\}_{A,\mathcal{R}}$$

À chaque degré de liberté non nul dans la liaison correspond une composante nulle du torseur associé à l'action mécanique transmissible par celle-ci.

Exemple :



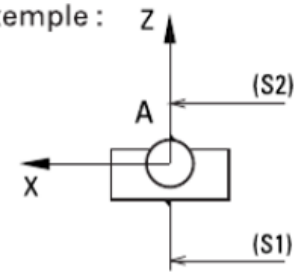
Les solides 1 et 2 sont en liaison linéique circulaire d'axe (Ax).
Les degrés de liberté dans cette liaison sont définis par :

Tx = 1	Rx = 1	avec	Tx = translation suivant l'axe (Ax)
Ty = 0	Ry = 1		Rx = rotation autour de l'axe (Ax)
Tz = 0	Rz = 1		1 = possibilité de mouvement
			0 = absence de mouvement

Le torseur des actions transmissibles par la liaison est : $\{T_{1\to2}\} = \left\{\begin{matrix}0 & 0 \\ Y\vec{A}_{1/2} & 0 \\ Z\vec{A}_{1/2} & 0\end{matrix}\right\}_{A,\mathcal{R}}$

Dans le cas d'un problème plan (mécanisme admettant un plan de symétrie pour la géométrie et les efforts) et pour un repère local défini dans le plan de symétrie, certaines composantes du torseur des actions transmissibles par la liaison s'annulent :
– la composante de la résultante suivant l'axe perpendiculaire au plan de symétrie est toujours nulle (par convention) ;
– les composantes du moment résultant suivant les axes contenus dans le plan de symétrie sont toujours nulles (par convention).

Exemple :



Soit (Ax, Az) plan de symétrie du mécanisme.
Le torseur des actions mécaniques transmissibles par la liaison est :

$$\{T_{1\to2}\} = \left\{\begin{matrix}0 & 0 \\ 0 & 0 \\ Z\vec{A}_{1/2} & 0\end{matrix}\right\}_{A,\mathcal{R}}$$

Les tableaux p. 252 et p. 253 donnent les torseurs transmissibles par les liaisons usuelles dans un repère $\mathcal{R}(A,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$.

5.2.7. PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA STATIQUE

Si un système matériel (S) isolé est en équilibre dans un repère galiléen, le torseur des actions mécaniques extérieures appliquées à (S) est égal au torseur nul.

$$\forall A \in Rg, \quad \{T_{\bar{S}\to S}\} = \{0\} \qquad \text{ou} \qquad \left\{\begin{matrix}\overrightarrow{R\bar{S}/S} \\ \overrightarrow{M_A\bar{S}/S}\end{matrix}\right\}_{A,\mathcal{R}} = \{0\}$$

Principe fondamental de la statique

Remarques : – isoler un solide ou un système de solide, c'est le sortir de son environnement et faire le bilan des actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur lui ;
– une action mécanique extérieure à un système est une action de l'environnement sur le système isolé.

De ce principe, on déduit deux équations vectorielles : $\overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = \vec{0}$; $\overrightarrow{M_{A\bar{S}/S}} = \vec{0}$

Ces deux équations se traduisent par six équations scalaires en projection sur les trois axes du repère R :

$$\overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = \vec{0} \Rightarrow \begin{cases} \text{proj/(Ox)} & \overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = 0 \\ \text{proj/(Oy)} & \overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = 0 \\ \text{proj/(Oz)} & \overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = 0 \end{cases}$$

$$\overrightarrow{M_A\bar{S}/S} = \vec{0} \Rightarrow \begin{cases} \text{proj/(Ox)} & \overrightarrow{M_A\bar{S}/S} = 0 \\ \text{proj/(Oy)} & \overrightarrow{M_A\bar{S}/S} = 0 \\ \text{proj/(Oz)} & \overrightarrow{M_A\bar{S}/S} = 0 \end{cases}$$

Dans le cas d'un problème plan, ces deux équations vectorielles se traduisent par trois équations scalaires ; si le plan de symétrie du mécanisme est (Ox, Oy) et (Oz) l'axe perpendiculaire à ce plan :

$$\overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = \vec{0} \Rightarrow \begin{cases} \text{proj/(Ox)} & \overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = 0 \\ \text{proj/(Oy)} & \overrightarrow{R_{\bar{S}/S}} = 0 \end{cases}$$

$$\overrightarrow{M_A\bar{S}/S} = \vec{0} \Rightarrow \{ \text{proj/(Oz)} \quad \overrightarrow{M_A\bar{S}/S} = 0$$

5.2.8. EXEMPLE DE RÉSOLUTION D'UN PROBLÈME DE STATIQUE (cas d'un problème plan)

Le mécanisme étudié est une pince de manipulateur, alimentée en air comprimé à une pression de 6 bars.

Hypothèses : – les frottements sont négligés dans les liaisons ;
– le poids propre des pièces est négligé ;
– l'étude se fera dans la position définie par le plan ci-dessous en phase de serrage : $\alpha = 60°$ et $\beta = 5°$;
– l'action du ressort est négligée pendant la phase de serrage ;
– le mécanisme admet un plan de symétrie géométrique et pour les efforts : plan (Ox, Oy) ;
– le diamètre du piston est D = 25 mm ;
– les coordonnées des points sont données en mm dans le repère $\mathcal{R}(O,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$ où $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont les vecteurs unitaires portés par les axes orientés (Ox), (Oy) et (Oz) : A(– 25,8 ; 0 ; 0) ; B(– 17,6 ; 14,2 ; 0) ; B'(– 17,6 ; – 14,2 ; 0) ; C(0 ; 8 ; 0) ; C'(0 ; – 8 ; 0) ; E(– 48,2 ; 0 ; 0) ; F(35,5 ; 15,1 ; 0) ; F'(35,5 ; – 15,1 ; 0).

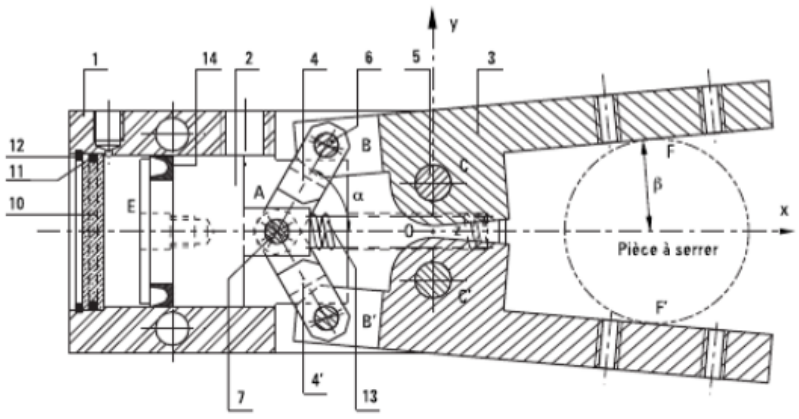
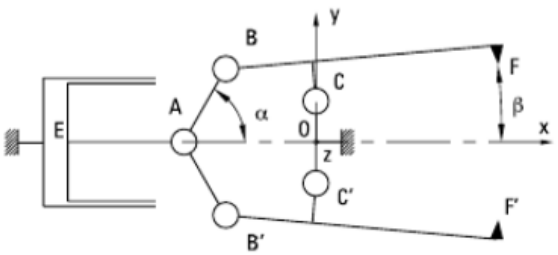


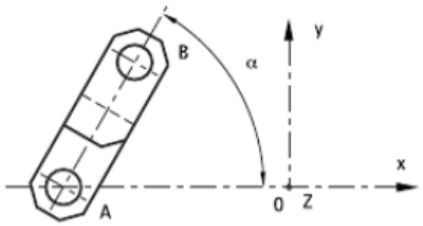
Schéma cinématique de la pince



Pince de manipulateur SCHRADER-BELLOWS (PARKER-Pneumatic)

• Étude de l'équilibre de la biellette 4

a) Bilan des actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur la biellette 4 isolée



La biellette 4 est soumise à l'action de deux forces.

$$\{T_{2\to4}\} = \begin{Bmatrix} X\overrightarrow{A_{2/4}} & 0 \\ Y\overrightarrow{A_{2/4}} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}} \quad \text{liaison pivot d'axe (Az)}$$

avec $\overrightarrow{A_{2/4}} = -\overrightarrow{A_{4/2}}$ (principe des actions mutuelles)

$$\{T_{3\to4}\} = \begin{Bmatrix} X\overrightarrow{B_{3/4}} & 0 \\ Y\overrightarrow{B_{3/4}} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{B,\mathcal{R}} \quad \text{liaison pivot d'axe (Bz)}$$

Théorème :

Si un solide, soumis à l'action de deux forces, est en équilibre, ces deux forces sont directement opposées.

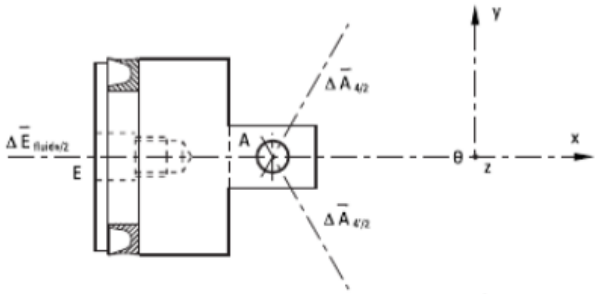
On peut donc conclure que $\overrightarrow{A_{2/4}} = -\overrightarrow{B_{3/4}}$ et que les directions des deux actions mécaniques sont identiques :

$\Delta\overrightarrow{A_{2/4}} = \Delta\overrightarrow{B_{3/4}} = (AB)$

On ne peut pas résoudre de façon plus avancée l'équilibre de la biellette 4, mais les conclusions nous permettent de lever certaines inconnues dans l'étude de l'équilibre du piston 2.

• Étude de l'équilibre du piston 2

a) Bilan des actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur le piston 2 isolé



Le piston est soumis à l'action de 3 forces.

$$\{T_{fluide\to2}\} = \begin{Bmatrix} \|\overrightarrow{E_{fluide/2}}\| & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{E,\mathcal{R}} \quad \text{avec } \|\overrightarrow{E_{fluide/2}}\| = p.\pi.D^2/4$$

$$\|\overrightarrow{E_{fluide/2}}\| = 295 \text{ N}$$

$$\{T_{4\to2}\} = \begin{Bmatrix} X\overrightarrow{A_{4/2}} & 0 \\ Y\overrightarrow{A_{4/2}} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}} \quad \text{liaison pivot d'axe (Az)}$$

avec $X\overrightarrow{A_{4/2}} = -\|\overrightarrow{A_{4/2}}\|.\cos\alpha$ et $Y\overrightarrow{A_{4/2}} = -\|\overrightarrow{A_{4/2}}\|.\sin\alpha$

$$\{T_{4'\to2}\} = \begin{Bmatrix} X\overrightarrow{A_{4'/2}} & 0 \\ Y\overrightarrow{A_{4'/2}} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}} \quad \text{liaison pivot d'axe (Az)}$$

avec $X\overrightarrow{A_{4'/2}} = -\|\overrightarrow{A_{4'/2}}\|.\cos\alpha$ et $Y\overrightarrow{A_{4'/2}} = +\|\overrightarrow{A_{4'/2}}\|.\sin\alpha$

Le système comporte deux inconnues ; il est isostatique et donc résolvable.

b) Transfert des torseurs en A

Pour pouvoir appliquer le principe fondamental de la statique il faut que tous les torseurs soient exprimés au même point ; on choisira de préférence le point où il y a le plus d'inconnues, ce qui simplifiera les calculs.

En transférant $\{T_{fluide\to2}\}$ en A, la résultante reste inchangée et le moment résultant devient :

$\overrightarrow{M_A E_{fluide/2}} = \overrightarrow{M_E E_{fluide/2}} + \overrightarrow{AE} \wedge \overrightarrow{E_{fluide/2}}$

$\overrightarrow{M_E E_{fluide/2}} = \vec{0}$ car $\Delta\overrightarrow{E_{fluide/2}}$ passe par le point A.

Le nouveau torseur devient alors :

$$\{T_{fluide\to2}\} = \begin{Bmatrix} \|\overrightarrow{E_{fluide/2}}\| & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}}$$

c) Application du principe fondamental de la statique

$\{T_{fluide\to2}\} + \{T_{4\to2}\} + \{T_{4'\to2}\} = \{0\}$

Tous les torseurs sont définis en A dans $\mathcal{R}$.

De l'équation $\overrightarrow{R_{2/2}} = \vec{0}$, sont déduites deux équations scalaires

$\|\overrightarrow{E_{fluide/2}}\| + X\overrightarrow{A_{4/2}} + X\overrightarrow{A_{4'/2}} = 0$

$Y\overrightarrow{A_{4/2}} + Y\overrightarrow{A_{4'/2}} = 0$

De l'équation $\overrightarrow{M_A 2/2} = \vec{0}$, est déduite une équation scalaire qui ne donne rien dans ce cas puisqu'il n'y a pas de moment en A.

d) Résolution du système d'équations

Après résolution, on trouve :

$X\overrightarrow{A_{4/2}} = -147{,}5$ $\quad X\overrightarrow{A_{4'/2}} = -147{,}5$

$X\overrightarrow{A_{4/2}} = -255{,}5$ $\quad Y\overrightarrow{A_{4'/2}} = +255{,}5$

e) Synthèse des résultats

Il est toujours bon de récapituler les résultats pour les utiliser plus aisément dans les questions ultérieures.

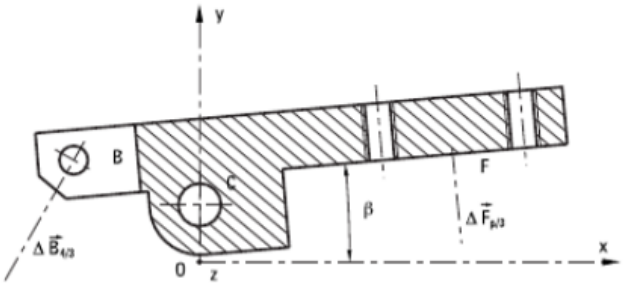
$$\{T_{4\to2}\} = \begin{Bmatrix} -147{,}5 & 0 \\ -255{,}5 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}} \qquad \{T_{4'\to2}\} = \begin{Bmatrix} -147{,}5 & 0 \\ +255{,}5 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A,\mathcal{R}}$$

$\|\overrightarrow{A4/2}\| = 295$ N $\qquad \|\overrightarrow{A4'/2}\| = 295$ N

Exemple de résolution d'un problème de statique (cas d'un problème plan)

• Étude de l'équilibre du doigt 3

a) Bilan des actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur le doigt 3 isolé



On supposera l'axe 6 encastré dans le doigt 3 : 3 = (6, 3).

$$\{T_{4\to3}\} = \begin{Bmatrix} X\overrightarrow{B_{4/3}} & 0 \\ Y\overrightarrow{B_{4/3}} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{B,\mathcal{R}} \quad \text{avec} \quad \begin{matrix} \overrightarrow{B_{4/3}} = -\overrightarrow{B_{3/4}} \\ X\overrightarrow{B_{4/3}} = 147{,}5 \\ Y\overrightarrow{B_{4/3}} = 255{,}5 \end{matrix}$$

$$\{T_{5\to3}\} = \begin{Bmatrix} X\overrightarrow{C_{5/3}} & 0 \\ Y\overrightarrow{C_{5/3}} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{C,\mathcal{R}} \quad \text{Liaison pivot d'axe (Cz)}$$

$$\{T_{pièce\to3}\} = \begin{Bmatrix} X\overrightarrow{F_{p/3}} & 0 \\ Y\overrightarrow{F_{p/3}} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{F,\mathcal{R}}$$

L'action de contact en F est perpendiculaire à la tangente au contact en F.

avec $X\overrightarrow{F_{p/3}} = -\|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\sin\beta$ et $Y\overrightarrow{F_{p/3}} = \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\cos\beta$

Le système comporte trois inconnues ; il est isostatique et donc résolvable.

b) Transfert des torseurs en C

$$\overrightarrow{M_C B_{4/3}} = \overrightarrow{M_B B_{4/3}} + \overrightarrow{CB} \wedge \overrightarrow{F_{4/3}} \quad \text{avec} \quad \overrightarrow{M_B B_{4/3}} = \vec{0}$$

$$\overrightarrow{M_C B_{4/3}} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -5411 \end{vmatrix} \qquad \overrightarrow{CB} \begin{vmatrix} -17{,}6 \\ 6{,}2 \\ 0 \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{B_{4/3}} \begin{vmatrix} 147{,}5 \\ 255{,}5 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$\{T_{4\to3}\} = \begin{Bmatrix} 147{,}5 & 0 \\ 255{,}5 & 0 \\ 0 & -5411 \end{Bmatrix}_{B,\mathcal{R}}$$

$$\overrightarrow{M_C F_{p/3}} = \overrightarrow{M_F F_{p/3}} + \overrightarrow{CF} \wedge \overrightarrow{F_{p/3}} \quad \text{avec} \quad \overrightarrow{M_F F_{p/3}} = \vec{0}$$

$$\overrightarrow{CF} \begin{vmatrix} 35{,}5 \\ 7{,}1 \\ 0 \end{vmatrix} \qquad \text{et} \quad \overrightarrow{F_{p/3}} \begin{vmatrix} -\|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\sin\beta \\ \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\cos\beta \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$\overrightarrow{M_C F_{p/3}} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.(35{,}5.\cos\beta + 7{,}1.\sin\beta) \end{vmatrix}$$

$$\{T_{5\to4}\} = \begin{Bmatrix} -\|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\sin\beta & 0 \\ \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\cos\beta & 0 \\ 0 & \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.(35{,}5.\cos\beta + 7{,}1.\sin\beta) \end{Bmatrix}_{B,\mathcal{R}}$$

c) Application du principe fondamental de la statique

$\{T_{4\to3}\}_{\mathcal{R}} + \{T_{5\to3}\}_{\mathcal{R}} + \{T_{pièce\to3}\}_{\mathcal{R}} = \{0\}$

De l'équation $\overrightarrow{R_{3/3}} = \vec{0}$, sont déduites deux équations scalaires :

$147{,}5 + X\overrightarrow{C_{5/3}} - \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\sin\beta = 0$

$255{,}5 + Y\overrightarrow{C_{5/3}} + \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.\cos\beta = 0$

De l'équation $\overrightarrow{MA_{3/3}} = \vec{0}$, est déduite une équation scalaire :

$-5411 + \|\overrightarrow{F_{p/3}}\|.(35{,}5.\cos\beta + 7{,}1.\sin\beta) = 0$

d) Résolution du système d'équations

Après résolution, on trouve :

$X\overrightarrow{C_{5/3}} = -134{,}4$ $\qquad$ $X\overrightarrow{F_{p/3}} = -13{,}1$

$Y\overrightarrow{C_{5/3}} = -405{,}5$ $\qquad$ $Y\overrightarrow{F_{p/3}} = 149{,}8$

e) Synthèse des résultats

$$\{T_{pièce\to3}\} = \begin{Bmatrix} -13{,}1 & 0 \\ 149{,}8 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{F,\mathcal{R}} \qquad \|\overrightarrow{F_{p/3}}\| = 150{,}4 \text{ N}$$

$$\{T_{5\to3}\} = \begin{Bmatrix} -134{,}4 & 0 \\ -405{,}3 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{C,\mathcal{R}} \qquad \|\overrightarrow{C_{5/3}}\| = 427 \text{ N}$$

Détermination de la direction de $\overrightarrow{C_{5/3}}$.

Soit γ l'angle d'inclinaison de l'action $\overrightarrow{C_{5/3}}$ par rapport à l'axe (Ox).

$$\arctan\gamma = \frac{Y\overrightarrow{C_{5/3}}}{X\overrightarrow{C_{5/3}}} \Rightarrow \gamma = 71{,}65° \text{ ou } \gamma = 71°\,39'15''$$

5.2.9. COMPORTEMENT STATIQUE DES MÉCANISMES (étude graphique)

• Exemples de résolution graphique d'un problème de statique

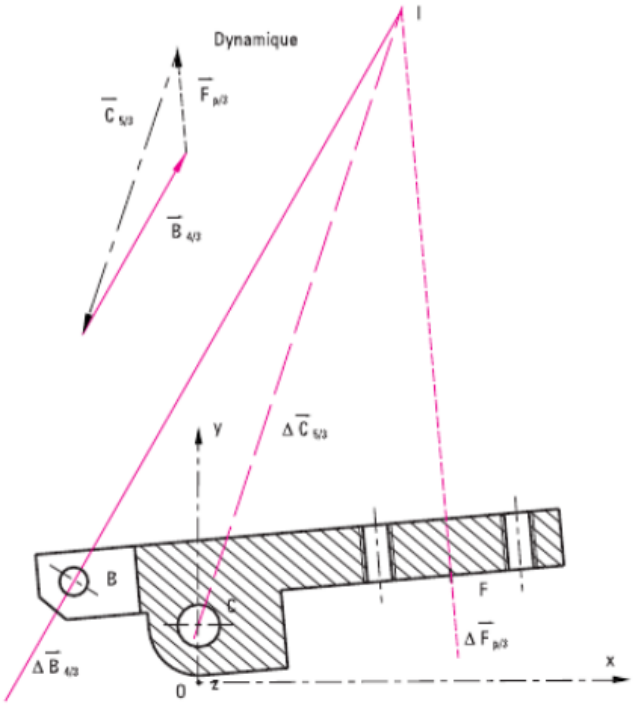
Cas d'un solide soumis à l'action de trois forces de directions concourantes

Théorème : si un solide, soumis à l'action de trois forces, est en équilibre, ces trois forces sont concourantes en un même point ou parallèles.

Hypothèses :
– une force connue entièrement ($\overrightarrow{B_{4/3}}$) ;
– une direction connue ($\Delta\overrightarrow{F_{p/3}}$) ;
– un point de la direction de la troisième force connue (C).

Tracé :
– choisir une échelle du dessin et des forces ;
– prolonger les deux directions connues pour déterminer leur point de concours I ;
– tracer la troisième direction passant par C et I ;
– tracer le dynamique des forces en commençant par placer la force connue puis les directions des deux autres, aux extrémités de la première ;
– définir le sens des forces : la somme des trois vecteurs doit être nulle (dynamique fermé) ;
– déterminer le module des forces en ramenant à l'échelle choisie.

Échelle du dessin : 0,8:1
Échelle des forces : 1 mm → 1,3 N



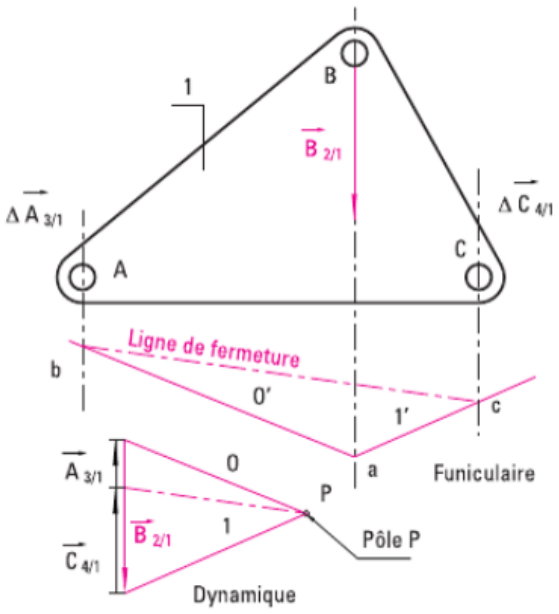
• Cas d'un solide soumis à l'action de trois forces de directions parallèles

Hypothèses :
– une force connue entièrement ($\overrightarrow{B_{2/1}}$) ;
– les directions des forces en A et C sont parallèles à celle de $\overrightarrow{B_{2/1}}$.

Tracé :
– choisir une échelle du dessin et des forces ;
– prolonger les directions des forces ;
– tracer la force connue et un pôle quelconque P ;
– tracer les rayons polaires 0 et 1 (dynamique) ;
– tracer 0' et 1', parallèles à 0 et 1, qui se coupent sur la direction de $\overrightarrow{B_{2/1}}$ en a (funiculaire) ;
– les droites 0' et 1' coupent les directions de $\overrightarrow{A_{3/1}}$ et $\overrightarrow{C_{4/1}}$ en deux points b et c qui définissent la ligne de fermeture du funiculaire ;
– tracer, sur le dynamique, la parallèle à la ligne de fermeture passant par le pôle P ; celle-ci coupe la direction de $\overrightarrow{B_{2/1}}$ en un point et définit ainsi la longueur des deux vecteurs $\overrightarrow{A_{3/1}}$ et $\overrightarrow{C_{4/1}}$;
– définir le sens des forces : la somme des trois vecteurs doit être nulle (dynamique fermé) ;
– déterminer le module des forces en ramenant à l'échelle choisie.

Remarque : deux rayons polaires encadrent une force sur le dynamique ; les parallèles à ces rayons polaires se coupent sur la direction de cette même force sur le funiculaire.

Échelle du dessin : 1:2
Échelle des forces : 1 mm → 10 N



Comportement statique des mécanismes (études graphiques)

• Cas d'un solide soumis à l'action de quatre forces de directions concourantes

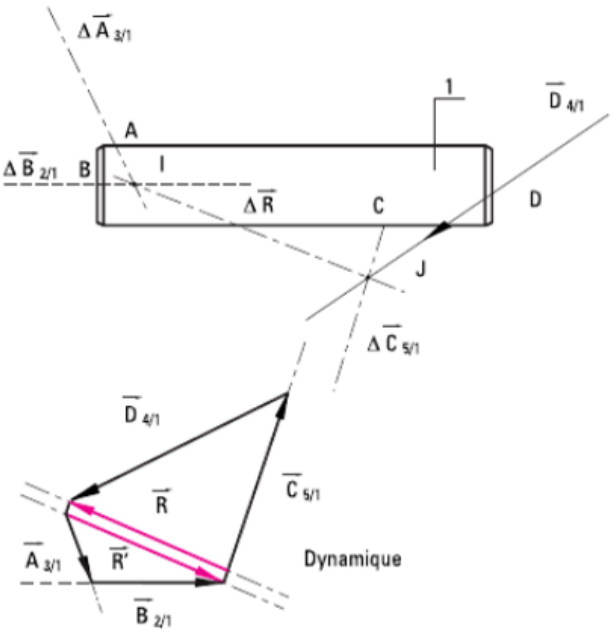
Hypothèses :

– une force connue entièrement $\overrightarrow{D_{4/1}}$;
– trois directions connues $(\Delta\overrightarrow{A_{3/1}})$, $(\Delta\overrightarrow{B_{2/1}})$ et $(\Delta\overrightarrow{C_{5/1}})$.

Échelle du dessin : 1:2
Échelle des forces : 1 mm → 10 N

Tracés :

– choisir une échelle du dessin et des forces ;
– grouper les forces deux à deux pour en déterminer la résultante : $\overrightarrow{A_{3/1}} + \overrightarrow{B_{2/1}} = \overrightarrow{R'}$ et $\overrightarrow{D_{4/1}} + \overrightarrow{C_{5/1}} = \overrightarrow{R}$;
– on peut alors écrire : $\overrightarrow{R} + \overrightarrow{R'} = 0$ ou $\overrightarrow{R'} = -\overrightarrow{R}$;
– prolonger les directions $\Delta\overrightarrow{A_{3/1}}$ et $\Delta\overrightarrow{B_{2/1}}$ qui se coupent en I, point d'application de $\overrightarrow{R'}$;
– prolonger les directions $\Delta\overrightarrow{D_{4/1}}$ et $\Delta\overrightarrow{C_{5/1}}$ qui se coupent en J, point d'application de $\overrightarrow{R}$;
– la direction de $\overrightarrow{R}$ ou $\overrightarrow{R'}$ est donc (IJ) ;
– tracer le dynamique des forces en commençant par placer la force connue $\overrightarrow{D_{4/1}}$ puis les directions de $\overrightarrow{R}$ et de $\overrightarrow{C_{5/1}}$, aux extrémités de la première ;
– définir le sens des forces : la somme des trois vecteurs doit être nulle ;
– tracer $\overrightarrow{R'} = -\overrightarrow{R}$, puis les directions de $\overrightarrow{A_{3/1}}$ et $\overrightarrow{B_{2/1}}$, aux extrémités de la première ;
– définir le sens des forces : la somme des trois vecteurs doit être nulle ;
– déterminer le module des forces en ramenant à l'échelle choisie.



Cas d'un solide soumis à l'action de plus de quatre forces de directions quelconques

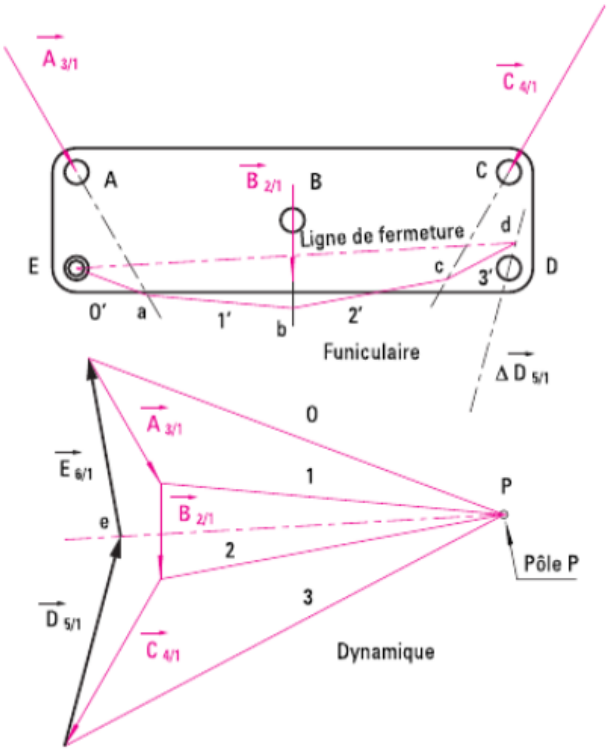
Hypothèses :

– trois forces connues entièrement $(\overrightarrow{A_{3/1}}, \overrightarrow{B_{2/1}}$ et $\overrightarrow{C_{4/1}})$;
– une direction connue $\Delta\overrightarrow{D_{5/1}}$;
– un point connu (E) de la direction de la cinquième force $\overrightarrow{E_{6/1}}$.

Échelle du dessin : 1:4
Échelle des forces : 1 mm → 100 N

Tracé :

– choisir une échelle du dessin et des forces ;
– prolonger les directions des forces ;
– tracer les forces connues bout à bout et un pôle quelconque P (dynamique) ;
– tracer les rayons polaires 0, 1, 2 et 3 (dynamique) ;
– tracer 0' parallèle à 0, passant par le point E seul point connu de la direction de la force $\overrightarrow{E_{6/1}}$ et qui coupe $\Delta\overrightarrow{A_{3/1}}$ en a (funiculaire) ;
– tracer 1' parallèle à 1, passant par a et qui coupe $\Delta\overrightarrow{B_{2/1}}$ en b, puis 2' parallèle à 2, passant par b et qui coupe $\Delta\overrightarrow{C_{4/1}}$ en c, puis 3' parallèle à 3, passant par c et qui coupe $\Delta\overrightarrow{D_{5/1}}$ en d ;
– le point E (point de départ) et le point d définissent la ligne de fermeture du funiculaire ;
– tracer, sur le dynamique, la parallèle à la ligne de fermeture passant par le pôle P puis tracer à l'extrémité de $\overrightarrow{C_{4/1}}$ une parallèle à $\Delta\overrightarrow{D_{5/1}}$ qui coupe la parallèle à la ligne de fermeture en e ; la force $\overrightarrow{D_{5/1}}$ est ainsi définie.
– fermer le dynamique et déterminer la force $\overrightarrow{E_{6/1}}$;
– définir le sens des forces : la somme des cinq vecteurs doit être nulle (dynamique fermé) ;
– déterminer le module des forces en ramenant à l'échelle choisie.



5.2.10. COMPORTEMENT STATIQUE DES MÉCANISMES (adhérence)

• Adhérence et frottement

Dans le cas de « non-frottement », les actions mécaniques de contact entre deux solides ont une direction normale au plan tangent au contact. Cette hypothèse convient dans de nombreuses applications, mais ne peut être retenue pour des mécanismes utilisant les propriétés du frottement tels les embrayages ou freins, les systèmes poulies-courroies ou à roues de frictions. Le frottement est une des causes de baisse des rendements et des pertes d'énergie.

Conditions d'équilibre

Soit un solide 1 de poids P en liaison appui plan avec un solide 2. Soit $\overrightarrow{A_{2/1}}$, la résultante des actions de contact de 2 sur 1 exercée en A et une action $\overrightarrow{B_{3/1}}$ qui a tendance à tirer le solide 1 sur le solide 2.

L'adhérence se caractérise par l'inclinaison d'un angle α par rapport à la normale au contact en A, de l'action $\overrightarrow{A_{2/1}}$ du côté opposé à la tendance au mouvement de 1 par rapport à 2 (fig. 1 et 2).

Le solide 1 est en équilibre : $\overrightarrow{P} + \overrightarrow{A_{2/1}} + \overrightarrow{B_{3/1}} = \overrightarrow{0}$; il le restera tant que α restera inférieur à une valeur limite φ.

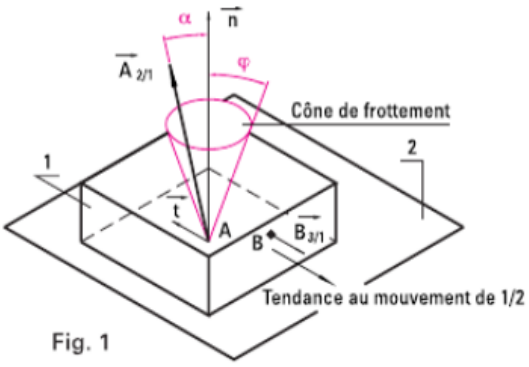


Fig. 1

Dans le cas de l'« équilibre strict » (limite du glissement fig. 3), l'action $\overrightarrow{A_{2/1}}$ est inclinée de l'angle φ qui caractérise la frontière entre l'adhérence et le frottement (on parle de frottement lorsqu'il y a glissement). L'angle φ, appelé angle de frottement, définit un cône de sommet A, d'axe $\vec{n}$ et de demi-angle au sommet φ appelé cône de frottement.

Si l'action $\overrightarrow{B_{3/1}}$ augmente, l'angle reste inchangé ; il y a glissement et l'équilibre est rompu : $\overrightarrow{P} + \overrightarrow{A_{2/1}} + \overrightarrow{B_{3/1}} \neq \overrightarrow{0}$;
L'action $\overrightarrow{A_{2/1}}$ ne pourra jamais sortir du cône de frottement.

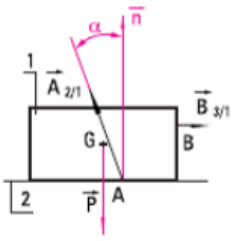


Fig. 2

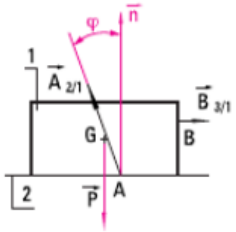


Fig. 3

Coefficient de frottement

Dans le cas de l'équilibre strict, l'angle φ permet de définir un coefficient μ (ou f) appelé coefficient de frottement : $\mu = \tan \varphi$.

Une relation lie les composantes de l'action $\overrightarrow{A_{2/1}}$ (fig. 4) :

$$\|\overrightarrow{T_{2/1}}\| = \|\overrightarrow{N_{2/1}}\|.\tan \varphi = \|\overrightarrow{N_{2/1}}\|.\mu$$

avec $\overrightarrow{N_{2/1}}$ = composante normale de $\overrightarrow{A_{2/1}}$

$\overrightarrow{T_{2/1}}$ = composante tangentielle de $\overrightarrow{A_{2/1}}$

C'est cette composante tangentielle qui s'oppose à la tendance au mouvement de 1 par rapport à 2.

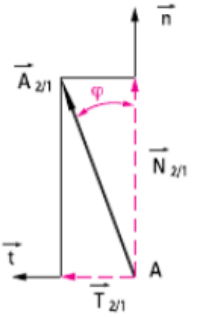


Fig. 4

Lois de Coulomb

Le coefficient de frottement μ dépend de :
- la nature des surfaces en contact,
- la rugosité des surfaces en contact et de leur lubrification.

Il est indépendant de :
- la pression de contact,
- la forme et l'étendue des surfaces en contact,
- la vitesse de glissement.

Ces lois de Coulomb restent approchées, car le coefficient de frottement peut varier légèrement avec la pression de contact, la vitesse de glissement et la température.

Valeurs du coefficient de frottement μ
(valeurs indicatives)

Nature des matériaux en contact	μ à sec	μ lubrifié
Acier trempé/Acier trempé	0,17	0,07
Acier/Fonte	0,17	0,08
Acier trempé/Bronze	0,11	0,05
Fonte/Bronze	0,2	0,06
Téflon/Acier	0,04	
Garniture de frein/Fonte	0,4	
Pneu/route	0,6	0,3 à 0,1

Cas d'un guidage en rotation avec frottement

Soit un arbre 1 de rayon R en contact avec frottement au point A avec l'alésage 2 (fig. 5). La composante tangentielle $\overrightarrow{T_{2/1}}$ s'oppose à la tendance au mouvement de rotation de 1 par rapport à 2 ; elle crée un moment appelé « moment de frottement » tel que :

$$\|\overrightarrow{M_O A_{2/1}}\| = R.\|\overrightarrow{T_{2/1}}\| = R.\|\overrightarrow{N_{2/1}}\|.\tan \varphi = R.\|\overrightarrow{N_{2/1}}\|.\mu$$

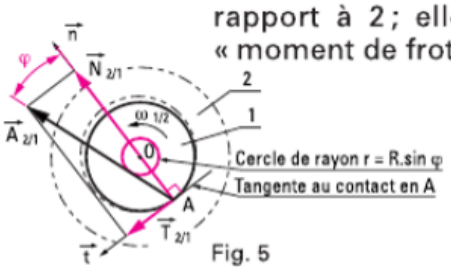
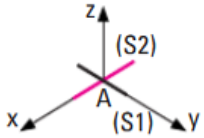
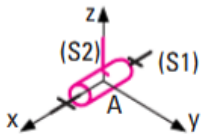
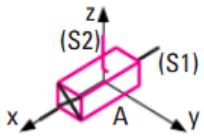
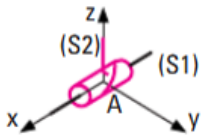
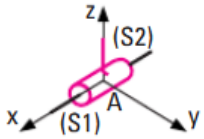
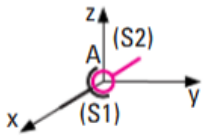
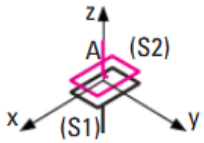
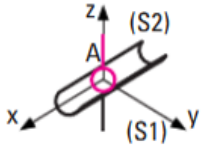
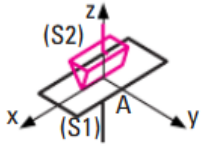
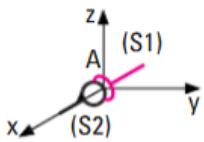


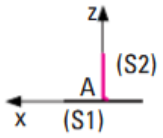
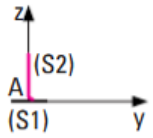
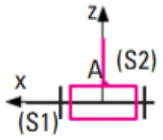
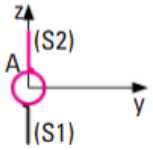
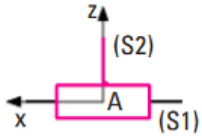
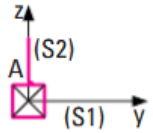
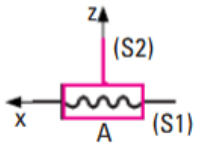
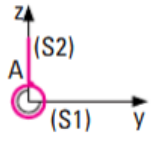
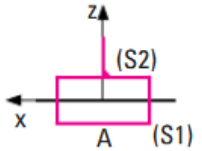
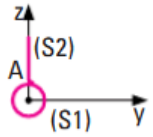
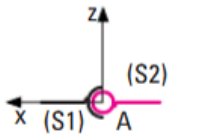
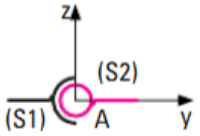
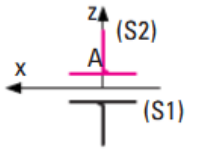
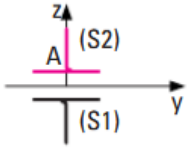
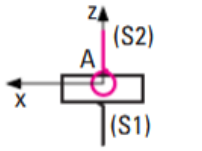
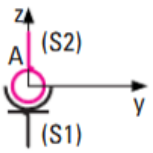
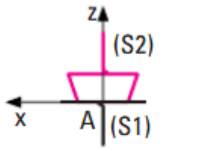
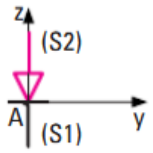
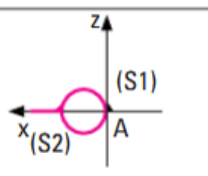
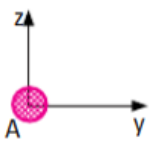
Fig. 5

5.2.11. COMPORTEMENT STATIQUE DES MÉCANISMES (torseurs transmissibles par les liaisons)

NATURE DE LA LIAISON ET REPÈRE ASSOCIÉ A $\mathcal{R}(A, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$*	ÉTUDE SPATIALE		
	Schématisation	Degré de liberté T R	Torseur transmissible
ENCASTREMENT		0 0 0 0 0 0	$A \left\{ \begin{matrix} X_{\overrightarrow{A1/2}} & L_{A1/2} \\ Y_{\overrightarrow{A1/2}} & M_{A1/2} \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & N_{A1/2} \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
PIVOT d'axe (Ax)		0 Rx 0 0 0 0	$A \left\{ \begin{matrix} X_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \\ Y_{\overrightarrow{A1/2}} & M_{A1/2} \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & N_{A1/2} \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
GLISSIÈRE d'axe (Ax)		Tx 0 0 0 0 0	$A \left\{ \begin{matrix} 0 & L_{A1/2} \\ Y_{\overrightarrow{A1/2}} & M_{A1/2} \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & N_{A1/2} \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
GLISSIÈRE HÉLICOÏDALE d'axe (Ax)		Tx Rx 0 0 0 0 Tx = k.Rx	$A \left\{ \begin{matrix} X_{\overrightarrow{A1/2}} & L_{A1/2} \\ Y_{\overrightarrow{A1/2}} & M_{A1/2} \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & N_{A1/2} \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$ $X_{\overrightarrow{A1/2}} = k.L_{A1/2}$
PIVOT GLISSANT d'axe (Ax)		Tx Rx 0 0 0 0	$A \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ Y_{\overrightarrow{A1/2}} & M_{A1/2} \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & N_{A1/2} \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
ROTULE de centre A		0 Rx 0 Ry 0 Rz	$A \left\{ \begin{matrix} X_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \\ Y_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
APPUI PLAN de normale (Az)		Tx 0 Ty 0 0 Rz	$A \left\{ \begin{matrix} 0 & L_{A1/2} \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
LINÉAIRE ANNULAIRE de centre A et d'axe (Az)		Tx Rx 0 Ry 0 Rz	$A \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ Y_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
LINÉAIRE RECTILIGNE de normale (Az) et d'axe (Ax)		Tx Rx Ty 0 0 Rz	$A \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$
PONCTUELLE de normale (Ax)		0 Rx Ty Ry Tz Rz	$A \left\{ \begin{matrix} X_{\overrightarrow{A1/2}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\}_{\mathcal{R}}$

* Les vecteurs unitaires, $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont liés aux axes (Ax), (Ay) et (Az).

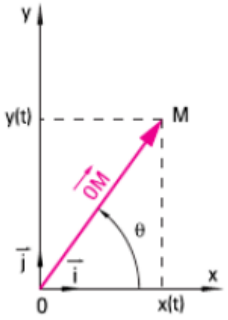
COMPORTEMENT STATIQUE DES MÉCANISMES (torseurs transmissibles par les liaisons) (suite)

NATURE DE LA LIAISON ET REPÈRE ASSOCIÉ $A\ \mathcal{R}(A, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$*	ÉTUDE PLANE			
	Plan de symétrie du mécanisme (Ax, Az)	Torseur transmissible	Plan de symétrie du mécanisme (Ay, Az)	Torseur transmissible
ENCASTREMENT		$A\begin{Bmatrix} X_{A1/2} & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & L_{A1/2} \\ Y_{A1/2} & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
PIVOT d'axe (Ax)		$A\begin{Bmatrix} X_{A1/2} & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Y_{A1/2} & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
GLISSIÈRE d'axe (Ax)		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & L_{A1/2} \\ Y_{A1/2} & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
GLISSIÈRE HÉLICOÏDALE d'axe (Ax)		$A\begin{Bmatrix} X_{A1/2} & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$ Pas de plan de symétrie réel		$A\begin{Bmatrix} 0 & L_{A1/2} \\ Y_{A1/2} & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$ Comportement comme encastrement
PIVOT GLISSANT d'axe (Ax)		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Y_{A1/2} & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
ROTULE de centre A		$A\begin{Bmatrix} X_{A1/2} & 0 \\ 0 & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Y_{A1/2} & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
APPUI PLAN de normale (Az)		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & L_{A1/2} \\ 0 & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
LINÉAIRE ANNULAIRE de centre A et d'axe (Ax)		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Y_{A1/2} & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
LINÉAIRE RECTILIGNE de normale (Az) et d'axe (Ax)		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{A1/2} \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ Z_{A1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$
PONCTUELLE de normale (Ax)		$A\begin{Bmatrix} X_{A1/2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$		$A\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{\mathcal{R}}$

* Les vecteurs unitaires, $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont liés aux axes (Ax), (Ay) et (Az).

5.2.12. COMPORTEMENT CINÉMATIQUE DES MÉCANISMES (cinématique du point)

La cinématique est l'étude des mouvements des solides ou systèmes de solides indépendamment des causes qui les provoquent. Ce chapitre ne traitera que de cinématique plane.



Position d'un point mobile M dans un repère de référence $\mathcal{R}$

Soit $\mathcal{R}$ $(O,\vec{i},\vec{j})$, un repère de référence où $\vec{i}$ et $\vec{j}$ sont les vecteurs unitaires portés par les axes orientés (Ox), (Oy) et un point M en mouvement dans ce repère. La position d'un point M appartenant à un solide (S) par rapport à un repère de référence $\mathcal{R}$, à un instant t est définie par un vecteur, nommé vecteur position du point M à l'instant t noté $\overrightarrow{OM}$:

$$\overrightarrow{OM} \left| \begin{matrix} x_{(t)} \\ y_{(t)} \end{matrix} \right. \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{OM} = x_{(t)}.\vec{i} + y_{(t)}.\vec{j}$$

Les coordonnées du vecteur position $\overrightarrow{OM}$ peuvent être définies en coordonnées polaires :

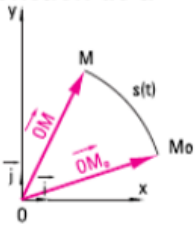
$$\overrightarrow{OM} \left| \begin{matrix} \rho_{(t)} \\ \theta_{(t)} \end{matrix} \right. \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{OM} = \rho_{(t)}.\vec{u} \text{ avec } \vec{u} \text{ déduit de } \vec{i} \text{ par une rotation de } \theta \text{ dans le sens trigonométrique.}$$

L'ensemble des positions de M dans le repère de référence $\mathcal{R}$ définit la trajectoire du point M dans $\mathcal{R}$.

Remarques : – la notion de mouvement est une notion relative à la position de l'observateur, d'où la nécessité du choix d'un repère de référence ou référentiel

– le point M occupe une certaine position à un instant t dans le référentiel ; à un instant $t + \Delta t$ ultérieur, la position de ce point pourra avoir changé. Il est donc nécessaire de définir une base « temps » (l'unité est la seconde). Les coordonnées du vecteur position seront donc fonction de t.

Abscisse curviligne d'un point M



L'abscisse curviligne s du point M est la mesure algébrique caractérisant l'arc $\overset{\frown}{M_0M}$ de trajectoire parcourue par le point M. Elle dépend du temps t :

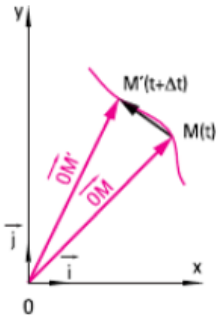
$s = \overset{\frown}{M_0M} = f(t)$

L'équation s = f(t) est appelée équation horaire du mouvement de A par rapport au repère de référence $\mathcal{R}$.

Vitesse instantanée $\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}}$ d'un point mobile M dans son mouvement par rapport à $\mathcal{R}$

Soit M défini par $\overrightarrow{OM}$ à l'instant t et $\overrightarrow{OM'}$ à l'instant $t + \Delta t$;

$$\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{MM'}}{\Delta t} = \left(\frac{d}{dt}\overrightarrow{OM}\right)_{\mathcal{R}} \quad \text{avec } \overrightarrow{MM'} = \overrightarrow{OM'} - \overrightarrow{OM} = \Delta(\overrightarrow{OM})$$



Remarques :

– Le vecteur $\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}}$ est tangent en M à la trajectoire du point M dans le repère $\mathcal{R}$.

– $\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}} = v.\vec{t}$ avec $\vec{t}$ = vecteur porté par la tangente en M à la trajectoire.

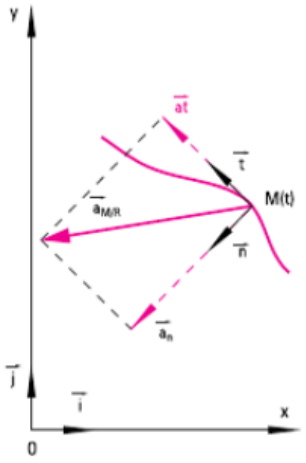
– Unité de vitesse : m/s.

Accélération instantanée $\overrightarrow{a_{M/\mathcal{R}}}$ d'un point mobile M dans son mouvement par rapport à $\mathcal{R}$

$$\overrightarrow{a_{M/R}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}}}{\Delta t} = \left(\frac{d}{dt}\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}}\right)_{\mathcal{R}} = \left(\frac{d^2}{dt^2}\overrightarrow{OM}\right)_{\mathcal{R}}$$

Unité de l'accélération m/s^2.

Composantes du vecteur accélération :



on sait que $\overrightarrow{a_{M/R}} = \left(\frac{d}{dt}\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}}\right)_{\mathcal{R}} = \left(\frac{d(v.\vec{t})}{dt}\right)_{\mathcal{R}}$

$$\overrightarrow{a_{M/R}} = \left(\frac{dv}{dt}\right).\vec{t} + v.\left(\frac{d}{dt}\vec{t}\right)_{\mathcal{R}} = \frac{dv}{dt}.\vec{t} + v.\left(\frac{d\vec{t}}{ds}\right)_{\mathcal{R}}.\frac{ds}{dt} \quad \text{avec} \left(\frac{d\vec{t}}{ds}\right)_{\mathcal{R}} = \frac{\vec{n}}{\rho}$$

$\vec{t}$ vecteur unitaire porté par la tangente à la trajectoire en M.

$\vec{n}$ vecteur unitaire porté par la normale à la trajectoire en M.

ρ rayon de courbure de la trajectoire en M.

On en déduit : $\vec{a}_t = \left(\frac{dv}{dt}\right).\vec{t} = a_t.\vec{t}$ accélération tangentielle

$\vec{a}_n = \frac{v^2}{\rho}.\vec{n} = a_n.\vec{n}$ accélération normale

Translation d'un solide S dans un repère de référence $\mathcal{R}$

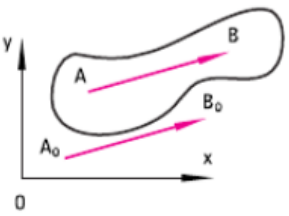
Un solide S est en translation dans un repère plan $\mathcal{R}$ si un bipoint quelconque AB du solide reste équipollent à un bipoint du repère $\mathcal{R}$ au cours du temps.

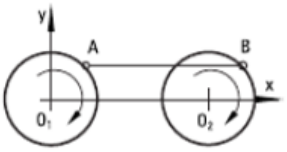
Dans un repère spatial, il faudra que deux bipoints du solide restent équipollents à deux bipoints du repère au cours du temps pour que le solide S soit en translation par rapport au repère $\mathcal{R}$.

On peut noter deux cas particuliers de la translation :

– la translation circulaire : tous les points du solide décrivent des trajectoires circulaires identiques dans le repère $\mathcal{R}$;

– la translation rectiligne : tous les points du solide décrivent des droites parallèles dans le repère R.

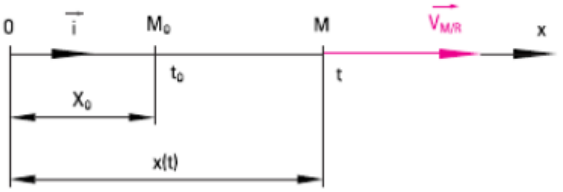




Translation rectiligne uniforme

Définition : un solide est en translation rectiligne uniforme si tous les points décrivent des droites parallèles et si l'équation horaire du mouvement est du premier degré par rapport au temps :

$$\overrightarrow{OM} \cdot \vec{i} = x_{(t)} = x_0 + v(t - t_0)$$



$x_{(t)}$: abscisse du point M à l'instant t (en m).
x_0 : abscisse du point M à l'instant initial t_0 (en m).
v : vitesse linéaire du point M (en m/s).
t_0 = instant initial (en s).

Vitesse du point M : $\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}} = \left(\frac{d}{dt}\overrightarrow{OM}\right)_{\mathcal{R}} = x'_{(t)}.\vec{i} =$ avec $x'_{(t)} = v =$ constante

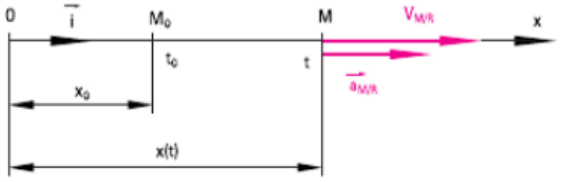
Accélération du point M : $\overrightarrow{a_{M/R}} = \left(\frac{d}{dt}\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}}\right)_{\mathcal{R}} = x''_{(t)}.\vec{i} = \vec{0}$

La dérivée de la vitesse qui est une constante est nulle.

Translation rectiligne uniformément variée

Définition : un solide est en translation rectiligne uniformément variée si tous les points décrivent des droites parallèles et si l'équation horaire du mouvement est du second degré par rapport au temps :

$$\overrightarrow{OM}.\vec{i} = x_{(t)} = x_0 + v_0\,(t - t_0) + 1/2a(t - t_0)^2$$



v_0 : vitesse linéaire du point M à l'instant t_0 (en m/s).
a : accélération du point M (en m/s²).

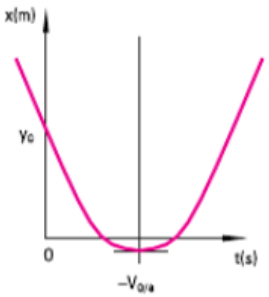
Vitesse du point M : $\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}} = \left(\frac{d}{dt}\overrightarrow{OM}\right)_{\mathcal{R}} = x'_{(t)}.\vec{i}$

$x'_{(t)} = v_{(t)} = v_0 + a(t - t_0)$ La vitesse est une fonction du temps et donc non constante.

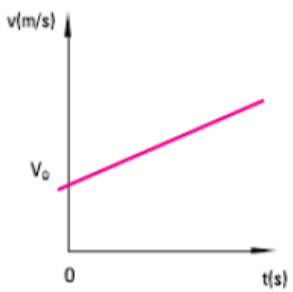
Accélération du point M : $\overrightarrow{a_{M/R}} = \left\{\frac{d}{dt}\overrightarrow{V_{M/\mathcal{R}}}\right\}_{\mathcal{R}} = x''_{(t)}.\vec{i}$

$x''_{(t)} = a_{(t)} = a_t =$ constante L'accélération est réduite à l'accélération tangentielle et est constante.

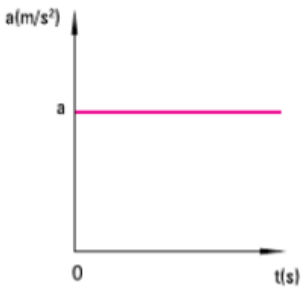
Graphes du mouvement :



Graphe du mouvement



Graphe de la vitesse



Graphe de l'accélération

Comportement cinématique des mécanismes (cinématique du point)

Rotation d'un solide S autour d'un axe fixe

Un solide (S) est en rotation dans un repère $\mathcal{R}$ si deux de ses points restent fixes dans $\mathcal{R}$ au cours du temps ; ces deux points fixes déterminent l'axe de rotation.

Mouvement circulaire uniforme

Définition : un solide est en mouvement circulaire uniforme autour d'un axe fixe si la trajectoire de tout point est un cercle et si l'équation horaire du mouvement est du premier degré par rapport au temps :

$\overset{\frown}{M_0M} = s_{(t)} = s_{(t0)} + v(t - t_0)$ avec

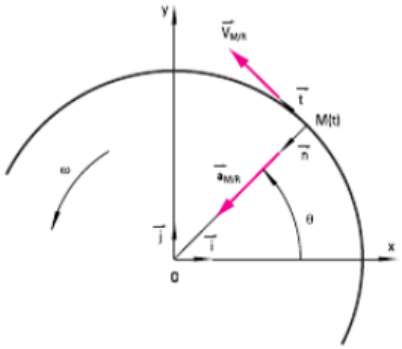
- $s_{(t)}$: abscisse curviligne du point M à l'instant t (en m).
- v : vitesse linéaire du point M (en m/s).
- t_0 : instant initial (en s).
- $s_{(t0)}$: abscisse curviligne à l'instant initial (en m).

Équation horaire angulaire du mouvement :

On a : $s_{(t)} = r.\theta$, d'où la relation :

$\theta = \theta_0 + \omega(t - t_0)$ avec

- θ : angle polaire de M à l'instant t (en rd).
- θ_0 : angle polaire initial à l'instant t_0 (en rd)
- ω : vitesse angulaire (en rd/s)



Vitesse linéaire du point M :

$v = \omega.R$ avec

- v : vitesse linéaire du point M (en m/s)
- ω : vitesse angulaire (en rd/s)
- R : rayon de la trajectoire circulaire (en m)

Le vecteur vitesse linéaire du point M par rapport au repère $\mathcal{R}$ est porté par la tangente à la trajectoire en M.

$\vec{V}_{M/\mathcal{R}} = v.\vec{t}$ avec $\vec{t}$: vecteur unitaire porté par la tangente au cercle de rayon R et de centre O en M

$\vec{V}_{M/\mathcal{R}} = \vec{\Omega}_{S/\mathcal{R}} \wedge \vec{OM}$ avec $\vec{\Omega}_{S/\mathcal{R}}$: vecteur vitesse angulaire dont le module est ω.

$\vec{OM}$: rayon de la trajectoire circulaire de M dans R.

Accélération linéaire du point M :

$$\vec{a}_{M/R} = \left(\frac{dv}{dt}\right).\vec{t} + v.\left(\frac{d}{dt}\vec{t}\right)_{\mathcal{R}} = \frac{dv}{dt}.\vec{t} + \frac{v^2}{R}.\vec{n} \quad \text{avec} \quad \left(\frac{dv}{dt}\right) = 0 \quad \text{car v = constante}$$

L'accélération se réduit donc à l'accélération normale : $a_{M/R} = \frac{v^2}{R} = \omega^2.R$ (en m/s^2)

Accélération angulaire du point M : $\omega' = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$ L'accélération angulaire (en rd/s^2) est nulle.

Mouvement circulaire uniformément varié

Définition : un solide est en mouvement circulaire uniformément varié autour d'un axe fixe si la trajectoire de tout point est un cercle et si l'équation horaire du mouvement est du second degré par rapport au temps :

$\overset{\frown}{M_0M} = s_{(t)} = s_{(t0)} + v(t - t_0) + 1/2a(t - t_0)^2$ avec a : accélération du point M (en m/s^2).

Équation horaire angulaire du mouvement :

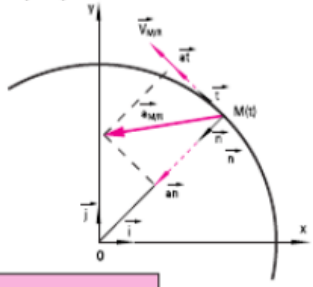
$\theta = \theta_0 + \omega_0(t - t_0) + 1/2\omega'(t - t_0)^2$ avec

- ω_0 : vitesse angulaire initiale (en rd/s)
- ω' : accélération angulaire (en rd/s^2)

Vitesse angulaire du point M : $\theta' = \omega = \omega_0 + \omega'(t - t_0)$ car $\theta' = \frac{d\theta}{dt}$

Vitesse linéaire du point M : $v = \omega.R = [\omega_0 + \omega'(t - t_0)].R$

Accélération angulaire du point M : $\omega' = \frac{d\omega}{dt} = \text{constante}$ (en rd/s^2)



Accélération linéaire du point M :

$$\vec{a}_{M/R} = \left(\frac{dv}{dt}\right).\vec{t} + v.\left(\frac{d}{dt}\vec{t}\right) = \frac{dv}{dt}.\vec{t} + \frac{v^2}{R}.\vec{n}$$

Accélération normale : $a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2.R = (\omega_0 + \omega' t)^2.R$ (en m/s^2)

Accélération tangentielle : $a_t = \frac{dv}{dt} = \omega'.R = \text{constante}$ (en m/s^2)

5.2.13. COMPORTEMENT CINÉMATIQUE DES MÉCANISMES (cinématique du solide)

Ce chapitre est destiné à voir les différentes méthodes graphiques de résolution d'un problème de cinématique plane.

Mouvement plan sur plan

Définition : un solide S_1 est en mouvement plan par rapport à un solide S_0, si un plan du solide S_1 reste constamment en contact avec un plan réel ou fictif du solide S_0 au cours du mouvement.

Exemple : le schéma cinématique ci-contre donne une représentation schématique spatiale de la pince de manipulateur (fig. 1) dont le dessin est donné p. 245 (un seul doigt a été représenté). Les mouvements respectifs du piston (1), de la biellette (4) ou du doigt (3) par rapport au corps (1) lié à S_0 peuvent être considérés comme plan sur plan.

L'étude cinématique se fera dans le plan $\mathcal{R}(O, x, y)$ lié à S_0, plan parallèle à celui du mouvement (fig. 2).

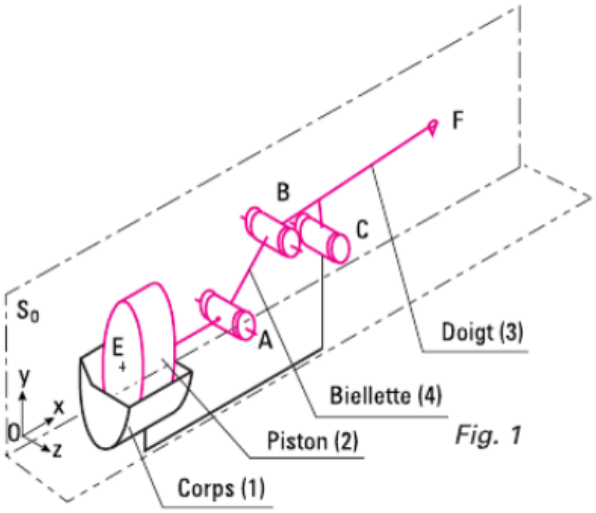


Fig. 1

Cas particulier de la translation

Dans un mouvement de translation, tous les points du solide ont même vitesse linéaire.

Exemple (fig. 3) : le piston (2) est en translation d'axe Ox par rapport au corps (1) ; on peut alors écrire :

$\overrightarrow{V_A 2/1} = \overrightarrow{V_E 2/1}$ à tout instant t et quels que soient ces points.

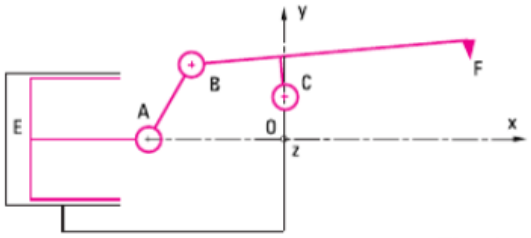


Fig. 2

Le champ des vecteurs vitesses (ensemble des vecteurs vitesses de tous les points du solide par rapport au repère de référence à l'instant t) est dit uniforme.

Cas particulier de la rotation

Dans un mouvement de rotation, tous les points du solide ont une vitesse linéaire proportionnelle à leur distance à l'axe de rotation.

Exemple (fig. 4) : le doigt (3) est en rotation autour de l'axe (Cz) par rapport au corps (1) ; tous les points décrivent des cercles de centre C. On peut alors écrire :

$$\|\overrightarrow{V_B 3/1}\| = \omega_{3/1}.CB$$
$$\|\overrightarrow{V_F 3/1}\| = \omega_{3/1}.CF$$

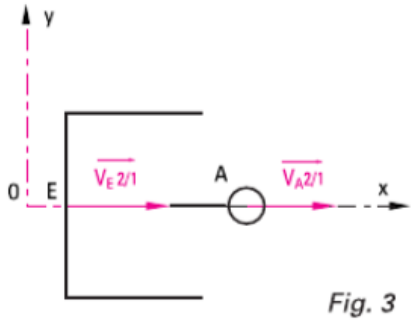


Fig. 3

La répartition des vecteurs vitesses est dite triangulaire.

Les directions des vecteurs vitesses des différents points sont perpendiculaires aux rayons des trajectoires de ces points.

On peut donc déterminer la vitesse linéaire de n'importe quel point d'un solide en rotation à partir du moment où l'on connaît la vitesse d'un de ses points.

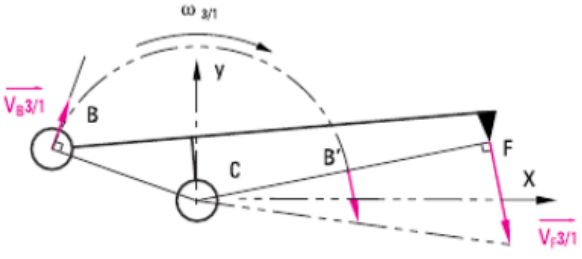


Fig. 4

Comportement cinématique des mécanismes (cinématique du solide)

Équiproiectivité des vecteurs vitesses des points d'un solide

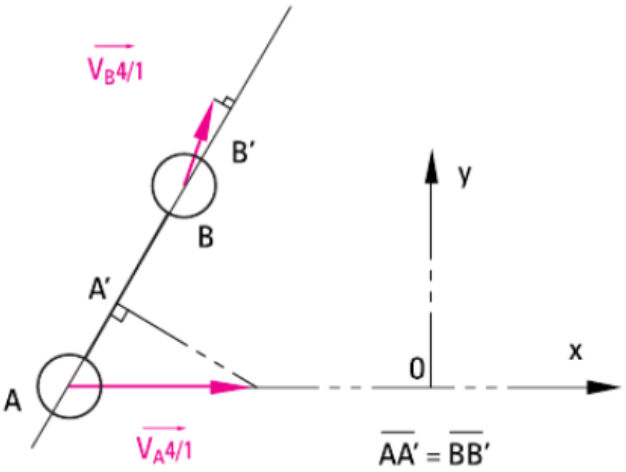
Les vitesses des points d'un solide parfait sont dépendantes.
Il existe une relation liant les vitesses en deux points A et B différents d'un même solide S:

$$\overrightarrow{V_{AS/\mathcal{R}}} \cdot \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{V_{BS/\mathcal{R}}} \cdot \overrightarrow{AB}$$

Exemple: soient A et B les points caractérisant les centres des liaisons pivots entre la biellette (4), le piston (2) et le doigt (3).

La projection orthogonale du vecteur $\overrightarrow{V_{A4/1}}$ sur la droite (AB) est égale à la projection orthogonale du vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{B4/1}}$ sur cette même droite: $\overrightarrow{V_{A4/1}}.\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{V_{B4/1}}.\overrightarrow{AB}$

On pourra déterminer la vitesse de n'importe quel point d'un solide à partir du moment où l'on connaît la direction du vecteur vitesse en ce point et un vecteur vitesse en un autre point.



Centre instantané de rotation

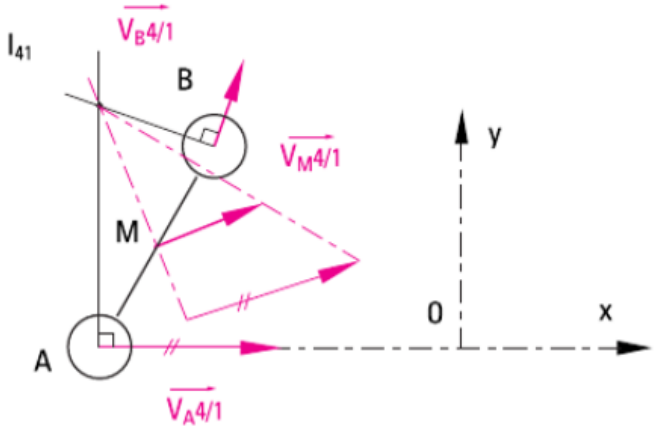
Définition: on appelle centre instantané de rotation (C.I.R.) d'un solide S par rapport à un repère de référence $\mathcal{R}$,le point où la vitesse est nulle à l'instant t considéré.

À l'instant t, le solide S aura un mouvement de rotation autour de l'axe passant par le C.I.R.
Dans le cas d'une translation, le C.I.R. est rejeté à l'infini.

Définition du C.I.R.: le C.I.R. d'un solide S en mouvement plan sur plan se trouve à l'intersection des perpendiculaires aux directions des vecteurs vitesses définis en deux points distincts du solide.

Exemple: le C.I.R. de la biellette (4) dans son mouvement par rapport au carter (1), noté I_{41} se trouve à l'intersection des perpendiculaires en A et B aux vecteurs vitesses $\overrightarrow{V_{A4/1}}$ et $\overrightarrow{V_{B4/1}}$.

Connaissant le C.I.R. d'un solide S par rapport à un repère de référence, on peut déterminer la vitesse de n'importe quel point du solide à partir du moment où l'on connaît la vitesse en un point; dans le cas de la figure ci-contre, on a déterminé la vitesse $\overrightarrow{V_{M4/1}}$ en utilisant les propriétés de la rotation.



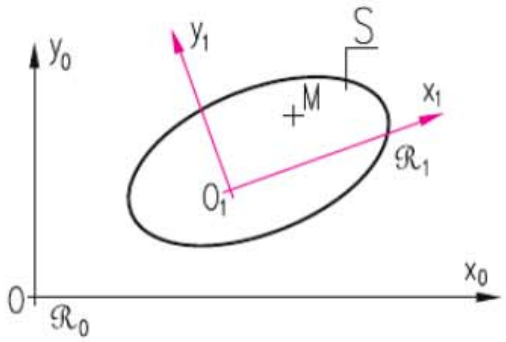
Base et roulante:
- la trajectoire du C.I.R. du solide S dans le repère de référence est appelée base du mouvement;
- la trajectoire du C.I.R. du solide S dans un repère lié à S, mobile par rapport au repère de référence est appelée *roulante du mouvement*.

Composition des vecteurs vitesses linéaires

Définition des repères :

– soit $\mathcal{R}_0$, le repère de référence fixe appelé *repère absolu* ;

– soit $\mathcal{R}_1$, un repère mobile par rapport à $\mathcal{R}_0$ lié au solide S appelé *repère relatif*.



Définition des vitesses linéaires de M :

soit M un point mobile de S.

– *Vitesse absolue* ($\vec{Va}$) : c'est la vitesse du point M appartenant à S dans le repère absolu ; on la note : $\vec{V}_{M S/\mathcal{R}_0}$.

– *Vitesse relative* ($\vec{Vr}$) : c'est la vitesse du point M appartenant à S dans le repère relatif ; on la note : $\vec{V}_{M S/\mathcal{R}_1}$,

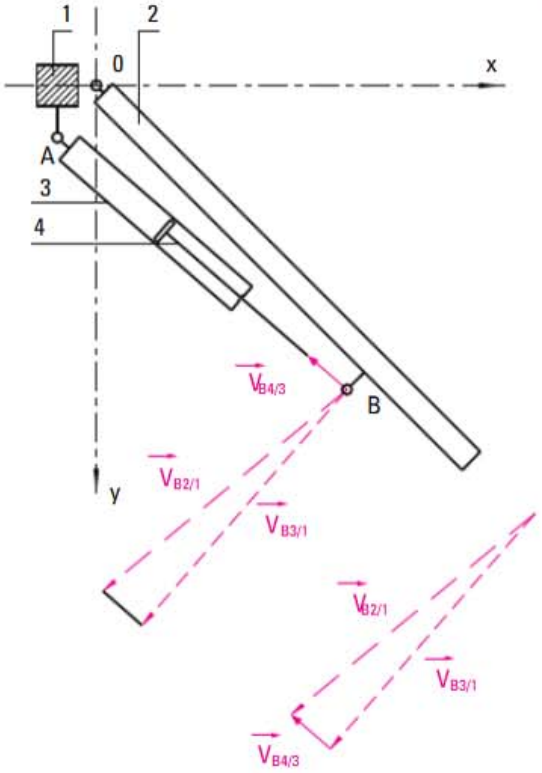
– *Vitesse d'entraînement* ($\vec{Ve}$) : c'est la vitesse du point M lié à S dans le repère fixe ; on la note : $\vec{V}_{M \mathcal{R}_1/\mathcal{R}_0}$.

(À l'instant t, le point M est considéré comme fixe dans le repère $\mathcal{R}_1$; cela revient à définir le mouvement de $\mathcal{R}_1$ par rapport à $\mathcal{R}_0$.)

Loi de composition des vecteurs vitesses : une relation lie ces différentes vitesses.

$$\vec{V}_{M S/\mathcal{R}_0} = \vec{V}_{M S/\mathcal{R}_1} + \vec{V}_{M \mathcal{R}_1/\mathcal{R}_0} \quad \text{ou} \quad \vec{Va} = \vec{Vr} + \vec{Ve}$$

Exemple d'application : le schéma cinématique ci-contre représente un portail automatisé mû par un vérin hydraulique (FAAC). On connaît la vitesse de rentrée de la tige de vérin (4) et on désire déterminer la vitesse d'ouverture du portail (2). Les liaisons en A, B et O sont des liaisons pivots.



La trajectoire du point B appartenant au portail (2) par rapport au châssis (1) est un cercle de centre O et de rayon OB : $\vec{V}_{B2/1}$ est perpendiculaire à OB en B.

La trajectoire du point B appartenant au corps de vérin (3) par rapport au châssis (1) est un cercle de centre A et de rayon AB : $\vec{V}_{B3/1}$ est perpendiculaire à AB en B.

La trajectoire du point B appartenant à la tige de vérin (4) par rapport au corps de vérin (3) est la droite (AB) : $\vec{V}_{B4/3}$ est porté par la droite (AB).

La loi de composition des vecteurs vitesses en B donne :

$$\vec{V}_{B2/1} = \vec{V}_{B2/4} + \vec{V}_{B4/3} + \vec{V}_{B3/1}$$

avec $\vec{V}_{B2/4} = \vec{0}$ car B est le C.I.R du mouvement de (2) par rapport à (4).

Il suffit de tracer la somme des vecteurs en respectant la relation ci-dessus et de déterminer le module de la vitesse $\vec{V}_{B2/1}$.

5.2.14. COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN SOLIDE

La dynamique traite des mouvements des solides en relation avec les actions mécaniques qui les produisent. Ce chapitre a pour but de rappeler quelques relations utiles à la résolution de problèmes courants de mécanique.

5.2.15. PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE

Cas d'un solide en translation : théorème de la résultante dynamique

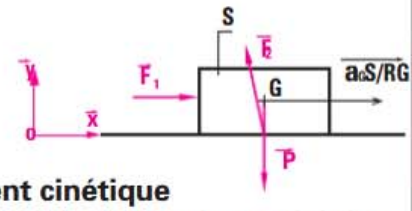
Soit un solide S animé d'un mouvement rectiligne uniformément varié :

$$\Sigma \overrightarrow{F_{ext/S}} = m.\overrightarrow{a_{GS/Rg}}$$

avec $\overrightarrow{F_{ext/S}}$: forces extérieures appliquées au solide en N

m : masse du solide S en kg

$\overrightarrow{a_{GS/Rg}}$: vecteur accélération du centre de gravité du solide S par rapport à un repère galiléen Rg en m/s²



Cas d'un solide en rotation autour d'un axe fixe : théorème du moment cinétique

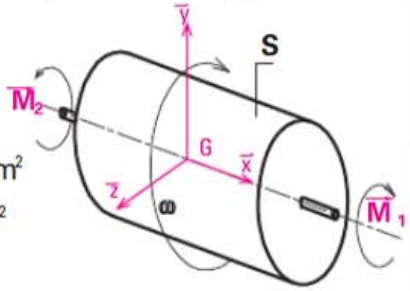
Soit S un solide animé d'un mouvement de rotation uniformément varié, le centre de gravité du solide est sur l'axe de rotation :

$$\Sigma M_{Gx}\overrightarrow{FextT/S} = J_x.\omega'$$

avec $M_{Gx}\overrightarrow{Fext/S}$: moment par rapport à l'axe de rotation Gx des forces extérieures appliquées au solide S en N.m

J_x : moment d'inertie du solide S par rapport à l'axe Gx en kg.m²

ω' : accélération angulaire du solide autour de l'axe Gx en rd/s²

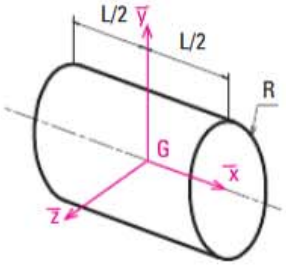


Moments d'inertie de quelques solides usuels

Cylindre plein

masse $m = \pi R^2.L.\rho$

(ρ : masse volumique)

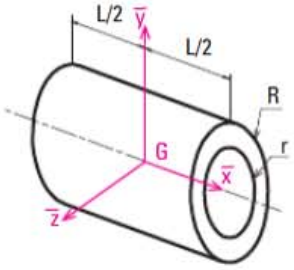


$$Jx = \frac{m.R^2}{2}$$

$$Jy = Jz = \frac{m.R^2}{4} + \frac{m.L^2}{12}$$

Cylindre creux

$m = \pi(R^2 - r^2).L.\rho$

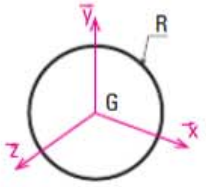


$$Jx = \frac{m.(R^2 + r^2)}{2}$$

$$Jy = Jz = \frac{m.(R^2 + r^2)}{4} + \frac{m.L^2}{12}$$

Sphère

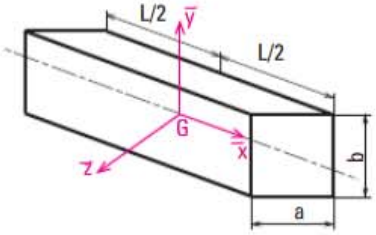
$m = \frac{4}{3}\pi R^3.\rho$



$$Jx = Jy = Jz = \frac{2}{5} m.R^2$$

Parallélépipède rectangle

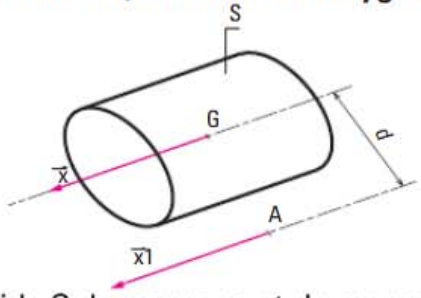
$m = a.b.L.\rho$



$$Jx = \frac{m}{12}(a^2 + b^2) \qquad Jy = \frac{m}{12}(a^2 + L^2)$$

$$Jz = \frac{m}{12}(b^2 + L^2)$$

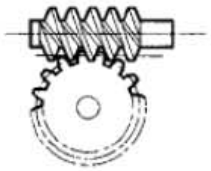
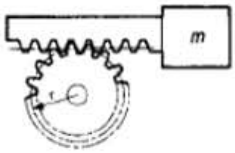
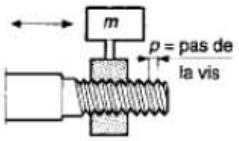
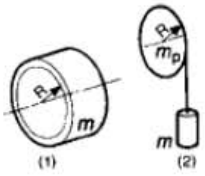
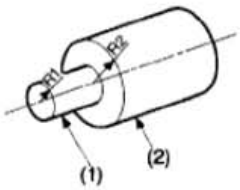
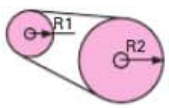
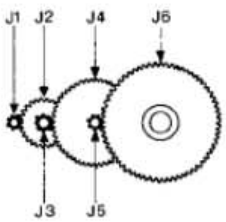
Changement d'axe (théorème de Huygens)



Soit un solide S de masse m et de moment d'inertie autour de l'axe x, Jx ; soit un axe x1 parallèle à x situé à une distance d de x :

$$Jx1 = Jx + m.d^2$$

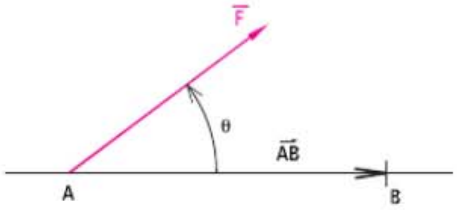
5.2.16 EXEMPLES DE MOMENTS D'INERTIE

SYSTÈMES	FORMES	RELATIONS	UNITÉS
A ROUE ET VIS SANS FIN		$J = J_v + \frac{1}{k_r^2} J_p$ (ramenée à la vis)	– J_v : inertie en kg.m² de la vis considérée comme un cylindre de diamètre primitif. (Voir D.) – J_p : inertie en kg.m² de la roue considérée comme un cylindre de diamètre primitif. (Voir D.) – k_r : rapport de réduction.
B CRÉMAILLÈRE		$J = mr^2 + \frac{m_p r^2}{2}$ (ramenée au pignon)	– J : inertie en kg.m². – m : masse à translater en kg. – m_p : masse du pignon en kg. – r : rayon primitif du pignon en m.
C VIS-ÉCROU		$J = m\frac{p^2}{4\pi^2} + \frac{m_v r^2}{2}$ (ramenée à la vis)	– J : inertie en kg.m². – m : masse à déplacer en kg. – m_v : masse de la vis en kg. – p : pas de la vis en m. – r : rayon de la vis en m.
D CYLINDRE		$J = m\frac{R^2}{2}$	– J : inertie en kg.m². – m : masse du cylindre en kg. – R : rayon du cylindre en m.
E JANTES POIDS-POULIE		(1) $J = m\frac{R_i^2 + R_e^2}{2} = \frac{mR^2}{2}$ (2) $J = mR^2 + m_p\frac{R^2}{2}$	– J : inertie en kg.m². – m : masse à entraîner en kg. – m_p : masse de la poulie en kg. – R_i : rayon intérieur de la jante en m. – R_e : rayon extérieur de la jante en m. – R : rayon de la poulie en m.
F ARBRES ÉPAULES		$J = m_1\frac{R_1^2}{2} + m_2\frac{R_2^2}{2}$	– J : inertie en kg.m². – m_1 : masse du cylindre 1 en kg. – m_2 : masse du cylindre 2 en kg. – R_1 : rayon du cylindre 1 en m. – R_2 : rayon du cylindre 2 en m.
G TRANSMISSION PAR COURROIE OU CHAÎNE		$J_t = \frac{m_1 + 2m_c + m_2}{2} R_1^2$ $J = J_t + J_c\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$ (ramenées à l'axe 1)	– J : inertie de l'ensemble en kg.m². – J_t : inertie de la transmission en kg.m². – J_c : inertie de la charge en kg.m². – m_1 : masse de la poulie 1 en kg. – m_2 : masse de la poulie 2 en kg. – R_1 : rayon de la poulie 1 en m. – R_2 : rayon de la poulie 2 en m. – m_c : masse de la courroie ou chaîne.
H RÉDUCTEUR		$J = J_r + J_c\left(\frac{1}{k_r}\right)^2$ $J_r = J_1 + (J_2 + J_3)\frac{1}{k_1^2} + (J_4 + J_5)\frac{1}{k_2^2} + \ldots$ $J_{C1} = J_{C6}\left(\frac{n_6}{n_1}\right)^2$ (ramenées à l'axe 1)	– J : inertie de l'ensemble en kg.m². – J_r : inertie du réducteur en kg.m². – k_r : rapport de réduction. – J_c : inertie de la charge en kg.m². – J_n : inertie du pignon en kg.m². – J_{cn} : inertie de la charge ramenée à l'axe n en kg.m². – n_n : fréquence de rotation de l'axe n. – k_n : rapport de réduction du train n.
Le moment de giration MD^2 vaut 4 fois le moment d'inertie J.		$J = \frac{MD^2}{4}$	– MD^2 en kg.m². – J en kg.m².

5.2.16. TRAVAIL ET PUISSANCE

Travail d'une force $\vec{F}$

Le travail W d'une force $\vec{F}$ est égal au produit scalaire de la force par le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$:

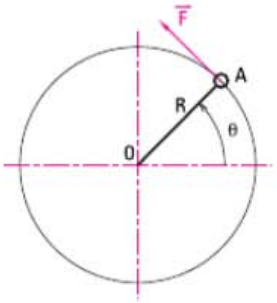


$$W = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$$

Autre expression : $W = \|\vec{F}\|.\|\overrightarrow{AB}\|.\cos\theta$ avec W : travail en J (joules)
$\|\vec{F}\|$: module de la force en N
$\|\overrightarrow{AB}\|$: module du déplacement en m

Travail d'un couple constant C

Le travail W d'un couple constant C est égal au produit du couple par l'angle parcouru :



$$W = C.\theta$$

avec W : travail en J
C : couple ou moment d'une force en N.m
θ : angle parcouru en rd

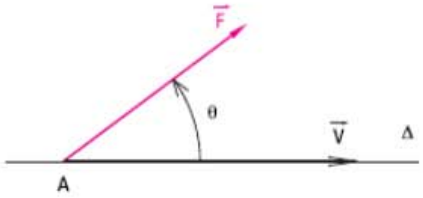
Puissance développée par une force $\vec{F}$

$C = \|\vec{F}\|.R$

La puissance est la dérivée du travail par rapport au temps :

$$P = \frac{dW}{dt}$$

La puissance développée par une force $\vec{F}$ dont le point d'application A se déplace à une vitesse $\vec{V}$ sur sa trajectoire Δ est égale au produit scalaire de la force $\vec{F}$ par la vitesse $\vec{V}$:



$$P = \vec{F} \cdot \vec{V}$$

Autre expression : $P = \|\vec{F}\|.\|\vec{V}\|.\cos\theta$ avec P : puissance en W (watt)
$\|\vec{F}\|$: module de la force en N
$\|\vec{V}\|$: module de la vitesse de déplacement en m/s

Puissance développée par un couple constant C

La puissance P développée par un couple constant exercé sur un solide qui tourne à une vitesse angulaire ω est égale au produit du couple C par la vitesse angulaire ω :

$$P = C.\omega$$

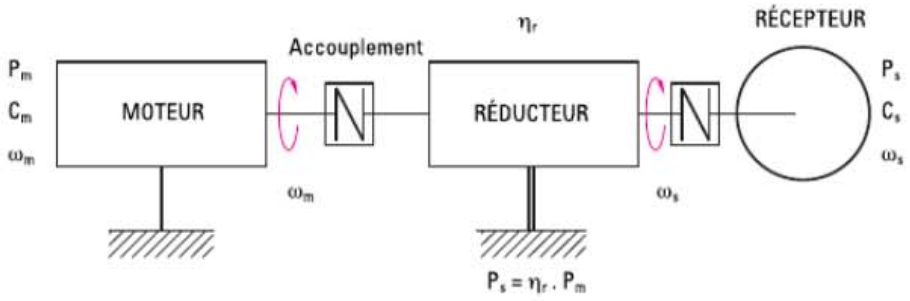
avec P : puissance en W (watt)
C : couple ou moment en N.m
ω : vitesse angulaire en rd/s

Notion de rendement

Le rendement d'un mécanisme est égal au rapport de la puissance restituée sur la puissance fournie :

$$\eta = \frac{P\ \text{restituée}}{P\ \text{fournie}}$$

Exemple de chaîne de transmission de puissance



5.3. COMPORTEMENT DU SOLIDE DÉFORMABLE

5.3.1. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

La résistance des matériaux a pour but la détermination des efforts intérieurs dans une pièce mécanique lors de déformations dues à des actions extérieures, ainsi que le dimensionnement de celles-ci.

5.3.2. HYPOTHÈSES DE TRAVAIL EN RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

Les études menées dans ce chapitre et les résultats obtenus sont applicables à des solides assimilés à des poutres :
– une poutre est un volume engendré par une surface variant peu et de manière continue dont le centre de gravité se déplace le long d'une ligne continue appelée *ligne moyenne* ;
– les sections planes étudiées sont perpendiculaires à la ligne moyenne et le restent après déformation ;
– on supposera les forces extérieures appliquées dans un plan de symétrie de la poutre étudiée.

Les lois de la résistance des matériaux sont valables dans le cas de matériaux :
– *homogènes* : les particules qui composent le matériau sont petites devant la dimension du solide ;
– *isotropes* : les caractéristiques des matériaux sont identiques dans toutes les directions ;
– travaillant dans le domaine de sa *déformation élastique* ; les déformations restent faibles par rapport aux dimensions de la poutre.

5.3.3. TORSEUR DE COHÉSION ET CONTRAINTE

Le torseur de cohésion ou torseur des efforts de cohésion

Le torseur de cohésion est défini par les éléments de réduction des efforts intérieurs dans une section droite S fictive de poutre (fig. 1).

La section droite S étant définie et en isolant le tronçon gauche de la poutre, on obtient la figure 2 ci-contre. Si ce tronçon est en équilibre, il est soumis à l'action des forces extérieures qui agissent sur lui et à l'action du tronçon de droite que l'on peut définir par deux vecteurs, une résultante des actions du tronçon de droite sur le tronçon de gauche et un moment résultant des actions du tronçon de droite sur le tronçon de gauche :

$$\begin{cases} \vec{R} = \sum_{S} \overrightarrow{f_i D/G} : \text{résultante des forces de cohésion de D sur G} \\ \vec{M_G} = \sum_{S} (\overrightarrow{GM_i} \wedge \overrightarrow{f_i D/G}) : \text{moment résultant des forces de cohésion } \overrightarrow{f_i D/G} \end{cases}$$

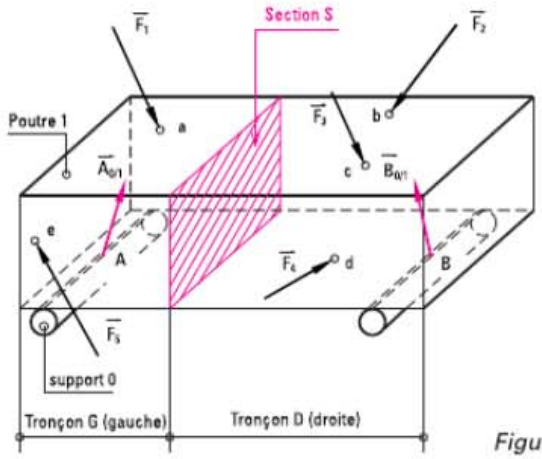


Figure 1

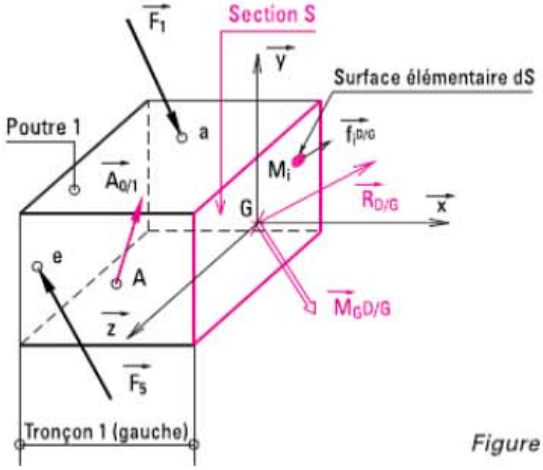


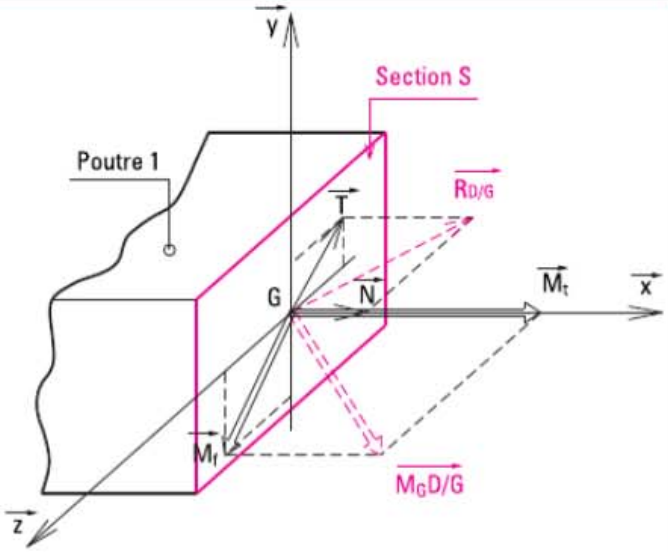
Figure 2

Torseur de cohésion et contrainte

Cet ensemble de deux vecteurs est appelé torseur de cohésion $\{Coh\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{R} \\ \vec{M}_G \end{matrix} \right\}_{G \; \mathcal{R}}$

Les éléments de réduction du torseur de cohésion se décomposent dans le repère $\mathcal{R}(G,\vec{x},\vec{y},\vec{z})$ lié en G à la section S :

- $\vec{N}$: effort normal
- $\vec{T}$: effort tangentiel ou tranchant
- $\vec{Mt}$: moment de torsion
- $\vec{Mf}$: moment réfléchissant



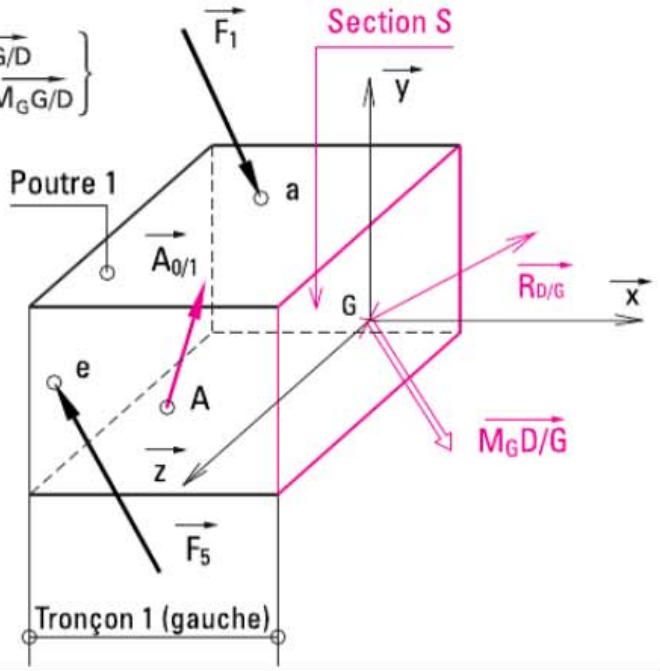
Le torseur de cohésion s'écrit donc $\{Coh\} = \left\{ \begin{matrix} N & Mt \\ Ty & Mfy \\ Tz & Mfz \end{matrix} \right\}_{G \; \mathcal{R}}$

avec :
- N : composante de l'effort normal sur $(G,\vec{x})$
- Ty : composante de l'effort tranchant suivant $(G,\vec{y})$
- Tz : composante de l'effort tranchant suivant $(G,\vec{z})$
- Mt : composante du moment de torsion suivant $(G,\vec{x})$
- Mfy : composante du moment fléchissant suivant $(G,\vec{y})$
- Mfz : composante du moment fléchissant suivant $(G,\vec{z})$

Torseur des actions mécaniques {T} **et torseur de cohésion** {Coh}

$$\{Coh\} = \{T_{\text{tronçon Droit} \rightarrow \text{tronçon Gauche}}\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} \vec{R} = \overrightarrow{RD/G} \\ \vec{M}_G = \overrightarrow{M_GD/G} \end{matrix} \right\}$$

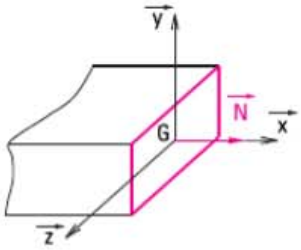
$$\{Coh\} = -\{T_{\text{tronçon Gauche} \rightarrow \text{tronçon Droit}}\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} \vec{R} = -\overrightarrow{RG/D} \\ \vec{M}_G = -\overrightarrow{M_GG/D} \end{matrix} \right\}$$



5.3.4. LES DIFFÉRENTES SOLLICITATIONS

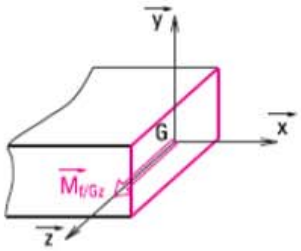
En fonction des composantes du torseur de cohésion, on définit les sollicitations dans la poutre.

Traction ou compression simple



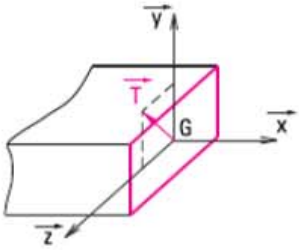
$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{G\ \mathcal{R}}$$

Flexion pure (rare)



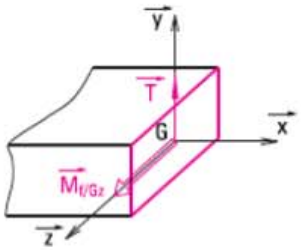
$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Mfz \end{Bmatrix}_{G\ \mathcal{R}}$$

Cisaillement pur (théorique)



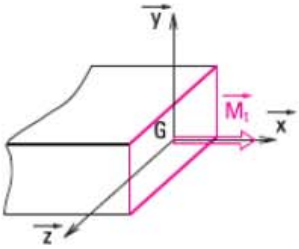
$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Ty & 0 \\ Tz & 0 \end{Bmatrix}_{G\ \mathcal{R}}$$

Flexion simple



$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Ty & 0 \\ 0 & Mfz \end{Bmatrix}_{G\ \mathcal{R}}$$

Torsion simple



$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} 0 & Mt \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{G\ \mathcal{R}}$$

Les sollicitations définies ci-dessus sont les plus simples à étudier ; en alliant ces différentes sollicitations, on obtient des sollicitations composées.

5.3.5. LES CONTRAINTES

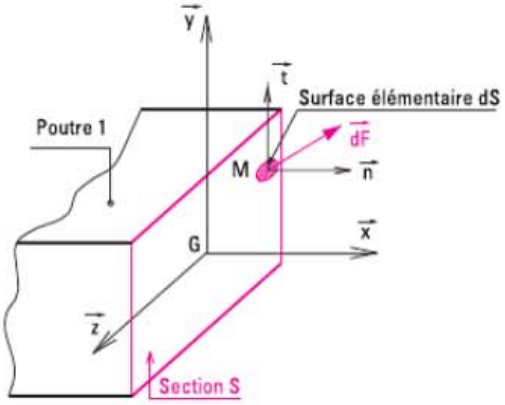
Une contrainte est définie par un vecteur (vecteur contrainte) normal en M à une facette dS de la section de poutre S.

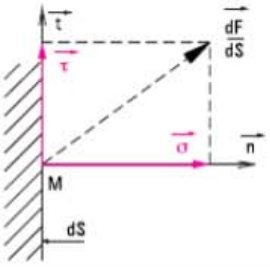
Ce vecteur est défini par la relation : $\overrightarrow{C_M} = \dfrac{\overrightarrow{dF}}{dS}$

Unité : c'est l'unité de pression qui est utilisée : Pa ou N/m^2

La contrainte normale $\vec{\sigma}$ est la projection sur la normale $\vec{n}$ à la facette de la contrainte $\overrightarrow{C_M}$.

La contrainte tangentielle $\vec{\tau}$ est la projection sur le plan tangent à la facette de la contrainte $\overrightarrow{C_M}$.





5.3.6. RIGIDITÉ DES ÉLÉMENTS DÉFORMABLES (traction)

• Extension simple

Une poutre est sollicitée en extension simple ou traction si elle est soumise à deux forces directement opposées exercées au centre de deux surfaces extrêmes.

Essai de traction

L'essai de traction est effectué sur une éprouvette avec une machine d'extension.

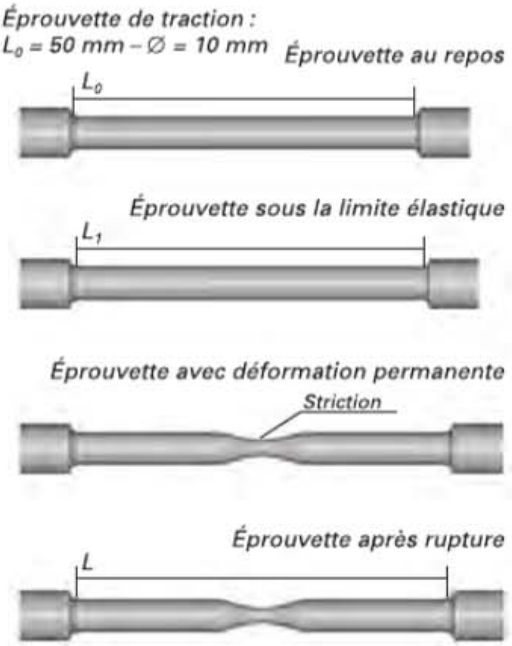
Les résultats de cet essai sont donnés par des courbes définissant l'allongement ΔL en fonction de l'effort normal N de traction ou la contrainte σ dans une section en fonction de l'allongement unitaire ε (voir courbes ci-dessous).

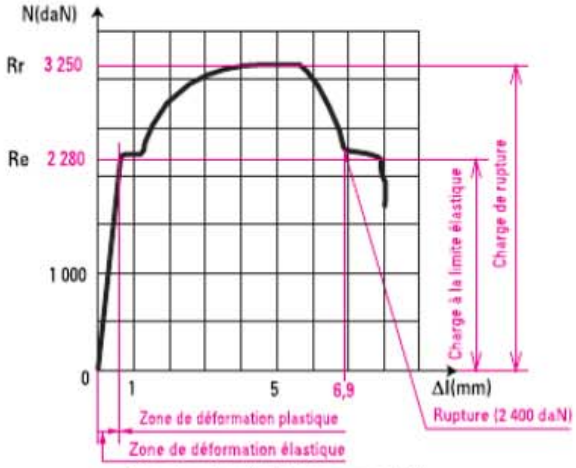
L'analyse de ces courbes montre trois étapes de l'extension :

– ***la déformation élastique*** (partie rectiligne de la courbe) pendant laquelle le matériau subit une extension non permanente : si on annule l'effort de traction, l'éprouvette retrouve sa longueur initiale L_0 : l'effort maximal admissible définit la limite élastique ***Re*** ;

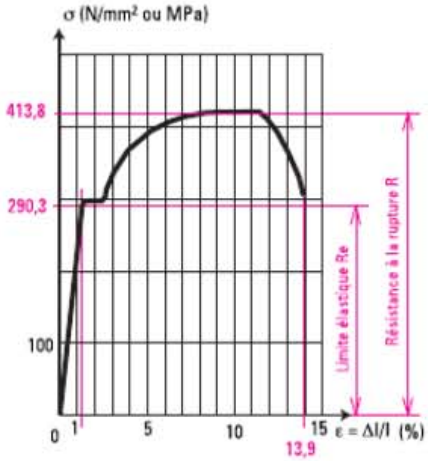
– ***la déformation plastique*** pendant laquelle l'éprouvette s'allonge de façon irrémédiable avec l'apparition d'une diminution de diamètre (la striction) ;

– ***la rupture*** qui définit la charge de rupture ***R*** ou ***Rr***.



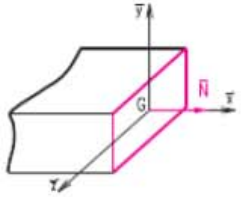


Courbe de l'effort normal N en fonction de l'allongement ΔL



Courbe de la contrainte σ en fonction de l'allongement unitaire ε = ΔL/L_0

Torseur de cohésion



$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{G\,\mathcal{R}}$$

Contrainte dans une section de poutre

La contrainte dans la section est réduite à une contrainte normale unique σ.

$$\sigma = \frac{N}{S_0}$$

avec N : effort normal en N
S_0 : aire de la section de la poutre en mm²
σ : contrainte normale en N/mm² ou MPa

Allongement unitaire ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

avec ΔL : allongement après rupture en mm
L_0 : longueur initiale en mm
ε : allongement unitaire en %

• Loi de Hooke (relation entre contrainte et allongement)

Cette loi n'est valable que dans le domaine élastique.

$$\sigma = \frac{N}{S_0} = E.\frac{\Delta L}{L_0} = E.\varepsilon$$

avec E : module d'élasticité longitudinal ou module de Young en N/mm² ou MPa

Quelques valeurs du module de Young :

Fonte :	*60 000 à 180 000 MPa*
Acier :	*200 000 à 220 000 MPa*
Cuivre :	*120 000 MPa*
Alliages d'aluminium :	*70 000 à 75 000 MPa*
Carbures métalliques :	*550 000 MPa*
Étain :	*40 000 MPa*
Bois :	*10 000 à 30 000 MPa*

Condition de résistance

Pour des raisons de sécurité, la contrainte σ dans la poutre doit rester inférieure à une valeur limite appelée résistance pratique à l'extension ***Rpe***. La valeur de ***Rpe*** est définie en appliquant un coefficient de sécurité à la limite élastique ***Re*** du matériau utilisé :

$$Rpe = \frac{Re}{s}$$

avec Rpe : résistance pratique à l'extension en N/mm² ou MPa
Re : limite élastique en N/mm² ou MPa
s : coefficient de sécurité : – 2 à 4 en mécanique générale
– 10 ou supérieur s'il y a sécurité des personnes

Condition de résistance : $\sigma \leq Rpe$

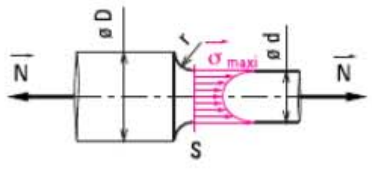
Concentration de contraintes

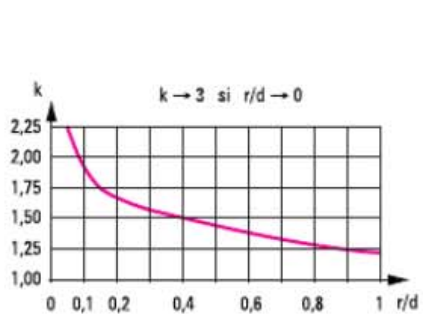
Lorsqu'il y a variation brusque de la section dans une poutre, la contrainte au voisinage du changement de section n'est plus uniforme et augmente considérablement ; il faut multiplier la contrainte par un coefficient de concentration de contrainte k.

$$\sigma_{maxi} \leq k.\sigma \quad \text{avec } 1 < k < 3$$

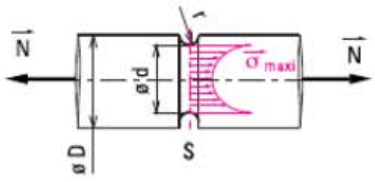
Le coefficient de concentration de contrainte k varie en fonction du rapport r/d.

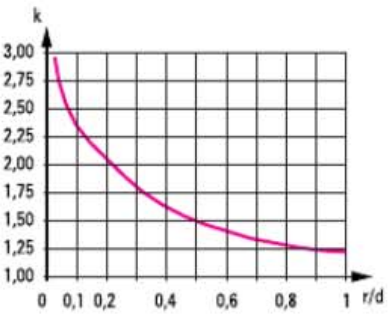
Cas d'un arbre épaulé



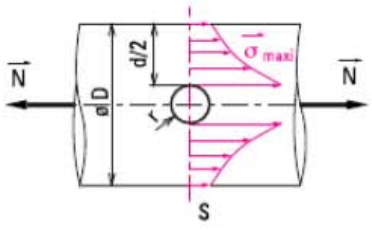


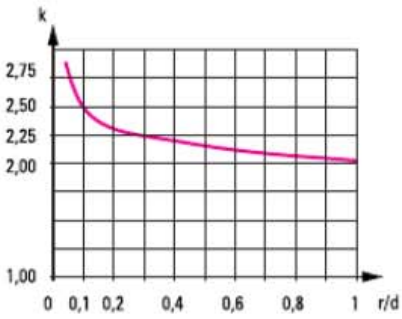
Cas d'un arbre avec gorge circulaire





Cas d'un arbre percé



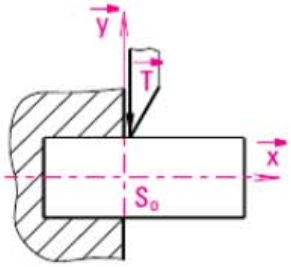


Pour un filetage on prend en général k = 3.

5.3.7. RIGIDITÉ DES ÉLÉMENTS DÉFORMABLES (cisaillement)

• Cisaillement pur

Une poutre est soumise en cisaillement pur si elle est soumise à deux forces directement opposées contenues dans un plan perpendiculaire à la ligne moyenne.



Essai de cisaillement

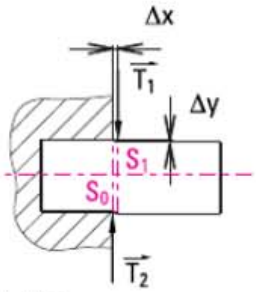
La poutre est encastrée, mais l'effort de cisaillement appliqué sur celle-ci ne peut en réalité être parfaitement contenu dans le plan d'encastrement S_0. La distance Δx entre les sections droites S_0 et S_1 induit un glissement transversal Δy de ces sections.

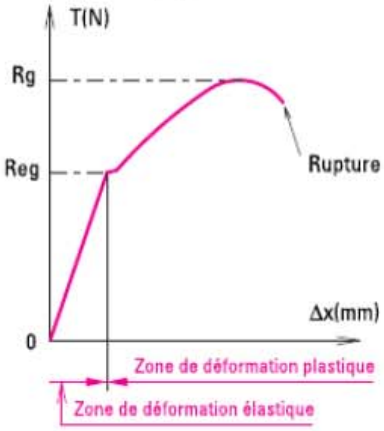
L'analyse de la courbe issue de l'essai de cisaillement μ définit trois étapes :

– ***la déformation élastique*** (partie rectiligne de la courbe) pendant laquelle le matériau se déforme de façon non permanente : si on annule l'effort tranchant $\vec{T}$, l'éprouvette retrouve sa forme initiale : l'effort maximal admissible définit la limite élastique au glissement ***Reg*** ;

– ***la déformation plastique*** pendant laquelle le glissement relatif entre les deux surfaces S_0 et S_1 de l'éprouvette glissent de façon irrémédiable ;

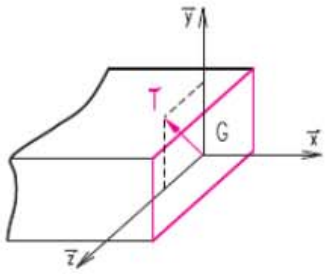
– ***la rupture*** qui définit la charge de rupture au glissement ***Rg*** ou ***Rrg***.





Torseur de cohésion

$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Ty & 0 \\ Tz & 0 \end{Bmatrix}_{G\,\mathcal{R}}$$



Contrainte tangentielle ou cission τ dans une section de poutre cisaillée

Les contraintes, dans la section cisaillée de la poutre, sont tangentielles (dans le plan de la section) ; dans un cas général, on peut supposer que leur répartition est uniforme dans la section cisaillée.

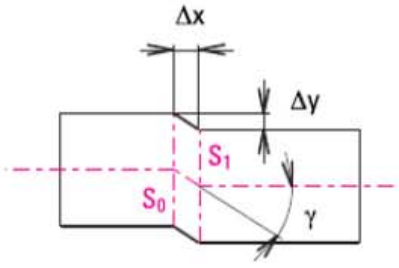
La contrainte de cisaillement est définie par la relation $\tau = \dfrac{\|\vec{T}\|}{S}$

avec τ : contrainte tangentielle en MPa ou N/mm²
$\vec{T}$: effort tranchant en N
S : section cisaillée en mm²

Déformation élastique

La déformation élastique est définie par l'angle γ appelé glissement relatif :

$$\gamma = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$



Relation entre déformation et contrainte

$$\tau = G.\gamma \quad \text{ou} \quad \frac{\|\vec{T}\|}{S} = G.\frac{\Delta y}{\Delta x}$$

avec G : module d'élasticité transversale ou module de Coulomb en MPa ou N/mm²

Quelques valeurs du module de Coulomb : en première approximation, on peut admettre G = 0,4.E.

Fonte :	*40 000 MPa*	*Alliages d'aluminium :*	*32 000 MPa*
Acier :	*80 000 MPa*	*Aciers à ressorts :*	*83 000 MPa*
Cuivre :	*48 000 MPa*	*Verre :*	*28 000 MPa*

Condition de résistance

Pour des raisons de sécurité, la contrainte tangentielle τ dans la poutre doit rester inférieure à une valeur limite appelée résistance pratique au glissement ***Rpg***. La valeur de ***Rpg*** est définie en appliquant un coefficient de sécurité à la limite élastique au glissement ***Reg*** du matériau utilisé.

$$Rpg = \frac{Reg}{s}$$

avec Rpg : résistance pratique au glissement en MPa ou N/mm²
Reg : limite élastique au glissement en MPa ou N/mm²
s : coefficient de sécurité (1 à 5)

La valeur de la limite élastique au glissement Reg d'un matériau peut être déduite de la valeur de la limite élastique à l'extension Re pour un calcul de première approche (sans réaliser un essai de cisaillement) :

acier doux et alliages d'aluminium (Re < 270 N/mm²) : Reg = 0,5 Re
acier mi-dur (320 N/mm² < Re < 500 N/mm²) : Reg = 0,7 Re
acier dur (Re > 600 N/mm²) – fonte : Reg = 0,8 Re

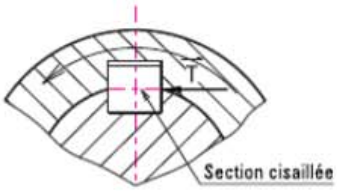
Condition de résistance (cas d'un calcul dans le domaine élastique) : $\tau \leq Rpg$ ou $\frac{\|\vec{T}\|}{S} \leq Rpg$

Condition de résistance (cas d'un calcul à la rupture) : $\tau \leq Rg$ ou $\frac{\|\vec{T}\|}{S} \leq Rg$

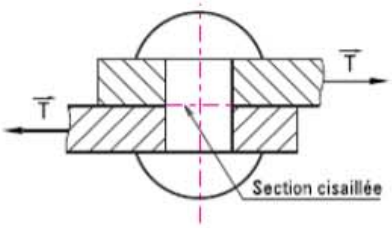
Remarque : la charge de rupture au glissement est en moyenne égale à la moitié de la charge de rupture en extension : Rg = 0,5 R

Exemples d'éléments cisaillés

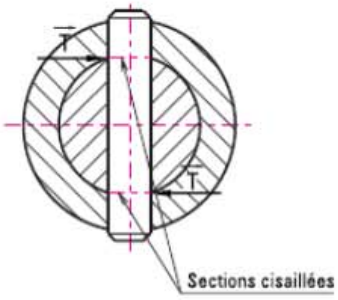
Assemblage claveté (calcul au cisaillement)



Assemblage riveté



Assemblage goupillé

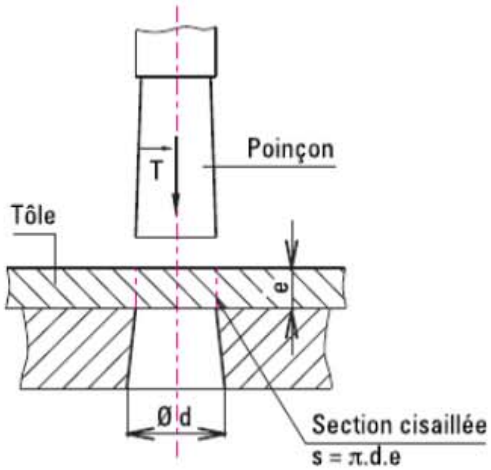


Le calcul est réalisé dans la limite élastique avec un coefficient de sécurité fonction du domaine d'utilisation.

Le calcul de la section de la goupille peut être fait à la rupture au cisaillement dans le cas d'une goupille de sécurité.

Tôle poinçonnée

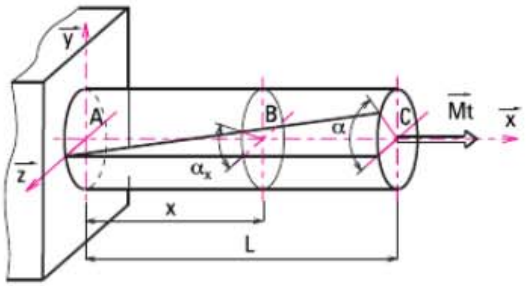
Le calcul est réalisé à la rupture du cisaillement.



5.3.8. RIGIDITÉ DES ÉLÉMENTS DÉFORMABLES (torsion)

• Torsion simple

Une poutre est soumise en torsion si elle est soumise à l'action de forces qui se réduisent à un couple situé dans un plan normal à son axe ; les arbres de transmission, barres de torsion, les ressorts hélicoïdaux sont calculés en torsion.



Essai de torsion

L'essai se fait sur une poutre cylindrique encastrée à une de ses extrémités. Sous l'influence du moment de torsion Mt exercé à son extrémité libre, les diverses sections droites du cylindre tournent les unes par rapport aux autres, en donnant naissance à une série de glissements analogues au cisaillement.

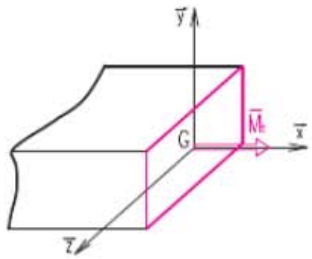
Pendant l'essai, on peut admettre les hypothèses suivantes :
– l'axe du cylindre reste droit après torsion,
– toute section droite reste plane et normale à l'axe (dimensions constantes),
– le déplacement d'une section droite, par rapport à une section infiniment voisine, s'opère par une rotation d'angle α_x autour de l'axe ; cette rotation est proportionnelle à la distance d'encastrement.

Une génératrice du cylindre se transforme donc suivant une hélice.

La courbe de l'enregistrement de l'essai de torsion présente une similitude avec celle de l'essai de traction ; le seuil de rupture est très variable en fonction de l'état de surface de l'éprouvette.

Torseur de cohésion

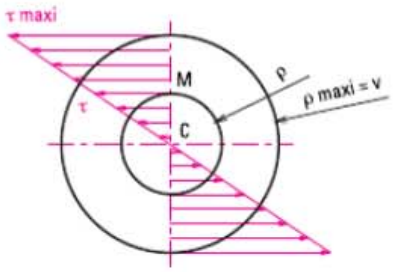
$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} 0 & Mt \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{G\,\mathcal{R}}$$



Contraintes de torsion τ dans une section droite

La contrainte de torsion dans une section droite est proportionnelle à la distance ρ du point M à la fibre moyenne (fibre neutre) :

$$\tau = \frac{Mt}{I_0}\rho$$

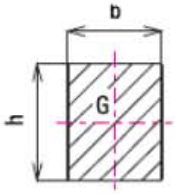


La contrainte maximale de torsion est définie pour la valeur maximale de ρ, notée v :

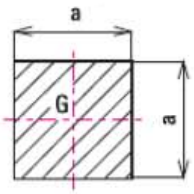
$$\tau\,maxi = \frac{Mt\,maxi}{\left(\frac{I_0}{v}\right)}$$

avec
- τ maxi : contrainte maximale de torsion en MPa ou N/mm²
- Mt maxi : moment de torsion en N.mm
- I_0 : moment quadratique polaire de la section en mm⁴
- v : valeur maxi de ρ (rayon pour un arbre)

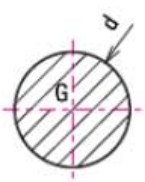
Moment quadratique polaire I_0 ou I_G des principales sections de poutre



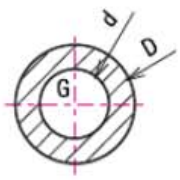
$$I_0 = I_G = \frac{bh}{12}(b^2 + h^2)$$



$$I_0 = I_G = \frac{a^4}{6}$$



$$I_0 = I_G = \frac{\pi d^4}{32}$$



$$I_0 = I_G = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)$$

Déformation élastique

Soit θ l'angle dont tournent deux sections voisines distantes de dx : $\theta = \frac{d\alpha}{dx}$.

L'angle θ constant est appelé angle unitaire de torsion exprimé en rd/mm ; il est défini par la relation :

$$\theta = \frac{Mt}{G.I_0}$$

avec θ : angle unitaire de torsion en rd/mm
Mt : moment de torsion en N.mm
G : module d'élasticité transversale ou module de Coulomb en MPa ou N/mm² (voir paragraphe cisaillement)
I_0 : moment quadratique polaire de la section en mm⁴.

Relation entre déformation et contrainte

$$\tau \text{ maxi} = G.\theta.I_0$$

avec τ maxi : contrainte de torsion maximale en MPa ou N/mm²

Conditions de résistance

Pour des raisons de sécurité, la contrainte tangentielle τ maxi dans la poutre doit rester inférieure à une valeur limite appelée résistance pratique au glissement ***Rpg***. La valeur de ***Rpg*** est définie en appliquant un coefficient de sécurité à la limite élastique au glissement ***Reg*** du matériau utilisé.

$$Rpg = \frac{Reg}{s}$$

avec Rpg : résistance pratique au glissement en MPa ou N/mm²
Reg : limite élastique au glissement en MPa ou N/mm²
s : coefficient de sécurité (1 à 5)

Condition de résistance (cas d'un calcul à la limite élastique) : $\tau \text{ maxi} = \frac{Mt \text{ maxi}}{I_0/V} \leq Rpg$

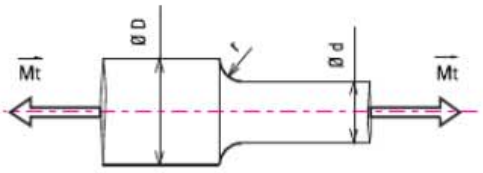
Condition de résistance (cas d'un calcul à la rupture) : $\tau \text{ maxi} = \frac{Mt \text{ maxi}}{I_0/V} \leq Rg$

avec Rg : charge de rupture au glissement en MPa

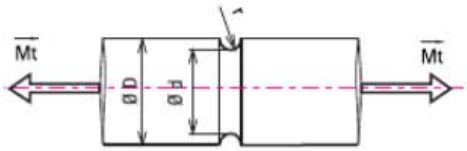
Concentration de contrainte

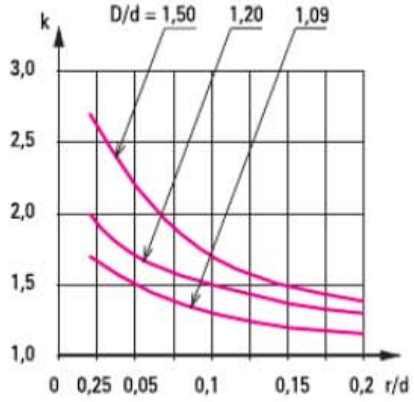
Lorsqu'il y a variation brusque de la section dans une poutre, la contrainte au voisinage du changement de section n'est plus uniforme et augmente considérablement ; il faut multiplier la contrainte par un coefficient de concentration de contrainte k.

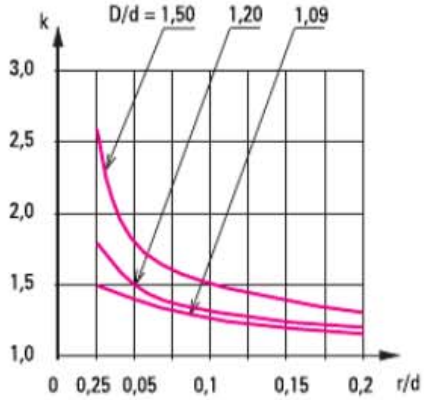
Cas d'un arbre épaulé



Cas d'un arbre avec gorge circulaire







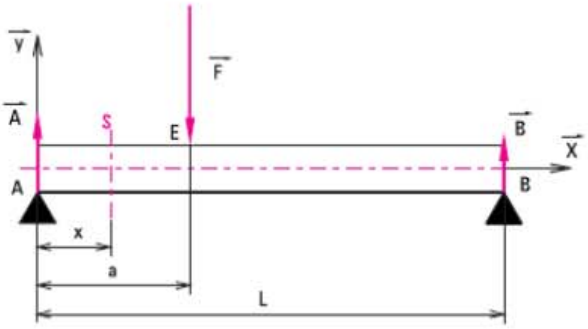
Pour une rainure de clavette : $2 < k < 5$

Pour un trou de goupille : $2{,}5 < k < 4$

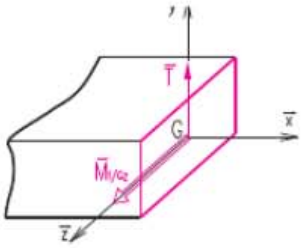
5.3.9. RIGIDITÉ DES ÉLÉMENTS DÉFORMABLES (flexion).

• Flexion simple plane

Hypothèses :
– la poutre possède un plan de symétrie longitudinal ;
– la ligne moyenne de la poutre est rectiligne ;
– les liaisons de la poutre avec le milieu extérieur sont parfaites ;
– toutes les forces exercées sur la poutre sont dans le plan de symétrie longitudinal et perpendiculaires à la ligne moyenne.

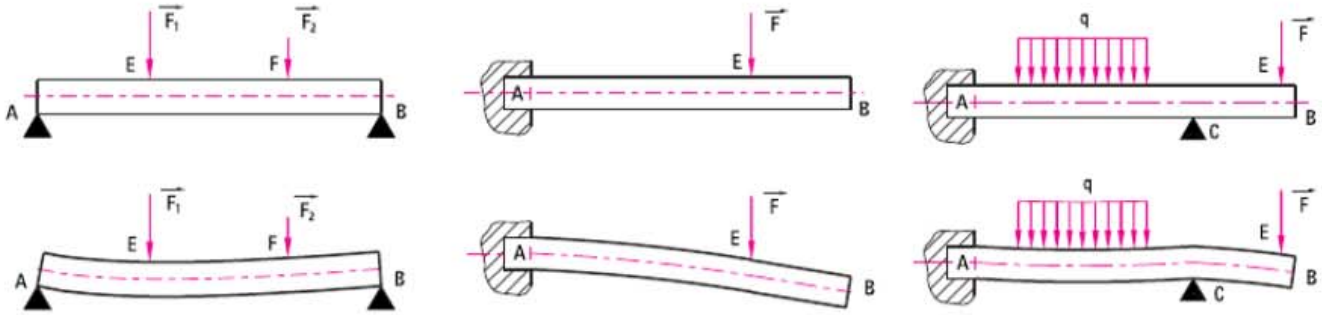


La flexion plane est définie par le torseur de cohésion suivant :



$$\{Coh\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Ty & 0 \\ 0 & Mfz \end{Bmatrix}_{G}^{\mathcal{R}}$$

Quelques exemples de flexion plane simple :

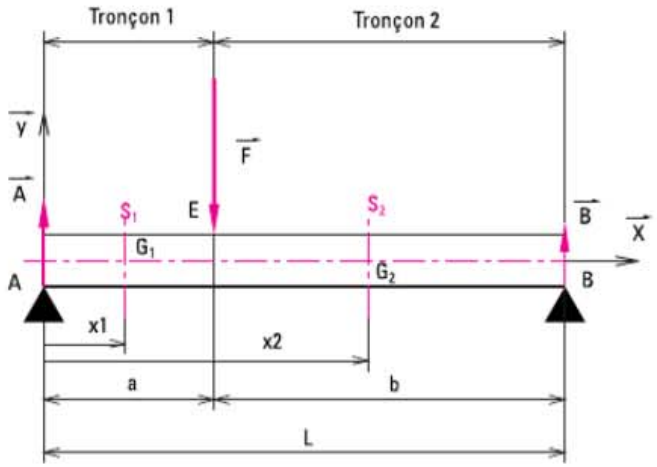


Poutre sur deux appuis
Charges concentrées

Poutre encastrée
à une extrémité
Charge concentrée

Poutre encastrée
à une extrémité + un appui
Charge répartie
+ charge concentrée

Effort tranchant et moment fléchissant

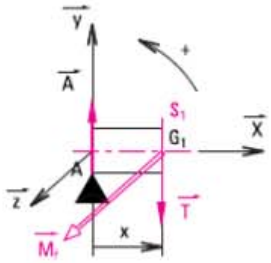


Soit une poutre sur deux appuis et une charge concentrée appliquée entre les deux appuis.
L'effort tranchant T et le moment fléchissant Mf sont variables en fonction de la position de la section S de poutre considérée.
Dans une section S :

$$\vec{T} + \Sigma\vec{F}_{G/D} = \vec{0}$$

$$\vec{Mf} + \Sigma\vec{M}_{G}\vec{F}_{G/D} = \vec{0}.$$

Dans le tronçon 1 (section S_1 entre A et E)
0 < x < a



Effort tranchant T :
$\vec{T} + \vec{A} = \vec{0}$
En projection sur y :
$T = -A = -\frac{F.b}{L}$

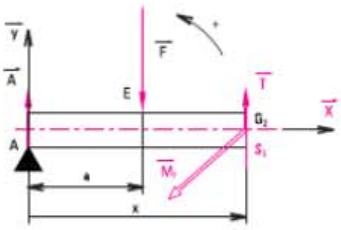
Moment fléchissant en G_1 en projection sur z

$Mf - A.x = 0 \Rightarrow \quad Mf = A.x = \frac{F.b}{L}.x$

Si $x = 0$: $Mf = 0$

Si $x = a$: Mf maxi $= \frac{F.a.b}{L}$

Dans le tronçon 2 (section S_2 entre E et B)
a < x < L



Effort tranchant T :
$\vec{T} + \vec{A} + \vec{F} = \vec{0}$
En projection sur y :
$T = -A + F = \frac{F.a}{L}$

Moment fléchissant en G_2 en projection sur z

$Mf - A.x + F(x - a) = 0$

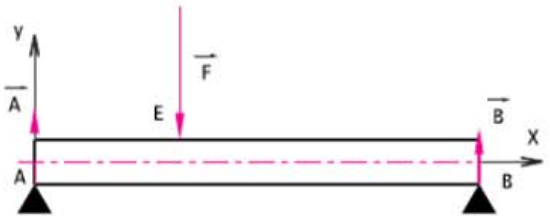
$\Rightarrow \quad Mf = A.x - F(x - a) = -\frac{F.a.x}{L} + F.a$

Si $x = a$: Mf maxi $= \frac{F.a.b.}{L}$

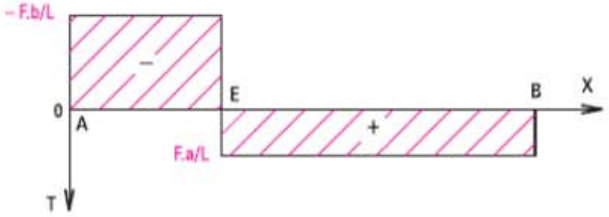
Si $x = L$: $Mf = 0$

Les variations de l'effort tranchant T et du moment fléchissant dans la poutre sont reportées sur les graphes de l'effort tranchant et du moment fléchissant représentés ci-contre.
Remarque : l'effort tranchant dans un tronçon de poutre est égal à l'opposée de la dérivée par rapport à x du moment fléchissant :

$$T = -\frac{dMf}{dx}$$



Graphe de l'effort tranchant



Déformée et flèche

La poutre fléchit sous l'influence du système des forces. La ligne moyenne se déforme dans le plan (A,x,y) ; la courbe ainsi obtenue est appelée *déformée.*
Soit $y = f(x)$, l'équation de la déformée ; la déformation est définie par :

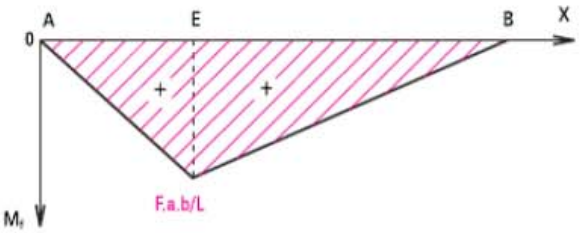
$$y'' = \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Mf}{E.I_{Gz}}$$

avec Mf : moment de flexion en N.mm
E : module d'élasticité longitudinal ou module de Young en N/mm²
I_{Gz} : moment quadratique par rapport à l'axe Gz en mm⁴.

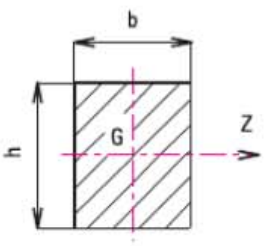
L'équation de la déformée dans chaque tronçon est déduite de la relation ci-dessus par deux intégrations successives ; il y a cependant continuité de la déformée au point limite des deux tronçons en E :
$y'_{E\ à\ gauche} = y'_{E\ à\ droite}$ et $y_{E\ à\ gauche} = y_{E\ à\ droite}$:
ces deux équations permettent de définir les constantes d'intégration.

La flèche en un point correspond à la valeur de la déformée pour une abscisse x considérée ; la flèche maximale est définie par l'équation $y' = 0$.

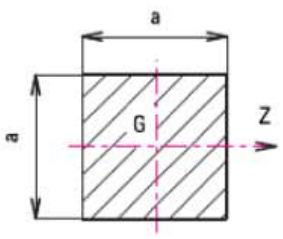
Graphe du moment fléchissant



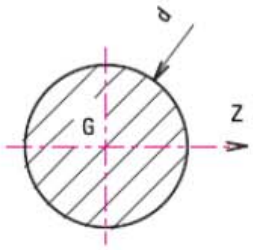
5.3.10. MOMENTS QUADRATIQUES PAR RAPPORT À L'AXE GZ DE QUELQUES SECTIONS DE POUTRES



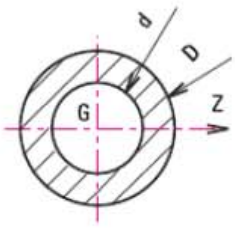
$$I_{Gz} = \frac{b.h^3}{12}$$



$$I_{Gz} = \frac{a^4}{12}$$



$$I_{Gz} = \frac{\pi d^4}{64}$$



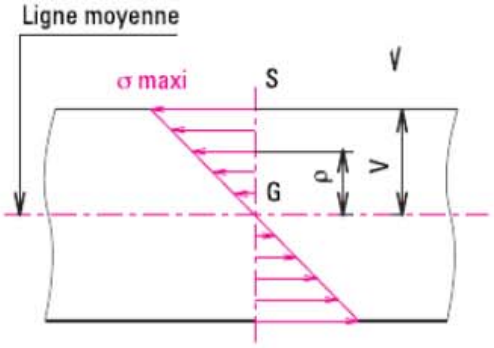
$$I_{Gz} = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

Contraintes

La contrainte normale dans une section de poutre est donnée par la relation :

$$\sigma = \frac{Mf}{I_{Gz}}\rho$$

avec σ : contrainte normale en N/mm²
Mf : moment fléchissant en N.mm
I_{Gz} : moment quadratique suivant Gz en mm⁴
ρ : distance de la fibre neutre au point considéré



La contrainte maximale est donnée par la relation :

$$\sigma \text{ maxi} = \frac{Mf \text{ maxi}}{\left(\frac{I_{Gz}}{v}\right)}$$

avec v : distance de la fibre la plus éloignée à la fibre neutre en mm.

La contrainte tangentielle moyenne peut être définie en première approximation par la relation :

$$\tau_{moy} = \frac{T}{S}$$

avec τ_{moy} : contrainte tangentielle en N/mm²
T : effort tranchant en N
S : section de la poutre en mm²

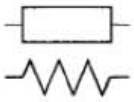
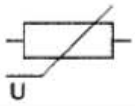
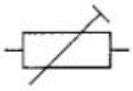
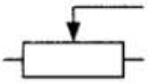
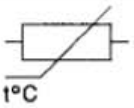
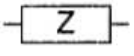
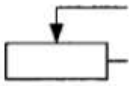
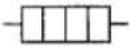
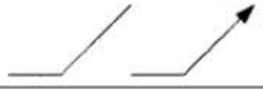
6 Electricité Electronique

6.1. RÈGLES EN ÉLECTRICITÉ 276
6.1.1. Symboles électriques et électroniques 276
6.1.2. Schémas structurels 278
6.1.3. Le courant continu 279
6.1.4. Tensions et courants variables 283
6.1.5. Méthodes de calculs avancés 287
6.1.6. Piles et accumulateurs 288
6.1.7. Caractériser des écarts 295
6.1.8. Appareil de mesure 299
6.2. LES CODES ET BASES DE NUMÉRATION 300
6.2.1. Conversions 303
6.2.2. Le code ASCII 307
6.3. LES FONCTIONS LOGIQUES 308
6.3.1. Les fonctions de base 309
6.3.2. Brochage des fonctions logiques TTL et CMOS les plus courantes 313
6.3.3. Fonction transfert 314
6.3.4. Logique combinatoire 315
6.3.5. L'algèbre de Boole 316
6.3.6. Théorème de De Morgan 317
6.3.7. Simplification 319
6.3.8. Transcodeur BCD 7 segments 322
6.4. LOGIQUE SÉQUENTIELLE 323
6.4.1. Bistables RS, RSH 325
6.4.2. Bascule D 326
6.4.3. Les compteurs 329
6.4.4. Codeur incrémental et absolu 335
6.5. LES SEMI-CONDUCTEURS 337
6.5.1. Diode à jonction 337
6.5.2. Le redressement 340
6.5.3. Les régulateurs de tension 341
6.5.4. Diode Zéner 343
6.5.5. Diodes électroluminescentes (DEL) 346
6.5.6. Photodiodes, phototransistors 347
6.5.7. Cellules photovoltaïques (photopiles) 348
6.6. COMMUTATION 349
6.6.1. Contacteurs électromagnétiques et relais 349
6.6.2. Le transistor bipolaire 350
6.6.3. Le transistor MOS 354
6.6.4. Thyristor et triac 356
6.7. CIRCUITS ANALOGIQUES 359
6.7.1. Capteurs électroniques : effort, LDR, CTN, température 359
6.7.2. Le condensateur 361
6.7.3. Circuits NE555 et NE556 365
6.7.4. l'inductance 367
6.7.5. Amplificateur intégré 370
6.7.6. Le filtrage 376
6.7.7. Conversion numérique ↔ analogique 379

6.1. RÈGLES EN ÉLECTRICITÉ

6.1.1. SYMBOLES ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

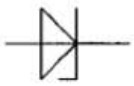
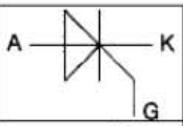
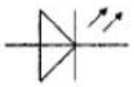
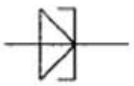
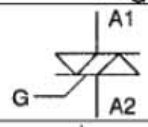
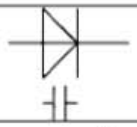
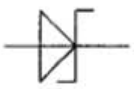
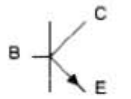
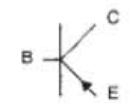
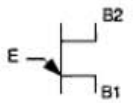
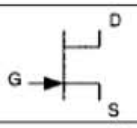
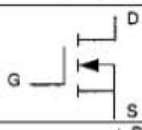
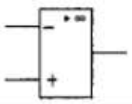
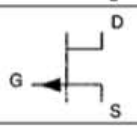
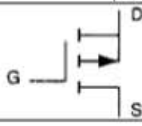
Composants passifs

	Résistance symbole général (2 variantes)		Varistance (résistance dépendant de la tension)		Résistance ajustable
	Potentiomètre à contact mobile		Thermistance (résistance dépendant de la température)		Impédance
	Résistance variable à contact mobile		Résistance variable		Résistance chauffante
	Variation linéaire		Variation non linéaire		

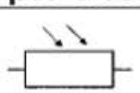
Condensateurs, inductances

	Condensateur symbole général		Condensateur polarisé		Condensateur variable
	Inductance symbole général		Inductance avec noyau		Inductance avec noyau et entrefer

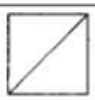
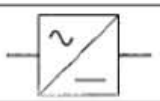
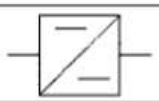
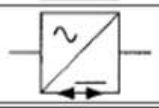
Semi-conducteurs

	Diode symbole général		Diode Zener ou avalanche contrôlée		Thyristor
	Diode électroluminescente		Diode tunnel		Triac
	Diode à capacité variable		Diode Schottky		Diac diode symétrique
	Transistor bipolaire NPN		Transistor bipolaire PNP		Transistor uni-jonction UJT
	Transistor à effet de champ canal N		Transistor MOS grille isolée canal N		Amplificateur intégré
	Transistor à effet de champ canal P		Transistor MOS grille isolée canal P		Quartz ou résonateur céramique

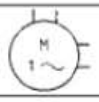
Opto-électronique

	Photorésistance		Photodiode		Phototransistor

Convertisseurs de puissance

	Convertisseur symbole général		Convertisseur alternatif/continu Redresseur		Convertisseur continu/alternatif Onduleur
	Convertisseur continu/continu		Redresseur en couplage à double voie (en pont)		Convertisseur continu ↔ alternatif redresseur/onduleur

Moteurs électriques

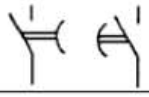
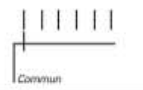
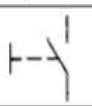
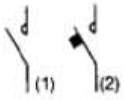
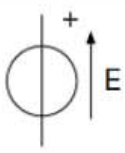
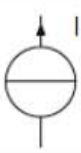
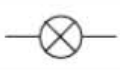
	Symbole général (remplacer * par une lettre de désignation de la machine).		Moteur asynchrone monophasé à phase auxiliaire.		Moteur à courant continu à aimant permanent.
	Moteur pas à pas.		Moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit.		Moteur à courant continu à excitation en série.

Transformateurs

		Transformateur à deux enroulements.			Autotransformateur.

Appareillage

NO : Normally opened ⇒ normalement ouvert
NC : Normally closed ⇒ normalement fermé

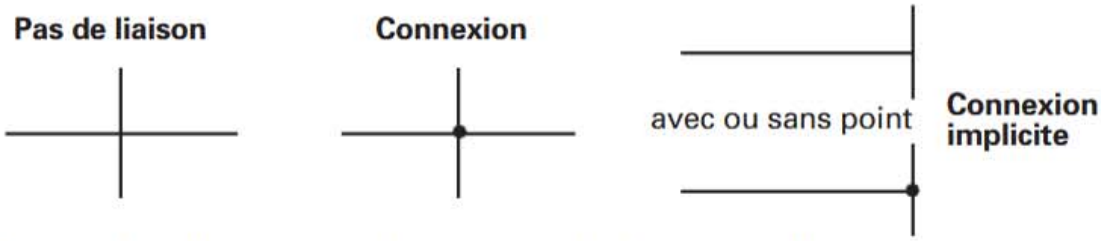
	Contact à fermeture (contact de travail) (NO).		Contact à deux directions sans chevauchement.		Contact à fermeture, retardé au travail (deux symboles) (NO).
	Contact à ouverture (contact de repos) (NF ou NC).		Contact de position fin de course NO, NF.		Elément de commutateur à n directions Ici 6 directions
	Contact à fermeture à commande manuelle (symbole général) (NO).		Bouton poussoir à fermeture à retour automatique (NO).		Bouton rotatif à fermeture sans retour automatique (NO).
	Interrupteur à fermeture (NO) commandé par la température θ.		Interrupteur à ouverture (NC) commandé par la température θ.		Contact d'un relais thermique (NC).
	Interrupteur (deux variantes) (NO).		Disjoncteur.		Interrupteur-sectionneur.
	Contacteur (1) (NO). Discontacteur (2) (NO) (contacteur associé à un relais de protection).		Sectionneur.		Interrupteur-sectionneur à ouverture automatique.
	Fusible (symbole général).		Fusible interrupteur (1). Fusible sectionneur (2).		Fusible-interrupteur-sectionneur.
	Capteur sensible à une proximité.		Capteur sensible à une proximité avec contact à fermeture.		Dispositif sensible à une proximité, commandé par un aimant, avec contact à fermeture.
	Organe de commande d'un relais, symbole général.		Organe de commande d'un relais à mise au repos retardée.		Organe de commande d'un relais à mise au travail retardée.
	Organe de commande d'un relais à verrouillage mécanique.		Organe de commande d'un relais thermique.		Organe de commande d'un relais insensible au courant alternatif.
	Générateur idéal de tension.		Générateur idéal de courant.		Témoin lumineux.
					Wattmètre.
	Voltmètre.		Fréquencemètre.		Phasemètre. Indicateur de déphasage.
	Ampèremètre.		Oscilloscope.		Tachymètre.

6.1.2. SCHÉMAS STRUCTURELS

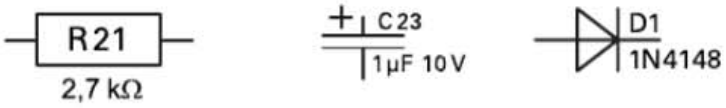
• Règles

Il existe plusieurs schémas structurels dont les représentations suivent les règles suivantes :

- L'utilisation de **symboles normalisés** (voir pages précédentes).
- Ces **symboles** peuvent être représentés en **position horizontale ou verticale**.
- Les **liaisons** entre les composants sont composées de **droites horizontales ou verticales**.
- Les **connexions** sont représentées par **un point** si les liaisons sont connectées.
- Le point n'est pas obligatoire si la connexion est implicite.



Il est recommandé de repérer les composants par un numéro et par sa valeur.
Exemple : Résistances R1, R2, R3, ... et d'ajouter, éventuellement, la valeur du composant.



• Séries normalisées E3, E6, E12 et E24

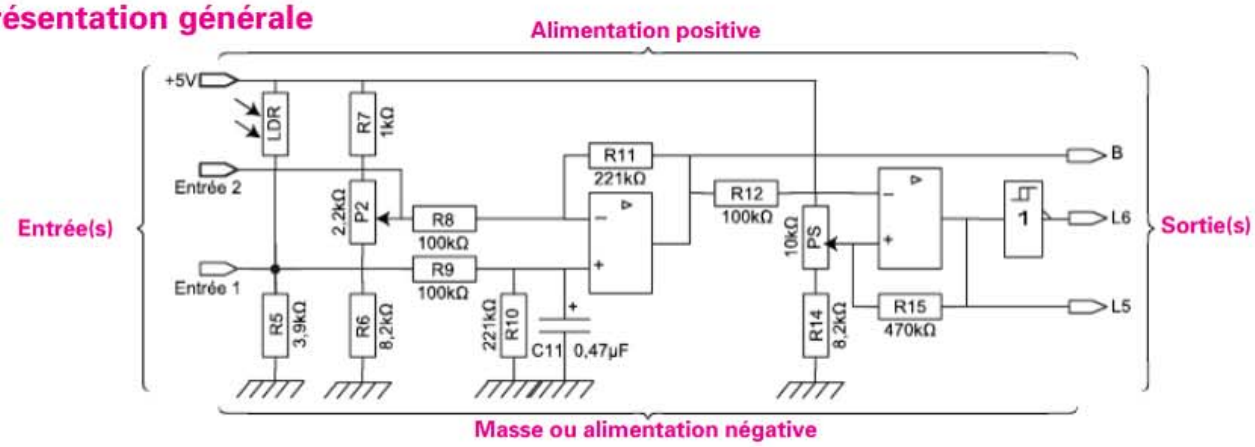
E24	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91
E12	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56		68		82	
E6	10				15				22				33				47				68			
E3	10								22								47							

La série définit le nombre des premiers chiffres significatifs auxquels on applique un coefficient multiplicateur puissance de 10. C'est la tolérance qui définit la série.

Correspondance entre la série et la tolérance : *(Le nombre après le E représente le nombre de valeurs par décade)*

E192 ± 0,5 % E96 ± 1 % E48 ± 2 %
E24 ± 5 % E12 ± 10 % E6 ± 20 % E3 ± 40 %

• Présentation générale



On représente :

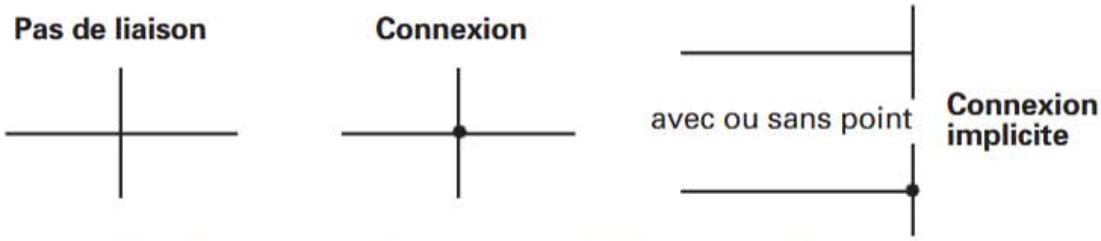
- **à gauche**, la ou **les entrées** ou le ou les composants qui constituent la ou les informations d'entrée ;
- **à droite**, la ou **les sorties** ou le ou les composants qui constituent la ou les informations de sortie ;
- **en haut**, la source d'alimentation de potentiel le plus élevé ;
- **en bas**, la source d'alimentation de potentiel le plus bas (par exemple la masse).

6.1.2. SCHÉMAS STRUCTURELS

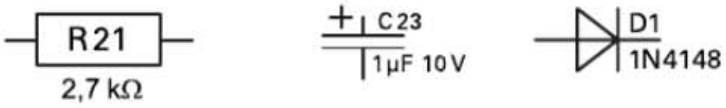
• Règles

Il existe plusieurs schémas structurels dont les représentations suivent les règles suivantes :

- L'utilisation de **symboles normalisés** (voir pages précédentes).
- Ces **symboles** peuvent être représentés en **position horizontale ou verticale**.
- Les **liaisons** entre les composants sont composées de **droites horizontales ou verticales**.
- Les **connexions** sont représentées par **un point** si les liaisons sont connectées.
- Le point n'est pas obligatoire si la connexion est implicite.



Il est recommandé de repérer les composants par un numéro et par sa valeur.
Exemple : Résistances R1, R2, R3, ... et d'ajouter, éventuellement, la valeur du composant.



• Séries normalisées E3, E6, E12 et E24

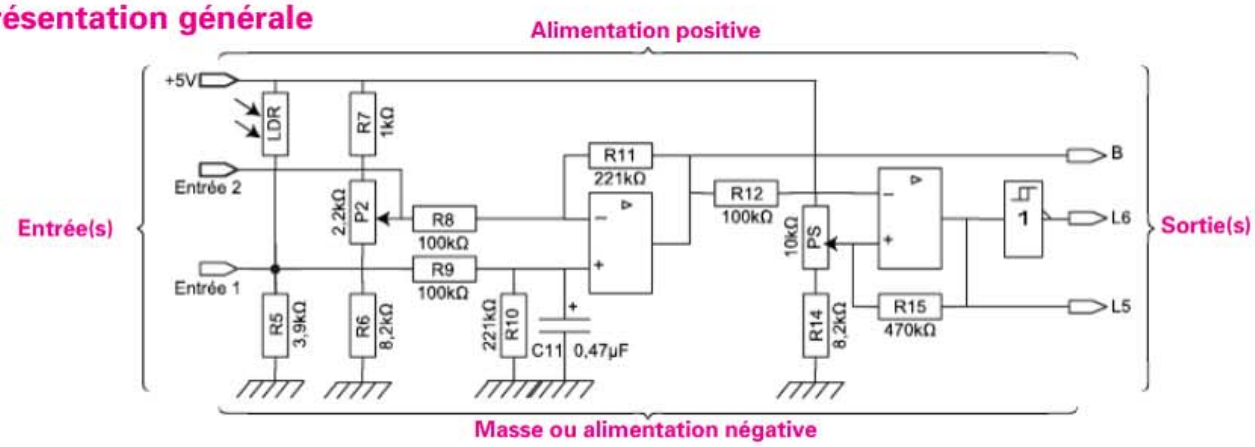
E24	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91
E12	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56		68		82	
E6	10				15				22				33				47				68			
E3	10								22								47							

La série définit le nombre des premiers chiffres significatifs auxquels on applique un coefficient multiplicateur puissance de 10. C'est la tolérance qui définit la série.

Correspondance entre la série et la tolérance : *(Le nombre après le E représente le nombre de valeurs par décade)*

E192 ± 0,5 % E96 ± 1 % E48 ± 2 %
E24 ± 5 % E12 ± 10 % E6 ± 20 % E3 ± 40 %

• Présentation générale



On représente :

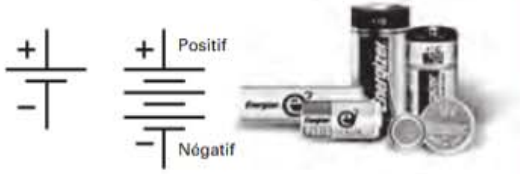
- **à gauche**, la ou **les entrées** ou le ou les composants qui constituent la ou les informations d'entrée ;
- **à droite**, la ou **les sorties** ou le ou les composants qui constituent la ou les informations de sortie ;
- **en haut**, la source d'alimentation de potentiel le plus élevé ;
- **en bas**, la source d'alimentation de potentiel le plus bas (par exemple la masse).

6.1.3. LE COURANT CONTINU

André-Marie Ampère
1775-1836

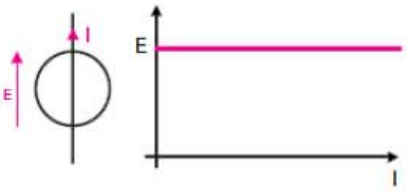
Pour mettre en mouvement des électrons libres il faut :
- Un **circuit conducteur fermé** une pompe à électrons appelée **générateur**
- L'intensité du courant électrique est la quantité d'électricité traversant une section droite du conducteur en une seconde
- **L'intensité d'un courant** s'exprime en **Ampères** (symbole **A**)

• Représentation d'un générateur



Le générateur chimique (la pile, l'accumulateur)
Une pile est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique. Un élément représente 1,2 V à 4 V, pour obtenir d'autres tensions, on peut brancher ces éléments en série.

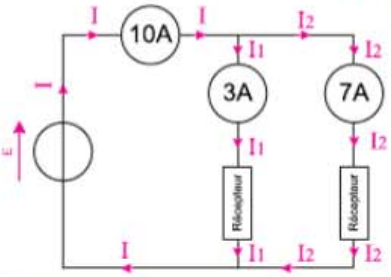
Générateur parfait de tension :
Il se différencie du générateur précédent par le fait qu'il fournit une tension stable et constante quel que soit le courant demandé. Il est nommé E (fem : force électromotrice).



• Mesure de l'intensité d'un courant — (A)

L'intensité d'un courant se mesure à l'aide d'un ampèremètre placé en série dans le circuit.

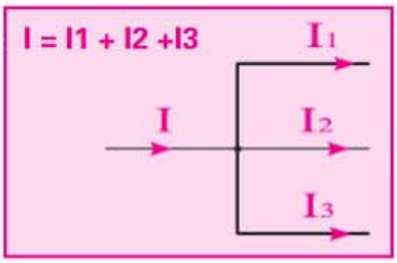
La valeur indiquée par l'ampèremètre mesurant **I** est la somme des valeurs indiquées par les ampèremètres mesurant **I1** et **I2**.



• Loi des nœuds

La somme des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des courants qui partent.

Si toutes les flèches sont entrantes ou sortantes, cela signifie qu'il y a une erreur de fléchage, ou qu'un courant est négatif.

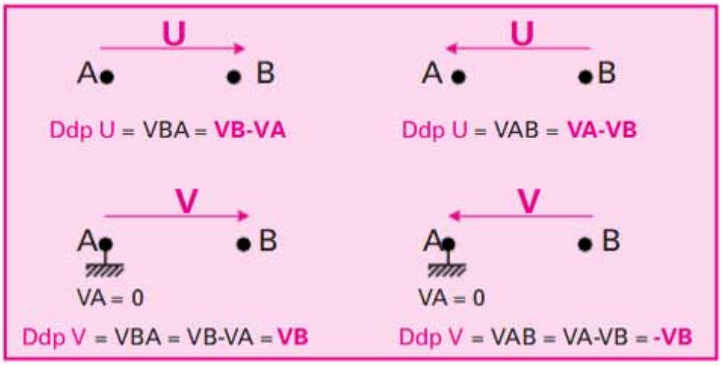


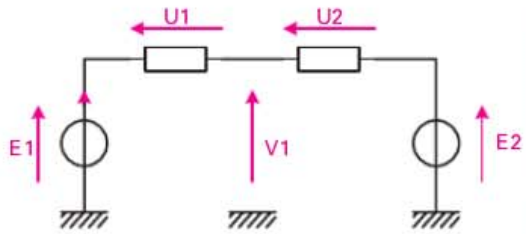
• Différence de potentiel

Le VOLT (V) correspond à la différence de potentiel électrique qui existe entre deux points d'un circuit parcouru par un courant constant de 1 ampère lorsque la puissance dissipée entre ces deux points est égale à 1 watt.

Anastasio Volta
1745-1827

Représentation schématique d'une différence de potentiel (ddp)





On note V pour une tension simple (tension par rapport à la masse)
On note U pour une tension composée (VA -VB)

Le courant continu

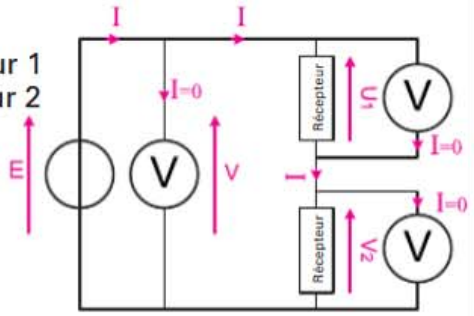
• Mesure d'une différence de potentiel

La différence de potentiel se mesure à l'aide d'un **voltmètre branché en dérivation** dans le circuit.

Le voltmètre mesure la **ddp V** aux bornes du générateur. Mais V est aussi la différence de potentiel aux bornes du circuit.

U1 est la différence de potentiel mesurée aux bornes du récepteur 1
V2 est la différence de potentiel mesurée aux bornes du récepteur 2

Le voltmètre ne perturbe pas le circuit.
L'énergie consommée par le voltmètre est considérée comme nulle **I=0**



• Puissance électrique

Par définition, la puissance est le travail effectué en 1 seconde (P en Watt).

1 Watt = 1 Joule par seconde $P_{(W)} = U_{(V)}.I_{(A)}$ $P = \frac{U^2}{R}$ $P = RI^2$

Le **kilowattheure** (symbole : **kWh**) est une unité pratique de mesure d'énergie valant **3,6 mégajoules**.

C'est l'énergie consommée par un appareil d'une puissance égale à un kilowatt (1000 W) fonctionnant pendant une heure (1 kilowatt × 1 heure).

Le prix public TTC d'un kWh d'électricité en France en 2017 est de 0,15 € environ et selon le type d'abonnement.

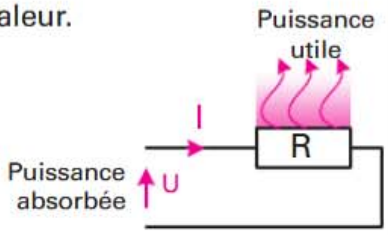
• Rendement

Le rendement est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée. $\eta = \frac{Putile}{Pabsorbée}$

Exemple :
Une résistance de chauffage, elle transforme l'énergie électrique en chaleur.

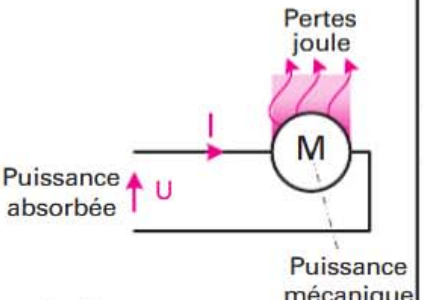
P absorbée = U.I

Si la puissance dissipée est utile, elle sera appelée Pu (puissance utile)
Sinon, elle sera appelée Pj : perte joule (puissance perdue)



Dans ce cas P utile = P absorbée $\eta = \frac{Putile}{Pabsorbée}$
Le rendement est de 100%

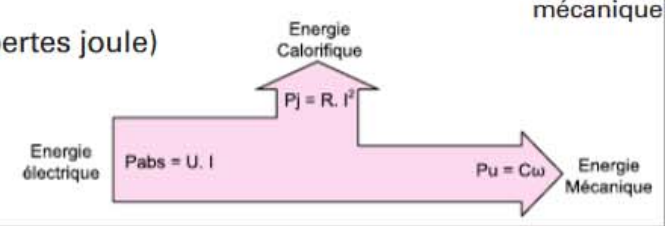
Exemple :
Un moteur électrique transforme une partie de l'énergie électrique en énergie mécanique.



- La puissance absorbée = U I
- La puissance Utile (Pu) = puissance mécanique
- La puissance perdue, est perdue en chaleur = Pj (pertes joule)

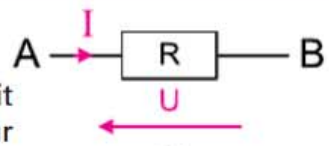
P absorbée = Pertes joule + P Utile

$$\eta = \frac{PMécanique}{Pabsorbée} = \frac{Pabsorbée - PertesJoule}{Pabsorbée}$$

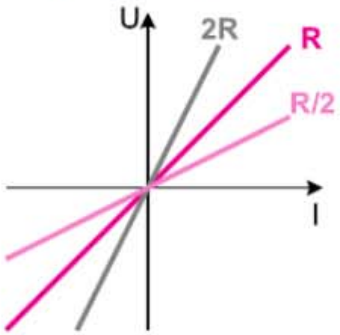


• Différence de potentiel aux bornes d'une résistance

• Loi d'Ohm



Une résistance électrique est comparable à un étranglement du circuit électrique fermé. Le courant d'électrons perd une certaine énergie pour vaincre l'obstacle qu'il rencontre en B. On constate en B une accumulation d'électrons. Le potentiel en B est plus faible qu'en A.
Il existe entre A et B une différence de potentiel U.



Si on relève, pour différentes valeurs de I, les valeurs correspondantes de U, on s'aperçoit que U et I sont directement proportionnels.
On note **R le coefficient de proportionnalité liant U à I**

$$R_{(\Omega)} = \frac{U_{(V)}}{I_{(A)}} \qquad U = RI \qquad I = \frac{U}{R}$$

L'Ohm (Ω) est la résistance électrique d'un conducteur qui est le siège d'une différence de potentiel de 1 V lorsqu'il est traversé par un courant de 1 A

• Résistivité

La **résistance** électrique d'un conducteur homogène est directement **proportionnelle à sa longueur**, **inversement proportionnelle à sa section**, et dépend de sa **nature** :

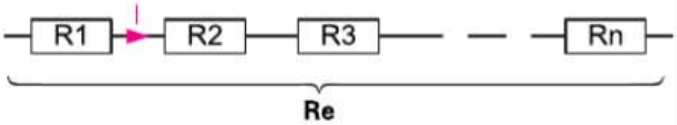
$$R_{(\Omega)} = \rho_{(\Omega m)} \frac{l_{(m)}}{s_{(m^2)}}$$

ρ est un coefficient dépendant de la nature du corps ; il est appelé résistivité.

Conducteurs		Isolants		Rigidité
Argent	ρ = 1.46 10^{-8} Ω.m	Air	ρ = infini	3 MV/m
Cuivre	ρ = 1.7 10^{-8} Ω.m	Verre	ρ = 9 10^{18} Ω.m	10 MV/m
Or	ρ = 2.44 10^{-8} Ω.m	Mica	ρ = 10^{17} Ω.m	70 MV/m
Aluminium	ρ = 2.5 à 4.510^{-8} Ω.m	Porcelaine	ρ = 10^{16} Ω.m	6 MV/m
Tungstène	ρ = 5.6 10^{-8} Ω.m	Silicone	ρ = 10^{16} Ω.m	40 MV/m
Mercure	ρ = 95 10^{-8} Ω.m	Téflon	ρ = 10^{16} Ω.m	10 MV/m
Fer	ρ = 10^{-7} Ω.m	Huile	ρ = 10^{14} Ω.m	10 MV/m
Carbone	ρ = 20 à 80 10^{-6} Ω.m	Papier sec	ρ = 5 10^{13} Ω.m	5 MV/m

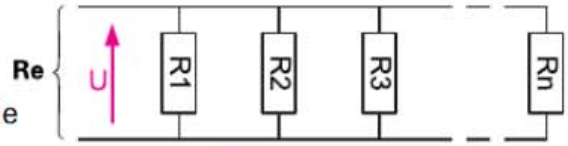
• Groupement de résistances

Groupement en série :
Lorsque plusieurs résistances sont montées en série, la somme des résistances donne la valeur équivalente Re.



$$Re = R1+R2+R3+...+Rn$$

Groupement en parallèle :
Lorsque plusieurs résistances sont montées en parallèle, la somme de l'inverse des résistances, donne la valeur de l'inverse de la résistance équivalente Re



$$\frac{1}{Re} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + ... + \frac{1}{Rn}$$

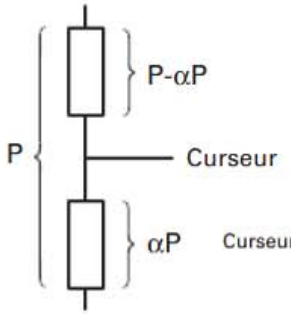
Cas de deux résistances

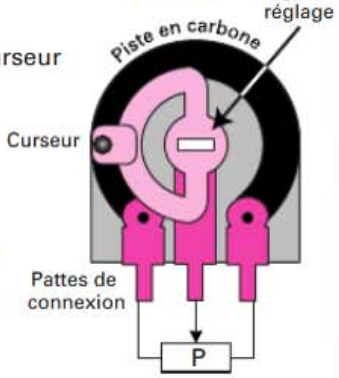
$$Re = \frac{R1.R2}{R1+R2}$$

• Le potentiomètre

Le potentiomètre est une résistance fixe sur laquelle glisse un curseur. De cette façon l'utilisateur a la possibilité d'agir sur un système en tournant la tige du potentiomètre.
Exemples : réglage du volume d'un équipement audio, etc.

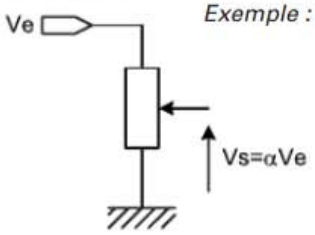
Le potentiomètre peut se modéliser sous cette forme :
α représente la rotation du curseur $0 < \alpha < 1$
Elle peut être monotour (300°) ou multitour.
On remarque que $(P-\alpha P) + (\alpha P) = P$
Les valeurs de P sont prises dans la série E3 à E12.
La puissance dissipée est faible (0,1 W à 0,25 W).





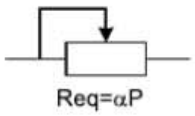
Montage en diviseur potentiométrique

Exemple : réglage de volume
0 < Vs < Ve



Montage en résistance variable

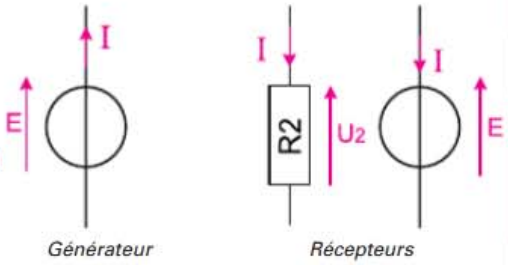
Exemple : réglage d'un paramètre
0 < Req < P



• Convention Générateurs récepteurs

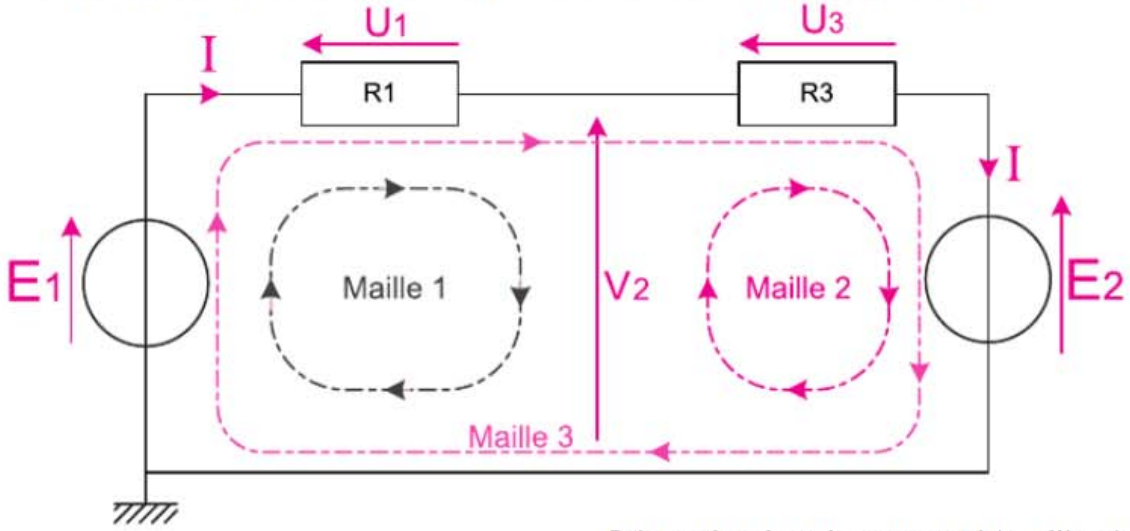
Le générateur
La flèche courant est dans le **même sens que la flèche tension**

Le récepteur
La flèche courant est dans le **sens opposé à la flèche tension**



• Règle de la loi des mailles

1. Flécher correctement les tensions et courants.
2. Choisir un sens de parcours arbitraire pour une maille.
3. Parcourir la maille dans le sens choisi et écrire que la somme algébrique des tensions est nulle en respectant la convention suivante :
   Si la **flèche tension** est rencontrée **par la pointe**, la tension est **négative**.
   Si la **flèche tension** est rencontrée **par le talon**, la tension est **positive**.



Maille 1 : $E1 - R1I - V2 = 0$
Maille 2 : $V2 - R3I - E2 = 0$
Maille 3 : $E1 - R1I - R3I - E2 = 0$

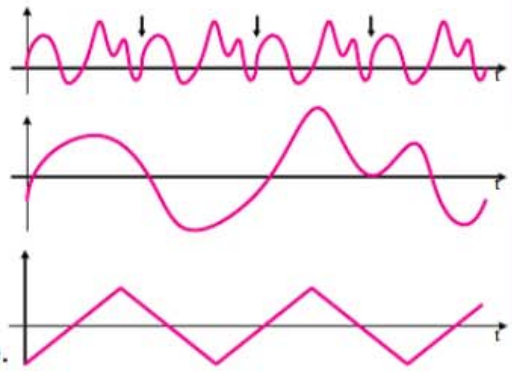
Détermination du courant I (maille 3)

$$E1 - E2 - I(R1 + R3) = 0$$

$$I = \frac{E1 - E2}{R1 + R3}$$

6.1.4. TENSIONS ET COURANTS VARIABLES

• Définitions



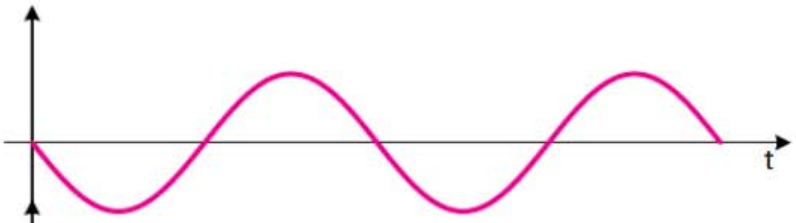
Courant périodique
Son intensité reprend la même valeur à intervalles égaux de temps.

Courant bidirectionnel
Il ne circule pas toujours dans le même sens, son intensité est soit positive, soit négative.

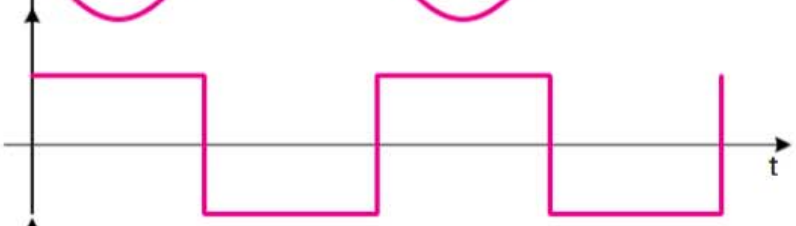
Courant alternatif
C'est un courant périodique dont la valeur moyenne est nulle.

• Différentes formes de tensions et courant variables

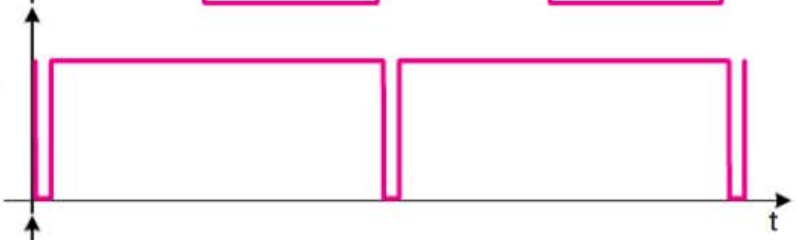
Signal sinusoïdal



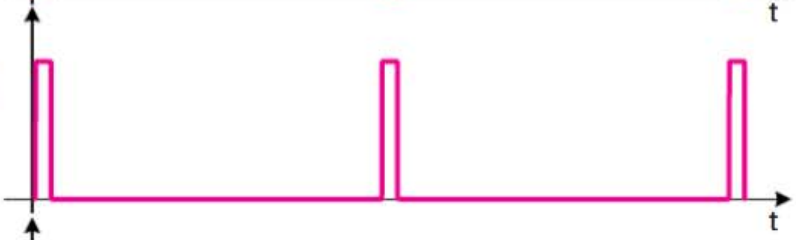
Signal rectangulaire
Egalement appelé à tort signal carré. Les lignes verticales sont quasi invisibles à l'oscilloscope.



Impulsion négative
C'est un signal rectangulaire avec un rapport cyclique proche de 1. Le passage à l'état bas un court instant lui donne le nom d'impulsion négative.

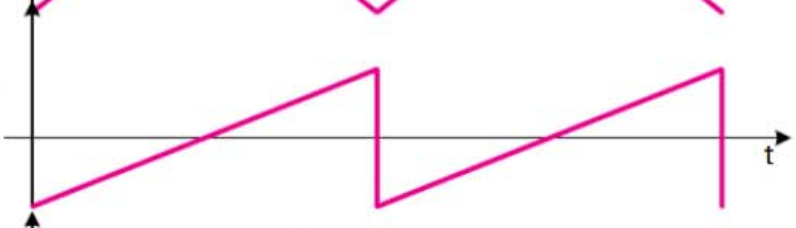


Impulsion positive
C'est un signal rectangulaire avec un rapport cyclique proche de 0. Le passage à l'état haut un court instant lui donne le nom d'impulsion positive.



Signal triangulaire
Il est composé de deux segments de droite. Seul le signe du coefficient directeur change périodiquement.

Signal en dent de scie
Il est composé de deux segments de droite dont le signe et le coefficient directeur sont différents.



Signal quelconque,
bruit, musique, etc.

Tensions et courants variables

• Écriture d'une grandeur électrique

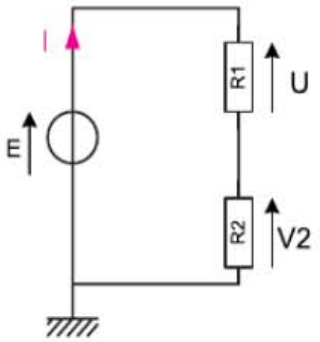
D'une façon générale :

E représente la force électromotrice d'un générateur
V représente une tension simple (par rapport à la masse)
U représente une tension composée (entre deux points)

Une **grandeur continue s'écrit en MAJUSCULE**

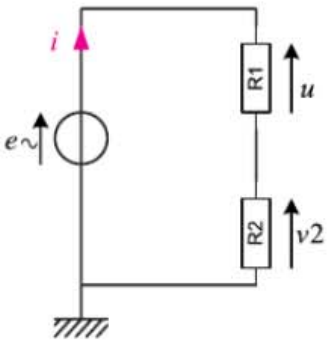
Une **grandeur alternative s'écrit en minuscule**

Les règles d'électricité s'appliquent pour le courant continu et alternatif.



$$E - U - V2 = 0$$

$$I = \frac{E}{R1 + R2}$$

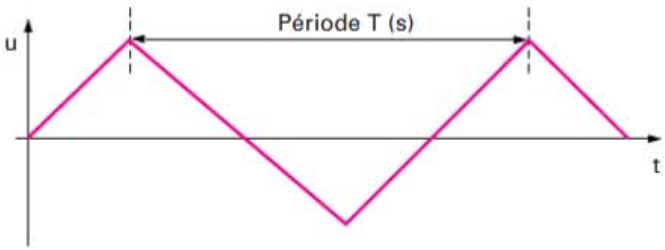


$$e - u - v2 = 0$$

$$i = \frac{e}{R1 + R2}$$

• La période

La période d'un signal électrique est le temps T nécessaire pour que le signal reprenne la même valeur avec le même sens de variation.



• La fréquence

La **fréquence** f est le nombre de périodes par seconde.

$$f_{(Hz)} = \frac{1}{T_{(s)}}$$

• La pulsation

ω **est la pulsation** de la force électromotrice, elle s'exprime en radians par seconde ($rd.s^{-1}$).

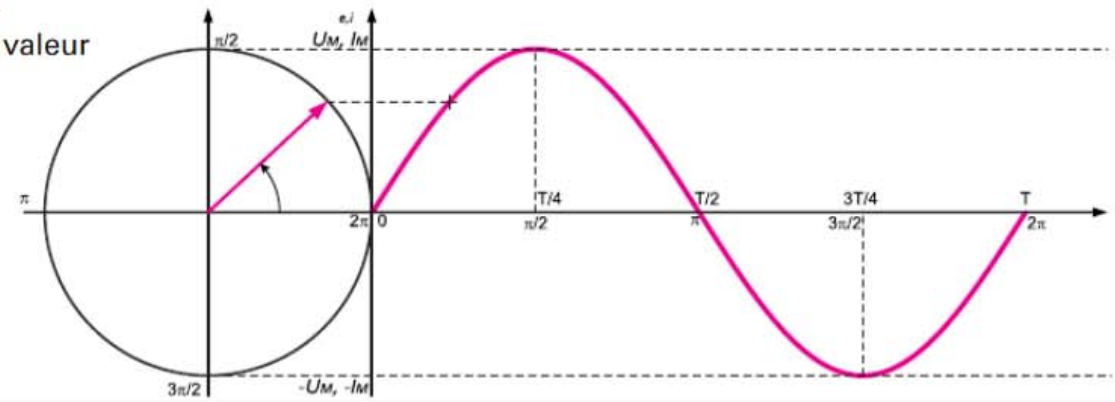
$$\omega_{(rd.s^{-1})} = \frac{2\pi}{T_{(s)}} = 2.\pi.f_{(Hz)}$$

• Le signal sinusoïdal

Un signal alternatif sinusoïdal est de la forme :
U_M, I_M = amplitude (constante)
ω = pulsation (constante $\omega = 2\pi f$)
sin = fonction mathématique
t = variable temps
e,i = amplitude ou valeur instantanée.

$$e = U_M \sin \omega t$$

$$i = I_M \sin \omega t$$

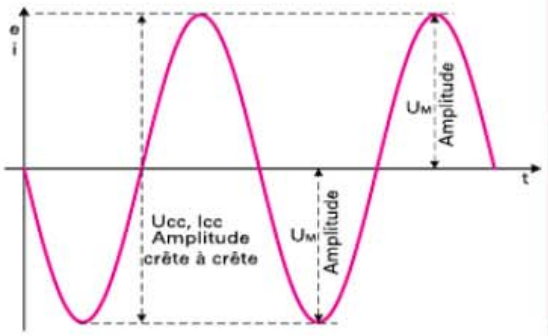


• Amplitude -Valeur instantanée

UM ou **IM** est l'**amplitude maximum** (ou valeur maximum). Valeur prise par rapport à l'axe de symétrie horizontale.

À un instant donné t, ***e ou i*** **est la valeur instantanée** ou amplitude instantanée.

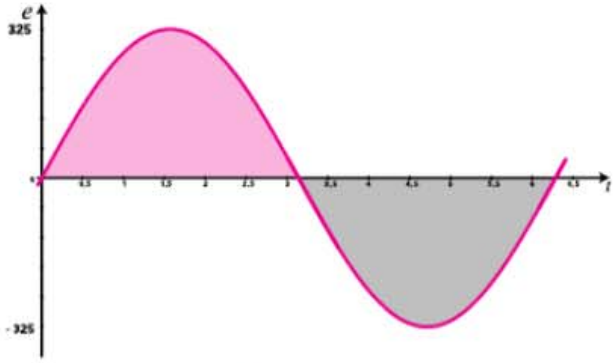
On appelle **valeur crête à crête Ucc** la quantité **2UM**, **Icc** la quantité **2 IM**



• Valeur moyenne, tension de décalage

La valeur moyenne d'une fem périodique est la moyenne des valeurs instantanées de cette fem sur une période.

$$U_{moyen} = \frac{1}{T}\int_0^T (U_M \sin \omega t)\,dt$$



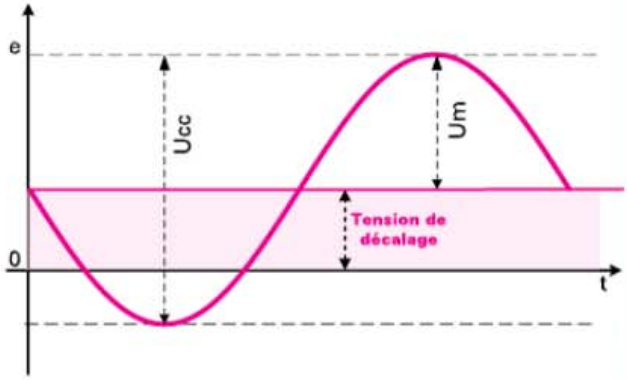
Exemple : tension secteur UM = 325 V 50 Hz

$$U_{moyen} = 50\int_0^{20.10^{-3}} \left(325\sin\left(2\pi 50t\right)\right)\,dt = 0$$

Remarque : par définition un **signal alternatif a sa valeur moyenne nulle.**

Tension de décalage

Lorsque le **signal est symétrique, la valeur moyenne est égale à la tension de décalage.**
Sur un générateur de fonctions, on ne règle pas la valeur moyenne, mais la tension de décalage. Elle représente une tension continue (positive ou négative) additionnée au signal variable.



• Valeur efficace RMS (Root Mean Square) (Racine moyenne carré)

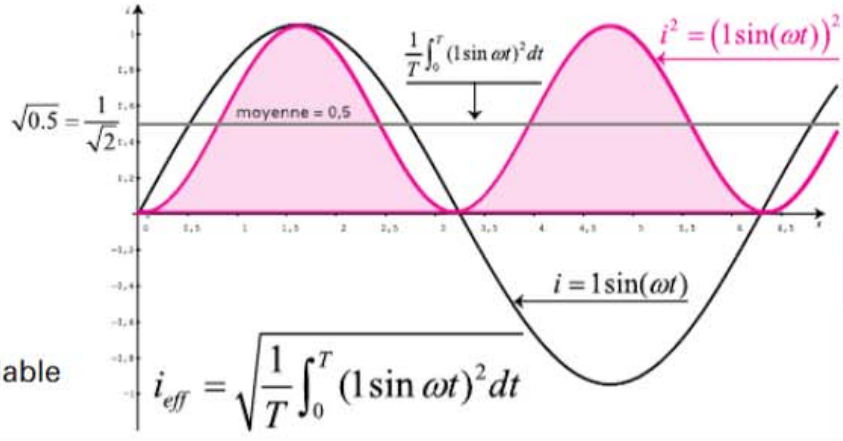
On appelle **valeur efficace** d'une fem alternative une quantité égale à la fem d'un générateur continu qui ferait circuler dans un conducteur un courant dissipant en chaleur la même quantité d'énergie que le courant alternatif dans le même temps.

Exemple : courant IM=1 A : $i = I_M \sin(\omega t) \rightarrow$ *au carré* $\rightarrow$ *moyenne* $\rightarrow$ *racine carrée*

$$i = 1\sin(\omega t)$$

$$u_{eff} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \qquad i_{eff} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

$$Valeur\ efficace = \frac{Amplitude}{\sqrt{2}}$$



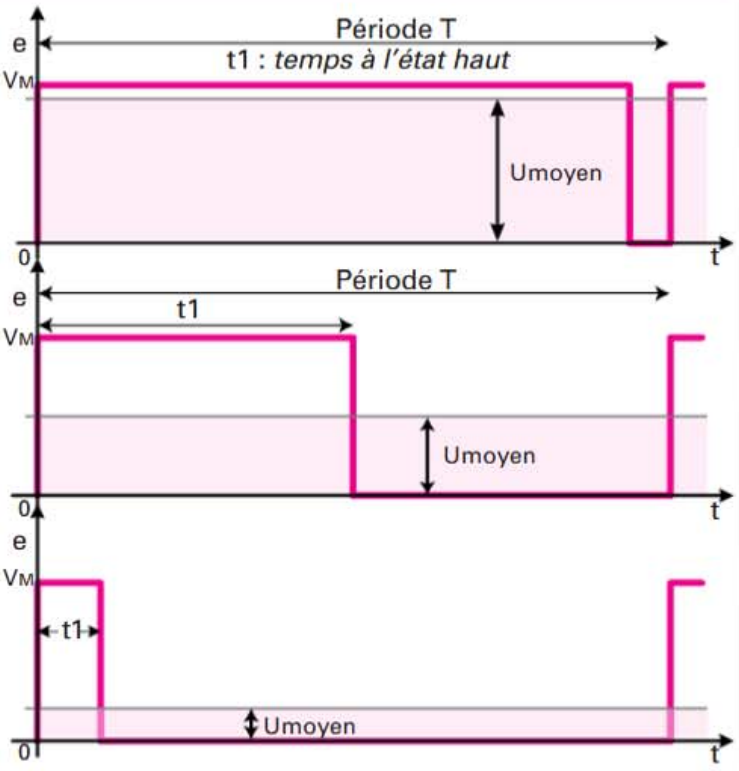
Remarque : Le coefficient $\sqrt{2}$ n'est valable que pour une forme sinusoïdale.

• Rapport cyclique

Le rapport cyclique Rc ou α est le rapport du temps à l'état haut sur la période.

$$Rc = \frac{temps\ à\ l'état\ haut}{Période\ T} = \frac{t1}{T}$$

Dans l'exemple ci-contre : $Umoyen = V_M.Rc$



Remarques :

- Le rapport cyclique n'est applicable que sur un signal rectangulaire.
- Dans ce cas la tension moyenne est différente de la tension de décalage.

• Valeurs moyennes et efficaces types

Signal sinusoïdal

$Umoyen = 0$ $\qquad Ueff = \frac{V\max}{\sqrt{2}}$

Demi-sinusoïde positive

$Umoyen = \frac{V\max}{\pi}$ $\qquad Ueff = \frac{V\max}{2}$

Double demi-sinusoïde positive

$Umoyen = \frac{2V\max}{\pi}$ $\qquad Ueff = \frac{V\max}{\sqrt{2}}$

Signal rectangulaire alternatif

$Umoyen = 0$ $\qquad Ueff = V\max$

Signal rectangulaire positif

$Umoyen = \frac{V\max}{2}$ $\qquad Ueff = \frac{V\max}{\sqrt{2}}$

Signal rectangulaire avec rapport cyclique

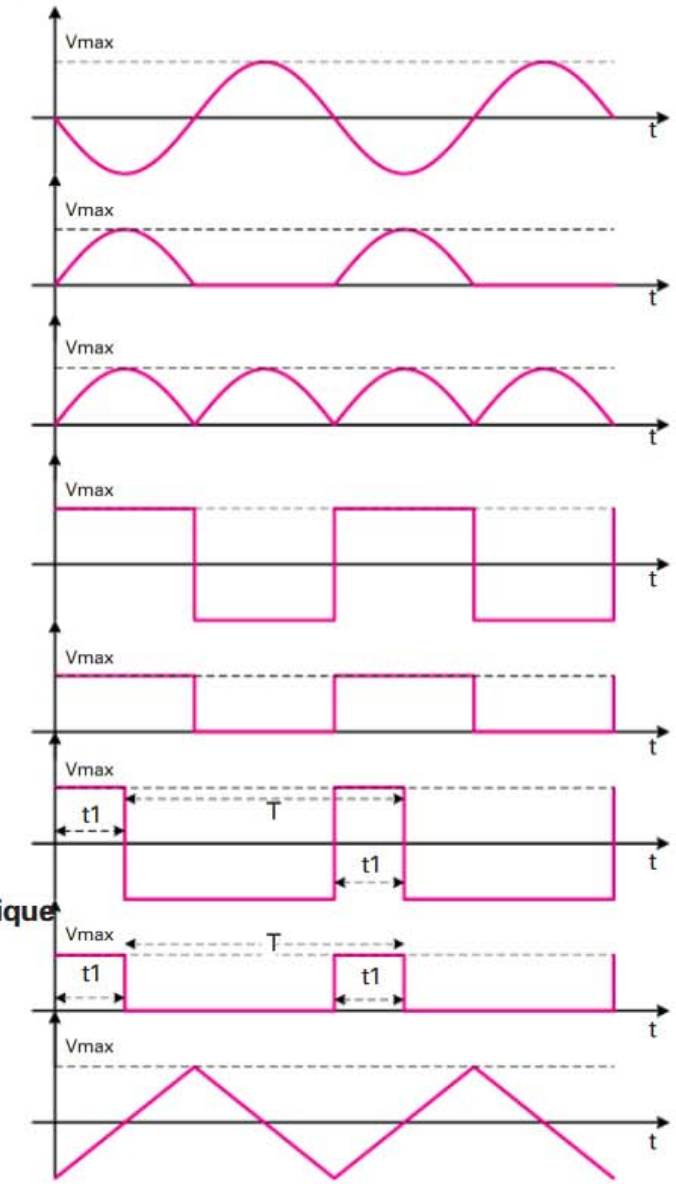
$Umoyen = V\max\frac{(2t1 - T)}{T}$ $\qquad Ueff = V\max$

Signal rectangulaire positif avec rapport cyclique

$Umoyen = V\max\frac{t1}{T}$ $\qquad Ueff = V\max\sqrt{\frac{t1}{T}}$

Signal triangulaire

$Umoyen = 0$ $\qquad Ueff = \frac{V\max}{\sqrt{3}}$



6.1.5. MÉTHODES DE CALCULS AVANCÉS

• Théorème de Millman

La tension au nœud est la moyenne des tensions aux bornes de tous les dipôles pondérée par les conductances respectives.

Conductance : Inverse de la résistance électrique d'un conducteur.

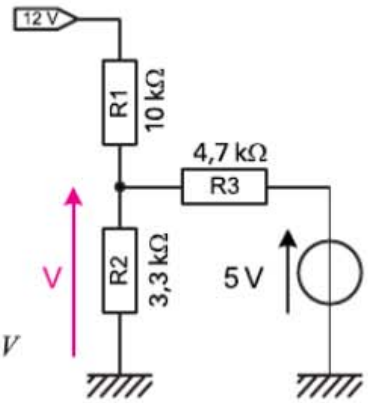
Pondéré : Affecté d'un coefficient de pondération.

$$V = \frac{\sum_{k=1}^{n} \frac{Vk}{Rk}}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{Rk}}$$

Exemple :

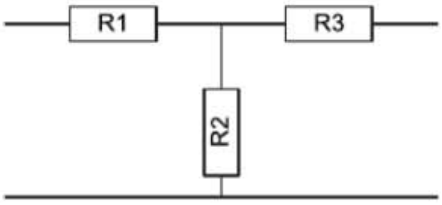
On cherche le potentiel V :
- Le générateur branché sur R1 vaut 12 V
- Le générateur branché sur R2 vaut 0 V
- Le générateur branché sur R3 vaut 5 V

$$V = \frac{\frac{12}{R1} + \frac{0}{R2} + \frac{5}{R3}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}} = 3,67\,V$$



• Le théorème de Kennelly

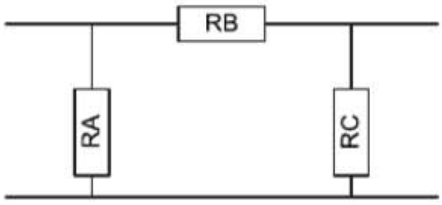
Le théorème de Kennelly, ou transformation triangle-étoile Δ-Y, ou transformation Y-Δ, est une technique qui permet de simplifier l'étude de certains réseaux électriques.



$$R1 = \frac{RARB}{RA + RB + RC}$$

$$R2 = \frac{RARC}{RA + RB + RC}$$

$$R3 = \frac{RBRC}{RA + RB + RC}$$



$$RA = \frac{R1R3 + R3R2 + R2R1}{R2}$$

$$RB = \frac{R1R3 + R3R2 + R2R1}{R1}$$

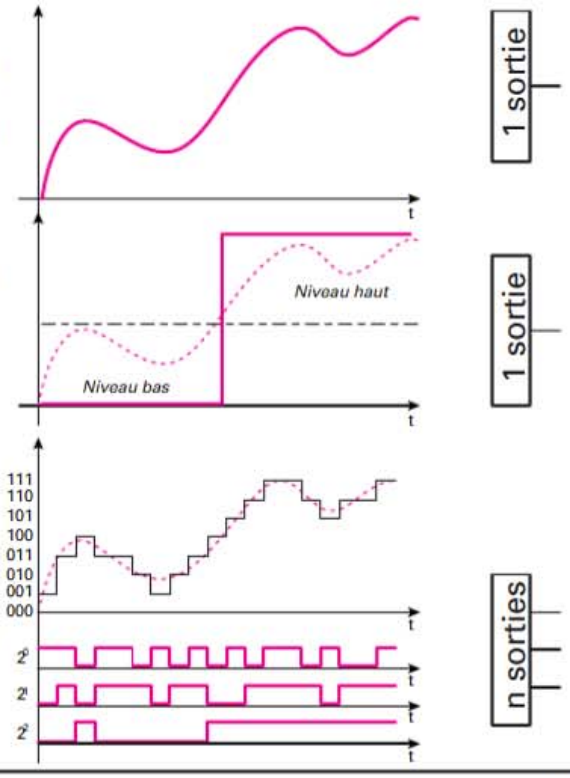
$$RC = \frac{R1R3 + R3R2 + R2R1}{R3}$$

• Identifier la nature et les caractéristiques des grandeurs en divers points de la chaîne d'information

Analogique
Signal véhiculé sur un conducteur et qui peut prendre une infinité de valeurs.
Exemple : tension aux bornes d'un condensateur, signal en sortie d'un amplificateur...

Logique
Signal véhiculé sur un conducteur et qui peut prendre seulement 2 valeurs 0 ou 1.
Exemple : la sortie d'un comparateur, d'un opérateur logique.

Numérique
Signaux véhiculés sur plusieurs conducteurs.
Il peut prendre au maximum $2^{n\ \text{conducteurs}}$ valeurs.
Chaque sortie individuelle a un caractère logique.
Exemple : CAN (convertisseur analogique numérique).
Sortie d'un codeur absolu ou incrémental, sortie d'un port d'un microcontrôleur.



6.1.6. PILES ET ACCUMULATEURS

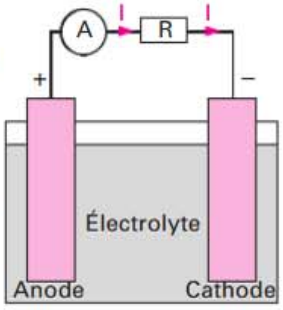
• Piles et accumulateurs

Symboles

Élément simple

Éléments en série

Principe et définition



Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en watt-heure (Wh), l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques.
Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte lorsqu'une résistance est branchée à ses bornes.

L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est **rechargeable** par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme batterie est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est défini par plusieurs paramètres :

Sa densité d'énergie massique (ou **volumique**), en watt-heure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) d'accumulateur.

Sa densité de puissance massique, en watt par kilogramme (W/kg), représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur.

Sa cyclabilité, exprimée en nombre de cycles (charge et décharge), caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge.

La tension d'un élément, fixée par le potentiel d'oxydo-réduction du couple utilisé, elle est de l'ordre de quelques volts pour un élément.

Auto-décharge (par mois), l'auto-décharge est la perte de capacité subie au cours d'une période de repos.

Technologie	Force électromotrice en V mini	nominale	Maxi	Densité massique en Wh/kg	Densité volumique en Wh/l	Puissance massique en W/kg	Durée de vie en cycles	Auto-décharge en %
Pile alcaline	0,8	1,5	1,6	80 à 160	300 à 500	400	1	0,3%
Plomb acide	1,8	2,0	2,12	30 à 50 [1]	75 à120	700	400 à 800	3% à 20% [2]
Nickel Cadmium [4]	1	1,2	1,4	45 à 80	80 à 150	175	1500 à 2000	20%
Nickel métal hydrure	1	1,2	1,4	60 à 110	220 à 330	900	800 à 1000	30%
Lithium ion	2.75	3.7	4,2	90 à 180	220 à 400	1500	500 à 1000	2 à 10% [3]
Lithium polymère	2,75	3,7	4,2	100 à 130	200 à 400	250	200 à 300	2 à 10% [3]

1 Par grand froid, la capacité peut être divisée par 2.
2 Dépend de la température, l'auto-décharge est plus importante à température élevée.
3 Dépend du circuit électronique de protection incorporé.
4 Interdit (toxique).
Pour comparaison, un kilogramme d'essence fournit approximativement 13 000 Wh

• La pile alcaline

Exemple de caractéristiques : Pile alcaline LR6

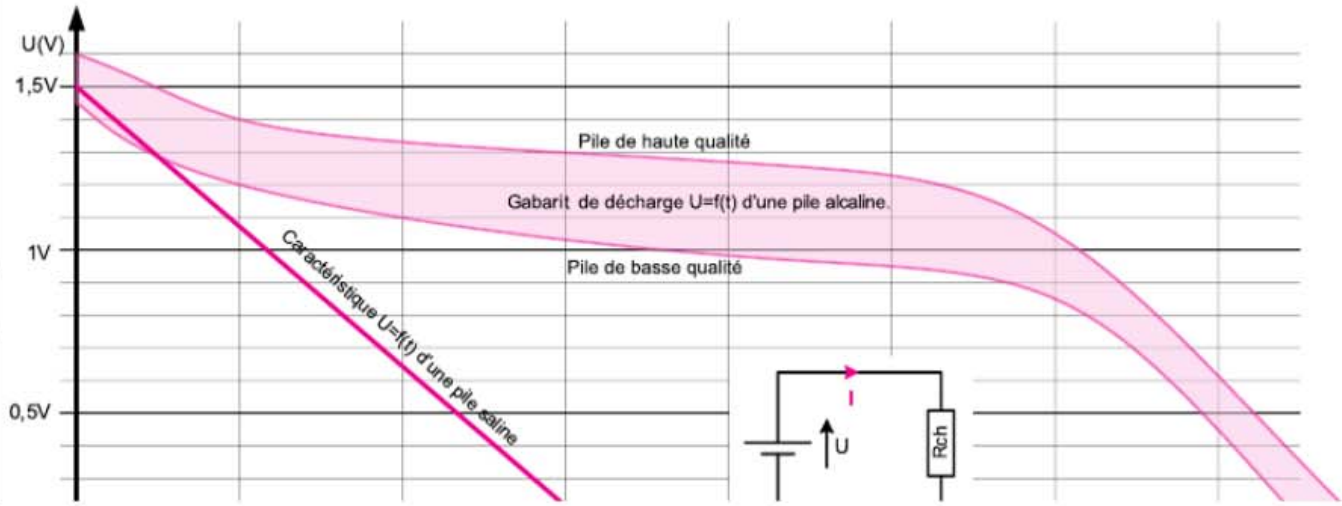
Document www.energize.com

- Tension nominale : 1,5 volt
- Résistance interne : 127 milliohms
- Température d'utilisation : –18 °C à 55 °C
- Capacité moyenne : 3 135 mAh (à 0,8 V) (avec un débit continu de 25 mA)
- Poids : 23,0 grammes
- Volume : 8,1 cm^3
- Durée de vie : 7 ans (80 % de la capacité)

Capacité d'une pile ou d'un accumulateur

La quantité d'électricité que l'on peut stocker dans une pile ou un accumulateur est exprimée en Ah ou mAh.
Une pile de 1000 mAh permet de fournir un courant constant de 1 ampère pendant une durée de 1 heure ou de 0,1, ampère pendant 10 heures.
La quantité d'électricité Q : **Q = i t**

Courbe de décharge d'une pile



Résistance interne

Une pile ou un accumulateur peut se modéliser sous la forme : générateur parfait **E** en série avec résistance interne **r**. **E** est appelé force électromotrice **fem**.
Cette résistance interne **r** est indissociable du générateur.

La tension en sortie du générateur est **U = E – rI**

Si la résistance interne **r** est très faible par rapport à la charge branchée sur le générateur, on pourra considérer la tension U = E et représenter ce générateur comme un générateur parfait, nommé E du nom de sa force électromotrice.

Le courant de court-circuit **Icc** est donc égal à **E/r**.

• La pile alcaline

Exemple de caractéristiques : Pile alcaline LR6

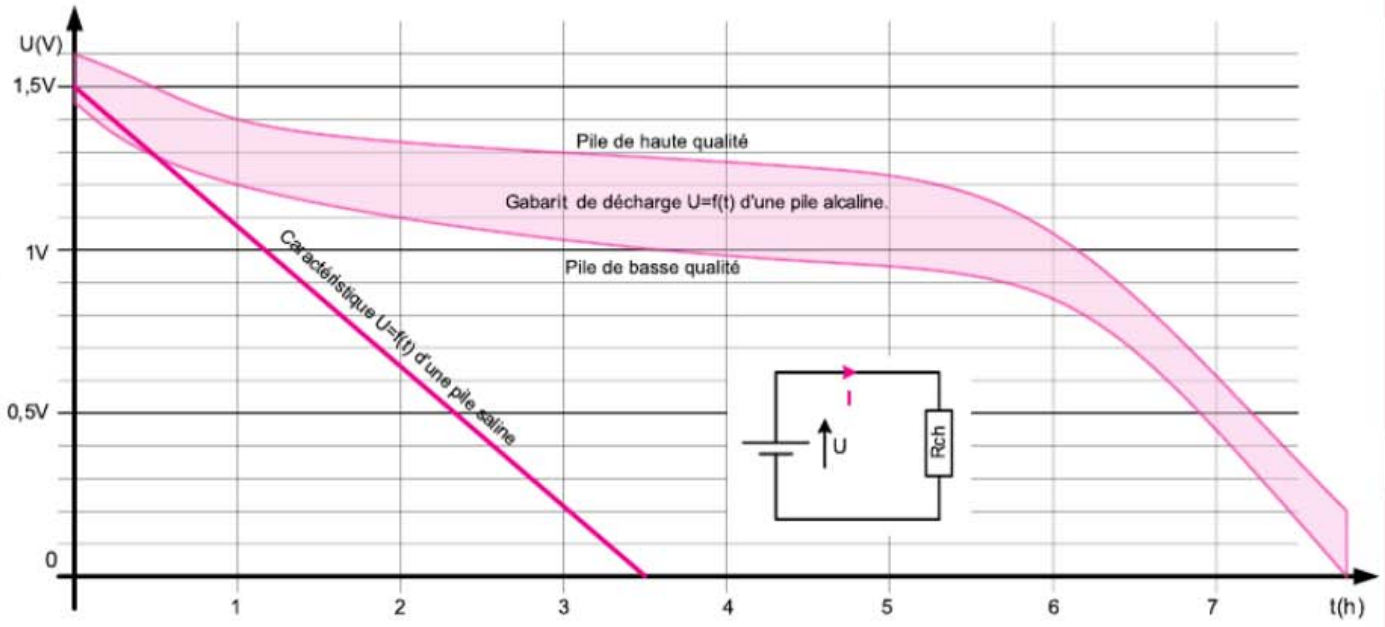
Document www.energize.com

- Tension nominale : 1,5 volt
- Résistance interne : 127 milliohms
- Température d'utilisation : –18 °C à 55 °C
- Capacité moyenne : 3 135 mAh (à 0,8 V) (avec un débit continu de 25 mA)
- Poids : 23,0 grammes
- Volume : 8,1 cm^3
- Durée de vie : 7 ans (80 % de la capacité)

Capacité d'une pile ou d'un accumulateur

La quantité d'électricité que l'on peut stocker dans une pile ou un accumulateur est exprimée en Ah ou mAh.
Une pile de 1000 mAh permet de fournir un courant constant de 1 ampère pendant une durée de 1 heure ou de 0,1, ampère pendant 10 heures.
La quantité d'électricité Q : **Q = i t**

Courbe de décharge d'une pile

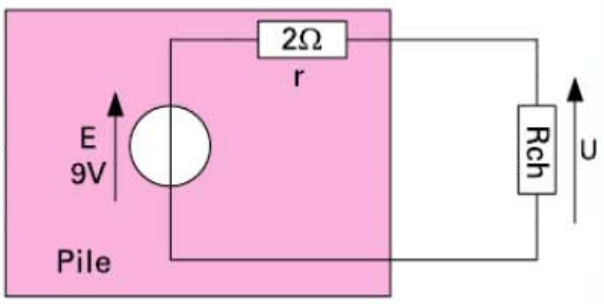


Résistance interne

Une pile ou un accumulateur peut se modéliser sous la forme : générateur parfait **E** en série avec résistance interne **r**. **E** est appelé force électromotrice **fem**.
Cette résistance interne **r** est indissociable du générateur.

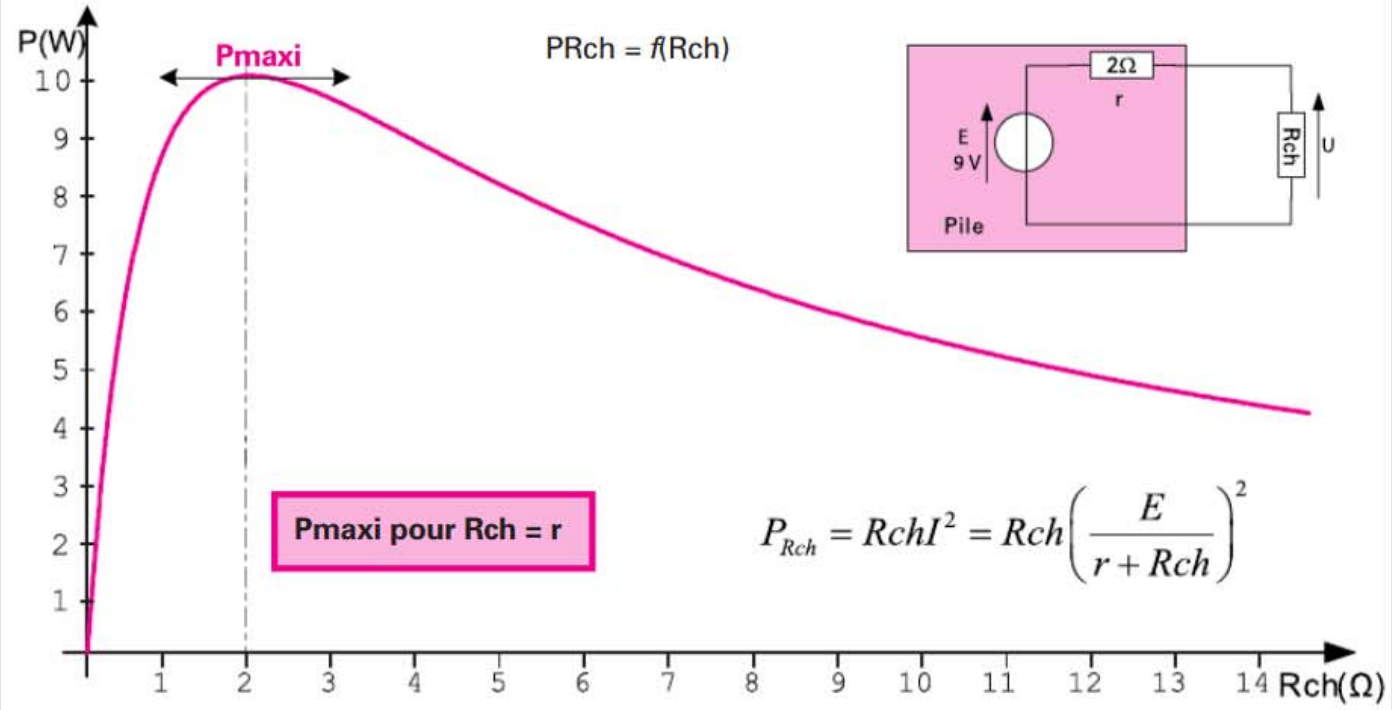
La tension en sortie du générateur est **U = E – rI**

Si la résistance interne **r** est très faible par rapport à la charge branchée sur le générateur, on pourra considérer la tension U = E et représenter ce générateur comme un générateur parfait, nommé E du nom de sa force électromotrice.



Le courant de court-circuit **Icc** est donc égal à **E/r**.

Courbe de puissance en fonction de la résistance interne



On constate que la puissance est maximum pour la résistance de charge égale à la résistance interne.

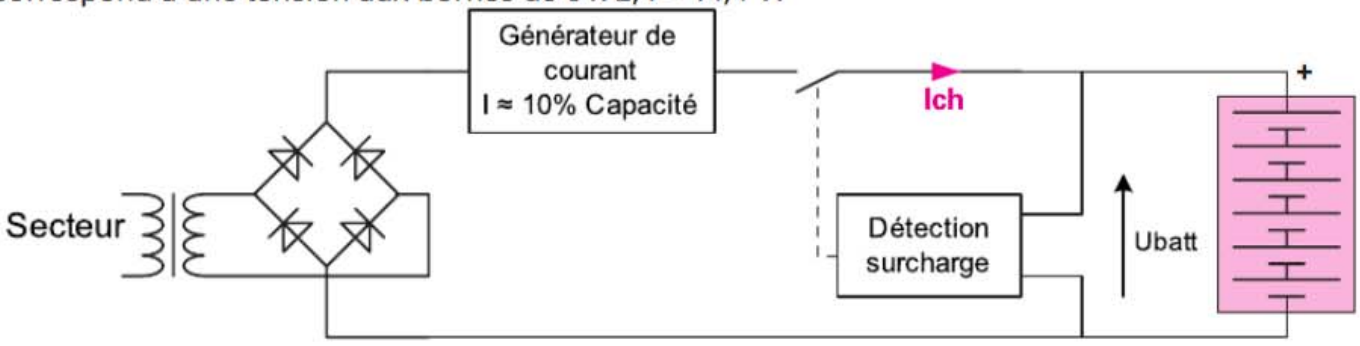
• Principe du chargeur d'accumulateur

Le chargeur le plus simple consiste en la connexion directe d'une source de courant continu à une batterie d'accumulateurs. Ce système implique une surveillance du temps de connexion sous peine de surcharge plus ou moins importante de l'accumulateur.
Le courant de charge peut être plus ou moins important selon le type d'accumulateur utilisé.
En général on trouve un courant de charge à 10 ou 20% de la capacité de l'accumulateur.

Exemple : une batterie au plomb de 60 Ah sera chargée en 14 h à 6 A ou 7 h à 12 A

On trouve de plus en plus des chargeurs de batterie «Intelligents»
Ce type de chargeur adapte le courant ainsi que le temps de charge en fonction de la capacité, de la tension, de la température de l'accumulateur à recharger.
Dans toutes les caractéristiques d'accumulateurs, on trouve une tension de surcharge. Celle-ci sert souvent de point de repère pour indiquer la fin de charge.

Exemple : une batterie au plomb de 12 V a une tension de surcharge de 2,4 V par élément, ce qui correspond à une tension aux bornes de 6 x 2,4 = 14,4 V.



• La batterie d'accumulateur plomb acide (Pb)

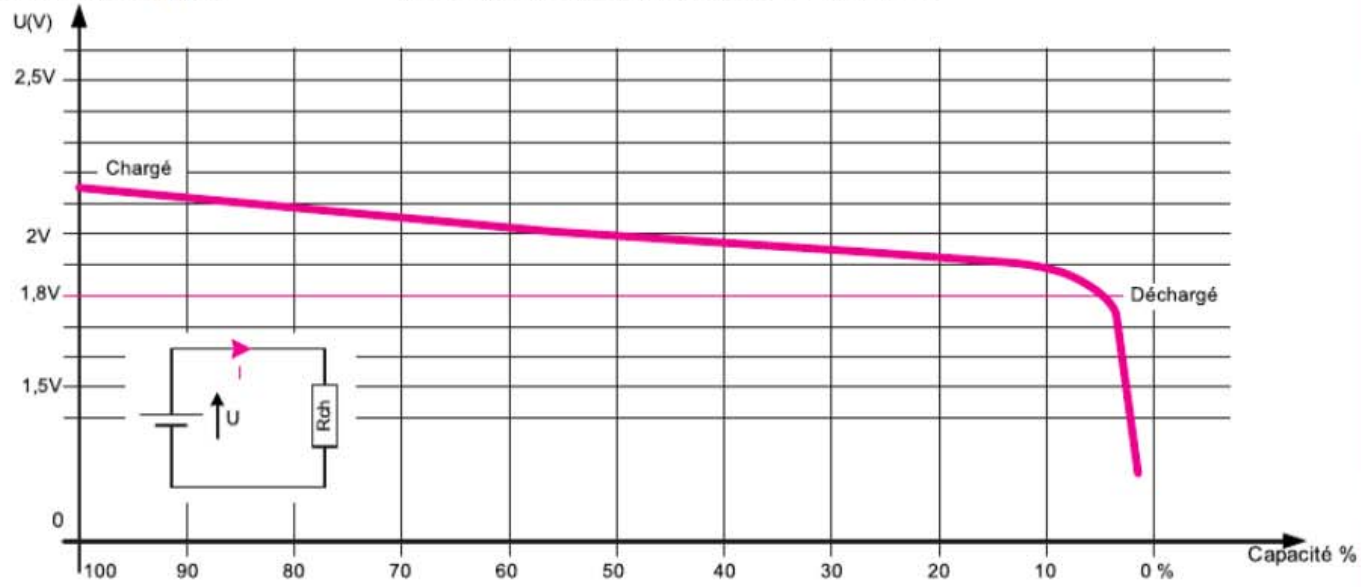
Dans sa forme primaire, elle est constituée d'une plaque de plomb (électrode négative), et d'une plaque de dioxyde de plomb (électrode positive) plongées dans une solution diluée d'acide sulfurique.

Les plus connues de ces batteries sont les SLI (Starting, Lightning, Ignition) utilisées dans les voitures conventionnelles. Elles sont conçues pour fournir un très fort courant au démarrage.

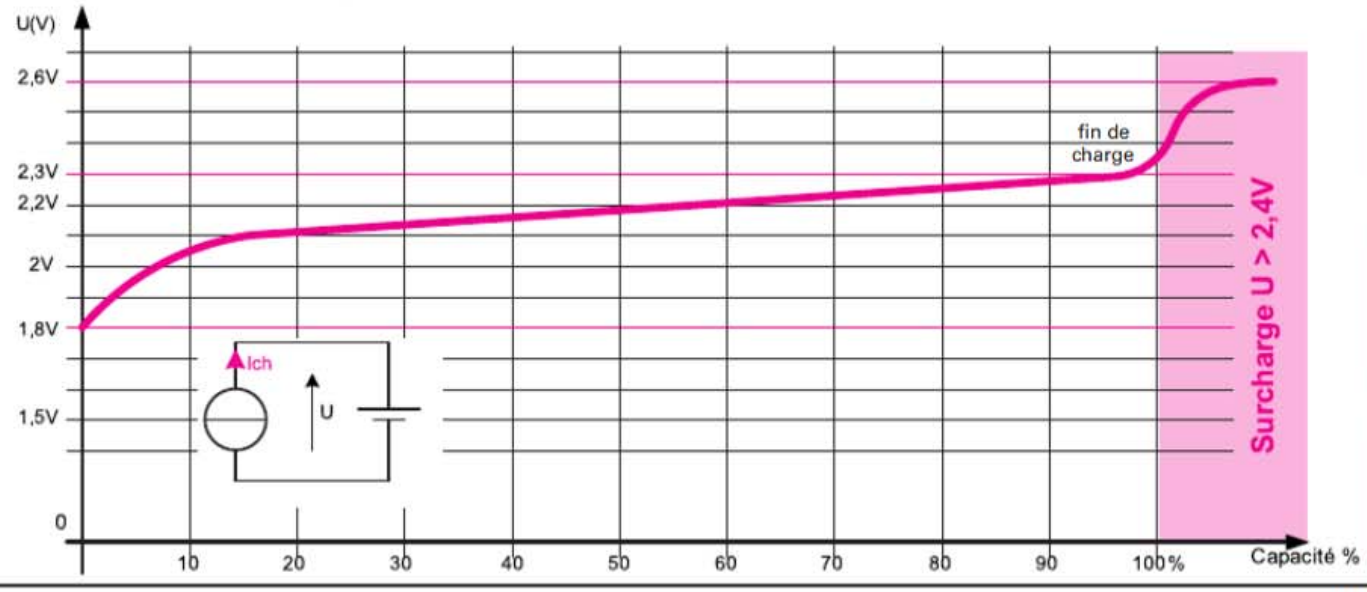
Caractéristiques générales :

- Force électromotrice d'un élément : 2 V
- Résistance interne : très faible de 0,01 Ω à 10^{-4} Ω.
- Rendement : il est de l'ordre de 60%.
- Recommandation : elle doit toujours être maintenue chargée.
- Durée de vie : environ 5 ans.

Caractéristiques Décharge à 10% de la capacité Plomb acide



Charge à courant constant d'un accumulateur plomb acide



• L'accumulateur nickel-cadmium (Ni-Cd) Nickel Métal Hydrure (Ni-Mh)

Un accumulateur nickel-cadmium ou Ni-Cd est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'oxyhydroxyde de nickel et du cadmium comme électrodes.
Les batteries Ni-Cd ne sont plus vendues dans l'Union européenne. Elles sont remplacées par les batteries Ni-Mh.

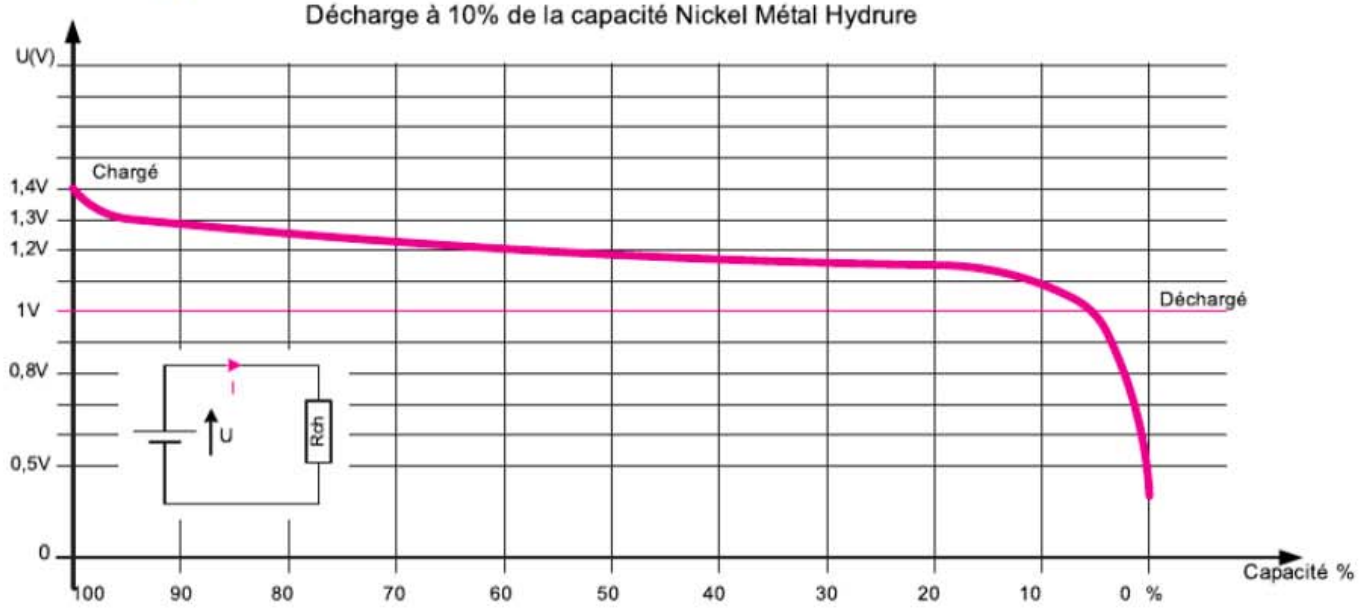
Accumulateur Nickel Metal Hydrure remplace le Ni-Cd. Son énergie massique est supérieure de 40% à celle des Ni-Cd et son effet mémoire est très faible.

Caractéristiques générales :

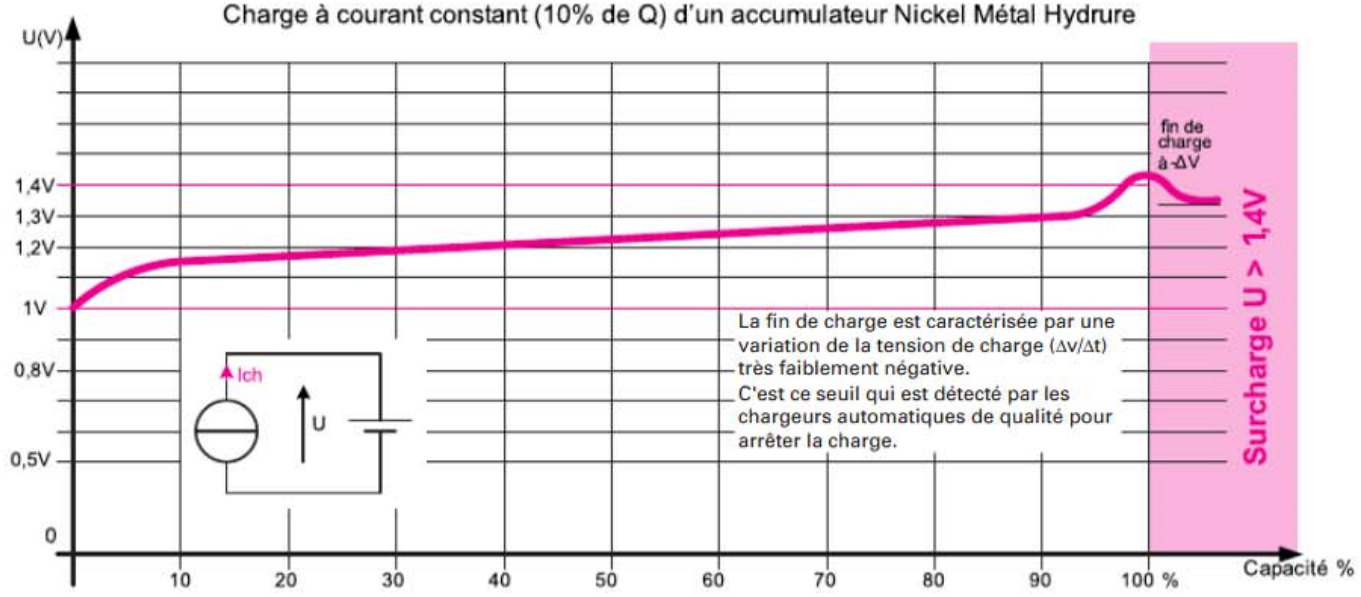
- Force électromotrice d'un élément : 1,2 V
- Résistance interne : très faible de 0,01 Ω à 10^{-4} Ω.
- Rendement : il est de l'ordre de 70%.
- Auto-décharge 20 à 30% par mois
- Durée de vie : environ 10 ans.

Caractéristiques

Décharge à 10% de la capacité Nickel Métal Hydrure



Charge à courant constant (10% de Q) d'un accumulateur Nickel Métal Hydrure



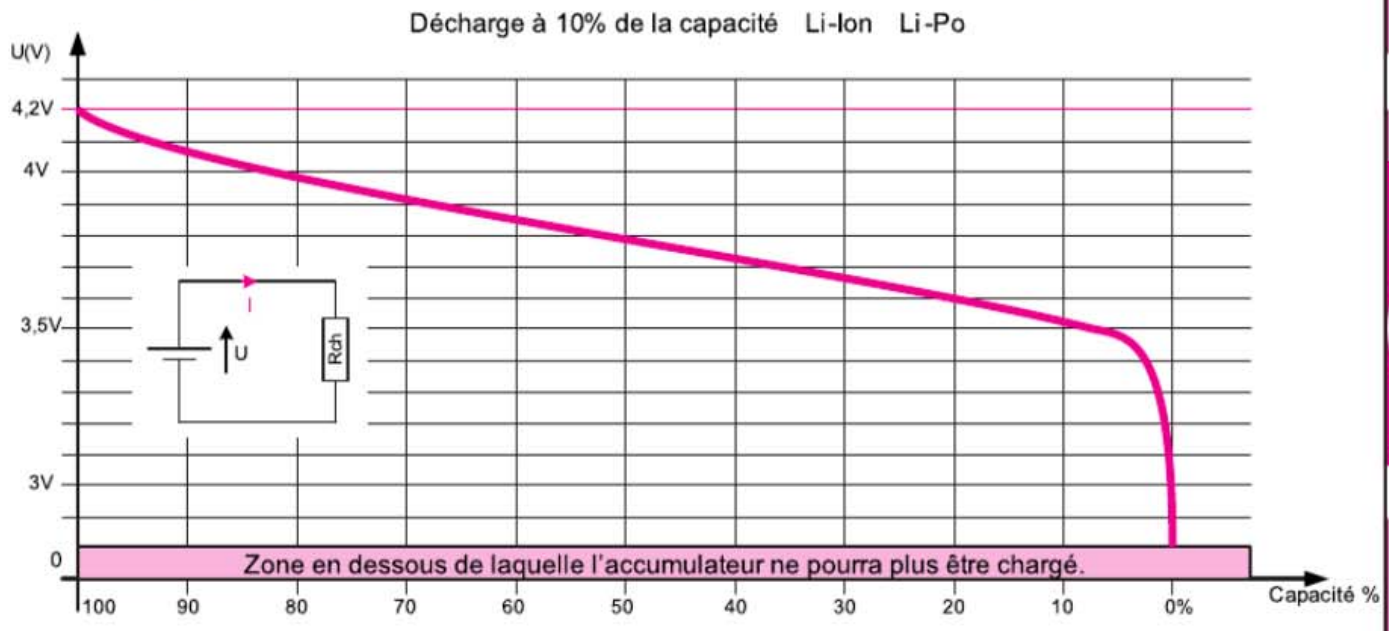
• L'accumulateur lithium ion (Li-ion) lithium polymère (Li-Po)

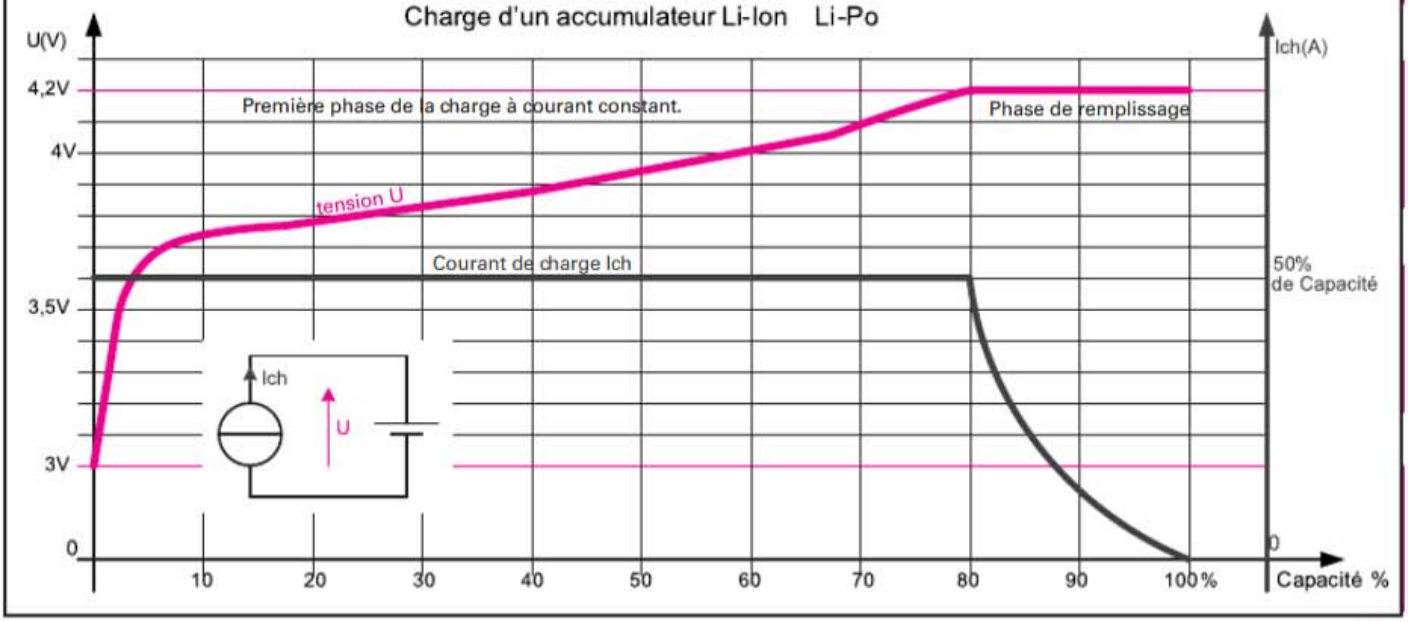
On distingue la technique lithium métal où l'électrode négative est composée de lithium métallique (matériau qui pose d'importants problèmes de sécurité), et la technique lithium ion, où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive. Les problèmes de sécurité demeurent (prise de feu) en cas de surcharge, de surdécharge ou de court-circuit. Les accumulateurs lithium-ion sont partiellement remplacés par les accumulateurs lithium polymère délivrant un peu moins d'énergie, mais beaucoup plus sûrs.

Caractéristiques générales :

- Force électromotrice d'un élément : 3,7 V
- Résistance interne : très faible de 100 mΩ à 300 mΩ.
- Rendement : il est de l'ordre de 70%.
- Auto-décharche 2% par mois (sans circuit de protection)
- Durée de vie : environ 3 ans.

Caractéristiques

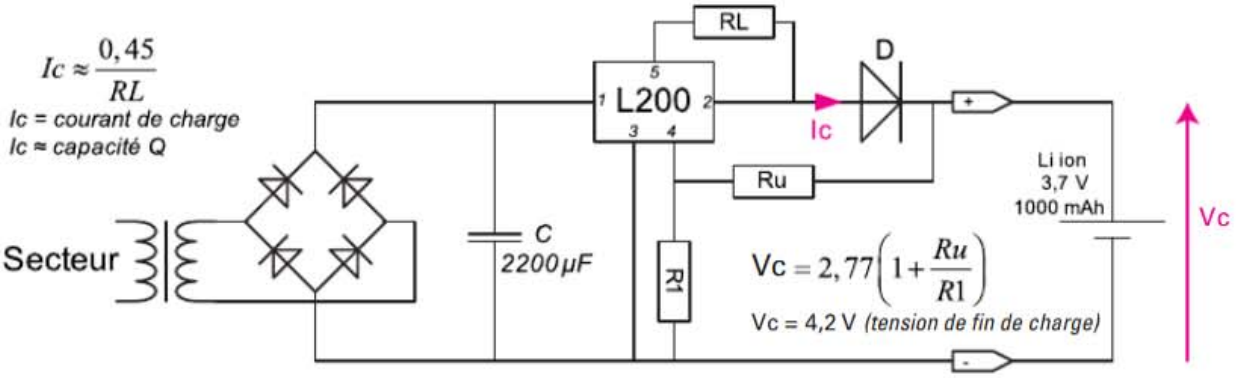




• Exemple de chargeur d'accumulateur Li-Ion

Le circuit intégré L200 permet de réaliser un chargeur d'accumulateur Li-ion simplement. Il est constitué un régulateur de tension allant de 2,77 V à 40 V ainsi qu'un limiteur de courant.

- Les résistances Ru, R1 permettent de fixer précisément la tension de sortie. Dans l'exemple cette valeur doit être réglée à la tension de fin de charge soit 4,2 V.
- RL permet de limiter le courant de charge, le maximum recommandé est une fois la capacité de l'accumulateur pour une charge rapide.
- La tension issue du transformateur doit être d'au moins 2 V supérieure à la tension de sortie.
- La diode D évite que l'accumulateur ne se décharge au travers du régulateur.

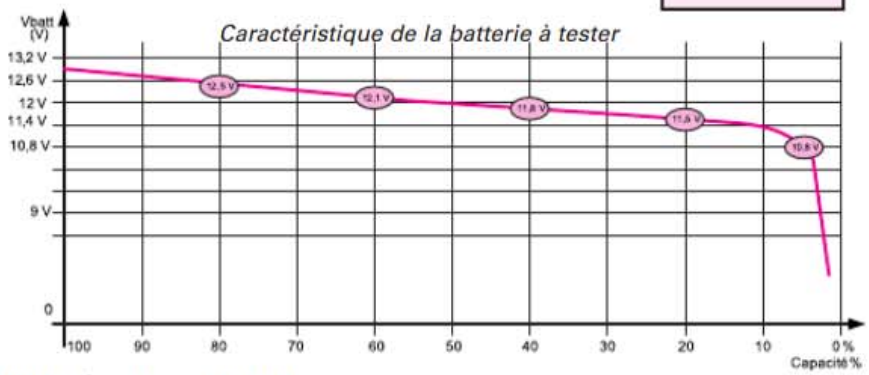


• Exemple d'un indicateur de charge d'une batterie 12 V plomb.

L'ensemble du circuit est alimenté en 5 V.
En fonction du nombre de DEL, il faut choisir les tensions batteries correspondant aux différents niveaux de charge. Ici 5 DEL = 5 niveaux de 10,8 à 12,5 V .
Le diviseur potentiométrique R1, R2, permet de ramener la caractéristique de la batterie dans le domaine d'alimentation des comparateurs (0 V 5 V).
La tension maximum de la batterie est de 13 V, cette tension doit correspondre à 5 V pour les comparateurs.

$D = \frac{R1}{R1+R2}$ On fixe $R2 = 10\ k\Omega$ $R1 = \frac{5}{13-5}R2$

R1 = 6,25 kΩ
R2 = 10 kΩ
D = 0,385



Rtb : résistance talon bas.
Rth : résistance talon haut.

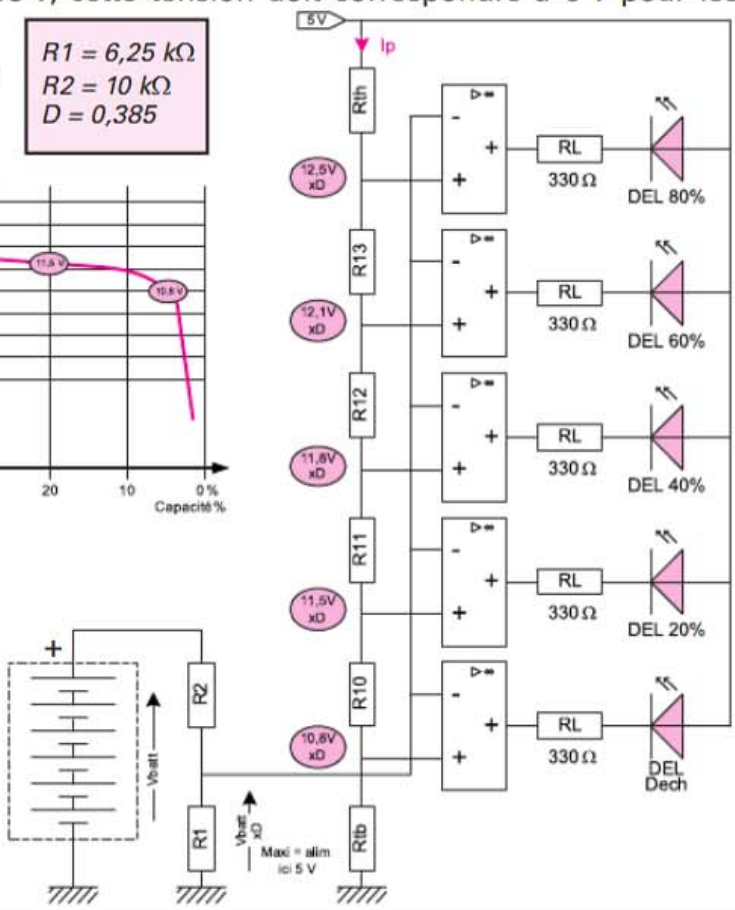
On fixe le courant Ip= 1 mA pour calculer les résistances :

$$Rtb = \frac{10,8 \times D}{Ip} = 4,15\ k\Omega$$

$$Rth = \frac{5 - 12,5 \times D}{Ip} = 192\ \Omega$$

$$R10 = \frac{(11,5 - 10,8) \times D}{Ip} = 269\ \Omega$$

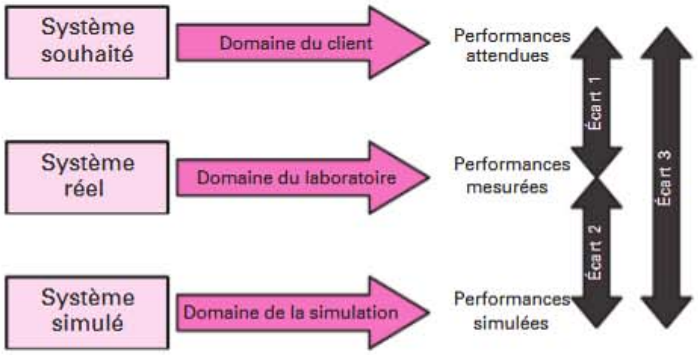
(Même principe pour R11 à R13)



6.1.7. CARACTÉRISER DES ÉCARTS

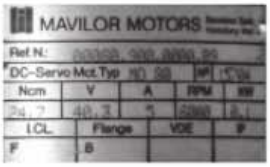
B.O. : L'enseignement des sciences de l'ingénieur a pour objectif d'aborder la démarche de l'ingénieur qui permet, en particulier :

- de vérifier les performances attendues d'un système, par l'évaluation de l'écart entre un cahier des charges et les réponses expérimentales : **écart 1** ;
- de proposer et de valider des modèles d'un système à partir d'essais, par l'évaluation de l'écart entre les performances mesurées et les performances simulées **écart 2** ;
- de prévoir les performances d'un système à partir de modélisations, par l'évaluation de l'écart entre les performances simulées et les performances attendues au cahier des charges, **écart 3**.



• Exemple : Servo moteur d'un bras manipulateur.

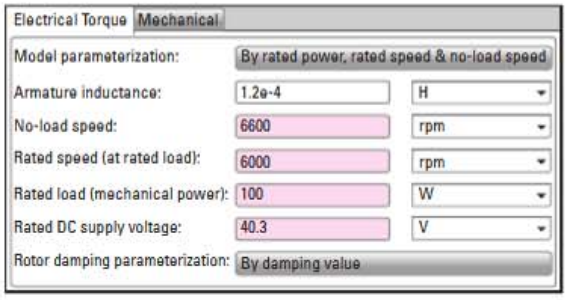
Système souhaité :
Pour un projet plus complexe, on désire modéliser un motoréducteur :



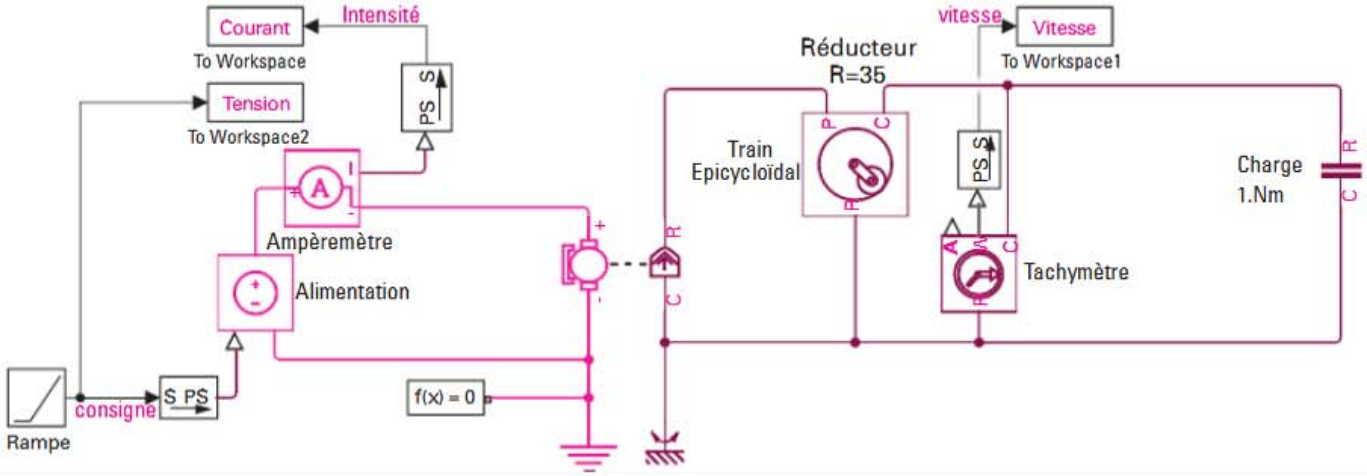
Cahier des charges :
Une variation linéaire de vitesse de 0 à 150 tr.min^{-1} pour une alimentation de 0 à 32 V.
Le couple à fournir est d'environ 1 N.m.
À partir de la plaque signalétique du moteur :

- Tension nominale : 40,3 V
- Courant nominal : 5 A
- Vitesse nominale : 6000 tr.min^{-1}
- Puissance nominale : 100 W

Réducteur à train épicycloïdal couplé au moteur R = 35

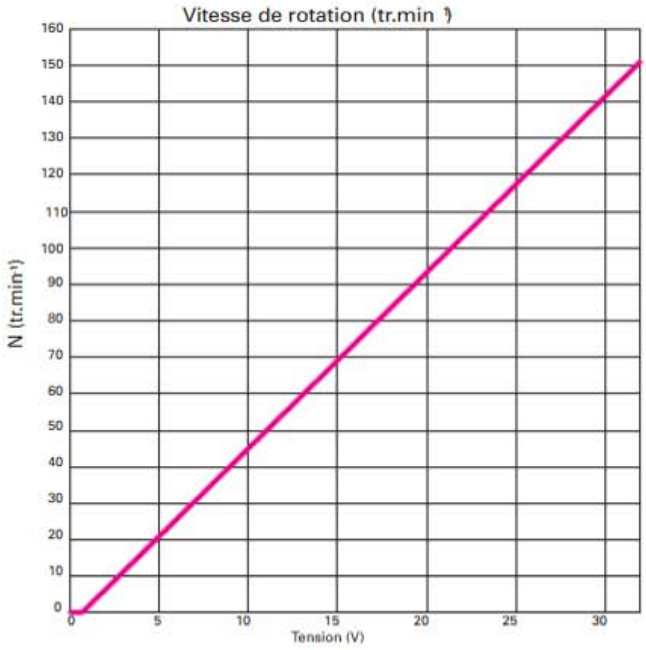


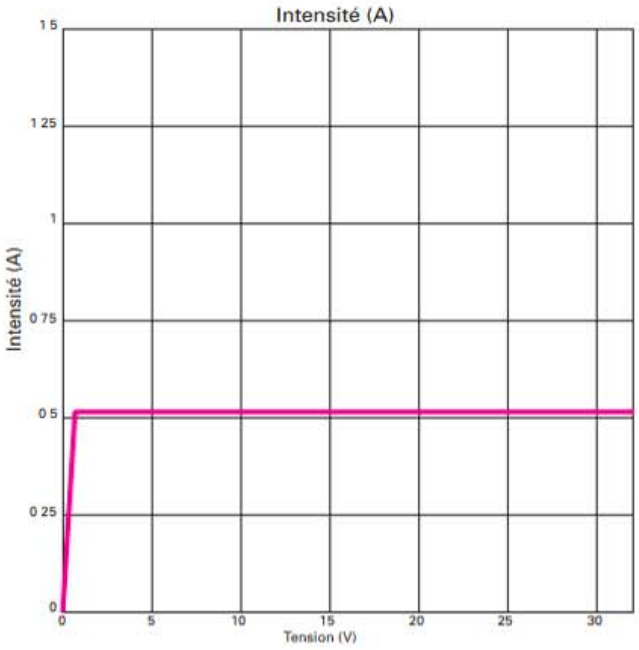
Système simulé :
Le modèle simulé reprend les éléments connus du moteur et du cahier des charges. La charge représente un couple résistant (friction) de 1 N.m.
Une rampe de 0 à 32 V est générée.
Les résultats de simulation sont enregistrés dans le «Workspace».
À partir du Workspace on pourra tracer les caractéristiques : Vitesse = f(Tension), Intensité=f(Tension)



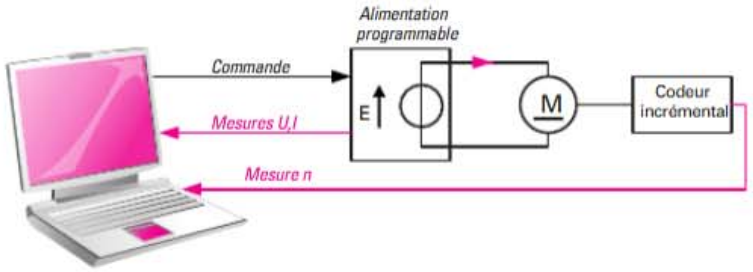
Caractériser des écarts

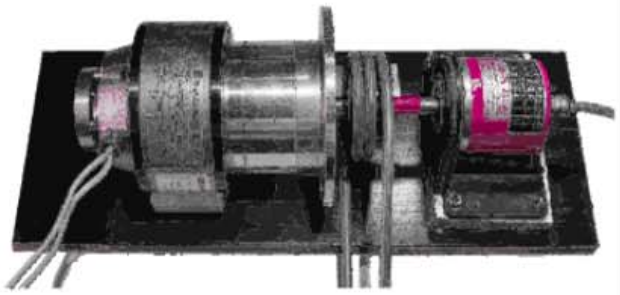
Système simulé : Les résultats de simulation montrent une linéarité de la vitesse par rapport à la tension. Il faut 0,7 V pour commencer à avoir une rotation. Le couple résistant constant de 1 Nm se traduit par une intensité constante du courant à 0,515 A.

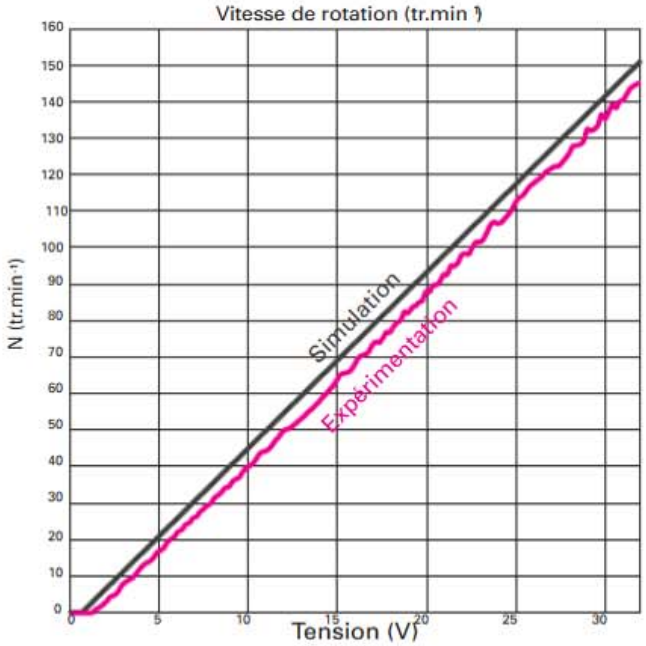


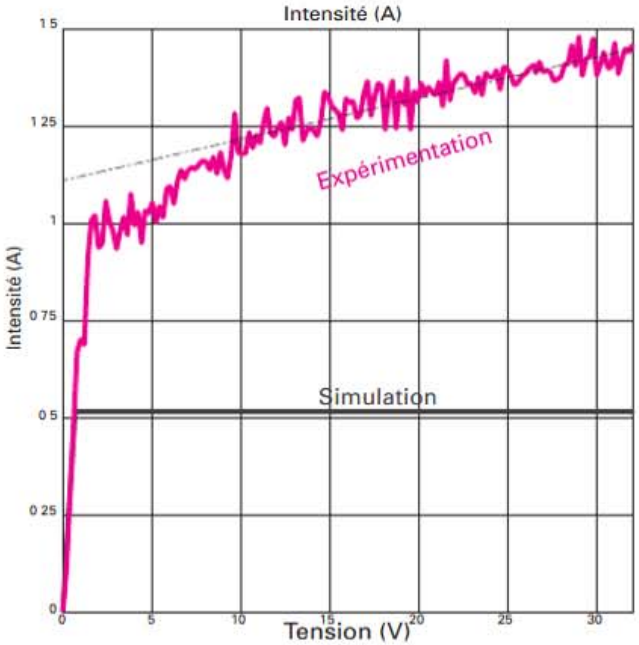


Système réel : À l'aide d'un script Matlab, on pilote une alimentation programmable. Ce script augmente la tension de 0,1 V toutes les 0,1 seconde. Après chaque augmentation, l'alimentation programmable renvoie les mesures de tension, courant et puissance. Un codeur incrémental fixé à la sortie du réducteur mesure la vitesse de rotation. Un système de courroie à friction oppose un couple résistant d'environ 1 N.m









Système souhaité → Domaine du client → Performances attendues

Une variation linéaire de vitesse de 0 à 150 tr.min^{-1} pour une alimentation de 0 à 32 V.
Le couple à fournir est d'environ 1 Nm

Il faut 1,2 V pour commencer à avoir une rotation qui sera linéaire après ce seuil.
La vitesse terminale est de 145 tr.min^{-1}.

Système réel → Domaine du laboratoire → Performances mesurées

Il faut 1,2 V pour commencer à avoir une rotation qui sera linéaire après ce seuil.
La vitesse terminale est de 145 tr.min^{-1}.
L'intensité du courant passe très rapidement à une valeur de 1 A pour suivre une variation qui semble devenir linéaire.

Il faut 0,7 V pour commencer à avoir une rotation qui sera linéaire après ce seuil.
La vitesse terminale est de 150 tr.min^{-1}.
L'intensité du courant passe très rapidement à une valeur de 0,515 A est reste constante.

Système simulé → Domaine de la simulation → Performances simulées

Il faut 0,7 V pour commencer à avoir une rotation qui sera linéaire après ce seuil.
La vitesse terminale est de 150 tr.min^{-1}.

Une variation linéaire de vitesse de 0 à 150 tr.min^{-1} pour une alimentation de 0 à 32 V.
Le couple à fournir est d'environ 1 Nm

Système souhaité → Domaine du client → Performances attendues

Écart 1

écart entre un cahier des charges et les réponses expérimentales.

Écart 1

Il existe une zone morte de 1,2 V où le moteur n'a pas assez d'énergie pour commencer à tourner. Cette zone représente 3,7 % de la zone linéaire. Cet écart est acceptable dans de nombreux cas.

La vitesse terminale est inférieure de 5 tr.min^{-1}, ce qui représente un écart de 3,3 %. Cet écart peut facilement être compensé par une tension d'alimentation légèrement supérieure à 32 V.

Écart 2

écart entre les performances mesurées et les performances simulées.

Écart 2

Il existe une zone morte de 1,2 V et 0,7 V où le moteur n'a pas assez d'énergie pour commencer à tourner, soit un écart de 0,5 V.

La vitesse terminale est inférieure de 5 tr.min^{-1}, ce qui représente un écart de 3,3 %.

La courbe de l'intensité du courant sur la simulation ne prend pas en compte l'ensemble des frottements du train épicycloïdal.
L'ensemble de ces frottements est comparable à un couple constant s'ajoutant à la charge et d'un couple variant avec la vitesse de rotation.

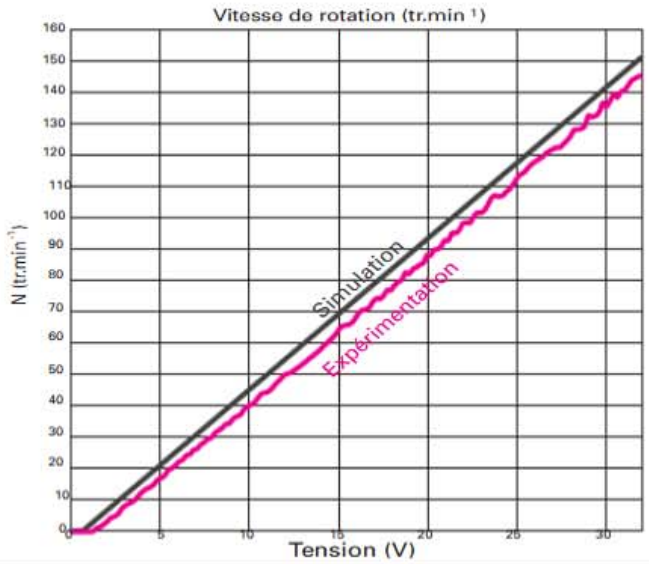
Écart 3

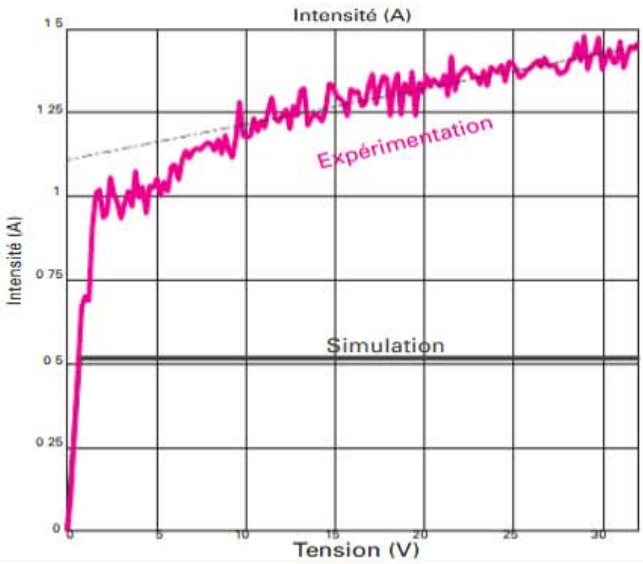
écart entre les performances simulées et les performances attendues au cahier des charges.

Écart 3

Il existe une zone morte de 0,7 V où le moteur n'a pas assez d'énergie pour commencer à tourner. Cette zone représente 2,18 % de la zone linéaire. Cet écart est acceptable dans de nombreux cas.

La vitesse terminale de simulation est identique au cahier des charges avec un couple résistant de 1 Nm.





Caractériser des écarts

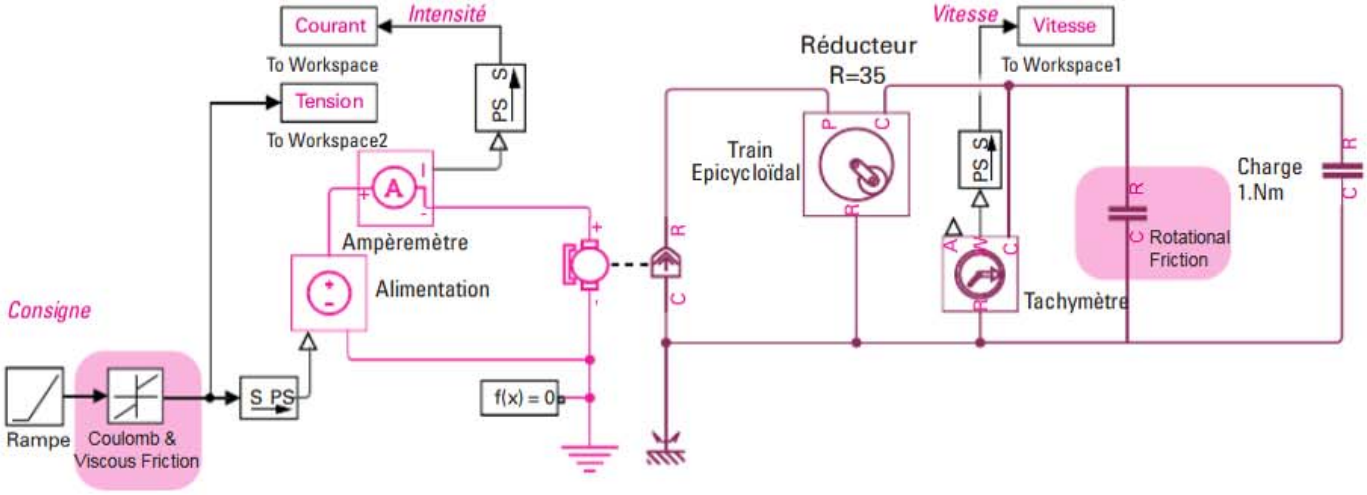
Exemple : Servo moteur d'un bras manipulateur (suite).

Validation du modèle

On veut que le modèle de simulation réponde au cahier des charges et **surtout qu'il soit le plus fidèle possible à la réalité.**

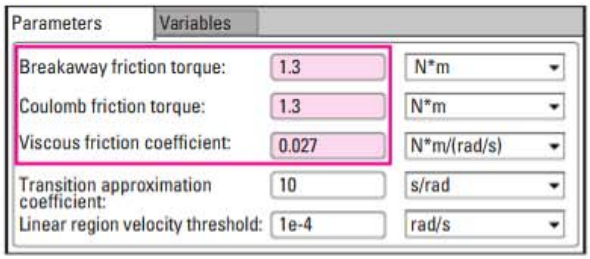
La caractérisation des écarts a montré un certain nombre de différences :

- Une vitesse de 3,3 % plus faible.
- Une zone morte de 1,2 V.
- La consommation du courant ne prend pas en compte les frottements du réducteur.

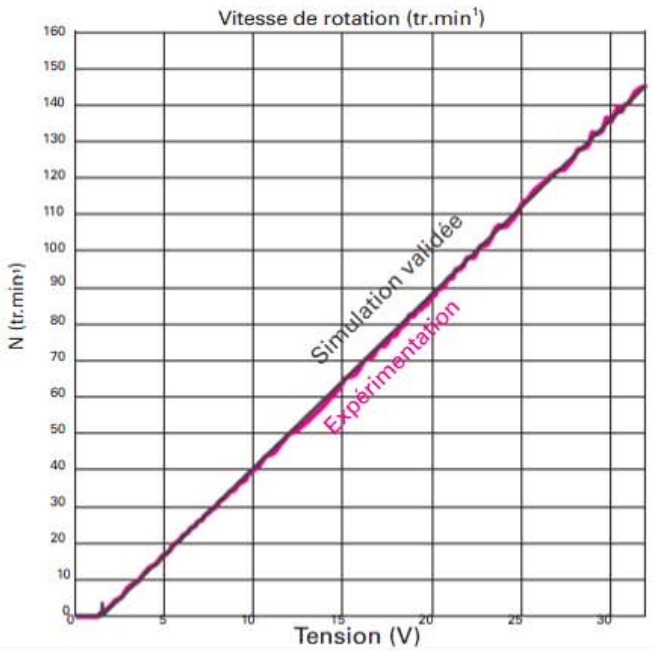


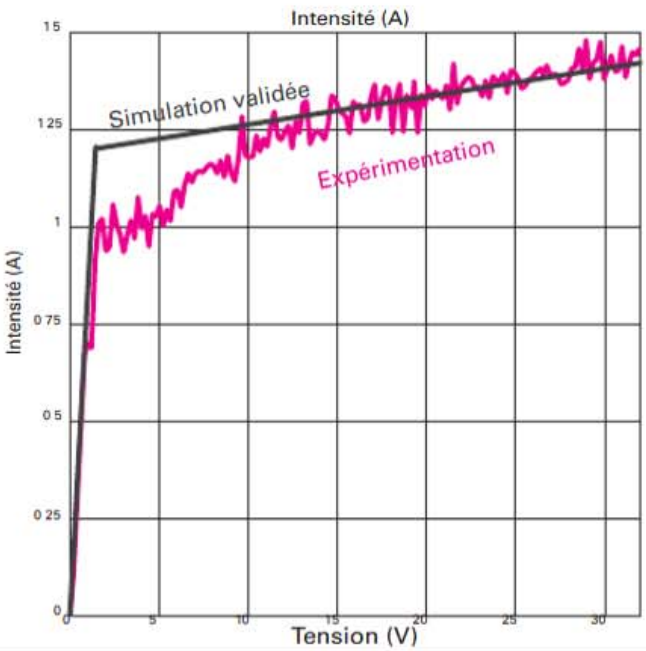
- Ajout d'un bloc «Coulomb & Viscous Friction» permettant de simuler le seuil de 1,2 V. Le bloc est paramétré avec un offset de 0,5 V qui est la différence entre la précédente simulation et l'expérimentation.

- Ajout d'un bloc simulant les frottements du réducteur «Rotational Friction».



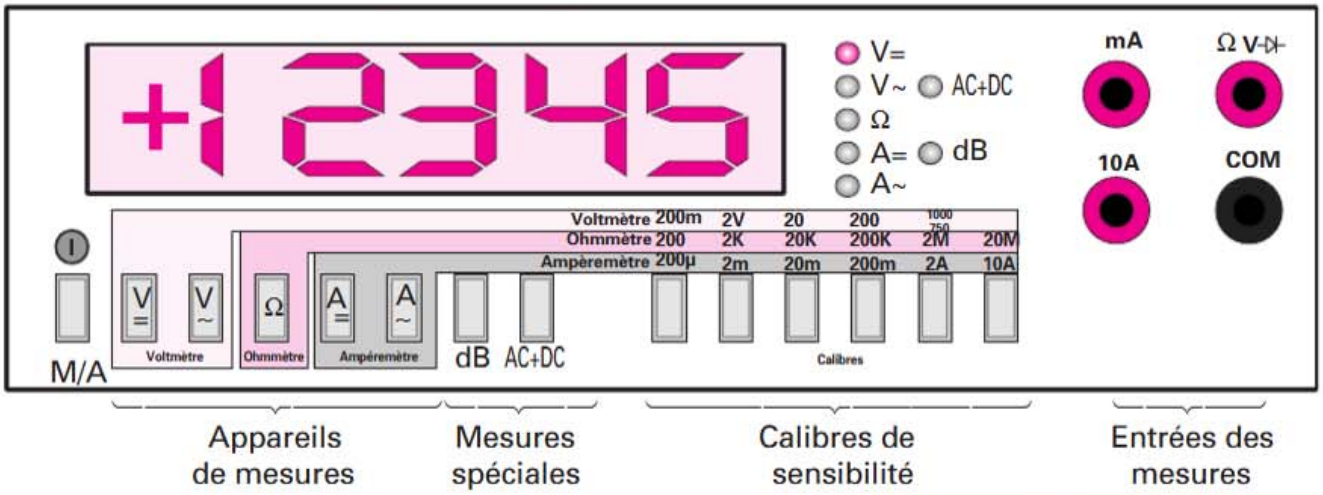
Les écarts sont devenus minimes, le modèle de simulation est validé.





6.1.8. APPAREIL DE MESURE

• Justifier les caractéristiques d'un appareil de mesure



Exemple : Un multimètre 20 000 points
Il dispose d'un afficheur permettant d'afficher un nombre compris entre 0 et 19 999.
Pour mesurer une tension par exemple, il est nécessaire d'utiliser des calibres pour obtenir une plage de tension de 200,0 mV à 2000 V.

Calibre	Plage de mesure
200 mV	0 à 199,99 mV
2 V	0 à 1,9999 V
20 V	0 à 19,999 V
200 V	0 à 199,99 V
1000 V	0 à 1999,9 V limité à 1000V

Le choix du calibre

Le calibre est la mesure maximale que l'appareil peut effectuer dans cette position.
Le choix du calibre est donc un préalable important à toute mesure.

• On connaît l'ordre de grandeur de la valeur à mesurer : On choisit donc le calibre immédiatement supérieur à la valeur à mesurer.
• On n'a aucune idée de la grandeur de la valeur à mesurer : On choisit le calibre le plus élevé de l'appareil

Calibre	Valeur affichée pour 0,12345V	Erreur d'affichage
200 mV	1234,5 mV	0 %
2 V	0,1234 V	0,04 %
20 V	00,123 V	0,364 %
200 V	000,12 V	2,79 %
1000 V	0000,1 V	19 %

Erreur de mesure en fonction du choix du calibre

Incertitude de mesure :
Même avec le calibre le mieux adapté à la mesure, il subsiste encore une erreur due à l'appareil.
Pour chaque appareil, on définit :
• Son exactitude qui s'exprime en pourcentage de la valeur mesurée.

Exemple : Une exactitude de ±0,1% de 100 V soit ±0,1 V
Valeur affichée avec un calibre 200 V : **099,90** à **100,10**

• **Sa résolution** qui correspond à la variation de 1 ou plusieurs unités du dernier digit (dgt) qui est le dernier chiffre à droite.

Exemple : Valeur affichée avec un calibre 200 V +2dg : **100,00** à **100,02**

Prévoir l'ordre de grandeur de la mesure
D'une façon générale, les tensions présentes dans un système sont égales ou inférieures à la tension d'alimentation.
Exception : dans de rares cas, la présence de certaines structures particulières telles que transformateur, dérivateur, multiplicateur peuvent générer des tensions différentes de la source d'alimentation.

6.2. LES CODES ET BASES DE NUMÉRATION

Représentation et traitement des données

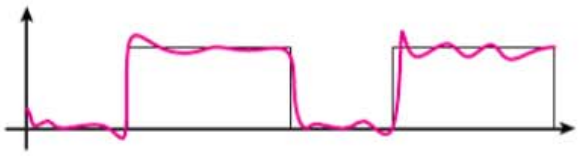
• La base 10 décimale

L'homme avec ses 10 doigts compte sur une base 10

Les chiffres possibles sont : **0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9**
Un nombre décimal est constitué de : ... centaines, dizaines, unités.

• La base 2 binaire

L'ordinateur, constitué de circuits logiques travaille en **base 2** alors que les résultats exploitables doivent être donnés **en base 10**. Il ne reconnaît que deux états, 0 et 1, c'est le bit qui est soit ouvert, soit fermé.



Base binaire ou base 2 : valeurs possibles : 0, 1
Un nombre binaire est constitué de bits : ...b4 b3 b2 b1 b0

• La base 16 Hexadécimale

Pour l'Humain, compter en base 2 (en binaire) est difficile.
Exemple : le nombre décimal $N_{10} = 300$ se lirait $N_2 = 01\ 0010\ 1100$.

Il était nécessaire d'inventer une nouvelle **base 16 dite hexadécimale** comprenant 16 symboles numériques : **0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F.**
En base 16, un symbole représente **4 bits** (quartet) d'où la nouvelle conversion.
Exemple : le nombre décimal $N_{10} = 300$ se lira $N_{16} = 12C$ H.
L'avantage du code hexadécimal est d'avoir une correspondance directe avec le codage binaire, ce qui n'est pas le cas du codage décimal.

• Code binaire codé décimal (BCD)

Un nombre décimal est une association de chiffres : unités, dizaines, centaines...
Pour représenter un nombre décimal de 0 à 9, il faut un quartet (4 bits).
Le codage BCD consiste à utiliser un quartet pour les unités, un autre pour les dizaines, un autre pour les centaines...

	centaine	*dizaine*	*unité*
$N_{10} =$	1	9	2
$N_{BCD} =$	0001	1001	0010

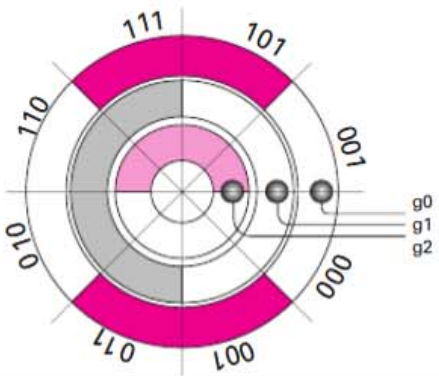
• Code binaire réfléchi ou code Gray

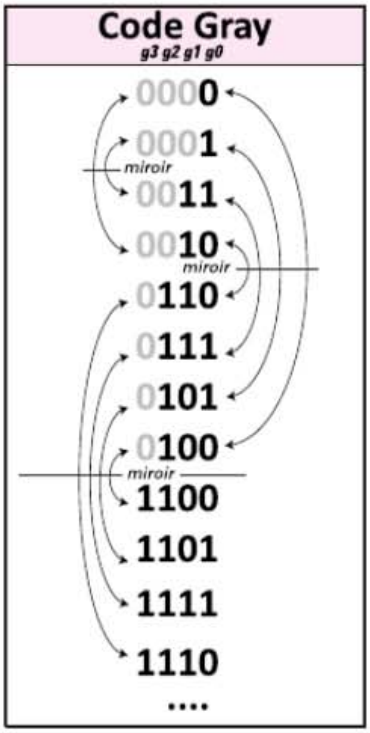
Le **code Gray** est un code construit de telle façon qu'à partir du chiffre 0 chaque nombre consécutif **diffère du précédent immédiat d'un seul digit**.

En l'exprimant autrement nous pouvons également dire que l'on change un seul bit à la fois quand un nombre est augmenté d'une unité.

Exemple : Roue codeuse, avec le code Gray, il ne peut y avoir de combinaison fausse.

Ceci est dû au fait qu'il n'y a qu'un élément binaire qui change à la fois.

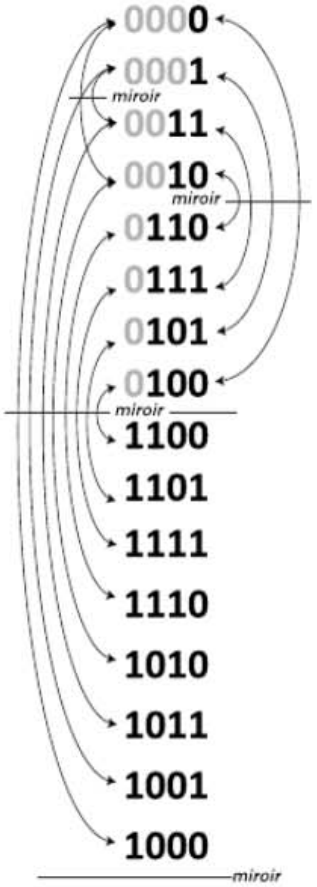




Les codes et bases de numération

• Tableau d'équivalences

Décimale *Dizaine Unité*	Binaire *b3 b2 b1 b0*	Hexadécimale	BCD *b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0*	Code Gray *g3 g2 g1 g0*
00	0000	00	0000 0000	0000
01	0001	01	0000 0001	0001
02	0010	02	0000 0010	0011
03	0011	03	0000 0011	0010
04	0100	04	0000 0100	0110
05	0101	05	0000 0101	0111
06	0110	06	0000 0110	0101
07	0111	07	0000 0111	0100
08	1000	08	0000 1000	1100
09	1001	09	0000 1001	1101
10	1010	0A	0001 0000	1111
11	1011	0B	0001 0001	1110
12	1100	0C	0001 0010	1010
13	1101	0D	0001 0011	1011
14	1110	0E	0001 0100	1001
15	1111	0F	0001 0101	1000
16	1 0000	10	0001 0110	1 0000
17	1 0001	11	0001 0111	1 0001



• Généralités (exemple d'écriture)

base décimale	N_{10} = 200	ou	200 d	ou	200	
base binaire	N_2 = 1100 1000	ou	1100 1000 b	ou	%1100 1000	ou 0b1100 1000
base hexadécimale	N_{16} =C8	ou	C8 h	ou	$C8	ou 0xC8
base BCD	N_{BCD} = 0001 0010	ou	0001 0010			

Il convient de regrouper un nombre binaire **par quartet** (groupe de 4) **en partant de la droite**.
Exemple :

010010110111010 → 010 0101 1011 1010
0111001001 → 01 1100 1001

Format d'un nombre binaire

Pour réaliser des opérations arithmétiques ou logiques, utiliser des nombres binaires dans un microcontrôleur, il est important de fixer le format qui sera utilisé.
Dans les langages de programmation, la déclaration des variables permet de définir le format et ainsi réserver la mémoire nécessaire pour faire fonctionner le programme.

Format		b_{15} - b_{12}	b_{11} - b_8	b_7 - b_4	b_3 - b_0	*Nombre*
Le bit :	de à				0 1	0 à 1
Le quartet :	de à				0000 1111	0 à 15
L'octet :	de à			0000 1111	0000 1111	0 à 255
Mot de 16 bits :	de à	0000 1111	0000 1111	0000 1111	0000 1111	0 à 65 535

Représentation des valeurs numériques sous Matlab Simulink

Dans une modélisation multiphysique, il faut être vigilant au format des valeurs numériques. Par défaut Matlab Simulink utilise le format «double» double précision en virgule flottante. Pour l'utilisation de fonctions logiques il faudra veiller à générer ou transformer le format en booléen ou en entier uint8 pour du binaire 8 bits ou int8 pour du binaire signé 8 bits, etc.

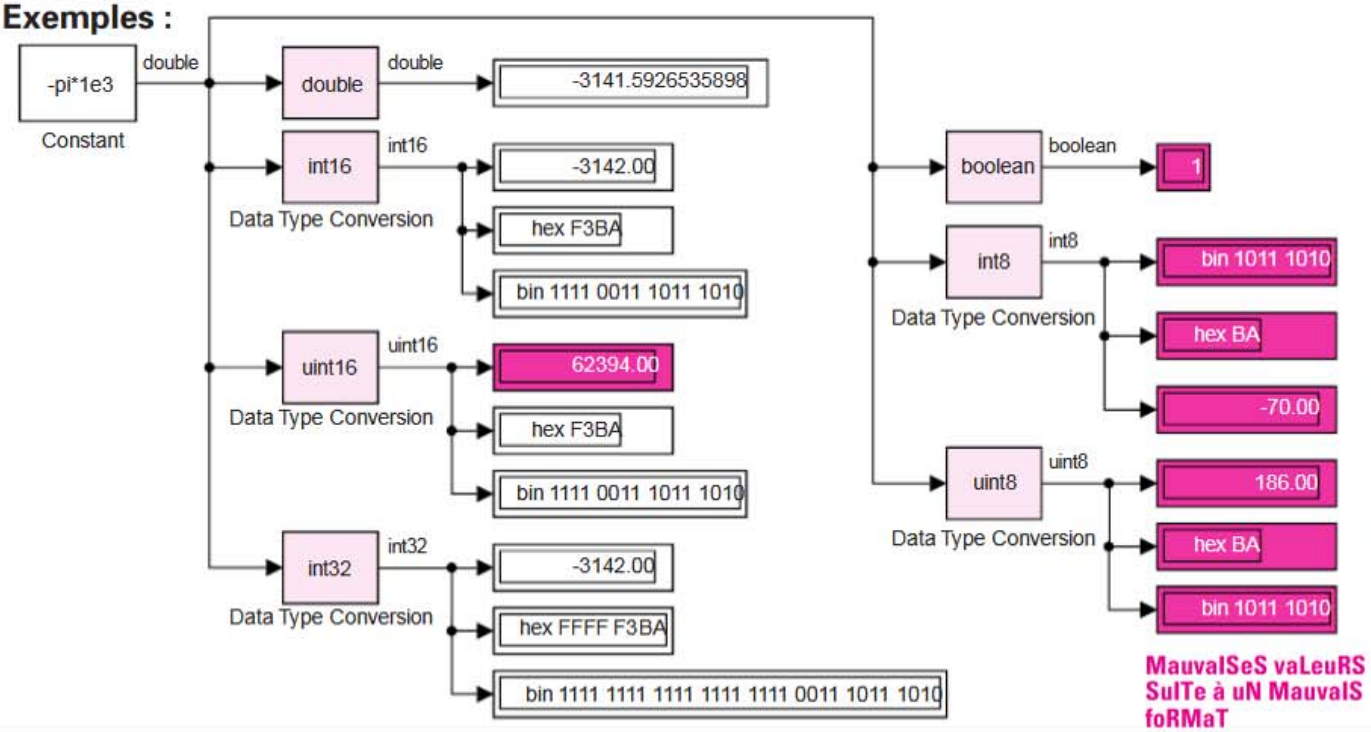
Virgule flottante

Format	Encodage	Signe	Exposant	Mantisse	Amplitude du nombre	Précision	Chiffres significatifs
SIMpLe pRéCISIoN	32 bits	1 bit	8 bits	23 bits	$\pm 3{,}4028235\times10^{38}$ $\pm 1{,}175494351\times10^{-38}$	24 bits	environ 7
DoubLe pRéCISIoN	64 bits	1 bit	11 bits	52 bits	$\pm 1{,}7976931348623157\times10^{308}$ $\pm 2{,}2250738585072014\times10^{-308}$	53 bits	environ 16

Entier

Format	Encodage	Signe	Exposant	Amplitude du nombre
INT64	64 bits	1 bit	63 bits	$\pm 2^{63}$
uINT64	64 bits	0	64 bits	2^{64}
INT32	32 bits	1 bit	31 bits	$\pm 2^{31}$ $(\pm 2\ milliards)$
uINT32	32 bits	0	32 bits	2^{32} $(0$ à $4\ milliards)$
INT16	16 bits	1 bit	15 bits	$\pm 2^{15}$ $(-32\,768$ à $+32\,767)$
uINT16	16 bits	0	16 bits	2^{16} $(0$ à $65\,535)$
INT8	8 bits	1 bit	7 bits	$\pm 2^{7}$ $(-127$ à $+128)$
uINT8	8 bits	0	8 bits	2^{8} $(0$ à $255)$
booLéeN	1 bit	0	1 bits	$0\ ou\ 1$

Exemples :



6.2.1 CONVERSIONS

• Conversion Binaire → Décimale

Principe

Pour réaliser la conversion d'une base binaire en base décimale, il faut tout d'abord ordonner l'écriture du code binaire en écrivant **à gauche le bit de poids fort** et **le bit de poids faible à droite**. Chaque symbole représente une puissance de 2 qui va s'incrémenter de 1 en 1 en partant de 0.

Mode opératoire

← *Bit de poids fort* *Bit de poids faible* →

$N_2 = 1100\ 1000 \Rightarrow$ bit 7 bit 6 bit 5 bit 4 bit 3 bit 2 bit 1 bit 0

$N_2 = 1100\ 1000 \Rightarrow 1 . 2^7 + 1 . 2^6 + 0 . 2^5 + 0 . 2^4 + 1 . 2^3 + 0 . 2^2 + 0 . 2^1 + 0 . 2^0$

$N_2 = 1100\ 1000 \Rightarrow 128 + 64 + 0 + 0 + 8 + 0 + 0 + 0$

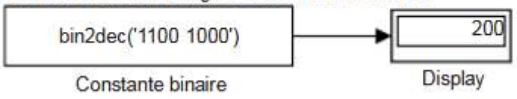
$N_2 = 1100\ 1000 \Rightarrow N_{10} = 200$

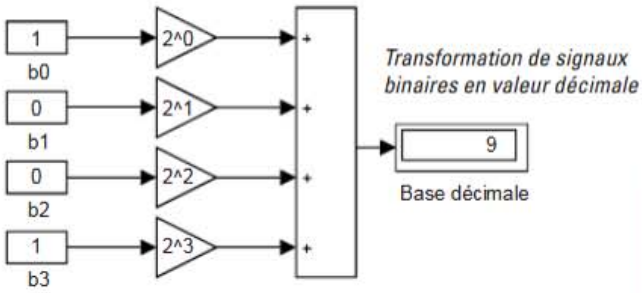
Exemples de conversion

Binaire	Décimale
N_2 = 1101 1010 1010	3498
N_2 = 1 0111 0011 1010	5946
N_2 = 1011 0001 1011 1011	45 499

Modélisation Simulink

Conversion d'affichage binaire vers décimale





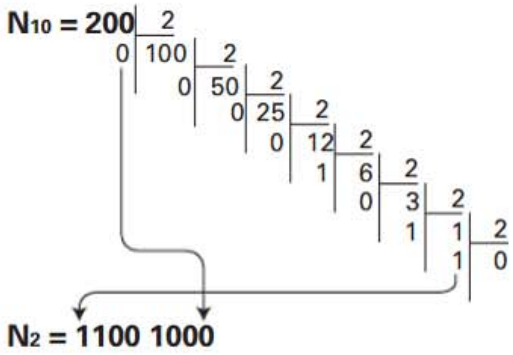
Transformation de signaux binaires en valeur décimale

• Conversion Décimale → Binaire

Principe

On trouve le nombre N en base 2 en réalisant une série de divisions euclidiennes par 2.
Le reste de la première division représente le bit de poids faible alors que le reste de la dernière division représente le bit de poids fort.

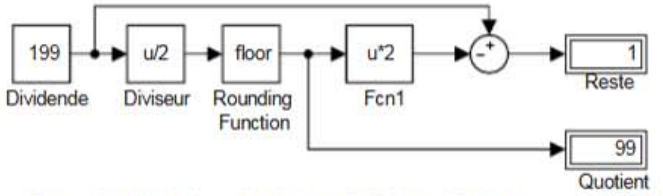
Mode opératoire



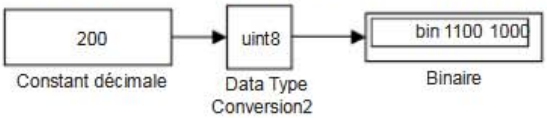
Modélisation Simulink

Modélisation d'une division euclidienne par 2 : cette structure permet d'obtenir les lignes binaires à partir d'une valeur numérique décimale.

199 | 2
-198 | 99 x 2=198
1



Conversion décimale → binaire avec l'afficheur «Display» en mode binaire



Exemples de conversion

Décimale		Binaire	Décimale		Binaire
N_{10} = 220	⇒	1101 1100	N_{10} = 2000	⇒	111 1101 0000
N_{10} = 255	⇒	1111 1111	N_{10} = 10 123	⇒	10 0111 1000 1011

Conversions

• Conversion Hexadécimale → Décimale

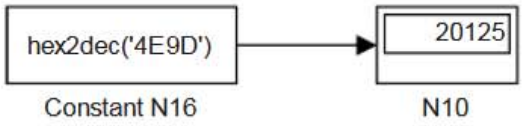
Principe

Pour réaliser la conversion d'une base hexadécimale vers une base décimale, procéder de la même façon que la conversion binaire-décimale.
Chaque symbole représente **une puissance de 16 qui va s'incrémenter de 1 en 1** en partant de 0.

Mode opératoire

$N_{16} = 4E9D \Rightarrow 4 . 16^3 + E . 16^2 + 9 . 16^1 + D . 16^0$
$N_{16} = 4E9D \Rightarrow 4 . 16^3 + 14 . 16^2 + 9 . 16^1 + 13 . 16^0$
$N_{16} = 4E9D \Rightarrow 4 . 4096 + 14 . 256 + 9 . 16 + 13 . 1$
$N_{16} = 4E9D \Rightarrow 16384 + 3584 + 144 + 13$
$\mathbf{N_{16} = 4E9D \Rightarrow N_{10} = 20\,125}$

Conversion Matlab Simulink



Exemples de conversion

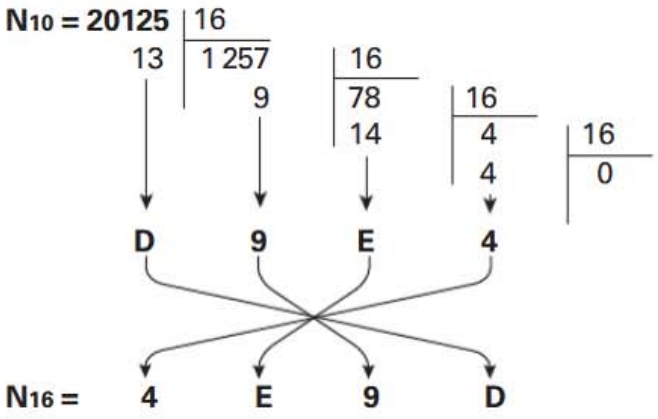
Hexadécimale		Décimale
N_{16} = 0ABCD	⇒	43 981
N_{16} = 10000	⇒	65 536
N_{16} = 200000	⇒	2 097 152
N_{16} = 12345	⇒	74 565

• Conversion Décimale → Hexadécimale

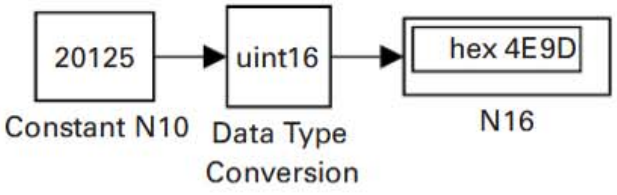
Principe

On trouve le nombre N en base 10 en effectuant **une série de divisions par 16**. Le reste de la première division représente le chiffre de poids faible alors que le reste de la dernière division représente le chiffre de poids fort. Il convient de convertir le résultat ou le reste en hexadécimal.

Mode opératoire



Conversion Matlab Simulink



Exemples de conversion

Décimale		Hexadécimale
N_{10} = 420	⇒	01A4
N_{10} = 65 535	⇒	0FFFF
N_{10} = 320 000	⇒	04E200

• Conversion Binaire ↔ Hexadécimale

Principe

La conversion du binaire en hexadécimal s'effectue simplement.
Il faut regrouper le mot binaire en **quartets en partant du bit de poids faible** et donner pour **chaque quartet** le **symbole hexadécimal correspondant** à l'aide de la table de correspondance.

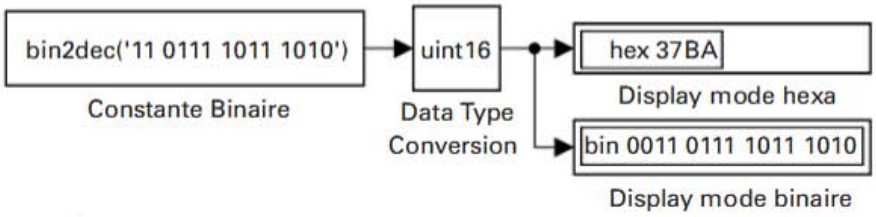
La conversion d'hexadécimal en binaire s'effectue simplement. Il faut utiliser la table de conversion et faire correspondre à chaque symbole hexadécimal le quartet binaire.

Mode opératoire

N_2 = 11 0111 1011 1010 ⇒ 0011 0111 1011 1010

N_{16} = **37BA** ⇒ **3** **7** **B** **A**

Conversion Matlab Simulink



Exemples de conversion

	Binaire		Hexadécimale
N_2 =	0101 1010 1111	⇔	5AF
N_2 =	1 0000 0001 1001	⇔	1019
N_2 =	111 1111 1101 0101	⇔	7FD5

• Conversion Hexadécimale ↔ Décimale

Méthode alternative

La manipulation de division par 16 ou puissance de 16 n'est pas toujours facile.

Il est plus simple de procéder comme suit :
Conversion Hexadécimale → Décimale
Convertir un nombre n en binaire, puis le convertir en décimale.

N_{16} = 3 A
N_2 = 0011 1010
N_{10} = 32 + 16 + 8 + 2 = 58

Conversion Décimale → Hexadécimale
Convertir un nombre en décimale n en binaire, puis le convertir en hexadécimale.

N_{10} = 120
N_2 = 0100 0010
N_{16} = 4 2

Conversions

• Représentation Signé d'un nombre binaire

En représentation binaire Signé, le bit situé le plus à gauche sert à indiquer le signe du nombre.

Par convention, le **0 signale un nombre positif** et un **1 signale un nombre négatif**.
Par exemple, **1111 1111** représente **– 127** et **0111 1111** représente **+ 127**.
Il est possible de représenter des nombres positifs ou négatifs, mais la taille maximale de ces nombres est ramenée à **127**.

La représentation Signé donne de mauvais résultats lors de l'addition de 2 nombres.
Exemple :

+ 8	0 0 0 0 1 0 0 0
– 6	1 0 0 0 0 1 1 0
+ 2	1 0 0 0 1 1 1 0 = –14

8 – 6 = – 14 alors que le résultat devrait être **+ 2**.

La solution consiste à utiliser la représentation en **complément à deux**.
La représentation en complément à deux d'un nombre négatif s'obtient en calculant d'abord le **complément à un**, puis en ajoutant **1**.

Exemple :
Le nombre **7** est représenté par **0 0 0 0 0 1 1 1**
Le nombre **– 7** en complément à **1** : **1 1 1 1 1 0 0 0**
Il suffit d'inverser chaque bit de la représentation initiale.

Le nombre **– 7** en complément à **2** : **1 1 1 1 1 0 0 0**
1
1 1 1 1 1 0 0 1

• Opération sur des nombres binaires

Addition binaire
Les règles de l'arithmétique pour les nombres binaires sont les mêmes que pour les nombres décimaux.

0 + 0 = 0
0 + 1 = 1
1 + 0 = 1
1 + 1 = (1) 0

(1) représente un **report** de **1**.
La dernière ligne vaut **10** ⇒ soit **2**.

Exemple

	7 A				b7 **7**				**A** b0		
+	**4 3**	⇒	+	(1) **0**	**1**	**1**	**1**		(1) **1**	**0**	**1**	**0**
				0	**1**	**0**	**0**		**0**	**0**	**1**	**1**
	BD			**1**	**0**	**1**	**1**		**1**	**1**	**0**	**1**
					B						**D**	

Soustraction binaire
La soustraction s'obtient par l'addition d'un nombre représenté en **complément à 2**.
Exemple : **8 – 5** =

5 se représente par		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**
son complément à **1**		**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1**	**0**
son complément à **2**		**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1**	**1** ⇒ **– 5**

	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)				
8	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	
– 5	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1**	**1**	
3	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	

6.2.2. LE CODE ASCII American Standard Code for Information Interchange

	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	xA	xB	xC	xD	xE	xF
0x	NUL	SOH	STX	ETX	EOT	ENQ	ACK	BEL	BS	HT	LF	VT	FF	CR	SO	SI
1x	DLE	DC1	DC2	DC3	DC4	NAK	SYN	ETB	CAN	EM	SUB	ESC	FS	GS	RS	US
2x	SP	!	"	#	$	%	&	'	(	)	*	+	,	-	.	/
3x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4x	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5x	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[	\	]	^	_
6x	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7x	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{	|	}	~	DEL
8x	€		‚	ƒ	„	…	†	‡	ˆ	‰	Š	‹	Œ		Ž	
9x		‘	’	“	”	•	–	—	˜	™	š	›	œ		ž	Ÿ
Ax	NBSP	¡	¢	£	¤	¥	¦	§	¨	©	ª	«	¬		®	¯
Bx	°	±	²	³	´	µ	¶	·	¸	¹	º	»	¼	½	¾	¿
Cx	À	Á	Â	Ã	Ä	Å	Æ	Ç	È	É	Ê	Ë	Ì	Í	Î	Ï
Dx	Ð	Ñ	Ò	Ó	Ô	Õ	Ö	×	Ø	Ù	Ú	Û	Ü	Ý	Þ	ß
Ex	à	á	â	ã	ä	å	æ	ç	è	é	ê	ë	ì	í	î	ï
Fx	ð	ñ	ò	ó	ô	õ	ö	÷	ø	ù	ú	û	ü	ý	þ	ÿ

• Le code ASCII

Le jeu de caractères codés ASCII (Code américain normalisé pour l'échange d'information) est la norme de codage de caractères en informatique la plus connue, la plus ancienne et la plus largement compatible.

Elle a été inventée par l'américain Bob Bemer en 1961.

L'**ASCII définit 128 caractères** numérotés de 0 à 127 et codés en binaire de 0000000 à 1111111. Sept bits suffisent donc pour représenter un caractère codé en ASCII. Depuis les années 1970, chaque caractère d'un texte en ASCII est stocké dans un octet dont le 8e bit est 0.

Les caractères de numéro 0 à 31 et le 127 ne sont pas affichables ; ils correspondent à des commandes de contrôle de terminal informatique.

De nombreuses normes de codage de caractères ont repris les codes ASCII et ajouté d'autres caractères pour les codes supérieurs à 127. En particulier, beaucoup de **pages de codes** étendent l'**ASCII en utilisant le 8e bit** pour définir des caractères numérotés de 128 à 255. La norme ISO/CEI 8859 fournit des extensions pour diverses langues. Par exemple, Windows-1252 (CP1252) en gris dans le tableau ci-dessus.

Le code hexadécimal du symbole est obtenu en associant la ligne et la colonne
Exemple :

Mémotech est codé en ASCII : **4D E9 6D 6F 74 65 63 68**

commandes de contrôle

NUL	Null (nul)
SOH	Start of Header (début d'en-tête)
STX	Start of Text (début du texte)
ETX	End of Text (fin du texte)
EOT	End of Transmission (fin de transmission)
ENQ	Enquiry (End of Line) (demande, fin de ligne)
ACK	Acknowledge (accusé de réception)
BEL	Bell (caractère d'appel)
BS	Backspace (espacement arrière)
HT	Horizontal Tab (tabulation horizontale)
LF	Line Feed (saut de ligne)
VT	Vertical Tab (tabulation verticale)
FF	Form Feed (saut de page)
CR	Carriage Return (retour chariot)
SO	Shift Out (fin d'extension)
SI	Shift In (démarrage d'extension)
DLE	Data Link Escape
DC1	Device Control 1 à 4 (DC1 et DC3 sont
DC2	généralement utilisés pour coder XON et XOFF
DC3	dans un canal de communication duplex)
DC4	
NAK	Negative Acknowledge (accusé de réception négatif)
SYN	Synchronous Idle
ETB	End of Transmission Block (fin du bloc de transmission)
CAN	Cancel (annulation)
EM	End of Medium (fin de support)
SUB	Substitute (substitution)
ESC	Escape (échappement)
FS	File Separator (séparateur de fichier)
GS	Group Separator (séparateur de groupe)
RS	Record Separator (séparateur d'enregistrement)
US	Unit Separator (séparateur d'unité)
SP	Espace

6.3. LES FONCTIONS LOGIQUES

• Les circuits intégrés logiques

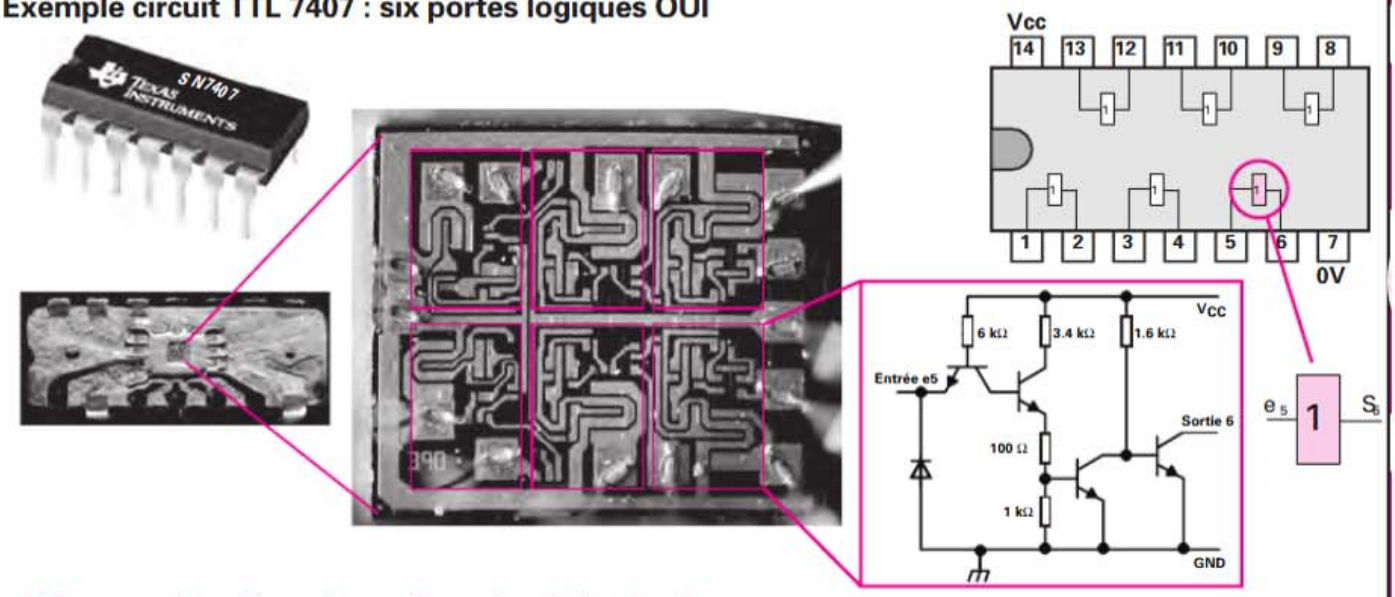
Le circuit intégré (CI), aussi appelé puce électronique, est un composant électronique reproduisant une ou plusieurs fonctions électroniques plus ou moins complexes, intégrant souvent plusieurs types de composants électroniques de base dans un volume réduit, rendant le circuit facile à mettre en œuvre.

Les circuits intégrés numériques les plus simples sont des portes logiques (NON, ET, OU), les plus complexes sont les microprocesseurs.

Les circuits intégrés se présentent généralement sous la forme de boîtiers pleins rectangulaires, équipés de pattes (appelées aussi broches ou pins) permettant d'établir les connexions électriques avec l'extérieur du boîtier. Sur le boîtier sont peints : le logo du fabricant, une référence qui permet d'identifier le composant.

Différents types de boîtiers permettent d'adapter le circuit intégré à son environnement de destination.
Le format le plus ancien a pour nom Dual Inline Package (DIP ou DIL) qui se traduit sommairement par « boîtier avec deux lignes ».

Exemple circuit TTL 7407 : six portes logiques OUI



• Alimentation électrique d'un circuit intégré

La plage d'alimentation dépend de la technologie utilisée.
Elle est généralement de 5 V pour les composants anciens (TTL), de 6 V max pour les CMOS, de 18 V max pour la famille CMOS CD4000 et elle est passée à 3,3 V, 2,5 V, 1,8 V pour les technologies récentes (LV-CMOS ...).

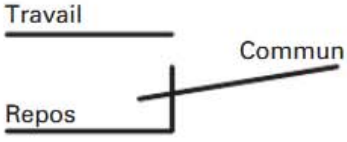
• Les contacts utilisés pour les schémas équivalents

Interrupteur à fermeture

NO : Normalement Ouvert
NO : Normally Open

Interrupteur à Ouverture

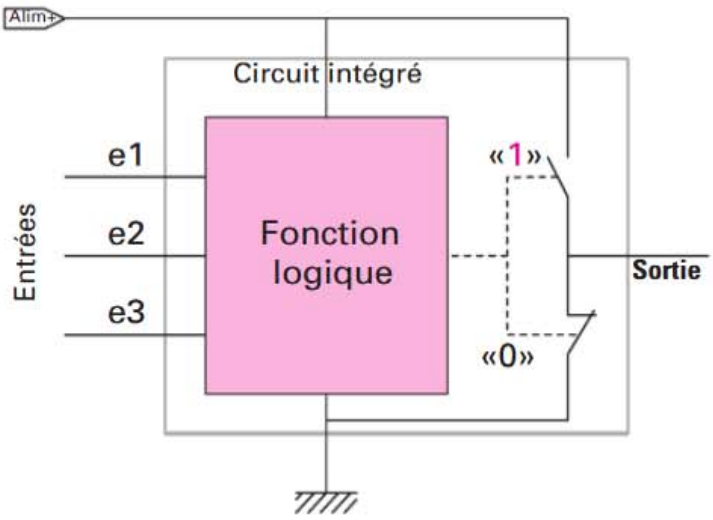
NF : Normalement Fermé
NC : Normally Closed

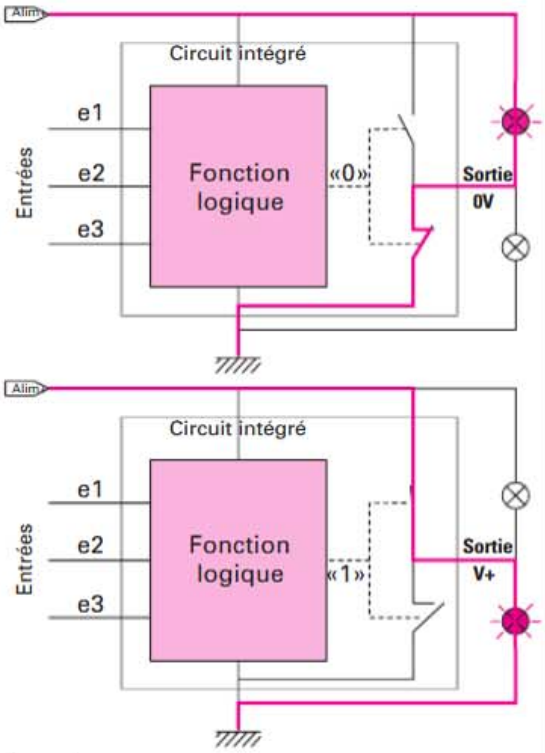


Interrupteur inverseur

• Représentation interne de la fonction logique

Les circuits intégrés sont alimentés en courant continu.
Les **variables d'entrée** et les variables **de sortie** possèdent deux niveaux possibles de tension :
0 V la masse
V+ l'alimentation.
Une entrée laissée en l'air n'a pas de niveau logique défini.





6.3.1. LES FONCTIONS DE BASE

• Fonction logique OUI *BUFFER en anglais (amplificateur)*

Symbole

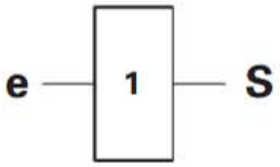


Table de vérité

e	S
0	0
1	1

Equation logique

$$S = e$$

Remarques :

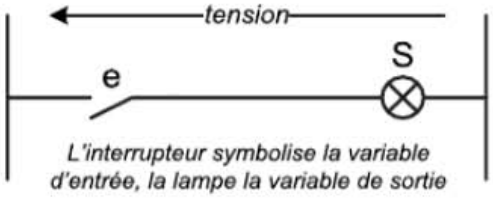
- Les entrées sont représentées par des minuscules. (e, b, ...)
- La sortie est représentée par une majuscule. (S, Q, ...)
- L'alimentation n'est pas représentée pour simplifier le schéma.
- La table de vérité donne en entrée toutes les combinaisons possibles (en binaire).

Il y a 2 combinaisons $2^{N_{entrées}}$

Schéma équivalent à contact :

Pas d'action sur l'interrupteur
Il est ouvert au repos ⇒ e = 0 (état physique).
Le courant ne circule pas. La lampe est éteinte.

Action sur l'interrupteur
Il est fermé au travail ⇒ e = 1 (état physique).
Le courant circule. La lampe est allumée.



L'interrupteur symbolise la variable d'entrée, la lampe la variable de sortie

Les fonctions de base

• Fonction logique NON ou inverseur *NOT ou INV en anglais*

Représentation

Symboles

Table de vérité

e	S
0	1
1	0

Équation

$$S = \overline{e}$$

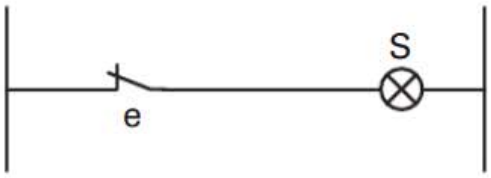
(prononcer e barre)

Fonction complément : $\overline{S} = e$

Schéma électrique équivalent

Pas d'action sur l'interrupteur

Il est fermé au repos ⇒ **e = 0** (état physique).
Le courant circule (état électrique).
La lampe est allumée.



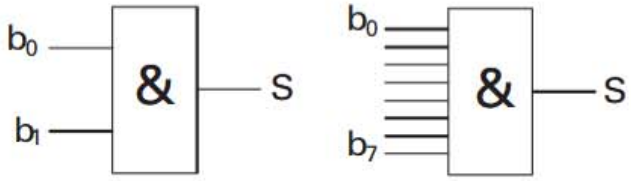
Action sur l'interrupteur

Il est ouvert au travail ⇒ **e = 1** (état physique).
Le courant ne circule pas (état électrique).
La lampe est éteinte.

• Fonction logique ET *AND en anglais*

Représentation

Symboles



$S=b_0.b_1.b_2.b_3.b_4.b_5.b_6.b_7$

Au minimum 2 entrées

Table de vérité

b_1	b_0	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Équation

$$S=b_0.b_1$$

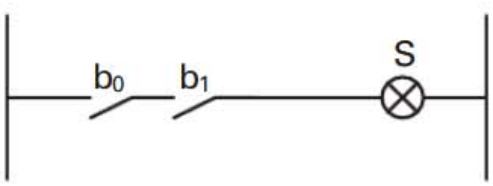
Lire « S = « b0 ET b1 »

La sortie = 1 si b0=1 ET b1=1

Schéma électrique équivalent

Pas d'action sur les interrupteurs

b_0 et b_1 ouverts au repos ⇒ b_0 et b_1 = 0 (états physiques).
Le courant ne circule pas. La lampe L est éteinte.



Action sur les interrupteurs

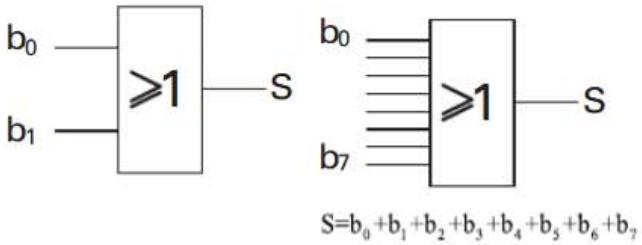
b_0 et b_1 fermés au travail ⇒ b_0 et b_1 = 1 (états physiques).
Le courant circule. La lampe est allumée.

Il faut que b0 ET b1 soient = 1 pour avoir S = 1.

• Fonction logique OU *OR en anglais*

Représentation

Symboles



$S=b_0+b_1+b_2+b_3+b_4+b_5+b_6+b_7$

Table de vérité

b_1	b_0	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Équation

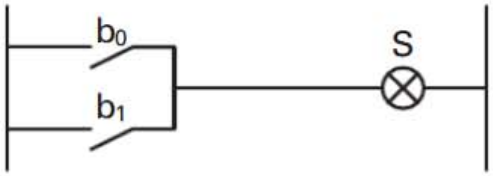
$$S=b_0+b_1$$

Lire « S = « b0 OU b1 »

Schéma électrique équivalent

Pas d'action sur les interrupteurs

b_0 et b_1 ouverts au repos ⇒ a et b = 0 (états physiques).
Le courant ne circule pas.
La lampe est éteinte.



Action sur les interrupteurs

b_0 ou b_1 fermé au travail ⇒ a ou b = 1 (états physiques).
Le courant circule. La lampe est allumée

Il faut que b0 OU b1 soit = 1 pour avoir S = 1.

• Fonction logique OU NON *NOR en anglais*

Représentation

Symboles

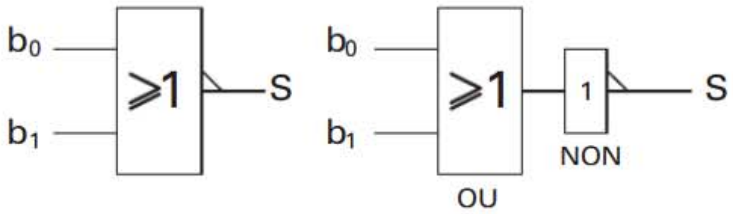


Table de vérité

b_1	b_0	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Équation

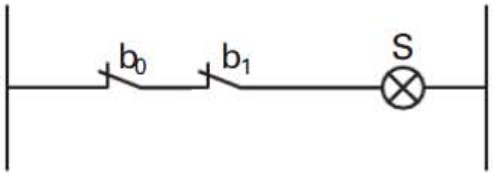
$$S=\overline{b_0+b_1}$$

Lire « S = « b0 OU b1 le tout barre »

Schéma électrique équivalent

Pas d'action sur les interrupteurs

b_0 et b_1 fermés au repos ⇒ b_0 et b_1 = 0 (états physiques).
Le courant circule. La lampe S est allumée.



Action sur les interrupteurs

b_0 et b_1 ouverts au travail ⇒ b_0 et b_1 = 1 (états physiques).
Le courant ne circule pas. La lampe est éteinte.

Il faut que b_0 OU b_1 soient = 1 pour avoir S = 0.

Si on écrit l'équation d'après le schéma à contacts on obtient :

$$S=\overline{b_0}.\overline{b_1}$$

Les fonctions de base

• Fonction logique ET NON *NAND en anglais*

Représentation

Symboles

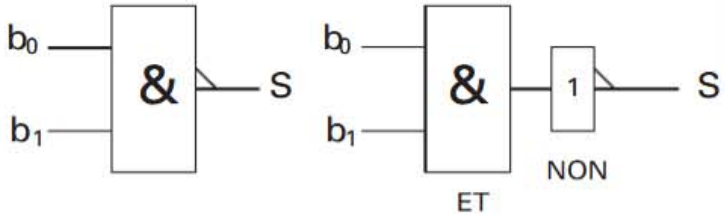


Table de vérité

b_1	b_0	S
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

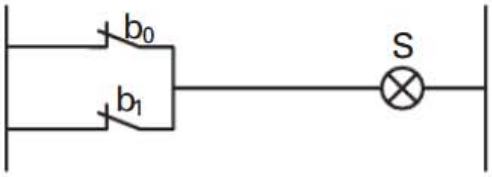
Équation

$$S=\overline{b_0.b_1}$$

Lire « S = « b0 ET b1 le tout barre »

Schéma électrique équivalent

Pas d'action sur les interrupteurs
b_0 et b_1 fermés au repos ⇒ b_0 et b_1 = 0 (états physiques).
Le courant circule. La lampe S est allumée.



Action sur les interrupteurs
b_0 et b_1 ouverts au travail ⇒ b_0 et b_1 = 1 (états physiques).
Le courant ne circule pas. La lampe S est éteinte.

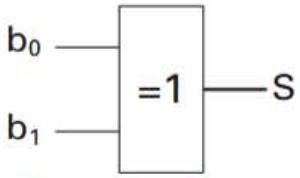
Il faut que b_0 et b_1 soient = 1 pour avoir S = 0.

Si on écrit l'équation d'après le schéma à contacts on obtient :

$$S=\overline{b_0}+\overline{b_1}$$

• Fonction logique OU EXCLUSIF *XOR en anglais*

Représentation **Symbole**



2 entrées uniquement

La sortie = 1 si b0 est différent de b1

Table de vérité

b_1	b_0	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

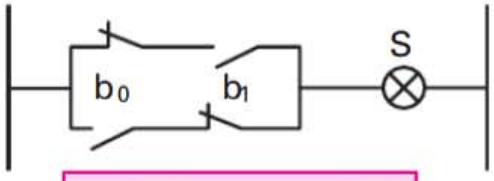
Équation

$$S=b_0 \oplus b_1$$

Lire « S = b0 OU EXCLUSIF b1 »

Schéma électrique équivalent

La lampe est allumée si un et un seul des interrupteurs b_0 ou b_1 est activée.



Le résultat est VRAI si un nombre impair d'entrées est vrai.

Si on écrit l'équation d'après le schéma à contacts on obtient :

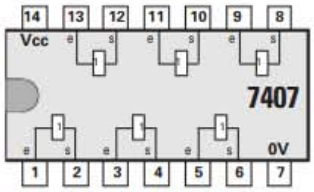
$$S=\overline{b_0}.b_1+b_0.\overline{b_1}$$

Propriétés mathématiques

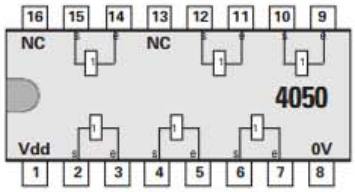
$$b_0 \oplus b_0 = 0 \qquad b_0 \oplus 1 = \overline{b_0}$$
$$b_0 \oplus 0 = b_0 \qquad b_0 \oplus \overline{b_0} = 1$$
$$\overline{b_0 \oplus b_1} = b_0.b_1+\overline{b_0}.\overline{b_1}$$

6.3.2. BROCHAGE DES FONCTIONS LOGIQUES TTL ET CMOS LES PLUS COURANTES.

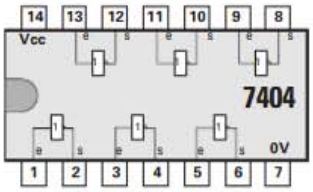
- 74xx technologie TTL, alimentation +5 V
- 40xx technologie CMOS, alimentation de 3 V à 15 V



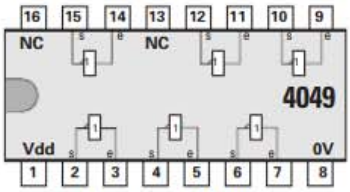
6 portes **OUI** (buffer)
Collecteur ouvert



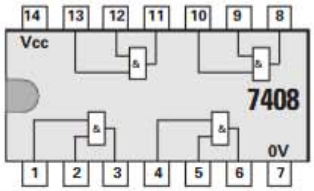
6 portes **OUI**



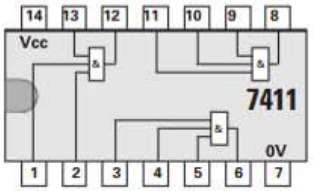
6 portes **NON**



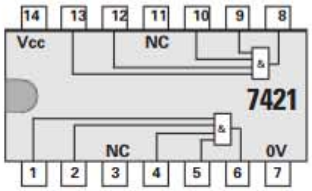
6 portes **NON**



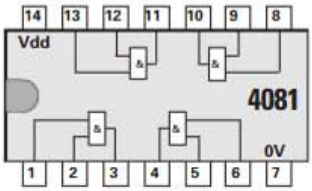
4 portes **ET** 2 entrées



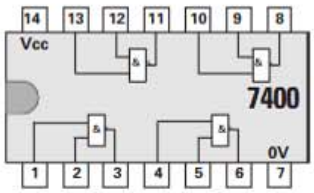
3 portes **ET** 3 entrées



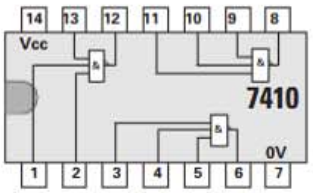
2 portes **ET** 4 entrées



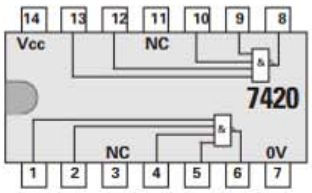
4 portes **ET** 2 entrées



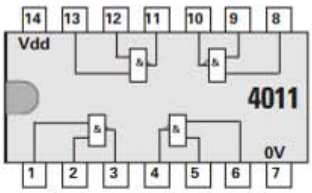
4 portes **ET NON** 2 entrées



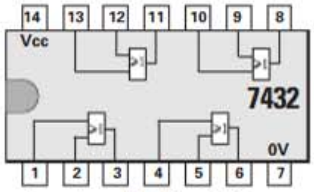
3 portes **ET NON** 3 entrées



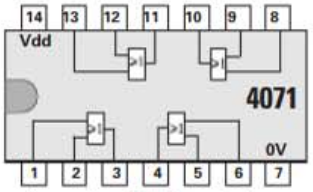
2 portes **ET NON** 4 entrées



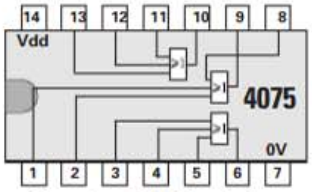
4 portes **ET NON** 2 entrées



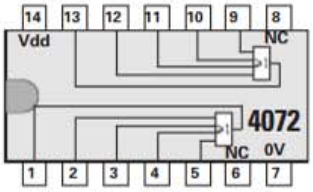
4 portes **OU** 2 entrées



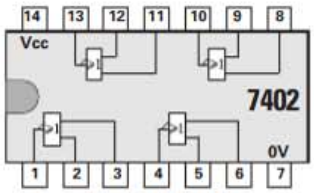
4 portes **OU** 2 entrées



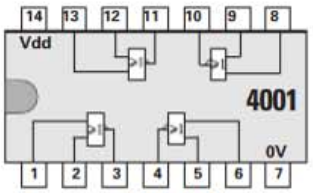
3 portes **OU** 3 entrées



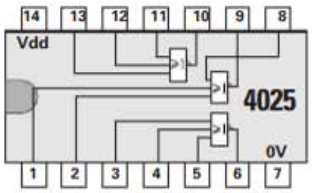
2 portes **OU** 4 entrées



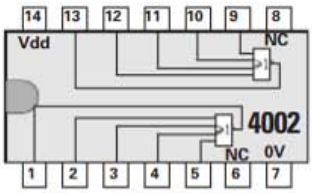
4 portes **OU NON**
2 entrées



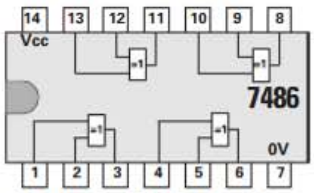
4 portes **OU NON**
2 entrées



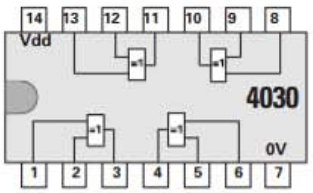
3 portes **OU NON**
3 entrées



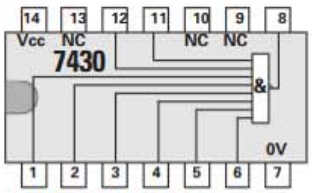
2 portes **OU NON**
4 entrées



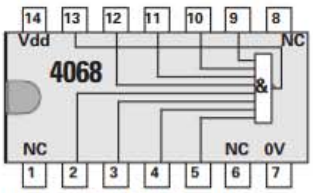
4 portes **OU Exclusif**



4 portes **OU Exclusif**



1 porte **ET NON** 8 entrées



1 porte **ET NON** 8 entrées

6.3.3. FONCTION TRANSFERT

• Famille TTL (Transistor Transistor Logique)

Elle constitue un standard pour les autres familles qui définissent souvent leurs produits avec des interfaces compatibles TTL.
Les circuits intégrés en technologie TTL utilisent des transistors bipolaires.
Elle se caractérise par un **temps de propagation faible** et une **alimentation de 5 V.**

• Famille CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

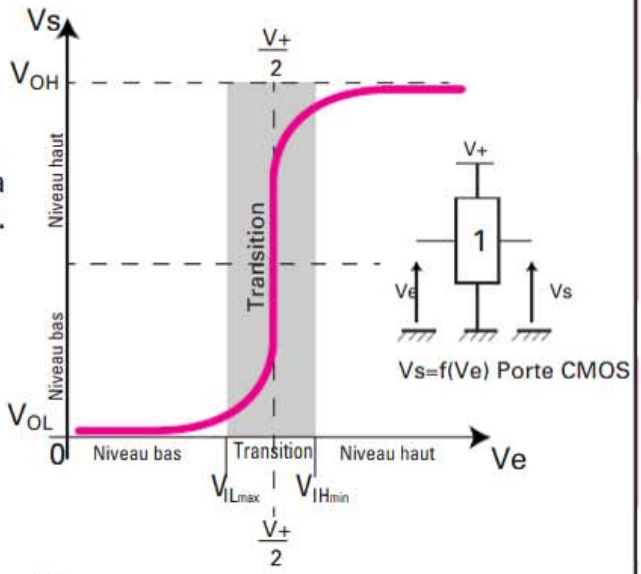
Les circuits intégrés en technologie CMOS utilisent des transistors à effet de champ MOS.
Ils se différencient essentiellement des circuits TTL par leur **faible dissipation** thermique et **une alimentation de 3 à 18 volts.**

• Caractéristiques électriques

La caractéristique représente la fonction de transfert d'un opérateur **OUI** technologie **CMOS.**

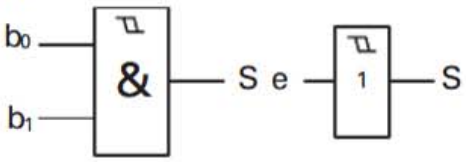
Le changement d'état de la sortie se traduit lorsque la tension d'entrée passe par une **valeur proche de V+/2.**

On a, approximativement :
- $V_{OH} = V+$
- $V_{OL} = 0$ V
- V_{IH} min ≈ 70% V+
- V_{IL} max ≈ 30% de V+



• Portes logiques à entrées trigger

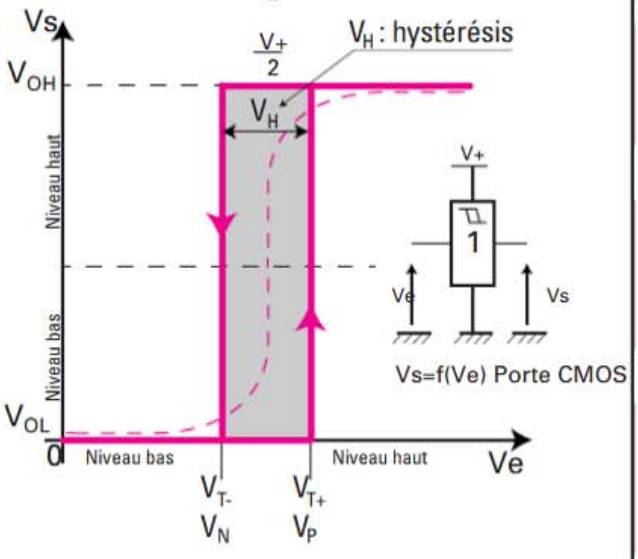
Symboles



En technologie CMOS :
V_{T-} ou V_N ≈ 40 % de V+
V_{T+} ou V_P ≈ 60 % de V+
} V_H ≈ 20 % de V+

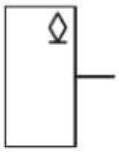
En technologie TTL : (alimentation fixe 5 V)
V_{T-} ou V_N ≈ 0,8 V
V_{T+} ou V_P ≈ 1,6 V
} V_H ≈ 0,8 V

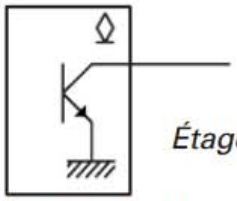
V_H = hystérésis = $V_{T+} - V_{T-}$



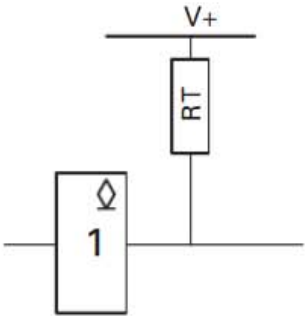
• Portes logiques à collecteur ouvert

Symbole





Étage de sortie



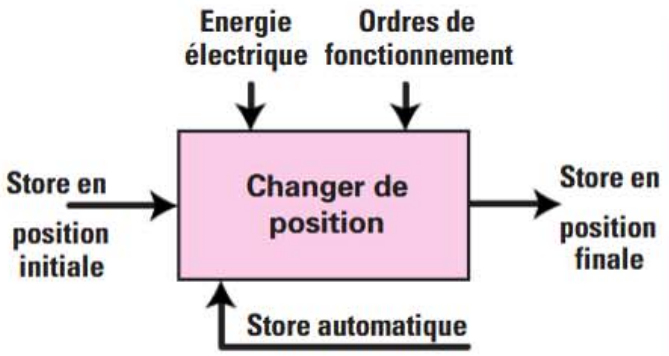
- Le niveau logique 0 correspond à une mise à la masse de la sortie.
- Le niveau logique «1» correspond à une mise en l'air de la sortie.

Ce type de portes nécessite impérativement une résistance de « tirage » (PULL Up).
La tension appliquée sur la sortie peut être différente de la tension d'alimentation du circuit.

6.3.4. LOGIQUE COMBINATOIRE

La partie commande d'un système automatisé peut être conçue, totalement ou partiellement, en logique combinatoire.

En logique combinatoire, chaque combinaison des états des variables d'entrée, ou informations d'entrée, ne correspond qu'à un seul ordre en sortie, vers la partie opérative.



• **Exemple** Store automatique
fonctionnement partiel

Cahier des charges

la présence du soleil **ET** le mode de fonctionnement automatique **ET** la **NON**-présence de vent entraînent toujours la descente du store.

s : variable d'entrée représentant la présence du soleil.
a : variable d'entrée représentant le mode automatique.
v : variable d'entrée représentant la présence du vent.
D : variable de sortie représentant le préactionneur de descente du store.

s : capteur soleil	= 0 : pas de soleil = 1 : présence de soleil	photorésistance
v : capteur de vent	= 0 : pas de vent = 1 : présence du vent	anémomètre
a : capteur « mode »	= 0 : mode manuel = 1 : mode automatique	interrupteur

Table de vérité

La table de vérité permet de décoder le fonctionnement d'un système en logique combinatoire. Elle est également l'outil graphique le mieux adapté pour traduire ce fonctionnement en équation. Cette équation s'écrit en associant à chacune des **N** combinaisons d'états logiques des variables d'entrée, l'état logique correspondant de la sortie.
Ce nombre **N** de combinaisons dépend du nombre **n** de variables d'entrée.

$$N = 2^n$$

Combinaison d'états logiques de la ligne où la sortie D est à 1.
s : état logique 1
v : état logique 0
a : état logique 1
} correspondent à l'état logique de la sortie **D**

D'où l'équation pour **D = 1**

$$D = automatique \text{ ET PAS } de\ vent \text{ ET } du\ soleil$$

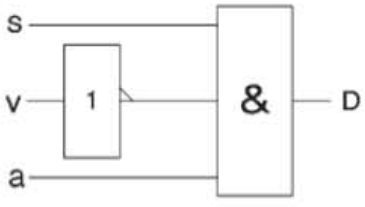
$$D = a.\overline{v}.s$$

a	v	s	D
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	0

Logigramme

Le traitement logique des informations peut nécessiter la mise en oeuvre d'un grand nombre d'opérateurs logiques.

Ces opérateurs sont interconnectés et la représentation graphique de leur association est un **logigramme** ou **diagramme logique** ou **schéma logique**. Pour en simplifier la représentation, on ne dessine pas les alimentations des opérateurs logiques.



6.3.5. L'ALGÈBRE DE BOOLE

• Propriétés des opérateurs de base

L'**algèbre de Boole** est une logique mathématique qui traite des variables binaires pouvant prendre seulement des valeurs **0** et **1**.
Cette algèbre découle de la théorie des ensembles.

Associativité de l'opérateur ET	$a \,.\, (b \,.\, c) = (a \,.\, b) \,.\, c = a \,.\, b \,.\, c$
Associativité de l'opérateur OU	$a + (b + c) = (a + b) + c = a + b + c$
Commutativité de l'opérateur ET	$a \,.\, b = b \,.\, a$
Commutativité de l'opérateur OU	$a + b = b + a$
Distributivité de l'opérateur ET par rapport à l'opérateur OU	$a \,.\, (b + c) = (a \,.\, b) + (a \,.\, c) = a \,.\, b + a \,.\, c$
Distributivité de l'opérateur OU par rapport à l'opérateur ET	$a + (b \,.\, c) = (a + b).(a + c) = a + b \,.\, c$
Élément neutre de l'opérateur ET	$a \,.\, 1 = 1 \,.\, a = a$
Élément neutre de l'opérateur OU	$a + 0 = 0 + a = a$
Élément nul de l'opérateur ET	$a \,.\, 0 = 0 \,.\, a = 0$
Élément nul de l'opérateur OU	$a + 1 = 1 + a = 1$
Idempotence de l'opérateur ET	$a \,.\, a = a$
Idempotence de l'opérateur OU	$a + a = a$
Complémentarité	$a \,.\, \overline{a} = 0$
Complémentarité	$a + \overline{a} = 1$
Complémentarité	$\overline{\overline{a}} = a$
Absorption	$a + a \,.\, b = a$
Simplification	$a + \overline{a} \,.\, b = \overline{b} \,.\, a + b = a + b$
Distributivité	$(a + b).(c + d) = a \,.\, c + b \,.\, c + a \,.\, d + b \,.\, d$
Théorème de De Morgan	$\overline{a + b + c} = \overline{a} \,.\, \overline{b} \,.\, \overline{c}$
Théorème de De Morgan	$\overline{a \,.\, b \,.\, c} = \overline{a} + \overline{b} + \overline{c}$
Redondance	$a \,.\, b + \overline{a} \,.\, c = a \,.\, b + \overline{a} \,.\, c + b \,.\, c$

• Simplification d'une expression algébrique

$S = \overline{a}\cdot\overline{b}\cdot c + \overline{a}\cdot b\cdot\overline{c} + \overline{a}\cdot b\cdot c + a\cdot b\cdot c$	Expression de départ
$S = \overline{a}\cdot(\overline{b}\cdot c + b\cdot\overline{c} + b\cdot c) + a\cdot b\cdot c$	Distributivité $\Rightarrow \overline{a}\cdot\overline{b}\cdot c + \overline{a}\cdot b\cdot\overline{c} + \overline{a}\cdot b\cdot c = \overline{a}\cdot(\overline{b}\cdot c + b\cdot\overline{c} + b\cdot c)$
$S = \overline{a}\cdot[\overline{b}\cdot c + b\cdot(\overline{c} + c)] + a\cdot b\cdot c$	Distributivité $\Rightarrow b\cdot\overline{c} + b\cdot c = b\cdot(\overline{c} + c)$
$S = \overline{a}\cdot(\overline{b}\cdot c + b\cdot 1) + a\cdot b\cdot c$	Complémentarité $\Rightarrow \overline{c} + c = 1$
$S = \overline{a}\cdot(\overline{b}\cdot c + b) + a\cdot b\cdot c$	Élément neutre $\Rightarrow b\cdot 1 = b$
$S = \overline{a}\cdot(c + b) + a\cdot b\cdot c$	Simplification $\Rightarrow \overline{b}\cdot c + b = b + \overline{b}\cdot c = b + c$
$S = \overline{a}\cdot b + \overline{a}\cdot c + a\cdot b\cdot c$	Distributivité de l'opérateur ET par rapport à l'opérateur OU
$S = \overline{a}\cdot b + c\cdot(\overline{a} + a\cdot b)$	Distributivité de l'opérateur ET par rapport à l'opérateur OU
$S = \overline{a}\cdot b + c\cdot(\overline{a} + b)$	Simplification $\Rightarrow \overline{a} + a\cdot b = \overline{a} + b$
$S = \overline{a}\cdot b + \overline{a}\cdot c + b\cdot c$	Expression simplifiée

6.3.6. THÉORÈME DE DE MORGAN

Les **lois de De Morgan** sont des identités entre propositions logiques. Elles ont été formulées par le mathématicien britannique **Augustus De Morgan (1806-1871)**.

Cette solution permet de n'utiliser qu'un seul type d'opérateur logique. Elle impose une transformation de l'équation par l'application du théorème de De Morgan.

Complémentation d'un produit logique

Le complément d'un produit logique est égal à la somme logique des termes complémentés de ce produit :

$$\overline{a.b.c} = \overline{a} + \overline{b} + \overline{c}$$

Complémentation d'une somme logique

Le complément d'une somme logique est égal au produit logique des termes complémentés de cette somme :

$$\overline{a+b+c} = \overline{a}.\overline{b}.\overline{c}$$

Exemples :

Dans cet exemple, il n'y a pas de barre, il faut en ajouter une de part et d'autre du signe égale pour pouvoir appliquer le théorème de De Morgan.

$$S = a.\overline{c}.d$$

$$\overline{S}_{somme} = \overline{a.\overline{c}.d} \Rightarrow \overline{S} = \overline{a} + \overline{\overline{c}} + \overline{d} \Rightarrow \overline{\overline{S}} = \boxed{S = \overline{\overline{a} + \overline{\overline{c}} + \overline{d}}}$$

Pour la transformation en produit, il ne faut traiter que le contenu de la parenthèse.

$$S = a.\overline{c}.(d+f)$$

$$S_{produit} = a.\overline{c}.\overline{(\overline{d+f})} \Rightarrow \boxed{S = a.\overline{c}.(\overline{\overline{d}.\overline{f}})}$$

$$\overline{\overline{S}}_{somme} = \overline{\overline{a.\overline{c}.(d+f)}} \Rightarrow S = \overline{\overline{a} + \overline{\overline{c}} + \overline{(d+f)}} \Rightarrow \boxed{S = \overline{\overline{a} + c + \overline{(d+f)}}}$$

Priorité

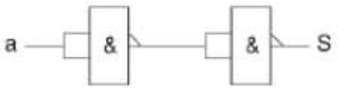
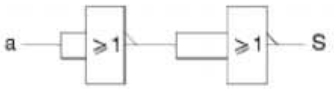
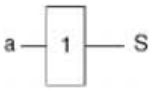
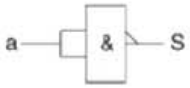
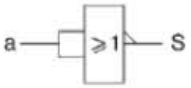
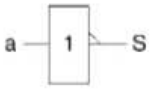
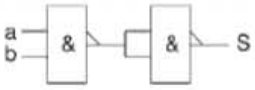
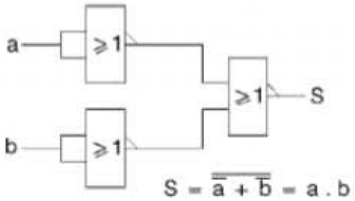
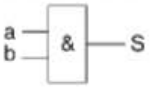
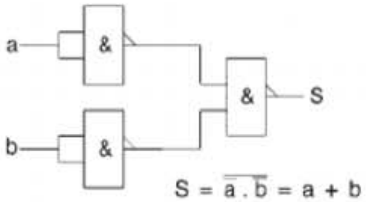
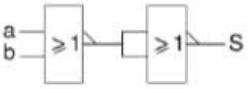
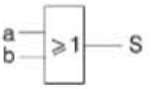
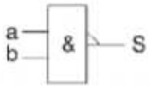
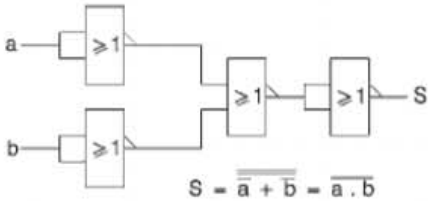
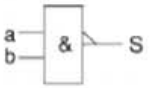
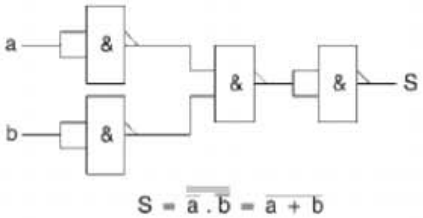
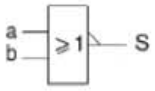
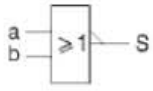
Pour faciliter leur compréhension, les opérations sont soumises aux mêmes règles que les opérations arithmétiques, la fonction ET (produit logique) est ainsi prioritaire par rapport à la fonction OU (somme logique). On peut s'aider de parenthèses dans les opérations. **Une barre est équivalente à une parenthèse.**

$$S = a.\overline{b.(c+d)} \Leftrightarrow S = a.\left(\overline{b.(c+d)}\right)$$

$$S_{somme} = a.\overline{b} + \overline{(c+d)} \Rightarrow S = \overline{\overline{a.\overline{b}}} + \overline{(c+d)} \Rightarrow S = \overline{\overline{a} + \overline{\overline{b}}} + \overline{(c+d)} \Rightarrow \boxed{S = \overline{\overline{a} + b} + \overline{(c+d)}}$$

$$S_{produit} = a.\overline{b.\overline{(c+d)}} \Rightarrow \boxed{S = a.\overline{b.(\overline{\overline{c}.\overline{d}})}}$$

Théorème de De Morgan

	Fonctions réalisées avec des portes ET NON	Fonctions réalisées avec des portes OU NON	
Fonction OUI	 $S = \overline{\overline{a}} = a$	 $S = \overline{\overline{a}} = a$	 $S = a$
Fonction NON	 $S = \overline{a \cdot a} = \overline{a}$	 $S = \overline{a + a} = \overline{a}$	 $S = \overline{a}$
Fonction ET	 $S = \overline{\overline{a \cdot b}} = a \cdot b$	 $S = \overline{\overline{a} + \overline{b}} = a \cdot b$	 $S = a \cdot b$
Fonction OU	 $S = \overline{\overline{a \cdot b}} = a + b$	 $S = \overline{\overline{a + b}} = a + b$	 $S = a + b$
Fonction ET NON	 $S = \overline{a \cdot b}$	 $S = \overline{\overline{a} + \overline{b}} = \overline{a \cdot b}$	 $S = \overline{a \cdot b}$
Fonction OU NON	 $S = \overline{\overline{a \cdot b}} = \overline{a + b}$	 $S = \overline{a + b}$	 $S = \overline{a + b}$

6.3.7. SIMPLIFICATION

• Simplification par la méthode de Karnaugh

Construction des tableaux

La méthode de Karnaugh utilise l'identité : $a.b + a.\overline{b} = a$ $\quad a.(b+\overline{b}) \Rightarrow a(1) \Rightarrow a$

Elle consiste à mettre en évidence, par une méthode graphique, tous les termes produits d'une fonction qui ne diffèrent que par l'état d'une seule variable (termes dits adjacents). Ainsi les deux produits **ab̄c** et **ab̄c̄** sont adjacents car ils ne diffèrent que par **c**.

On a : $a\overline{b}.c + a\overline{b}.\overline{c} = a\overline{b}.(c+\overline{c}) = a\overline{b}$

On a supprimé ainsi la variable **c** et l'on a un seul produit au lieu de deux.
Si une fonction dépend de n variables, il y a au maximum 2^n produits.
Chacun de ces 2^n produits est représenté par une case d'un tableau, construit de telle manière que les lignes soient adjacentes entre elles ainsi que les colonnes.

b \ a	0	1
0	$\overline{a}\overline{b}$	$a\overline{b}$
1	$\overline{a}b$	ab

Tableau à 2 variables

c \ ba	00	01	11	10
0	$\overline{a}\overline{b}\overline{c}$	$a\overline{b}\overline{c}$	$ab\overline{c}$	$\overline{a}b\overline{c}$
1	$\overline{a}\overline{b}c$	$a\overline{b}c$	abc	$\overline{a}bc$

Tableau à 3 variables

dc \ ba	00	01	11	10
00				
01				
11				
10				

Tableau à 4 variables

Le tableau à **2** variables possède 2^2 = 4 cases.
Le tableau à **3** variables possède 2^3 = 8 cases.
Les tableaux à **4**, **5**, **6** variables possèdent **16**, **32**, **64** cases.
Pour un tableau à **4** variables (**a**, **b**, **c**, **d**), on vérifie que l'on passe d'une colonne à la suivante en ne changeant d'état qu'une seule variable et que l'on passe d'une ligne à la ligne suivante en ne changeant d'état qu'une seule variable (**code Gray**).

• Passage de la table de vérité au tableau de Karnaugh

Le passage du tableau de vérité au tableau de Karnaugh consiste à écrire des **1** dans les cases correspondant aux combinaisons où la fonction vaut **1** et à écrire des **0** dans les autres cases.

Attention ! cette méthode n'est valable que si la table de vérité est écrite en binaire naturel.

	b3	b2	b1	b0	S
Première ligne	0	0	0	0	1
	0	0	0	1	0
	0	0	1	0	1
	0	0	1	1	0
Deuxième ligne	0	1	0	0	0
	0	1	0	1	1
	0	1	1	0	0
	0	1	1	1	0
Quatrième ligne	1	0	0	0	1
	1	0	0	1	1
	1	0	1	0	1
	1	0	1	1	1
Troisième ligne	1	1	0	0	0
	1	1	0	1	1
	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	0

Première ligne		
0 0 0 0	1	*colonne 1*
0 0 0 1	0	*colonne 2*
0 0 1 0	1	*colonne 4*
0 0 1 1	0	*colonne 3*

S \ b3 b2 \ b1 b0	00	01	11	10
00	1	0	0	1
01	0	1	0	0
11	0	1	0	0
10	1	1	1	1

Simplification

• Mise en œuvre de la méthode

- Transposer la table de vérité dans le tableau de Karnaugh correspondant (voir page précédente).
- Réaliser les groupements possibles de **1, 2, 4, 8** termes adjacents.
- Réaliser le **minimum de groupements**, chaque groupement rassemblant le **maximum de termes**.
- **Utiliser tous les termes**.
- **Les mêmes termes peuvent participer à plusieurs groupements** (car x + x + x = x).

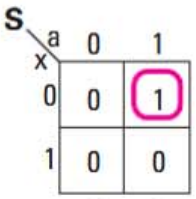
- Dans un groupement de **un terme**, on ne peut éliminer **aucune variable**. On écrit donc le produit des variables directes et inverses caractérisant la case.

- Dans un groupement de **deux termes,** on élimine la variable qui change d'état et on conserve le produit des variables directes ou inverses qui n'ont pas changé d'état dans le groupement.

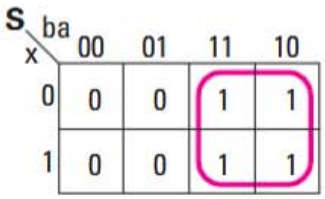
- Dans un groupement de **quatre termes**, on élimine les **deux variables** qui changent d'état et on conserve le produit des variables directes ou inverses qui n'ont pas changé d'état dans le groupement.

- On élimine **trois variables** dans un groupement de **huit termes**.

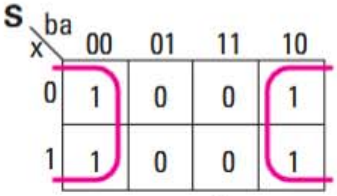
- L'expression logique finale est la réunion des groupements après élimination des variables ayant changé d'état.



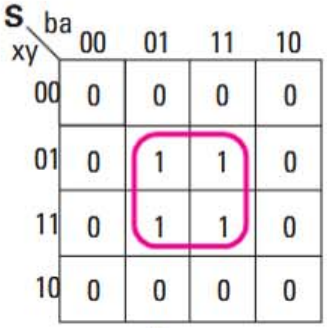
S = a$\bar{x}$



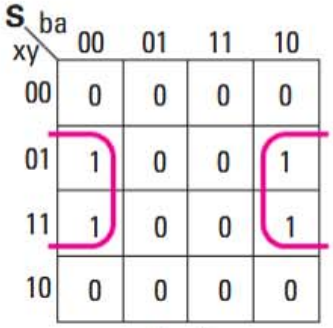
S = b



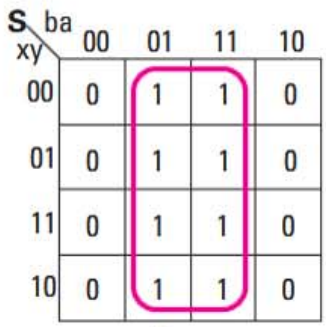
S = $\bar{a}$



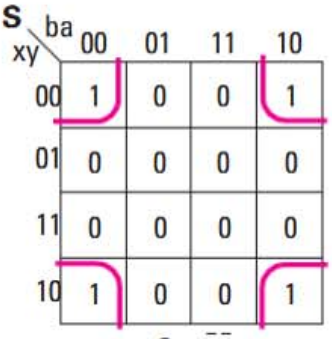
S = ay



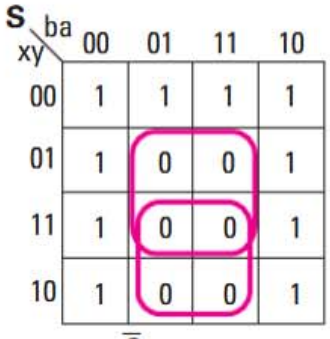
S = $\bar{a}$y



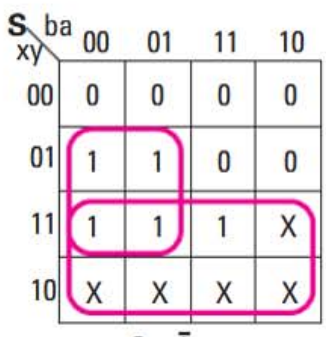
S = a



S = $\bar{a}\bar{y}$



$\bar{S}$ = ay + ax
S = $\overline{ay + ax}$



S = $\bar{b}$y + x

Remarques

Si la table de vérité est **incomplètement définie**, on affecte aux cases non définies des **X** représentant **1** ou **0** selon que cela favorise ou non le groupement.

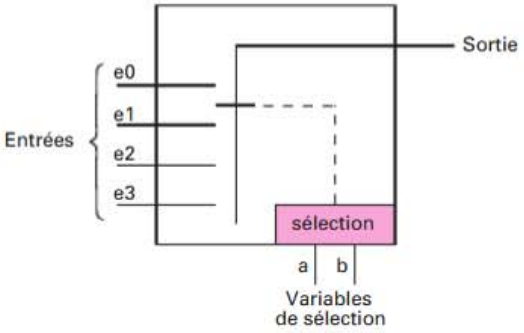
Il est possible de **regrouper les «0»**, dans ce cas il faut écrire $\overline{S} = a.y + a.x \Rightarrow S = \overline{a.y + a.x}$

• Fonction multiplexage

La **fonction multiplexage** consiste à aiguiller, vers une sortie, une information à caractère logique ou analogique, sélectionnée parmi **n** entrées.

Le **multiplexeur** peut être assimilé à un commutateur à **n** positions.

Principe



Symbole logique

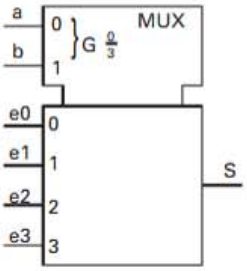


Table de vérité

b	a	S
0	0	e_0
0	1	e_1
1	0	e_2
1	1	e_3

Exemples de références constructeur

– **74 150** : multiplexeur **16** vers **1** ;
– **74 152** : multiplexeur **8** vers **1** ;
– **74 153** : double multiplexeur **4** vers **1** ;
– **74 157** : quadruple multiplexeur **2** vers **1**.

Remarques

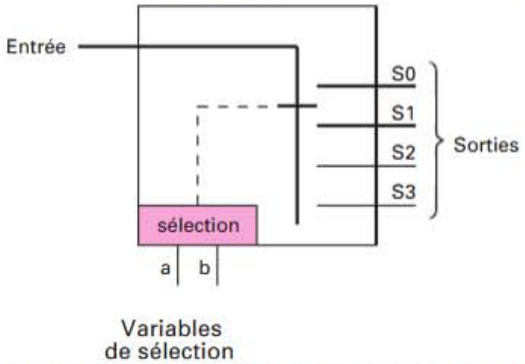
Il existe des circuits fonctionnant avec des signaux analogiques. Dans ce type de circuit, l'information circule de l'entrée vers la sortie ou de la sortie vers l'entrée. Ils sont donc désignés sous le nom de : **multiplexeurs - démultiplexeurs analogiques**.

Exemples : CD4051 8 voies, CD4052 2x4 voies, CD4053 4x2 voies.

• Fonction démultiplexage

La fonction démultiplexage consiste à aiguiller une entrée vers une sortie, sélectionnée parmi **n** sorties.

Principe



Variables
de sélection

Symbole logique

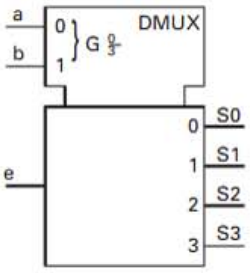


Table de vérité

b	a	S_0	S_1	S_2	S_3
0	0	e	0	0	0
0	1	0	e	0	0
1	0	0	0	e	0
1	1	0	0	0	e

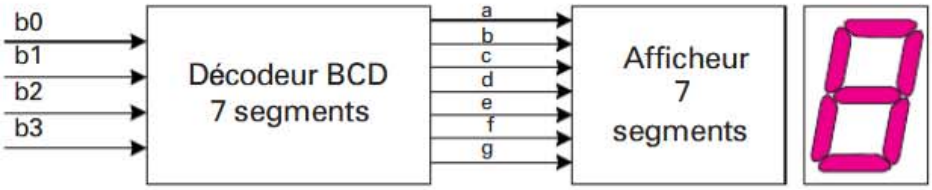
Exemples de références constructeur

– **74 154** : démultiplexeur **4** vers **16** ;
– **74 42** : démultiplexeur **BCD 4** vers **10** ;
– **74 138** : démultiplexeur **3** vers **8** ;
– **74 139** : double démultiplexeur **2** vers **4**.

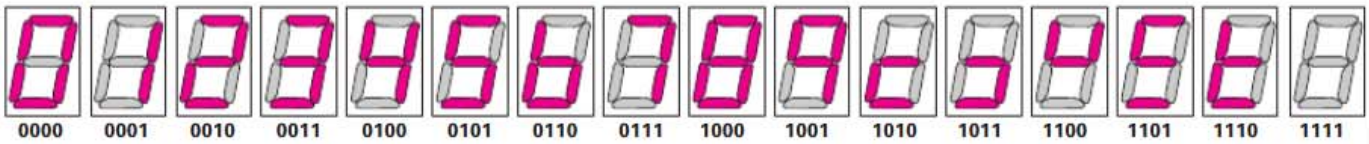
6.3.8. TRANSCODEUR BCD 7 SEGMENTS

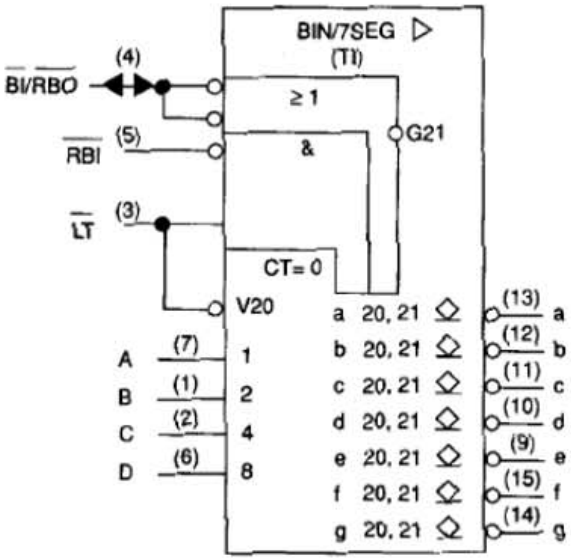
• Afficheurs 7 segments

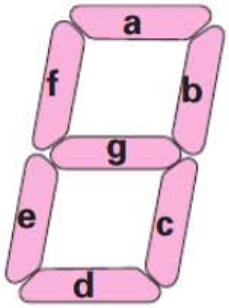
Le montage suivant est constitué d'un circuit qui transcode le binaire BCD en un code 7 segments. Ce code permet d'allumer les DEL d'un afficheur 7 segments afin d'en composer un des 10 chiffres.



Exemple de circuit 7447 : Décodeur BCD pour afficheur 7 segments







Caractéristiques

- Niveau actif L (L = 0 = bas)
- Sortie : collecteur ouvert
  courant maximum 24 mA
  tension maximale 15 V
- Puissance dissipée 35 mW
- Pour afficheur à anode commune
- Boîtier 16 broches
- Vcc (16) (alimentation 5V)
- GND (8) (masse)

Sortie active au niveau bas (L = 0 = niveau bas, H = 1 = niveau haut)

Décimal ou Fonction	Entrées						BI/RBO/	Sorties						
	LT	RBI	D	C	B	A		a	b	c	d	e	f	g
0	H	H	L	L	L	L	H	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF
1	H	X	L	L	L	H	H	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
2	H	X	L	L	H	L	H	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON
3	H	X	L	L	H	H	H	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON
4	H	X	L	H	L	L	H	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON
5	H	X	L	H	L	H	H	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON
6	H	X	L	H	H	L	H	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
7	H	X	L	H	H	H	H	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
8	H	X	H	L	L	L	H	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
9	H	X	H	L	L	H	H	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON
10	H	X	H	L	H	L	H	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON
11	H	X	H	L	H	H	H	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON
12	H	X	H	H	L	L	H	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
13	H	X	H	H	L	H	H	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON
14	H	X	H	H	H	L	H	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
15	H	X	H	H	H	H	H	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
BI	X	X	X	X	X	X	L	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
RBI	H	L	L	L	L	L	L	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
LT	L	X	X	X	X	X	H	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

6.4. LOGIQUE SÉQUENTIELLE

• Définition

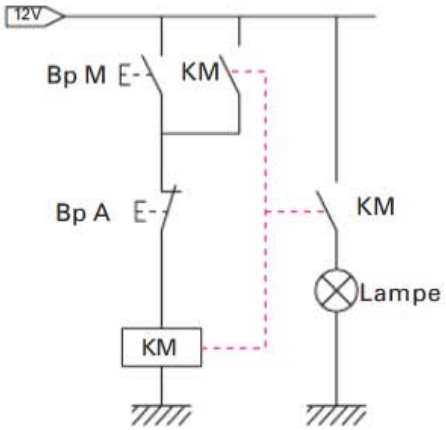
Un système combinatoire est tel que l'état de ses sorties ne dépende que de l'état des entrées. Il peut donc être représenté par une table de vérité ou un tableau de Karnaugh, pour chaque sortie. Il est donc possible d'écrire l'équation logique de chaque sortie, en fonction seulement des entrées.

Un système séquentiel dépend non seulement des entrées, mais aussi des états précédents du système (notion de séquence et d'étapes). On retrouvera les mêmes états des entrées à plusieurs étapes, alors que les sorties seront différentes.

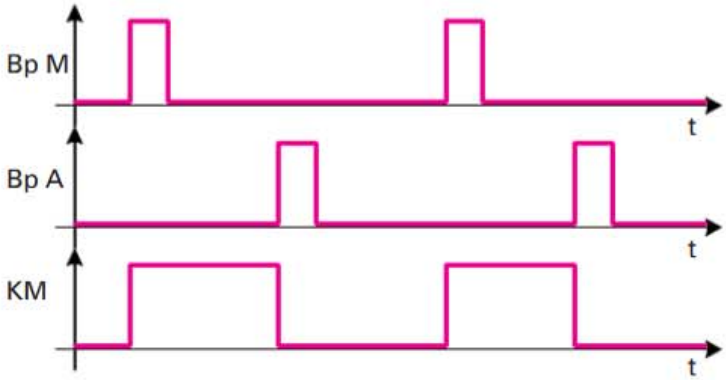
Les opérateurs de base sont les bascules, et donnent naissance à de nombreux dispositifs :
- Le bistable RS.
- Les bascules D déclenchées sur front.
- Les compteurs, décompteurs et diviseurs.
- Les fonctions complexes réalisées par association de bascules (registre à décalage).

• Fonction mémoire

Schéma structurel :



Chronogrammes :



- L'action sur le bouton-poussoir «Bp M» alimente la bobine du relais KM
- Le contact «KM» auto-alimente le relais et alimente la lampe.
- L'action précédente a été mémorisée.
- L'action sur le bouton-poussoir «Bp A» coupe l'alimentation du relais KM.
- L'action précédente a été mémorisée.

Table de vérité :

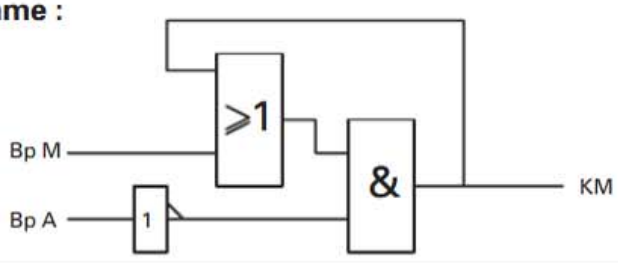
Bp M	Bp A	KM	Commentaire
0	0	$KM_{(n-1)}$	Etat mémoire
0	1	0	Arrêt
1	0	1	Marche
1	1	0	Arrêt *

** Le relâchement des deux boutons poussoirs en même temps ne permet pas de savoir quelle sera la combinaison suivante. Cette combinaison «1» «1» est à éviter.*

Equations logiques :

$$KM = (BpM + KM).\overline{BpA}$$
$$Lampe = KM$$

Logigramme :



Logique séquentielle

Transformation de l'équation :
Pour n'utiliser qu'un type d'opérateur logique, on opère une transformation à l'aide du théorème de De Morgan.

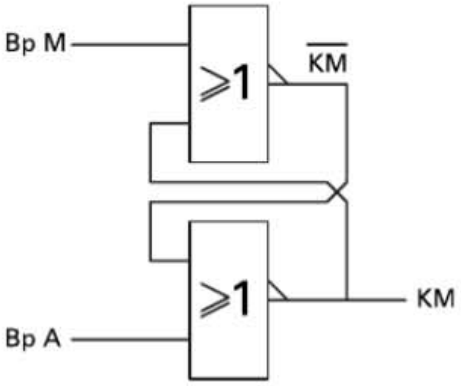
En somme logique :

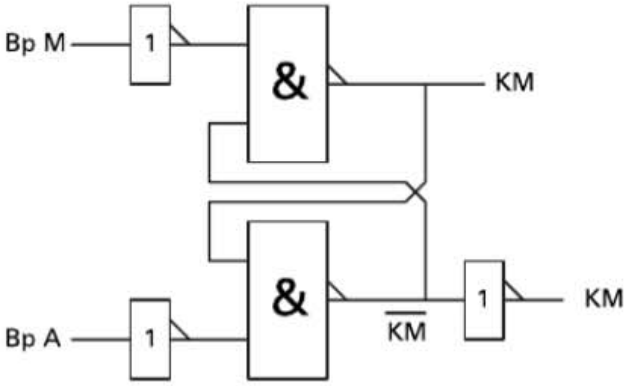
$$KM = (BpM + KM).\overline{BpA}$$
$$KM = \overline{\overline{(BpM + KM).\overline{BpA}}}$$
$$KM = \overline{\overline{(BpM + KM)} + BpA}$$

En produit logique :

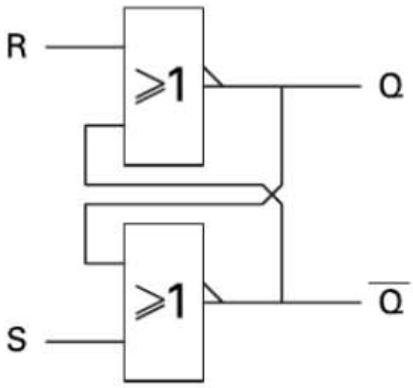
$$KM = (BpM + KM).\overline{BpA}$$
$$KM = \overline{\overline{(BpM + KM).\overline{BpA}}}$$
$$KM = \overline{\overline{(BpM}.\overline{KM}).\overline{BpA}}$$
$$KM = \overline{\overline{\overline{(BpM}.\overline{KM}).\overline{BpA}}}$$

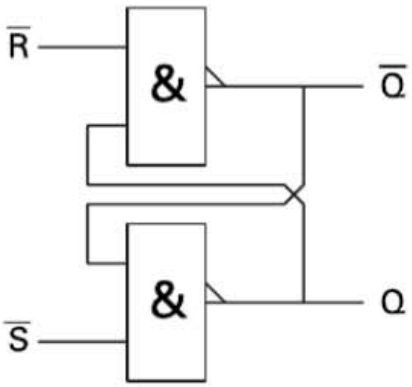
Logigrammes





D'une façon générale :
- Bp M est « **la mise à 1** » en anglais **S**ET, on donnera le nom de **S** pour cette entrée.
- Bp A est « **la mise à 0** » en anglais **R**ESET, on donnera le nom de **R** pour cette entrée.
- Comme on a déjà affecté la lettre S, la sortie se nommera Q
- La sortie complémentaire $\overline{Q}$ **(Q barre)**

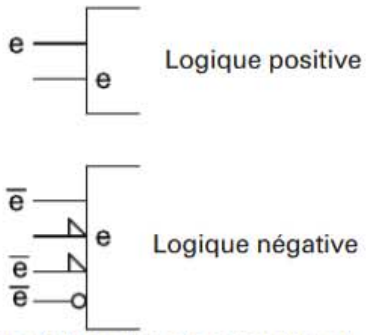




Rappel :

Logique positive :
- un «zéro» 0 : l'entrée est inactive
- un «un» 1 : l'entrée est active

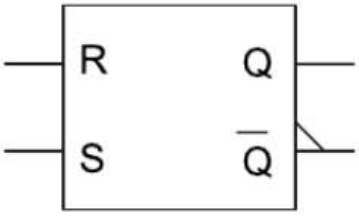
Logique négative :
- un «zéro» 0 : l'entrée est active
- un «un» 1 : l'entrée est inactive



Attention, l'indication barre ou le cercle ou le triangle peuvent être omis, se référer à la table de vérité. Les indications peuvent être redondantes.

6.4.1. BISTABLES RS, RSH

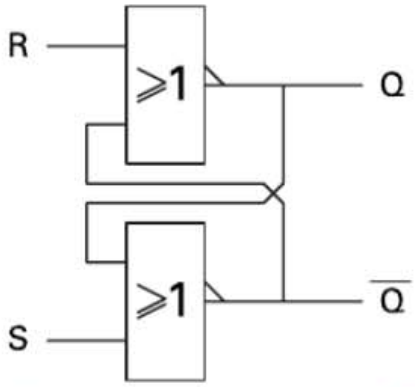
• Bistable générique (la structure interne est inconnue)



R	S	Q	$\overline{Q}$	Commentaire
0	0	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	Etat mémoire
0	1	1	0	Mise à 1
1	0	0	1	Mise à 0
1	1	?	?	Indéterminé ne pas utiliser

• Bistable constitué de portes OU-NON

Au vu de la notation des entrées, c'est de la logique positive

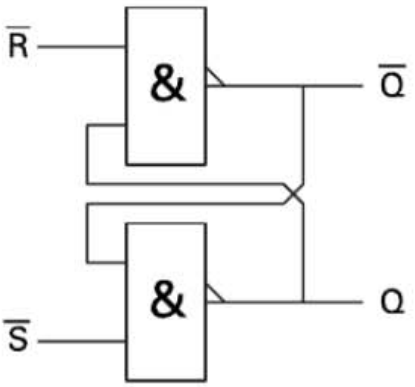


R	S	Q	$\overline{Q}$	Commentaire
0	0	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	Etat mémoire
0	1	1	0	Mise à 1
1	0	0	1	Mise à 0
1	1	0	0	instable ne pas utiliser

Priorité à la désactivation

• Bistable constitué de portes ET-NON

Au vu de la notation des entrées, c'est de la logique négative



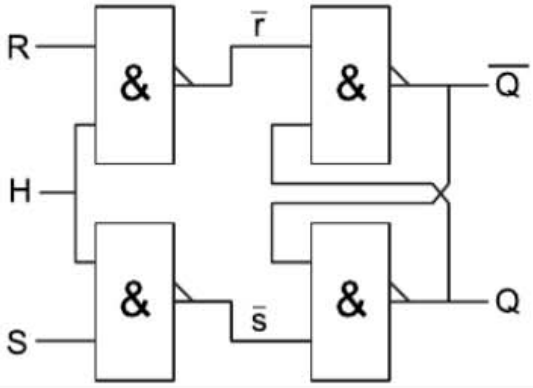
$\overline{R}$	$\overline{S}$	Q	$\overline{Q}$	Commentaire
0	0	1	1	instable ne pas utiliser
0	1	0	1	Mise à 0
1	0	1	0	Mise à 1
1	1	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	Etat mémoire

Priorité à l'activation

• Bistable RSH (aussi appelé RST)

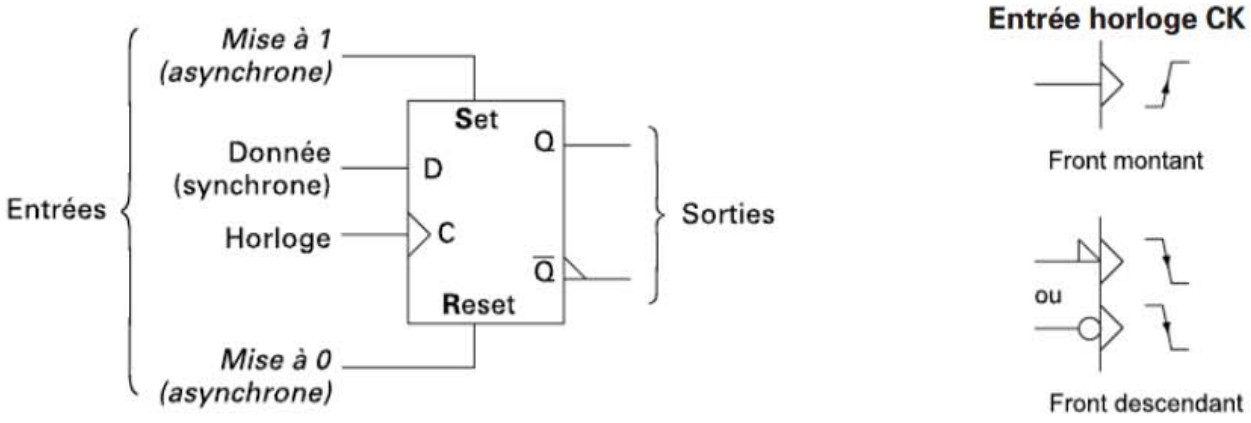
C'est un bistable RS auquel on a ajouté une troisième entrée, généralement notée H (ou CLK pour horloge). Cette troisième entrée a la fonction suivante :

- Si H est au niveau logique 0, la sortie maintient son état, quels que soient les niveaux appliqués aux entrées R et S ;
- Si H est à 1, le bistable RS répond normalement aux commandes appliquées à ses entrées.



H	R	S	$\overline{r}$	$\overline{s}$	Q	$\overline{Q}$	Commentaire
0	0	0	1	1	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	*Etat mémoire*
0	0	1	1	1	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	*Etat mémoire*
0	1	0	1	1	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	*Etat mémoire*
0	1	1	1	1	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	*Etat mémoire*
1	0	0	1	1	$Q_{(n-1)}$	$\overline{Q}_{(n-1)}$	*Etat mémoire*
1	0	1	1	0	1	0	*Mise à «1»*
1	1	0	0	1	0	1	*Mise à «0»*
1	1	1	0	0	1	1	instable *ne pas utiliser*

6.4.2. BASCULE D



Une entrée **Set** de **mise à 1 asynchrone**.
Une entrée **Reset** de **mise à 0 asynchrone**.
Une entrée **horloge CK ou C, qui valide l'entrée D**, active ici **sur un front** montant.
Une entrée **D (donnée) synchrone**.
Deux sorties complémentaires Q et $\overline{Q}$.

La table de vérité montre le fonctionnement de la bascule D. **Les trois premières lignes** correspondent au **fonctionnement asynchrone** (comme un bistable RS) et les trois suivantes au fonctionnement synchrone. Cette table s'interprète de la façon suivante :

- Cas 0 : **Set = 1** (actif), **Reset = 0** (inactif) : la bascule passe à **1**, quel que soit l'état de CK et D.
- Cas 1 : **Set = 0** (inactif), **Reset = 1** (actif) : la bascule passe à 0, quel que soit l'état de CK et D.
- Cas 2 : **Set = 1** (actif), **Reset = 1** (actif). Les deux sorties prennent la valeur **1 ($Q = \overline{Q} = 1$)**
  mais cet état n'est pas stable quand Set et Reset reprennent leur état inactif. On rencontre les mêmes phénomènes que pour la bascule BISTABLE RS avec deux commandes simultanées.

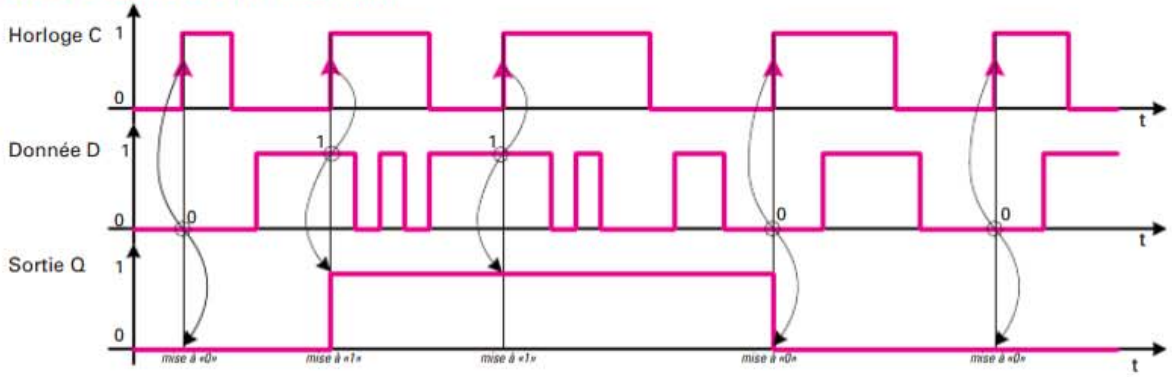
• Fonctionnement en mode synchrone

Au front d'horloge (ici front montant), la donnée présente sur **D** est transférée en sortie.
En l'absence de front d'horloge, l'état de la bascule se conserve.

• Table de vérité de la bascule D

	Cas	Set	Reset	Clock	D	Q	Remarques
Mode asynchrone	0	1	0	X	X	1	Mise à 1
	1	0	1	X	X	0	Mise à 0
	2	1	1	X	X	1	État instable
Mode synchrone	3	0	0	↑	0	0	Mise à 0
	4	0	0	↑	1	1	Mise à 1
	5	0	0	0 ou 1	X	Q	Maintien

• Diagramme de fonctionnement



• Montage anti-rebond avec bistables R S

Symbole générique

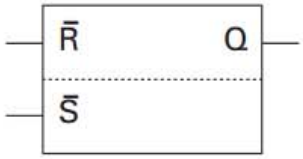


Schéma structurel avec des portes ET NON

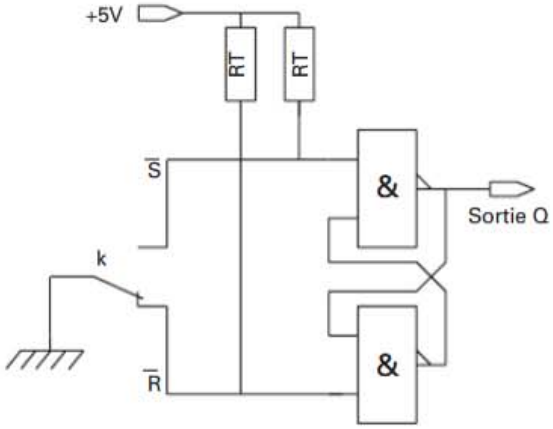
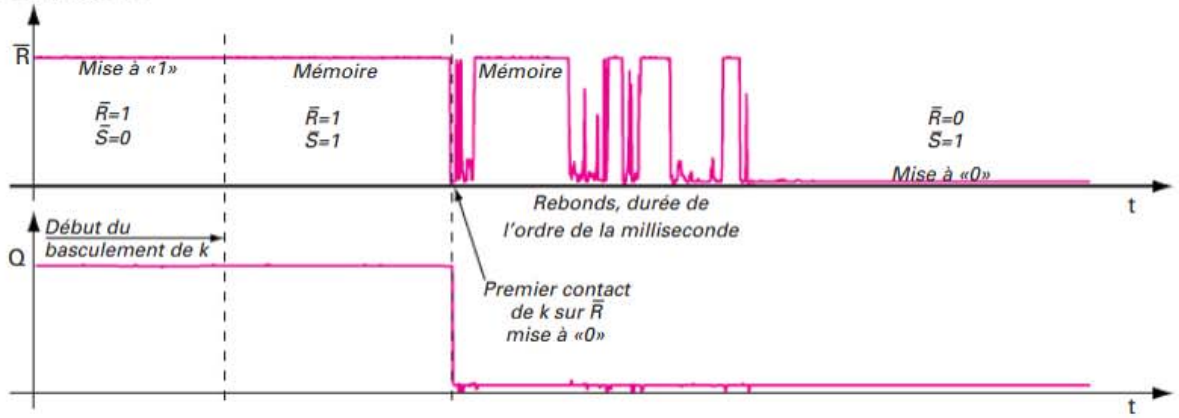


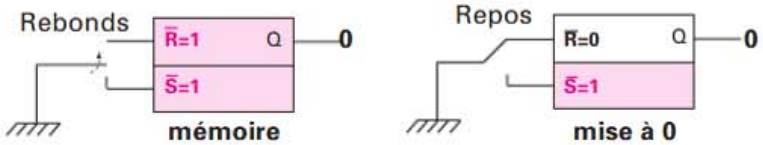
Table de vérité

R	S	Q	Remarques
0	0	X	Inexploité
0	1	0	Mise à 0
1	0	1	Mise à 1
1	1	Qn-1	Maintien

Chronogrammes

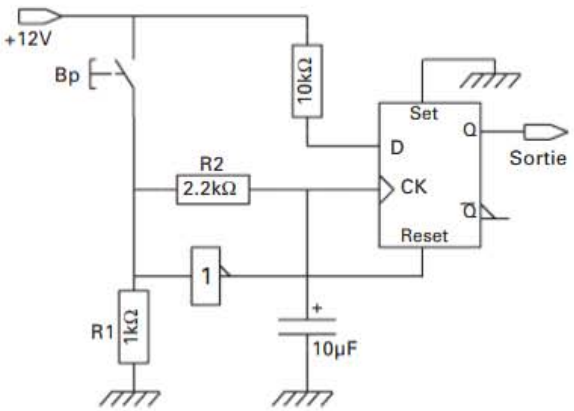


Séquence de fonctionnement

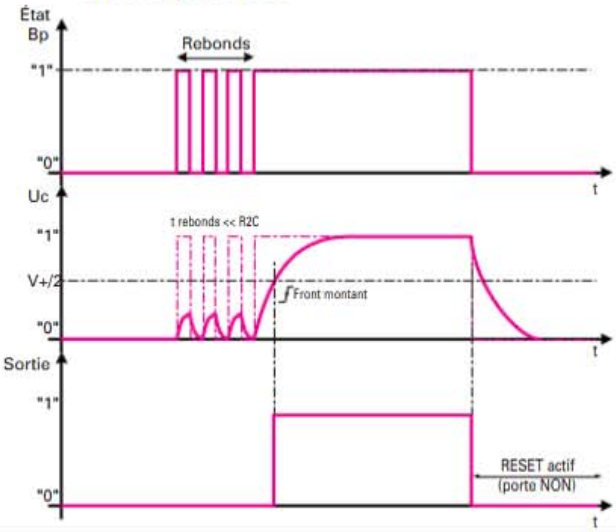


• Montage anti-rebond avec bascules D

Schéma structurel

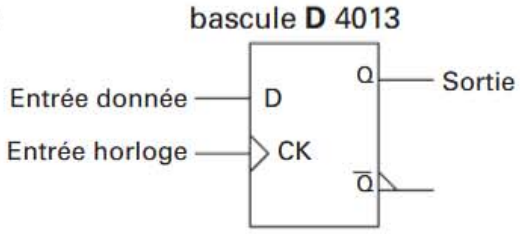


Chronogrammes



• Temps de montée et temps de descente

Exemple d'application d'un circuit séquentiel :
V+ = 10 V, V_M = 5 V
F_{max} = 12,5 MHz
tr, tf = 10 µs max
Tw = 40 ns
T_{PHL}, T_{PLH} = 80 ns
T_{su} = 15 ns



• Paramètres dynamiques de commutation

f_{max} Fréquence d'horloge – rapport cyclique de 50 %. Elle doit faire commuter les sorties entre 10 % et 90 % de la tension d'alimentation.

tr tf Temps de montée (tr) et temps de descente (tf) de l'horloge. Mesuré entre 10 % et 90 % de la tension d'alimentation.

V_M Tension de transition entre un état logique bas et un état logique haut (50 % en CMOS).

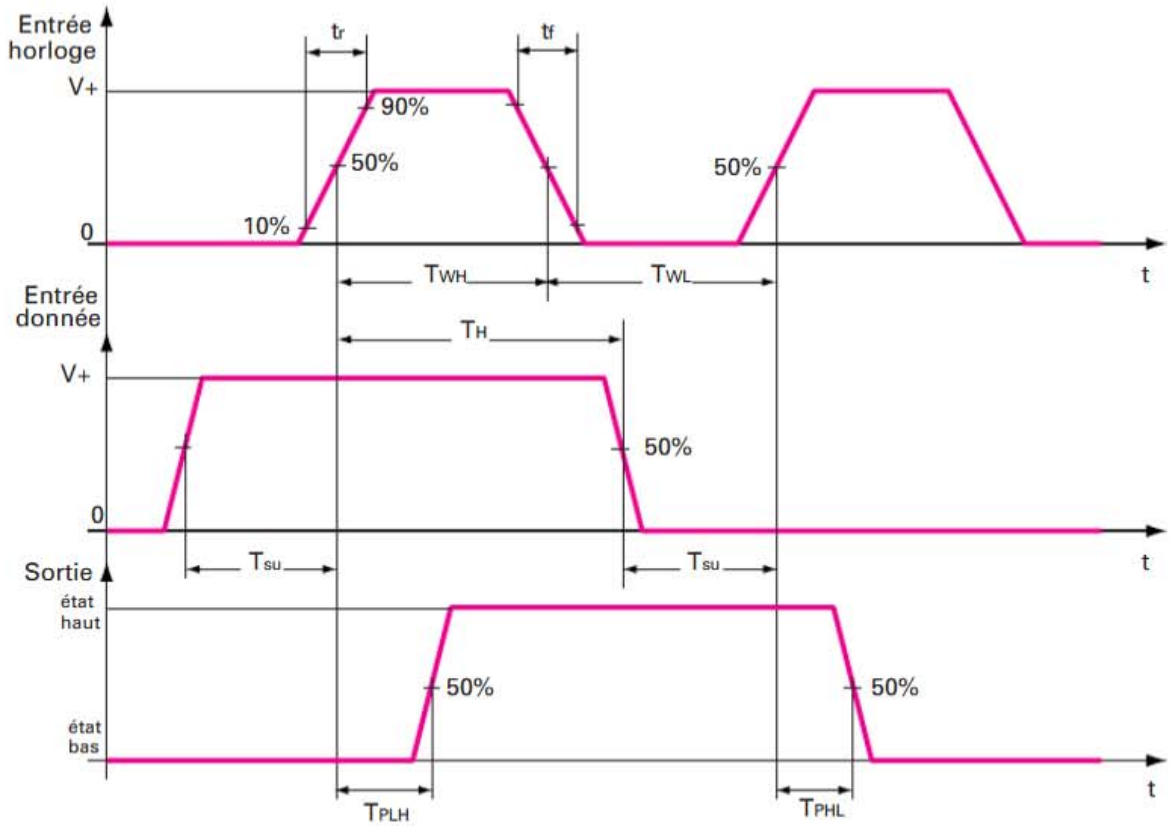
Tw Largeur d'impulsion. Temps compris entre V_M du front montant et V_M du front descendant.

T_{PLH} Temps de transition entre le niveau bas (L = *low*) et le niveau haut de 2 signaux à V_M.

T_{PHL} Temps de transition entre le niveau haut (H = *high*) et le niveau bas de 2 signaux à V_M.

Th (ou t_{hold}) Temps de maintien. Temps pendant lequel la donnée doit rester présente après l'impulsion d'horloge à V_M.

T_{su} Temps de prépositionnement. Temps pendant lequel la donnée doit être présente pour être prise en compte par l'impulsion de commande à V_M.



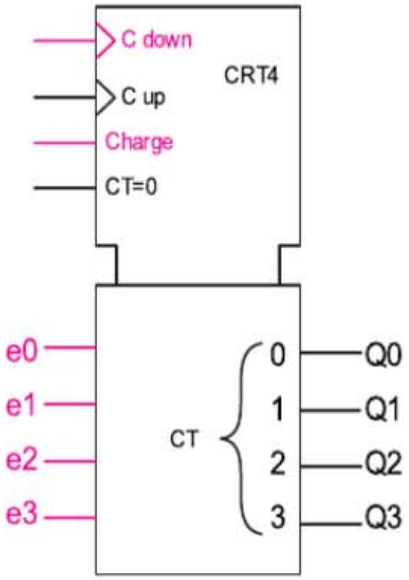
6.4.3. LES COMPTEURS

• Introduction

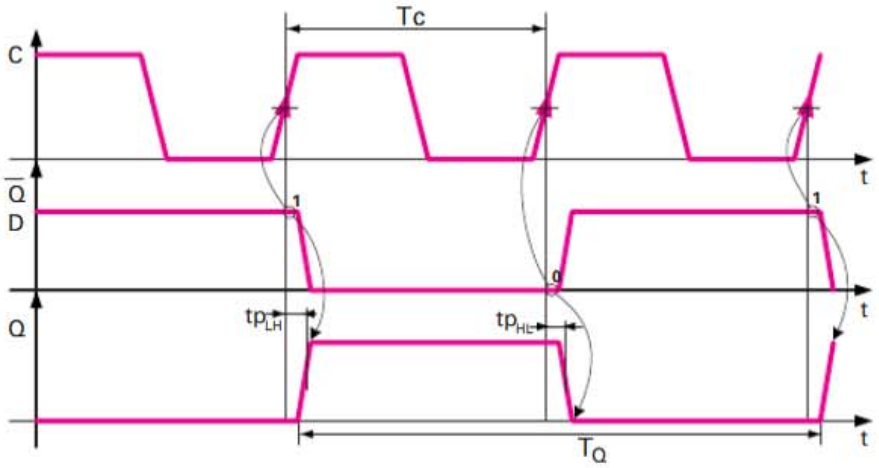
Le **compteur** est un registre dont le contenu passe de la valeur **n à n + 1** après application d'une impulsion de progression appelée communément **horloge** (c, h, Ck, Clk).
Le symbole général d'un compteur est donné ci-contre, il comprend :

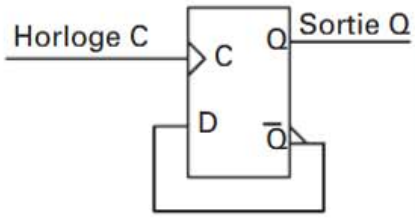
- une zone supérieure de contrôle où l'on trouve l'horloge, la remise à zéro et éventuellement d'autres commandes particulières comme une horloge de décomptage ou une entrée de chargement.

- une zone inférieure où l'on trouve les sorties à droite et dans certains cas particuliers des entrées de présélection à gauche.



• Diviseur élémentaire par deux





L'horloge réagit sur un front montant qui est la transition d'un état bas vers un état haut.
Ce front a l'avantage d'être unique et ne peut produire qu'un seul événement.

Fonctionnement
La bascule est au repos, sa sortie est à **0** et sa sortie complémentée est à **1**.
Au front montant de l'horloge, la donnée présente en **D** est transférée en sortie.
Il faudra un temps $\mathbf{tp_{LH}}$ pour transmettre l'information prélevée en **D** vers la sortie.
À cet instant, le front montant sera dépassé et l'information ne changera d'état qu'au prochain front d'horloge.
$\mathbf{tp_{LH}}$ est le temps de propagation de la bascule, il est faible (10 à 300 ns).

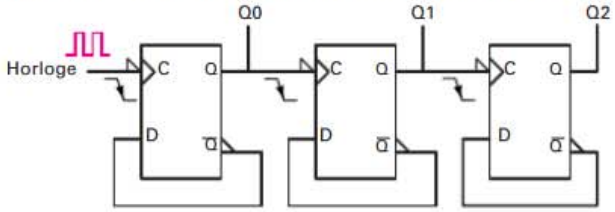
Remarques
On peut constater que la période de sortie $\mathbf{T_Q}$ est deux fois plus grande que la période d'horloge.

Il faudra deux périodes d'horloge pour obtenir une période de sortie.
La fréquence de sortie est divisée par 2 par rapport à la fréquence d'horloge :
c'est un diviseur de fréquence par 2.

$$T_Q = 2\,T_c \qquad f_Q = \frac{f_c}{2}$$

• Structure interne d'un compteur asynchrone trois bits

Soit un montage constitué de **3 bascules D** montées en diviseur par **2**.
La sortie du premier diviseur sert d'horloge au second diviseur, etc.



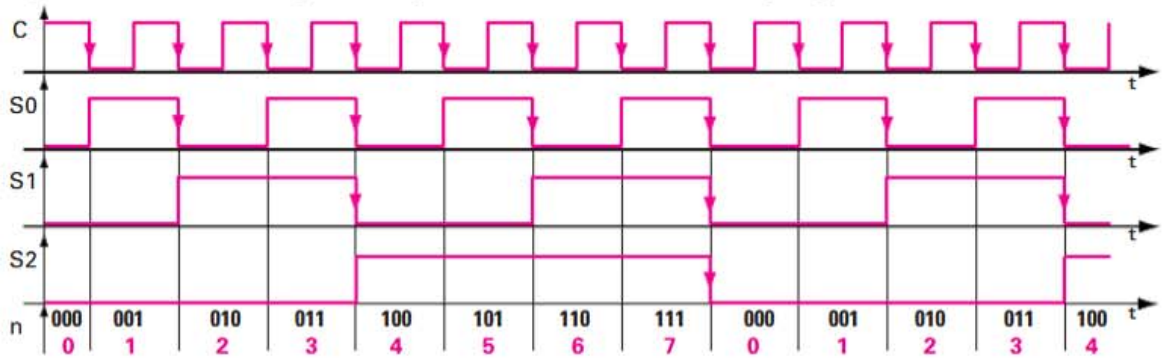
Fonctionnement
Le compteur est obtenu en mettant en cascade une série de bascules D câblées en diviseurs élémentaires par deux. Le signal à compter est appliqué à l'entrée de la première bascule, la sortie de cette bascule pilote l'entrée de la deuxième bascule et ainsi de suite.
Le résultat du comptage apparaît sous forme de nombre binaire, la première bascule indiquant le bit de poids faible et la dernière le bit de poids fort.

$$n = Q0.2^0 + Q1.2^1 + Q2.2^2$$

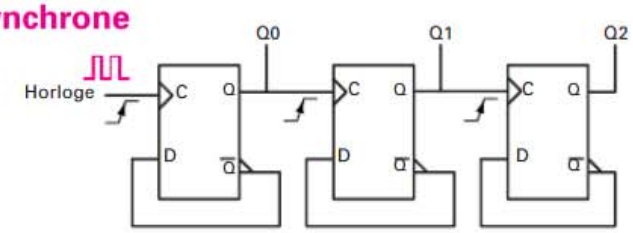
• Compteur asynchrone

Pour obtenir une incrémentation à chaque période d'horloge, il faut que les horloges des bascules D réagissent sur **un front descendant**.

Chronogrammes d'un compteur asynchrone modulo 8 (comptage de 0 à 7)

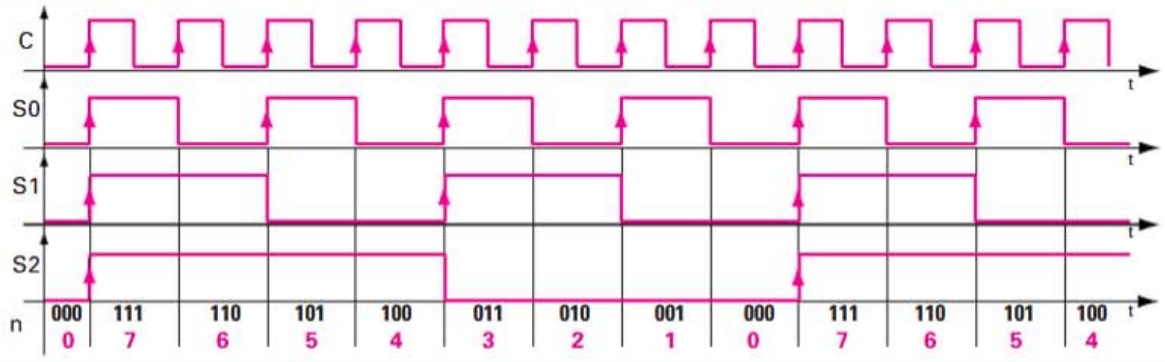


• Décompteur asynchrone



Pour obtenir une décrémentation à chaque période d'horloge, il faut que les horloges des bascules D réagissent **sur un front montant**.

Chronogrammes d'un décompteur asynchrone modulo 8 (comptage de 7 à 0)



• Compteur modulo n

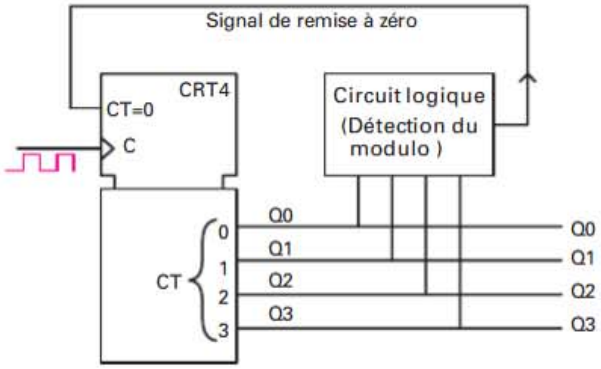
Avec 1 bascule, on réalise un compteur modulo 2
Avec 2 bascules, on réalise un compteur modulo 4
Avec 3 bascules, on réalise un compteur modulo 8
Avec 4 bascules, on réalise un compteur modulo 16
Avec 5 bascules, on réalise un compteur modulo 32
Etc....

$$Bascules = \frac{\log n}{\log 2}$$

Avec bascules = nombre entier ramené à la valeur supérieure.

Exemple :
Pour réaliser un compteur modulo 10 000 Bascules = 13.29.... il faut 14 bascules.

Modulo autre qu'une puissance de deux :
Exemple compteur modulo 10
Il va compter 0, 1, ..., 8, 9, 0, 1 etc.



Q3	Q2	Q1	Q0	RAZ	n
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	2
0	0	1	1	0	3
0	1	0	0	0	4
0	1	0	1	0	5
0	1	1	0	0	6
0	1	1	1	0	7
1	0	0	0	0	8
1	0	0	1	0	9
1	**0**	**1**	**0**	**1**	**10**
1	0	1	1	X	11
1	1	0	0	X	12
1	1	0	1	X	13
1	1	1	0	X	14
1	1	1	1	X	15

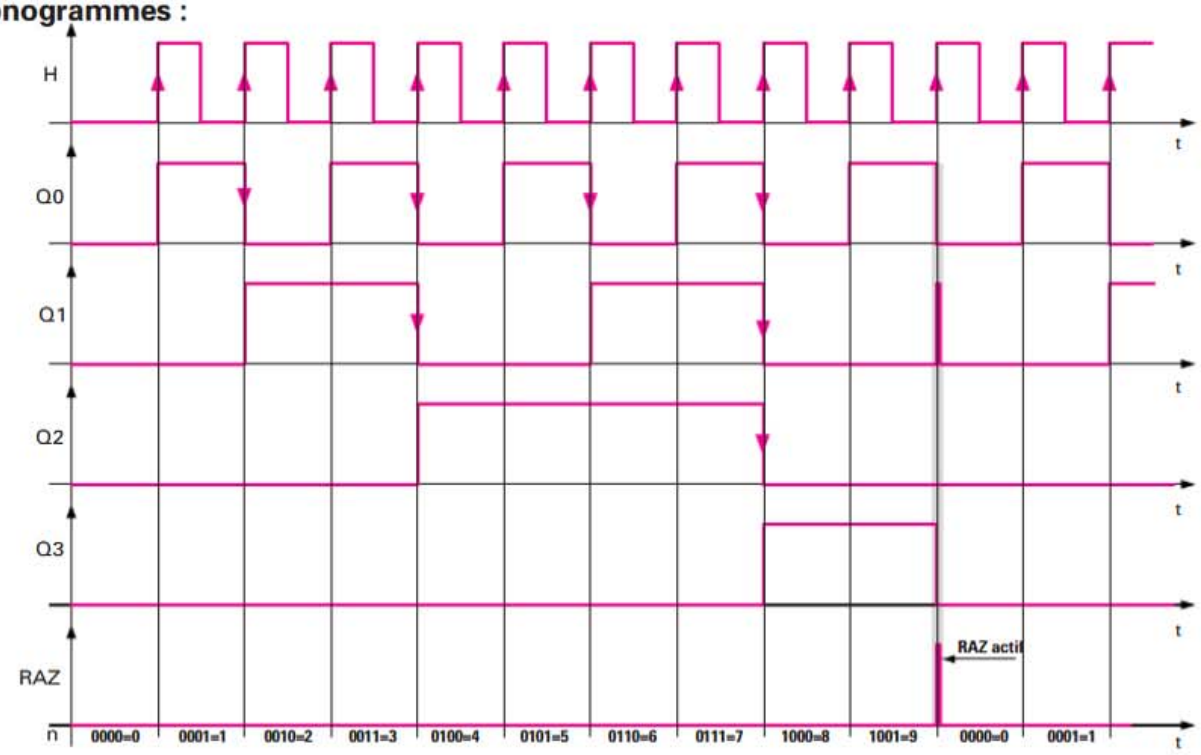
L'équation du circuit logique de détection est :

RAZ = $\overline{Q0}$. Q1 . $\overline{Q2}$. Q3

Après simplification avec Karnaugh :

RAZ = Q1 . Q3

Chronogrammes :

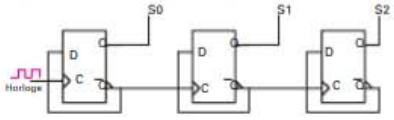


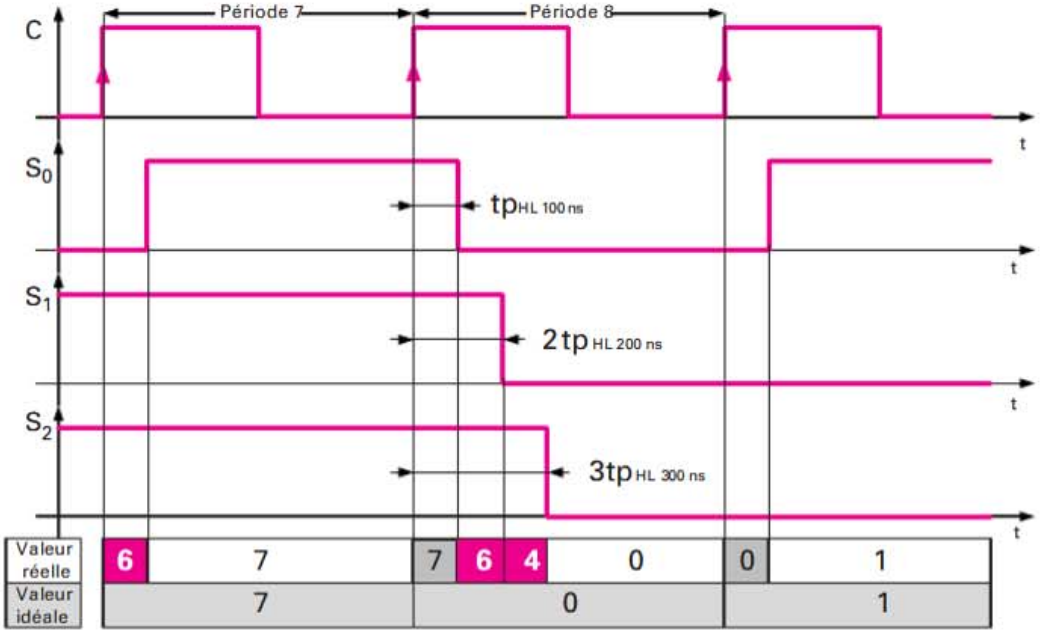
Les compteurs

• Problème d'un compteur asynchrone

Une bascule introduit **un temps de propagation** tp_{LH} ou tp_{HL}
Ce temps s'accumule de bascule en bascule et introduit **des valeurs** transitoires **fausses**.

Exemple du passage de la valeur 7 à 0





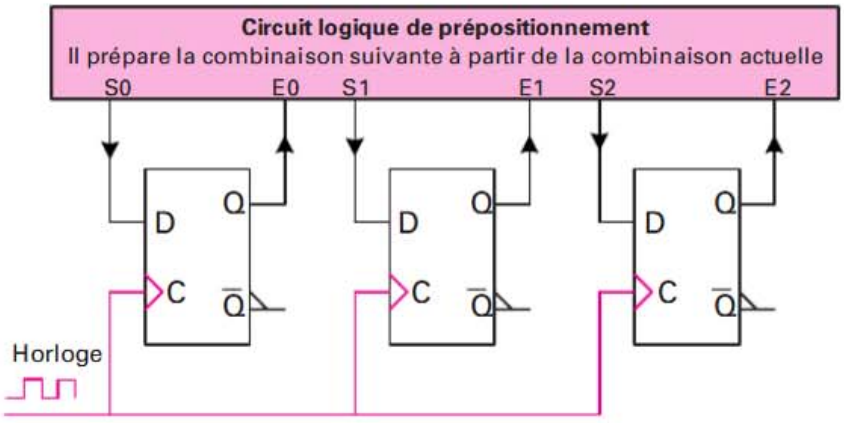
• Les inconvénients et avantages d'un compteur asynchrone

- Il ne sait que compter ou décompter en binaire naturel.
- Il introduit un retard (de l'ordre de 10 à 100 ns par bascule).
- L'avantage d'un compteur asynchrone est sa simplicité de conception.

• Principe d'un compteur synchrone

Au front montant de l'horloge, les niveaux aux entrées D sont transférés en sortie

- Ces transferts sont effectués en même temps.
- Pas de combinaison intermédiaire indésirable.
- Le cycle dépend du circuit de prépositionnement et peut représenter n'importe quel type de codage, binaire, Gray ou autre, ce qui lui donne aussi le nom de séquenceur.



• Les inconvénients et avantages d'un compteur synchrone

- Les sorties peuvent représenter n'importe quel type de code binaire, Gray, autre.
- Toutes ses sorties sont actualisées en même temps (pas de retard).
- L'inconvénient d'un compteur synchrone est sa complexité de conception.

• Compteur synchrone

Exemple

Le compteur CD4040 introduit un retard TP_{HL} de 100 ns par bascule en 5 V.
Le décalage entre le front d'horloge et la 12e sortie sera de 12 TP_{HL} soit 1,2 µs.
Pour éviter les combinaisons transitoires en sortie, on utilise le **compteur synchrone**.
Le compteur synchrone positionne l'entrée des bascules pour qu'au prochain front d'horloge les sorties se positionnent toutes en même temps et selon la combinaison définie dans la table de vérité.

Exemple, compteur synchrone modulo 16

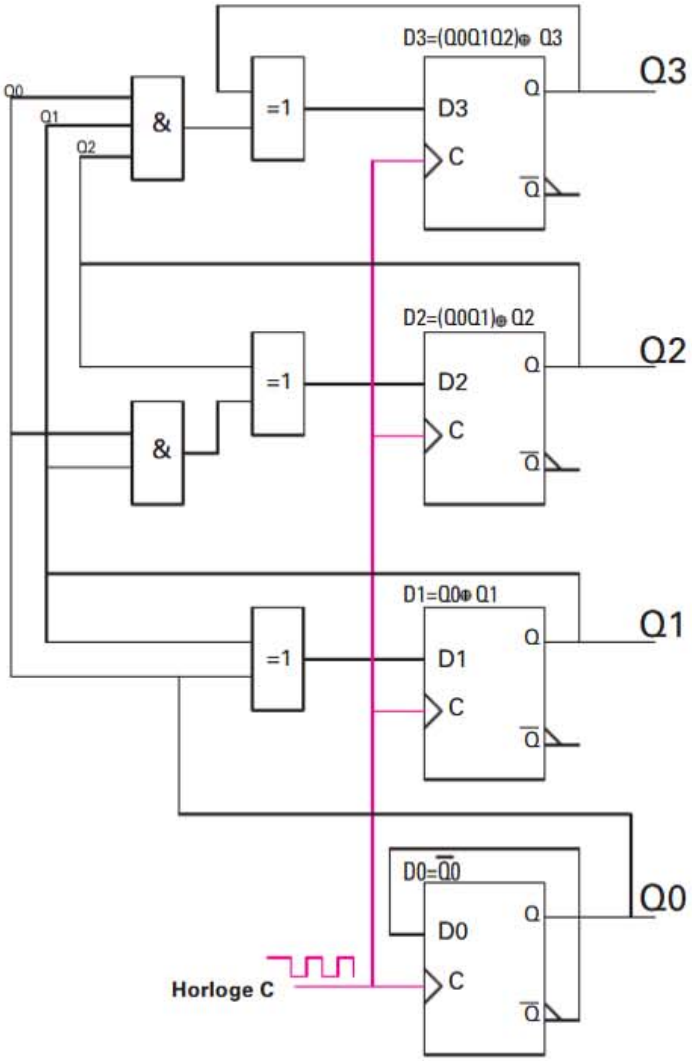
Pour compléter la table de vérité du circuit de prépositionnement, il faut, en face de la combinaison de sortie courante, écrire la combinaison de sortie suivante.

Q3	Q2	Q1	Q0	D3	D2	D1	D0
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

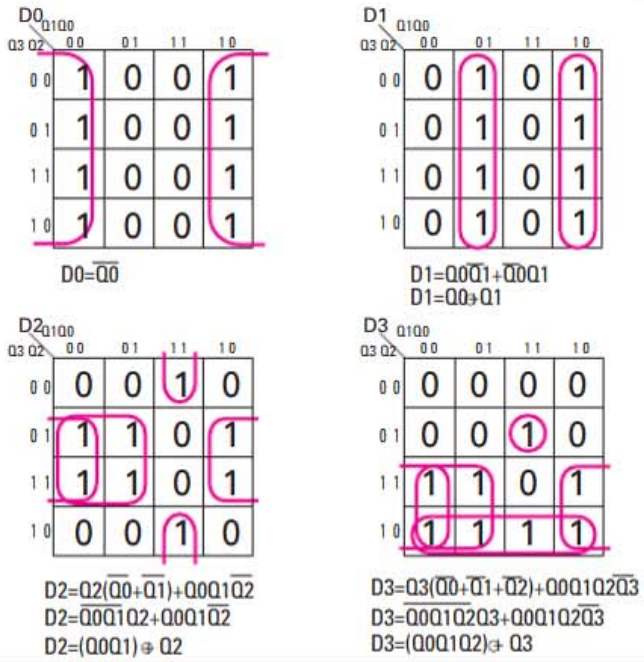
Table de vérité

C	Q3	Q2	Q1	Q0	D3	D2	D1	D0
↓	0	0	0	0	0	0	0	1
↓	0	0	0	1	0	0	1	0
↓	0	0	1	0	0	0	1	1
↓	0	0	1	1	0	1	0	0
↓	0	1	0	0	0	1	0	1
↓	0	1	0	1	0	1	1	0
↓	0	1	1	0	0	1	1	1
↓	0	1	1	1	1	0	0	0
↓	1	0	0	0	1	0	0	1
↓	1	0	0	1	1	0	1	0
↓	1	0	1	0	1	0	1	1
↓	1	0	1	1	1	1	0	0
↓	1	1	0	0	1	1	0	1
↓	1	1	0	1	1	1	1	0
↓	1	1	1	0	1	1	1	1
↓	1	1	1	1	0	0	0	0

Logigramme

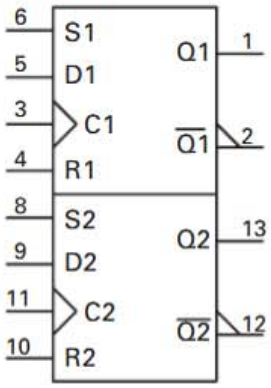


Simplification



• Bascule 4013

Deux bascules D



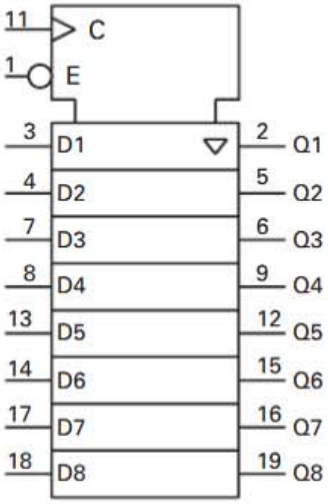
Bascule D à usage général

C	D	R	S	Q	$\overline{Q}$
↓	0	0	0	0	1
↓	1	0	0	1	0
↓	X	0	0	Q	$\overline{Q}$
X	X	1	0	0	1
X	X	0	1	1	0
X	X	1	1	1	1

C : Horloge
D : Données
R : Reset
S : Set
Q : Sortie
$\overline{\mathbf{Q}}$: Sortie complétée
X : Quelconque

• Bascule 40374, 74C374

Octuple bascule type D à sortie 3 états



Ce circuit est entièrement compatible avec le circuit TTL 374

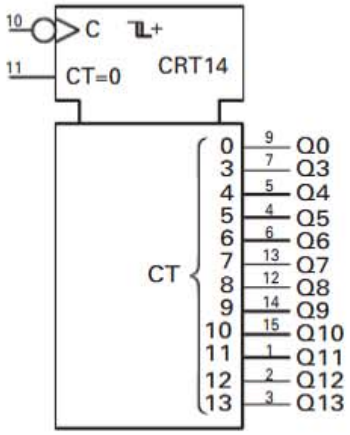
Mode de fonctionnement	Entrées			Registre interne	Sorties Q
	E	C	D		
Chargement et lecture du registre	0	↓	0	0	0
	0	↓	1	1	1
Verrouillage du registre et invalidation des sorties	1	↓	0	0	Z
	1	↓	1	1	Z

E : Validation des sorties
C : Horloge
D : Données
Q : Sortie
Z : Sortie en l'air

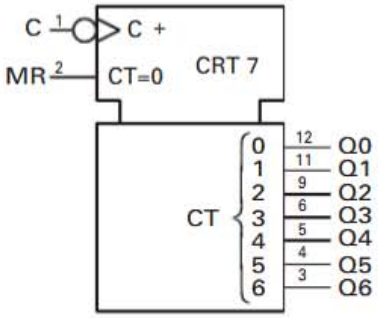
• Compteurs 4020-4024-4040

Compteur binaire diviseur

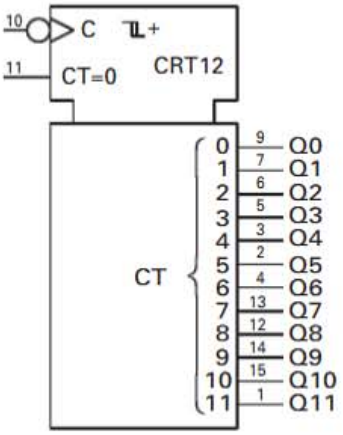
4020 – 14 étages



4024 – 7 étages



4040 – 12 étages

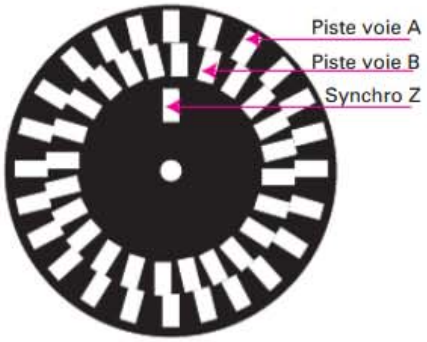


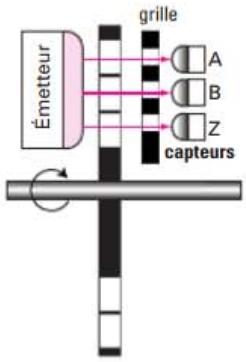
Horloge front descendant.
MR mise à zéro

6.4.4. CODEURS INCRÉMENTAL ET ABSOLU

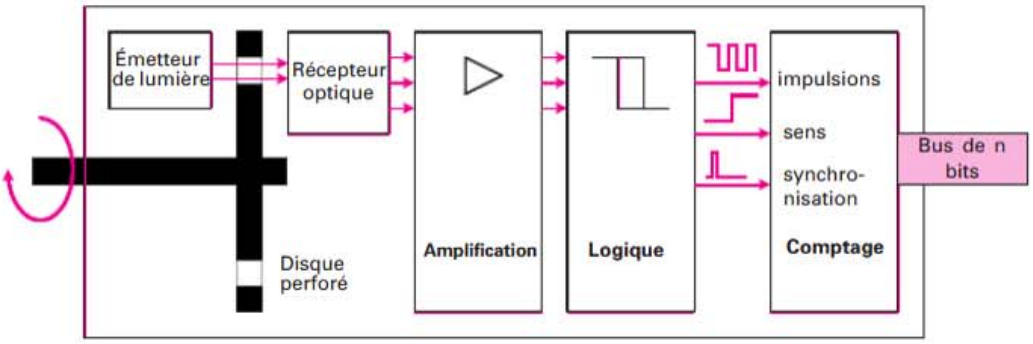
• Codeur optique incrémental

Le disque rotatif comporte 2 pistes, éventuellement une encoche de synchronisation. Ses pistes sont divisées en intervalles d'angles égaux alternativement opaques et transparents.
La seconde piste comporte des fenêtres décalées, ce qui permet de déterminer le sens de rotation du disque.
Le nombre de fenêtres d'une piste définit la résolution du capteur.



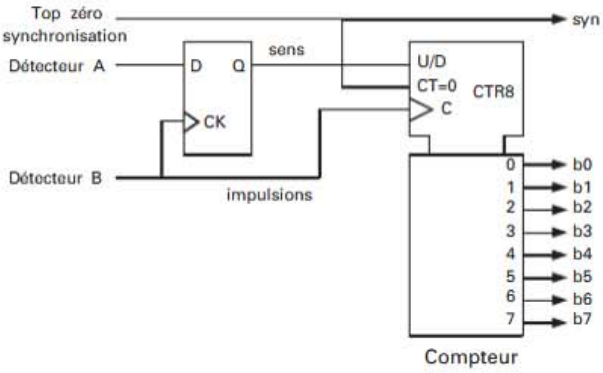


Dans l'exemple ci-contre la résolution est de 15° (360°/24).
On peut trouver des résolutions bien supérieures : 50, 100, 200... soit une résolution de 7°, 3°3' , 1°5'...



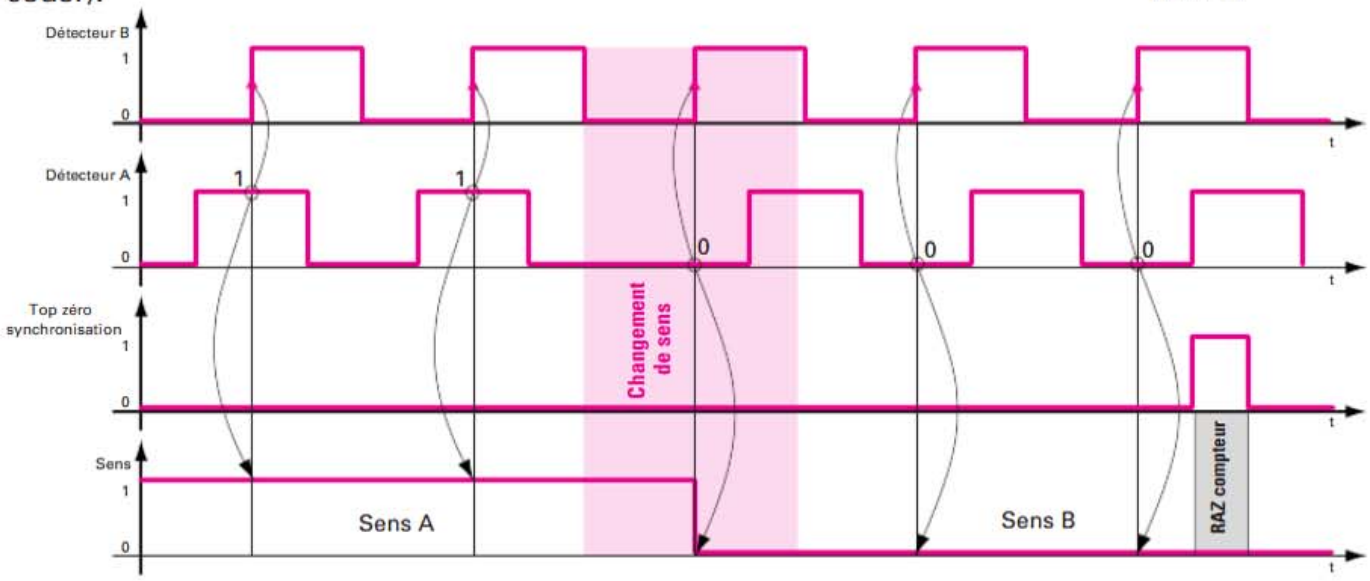
Domaine d'application

Asservissement de vitesse (on utilise l'information impulsion). La fréquence du signal est proportionnelle à la vitesse de rotation fois le nombre de fenêtres.



Asservissement de position

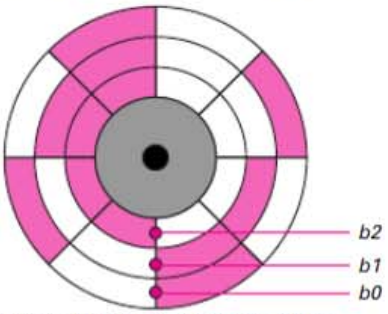
La sortie d'un compteur décompteur permet de connaître la position codée sous *n* bits (dans l'exemple ci-dessus le nombre de bits nécessaires est de 5 (24 fenêtres soit 24 positions à coder).



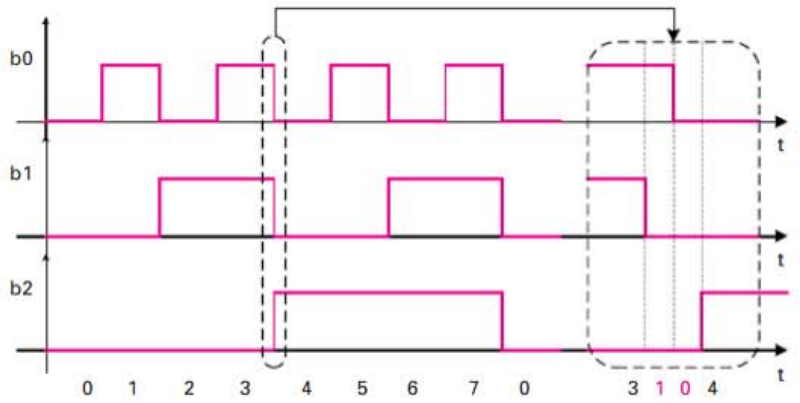
Codeur incrémental et absolu

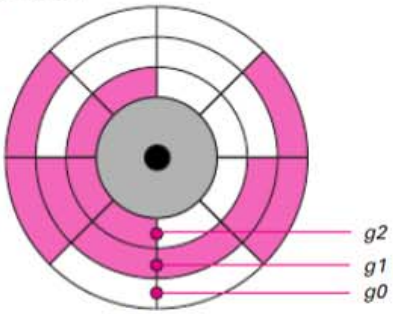
• Codeur optique absolu

Application du code de Gray aux codeurs

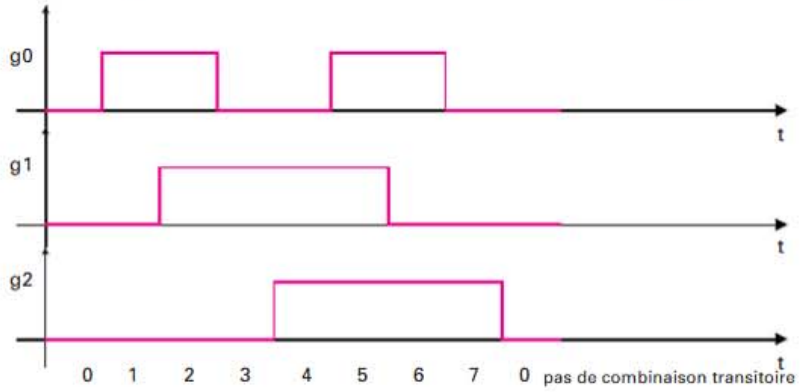


Disque en binaire naturel de 3 bits
Il introduit des fausses combinaisons transitoires.





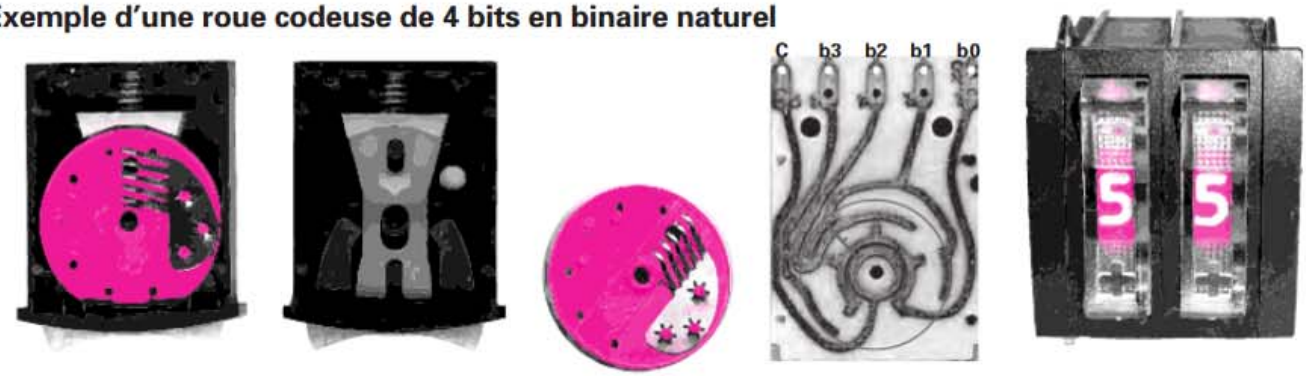
Disque en code de Gray de 3 bits
Il est bien adapté pour les codeurs absolus.



Principe

Le disque codeur est constitué d'un disque isolant sur lequel sont dessinés des motifs.
Ces motifs sont métallisés donc conducteurs. Des curseurs métalliques sont posés sur le disque.
Si le curseur est sur une partie isolante, le bit est à 0.
Si le curseur est sur une partie conductrice, le bit est à 1.
Ce principe peut être utilisé comme codeur de position, mais il existe un problème, dans le cas où le code utilisé est du binaire naturel. Dans l'exemple ci-dessus la transition 3 vers 4 peut induire des combinaisons indésirables ; ceci est dû au fait que les 3 bits changent d'état simultanément.
Pour éviter ce genre de problème, on utilise un code de Gray. Celui-ci a l'avantage de ne jamais avoir de combinaisons transitoires indésirables, mais ce code est moins pratique à utiliser.

Exemple d'une roue codeuse de 4 bits en binaire naturel



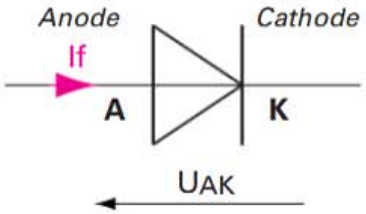
Cette roue codeuse est codée en binaire naturel. Les transitions ne sont pas importantes du fait que la roue codeuse a pour fonction de transmettre une consigne qui n'évoluera pas dans le temps.
Le curseur permet de mettre en contact la piste centrale (commun) avec les autres pistes 1, 2, 4, 8 qui sont respectivement b0, b1, b2 et b3.

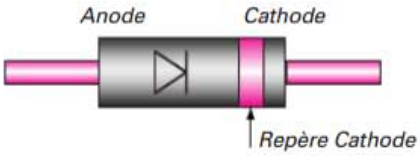
6.5.1. DIODE À JONCTION

• Constitution

L'élément de base est une jonction PN dont la diode possède toutes les propriétés. Pour permettre son insertion dans des équipements, la jonction doit être «habillée» et se présenter sous la forme d'un composant maniable.

• Symbole





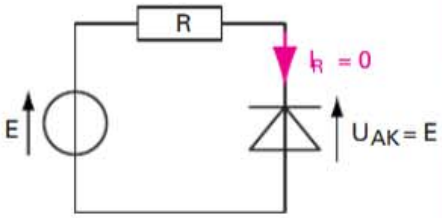
La Cathode est noté **K**

• Caractéristique courant-tension

Caractéristique inverse

Le pôle positif de la source de tension continue **E** est relié au côté cathode de la diode.

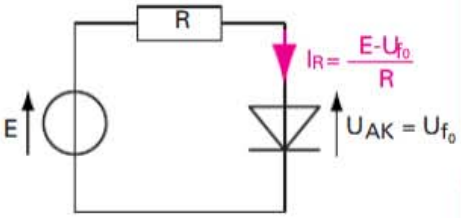
La diode est non passante : le courant obtenu restera très faible et considéré comme nul. Sur la caractéristique on voit apparaître U_{Rmax}. Si l'on fait croître la tension au-delà de U_{Rmax}, on obtient une croissance de plus en plus rapide du courant, puis la destruction de la diode.

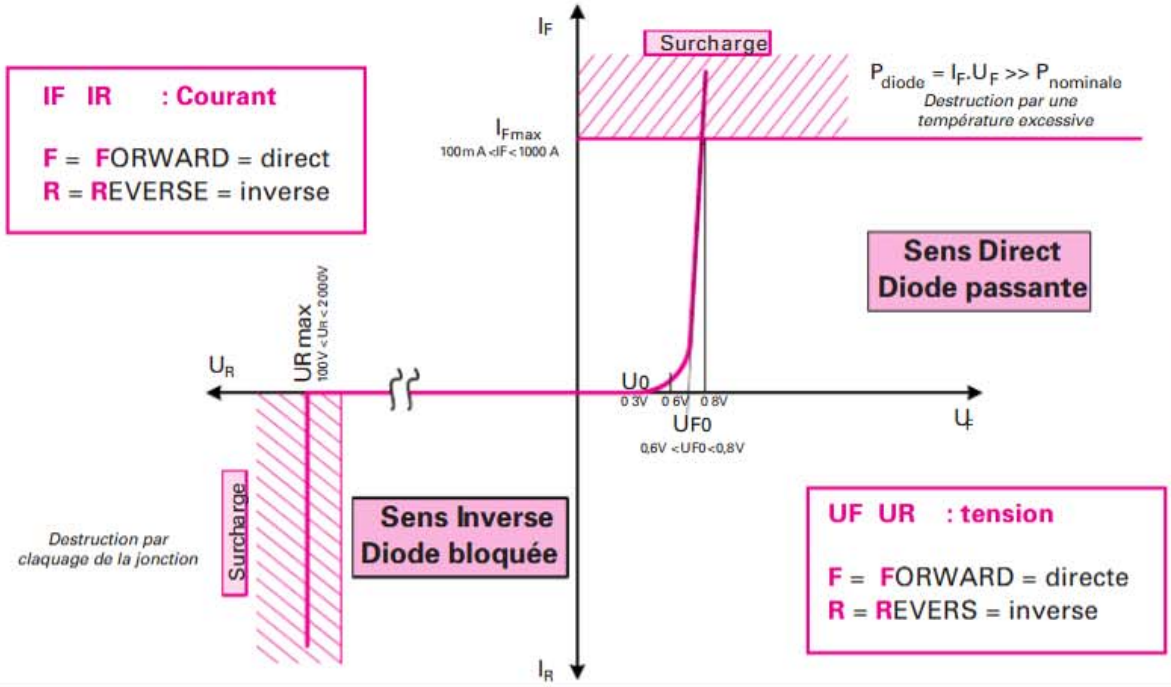


Caractéristique directe

Seuil réel de tension : d'après sa définition, c'est la valeur U_0 de U_F au-dessous de laquelle le courant reste nul. U_0 = **0,3 V** pour les diodes au silicium.

Seuil pratique de tension : U_{F0}, cette valeur est plus importante que U_0 : elle permettra de linéariser la caractéristique. Sa valeur est de 0,6 V à 0,8 V pour les diodes au silicium.

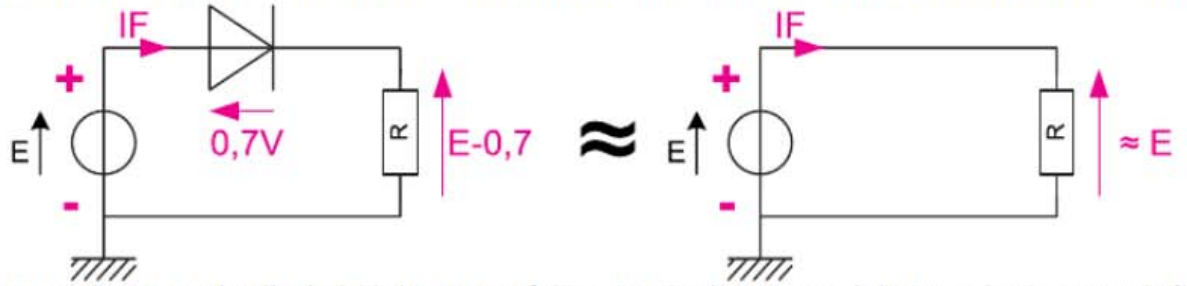




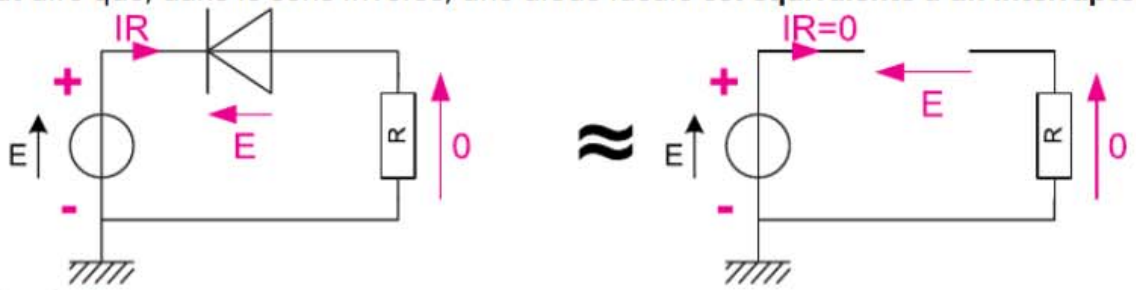
La diode à jonction

• Diode idéale

Dans le sens passant : la diode idéale est parfaitement conductrice, sa résistance directe (statique ou dynamique) est nulle, la chute de tension qu'elle produit est nulle aussi.
On peut dire que, dans le sens direct, une diode idéale est **équivalente à un interrupteur fermé.**



Dans le sens inverse : la diode idéale est parfaitement isolante, sa résistance inverse est infinie, le courant qui la traverse est nul.
On peut dire que, dans le sens inverse, une diode idéale est **équivalente à un interrupteur ouvert.**

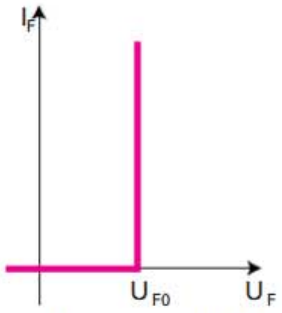


• Diode réelle

Quand **la tension est négative (ou inverse)**, le courant peut être négligé et la portion de caractéristique située à gauche de 0 est confondue avec l'axe des tensions : **la diode est pratiquement idéale.**

Quand la tension est positive (ou directe), le courant peut être négligé tant que UF est inférieur à U_{F0} et, pour $U_F > U_{F0}$, **la portion de courbe peut être assimilée à une droite.**
La caractéristique est formée de deux parties rectilignes :

- le courant est nul quand la tension est négative et quand la tension est positive, mais inférieure à U_{F0} ;
- le courant peut circuler quand U_F est supérieure à U_{F0}.



Remarque : dans la plupart des usages industriels, la chute de tension directe peut être négligée devant la tension principale ; la diode est alors assimilée à une diode idéale.

• Limites d'utilisation d'une diode à jonction

Ces limites sont fixées par le fabricant.
Tension inverse de pointe répétitive (V_{RRM}) : valeur maximale instantanée de la tension inverse. Cette valeur peut être appliquée à chaque période mais elle est à la limite des possibilités de la diode.
Tension maximale inverse de service (V_{RM}) : c'est la valeur précédente divisée par un coefficient de sécurité K auquel on donne souvent la valeur 2.
Courant inverse I_R : c'est la valeur instantanée maximale qui, pour la tension V_{RRM}, correspond à la température maximale de jonction. Ce courant peut atteindre quelques milliampères.
Courant direct moyen maximal (I_{FRM}) : c'est le maximum admissible pour la valeur moyenne du courant direct, cette valeur étant calculée sur une période avec un redressement monophasé simple alternance et une charge résistante.
Courant direct moyen de service IF : c'est la valeur précédente divisée par un coefficient de sécurité (souvent 2).
Température maximale de jonction : pour une diode au silicium, elle est de 200 °C.

Diodes

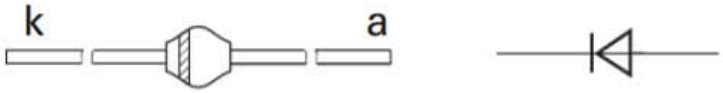
1N4001 à 1N4007

Caractéristiques

- Passivée par verre
- Fonctionnant à haute température
- Faible courant de fuite
- Excellente stabilité

Description

Boîtier en verre robuste, utilisant une construction alliée à haute température.
Ce boîtier est scellé hermétiquement et les coefficients de dilatations de toutes les pièces utilisées sont appariés.



Valeurs limites

En conformité avec le système nominale maximale absolu (IEC 134).

SYMBOLE	PARAMÈTRES	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNITÉ
V_{RRM}	Tension inverse de pointe répétitive				
	1N4001G		–	50	V
	1N4002G		–	100	V
	1N4003G		–	200	V
	1N4004G		–	400	V
	1N4005G		–	600	V
	1N4006G		–	800	V
	1N4007G		–	1000	V
V_R	Tension maximale inverse de service				
	1N4001G		–	50	V
	1N4002G		–	100	V
	1N4003G		–	200	V
	1N4004G		–	400	V
	1N4005G		–	600	V
	1N4006G		–	800	V
	1N4007G		–	1000	V
$I_{F(AV)}$	Courant direct moyen	moyenne sur toutes périodes de 20 ms ; T_{amb} = 75 °C;	–	1,00	A
		moyenne sur toutes périodes de 20 ms ; T_{amb} = 100°C	–	0,75	A
I_F	Courant direct moyen maximal	T_{amb} = 75°C	–	1,00	A
I_{FRM}	Pointe de courant direct répétitive		–	10	A
I_{FSM}	Pointe de courant direct non répétitive	Demi-sinusoïde de 60 Hz	–	30	A
T_{stg}	Température de stockage		–65	+175	°C
T_j	Température de jonction		–65	+175	°C

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

T_j = 25 °C

SYMBOLE	PARAMÈTRES	CONDITIONS	MAX.	UNITÉ
V_F	Tension directe	I_F = 1 A	1,1	V
$V_{F(AV)}$	Tension moyenne sur une période	$I_{F(AV)}$ = 1 A	0,8	V
I_R	Courant inverse	$V_R = V_{Rmax}$	10	µA
		$V_R = V_{Rmax}$; T_{amb} = 100°C	50	µA
$I_{R(AV)}$	Courant inverse sur une periode	$V_R = V_{RRMmax}$; T_{amb} = 75°C	30	µA

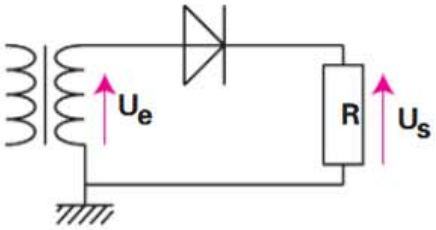
Philips Semiconductors

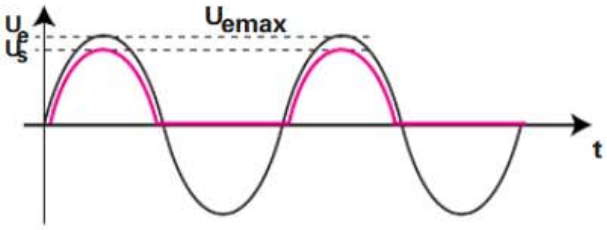
6.5.2. LE REDRESSEMENT

• Redressement sur charge résistive

La fonction redressement consiste à transformer une tension bidirectionnelle en une tension unidirectionnelle.

Redressement mono-alternance



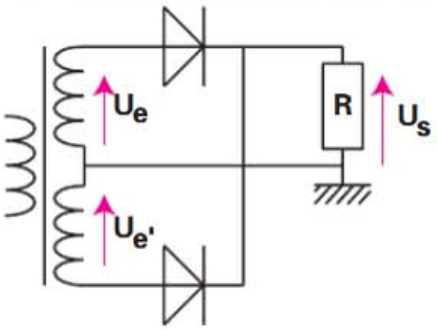


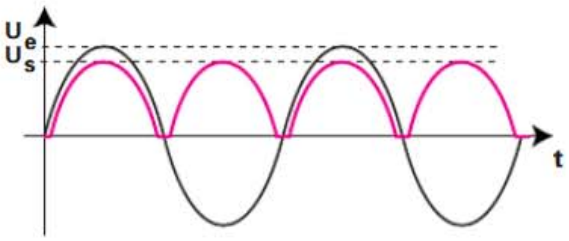
$$U_{s\,eff} = \frac{U_{e\,max} - U_{F0}}{2}$$

$$U_{s\,moy} = \frac{U_{e\,max} - U_{F0}}{\pi}$$

Tension inverse diode = U_{max}

Redressement double-alternance avec transformateur à point milieu



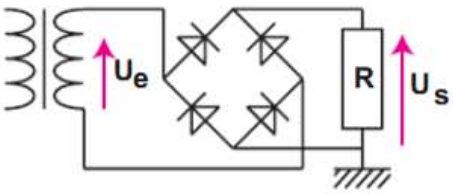


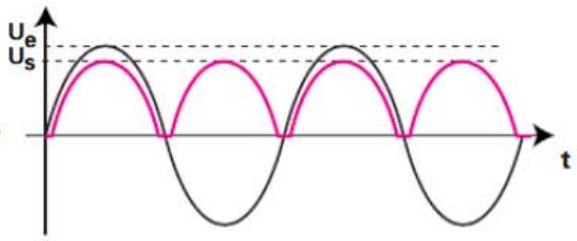
$$U_{s\,eff} = \frac{U_{e\,max} - U_{F0}}{\sqrt{2}}$$

$$U_{s\,moy} = \frac{2\,(U_{e\,max} - U_{F0})}{\pi}$$

Tension inverse diodes = $2U_{max}$

Redressement double alternance en pont de Graetz





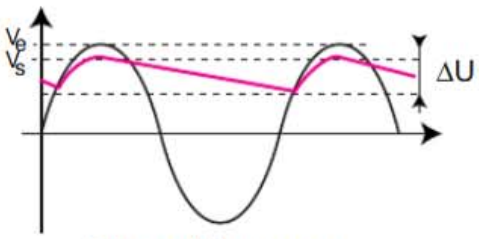
$$U_{s\,eff} = \frac{U_{e\,max} - 2U_{F0}}{\sqrt{2}}$$

$$U_{s\,moy} = \frac{2(U_{e\,max} - 2U_{F0})}{\pi}$$

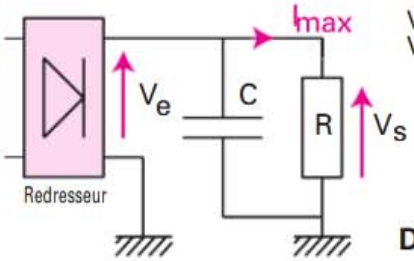
Tension inverse diodes = U_{max}

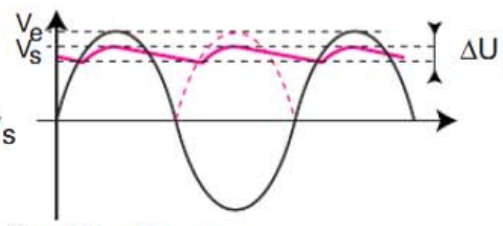
• Redressement sur charge capacitive

Le condensateur a pour but d'augmenter la valeur moyenne de la tension redressée.
Il joue le rôle d'un réservoir d'énergie en l'accumulant lorsqu'il y en a et la restitue lorsqu'elle fait défaut. Pour obtenir une tension continue et réduire la tension d'ondulation ΔU, il faut une grande capacité, mais on est vite limité par son encombrement et son prix ($100\ \mu F < C < 10\,000\ \mu F$).



Mono-alternance





Double-alternance

$$\Delta U \approx \frac{I_{max}}{50\,C}$$

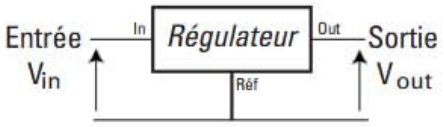
$$\Delta U \approx \frac{I_{max}}{100\,C}$$

6.5.3.LES RÉGULATEURS DE TENSION

La fonction régulation de tension consiste à maintenir constante une tension de sortie en réagissant sur la tension d'entrée.

On trouve des régulateurs :

- fixes positifs : série 78xx
- fixes négatifs : série 79xx
- variables positif : LM317
- variable négatif : LM337



La série de régulateurs à trois broches est disponible dans de nombreuses valeurs de tension de sortie fixe et est très utile dans de nombreuses applications. Bien que conçus pour fournir des tensions de sortie fixes, ces circuits peuvent également délivrer des tensions et courants réglables à l'aide de quelques composants extérieurs.

Ces régulateurs possèdent une limitation en courant interne pour ne pas dépasser les limites de sécurité en courant de pointe. Une plage de sécurité est prévue pour le transistor de sortie permettant de limiter la puissance interne dissipée. Si celle-ci devient trop importante pour le refroidisseur utilisé, le circuit de disjonction thermique est activé pour éviter une surchauffe du circuit intégré.

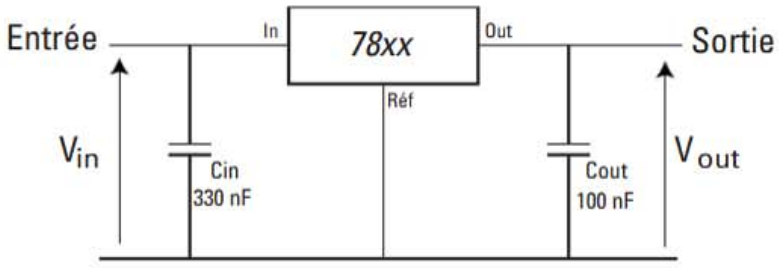
• Régulateurs de tension fixe

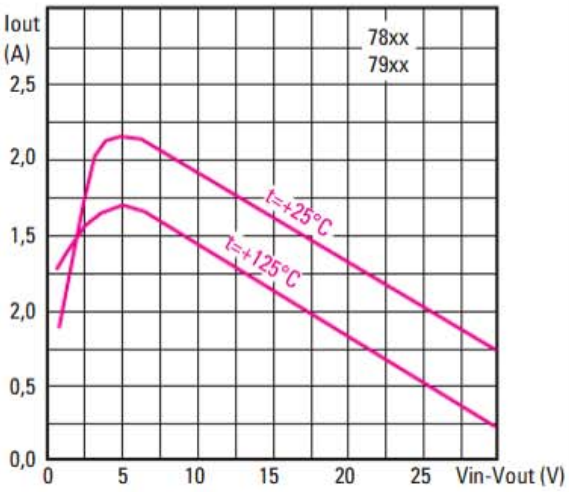
La série des « 78XX » (7805, 7809, 7812, etc.) sont des régulateurs de tension positive, tandis que la série des « 79XX » (7905, 7909, 7912, etc.) sont des régulateurs de tension négative. Les deux derniers chiffres représentent la tension de sortie ; par exemple un 7805 est un régulateur +5 V tandis qu'un 7924 est un régulateur -24 V.

Selon la taille du boîtier et la possibilité d'y fixer un radiateur, ils acceptent un courant plus ou moins important.

Caractéristiques

- Courant de sortie supérieur à 1,5 A
- Tension de sortie 5; 6; 8; 8.5; 9; 12; 15; 18; 24 V
- Protection thermique
- Protection contre les courts circuits
- Tolérance de la tension de sortie : 5 à 2 %



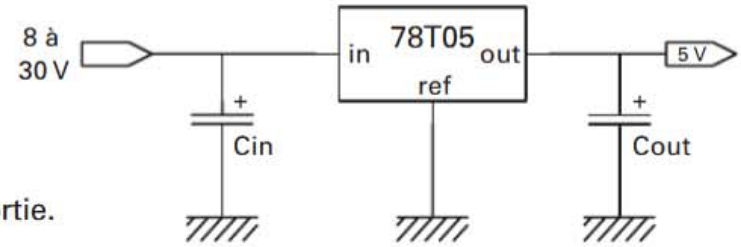


• Les régulateurs de tension réglable

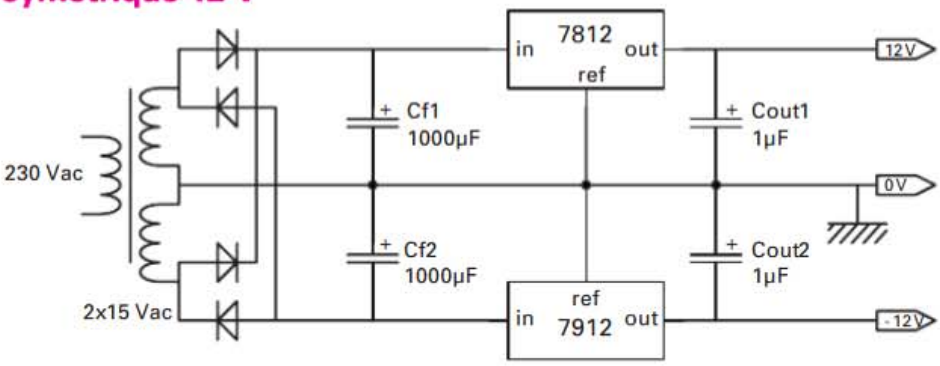
De principe similaire aux régulateurs à tension fixe, (par défaut la tension est de 1,25 V) ces régulateurs peuvent fournir n'importe quelle tension régulée (à l'intérieur d'une plage spécifiée par le fabricant). Généralement, deux résistances externes sont utilisées pour régler la tension de sortie.

• Tension de sortie fixe

Si 78 xx tension positive.
Si 79 xx tension négative.
xx = tension de sortie.
La tension d'entrée doit être supérieure
de 2,5 V min par rapport à la tension de sortie.



• Alimentation symétrique 12 V



• Alimentation variable de 1,25 V à Vs_{MAX}

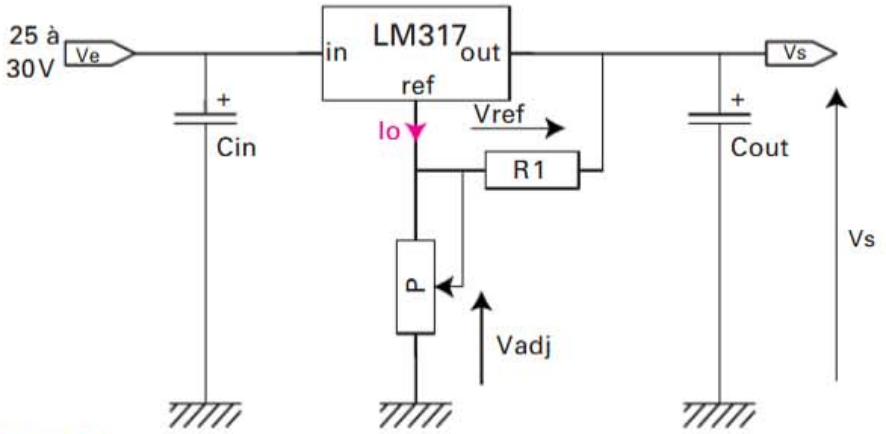
$$Io \approx 1,5\ mA$$

$$Vref = 1,25\ V$$

$$Vs = Verf + Vadj$$

$$Vs = Vref + \frac{Vref}{R1}(\alpha P)$$

$$1,25 < Vs < (Ve - 3\ V)$$



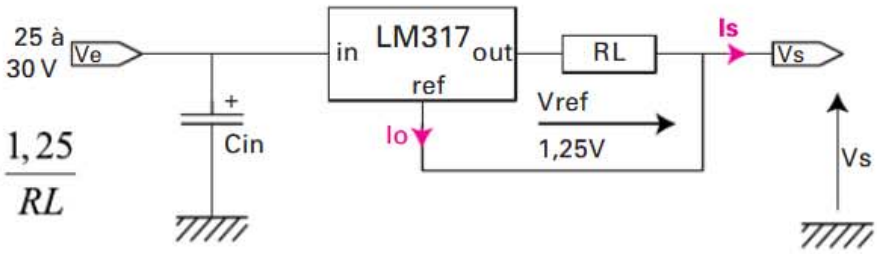
• Générateur de courant constant Is

$$Io \approx 1,5\ mA$$

$$Vref = 1,25\ V$$

$$Is = Io + \frac{Vref}{RL} = 1,5.10^{-3} + \frac{1,25}{RL}$$

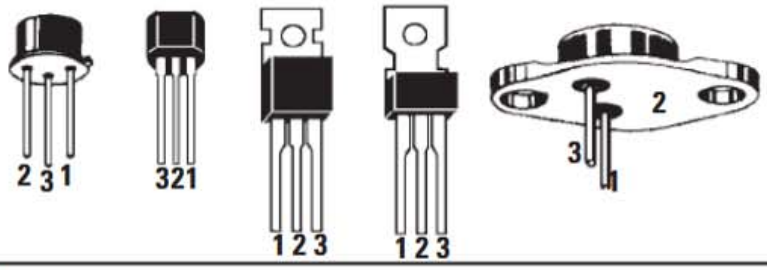
$$1,25 < Vs < (Ve - 3\ V)$$



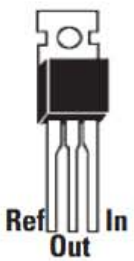
• Boîtiers, brochages

Série : 78XX
1 entrée (in)
2 référence
3 sortie (out)

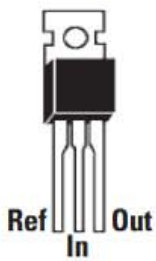
79XX
1 référence
2 entrée (in)
3 sortie (out)



LM317

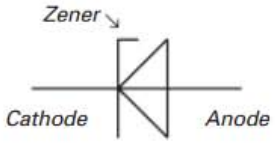


LM337



6.5.4. DIODE ZÉNER

• Symbole

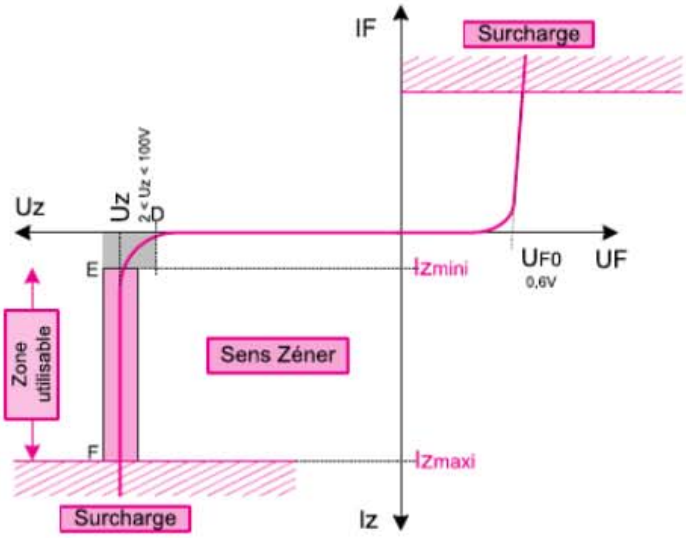


Marquage d'une diode BZX 85 C 6 V2

B : silicium
Z : type (Z pour Zéner)
X 85 : référence constructeur
C : tolérance 5 %
(A : 1 %, B : 2 %, D : 10 %, E : 20 %)
6 V2 : indique que V_z = 6,2 V

• Caractéristiques électriques

On sait que si la tension inverse aux bornes d'une diode devient suffisamment élevée, le courant inverse s'accroît brusquement. C'est le phénomène de claquage inverse.
Ce phénomène correspond à la région EF de la caractéristique de la diode.
On constate que la tension inverse aux bornes de la diode fonctionnant dans la zone de claquage varie peu. On la suppose constante et égale à Vz (tension Zener).



Deux intensités I_{zmin} et I_{ZMax} marquent les limites de la zone de claquage :

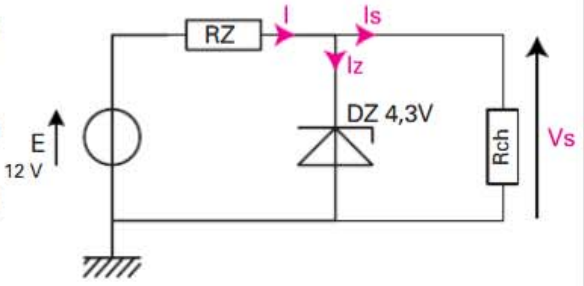
- **l'intensité minimale I_{zmin} au-dessous de laquelle la tension n'est plus stabilisée** (on rentre alors dans le coude ED de la courbe) ;
- **l'intensité maximale I_{ZMax}** au-dessus de laquelle la puissance **P = Uz . Iz** dissipée thermiquement dans la diode devient destructrice.

La tension inverse aux bornes d'une diode reste constante à condition de maintenir son intensité inverse Iz entre les limites I_{zmin} et I_{ZMax}.

• Sources de tension constante

La source de tension constante ci-contre fournit une tension inférieure à la tension d'alimentation générale E.

La diode Zéner utilisée possède une tension considérée constante sur toute l'étendue de sa zone de claquage.
La valeur nominale de cette tension est toujours inscrite en clair sur le boîtier.



La résistance Rz a pour but de limiter l'intensité inverse de la diode à une valeur inférieure au maximum I_{ZMax}.

• Conclusions

Le courant Iz traversant la diode diminue quand l'intensité Is débitée dans la charge augmente (quand Rch diminue).
La diode supporte un courant inverse maximal lorsque la charge est déconnectée : d'où l'intérêt de faire le calcul de Rz en supposant Rch infini. Dans le cas contraire, on risque la destruction de la diode en cas de débranchement accidentel de la charge.
Si l'intensité Is débitée dans la charge est trop élevée, l'intensité Iz dans la diode risque d'être inférieure au minimum I_{zmin} au-dessous duquel elle ne stabilise plus (fonctionnement dans la région du coude).

• Diodes stabilisatrices de tension. Séries BZX55. Philips

Caractéristiques

- Puissance dissipée totale : maxi 500 mW.
- Tolérance : ± 5 %.
- Plage de tension : nom. 2,4 à 75 V (Série E24).
- Pointe de puissance non répétitive : maxi 40 W.

Application

- Stabilisateur de tension
  Tension de référence

Description

Diodes stabilisatrices de tension, de faible puissance dans un boîtier en verre SOD27(DO-35).

Les diodes sont disponibles dans la série normalisée E24 à 5 %.

Cette série est constituée de 37 types avec une tension allant de 2,4 à 75 V (BZX55-C2V4 à BZX55-C75).

Boîtier SOD27 ; DO-35

Valeurs limites

Symbole	Paramètres	Conditions	Min.	Max.	Unité
I_F	Courant direct continu		–	250	mA
I_{ZSM}	Pointe de courant non répétitive	t_p = 100 µs ; signal carré ; T_j = 25 °C	Voir table « Par type »		
P_{tot}	Puissance dissipée	T_{amb} = 50 °C ; note 1	–	400	mW
		T_{amb} = 50 °C ; note 2	–	500	mW
P_{ZSM}	Pointe de puissance non répétitive	t_p = 100 µs ; signal carré T_j = 25 °C	–	40	W
		t_p = 8,3 ms ; signal carré $T_j \leq$ 150 °C	–	30	W
T_{stg}	Température de stockage		– 65	+ 200	°C
T_j	Température de jonction		–	200	°C

Notes :

1. Le composant est monté sur un circuit imprimé sans trou métallisé avec la longueur des broches maximale.
2. Température 50 °C avec longueur des broches 8 mm.

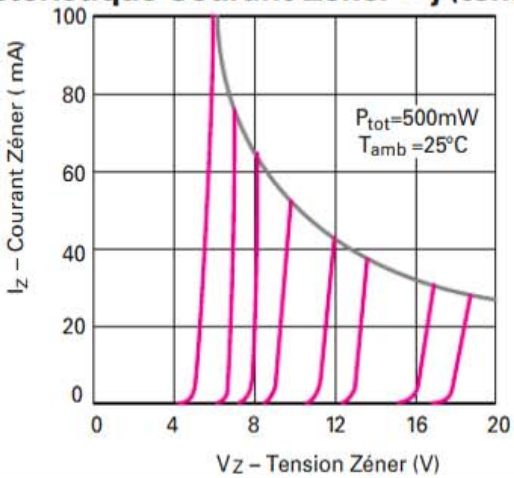
Caractéristiques électriques

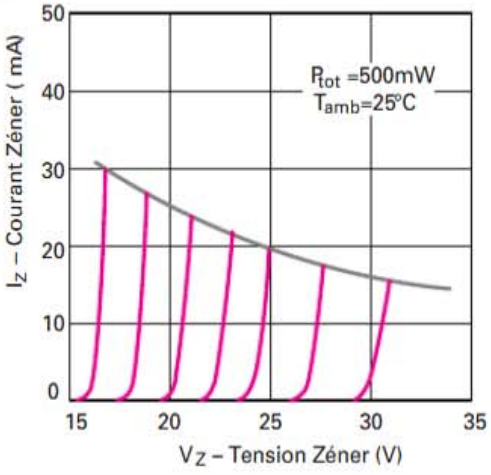
Série complète

Tj = 25 °C.

Symbole	Paramètres	Conditions	Min.	Max.	Unité
V_F	Tension directe	I_F = 100 mA	–	1,0	V

Caractéristique Courant Zéner = *f* (tension Zéner)





• Caractéristiques des diodes BZX55

BZX55-CXXX	Tension de travail V_z (V) à I_{ztest}		Résistance différentielle r_{dif} (Ω)		Coeff. de temp. S_z (mV/K) à I_{Ztest}	Courant de test I_{Ztest} (mA)	Cap. diode C_d (pF) à f = 1MHz; à V_R = 0 V	Courant inverse à la tension inverse IR (µA)			Pointe de courant non répétitive I_{ZSM} (A) à t_p = 100 µs; T_{amb} = 25 °C
			à I_z	à I_{ztest}				à T_j = 25 °C	à T_j = 150 °C	V_R (V)	
	min.	max.	max.	max.	typ.		max.	max.	max.		max.
2V4	2,28	2,56	600	85	1,8	5	450	50	100	1,0	6,0
2V7	2,5	2,9	600	85	1,9	5	450	10	50	1,0	6,0
3V0	2,8	3,2	600	85	2,1	5	450	4	40	1,0	6,0
3V3	3,1	3,5	600	85	2,2	5	450	2	40	1,0	6,0
3V6	3,4	3,8	600	85	2,4	5	450	2	40	1,0	6,0
3V9	3,7	4,1	600	85	2,4	5	450	2	40	1,0	6,0
4V3	4,0	4,6	600	80	2,4	5	450	1	20	1,0	6,0
4V7	4,4	5,0	600	70	1,4	5	300	0,5	10	1,0	6,0
5V1	4,8	5,4	550	50	0,8	5	300	0,1	2	1,0	6,0
5V6	5,2	6,0	450	30	1,6	5	300	0,1	2	1,0	6,0
6V2	5,8	6,6	200	10	2,2	5	200	0,1	2	2,0	6,0
6V8	6,4	7,2	150	8	3,0	5	200	0,1	2	3,0	6,0
7V5	7,0	7,9	50	7	3,8	5	150	0,1	2	5,0	4,0
8V2	7,7	8,7	50	7	4,5	5	150	0,1	2	6,15	4,0
9V1	8,5	9,6	50	10	5,5	5	150	0,1	2	6,8	3,0
10	9,4	10,6	70	15	6,5	5	90	0,1	2	7,5	3,0
11	10,4	11,6	70	20	7,7	5	85	0,1	2	8,25	2,5
12	11,4	12,7	90	20	8,4	5	85	0,1	2	9,0	2,5
13	12,4	14,1	110	26	9,8	5	80	0,1	2	9,75	2,5
15	13,8	15,6	110	30	11,3	5	75	0,1	2	11,25	2,0
16	15,3	17,1	170	40	12,8	5	75	0,1	2	12,0	1,5
18	16,8	19,1	170	50	14,4	5	70	0,1	2	13,5	1,5
20	18,8	21,2	220	55	16,0	5	60	0,1	2	15,0	1,5
22	20,8	23,3	220	55	18,7	5	60	0,1	2	16,5	1,25
24	22,8	25,6	220	80	20,4	5	55	0,1	2	18,0	1,25
27	25,1	28,9	220	80	22,9	5	50	0,1	2	20,25	1,0
30	28,0	32,0	220	80	27,0	5	50	0,1	2	22,25	1,0
33	31,0	35,0	220	80	29,7	5	45	0,1	2	24,75	0,9
36	34,0	38,0	220	80	32,4	5	45	0,1	2	27,0	0,8
39	37,0	41,0	500	90	35,1	2,5	45	0,1	2	29,25	0,7
43	40,0	46,0	600	90	38,7	2,5	40	0,1	2	32,25	0,6
47	44,0	50,0	700	110	44,0	2,5	40	0,1	2	35,25	0,5
51	48,0	54,0	700	125	49,0	2,5	40	0,1	2	38,25	0,4
56	52,0	60,0	1 000	135	55,0	2,5	40	0,1	2	42,0	0,3
62	58,0	66,0	1 000	150	62,0	2,5	35	0,1	2	46,5	0,3
68	64,0	72,0	1 000	200	70,0	2,5	35	0,1	2	51,0	0,25
75	70,0	79,0	1 500	250	78,0	2,5	35	0,1	2	56,25	0,2

T_j = 25 °C

6.5.5. DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES (DEL)

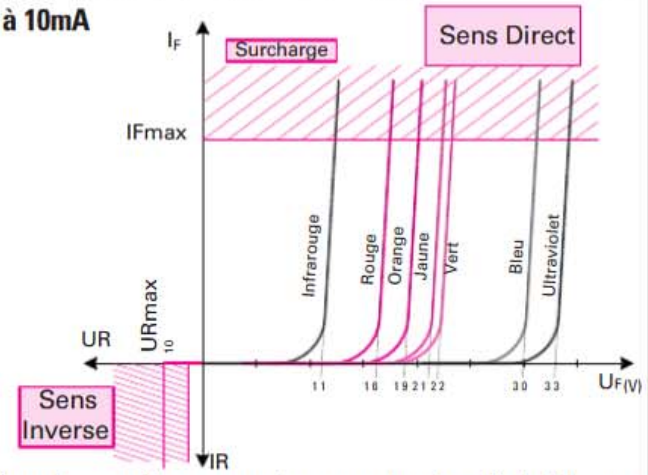
• Principe

Fonctionnement identique à celui d'une diode classique.
Lorsque la jonction est passante, elle diffuse un rayonnement.

La couleur d'une diode électroluminescente est due à la longueur d'onde du semi-conducteur :

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Tension de seuil à 10mA
InfraRouge	$\lambda > 760$	$U_{F0} \approx 1{,}1\ V$
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$U_{F0} \approx 1{,}6\ V$
Orange	$590 < \lambda < 610$	$U_{F0} \approx 1{,}9\ V$
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$U_{F0} \approx 2{,}1\ V$
Vert	$500 < \lambda < 570$	$U_{F0} \approx 2{,}2\ V$
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$U_{F0} \approx 3{,}0\ V$
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$U_{F0} \approx 3{,}3\ V$

Blanc : diode ultraviolette avec une couche de phosphore ou assemblage de trois diodes rouge verte bleue.



• Diodes électroluminescentes ordinaires

- Signalisation d'état d'appareils divers (lampes témoins en face avant ou sur le circuit, tableaux de bord de voitures, équipements de sécurité).
- Signalisation routière, feux arrières de voitures ou de bicyclettes.
- Affichage alphabétique ou numérique d'appareils de mesure, d'horloges.
- Optocoupleurs.
- Transmissions de signaux par fibre optique.
- Télécommandes (infrarouges).
- Éclairage invisible pour caméras de surveillance (dans l'infrarouge).

• Diodes électroluminescentes blanches

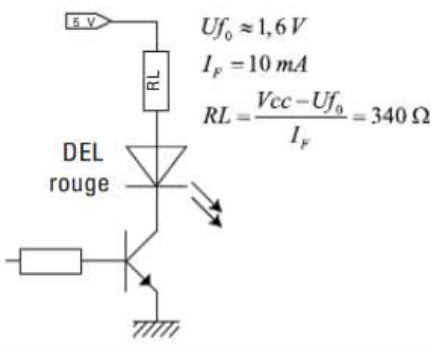
L'amélioration du rendement des DEL permet de les employer en remplacement de lampes à incandescence ou fluorescence, à condition de les monter en nombre suffisant :

- Éclairages de secours.
- Éclairage de courte portée portatif.
- Lampes de poche à piles ou accumulateur à génératrice de recharge incorporé.
- Lampes de balisage des jardins alimentées par panneau solaire.
- Le rétroéclairage de l'écran par des diodes électroluminescentes.

• Mise en œuvre d'une DEL

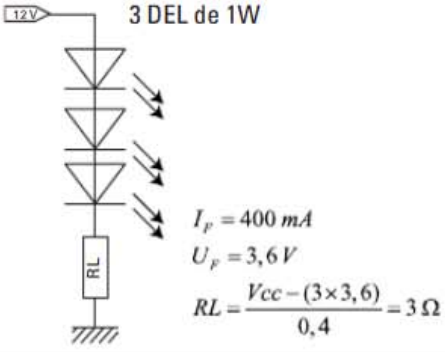
Intensité maximale typique : 5 à 30 mA pour une DEL de faible puissance.
De l'ordre de 350 à 1000 mA pour un LED de forte puissance (éclairage).

Commande d'un voyant



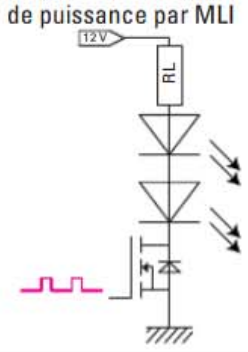
$Uf_0 \approx 1{,}6\ V$
$I_F = 10\ mA$
$RL = \frac{Vcc - Uf_0}{I_F} = 340\ \Omega$

Eclairage 3 DEL de 1W



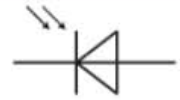
$I_F = 400\ mA$
$U_F = 3{,}6\ V$
$RL = \frac{Vcc - (3 \times 3{,}6)}{0{,}4} = 3\ \Omega$

Commande d'une DEL de puissance par MLI



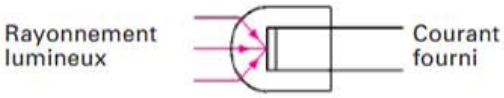
6.5.6. PHOTODIODES, PHOTOTRANSISTORS

• Photodiodes



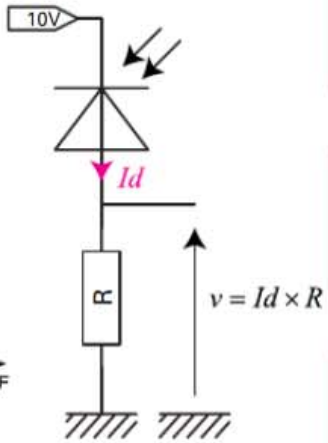
Une photodiode est constituée par une jonction PN qui peut être éclairée extérieurement. Elle travaille en polarisation inverse sans atteindre la tension de claquage de la diode.

Dans l'obscurité, elle laisse passer, comme toute diode, un courant inverse. Ce courant s'appelle le **courant d'obscurité**. Lorsqu'on éclaire la jonction, il y a création d'un courant inverse dit **courant photoélectrique**.
Ce courant de quelques µA est pratiquement indépendant de la tension inverse au-delà d'un volt ou deux.

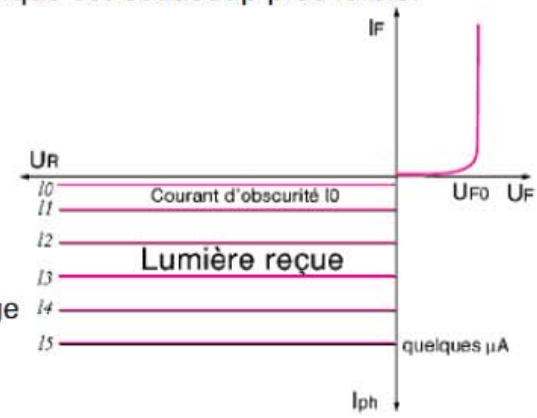


• Performances et applications

Les photodiodes ont, par rapport aux photorésistances, les avantages :
• d'avoir une réponse très rapide et plus linéaire ;
• d'être beaucoup plus petites et robustes.
Au contraire, leur courant photoélectrique est beaucoup plus faible.



Mesures d'éclairements
densitomètres,
photomètres,
radiométrie.
Capteurs optiques d'impulsions
tachymètres,
équipements de fibres optiques,
récepteur télécommande infrarouge

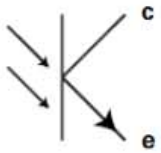


• Phototransistors

Transistor dont le boîtier comporte une extrémité transparente munie d'une lentille qui concentre la lumière sur la jonction « collecteur-base ».

Cette jonction, polarisée en inverse, se comporte comme une photodiode. **Le courant qui en résulte subit l'effet multiplicatif du transistor**, d'où un courant « collecteur-émetteur » β fois plus élevé que celui d'une photodiode.
La courbe ci-dessous montre la grande linéarité de ce dispositif vis-à-vis de l'éclairement et ce, sur plusieurs décades.

Symbole



• Applications : identiques à celles de la photodiode.

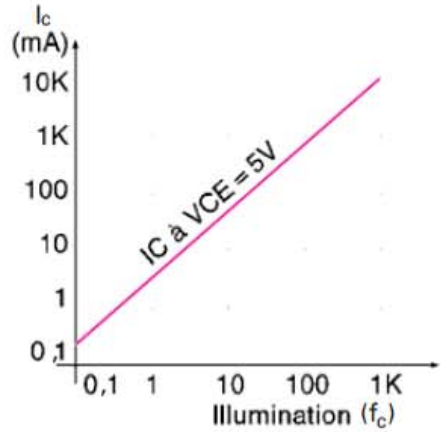
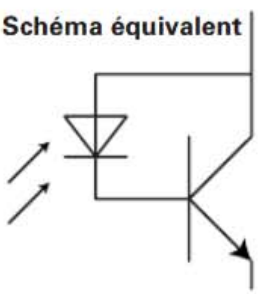
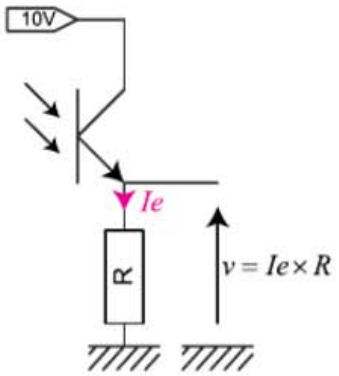


Schéma équivalent





6.5.7. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES (PHOTOPILES)

• Principe

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

• Cellule en silicium amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé.
Rendement faible en plein soleil, de 5% à 7%, environ 60 Wc/m²

• Cellule en silicium polycristallin

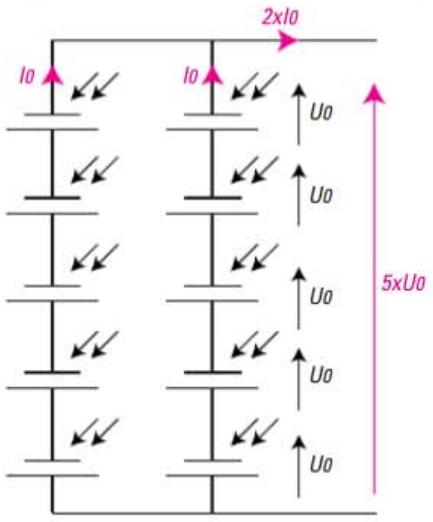
Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.
Rendement 12% à 14% de conversion, environ 130 Wc/m²

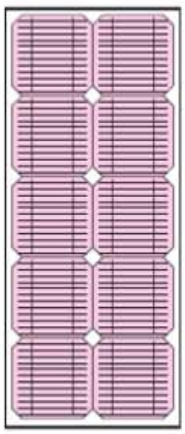
• Cellule en silicium monocristallin

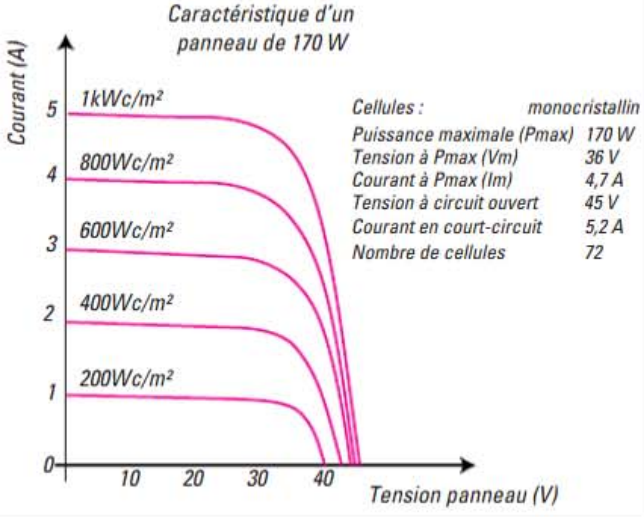
Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.
Rendement 14% à 16% de conversion, environ 150 Wc/m²

• Réalisation et applications

Pour obtenir un maximum de rendement, il faut faire en sorte, par construction, que la surface de la jonction soit la plus grande possible et que l'une des lames soit suffisamment mince pour être facilement traversée par la lumière.
La tension d'une seule cellule étant assez faible (0,6 V à vide), on réunit plusieurs cellules en série. Les piles obtenues sont ensuite groupées en parallèle pour augmenter le courant.





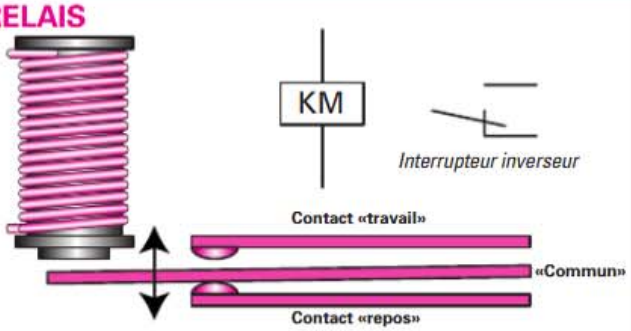


6.6. COMMUTATION

6.6.1. CONTACTEURS ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET RELAIS

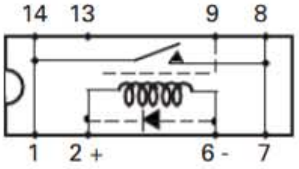
• Fonctionnement

Lorsqu'une tension est appliquée à ses bornes, la bobine est alimentée et crée un champ magnétique comparable à celui d'un aimant.
Ce champ magnétique attire la partie mobile du circuit magnétique sur laquelle sont fixés les contacts mobiles qui viennent en contact avec les contacts fixes.



Interrupteur à Lames Souples ILS

Relais miniature Reed

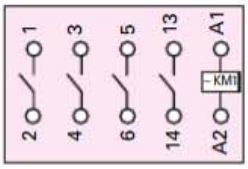


Relais Reed taille d'un circuit intégré 14 broches
Utilise un contact ILS

Contacteur industriel LC1K (Schneider)

Caractéristiques des contacts en alternatif

Puissance nominale maximale en kW						Courant Maximum		
1 phase		3 phases				Inductif AC3 Ampères	Résistif AC1 Ampères	Réf.
115 V hp	230 V hp	200 V hp	230 V hp	460 V hp	575 V hp			
0,5	1,5	1,5	1,5	3	3	6	15	LC1K0610 LC1K0601
0,5	1,5	2	3	5	5	9	20	LC1K0910 LC1K0901
0,5	1,5	3	3	7,5	10	12	20	LC1K1210 LC1K1201



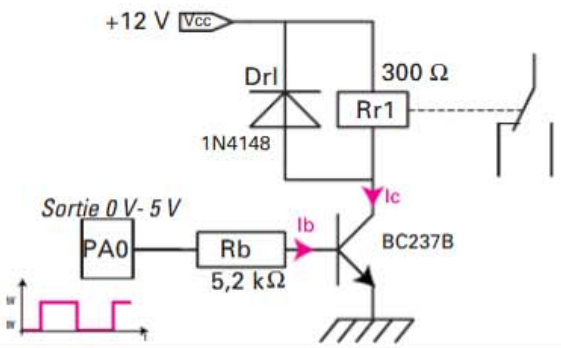
Caractéristiques de la bobine de commande

Volts AC 50/60 Hz	12	24	42	48	110	120	127	200/ 208	220/ 230	230	230/ 240	277	380/ 400	400/ 415	440	480	660/ 690
Code	J7	B7	D7	E7	F7	G7	FC7	L7	M7	P7	U7	UE7	Q7	N7	R7	T7	Y7

• Commande d'un relais.

La résistance de bobine d'un relais Reed alimenté en 5 V est d'environ 300 Ω soit un courant d'une dizaine de milliampères pour le commander. Il est possible de commander ce type de relais directement à l'aide d'un opérateur logique type TTL.

Dans la majorité des cas, il convient d'utiliser une interface de puissance comme un transistor et d'y adjoindre une diode de roue libre pour neutraliser l'effet inductif de la bobine du relais.



$$Ic \approx \frac{Vcc}{Rr1} = \frac{12}{300} = 40\ mA$$

$$Ib_{sat} = \frac{Ic}{\beta} \approx \frac{Ic}{100} = 400\ \mu A$$

$$Ib = 2.Ib_{sat} = 800\ \mu A$$

$$Rb_{maxi} = \frac{Sortie - Vbe}{Ib} = \frac{5 - 0,6}{8.10^{-4}} = 5,5\ k\Omega$$

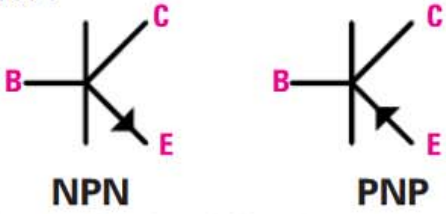
$$Rb_{normalisée} = 5,2\ k\Omega$$

6.6.2. LE TRANSISTOR BIPOLAIRE

• Symboles

Il existe deux types de transistors bipolaires :
le transistor **NPN** et le transistor **PNP**.

B : base du transistor
C : collecteur du transistor
E : émetteur du transistor



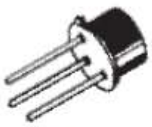
NPN **PNP**

La **flèche indique** toujours **l'émetteur** et le sens de circulation du courant.

• Boîtiers

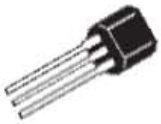
X37

TO72



TO5

TO126



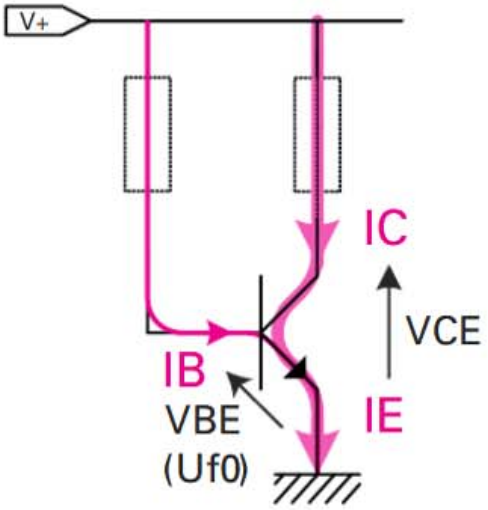
X10

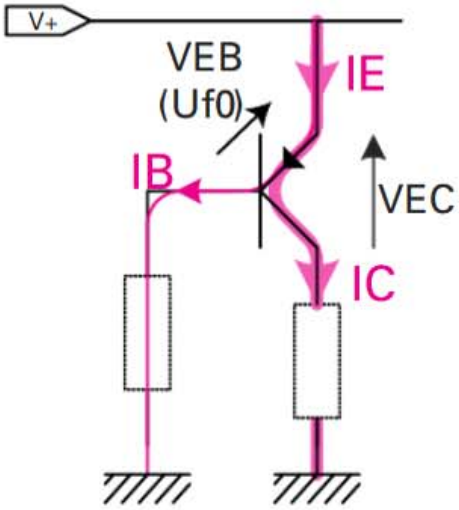
TO220

TO3

• Polarisation

L'alimentation électrique positive est représentée par convention dans la partie supérieure du schéma. Il est donc pratique de représenter un transistor PNP émetteur dans la partie supérieure (figure de droite). Il en résulte que les courants sont positifs ainsi que les tensions.





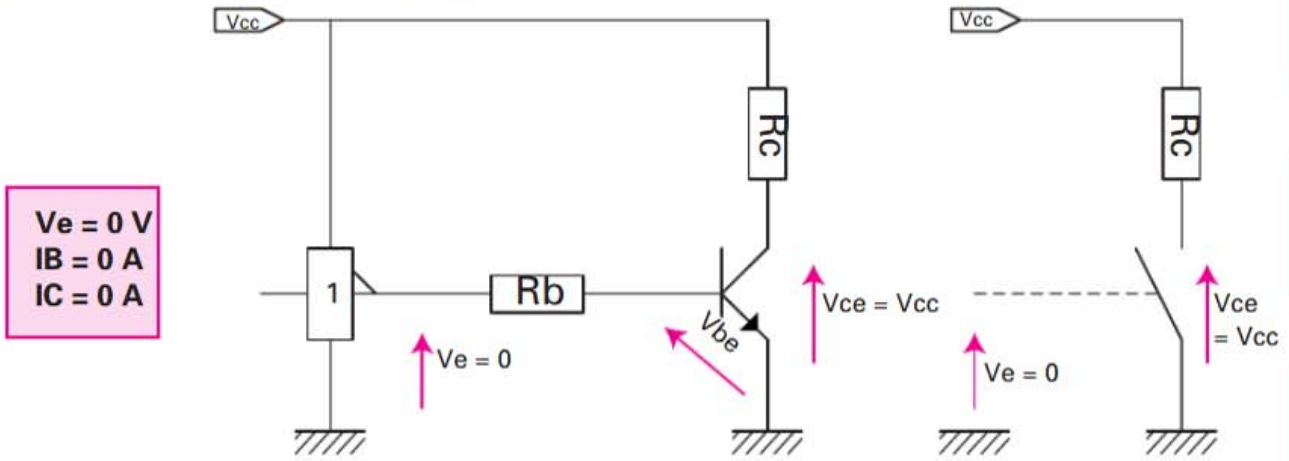
• Relations

$$IE = IB + IC$$

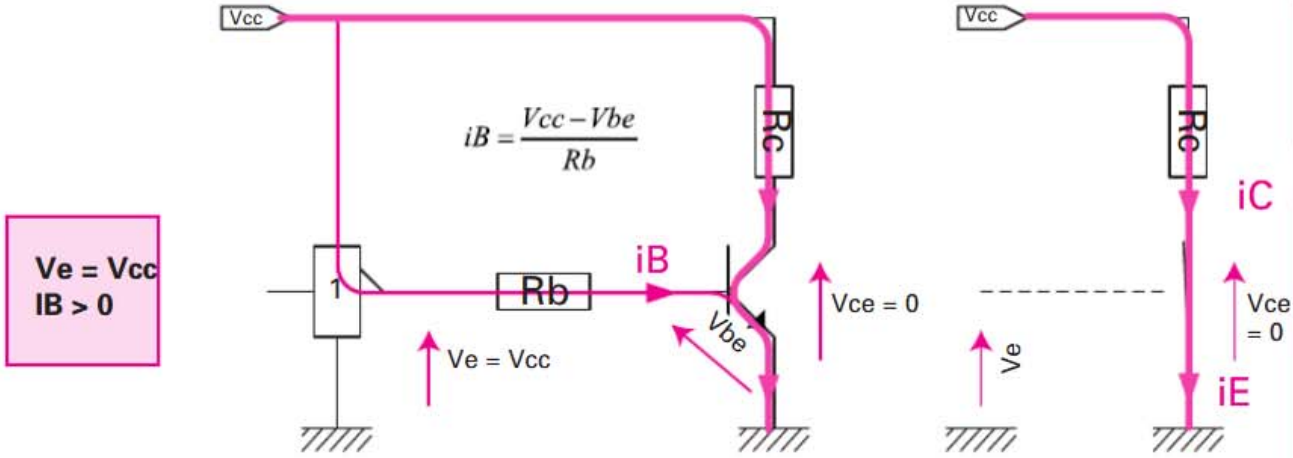
$$IC = \beta \cdot IB$$

$IC = \beta \cdot IB$ est la relation linéaire entre le courant de base et le collecteur.
β (ou Hfe dans les catalogues constructeurs) est appelé le gain du transistor.
Il est d'environ 20 à 500.

Utilisation d'un transistor bipolaire en commutation.



Le transistor est bloqué, il est équivalent à un interrupteur ouvert.



Le transistor est passant (saturé), il est équivalent à un interrupteur fermé.

C'est un courant qui commande la conduction d'un transistor bipolaire.

Extraits de catalogue

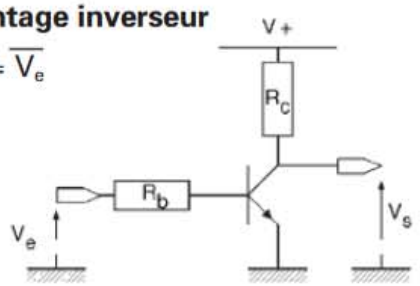
Référence	Type	Boîtier	$V_{CE\ max}$	$I_{C\ max}$	Fréquence	Gain ß
2N2222	NPN	TO18	30 V	800 mA	250 MHz	75 mini
2N2905	PNP	TO5	40 V	600 mA	200 MHz	100 mini
2N2907	PNP	TO18	40 V	600 mA	200 MHz	100 mini
2N3055	NPN	TO3	60 V	15 A	200 KHz	20 à 70
2N6379	PNP	TO3	120 V	50 A	30 MHz	30 à 120
2N6389	NPN	TO72	12 V	40 mA	1 GHz	25 à 250
BC308	PNP	X10	25 V	100 mA	100 MHz	125 mini
BC238	NPN	X10	20 V	100 mA	150 MHz	110 mini
BC547	NPN	X10	45 V	100 mA	200 MHz	110 mini
BDX33A	NPN	TO220	60 V	10 A	20 MHz	750 mini
BDX34A	PNP	TO220	60 V	10 A	20 MHz	750 mini

Le transistor bipolaire

• Exemples d'application de transistor en commutation

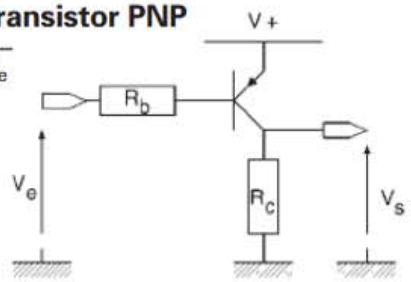
Montage inverseur

$V_S = \overline{V_e}$

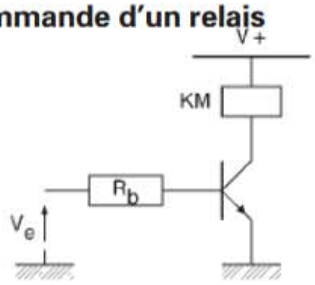


Avec transistor PNP

$V_S = \overline{V_e}$



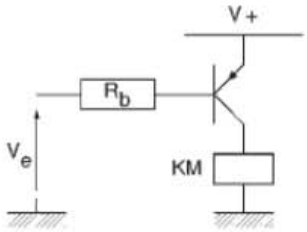
Commande d'un relais



Relais actif pour :

$V_e >> 0{,}6\ V$

Avec transistor PNP



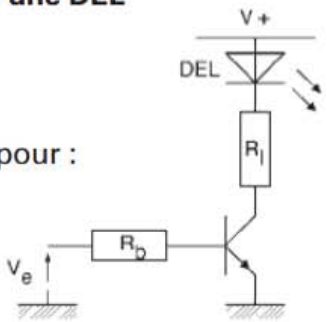
Relais actif pour :

$V_e < (V+) - 0{,}6\ V$

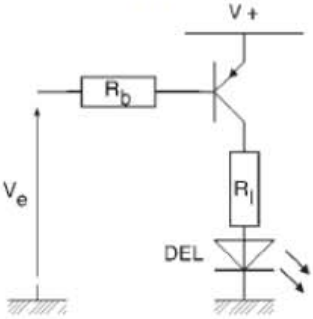
Commande d'une DEL

DEL allumée pour :

$V_e >> 0{,}6\ V$



Avec transistor PNP

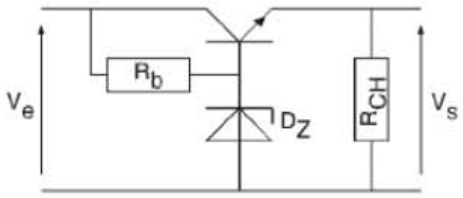


DEL allumée pour :

$V_e < (V+) - 0{,}6\ V$

• Exemples d'application de transistor en amplification

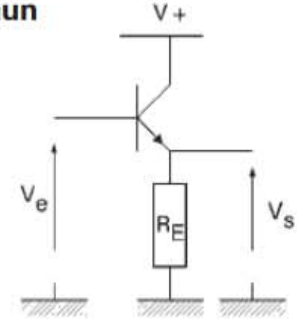
Source de tension



$V_s = VD_Z - V_{BE}$

$$I_{S\,max} = \frac{V_e - VD_Z}{R_b} \times \beta$$

Collecteur commun

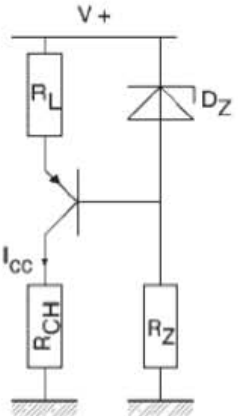


$V_S = V_e - V_{BE}$

$I_E = (\beta + 1) I_B$

L'impédance d'entrée est élevée et l'impédance de sortie est faible.

Générateur de courant constant



$0 < U_{rch} < V+$

$$I_{cc} \approx \frac{V_{DZ} - V_{BE}}{R_L}$$

I_{cc} est constant car il ne dépend que de termes constants.

• Caractéristiques des transistors NPN de commutation 2N2222 et 2N2222A

Courant moyen (max. 800 mA).
Basse tension (max. 40 V).

Applications

Amplification linéaire et commutation

Description

Transistor de commutation NPN en boîtier TO18
Transistor complémentaire PNP : 2N2907A.

PIN	Description
1	émetteur
2	base
3	collecteur, connecté au boîtier

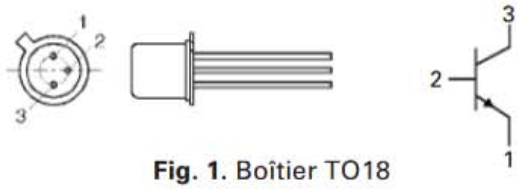


Fig. 1. Boîtier TO18

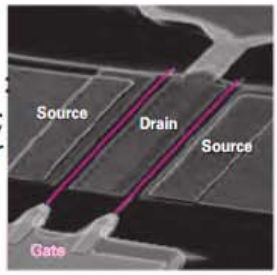
Références rapides

Symbole	Paramètres	Conditions	Min.	Max.	Unité
V_{CBO}	Tension collecteur-base 2N2222 2N2222A	Émetteur en l'air	 – –	 60 75	 V V
V_{CEO}	Tension collecteur-émetteur 2N2222 2N2222A	Base en l'air	 – –	 30 40	 V V
V_{EBO}	Tension émetteur-base 2N2222 2N2222A	Collecteur en l'air	 – –	 5 6	 V V
I_C	Courant de collecteur (DC)		–	800	mA
I_{CM}	Courant de pointe de collecteur		–	800	mA
I_{BM}	Courant de pointe de base		–	200	mA
P_{tot}	Puissance totale dissipée	$T_{amb} \leq 25$ °C	–	500	mW
		$T_{boit} \leq 25$ °C	–	1,2	W
h_{FE}	Gain en courant	$I_C = 10$ mA ; $V_{CE} = 10$ V	75	–	
f_T	Fréquence de transition 2N2222 2N2222A	$I_C = 20$ mA ; $V_{CE} = 20$ V ; f = 100 MHz	 250 300	 – –	 MHz MHz
t_{off}	Temps de blocage	$I_{Con} = 150$ mA ; $I_{Bon} = 15$ mA ; $I_{Boff} = -15$ mA	–	250	ns
T_{stg}	Température de stockage		– 65	+ 150	°C
T_j	Température de jonction		–	200	°C
T_{amb}	Température d'utilisation		– 65	+ 150	°C

Doc.
PHILIPS

6.6.3. LE TRANSISTOR MOS

• Le transistor à effet de champ, le transistor MOS

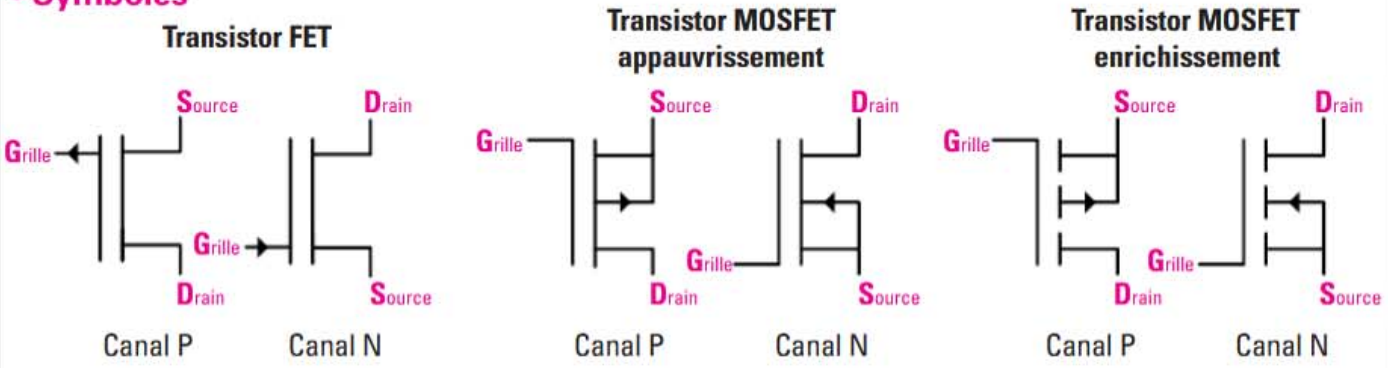


Le transistor à effet de champ diffère du transistor bipolaire par sa commande :
- le **transistor bipolaire est commandé par un courant** injecté dans sa base ;
- le **transistor à effet de champ est commandé par une tension** appliquée sur sa grille.

Il existe deux types de transistors à effet de champ :
- le transistor à effet de champ à jonction « **transistor FET** » ;
- le transistor à effet de champ à grille isolée ou **MOS** ou **MOSFET**.

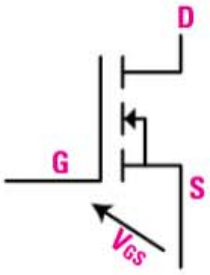
Dans les deux cas, on distingue deux types de transistors à effet de champ : **canal N** et **canal P**.

• Symboles



Un transistor à effet de champ est un composant à trois broches : la **Grille**, le **Drain** et la **Source**.

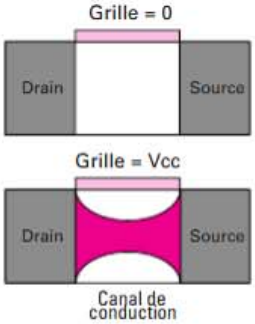
On considère que la commande du transistor se fait par l'application d'une tension VGS positive dans le cas d'un type N, négative dans le cas d'un type P.



Les caractéristiques de sortie sont liées au rapport tension/courant admissible entre le drain et la source, représenté par une résistance équivalente RDSon lorsque le transistor est passant.

• Fonctionnement

Un transistor à effet de champ est un **transistor unipolaire** :
son fonctionnement est basé sur l'**action d'un champ électrique sur un canal** composé d'un seul type de porteurs de charges mobiles.



La présence d'un champ électrique peut autoriser la conduction électrique dans ce canal (transistor à enrichissement, ou *enhancement*) ou la réduire (transistor à appauvrissement, ou *depletion*).

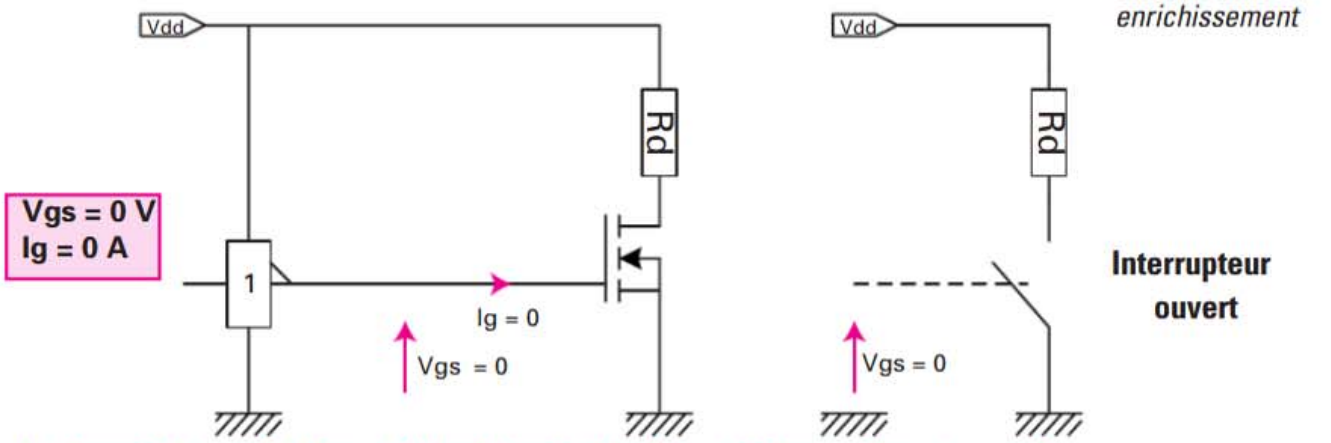
Par rapport à un transistor à jonction ordinaire (NPN ou PNP), il présente l'intérêt d'avoir une grande impédance d'entrée.
Plus précisément, cette résistance d'entrée est la résistance de fuite de la jonction grille-source (GS) polarisée en inverse. La capacité d'entrée du transistor est faible (quelques picofarads).

Les transistors **FET**, **MOSFET** contrôlent le courant qui les traverse à l'aide d'une tension appliquée sur l'électrode centrale nommée **G**rille.

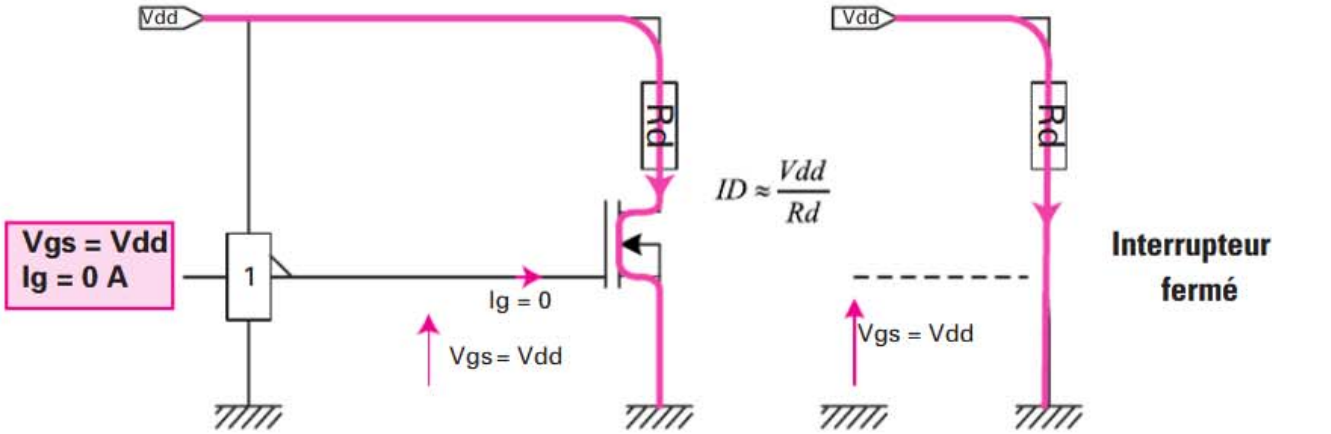
Ils trouvent leurs applications dans les circuits intégrés numériques, en particulier avec la technologie CMOS, ainsi que dans l'électronique de puissance.

Utilisation d'un transistor MOSFET en commutation.

Canal N enrichissement



Le transistor est bloqué, il est équivalent à un interrupteur ouvert.



Le transistor est passant, il est équivalent à un interrupteur fermé.
C'est une tension qui commande la conduction d'un transistor FET, MOSFET.

Exemples d'application

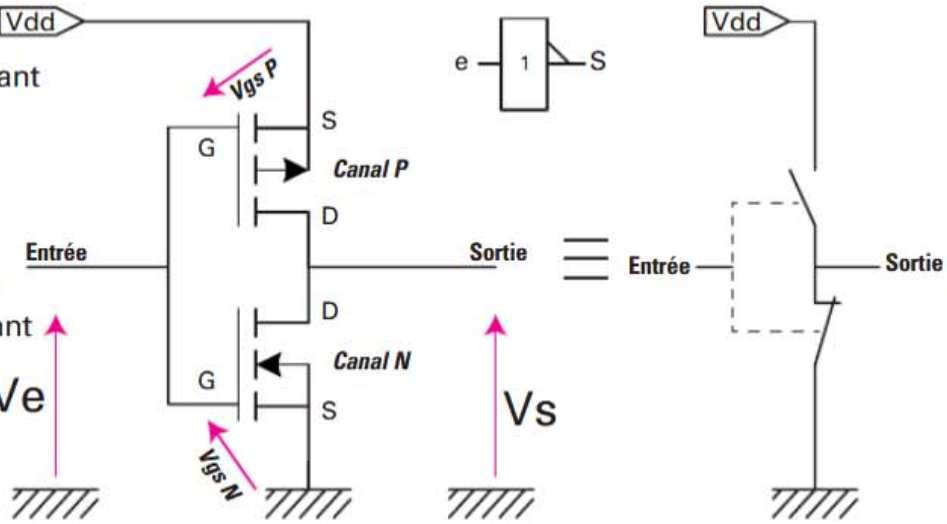
Portes logiques CMOS (transistors **MOS** complémentaires **canal N** et **canal P**).
Les transistors MOSFET canal N ont un fonctionnement complémentaire du transistor MOSFET canal P. Ce dernier est passant pour une tension Vgs < 0.
Dans les circuits logiques, on intègre ces deux types de transistors qui permettent la réalisation d'interrupteurs (commande en tout ou rien) et d'inverseur en commandant deux transistors montés en « push pull » (exemple ci-dessous).

Entrée = Vdd
- V_{gsN} = +Vdd canal N est passant
- V_{gsP} = 0 V canal P est bloqué

Vs = 0 V

Entrée = 0 V
- V_{gsN} = 0 V canal N est bloqué
- V_{gsP} = –Vdd canal P est passant

Vs = Vdd



6.6.4. THYRISTOR ET TRIAC

• Le Thyristor

Les thyristors sont des composants à semi-conducteurs se comportant comme des diodes qui peuvent être rendues passantes par une faible impulsion de courant appliquée sur une électrode de commande.
L'impulsion de commande ayant cessé, ils restent conducteurs et peuvent livrer passage à des courants très importants (plusieurs dizaines d'ampères) sans dissiper en eux-mêmes une puissance aussi forte que ne le ferait un transistor saturé dans les mêmes conditions.

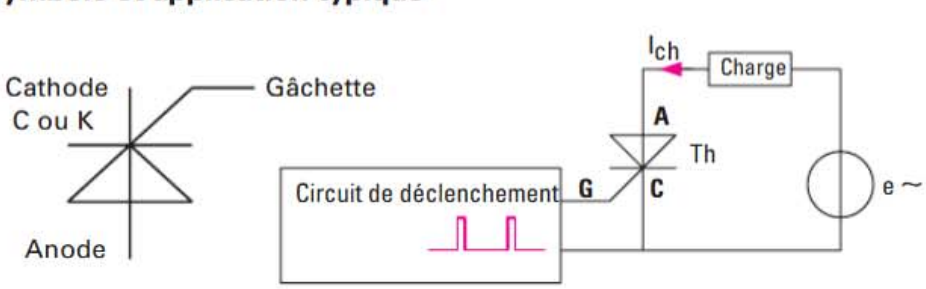
Photo : Zhejiang Huajing Rectifier Co., Ltd

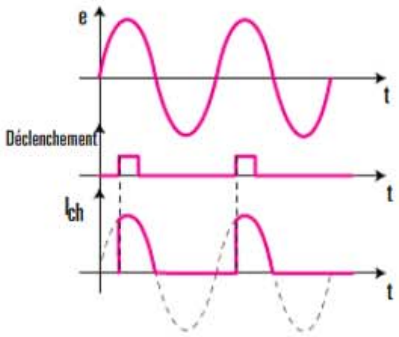
Malheureusement, ce courant ne peut être annulé aussi facilement qu'il a été établi.
Pour ce faire, il faut pratiquement :

- soit amener le courant traversant le thyristor à baisser en dessous d'une faible valeur I_H que l'on appelle courant de maintien, et ce grâce à un dispositif externe qui peut être très complexe ;
- soit, s'il est alimenté sous tension alternative, attendre que ce courant s'annule lui même.

Le thyristor est un interrupteur incomplet.

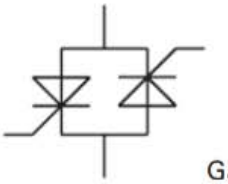
Symbole et application typique

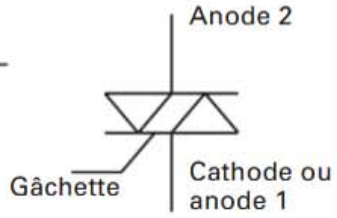




• Le triac

Lorsqu'on souhaite contrôler un courant alternatif, un seul thyristor ne suffit pas puisqu'il ne peut être traversé par le courant que dans un seul sens.
On peut alors monter deux thyristors en tête-bêche comme indiqué ci-contre. Il faut prévoir un système de double déclenchement puisque les deux gâchettes devront être alimentées à des temps différents et par des impulsions de sens différents.
Le triac permet de simplifier le montage : il est en quelque sorte constitué par deux thyristors montés en tête-bêche dans le même boîtier.
Une seule gâchette permet de déclencher le dispositif dans un sens comme dans l'autre.


Deux thyristors en tête-bêche



Symbole d'un triac

Dispositif de déclenchement d'un triac

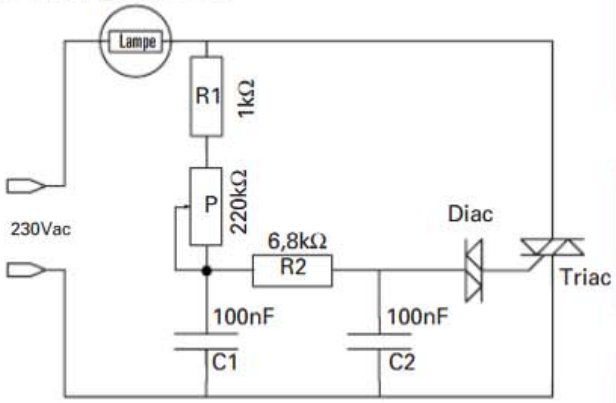
Comme les thyristors, les triacs se déclenchent par des impulsions de gâchettes dont l'intensité et la durée doivent être comprises entre certaines limites.
Les schémas de dispositifs permettant d'obtenir de telles impulsions sont excessivement divers.
On peut classer les montages en trois catégories, suivant que le courant de l'impulsion de gâchette est :

- prélevé directement sur le secteur,
- prélevé sur le secteur à travers un pont déphaseur,
- élaboré par un générateur d'impulsions annexe.

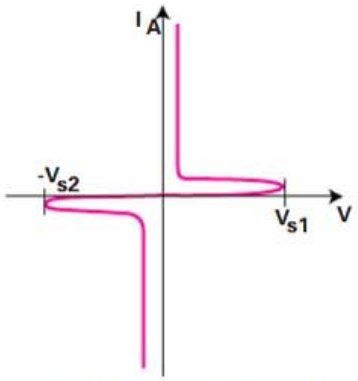
Impulsion de gâchette prélevée sur le secteur à travers un déphaseur.

Un **diac** a été utilisé afin de porter la tension de déclenchement à la valeur $V_S + V_{GT}$.
V_S étant la tension de commutation du diac mieux définie que V_{GT} du triac et devant laquelle cette dernière est négligeable :

$$V_S + V_{GT} \approx V_S$$
$$V_S \approx 33\ V$$



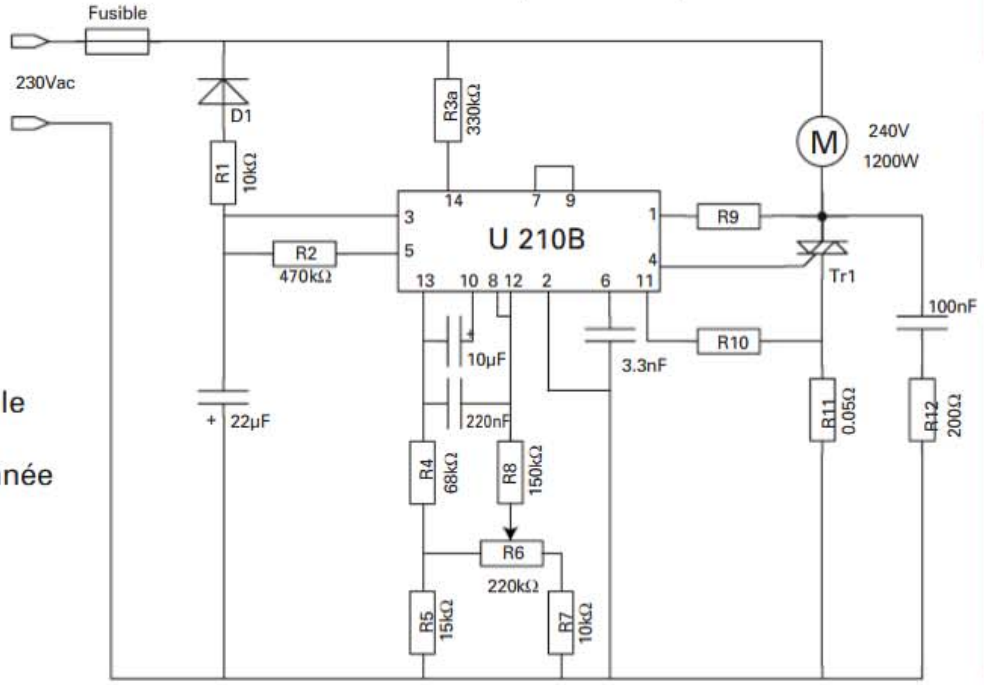
Commutateurs bilatéraux DIAC



Les diacs sont utilisés pour le déclenchement des triacs.
Leur caractéristique est donnée ci-dessus.

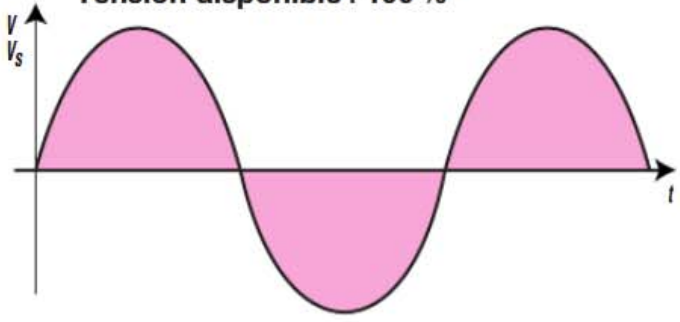
V_{S1}, V_{S2} sont de l'ordre de quelques dizaines de volts.

Déclenchement par circuit spécialisé

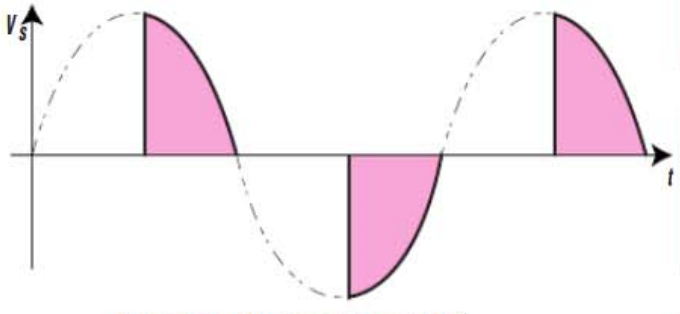


• Modulation de la puissance par modification de l'angle de conduction

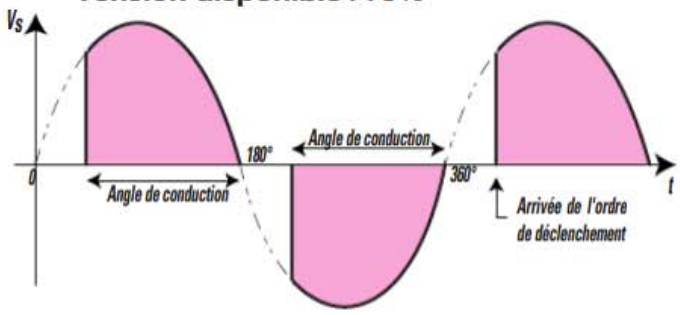
Tension disponible : 100 %



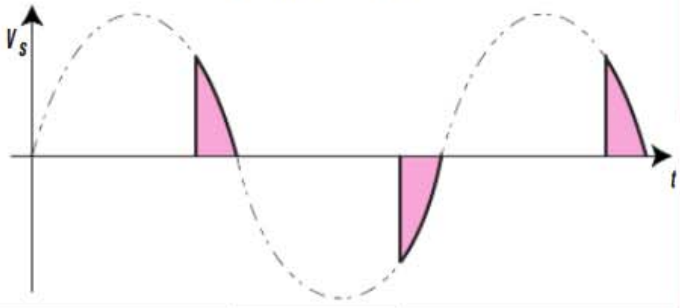
Tension disponible : 50%



Tension disponible : 75%



Tension disponible : 25 %



• Triacs série BTA140

Description générale

Destinés à être utilisés dans des applications demandant un haut pouvoir de commutation en tension, alternative et de bonnes performances thermiques.

Les applications typiques sont le contrôle de moteur industriel et les variateurs de lumière domestique.

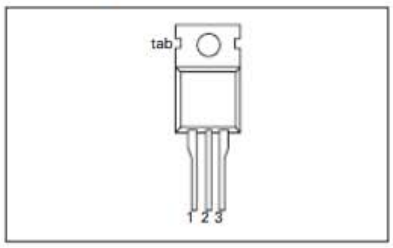
Référence rapide

Symbole	Paramètres	MAX.	MAX	MAX.	Unité
	BTA140-	**500**	**600**	**800**	
V_{DRM}	Pointe de tension répétitive à l'état bloqué	500	600	800	V
$I_{T(RMS)}$	Courant direct RMS	25	25	25	A
I_{TSM}	Pointe de courant non répétitive à l'état passant	190	190	190	A

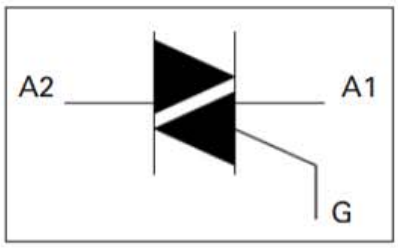
Brochage – TO220AB

PIN	DESCRIPTION
1	Anode 1
2	Anode 2
3	Gâchette
tab	Anode 2

Brochage



Symbole



Valeurs limites

Symbole	Paramètre	Conditions	MIN.	MAX.			Unité
				– 500	**– 600**	**– 800**	
V_{DRM}	Pointe de tension à l'état bloqué (répétitif)			500	600	800	V
$I_{T(RMS)}$	Courant RMS à l'état ON	pleine onde sinus ; $T_{mb} \leq 91$ °C		25			A
I_{TSM}	Pointe de courant non répétitive à l'état passant	pleine onde sinus ; $T_j = 25$ °C					
		t = 20 ms	-	190			A
		t = 16,7 ms	-	209			A
I^2t	I^2t pour fusion	t = 10 ms	-	180			A^2s

Caractéristiques statiques

$T_J = 25$ °C sauf indication

Symbole	Paramètre	Conditions		MIN.	TYP.	MAX.	UNITÉ
I_{GT}	Courant de gâchette	V_D = 12 V ; I_T = 0,1 A					
			T2+ G+	-	6	35	mA
			T2+ G–	-	10	35	mA
			T2– G–	-	11	35	mA
			T2– G+	-	23	70	mA
I_L	Courant de verrouillage	V_D = 12 V ; I_{GT} = 0,1 A					
			T2+ G+	-	8	40	mA
			T2+ G–	-	30	60	mA
			T2– G–	-	18	40	mA
			T2– G+	-	15	60	mA
I_H	Courant de maintien	V_D = 12 V ; I_{GT} = 0,1 A					
			T2+	-	7	30	mA
			T2–	-	12	30	mA
V_T	Tension à l'état permanent	I_T = 30 A		-	1,3	1,55	V
V_{GT}	Tension de gâchette	V_D = 12 V ; I_T = 0,1 A		-	0,7	1,5	V
		V_D = 400 V ; I_T = 0,1 A ; T_j = 125 °C		0,25	0,4	-	V
I_D	Courant de fuite (bloqué)	$V_D = V_{DRM(MAX)}$; T_J = 125 °C		-	0,1	0,5	mA

6.7.1. CAPTEURS ÉLECTRONIQUES : EFFORT, LDR, CTN, TEMPÉRATURE

• Jauge de contrainte

Le but des **extensomètres à fils résistants** ou **jauges de déformation** est de traduire la **déformation d'une pièce en variation de résistance** électrique.

$$R_{conducteur} = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{4l}{D^2 \pi}$$

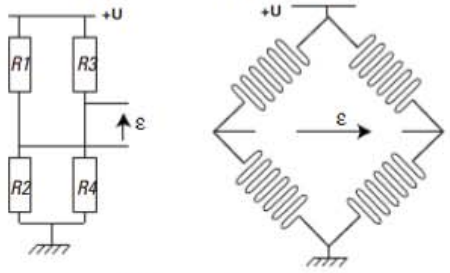
ρ résistivité du conducteur
l sa longueur
s l'aire de sa section
D le diamètre de la section

Jauges d'extensométrie - HBM
Grille en Chrome Nickel
Support polyimide
Impédance de 350 Ohm
Allongement maximum: 2,5% à 5%

Elles consistent en des spires rapprochées et sont généralement fabriquées à partir d'une mince feuille métallique de quelques µm d'épaisseur.

Montage en pont

La mesure ne peut s'effectuer directement car les variations de conductibilité de la jauge sont trop faibles pour être mesurées directement avec un ohmmètre. Il est nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone.



On alimente par une source électromotrice +U. À l'équilibre, la tension ε est nulle, mais la variation d'une quelconque des résistances fait apparaître une tension.

RDP Electronics

Pour de très faibles variations (de l'ordre du milliohm pour les jauges de contraintes), la sortie ε est proportionnelle aux variations relatives ΔR / R de chacune des résistances.

$$\varepsilon = \frac{+U}{4}\left(\frac{(+\Delta)R1}{R1} + \frac{(-\Delta)R2}{R2} + \frac{(+\Delta)R3}{R3} + \frac{(-\Delta)R4}{R4}\right)$$

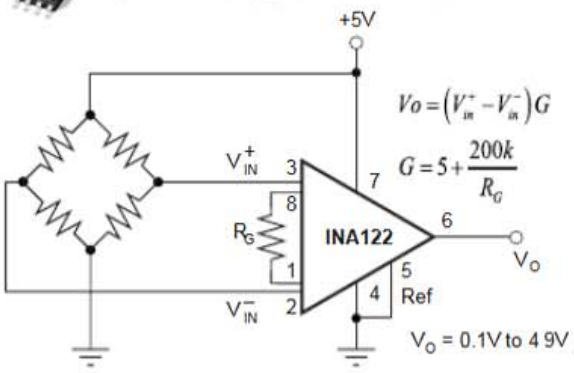
***Exemple** : R=100 Ω avec une variation ΔR de 0.001 Ω le pont fournit une tension ε de 4 mV*

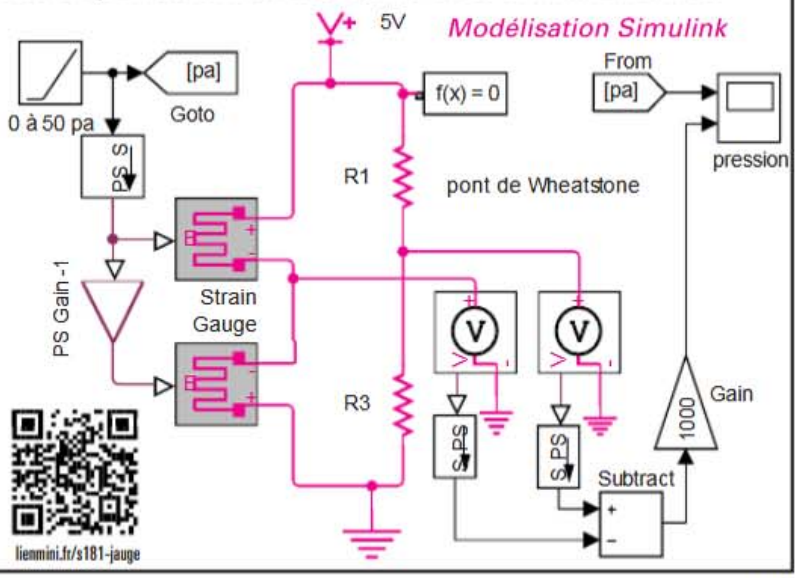
Dans la pratique, ces résistances sont souvent d'autres jauges (une, deux ou quatre).

L'alternance des signes +Δ et −Δ caractérise la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens opposé et deux résistances opposées agissent dans le même sens. Un capteur à quatre jauges permet d'avoir encore une meilleure précision qu'un capteur à une jauge. Dans la pratique, le nombre de jauges est souvent dicté par la géométrie de la pièce.

Exemple de schémas pour expérimenter et pour simuler une mesure d'effort.

Le circuit spécialisé INA 122 permet une forte amplification différentielle avec un minimum de composants.

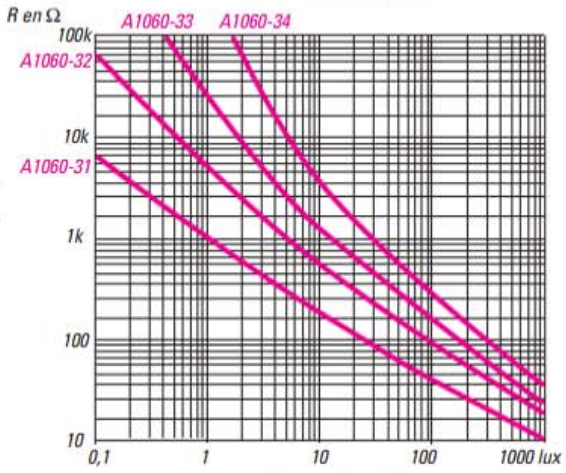




• La photorésistance LDR

Une photorésistance est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente.
On peut également la nommer résistance photo-dépendante : **L**ight-**D**ependent **R**esistor : LDR ou cellule photoconductrice.

Caractéristiques



PerkinElmer Optoelectronics

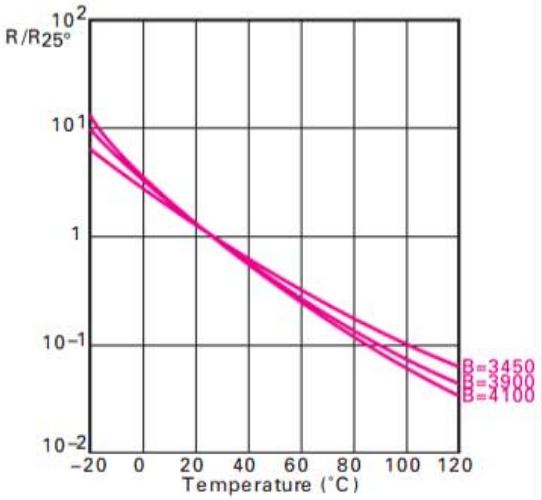
Exemple : Photorésistance A 1060 - 31 à 34

Puissance dissipée max.	90 mW
Résistance @ 10 lux	16...33 kΩ
Résistance @ 100 lux	5 kΩ
Résistance d'obscurité après 1 seconde	0,18 MΩ
Résistance d'obscurité après 5 secondes	0,5 MΩ
Longueur d'onde la plus sensible	600 nm
Tension directe max.	150 V

Symbole

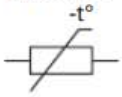
• La thermistance CTN

Caractéristique $R/R_{25} = f(t°c)$



Les **CTN** : **C**oefficient de **T**empérature **N**égatif, en anglais **NTC**, **N**egative **T**emperature **C**oefficient sont des thermistances dont la résistance diminue de façon uniforme avec la température.

Symbole



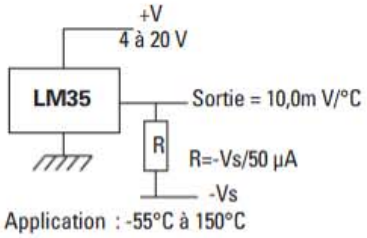
$$R_{ctn} = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)}$$

R_{ctn} : Résistance à la température recherchée T (K)
R_0 : Résistance à la température ambiante (25°) (K)
B : Constante de la thermistance.

• Capteur de température

Exemple LM35 LM19

La série LM35 LM19 sont des circuits intégrés capteurs de température de précision.
La tension de sortie est linéaire par rapport à la température.
La série LM35, LM335, LM34, LM61 fournit **une tension proportionnelle à la température : 10 mV/°C** (10 mV/°F pour le LM34)

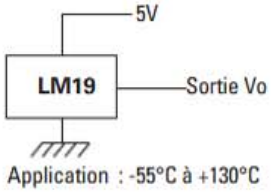


Application : -55°C à 150°C

Le LM19 peut être alimenté de 2,5 à 5 V sur toute la plage de mesure.

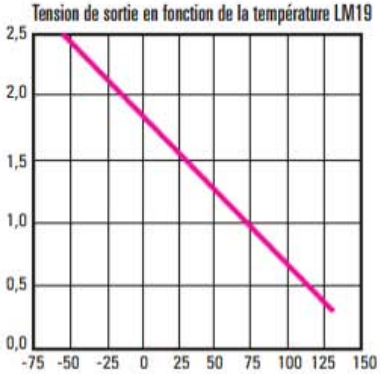
$$Vo = (-3{,}88\times10^{-6}\times T^2)+(-1{,}15\times10^{-2}\times T)+1{,}8639$$

$$t°C = -1481{,}96+\sqrt{2{,}1962\times10^{-6}+\frac{(1{,}8639-Vo)}{3{,}88\times10^{-6}}}$$



Application : -55°C à +130°C

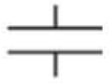
Tension de sortie en fonction de la température LM19



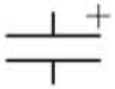
6.7.2. LE CONDENSATEUR

On forme un condensateur en rapprochant deux conducteurs appelés armatures. Lorsqu'on applique entre les deux armatures d'un condensateur une tension U, elles accumulent deux charges opposées +Q et -Q évaluées en Coulombs (C).

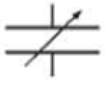
• Symboles



Symbole général



Polarisé



Variable

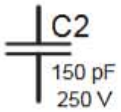
• Unités utilisées

Le **farad** est **une unité trop importante**, aussi utilise-t-on couramment les sous-multiples.

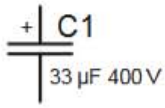
µF = 10^{-6} F : microfarad.
nF = 10^{-9} F : nanofarad.
pF = 10^{-12} F : picofarad.

• Deux types de condensateurs

Condensateurs non polarisés
1 pF à 1 µF de 63 V à 1000 V et plus



Condensateurs polarisés
100 nF à 1 F de 3 V à 500 V



• Caractéristiques particulières d'un condensateur

- Un condensateur laisse passer les variations de courant et bloque les courants continus.
- Il n'existe pas de variation brutale de tension aux bornes d'un condensateur.
- Un condensateur qui se charge est un récepteur.
- Un condensateur qui se décharge est un générateur.

• Description

Un condensateur est constitué fondamentalement de deux conducteurs électriques, ou «armatures», très proches l'un de l'autre, mais séparés par un isolant, ou «diélectrique».

La charge électrique emmagasinée par un condensateur est proportionnelle à la tension appliquée entre ses deux armatures. Aussi, un tel composant est-il principalement caractérisé par sa capacité, rapport entre sa charge et la tension.

L'unité de base de capacité électrique, le farad représente une capacité très élevée, rarement atteinte ainsi, de très petits condensateurs peuvent avoir des capacités de l'ordre du picofarad.

Une des caractéristiques des condensateurs est leur tension de service limite, qui dépend de la nature et de l'épaisseur de l'isolant entrant dans leur constitution. Cet isolant présente une certaine rigidité diélectrique, c'est-à-dire une tension au-delà de laquelle il peut apparaître un violent courant de claquage qui entraîne une destruction du composant.

Le condensateur

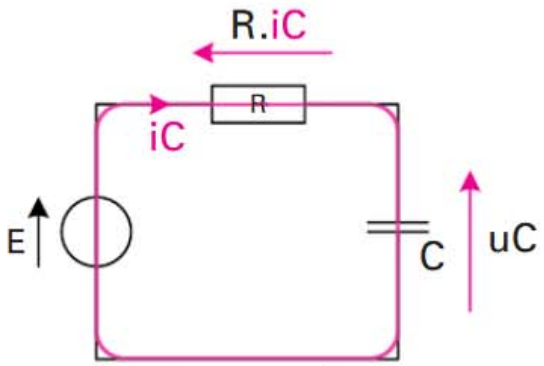
• Charge d'un condensateur

• **à t = 0 , Uc = 0**
Maille : $E - R.ic - uC = 0$

E est constant
C se charge donc uC augmente
iC diminue donc *R.iC* diminue

• **à t = τ = RC**

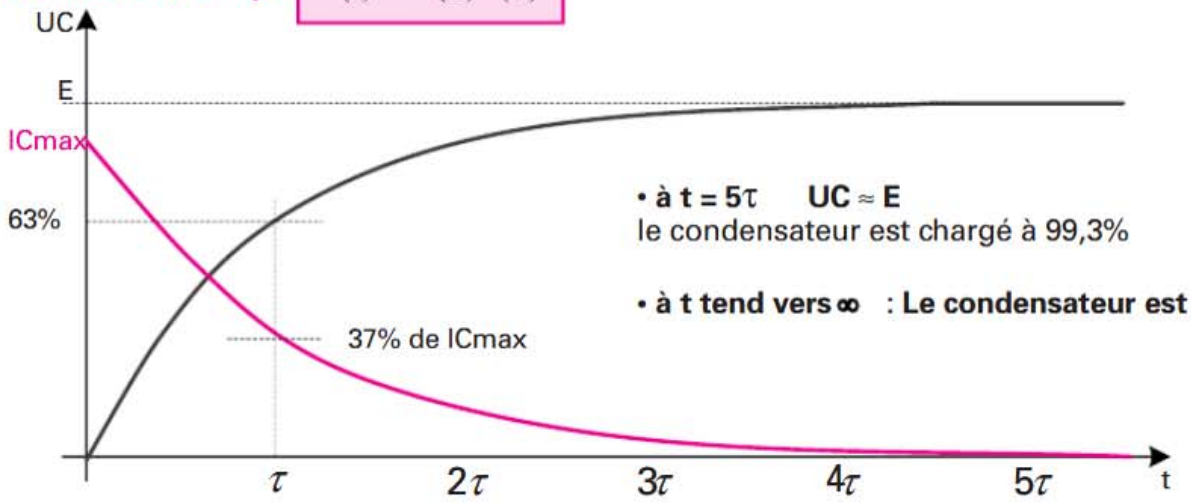
uC = 63% de E
iC = 37% (100-63%) de sa valeur maxi (IC_{max})



Le condensateur est un récepteur.

La constante de temps $\tau_{(s)} = R_{(\Omega)} C_{(F)}$

τ *en secondes, le condensateur est chargé à 63% de sa valeur*



• **à t = 5τ UC ≈ E**
le condensateur est chargé à 99,3%

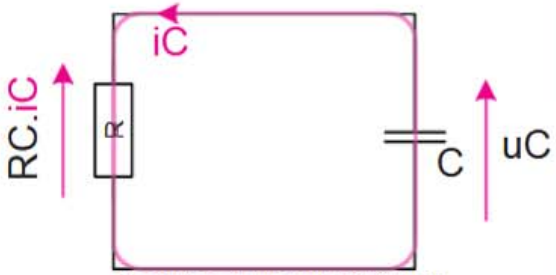
• **à t tend vers ∞ : Le condensateur est chargé.**

• Décharge d'un condensateur

• **à t = 0 , uC = E**
à t = 0 C est chargé à uC = E
Maille : $uC - RiC = 0 \Rightarrow iC = \frac{uC}{R}$

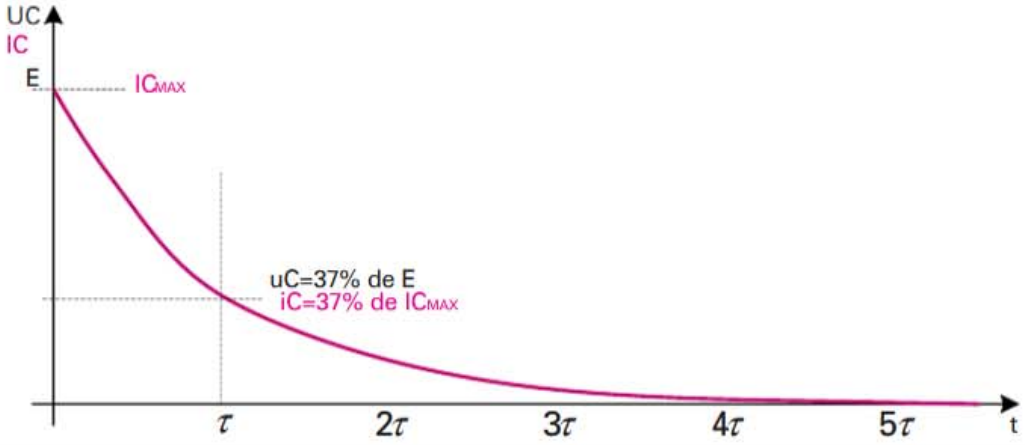
• **à t = τ = RC**
uC = 37% de E, iC = 37% de iCmax

à t = 5 τ uC ≈ 0



Le condensateur est un générateur.

le condensateur est déchargé à 99,3 %
• **à t = ∞, u = 0, i = 0 Le condensateur est déchargé.**



• Méthodes de calcul d'un condensateur

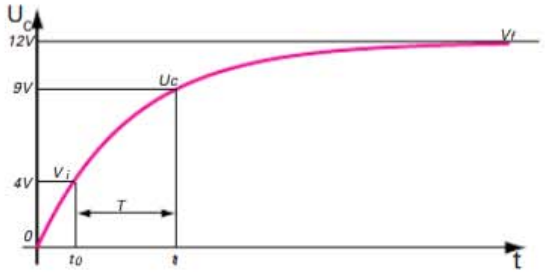
Méthode numérique

Il faut, dans un premier temps, définir les paramètres du montage :

- la constante de temps $\tau = R \cdot C$ (**R** : résistance intervenant dans la charge ou la décharge) ;
- la valeur limite V_i : (tension initiale aux bornes de **C** au début de sa charge) ;
- la valeur finale V_f (tension que prendrait **C** s'il se chargeait durant un temps infini) ;
- la valeur de la tension du condensateur à l'instant recherché U_C.

$$t = \tau \ln\left(\frac{V_i - V_f}{U_C - V_f}\right)$$

ln logarithme népérien



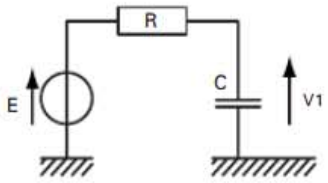
Exemple

On recherche $T = t1 - t0$, $\tau = 2$ s

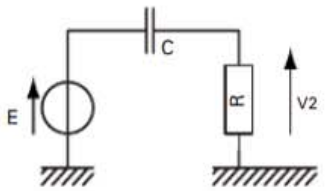
$V_i = 4$ V
$V_f = 12$ V
$U_C = 9$ V

$$T = 2 \ln\left(\frac{4-12}{9-12}\right) = 1{,}96 \text{ s}$$

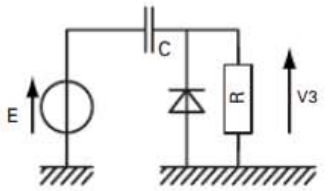
• Exemple d'applications



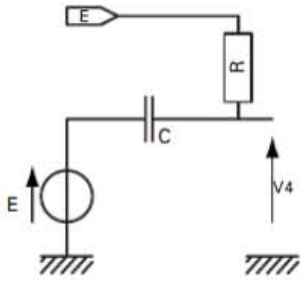
Montage intégrateur



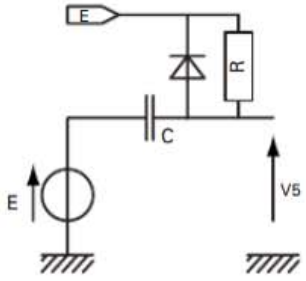
Montage dérivateur



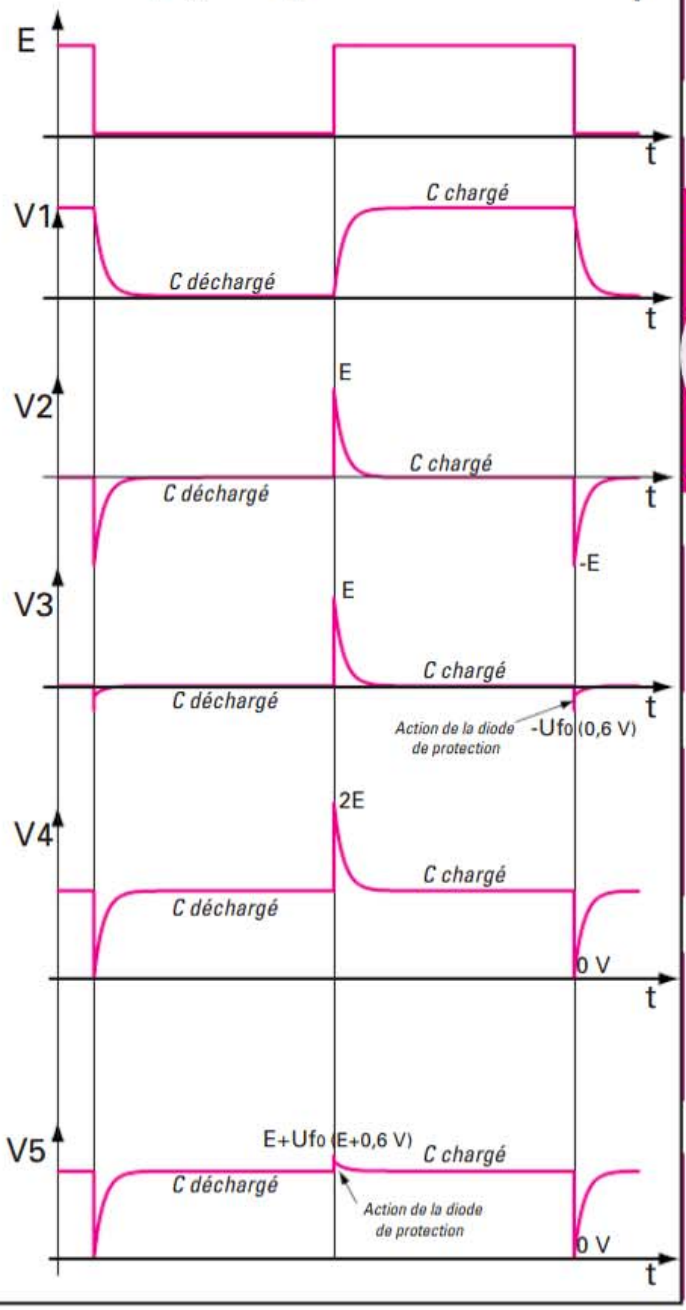
Montage dérivateur avec diode de protection



Montage dérivateur centré sur l'alimentation



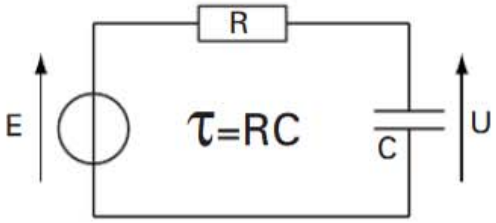
Montage dérivateur centré sur l'alimentation avec diode de protection



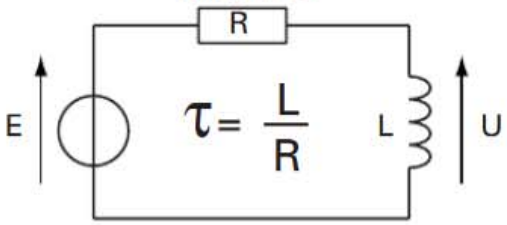
Le condensateur

• La courbe universelle

Circuit RC



Circuit RL



• Méthode à partir de la courbe universelle

Ces courbes de charge et de décharge permettent le calcul du temps de charge ou de décharge en fonction des variations de la tension aux bornes de C et le calcul de variation de tension en fonction du temps :

– l'axe des abscisses est gradué en nombre de fois la constante de temps τ ;

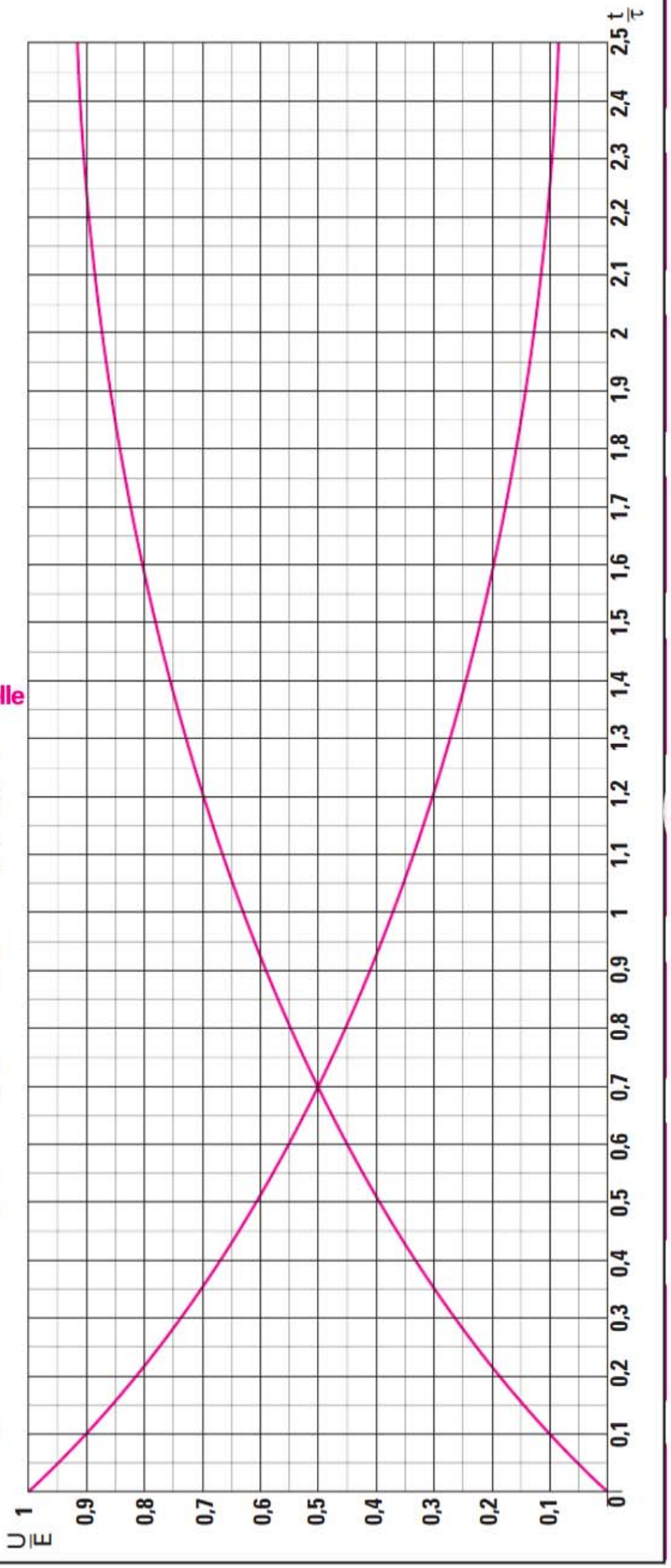
– l'axe des ordonnées en fractions de la charge limite (ou de la charge initiale).

Exemple : Une charge de condensateur de 3 à 9 V pour une valeur finale de 12 V, τ = 10 ms.

$$\frac{3}{12} = 0{,}25 \Rightarrow \text{axe } \frac{t}{\tau} = 0{,}28 \Rightarrow t = 2{,}8\ ms$$

$$\frac{9}{12} = 0{,}75 \Rightarrow \text{axe } \frac{t}{\tau} = 1{,}38 \Rightarrow t = 13{,}8\ ms$$

L'opération peut être réalisée dans les deux sens.



6.7.3. CIRCUITS NE 555 ET 556

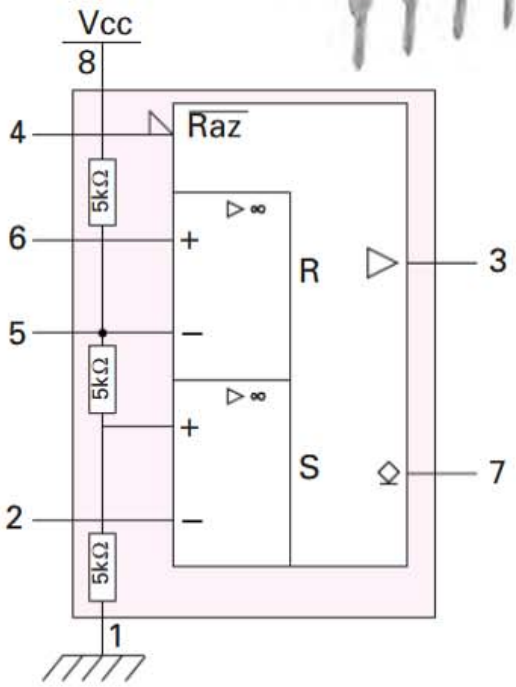
Les circuits intégrés NE**555** et NE**556** sont des monostables de longue durée qui permettent la réalisation de temporisation allant de **quelques microsecondes à quelques heures**.
Le **556** est constitué de deux **555** dans le même boîtier.

• Applications

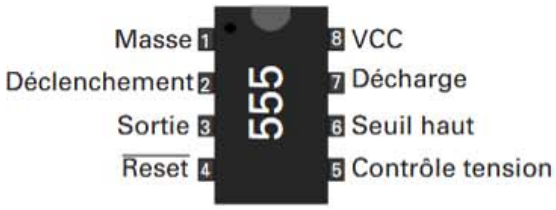
On le trouve dans des montages simples nécessitant peu de composants et une conception rapide (clignotement de DEL, mesure de température).

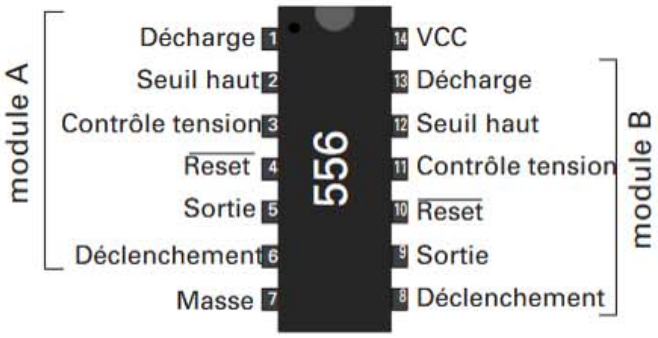
• Caractéristiques et symbole

Plage de tension d'alimentation 3 à 16 V
Courant de sortie maxi 200 mA
Temps de réponse 100 ns
Précision 1%
RAZ 0,7 V ; 0,1 mA

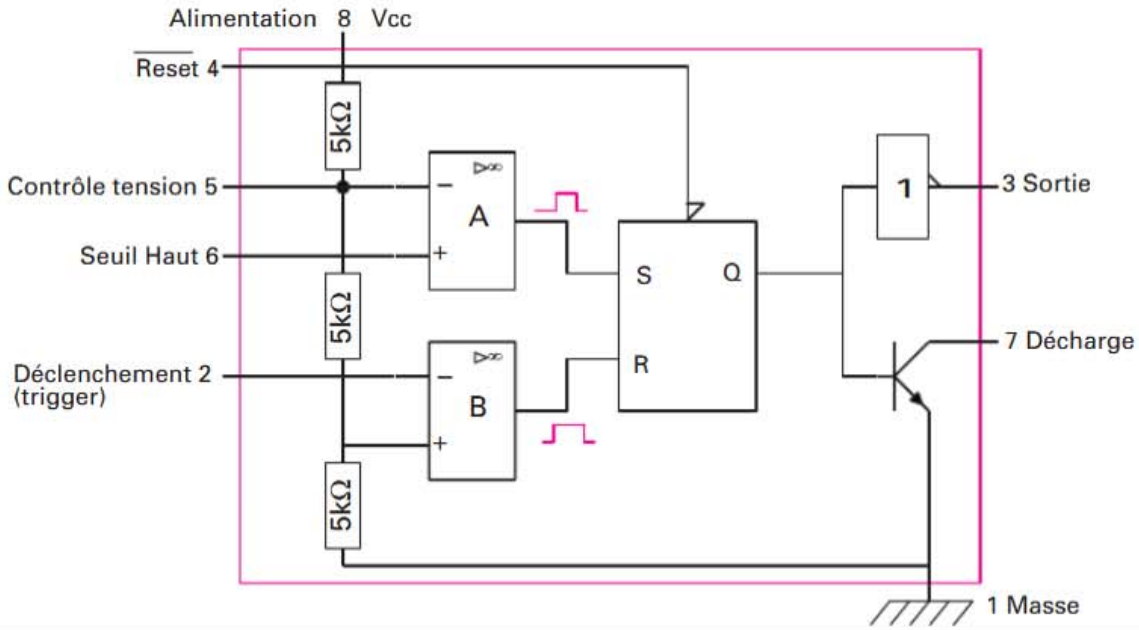


• Brochages

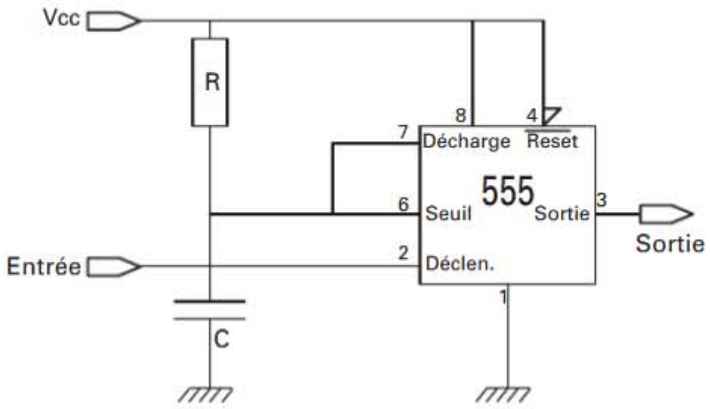


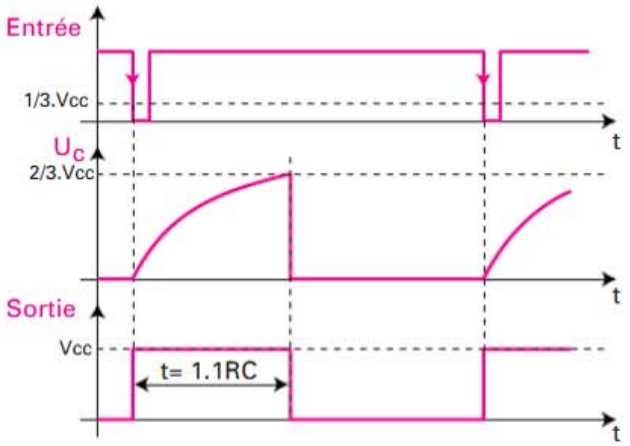


• Structure interne



• Montage monostable



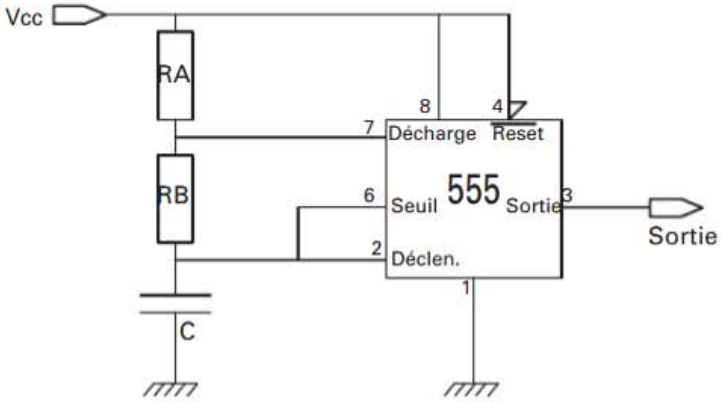


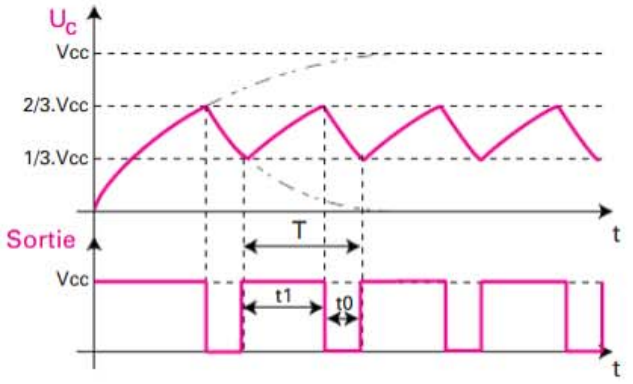
Chaque fois qu'une impulsion est envoyée sur l'entrée « déclenchement », on obtient en sortie une impulsion calibrée de durée t = 1,1 R C

Attention : la durée de l'impulsion de commande doit être inférieure à la durée de l'impulsion de sortie.

$$t = (\ln 3)RC \approx 1{,}1RC$$

• Montage astable





Le montage change successivement d'état et délivre des impulsions en permanence sur la sortie, il est appelé **astable**. Le rapport cyclique t1/T ne peut pas être inférieur à 50%.

La période du signal de sortie est : $T = t_1 + t_0$

$$t_1 = \ln 2.(RA + RB).C \qquad t_1 \approx 0{,}69.(RA + RB).C$$

$$t_0 = \ln 2.RB.C \qquad t_0 \approx 0{,}69.RB.C$$

$$T = \ln 2.(RA + 2.RB).C \qquad T \approx 0{,}69.(RA + 2.RB).C$$

$$f_{(Hz)} = \frac{1}{\ln 2.(RA + 2.RB).C} \qquad f_{(Hz)} \approx \frac{1{,}44}{(RA + 2.RB).C}$$

Rapport cyclique

$$Rc_{(\%)} = \frac{RA + RB}{RA + 2RB}$$

6.7.4. L'INDUCTANCE

L'inductance d'un circuit électrique est un coefficient qui traduit le fait qu'un courant le traversant crée un champ magnétique à travers la section entourée par ce circuit. Il en résulte un flux du champ magnétique à travers la section limitée par ce circuit.

L'inductance est égale au quotient du flux de ce champ magnétique par l'intensité du courant traversant le circuit. **L'unité de l'inductance est le henry (H).**

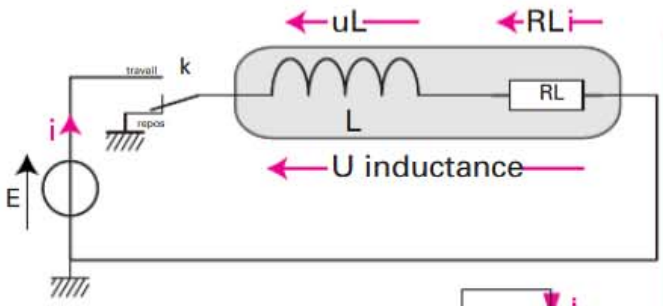
On désigne par **inductance** tout circuit électrique ou dipôle électrique qui par sa construction a une certaine valeur d'inductance (grandeur physique). Ces dipôles sont généralement **des bobines**, souvent appelées inductances ou self (en anglais self inductance qui a donné le mot « self ») par abus de langage.

Une inductance est constituée d'une bobine qui peut être représentée par un schéma équivalent.

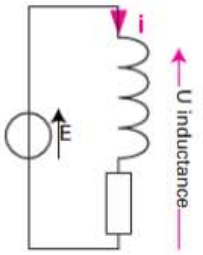
RL : résistance pure (résistance ohmique du fil de la bobine, Ω).
L : Inductance pure (**henry, H**).

• Établissement d'un courant dans un circuit inductif

Soit le montage ci-contre :



- À l'instant t = 0, fermeture de k.
- La bobine est alimentée par le générateur E, le courant *i* croît...
- L'inductance se charge, transformant l'énergie électrique en énergie magnétique.
- À 63% du courant maximum correspond un temps t, appelé constante de temps τ .
- Après une durée de 5τ , le champ magnétique produit par l'inductance est maximal et le courant est limité par **RL** d'où le courant maximum :

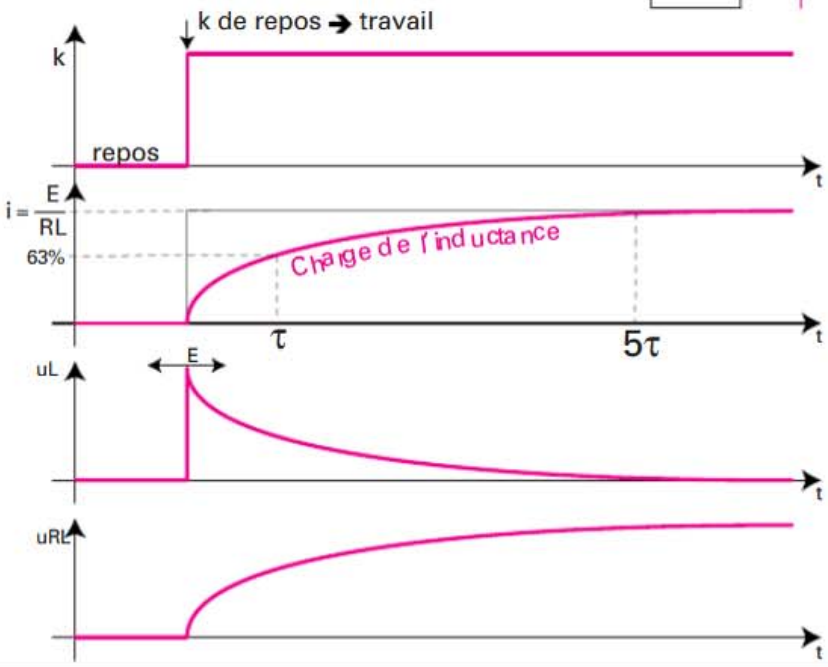


$$I_{MAX} = \frac{E}{RL}$$

La constante de temps τ a pour expression :

$$\tau = \frac{L}{RL}$$

Après 5τ , on considère que l'inductance n'intervient plus et le courant sera : $I_{MAX} = \frac{E}{RL}$



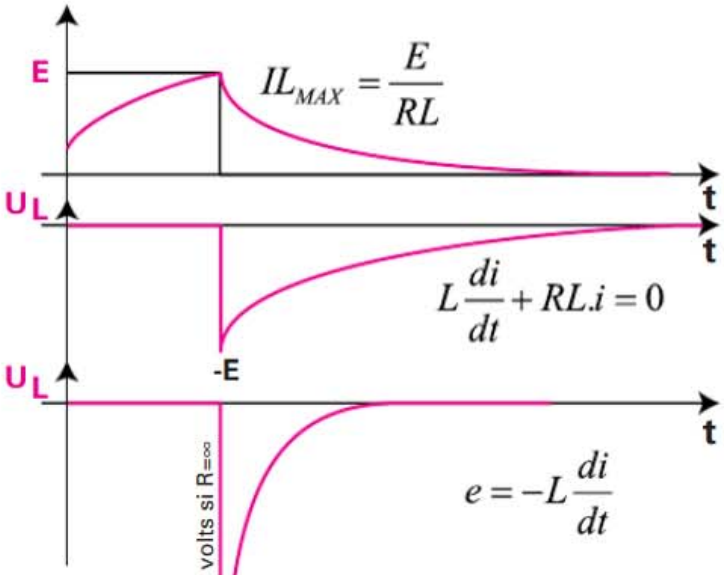
$$E - R_L i - u_L = 0$$

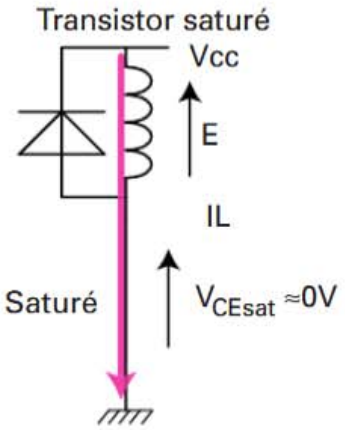
$$u_L = L\frac{di}{dt}$$

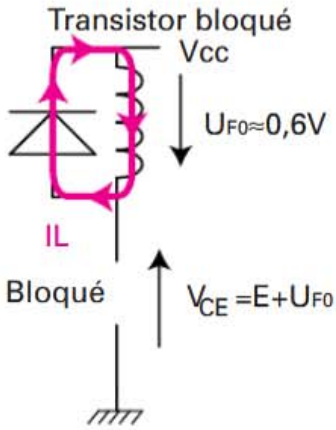
$$E = L\frac{di}{dt} + RL.i$$

• Annulation du courant dans un circuit inductif

L'annulation du courant a lieu lorsque la tension du générateur passe de **E à 0 volt**. À partir de l'instant **t = 0**, on observe une décroissance exponentielle de l'intensité du courant.
La tension aux bornes de la bobine passe instantanément de **0 à – E** et présente une discontinuité.
En cas d'ouverture du circuit (**R** = ∞), **e = – i_L** . **R** = ∞.
Pour éviter cette surtension destructrice pour les semi-conducteurs, il faut ajouter aux bornes de l'inductance une diode appelée **diode de roue libre**.



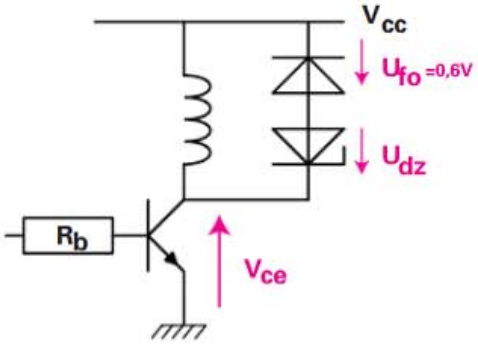


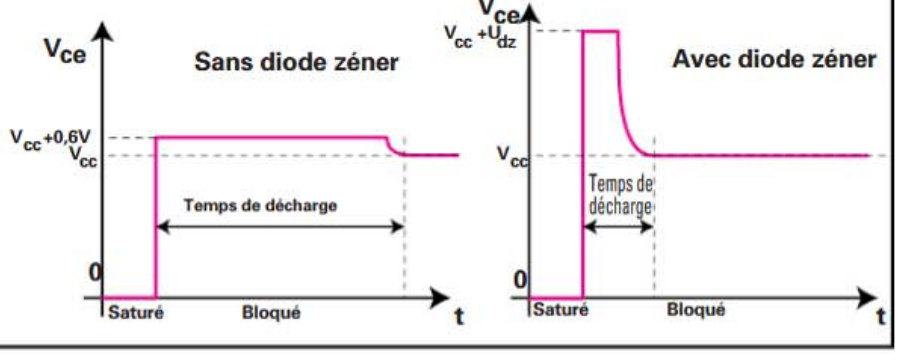


Amélioration du montage ci-dessus

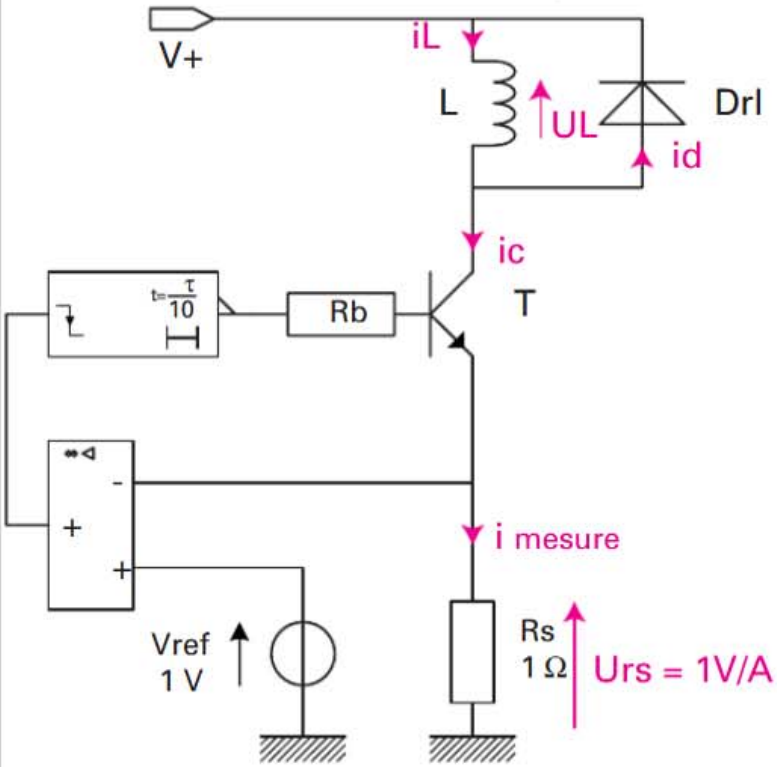
Dans le montage sans diode zéner, lorsque l'inductance se décharge (transistor bloqué) la tension à ses bornes est égale à la tension aux bornes de la diode soit 0,6 V. Le courant qui en découle est alors égal à 0,6/RL. Ce courant est faible et la décharge est lente.

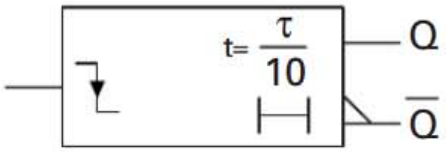
Pour obtenir une décharge plus rapide de l'inductance, il faut augmenter la tension de seuil de la diode de roue libre. Ceci est obtenu facilement en insérant une diode zéner en série avec la diode de roue libre. Dans ce cas, la tension aux bornes de l'inductance est égale à 0,6 + Udz.
Attention, la tension Vce maximale du transistor est égale à la tension d'alimentation plus la tension zéner plus la tension de seuil de la diode de roue libre : soit Vce max = Vcc + V_{DZ} + U_{F0} .



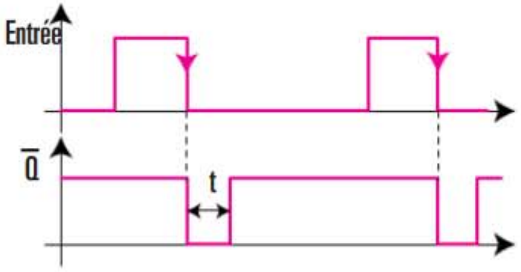


• Limitation de courant par hachage dans une bobine

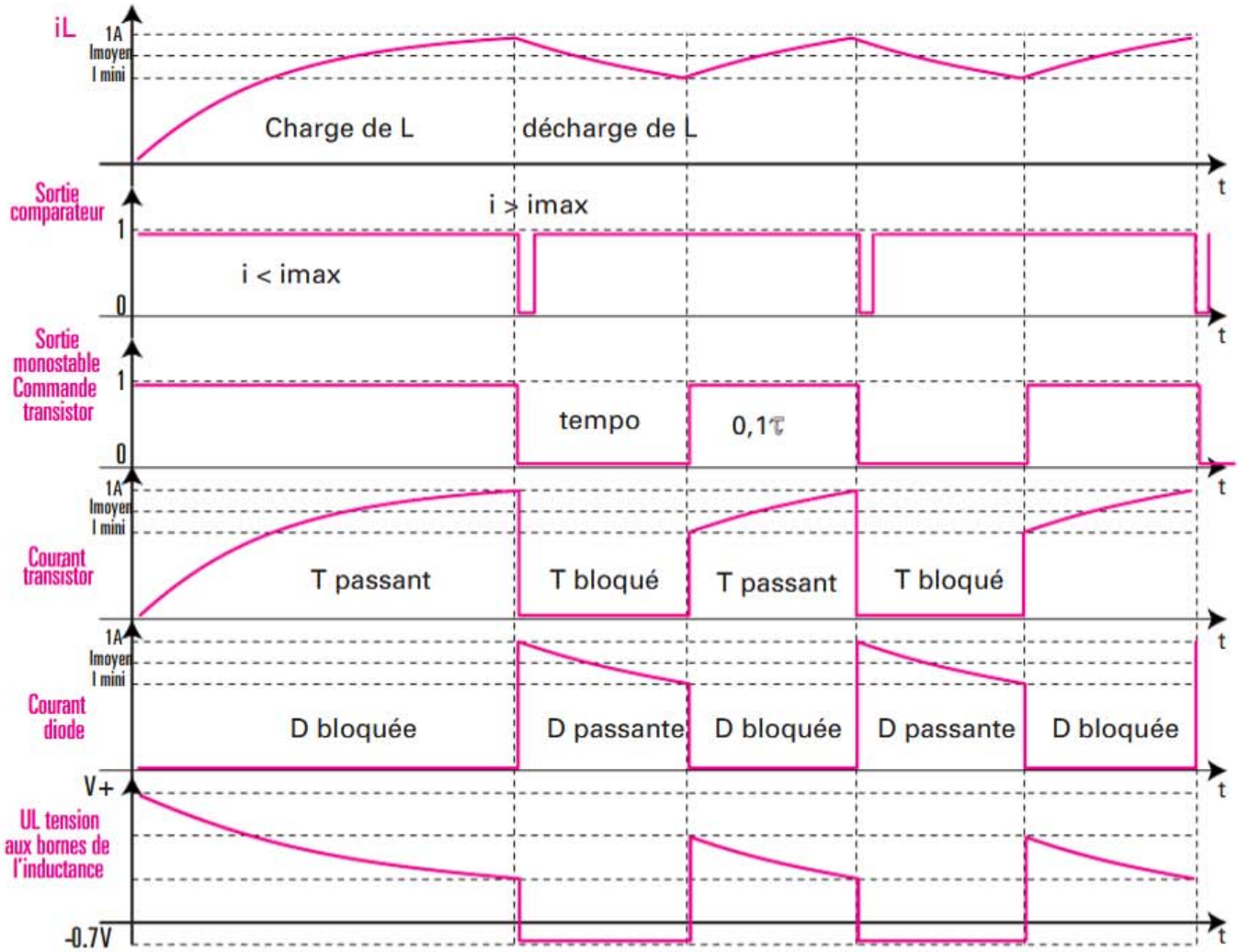




Monostable :
à chaque front descendant reçu sur l'entrée, la sortie Q passe à l'état «1» pour une durée indiquée dans le bloc monostable : ici 0,1 τ



• Chronogrammes de limitation de courant par hachage



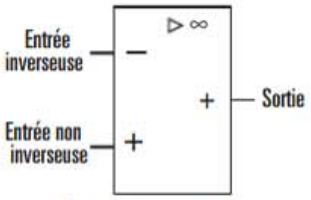
6.7.5. AMPLIFICATEUR INTÉGRÉ

• Description

Un amplificateur intégré aussi dénommé :
- ampli-op, AO, AOP : amplificateur opérationnel
- ALI ou AIL : Amplificateur linéaire intégré

est un **amplificateur différentiel** : **c'est un amplificateur électronique qui amplifie une différence de potentiel électrique présente à ses entrées.**

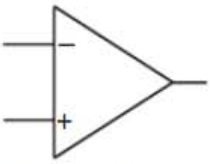
Il a été initialement conçu pour effectuer des opérations mathématiques dans les calculateurs analogiques : il permettait de modéliser les opérations mathématiques de base comme l'addition, la soustraction, l'intégration, la dérivation et d'autres.



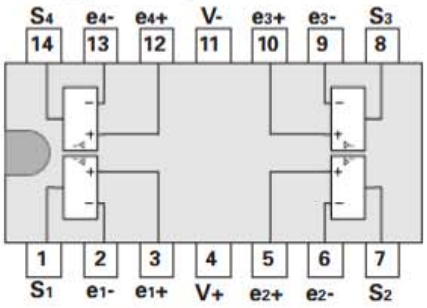
Symbole européen

Par la suite, l'amplificateur intégré est utilisé dans d'autres applications comme le **comparateur**, la commande de moteurs, la régulation de tension, les sources de courants ou encore les oscillateurs. On le trouve communément sous la forme de circuit intégré.

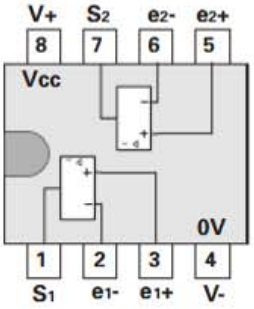
La figure ci-contre représente les symboles d'un amplificateur intégré.


Symbole Américain

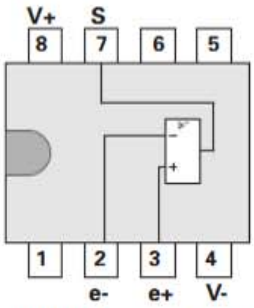
Brochages les plus courants



TL 074 TL 084 LF 347 LM324



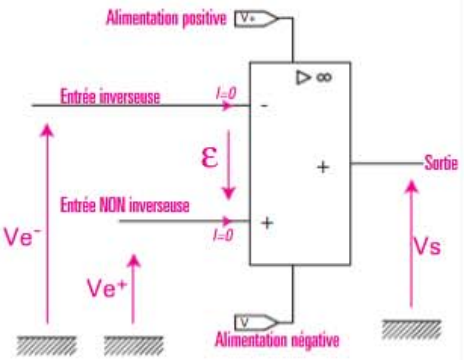
TL 072 TL 082 LF 353 LM358



TL 071 TL 081 LF 356 µA741

Branchement :

Un amplificateur comporte :
deux bornes d'alimentation auxquelles il faut appliquer les tensions V+ et V– (ex. : + 15 V et – 15 V). Les liaisons boîtiers alimentation ne sont généralement pas représentées sur les schémas ;
- deux bornes d'entrée : e^+, entrée non inverseuse ;
  e^-, entrée inverseuse ;
- une borne de sortie S.



Caractéristiques idéales

Re : résistance d'entrée ∞. (le courant entrant est considéré nul)
A : amplification en boucle ouverte ∞.
Rs : résistance de sortie zéro ohm.
BP : bande passante ∞.

Fonctionnement

Un amplificateur intégré amplifie la différence des tensions Ve^+ et Ve^- appliquées entre chaque entrée et la masse, d'où :

$$\varepsilon = Ve^+ - Ve^-$$

$$Vs = A.\varepsilon = A.\left(Ve^+ - Ve^-\right)$$

• Limitations

Comme pour un transistor, la polarisation des éléments internes n'est due qu'à la source de tension continue. **La tension de sortie Vs est donc nécessairement comprise entre V+ et V–.**

$$V- < Vs < V+$$

En fait, par suite de chutes de tensions internes, il y a un déchet **ΔV** de quelques dixièmes de volt. La valeur absolue de Vs est au plus égale à (**V – ΔV**). Cette valeur est la tension **Vsat** de saturation de la sortie.

$$|Vs| \leq Vsat$$

• Amplification

Le facteur **A** est très grand, il atteint couramment 10^4 à 10^5.

• Régime linéaire

Le régime de fonctionnement est linéaire quand la tension de sortie est proportionnelle à la tension d'entrée :

$$Vs = A\varepsilon$$ il faut pour cela que $$|\varepsilon| \leq \frac{Vsat}{A}$$

• Régime de saturation

Il y a régime de saturation quand la tension de sortie ne dépend plus que de la valeur absolue de la tension d'entrée.

Il en est ainsi dès que $$|\varepsilon| > \frac{Vsat}{A}$$

La valeur absolue de la tension de sortie est alors égale à $\mathbf{V_{sat}}$.

Dans ces conditions :

$$Si\ \ e^+ > e^- \Rightarrow\ \ \varepsilon > 0 \Rightarrow\ \ Vs = +Vsat \approx V+$$
$$Si\ \ e^+ < e^- \Rightarrow\ \ \varepsilon < 0 \Rightarrow\ \ Vs = -Vsat \approx V-$$

• Caractéristique de transfert

C'est la courbe qui donne les variations de V_s en fonction de ε. Elle traduit les propriétés précédentes.

De **ε1** à **ε2**, la tension $\mathbf{V_s}$ de sortie est proportionnelle à **ε**

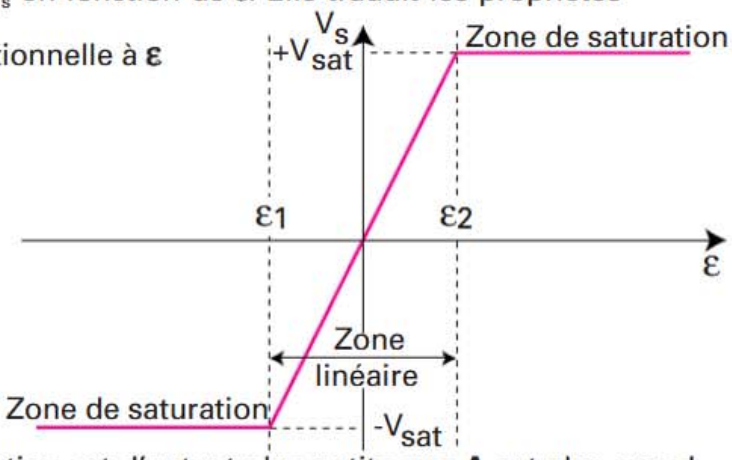
$$Vs = A\varepsilon$$

C'est le domaine linéaire.

Avant **ε1** et au-delà de **ε2**, la tension $\mathbf{V_s}$ de sortie est constante :

$$Vs = Vsat$$

C'est le domaine de saturation.



Remarque : la tension ε qui entraîne la saturation est d'autant plus petite que **A** est plus grand.

Pour **A** = 10^5 et $\mathbf{V_{sat}}$ = 14 V, la saturation se produit dès que : $|\varepsilon| = \frac{14}{10^5} = 0{,}14\ mV$

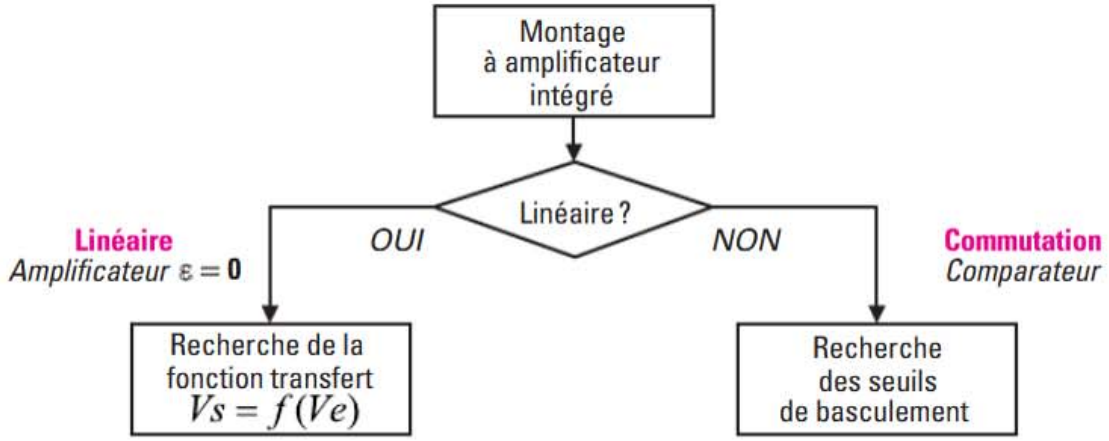
En pratique, si la même échelle est adoptée pour **ε** et $\mathbf{V_s}$, la portion de courbe **ε1**, **ε2** se confond avec l'axe des ordonnées.

Amplificateur intégré

• Organigrammes en amplificateur ou en comparateur

En **linéaire**, si un élément relie la sortie à l'entrée e^- et s'il n'y a pas d'élément reliant la sortie à l'entrée e^+.

En **commutation**, si l'amplificateur fonctionne en boucle ouverte ou si un élément relie la sortie à l'entrée e^+.



• Exemples de montages en amplificateurs et en comparateurs

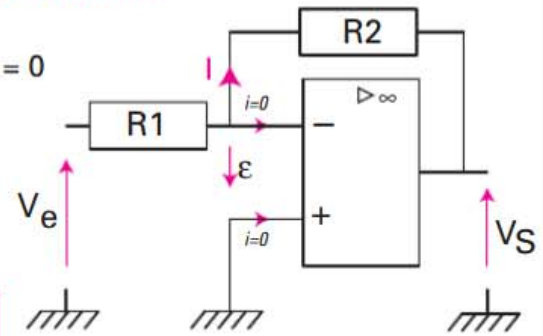
Montage linéaire en amplificateur

La sortie **Vs** est reliée à e^-. On obtient un montage linéaire $\varepsilon = 0$

On cherche alors la fonction de transfert :

$$Av = \frac{Vs}{Ve}$$

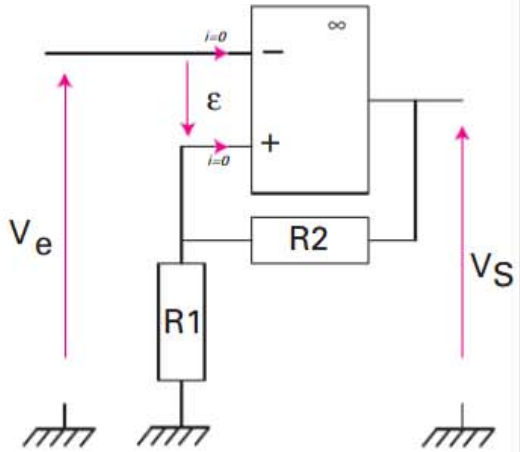
Av est l'amplification en tension.



$$\left.\begin{array}{l} Ve = R1.I \\ Vs = -R2.I \end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} I = \dfrac{Ve}{R1} \\ I = -\dfrac{Vs}{R2} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{Ve}{R1} = -\frac{Vs}{R2} \Rightarrow \boxed{\frac{Vs}{Ve} = -\frac{R2}{R1}}$$

L'amplification en tension sera : $\boxed{Av = -\dfrac{R2}{R1}}$

Il s'agit d'un amplificateur inverseur.
Vs est en opposition de phase avec Ve.



Montage en commutation : comparateur

La sortie Vs est reliée à e^+. C'est un montage en commutation $\varepsilon \neq 0$. Ce fonctionnement est obtenu en faisant une réaction positive (ou **en boucle ouverte**).
Dans ce cas, l'amplificateur est toujours saturé.
On dit qu'il travaille en **commutation** (tout ou rien).
Il possède deux valeurs possibles en sortie : $+V_{sat}$ **et** $-V_{sat}$

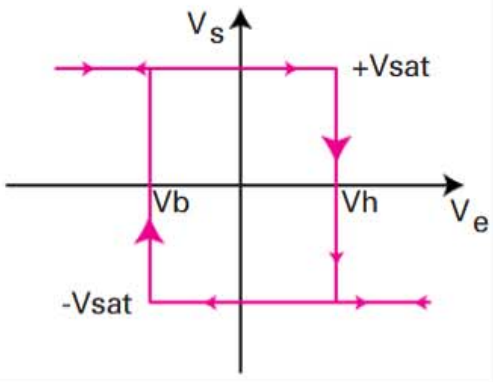
$$\boxed{Ve+ = \frac{Vs.R1}{R1+R2}}$$

Recherche des seuils de basculement

Deux seuils de basculement :
– V_h (seuil haut),
– V_b (seuil bas).

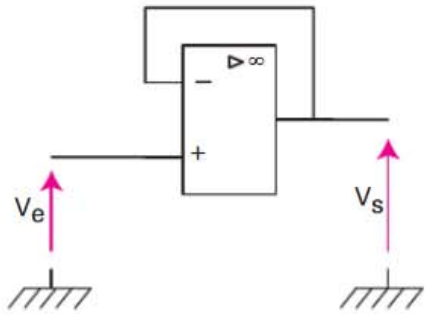
$$\boxed{Vh = \frac{+Vsat.R1}{R1+R2}} \qquad \boxed{Vb = \frac{-Vsat.R1}{R1+R2}}$$

Les seuils étant connus, on trace le cyclogramme.



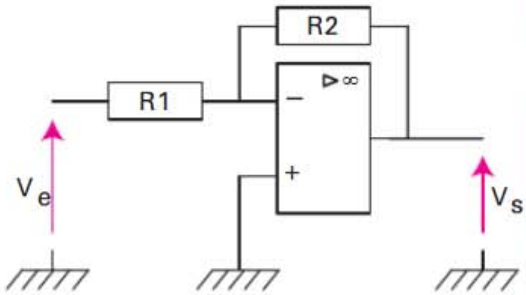
• Montages de base en linéaire

Suiveur



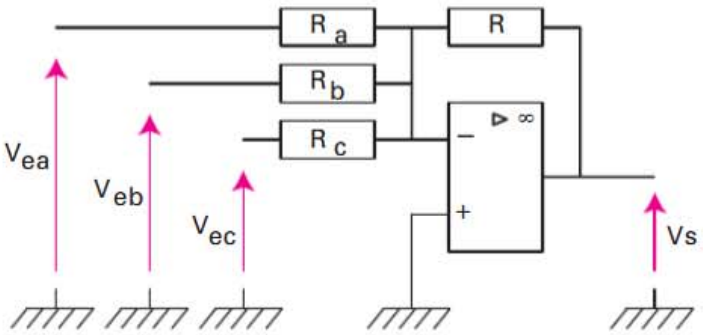
$$\frac{Vs}{Ve} = 1 \Rightarrow Vs = Ve$$

Amplificateur inverseur



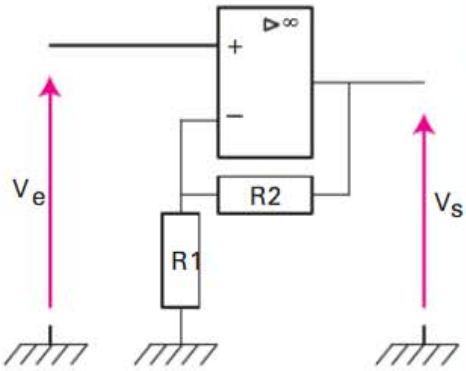
$$\frac{Vs}{Ve} = -\frac{R2}{R1}$$

Sommateur inverseur



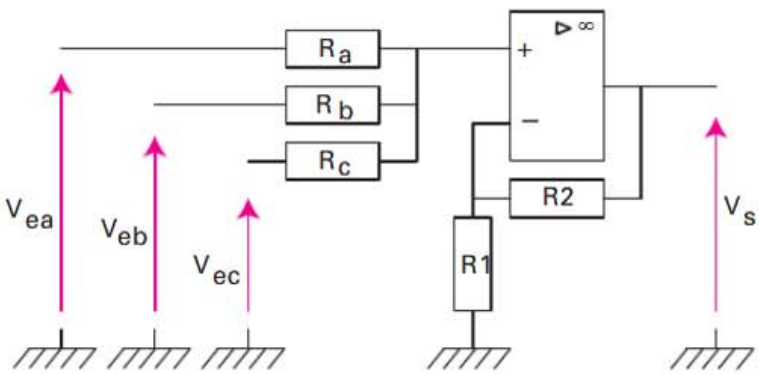
$$Vs = -R\left(\frac{Vea}{Ra} + \frac{Veb}{Rb} + \frac{Vec}{Rc}\right)$$

Amplificateur non inverseur



$$\frac{Vs}{Ve} = \frac{R2}{R1} + 1$$

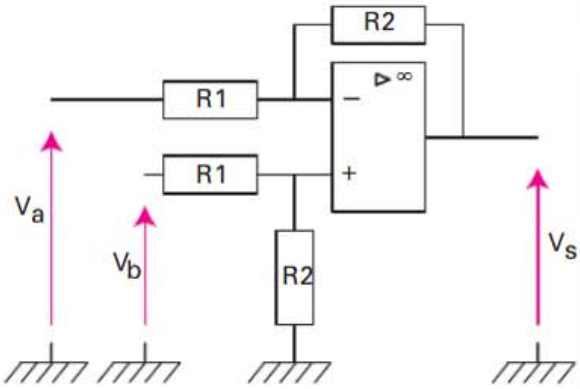
Sommateur non inverseur



$$Vs = (Vea + Veb + Vec)\frac{R1 + R2}{3.R1}$$

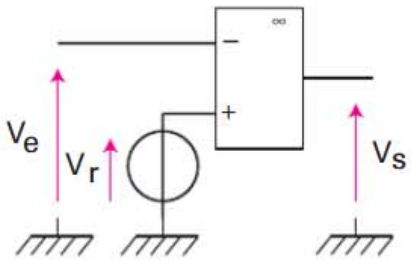
avec $R_a = R_b = R_c$

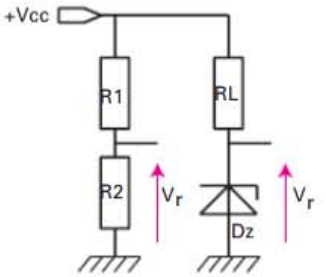
Soustracteur

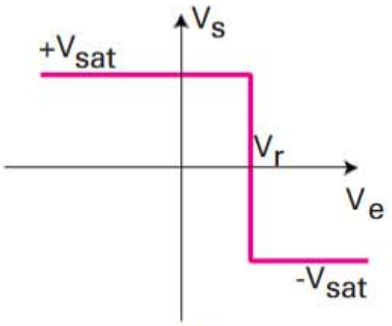


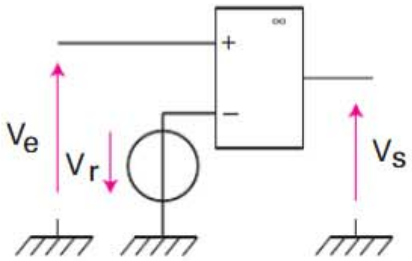
$$Vs = \frac{R2}{R1}(Vb - Va)$$

• Montages en commutation de base d'un comparateur

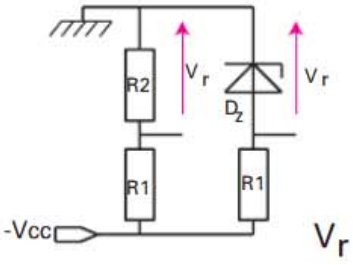


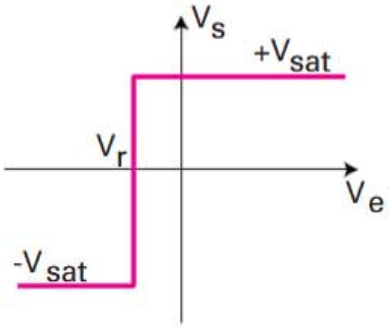


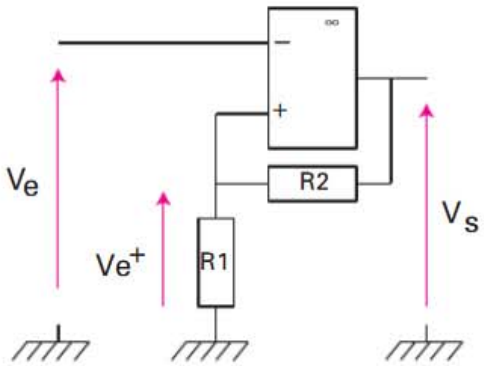




Variantes pour générer V_r





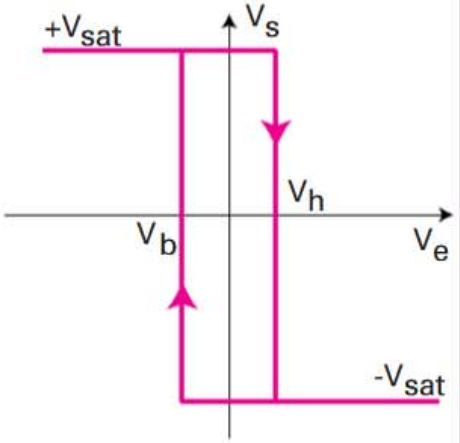


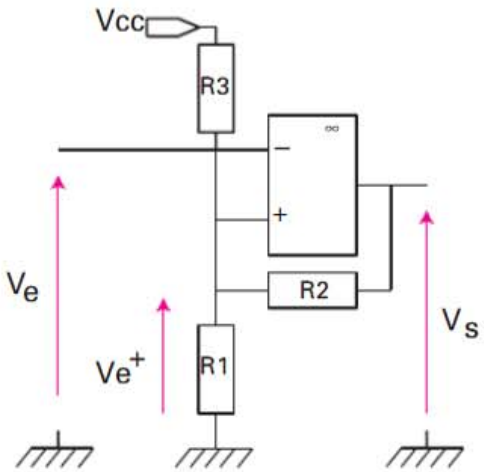
Seuils de basculement

$$Vh = \frac{+Vsat.R1}{R1+R2}$$

$$Vb = \frac{-Vsat.R1}{R1+R2}$$

Alimentation symétrique +Vcc, -Vcc

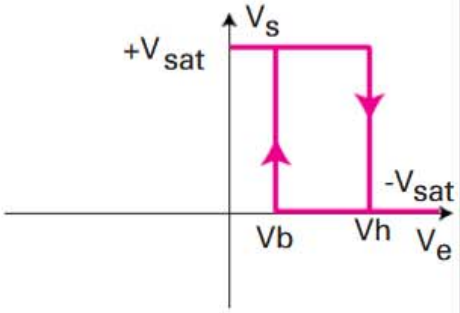


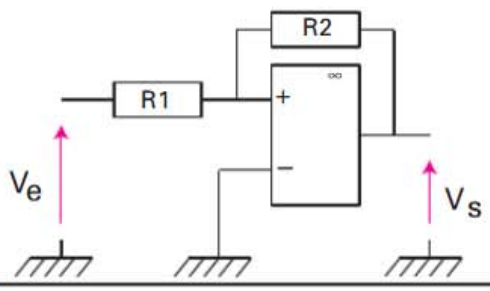


$$Vh = \frac{Vcc.R1}{R1+\frac{R2.R3}{R2+R3}}$$

$$Vb = \frac{Vcc \times \frac{R2.R1}{R2+R1}}{\frac{R2.R1}{R2+R1}+R3}$$

Alimentation asymétrique +Vcc, 0V
pas de tension de déchet
+Vsat = +Vcc et -Vsat = 0V

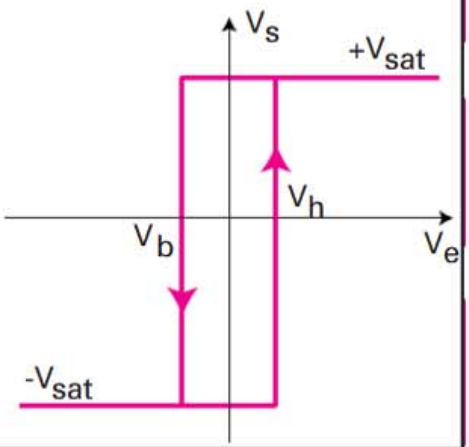




$$Vh = \frac{+Vsat.R1}{R2}$$

$$Vb = \frac{-Vsat.R1}{R2}$$

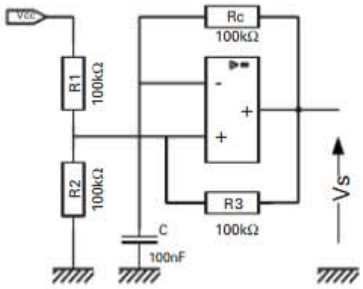
Alimentation symétrique +Vcc, -Vcc



• Exemples de montage à amplificateurs

Montage astable

Composé d'un amplificateur monté en comparateur à deux seuils de tension.
Le condensateur C se charge et se décharge à travers Rc. Il se charge de Vb à Vh et se décharge de Vh à Vb. La tension de sortie VS est considérée comme étant soit à 0 V soit à Vcc.

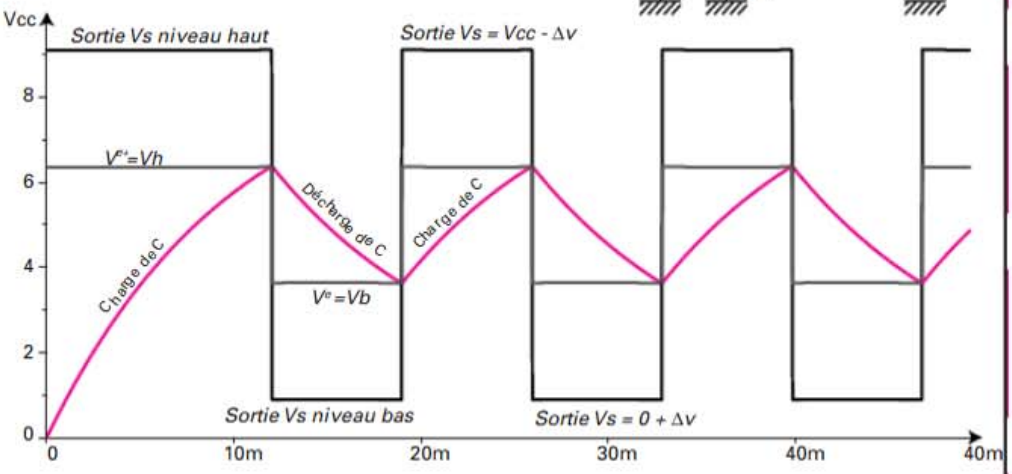


$$Vh = V^{e+}h = \frac{VccR2}{R2 + \frac{R1R3}{R1+R3}}$$

$$Vb = V^{e+}b = \frac{Vcc\frac{R2R3}{R2+R3}}{R1 + \frac{R2R3}{R2+R3}}$$

$$Tch = CRc\ln\left(\frac{Vb-Vcc}{Vh-Vcc}\right)$$

$$Tdch = CRc\ln\left(\frac{Vh-0}{Vb-0}\right)$$



Comparateur à fenêtre

Cahiers des charges :
Le niveau de sortie Vs doit être à «1» pour 4 V < Ve < 6 V

$VA^{e+} = 6\,V$

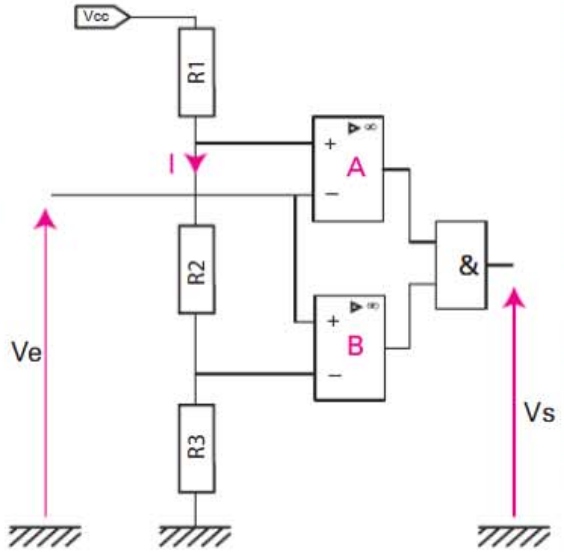
$VB^{e-} = 4\,V$

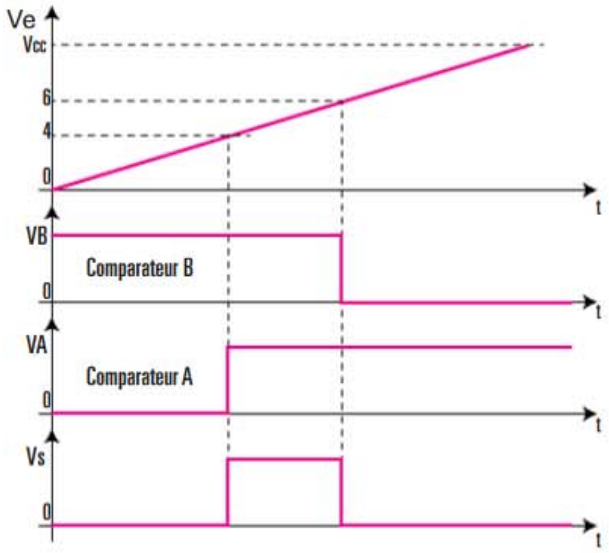
Pour calculer les résistances R1 à R3 il faut fixer le courant I à 1 mA par exemple.

$$UR3 = VB^{e-} = 4V \Rightarrow R3 = \frac{VB^{e-}}{I} = \frac{4}{10^{-3}} = 4\,k\Omega$$

$$UR2 = VA^{e+} - VB^{e-} = 2V \Rightarrow R2 = \frac{VA^{e+} - VB^{e-}}{I} = \frac{2}{10^{-3}} = 2\,k\Omega$$

$$UR1 = Vcc - VB^{e-} = 4V \Rightarrow R1 = \frac{Vcc - VB^{e-}}{I} = \frac{4}{10^{-3}} = 4\,k\Omega$$

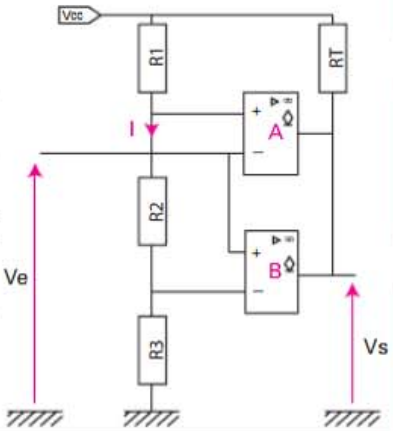




En utilisant des comparateurs à sortie à collecteur ouvert, ◇ il est nécessaire d'ajouter une résistance de tirage RT.

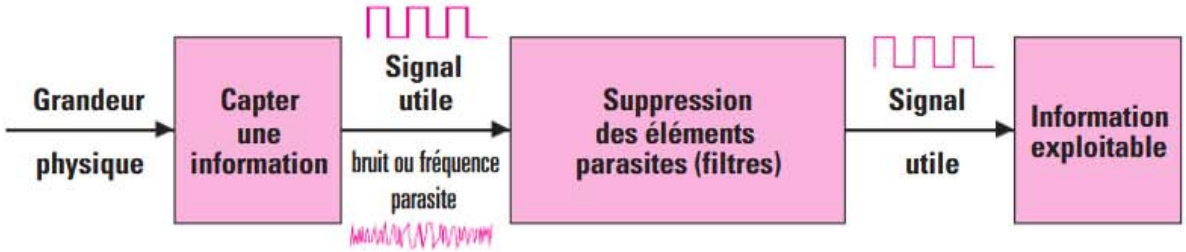
La liaison entre les deux sorties réalise un ET «fantôme»

Exemple de comparateur à collecteur ouvert : LM339



6.7.6. LE FILTRAGE

Un filtre idéal est un montage électronique réalisant, dans un intervalle de fréquences déterminé, la transmission des signaux sans déformation et, en dehors de cet intervalle, la suppression de ces signaux.



• Constitution

Usuellement, les filtres actifs utilisent un ou plusieurs circuits intégrés linéaires, des résistances, des condensateurs et des inductances.

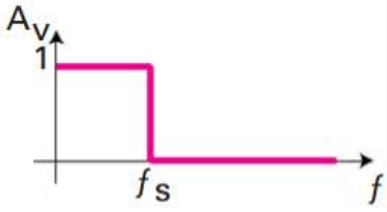
En général, la présence de circuits intégrés linéaires permet d'obtenir une grande impédance d'entrée et une faible impédance de sortie.

Ces deux propriétés facilitent la mise en cascade de ces filtres. Ils utilisent rarement des inductances (bobine inductive); cela les rend moins volumineux que les autres types de filtres (filtres passifs à résistances, inductances et condensateurs).

Suivant l'allure de leur fonction de transfert, on peut classer les filtres en quatre catégories.
Si on appelle ***fi*** et ***fs*** les fréquences de coupure inférieure et supérieure d'un filtre et ***Bp = fs – fi*** sa bande passante, on obtient :

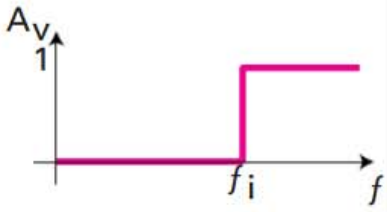
Un filtre passe-bas

si $f_i = 0$ et $f_s \neq 0$ (alors $B_p = f_s$) ;



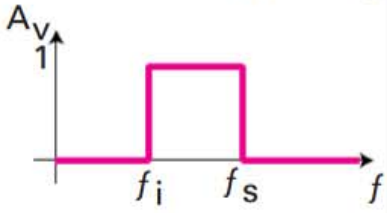
Un filtre passe-haut

si $f_i \neq 0$ et f_s = **infini** ;



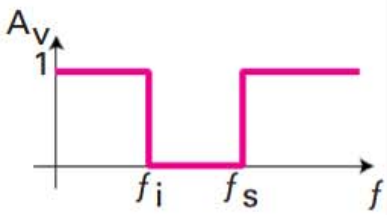
Un filtre passe-bande

si $f_i \neq 0$ et f_s **fini**, alors la bande passante du filtre est $B_p = f_s - f_i$;



Un filtre coupe-bande

lorsque la bande passante va de **zéro** à f_i puis de f_s à **l'infini**.



• Amplification d'un filtre idéal

L'amplification d'un filtre est définie comme pour un amplificateur : $Amplification = \frac{Grandeur\ de\ sortie}{Grandeur\ d'entrée}$

On parle de gain en tension : $Gv_{(dB)} = 20\log(Av) = 20\log\left(\frac{Vs}{Ve}\right)$

On parle de gain en courant : $Gi_{(dB)} = 20\log(Ai) = 20\log\left(\frac{Is}{Ie}\right)$

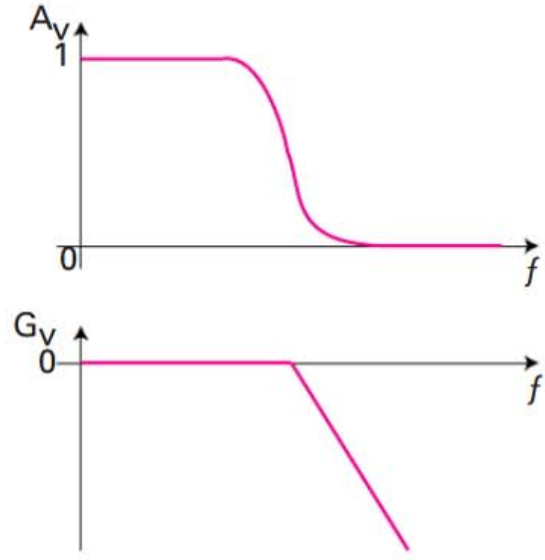
On parle de gain en puissance : $Gp_{(dB)} = Gv.Gi = 10\log(Ap) = 10\log\left(\frac{Ps}{Pe}\right)$

Pour un gain en tension ou courant : -40 dB = 0,01 -20 dB = 0,1 0 dB = 1 +20 dB = 10 +40 dB = 100
Pour un gain en puissance : -20 dB = 0,01 -10 dB = 0,1 0 dB = 1 +10 dB = 10 +20 dB = 100

Selon le type de filtre choisi, la courbe AV (f) présente l'une des quatre formes des courbes de la page précédente.

• Ordre d'un filtre

Il n'existe aucun filtre réel passant pour une fréquence f déterminée et non passant pour une fréquence infiniment voisine f + Df. La courbe Av(f) n'a jamais de partie verticale. Le raccordement entre la partie rectiligne correspondant à la bande passante et le reste de la courbe se fait avec une partie curviligne.
Sur les courbes Gv(f) donnant le gain en fonction de la fréquence, on obtient un segment de droite porté par l'axe des fréquences pour la bande passante et une partie oblique, sensiblement rectiligne, pour le reste.

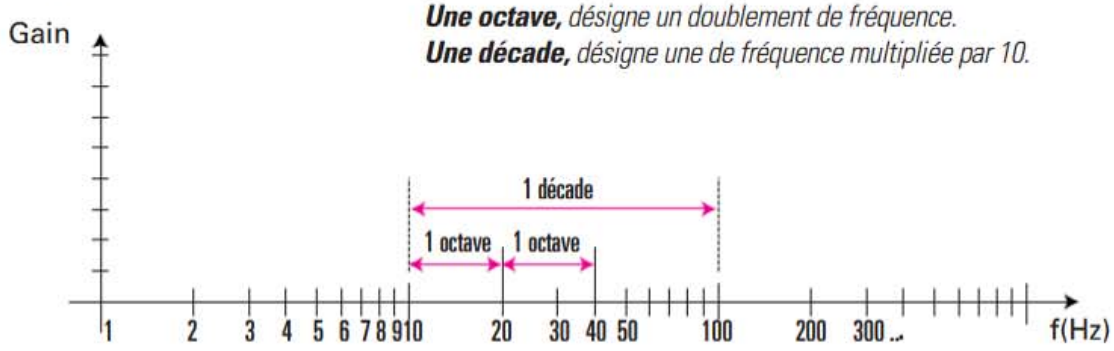


p s'exprime en décibels par décade.
n est l'ordre du filtre.
La fréquence de coupure d'un filtre s'exprime à un gain de – 3 dB.

• Échelle logarithmique

Un axe gradué linéairement est mal adapté pour la représentation d'une grandeur dont les valeurs forment un éventail très ouvert. C'est le cas du domaine des fréquences de fonctionnement d'un amplificateur ou d'un filtre. Nous utiliserons donc, pour l'axe des fréquences, une échelle logarithmique. Rappelons que celle-ci est obtenue en séparant les valeurs par des intervalles proportionnels à leur logarithme.

Une octave, *désigne un doublement de fréquence.*
Une décade, *désigne une de fréquence multipliée par 10.*

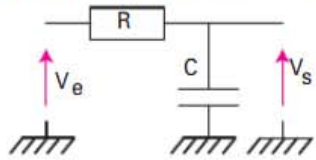


Le filtrage

• Exemples de filtres passe-bas, passe-haut

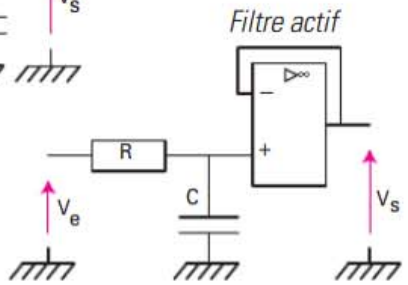
Schéma structurel

Filtre passe-bas

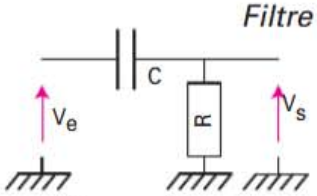


Filtre passif

Filtre actif

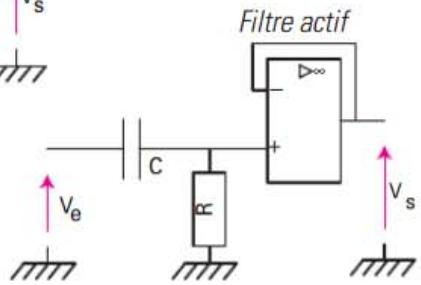


Filtre passe-haut



Filtre passif

Filtre actif



Amplification

$$Av = \frac{Vs}{Ve} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

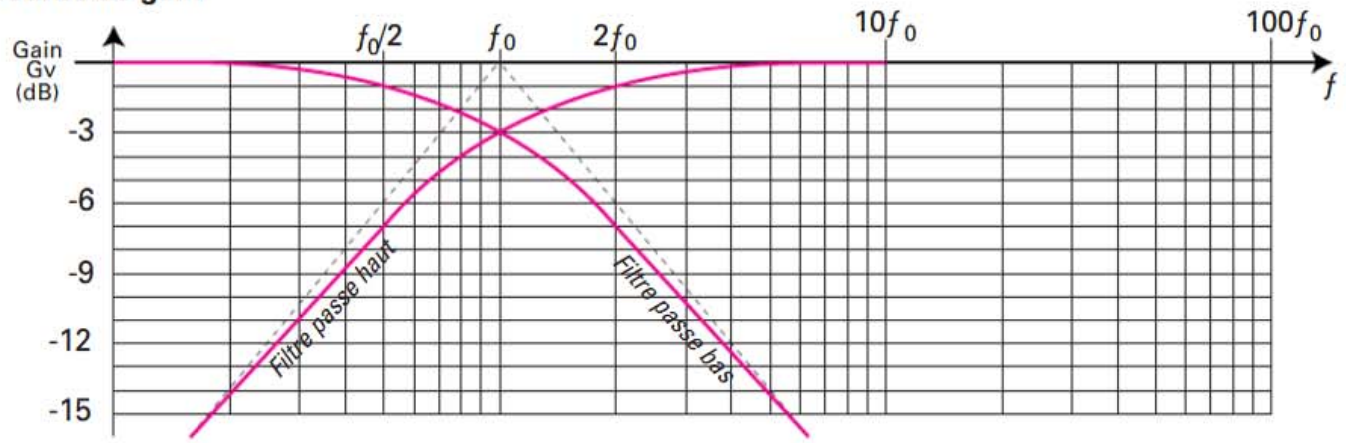
Fréquence de coupure à -3 dB

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \text{ Avec } \omega = 2\pi f \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

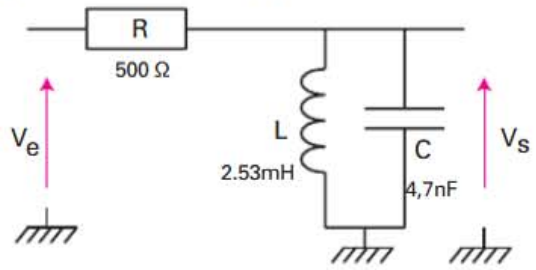
Amplification

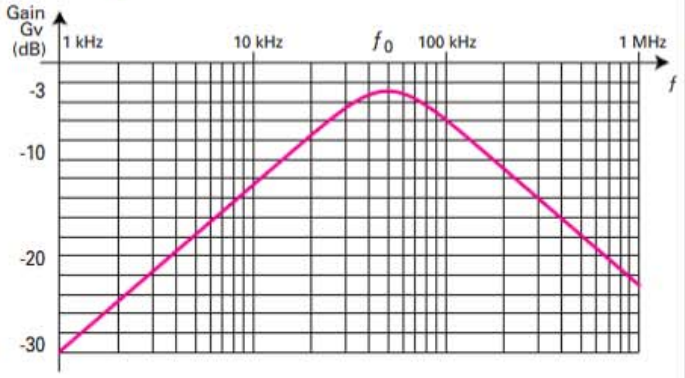
$$Av = \frac{Vs}{Ve} = \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega}$$

Courbe de gain

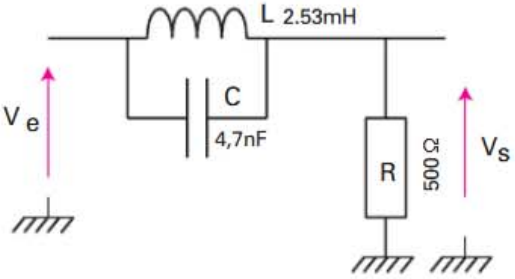


Exemple circuits RLC : circuit bouchon

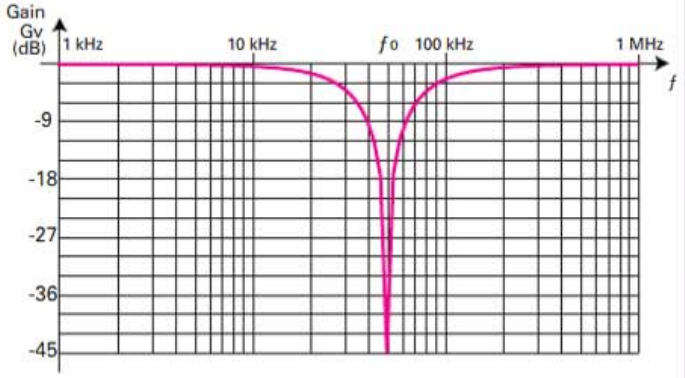




La cellule **LC** se comporte à la résonance comme un circuit ouvert, ce qui permet de réaliser simplement un **filtre passe-bande** ou un **filtre réjecteur de bande**, suivant la disposition de R.



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 50\,kHz$$

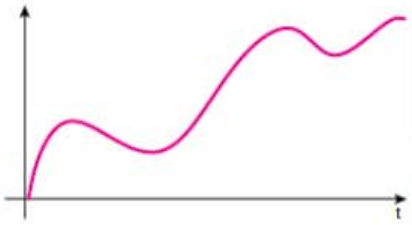


6.7.7. CONVERSION NUMÉRIQUE ↔ ANALOGIQUE

En électronique, la conversion de données a pour but de transformer une grandeur électrique ou numérique en une autre grandeur électrique ou numérique elle aussi, dans le but d'en faciliter l'exploitation. Cette technique est aujourd'hui couramment employée dans les appareils à affichage numérique et dans les systèmes de traitement numérique de l'information (incluant les microprocesseurs et les micro-ordinateurs).

• Grandeur analogique

C'est une grandeur qui varie dans le temps de façon continue et qui peut prendre une infinité de valeurs.

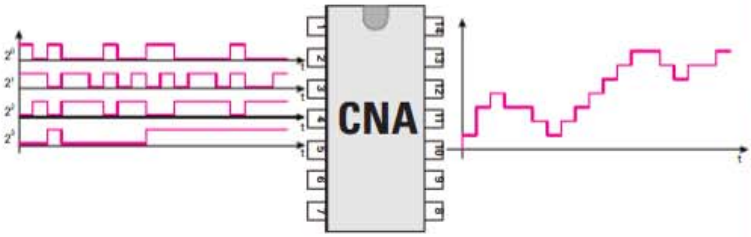


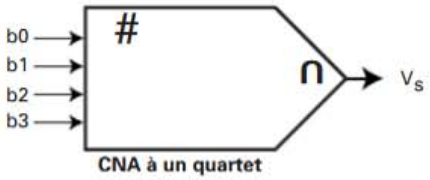
• Grandeur numérique

C'est une grandeur qui varie dans le temps de façon discontinue, par exemple le nombre de voyageurs franchissant un portillon, l'indication d'une horloge à affichage numérique. C'est donc toujours un nombre entier. En électronique, on utilise surtout des grandeurs numériques formées de 0 et de 1 logiques, qui présentent de nombreux avantages par rapport aux grandeurs analogiques (tension ou courant) : insensibilité aux bruits, aux distorsions, facilité de mémorisation et de restitution.

Un convertisseur numérique analogique, ou CNA, est un montage transformant une information numérique (binaire en général) en un signal analogique (tension).

Un CNA peut convertir un mot de 4, 8, 10 , 12, 16 bits, ou plus issu de circuits logiques en une tension proportionnelle à la valeur décimale du nombre binaire converti.





CNA à un quartet

• Principe de fonctionnement

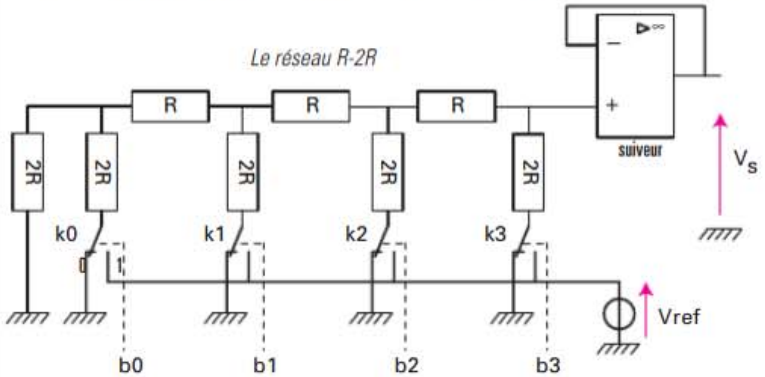
Le réseau R-2R

On réalise une échelle avec un faible nombre de valeurs de résistances. **Cette méthode est plus adaptée à la fabrication sur silicium.**

Le réseau binaire

Chaque résistance correspond au poids de chaque bit. Cette méthode requiert un grande précision sur la valeur des résistances des bits MSB (bit de poids fort ici b3)

Le réseau R-2R

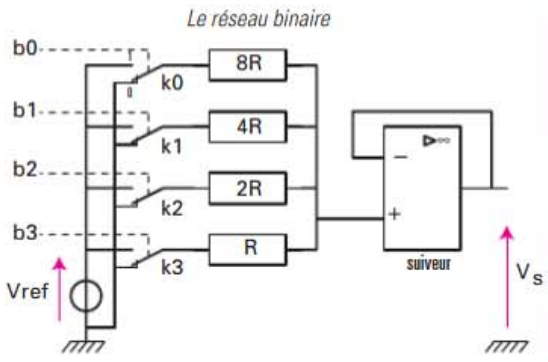


$$Vs = Vref \frac{\left(2^3.k3 + 2^2.k2 + 2^1.k1 + 2^0.k0\right)}{2^4}$$

$$Vs = Vref \frac{Valeur}{2^n}$$

n : nombre de bits

Le réseau binaire



$$Vs = Vref \frac{\left(2^3.k3 + 2^2.k2 + 2^1.k1 + 2^0.k0\right)}{2^4 - 1}$$

$$Vs = Vref \frac{Valeur}{2^n - 1}$$

Conversion numérique ↔ analogique

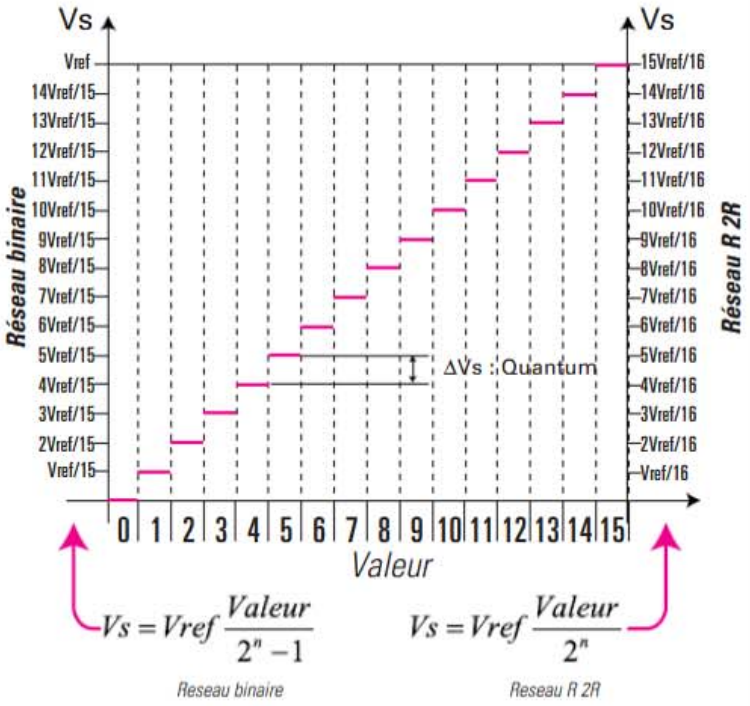
Dans les CNA le premier bit est appellé **MSB** (most significant bit) : **bit de poids fort**, son poids représente la moitié de la pleine échelle du convertisseur, son suivant repésente le quart, etc.

En **8 bits** on peut compter **de 0 jusqu'à 255 soit 256 intervalles**.
Le MSB représente le nombre 128 (soit la moitié de 256). Le bit de poids le plus faible **LSB** (least significant bit) **bit de poids faible** représente la quantité minimale que l'on pourra identifier soit 1.

On donne à cette quantité qui va caractériser la résolution du système le nom de **quantum, ΔVs**.

On exprime souvent la résolution en pourcentage de la pleine échelle. Ainsi dans un système à 8 bits cette résolution sera 1/256 soit 0,4%.

Dans l'exemple du convertisseur 4 bits, on dispose de 16 niveaux de tensions différents soit 15 intervalles de tension.



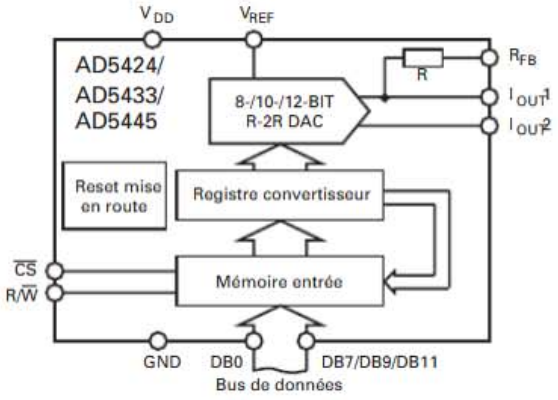
Nombre de valeurs possibles : $Nombre = 2^n$

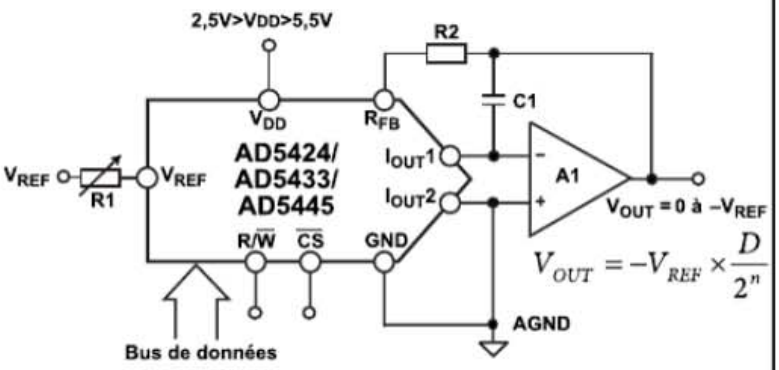
Nombre de variations possible : $Variations = 2^n - 1$

L'accroissement d'une unité du nombre d'entrées fournit, en principe, un accroissement de la tension de sortie : $\Delta Vs = \frac{Vref}{2^n - 1}$ ΔVs s'appelle le **quantum** *(la plus petite mesure indivisible).*

La tension **Vref** s'appelle **tension de référence**.
La valeur maximum de sortie s'appelle **tension de pleine échelle FS (Full Scale)**.

- **Exemple CNA AD5424 (8 bits) AD5433 (10 bits) AD5445 (12 bits)** ANALOG DEVICES





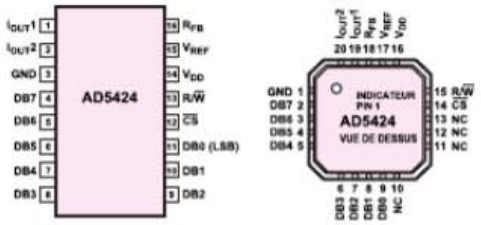
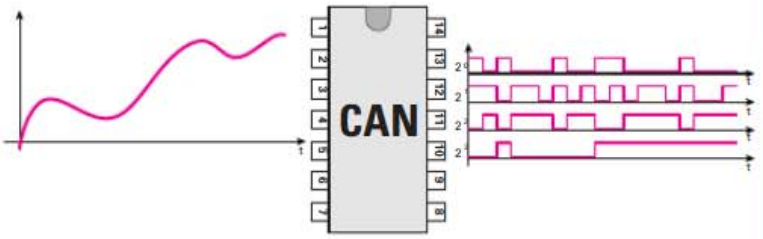


Table de vérité mode unipolaire 8 bits

Entrée numérique	Sortie analogique (V)
1111 1111	$-V_{REF}(255/256)$
1000 0000	$-V_{REF}(128/256) = -V_{REF}/2$
0000 0001	$V_{REF}(1/256)$
0000 0000	$V_{REF}(0/256) = 0$

Un convertisseur analogique-numérique, **CAN**, ou en anglais **AD** (**A**nalog to **D**igital), est un montage électronique dont la fonction est de générer à partir d'une valeur analogique, une valeur numérique (codée sur plusieurs bits), proportionnelle à la valeur analogique entrée.



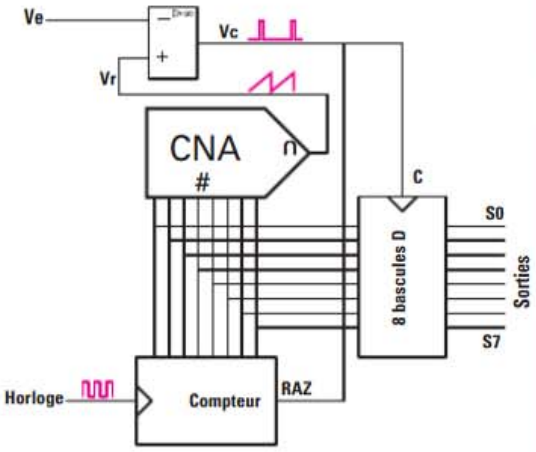
Il existe plusieurs solutions pour convertir un signal analogique en signal numérique.

- Convertisseur à simple rampe
- Convertisseur à double rampe
- Convertisseur à approximations successives
- Convertisseur flash
- Convertisseurs semi-flash pipeline

CAN à un quartet

• Convertisseur à simple rampe

On réalise au moyen d'un **compteur** et d'un convertisseur numérique-analogique **CNA** une rampe de tension. Un comparateur arrête le compteur lorsque la tension créée par le CNA atteint la tension à convertir. Le compteur indique alors le résultat sur N bits, qui peut être stocké ou traité.



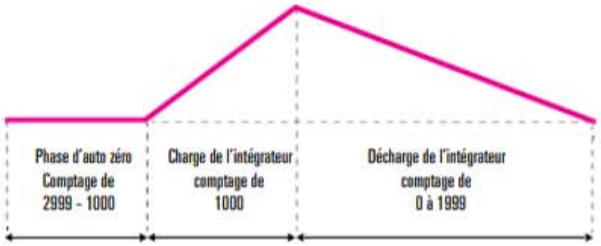
Ces convertisseurs ont les mêmes performances en termes de stabilité que les convertisseurs à approximations successives, tout en étant nettement plus lents que ces derniers. De plus, leur temps de conversion qui évolue avec la tension à convertir en fait un outil peu utilisé.

• Convertisseur à double rampe

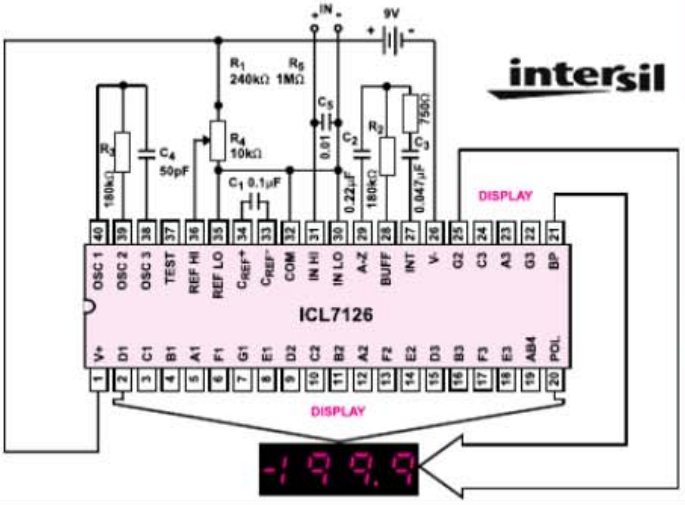
Cette évolution des convertisseurs à simple rampe permet de s'affranchir de la dérive naturelle des composants qui le composent. Son fonctionnement repose sur une comparaison entre une référence et le signal à convertir.

Ces convertisseurs sont particulièrement lents (quelques dizaines de millisecondes par cycle, et parfois quelques centaines), mais très précis (plus de 16 bits). Ils sont souvent utilisés dans les appareils de mesures.

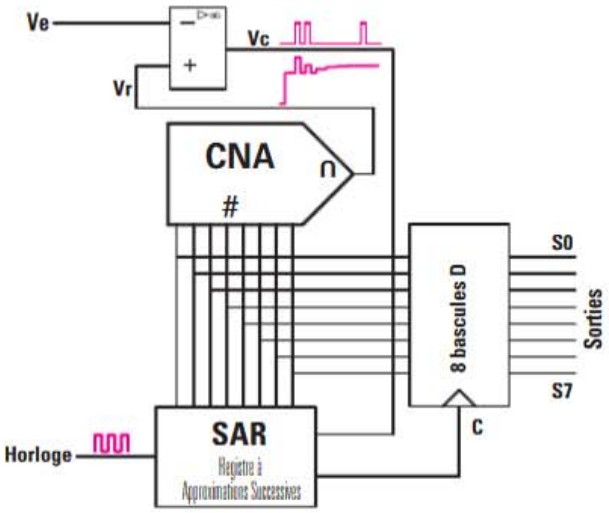
Exemple ICL7126 voltmètre 199 mV



Temps total de conversion = 4000 x t Clock = 16 000 x t_{osc}



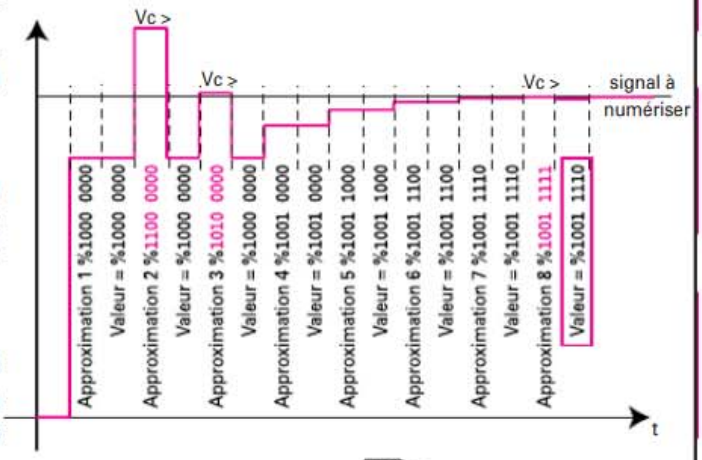
• Convertisseur à approximations successives



Très proches en termes de composition des convertisseurs à simple rampe, les convertisseurs à approximations successives (aussi appelées pesées successives) utilisent un processus de dichotomie pour traduire numériquement une tension analogique.

Un séquenceur nommé **SAR** pour **S**uccessive **A**pproximation **R**egister, couplé à un **CNA**, génère une tension analogique, qui est comparée au signal à convertir.

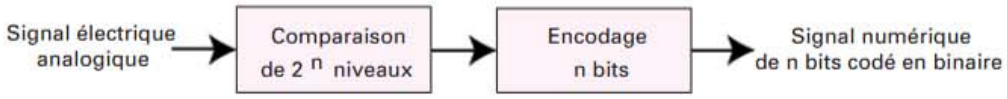
Le résultat de cette comparaison est alors introduit dans le **SAR**, qui va le prendre en compte, pour la suite du processus de dichotomie, jusqu'à achèvement.



Le convertisseur réalise donc sa conversion en positionnant en premier le **bit de poids fort** (MSB) et en descendant progressivement jusqu'au LSB.

Les convertisseurs à approximations successives ont des **temps de conversion** de l'ordre de la **dizaine de microsecondes**, pour des résolutions d'une douzaine de bits environ.

• Convertisseur flash

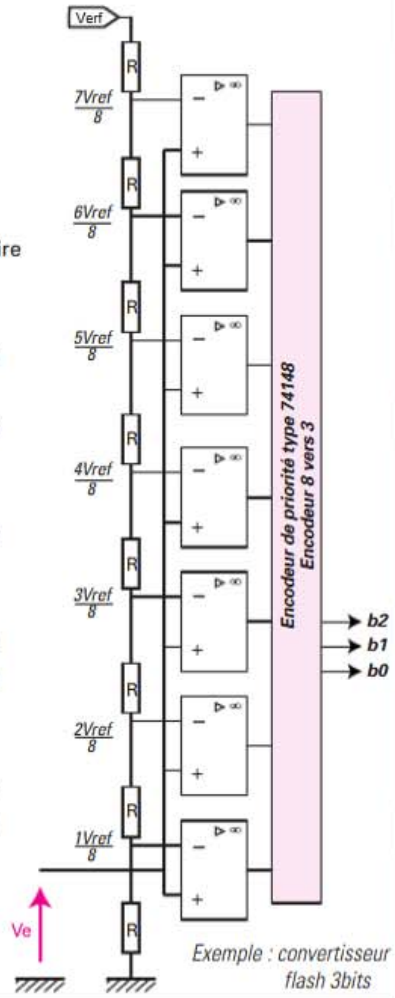


Le principe est de générer 2^{n-1} tensions analogiques au moyen d'un diviseur de tension à 2^n résistances.
Les 2^{n-1} tensions obtenues aux bornes de chacune des résistances sont ensuite comparées dans 2^{n-1} comparateurs au signal à convertir.

Un bloc logique combinatoire relié à ces comparateurs donnera le résultat codé sur N bits en parallèle.

Cette technique de conversion est très rapide, mais coûteuse en composants et donc utilisée pour les applications critiques comme la vidéo.

Les convertisseurs Flash ont des temps de conversion inférieurs à la microseconde mais une précision assez faible (de l'ordre de la dizaine de bits). Ce convertisseur est souvent très cher.



Exemple : convertisseur flash 3bits

7 Chaîne d'énergie électrique

7.1. GÉNÉRALITÉS 384
7.1.1. Le champ magnétique 384
7.2. LE TRANSFORMATEUR ÉLECTRIQUE 385
7.2.1. Le transformateur électrique monophasé 385
7.2.2. Le transformateur électrique triphasé 386
7.3. LE MOTEUR À COURANT CONTINU 389
7.3.1. Définitions de base 389
7.3.2. Fonctionnement 390
7.3.3. Équation de fonctionnement du moteur 391
7.3.4. Modèle équivalent 392
7.3.5. Caractéristiques électriques à flux constant 393
7.3.6. Moteur universel 394
7.3.7. Modélisation multiphysique d'un moteur à courant continu 395
7.3.8. Variateur de vitesse 396
7.4. LE MOTEUR PAS À PAS 397
7.4.1. Moteur à réluctance variable, à aimants permanents 397
7.4.2. Le moteur pas à pas hybride 398
7.4.3. Modes d'excitation et de fonctionnement du moteur pas à pas 399
7.4.4. Commande d'un moteur pas à pas par un circuit spécialisé 400
7.4.5. Caractéristique couple-fréquence 401
7.5. PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ 402
7.5.1. Production par éoliennes 403
7.5.2. Production par panneaux solaires (Photovoltaïque) 403
7.6. LE MOTEUR TRIPHASÉ 404
7.6.1. Le réseau triphasé 404
7.6.2. Avantages du courant triphasé 406
7.6.3. Description d'un moteur asynchrone 407
7.6.4. Le champ tournant 408
7.6.5. Couplage d'un moteur triphasé 409
7.6.6. Identification d'une plaque signalétique 410
7.6.7. Fabrication d'un moteur de forte puissance 411
7.6.8. Caractéristiques couple, intensité 412
7.6.9. Modélisation d'un moteur asynchrone 413
7.6.10. Principe du moteur synchrone 446
7.6.11. Le moteur synchrone autopiloté 417
7.6.12. Commande d'un moteur asynchrone à démarrage direct 418
7.6.13. Commande d'un moteur asynchrone à deux sens de rotation 420
7.6.14. Principales fonctions pouvant être réalisées par les variateurs 421
7.6.15. Modulation de largeur d'impulsion MLI 422
7.6.16. Conversion d'un champ tournant à partir d'un variateur 423
7.6.17. Structure interne d'un convertisseur de fréquence 424
7.7. PROTECTION DES MATÉRIELS ET DES PERSONNES 425
7.7.1. Protection des matériels 425
7.7.2. Protection des personnes 426
7.7.3. Disjoncteur différentiel (DD) 430
7.7.4. Habilitation 431
7.7.5. Distances limites des zones d'environnement 432
7.7.6. Consignation 432

7.1. GÉNÉRALITÉS

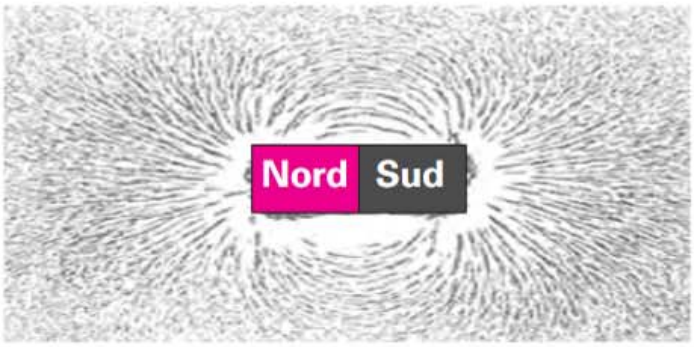
7.1.1. LE CHAMP MAGNÉTIQUE

• Aimant

Un aimant est capable d'attirer des morceaux de fer ou de la limaille. Tout aimant comporte deux extrémités, le pôle NORD et le pôle SUD, indissociables. Deux pôles de même nom se repoussent, deux pôles de noms différents s'attirent.

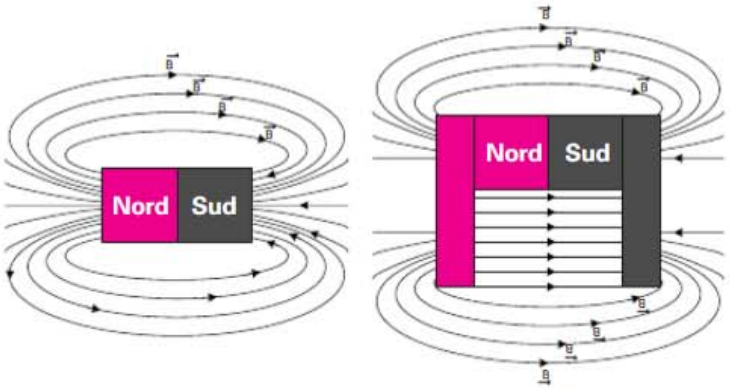
• Champ magnétique

Le champ magnétique est l'espace sur lequel un aimant fait sentir son influence. Une aiguille aimantée placée dans le champ prend une direction tangente à des lignes qui peuvent être matérialisées par des grains de limaille de fer. L'ensemble de ces lignes représente le champ de l'aimant et constitue son spectre magnétique.



• Vecteur champ magnétique

En tout point du champ magnétique, l'influence de l'aimant peut être définie par un vecteur dont les caractéristiques sont :
• une direction tangente à la ligne de champ passant par ce point,
• un sens allant du pôle Nord vers le pôle Sud,
• une valeur ou intensité exprimée en tesla (T).
D'où le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ exprimé en teslas (T).



Champ magnétique uniforme

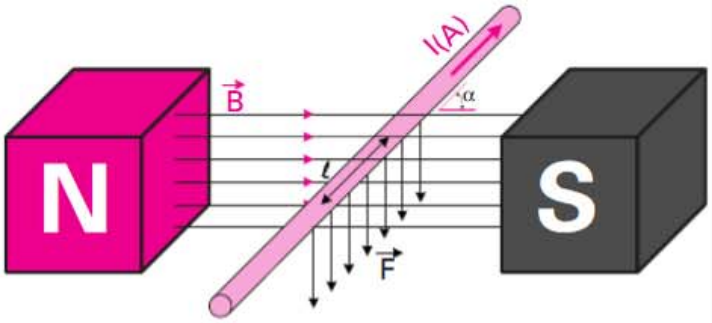
• Force électromagnétique

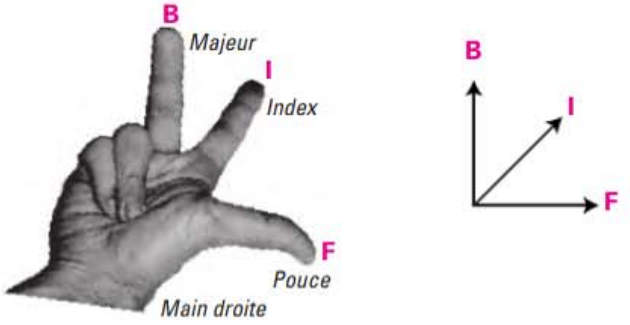
Une portion conducteur MN est placée dans un champ magnétique B. Ce conducteur subit une force F qui tend à le mettre en mouvement.

On constate que :
• la direction de la force $\vec{F}$ est orthogonale au plan formé par le conducteur MN et le vecteur champ magnétique $\vec{B}$;
• le sens de la force F , qui dépend du sens du courant I et du sens du champ magnétique $\vec{B}$, est donné par la règle de la main droite.

Le module de la force $\vec{F}$ est proportionnel :
• à la valeur absolue de l'intensité du courant $|I|$,
• à la longueur ℓ de la partie du conducteur plongée dans le champ magnétique, ici ℓ = MN,
• à l'intensité $\vec{B}$ du champ magnétique,
• au sinus de l'angle α formé par le conducteur et le vecteur champ magnétique $\vec{B}$.

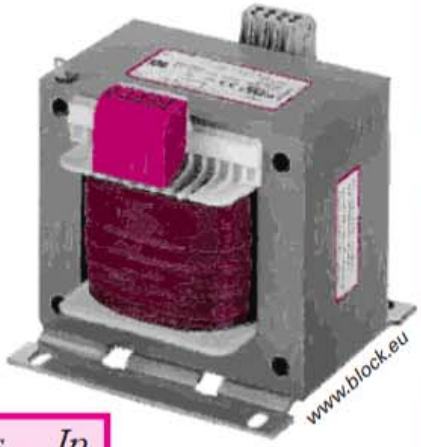
$$F = |\ell . I . B . \sin \alpha|$$





7.2. LE TRANSFORMATEUR ÉLECTRIQUE

7.2.1. LE TRANSFORMATEUR ÉLECTRIQUE MONOPHASÉ



• Principe

Le transformateur utilise le principe de la réversibilité électromagnétique.
Un courant électrique variable passant dans le bobinage primaire crée un champ magnétique variable.
La carcasse métallique, constituée de feuilles d'acier doux, véhicule le flux magnétique jusqu'au bobinage secondaire.
Le champ magnétique variable traversant la bobine secondaire va créer un courant électrique.

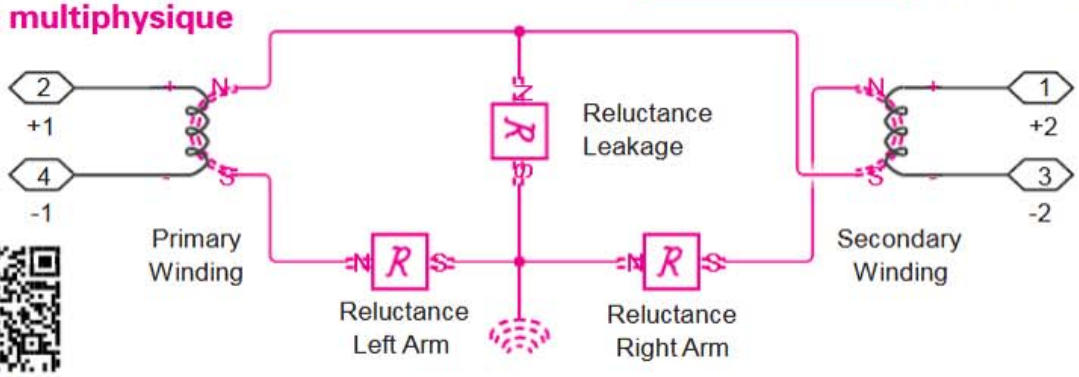
• Rapport de transformation

Le rapport entre le nombre de spires du secondaire sur le primaire donne le rapport de transformation.

$$\frac{Us}{Up} = \frac{Ns}{Np} = \frac{Ip}{Is}$$

Relation valable pour un transformateur idéal

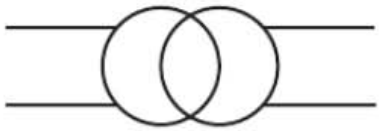
• Modèle multiphysique



lienmini.fr/s181-transfo

• Symbole

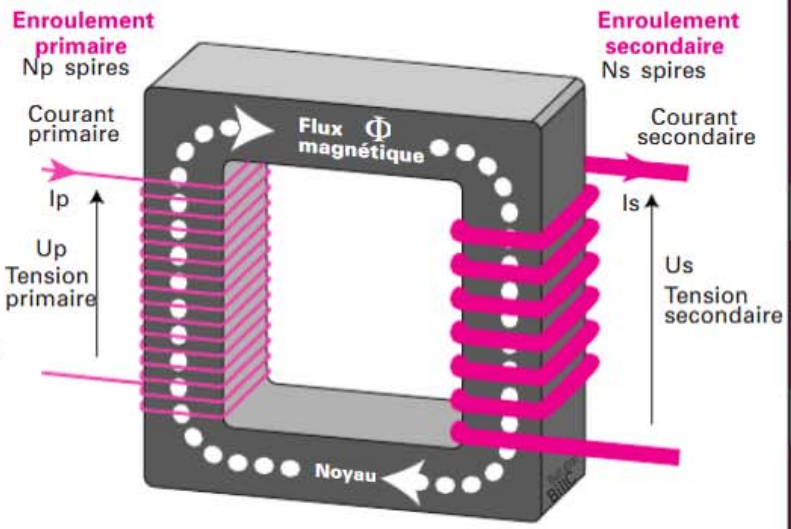
Symbole préféré en électricité faible puissance



Symbole préféré dans la distribution électrique

• Constitution

Un transformateur est un élément statique qui transfère de l'énergie électrique entre deux circuits grâce à l'induction électromagnétique.
Les deux circuits sont donc séparés électriquement, galvaniquement, mais couplés magnétiquement.



Exemple : Np = 2400 spires, Ns = 260 spires, Up = 230V

$$Us = \frac{Up \times Ns}{Np} = \frac{230 \times 260}{2400} \approx 25V$$

• Rendement

La puissance disponible en sortie sera égale à la puissance d'entrée multipliée par le rendement.

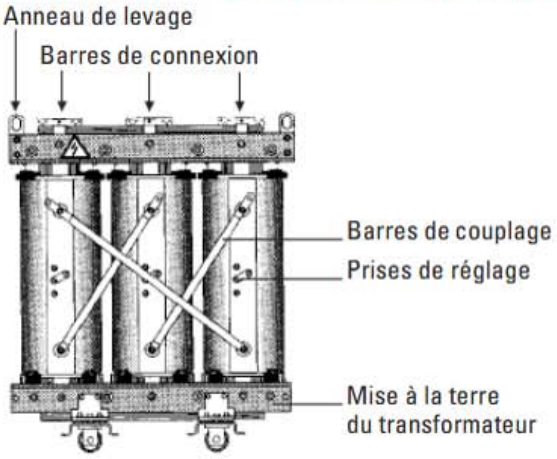
$$Ps = Pe.\ \eta$$

$$60\ \% < \eta < 98\ \%$$

Le rendement d'un transformateur de faible puissance, exemple 63 VA, est de l'ordre de 70 % alors qu'un transformateur de distribution de 1 MVA aura un rendement de l'ordre de 98 %.

7.2.2. LE TRANSFORMATEUR ÉLECTRIQUE TRIPHASÉ

• Constitution d'un transformateur de puissance triphasé



• Grandeurs physiques définies par la norme NF C 52-113

Puissance assignée S_n en kVA (puissance apparente) en courant triphasé

$$S_n = U1 \cdot I1 \sqrt{3} = U2_o \cdot I2_o \sqrt{3}$$

Tension assignée
Tension spécifiée pouvant être appliquée au primaire ou développée au secondaire en fonctionnement à vide entre les bornes de ligne des enroulements du transformateur.

$U1 = 20$ kV — Tension réseau

$U2_o = 410$ V — Tension secondaire à vide

Courants assignés

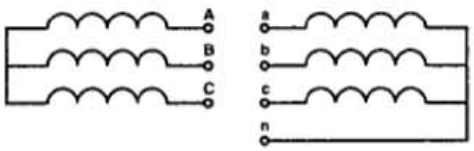
$I1 = \dfrac{S_n}{\sqrt{3}\, U1}$ Courant primaire

$I2_n = \dfrac{S_n}{\sqrt{3}\, U2_o}$ Courant secondaire

$U2_o = \dfrac{N2}{N1} U1$

N2 : nombre de spires au secondaire par enroulement.
N1 : nombre de spires au primaire par enroulement.

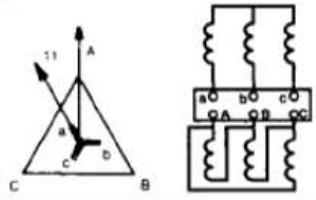
Désignation des couplages
Repérage côté HT : lettres majuscules
Y = étoile, D = triangle, Z = zig-zag.
Repérage côté BT : lettres minuscules
y = étoile, d = triangle, z = zig-zag.
Le chiffre indique l'indice horaire du couplage. Le couplage au secondaire d'un transformateur permet d'obtenir des tensions différentes et d'obtenir un point neutre dans le couplage étoile (tension entre phases ou tension entre phase et neutre).



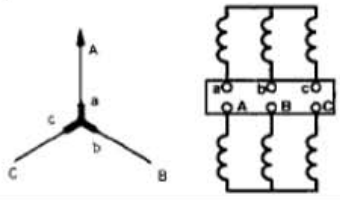
Couplage Y – yn - O

Couplages normalisés des transformateurs

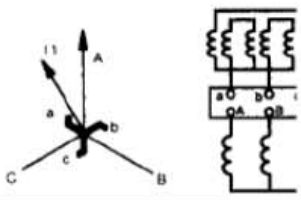
Dy 11 330°

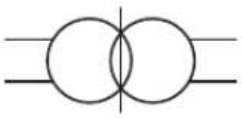
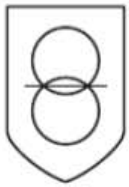
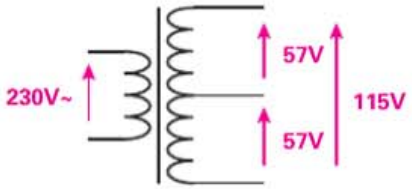
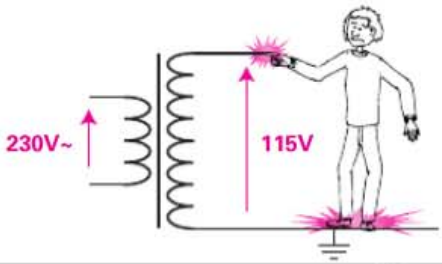
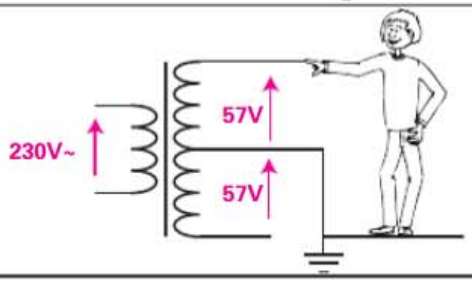


Yy O 0°



Yz 11 330°



AVANTAGES D'UN TRANSFORMATEUR DE SÉPARATION DES CIRCUITS (NF C 52-220)	Ce transformateur est construit de manière à obtenir une séparation électrique sûre entre les enroulements primaire et secondaire (source et utilisation). Pas de danger d'électrocution en cas de défaut sur une phase (isolement de 4 000 V entre primaire et secondaire). Mesure A1 de la Norme C 15-100.	Symbole : 
AVANTAGES D'UN TRANSFORMATEUR DE SÉCURITÉ (NF C 52-210)	Un transformateur de sécurité est destiné à alimenter un circuit de distribution, un appareil d'utilisation ou un autre équipement en très basse tension de sécurité (≤ 25 V). Le contact sur les deux phases peut être supporté sans danger, même en milieu conducteur. Mesure A2 de la Norme C 15-100.	Symbole : 
TRANSFORMATEUR À POINT MILIEU SORTI (PM)	C'est une sortie qui se trouve au milieu de l'enroulement secondaire et qui est destinée à être raccordée à la masse. La tension secondaire entre un fil d'utilisation et la masse sera égale à la moitié de la tension nominale.	
	Exemple : pour une mise à la masse accidentelle sur un transformateur dont la tension secondaire est de 115 V~ : – sans point milieu sorti : il y a 0 V ou 115 V entre le fil d'utilisation et la masse ;	
	– avec point milieu sorti : il y a 57,5 V entre le fil d'utilisation et la masse. Cette tension est très proche de la très basse tension, donc pratiquement sans danger pour l'utilisateur.	

Exemple d'une plaque signalétique d'un transformateur

ÉLECTRO-INDUSTRIE - METZ

ISOL Transformateur TRTC 8 Type sec

N° 882311 Commande 27 79

Conforme **UTE C52-100**

3 **Ph** 50 **Hz** 90 **kVA** **coupl.** D/Y

U1 400 I1 136

U2 230/400 I2 40/114

U_{cc} 11 % Classe isolement E

Tension isolement 4 000 V

ISOL. : transformateur d'isolement.
sec : transformateur non immergé.
90 kVA : puissance apparente.
D/Y : couplage primaire triangle, couplage secondaire étoile.
U1 : tension primaire.
U2 : tensions secondaires.
I1 : courant primaire.
I2 : courants secondaires.
U_{cc} 11 % : tension primaire de court-circuit
E : température limite 115 °C.

Guide de choix d'un moteur électrique

Aptitudes / Types	Caractéristiques principales	Conditions principales d'utilisation	Exemples d'application
MoTeuR paS à paS HybRIde mdp	10 W maximum 10 Nm maximum 10 Nm de couple statique ou couple de maintien	Alimentation par convertisseur tension/fréquence. Température ambiante : ⩽ 25 °C. 200 pas/s maximum soit 2 400 min^{-1} pour un moteur 200 pas (1,8°/pas).	Codage de position. Positionnement précis sans boucle d'asservissement. Fonctionnement à vitesse variable (action sur le nombre de pas/s). Petite charge nécessitant un couple à l'arrêt.
MoTeuR à CouRaNT CoNTINu à aIMaNT peRMaNeNT LEROY-SOMER	1 kW maximum à 2 000 min^{-1} pour U = 180 V 4,8 Nm maximum IP 55 Classe F	Alimentation par variateur électronique monophasé 220/240 V pont mixte. Température ambiante : ⩽ 40 °C. Service S1. Fonctionnement à couple constant. I maximum limitée à 1,6 I_n.	Rapidité d'arrêt. Charge nécessitant de grandes plages de variation de vitesse. Démarrage et ralentissement contrôlés. Positionnement précis avec boucle d'asservissement. Variation de vitesse.
MoTeuR aSyNCHRoNe MoNopHaSé RoToR eNCC LEROY-SOMER	4 kW maximum I_d jusqu'à 6,2 I_n M_d (jusqu'à 2,7 M_n) 3 000 min^{-1} maximum bi-tension 115/230 V	Type « P » condensateur permanent : utilisation sans contrainte particulière. Type « C » ou « R » condensateur de démarrage : utilisation nécessitant un important couple au démarrage. Type « PC » condensateur permanent et condensateur de démarrage.	Applications domestiques et tertiaires principalement.
MoTeuR aSyNCHRoNe TRIpHaSé RoToR eNCC LEROY-SOMER	5 000 kW maximum I_d jusqu'à 7,1 I_n M_d jusqu'à 2,5 M_n 3000 min^{-1} maximum bi-tension 230/400 V, 400/690 V	Adaptation au réseau, par démarreur approprié. Alimentation par variateur électronique (f variable). Température ambiante : ⩽ 40 °C. Altitude ⩽ 1 000 m. Service S1.	Toutes applications industrielles. Sidérurgie. Chimie. Traitement des eaux. Papeterie. Agro-alimentaire. Tous systèmes d'entraînement. Variation de vitesse.

7.3. MOTEUR À COURANT CONTINU

7.3.1. DÉFINITIONS DE BASE

Fonctionnement au point nominal ou fonctionnement à efficacité maximum :

La **vitesse nominale n_n** du moteur est obtenue pour la **charge nominale**, à la **tension d'induit nominale, u_m** à **l'excitation nominale θ_n ,** à l'**intensité d'induit nominale I_m** à la température de service normale, **$t_n°$**.

Les **valeurs nominales essentielles sont notées sur la plaque signalétique**. Dans le cas d'un petit moteur, ces informations sont consignées dans un document du constructeur. On y trouve les informations détaillées, caractéristiques du moteur, courbes, application, installation, etc.
Selon l'origine du moteur, les unités sont plus ou moins normalisées (ex: Nm ou g.cm)

Conception d'ensemble

Le STATOR

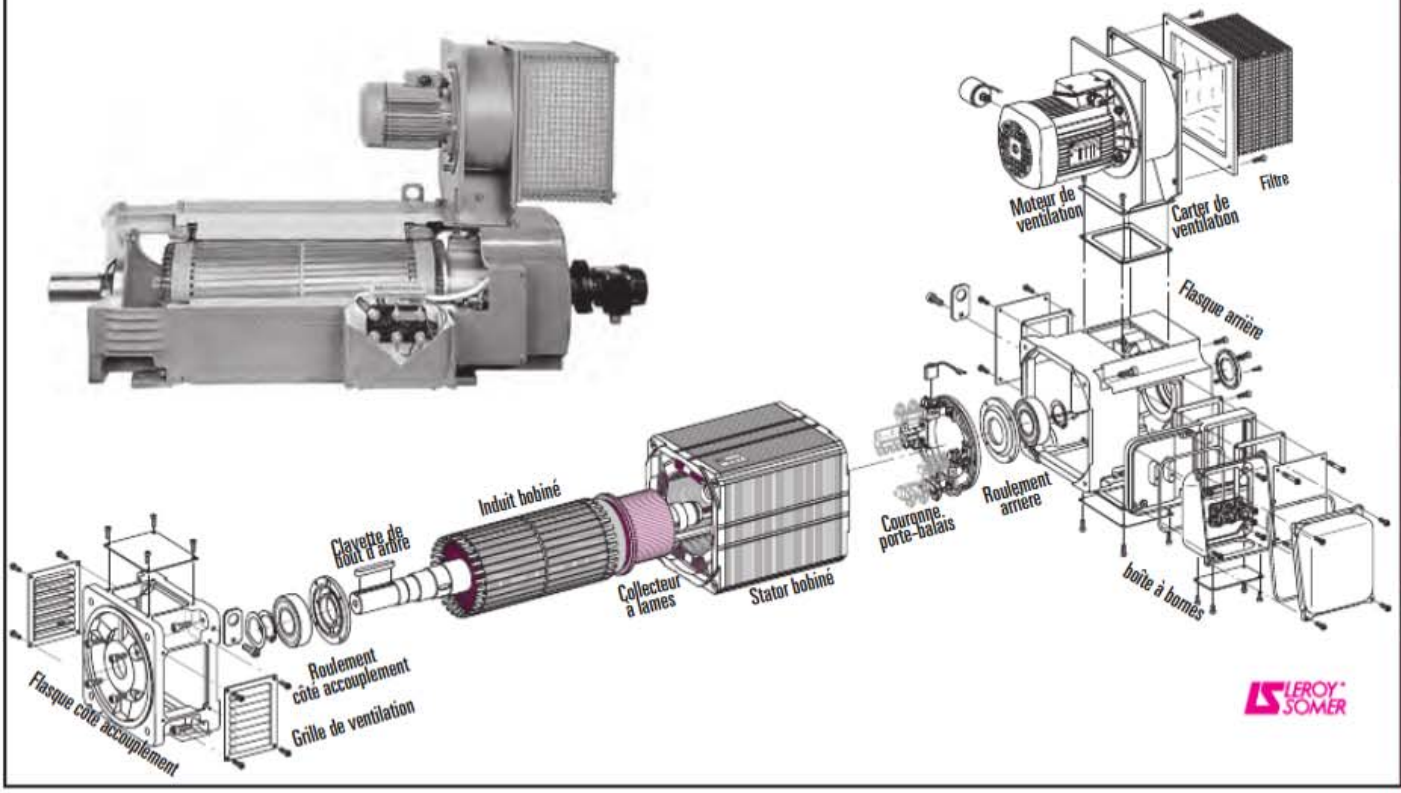
Le stator est la partie fixe d'une machine rotative. Le stator fournit le champ magnétique externe et est stationnaire.
Dans les moteurs à courant continu, le stator peut être réalisé avec des aimants permanents. Les électro-aimants sont le plus souvent utilisés.

La carcasse, les pôles principaux et les pôles de commutation sont entièrement feuilletés.
Les composants du stator sont soudés ensemble dans un bâti de fixation qui aligne et presse les tôles ensemble en une unité monobloc.

L'INDUIT (rotor)

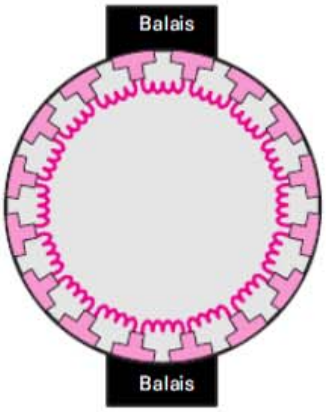
Le noyau d'induit est constitué de disques en tôles électromagnétiques isolées. L'enroulement d'induit est en cuivre isolé verni. Les bobinages de cuivre sont placés dans des encoches.

Le rotor bobiné est relié à un collecteur rotatif inversant la polarité dans chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour et qui permet de créer un champ magnétique rotorique en quadrature avec le champ statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément induit en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine.



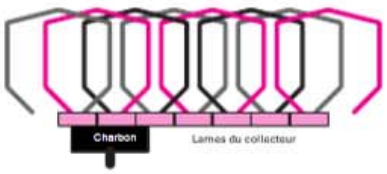
CHaîNe d'éNeRGI éLeCTRIque

Les bobinages d'induit

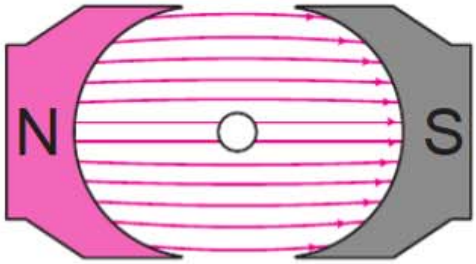


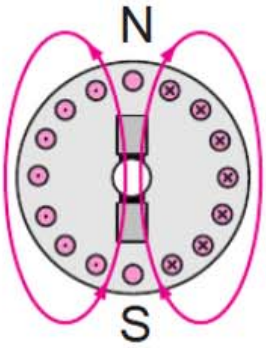
Le collecteur permet d'amener l'énergie vers le rotor. Il est constitué de lames conductrices isolées les unes des autres où frottent deux balais.

L'induit se comporte comme une seule et même bobine lorsqu'il est alimenté par les balais.



7.3.2 FONCTIONNEMENT





Le stator composé d'un aimant permanent ou d'un électroaimant va créer un champ magnétique uniforme.

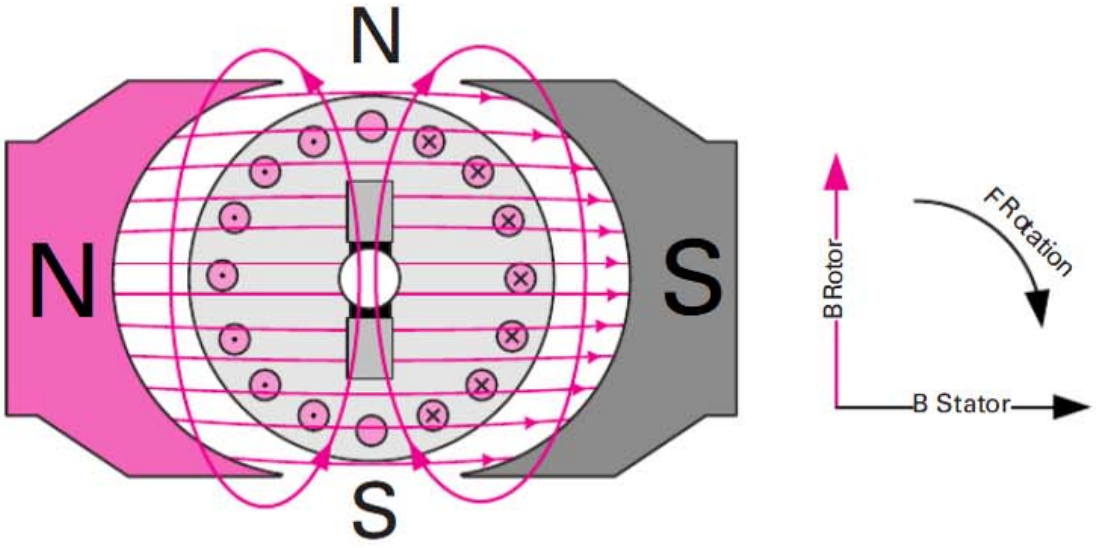
L'induit (le rotor) est placé dans le champ magnétique uniforme du stator.

Le rotor alimenté par le collecteur, va créer un champ magnétique en quadrature par rapport au champ magnétique du stator.

Cette position en quadrature des champs magnétiques, permet d'obtenir une force d'attraction et de répulsion maximum.

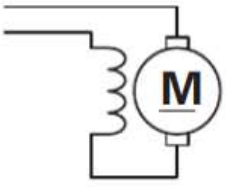
Il est souhaitable d'avoir un grand nombre de lames sur le collecteur (donc de voies d'enroulements), cela permet d'obtenir un vecteur champ magnétique oscillant peu par rapport à sa position en quadrature.

La conséquence est : un couple plus régulier, un effet inductif entre 2 lames plus faible donc des étincelles plus faibles.

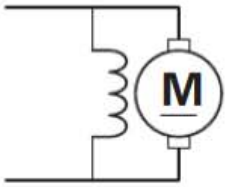


• Symboles

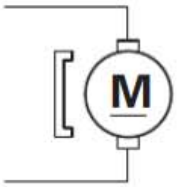
G : génératrice
M : moteur
GS : génératrice synchrone
MS : moteur synchrone
MG : Moteur et génératrice



Moteur continu à excitation série



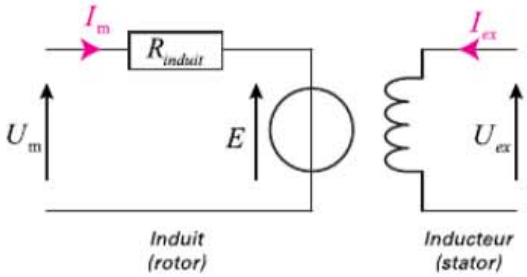
Moteur continu à excitation en dérivation



Moteur continu à aimant permanent

7.3.3. ÉQUATION DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR

• Moteur à excitation séparée



R_{induit} : résistance de l'induit en ohms (Ω)
E *ou fem ou fcem* : force électromotrice (V)
I_m : courant dans l'induit en ampères (A)
U_m : tension d'alimentation de l'induit (V)
I_{ex} : courant d'excitation de l'inducteur (A)
U_{ex} : tension d'alimentation de l'inducteur (V)
Φ : flux magnétique en webers (W)
n : vitesse en tours par minute ($tr.m^{-1}$)
Ω : vitesse en radians par seconde ($rd.s^{-1}$)
K *ou* K' : constante de fabrication
P_{abs} : puissance absorbée (W)
P_e : puissance électromagnétique (W)
M : couple électromagnétique (Nm)

$$\Omega = \frac{n.\pi}{30} \qquad n = \frac{\Omega.30}{\pi}$$

$$E = K.\Omega.\Phi$$

$$U_m = E + R_{induit}.I_m$$

$$P_{abs} = U_m.I_m + U_{ex}.I_{ex}$$

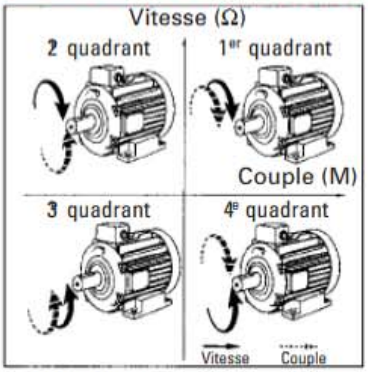
$$P_e = E.I_m$$

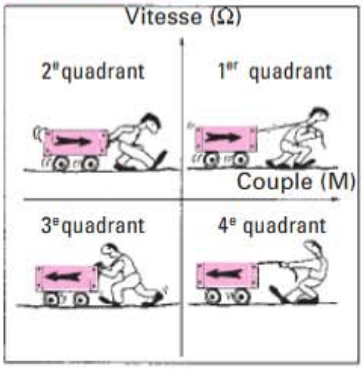
$$M = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{E.I_m}{\Omega} = \frac{K.\Omega.\Phi.I_m}{\Omega} \Rightarrow M = K.\Phi.I_m$$

• **Remarque :**
Pour un moteur à aimant permanent ces équations générales se réduisent à :

$$P_{abs} = U_m.I_m \qquad E = K'.\Omega \qquad M = K'.I_m$$

• Modes de fonctionnement (fonctionnement en quatre quadrants)

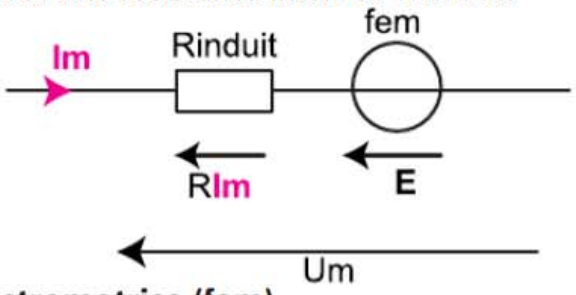


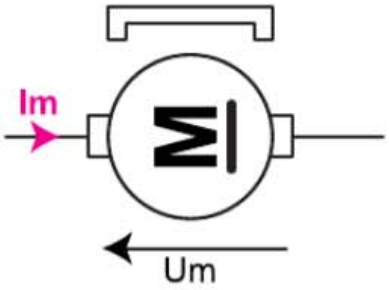


Les divers fonctionnements sont caractérisés par :
– une marche en **MoTeuR** : quadrants 1 et 3 (le moteur fournit une puissance mécanique) ;
– une marche en **fReINaGe** ou en génératrice : quadrants 2 et 4 (le moteur absorbe une puissance mécanique).

7.3.4. MODÈLE ÉQUIVALENT

Le moteur à courant continu à aimant permanent est équivalent à une force électromotrice (fem) en série avec une résistance interne : **R induit**.





Force électromotrice (fem)

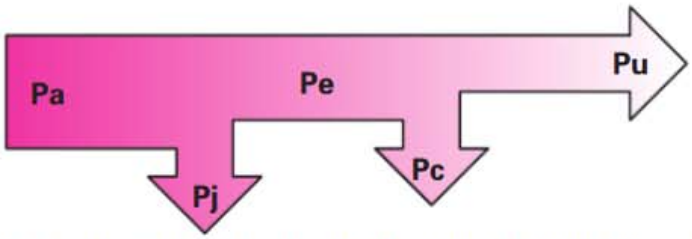
La force électromotrice (fem) d'un moteur à courant continu à aimant permanent est proportionnelle à la vitesse de rotation. En particulier, si la vitesse est nulle, la fem est nulle aussi :

$$E = K' . \Omega$$

E en volts
Ω en radians/seconde (rd/s)
K' constante de fabrication

• Bilan des puissances

$$Pu = Pa - Pj - Pc$$



Expression des puissances lorsque la tension aux bornes du moteur et l'intensité qui le traverse sont variables au cours du temps.

Puissance absorbée : $Pa = \overline{um} . \overline{im}$

Pertes Joule : $Pj = R . im^2$

Puissance électrique : $Pe = E . im$ (puissance électrique transmise à la partie tournante).

Puissance utile : **Pu.** C'est la puissance mécanique fournie par le moteur pour entraîner la charge. Cette puissance mécanique est donc nulle en fonctionnement à vide.

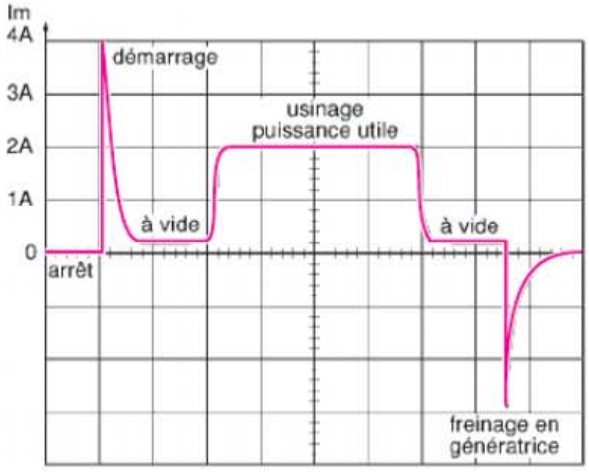
Pertes constantes : **Pc.** Ces pertes sont la somme des pertes mécaniques et magnétiques. Elles sont constantes à une vitesse donnée et peuvent se déterminer à vide.

Rendement : $\eta = \frac{Pu}{Pa}$

• Application

Le graphe ci-contre représente les différents modes de fonctionnement d'un moteur.

Le pic de démarrage **Id = 4 A**
Le fonctionnement à vide **Iv = 0,2 A**
En phase d'usinage **Im = 2 A**
À vide puis en fonctionnement en génératrice **Ig = 3 A**



Résistance induit : $\frac{Um}{Id} = \frac{48}{4} = 12\ \Omega$

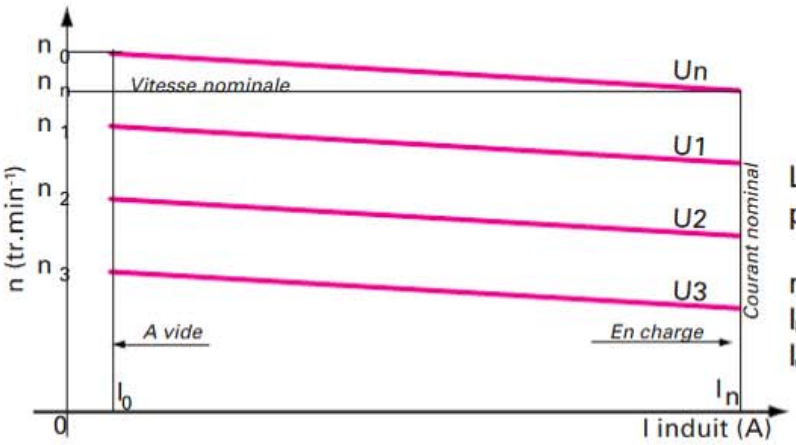
Pertes Joule à vide : $R\ induit \times I^2v = 0,48\ W$

Pertes constantes : $Pv_{abs} - Pu - Pjv = (48 \times 0,2) - 0 - 0,48 = 9,12\ W$

Puissance utile = $Pm_{abs} - Pc - Pjm = (48 \times 2) - 9,12 - 12 \times 2^2 = 38,9\ W$

Rendement $\eta = Pu/Pabs = 40,5\ \%$

7.3.5. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES À FLUX CONSTANT

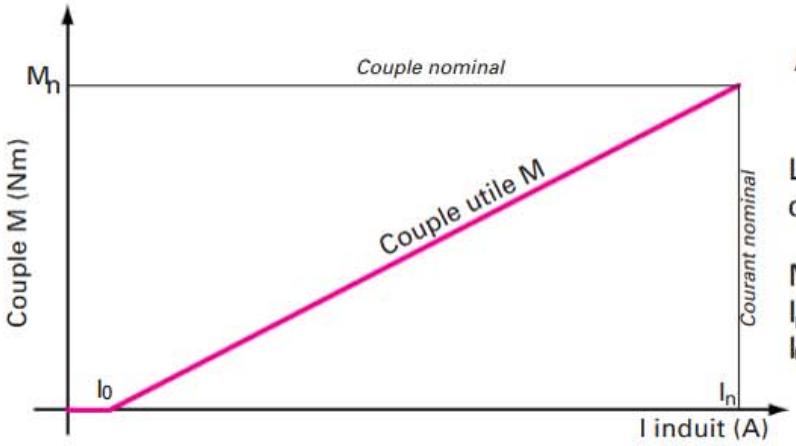


Allure de la vitesse de rotation en fonction du courant d'induit à tension constante.

La vitesse est relativement constante pour une tension d'induit constante.

n = vitesse nominale en tr.min^{-1}
I_n = courant nominal dans l'induit
I_0 = courant d'induit minimal

$$\Omega = \frac{E}{K'} = \frac{U_m - R_{induit}.I_m}{K'} \qquad n = \frac{\Omega.30}{\pi}$$

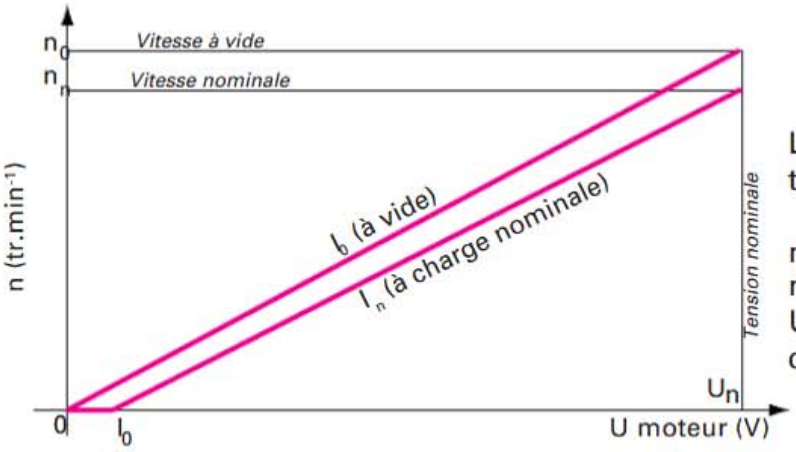


Allure du couple moteur (M) en fonction du courant d'induit.

Le couple est proportionnel au courant d'induit.

$$M = K'.I_m$$

M_n = couple nominal en Nm
I_n = courant nominal dans l'induit
I_0 = courant d'induit minimal



Allure de la vitesse de rotation en fonction de la tension d'induit.

La vitesse est proportionnelle à la tension d'induit.

$$\Omega = \frac{E}{K'}$$

n_n = vitesse nominale en tr.min^{-1}
n_0 = vitesse à vide (couple nul)
U_0 = tension d'induit minimale avec couple nominal.

• Plaque signalétique

THRIGE-ENCO	
MOTEUR SHUNT	B 60-380-50
LAK 132 A	N° 336 1094-9449
5,10 kW	1440 min^{-1}
CONT	class F
440 V	13,90 A
Excitation 210 V	1,70 A
1EC 34-1	EXT. FAN 760 m^3

Moteur shunt : moteur à induction parallèle.
LAK 132 A : type de moteur.
5,10 kW : puissance nominale sur l'arbre.
CONT : alimentation continue.
440 V : tension nominale de l'induit.
210 V : tension nominale de l'inducteur.
Ext. Fan : ventilation forcée extérieure.
1440 min^{-1} : vitesse nominale.
Class F : niveau d'isolation électrique.
13,90 A : courant nominal d'induit.
1,70 A : courant nominal d'inducteur.

7.3.6. MOTEUR UNIVERSEL

Un moteur universel est une machine dont le principe de fonctionnement se rapproche de celui d'une machine à courant continu à excitation série.
Le stator est une bobine constituant un électro-aimant. De ce fait, il est feuilleté pour limiter les courants de Foucault qui apparaissent systématiquement dans toutes les zones métalliques massives soumises à des champs magnétiques alternatifs.

Le sens de rotation du rotor reste le même, quel que soit le sens du courant, car le champ magnétique créé dans le stator et le rotor, s'inverse aux changements de polarités (voir figure ci-dessous).

Ce moteur tient son nom du fait qu'il peut être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif de fréquence 50 Hz ou 60 Hz.

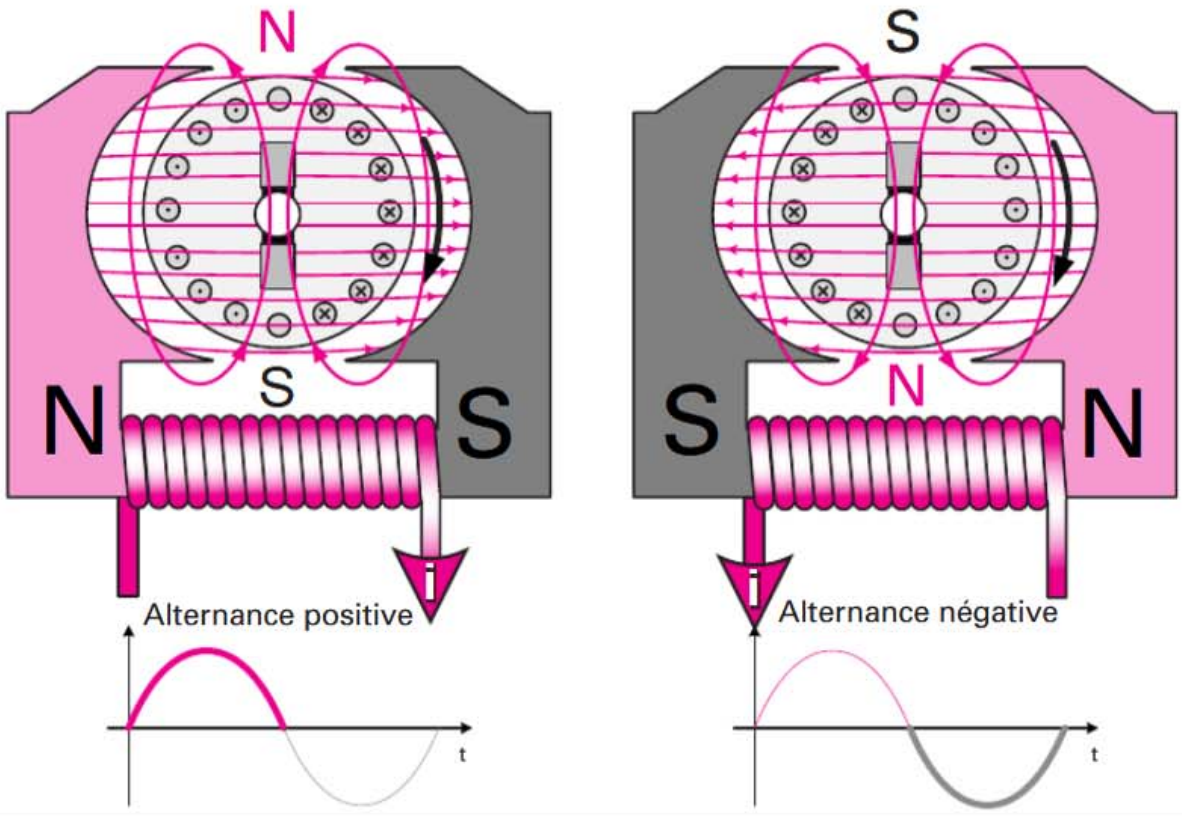
L'inversion du sens de rotation est obtenue simplement au moyen d'un interrupteur inverseur permettant d'inverser le courant soit dans le stator soit dans le rotor.

Les moteurs universels sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple assez fort, tels que les robots de cuisine, l'outillage électroportatif de faible puissance (jusqu'à 1200 W) ou encore les aspirateurs.

La vitesse de ces moteurs dépend de la valeur de la tension d'alimentation. En régime de courant alternatif, elle peut être facilement réglée par un dispositif peu coûteux tel que le gradateur à angle de phase (le même variateur qui sert à régler l'intensité lumineuse des luminaires).

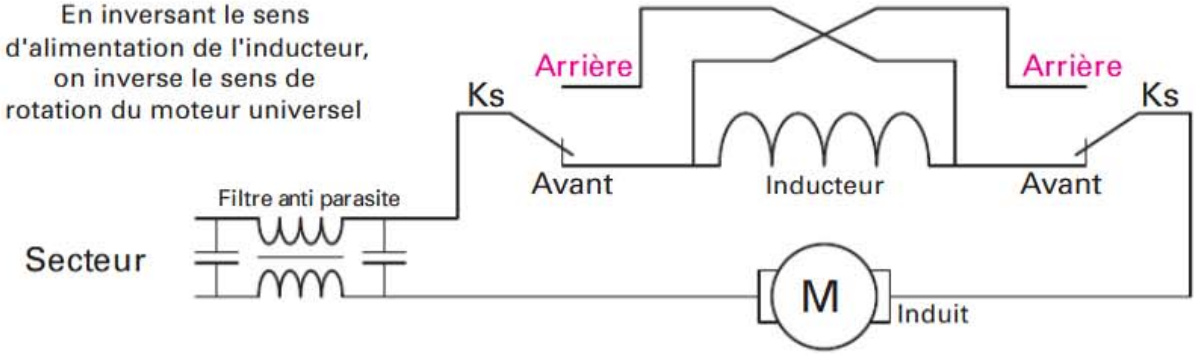
Inconvénients

Usure des balais alimentant le rotor, comme dans toute machine à courant continu.
Les ruptures de contact successives, inhérentes au fonctionnement de l'ensemble balais-collecteur, génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation et des interférences électromagnétiques, radioélectriques, pour beaucoup d'autres appareils : télévisions, radios, téléphones.
Le rendement est assez faible de l'ordre de 30 à 50 %.



• Inversion du sens de rotation d'un moteur universel alimenté en alternatif.

En inversant le sens d'alimentation de l'inducteur, on inverse le sens de rotation du moteur universel



7.3.7. MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU

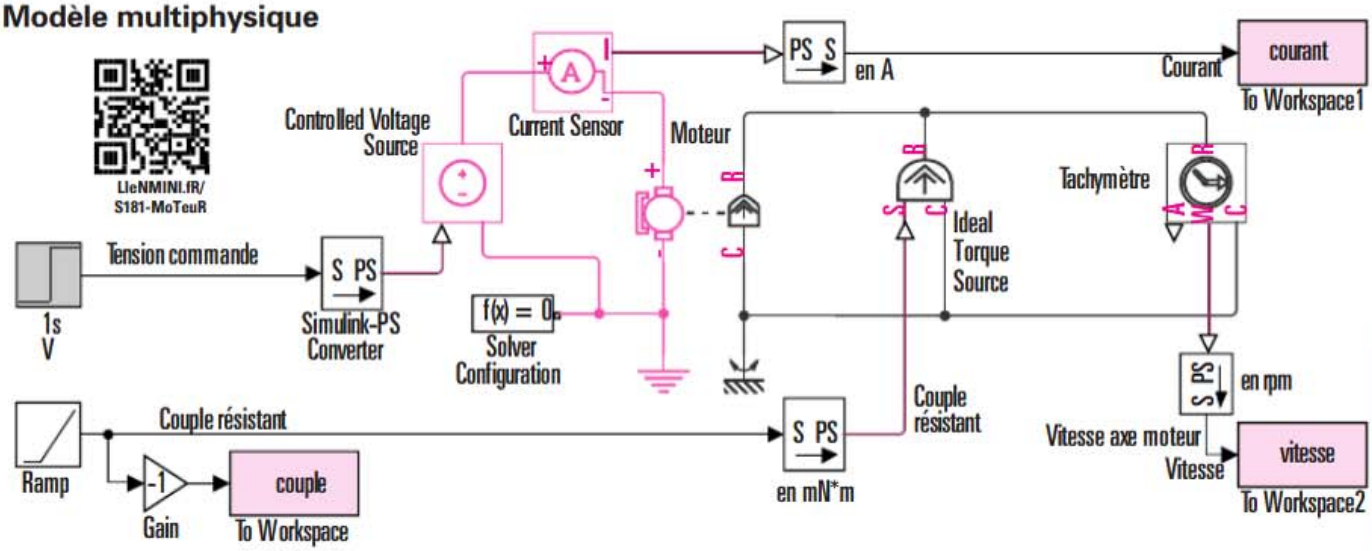
Exemple : moteur de voiture radiocommandée RS-540SH

MABUCHI MOTOR

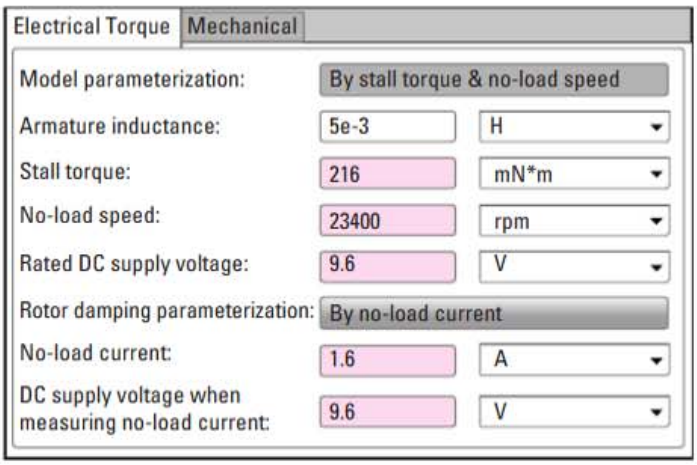
Caractéristiques constructeur

Modèle	Tension		A vide		Au rendement maximum					Bloqué		
	Plage d'utilisation	Nominale	Vitesse	Courant	Vitesse	Courant	Couple		Puissance	Couple		Courant
			tr/min	A	tr/min	A	mN·m	g·cm	W	mN·m	g·cm	A
RS-540SH-6527	4.8V à 9.6V	9.6V	23400	1.60	20040	9.55	31.0	316	64.9	216	2202	57.0

Modèle multiphysique



Paramètres du moteur



À partir des caractéristiques constructeur on complète les paramètres du moteur dans Simulink.

Le bloc «*Ideal Torque Source*» va opposer un couple résistant.

Une mesure de l'intensité du courant et de la vitesse du moteur permettra de calculer le rendement et de tracer les caractéristiques du moteur.

$$I = f(M) \qquad n = f(M)$$

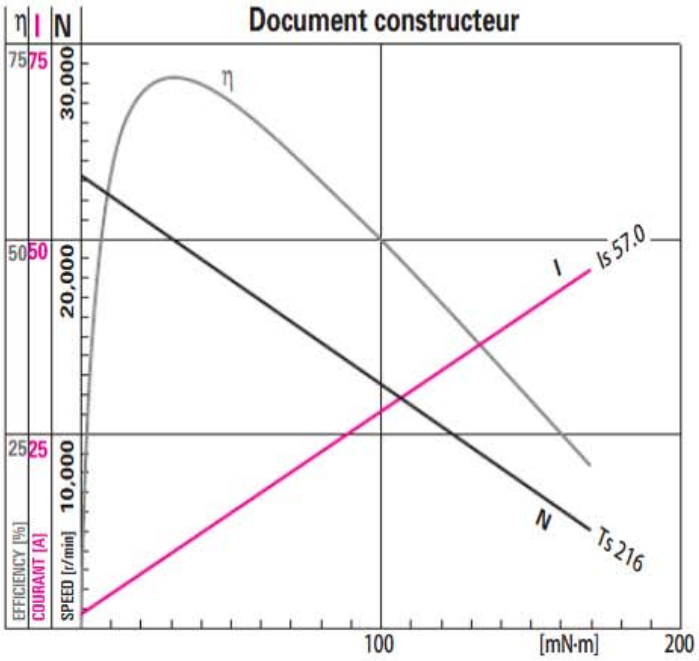
$$\eta = \frac{Pu}{Pabs} = \frac{M \times 10^{-3} \times (n \times 2 \times \pi / 60)}{9.6 \times I}$$

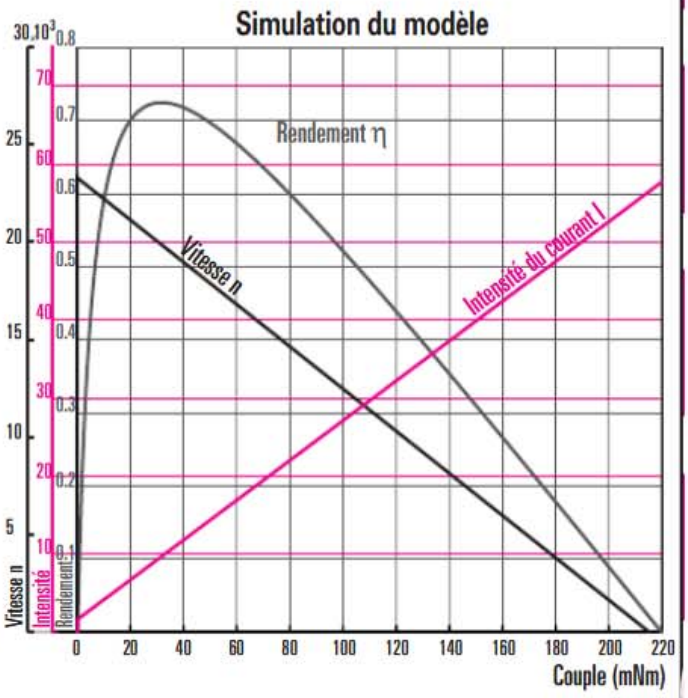
• Protocole de simulation

La tension de commande de 9.6V est appliquée après 1 seconde de simulation.
Le couple résistant est généré par une rampe. Le couple augmente à partir de 4 secondes de simulation pour laisser le temps au moteur de stabiliser sa vitesse. La rampe décroit de -33.3 mNm par seconde soit -220 mNm à la fin de la simulation.
Le couple est enregistré en positif (gain -1) pour faciliter le tracé.

Un script Matlab permet de calculer le rendement et de tracer les 3 courbes sur le même graphe.

Il est possible de traiter la caractérisation des écarts entre le système souhaité et le système simulé (écart 3).



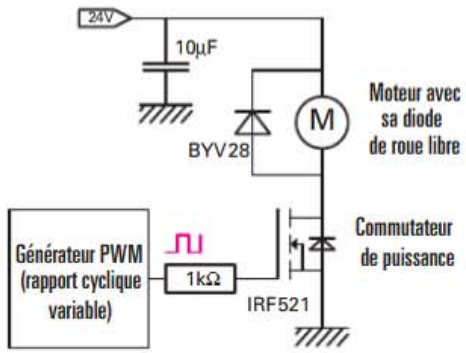


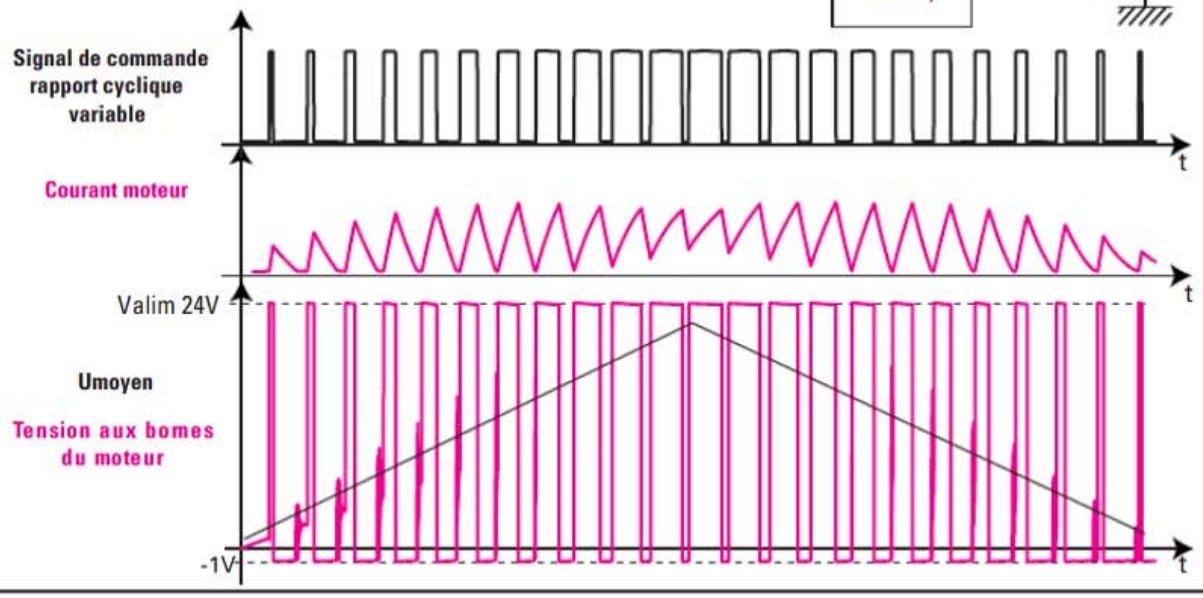
7.3.8. VARIATEUR DE VITESSE

• Variation de vitesse par MLI (PWM)

MLI : **M**odulation à **L**argeur d'**I**mpulsion,
en anglais **PWM** : **P**ulse **W**idth **M**odulation.

Les tensions négatives (-1V) sont dues à l'effet inductif du moteur elles sont limitées par la diode de roue libre.

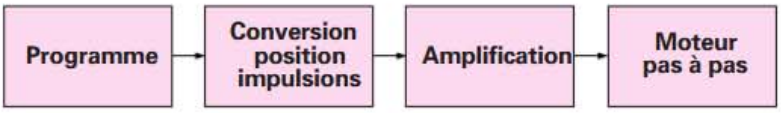




7.4. LE MOTEUR PAS À PAS

Les moteurs pas à pas permettent de convertir directement un signal électrique numérique en un positionnement angulaire de caractère incrémental. Chaque impulsion envoyée par le système de commande au module de puissance se traduit par la rotation d'un pas du moteur. La résolution angulaire d'un moteur pas à pas va de 4 à 400 pas. On peut distinguer trois catégories technologiques :

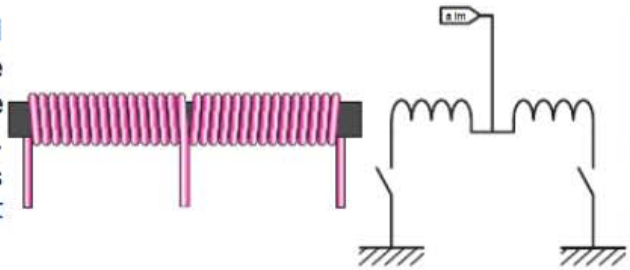
- moteur à reluctance variable,
- moteur à aimants permanents,
- moteur hybride.



• Commande des moteurs pas à pas

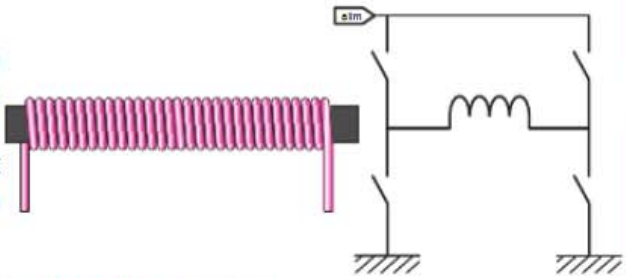
Commande unipolaire

Chaque phase du moteur est alimentée dans un seul sens. C'est-à-dire que le courant traversant une phase est soit nul, soit positif. L'électronique de commutation est alors plus simple et économique, mais les performances du moteur sont moindres. Les moteurs pouvant être pilotés en unipolaire doivent avoir 6 ou 8 fils.



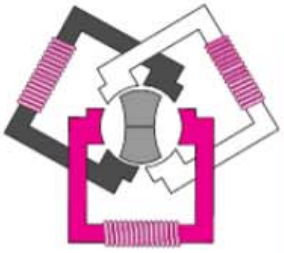
Commande bipolaire

Chaque phase du moteur peut être alimentée par un courant positif, négatif ou nul. Ainsi, tout le cuivre du moteur est utilisé : les performances du moteur sont accrues. Cependant, la commande électronique est plus complexe. Les moteurs pouvant être pilotés en bipolaire doivent avoir 4 ou 8 fils.



7.4.1. MOTEUR À RÉLUCTANCE VARIABLE, À AIMANTS PERMANENTS

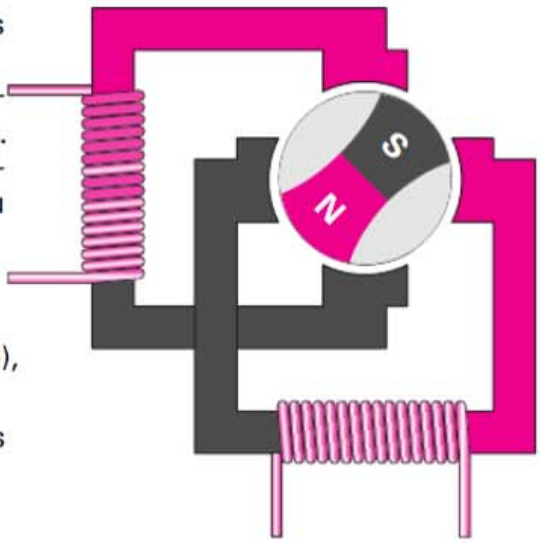
• Moteur à réluctance variable



Dans un circuit magnétique, le flux cherche à être maximal en empruntant le circuit de moindre réluctance. Ce moteur comporte une denture dont le pas est différent au stator et au rotor. Le rotor n'est pas aimanté.
Type de moteur peu utilisé à cause de son faible couple et de sa faible résolution angulaire.

• Moteur à aimants permanents

Ce type de moteur exploite le phénomène d'attraction de deux pôles opposés et la répulsion de deux pôles identiques.
Par inversion du sens du courant dans les bobines magnétiques, on provoque une inversion du champ magnétique. Ceci doit avoir lieu dans un ordre précis par la commutation des phases pour avoir une rotation par pas entier ou demi-pas.



On peut commander ce type de moteur :

- en pas entier excitation normale,
- en pas entier excitation pleine onde (moins de couple),
- en demi-pas.

Ce type de moteur est utilisé dans des applications simples à faible exigence de positionnement.

Nombre de pas par tour 20, 24 ou 48
Couple de maintien de 6 mNm à 150 mNm

7.4.2. LE MOTEUR PAS À PAS HYBRIDE

Le moteur hybride est une combinaison du moteur à reluctance variable et du moteur à aimant permanent.

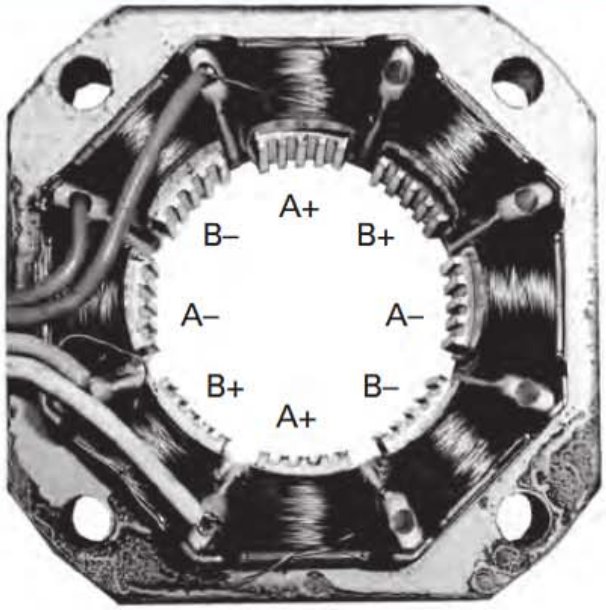
Exemple moteur de 200 pas.

Le rotor composé d'un aimant permanent emboîté dans deux couronnes de 50 dents décalées d'une demi-dent. De profil, on a ainsi 100 dents alternativement pôle nord et pôle sud, soit 50 paires de pôles.

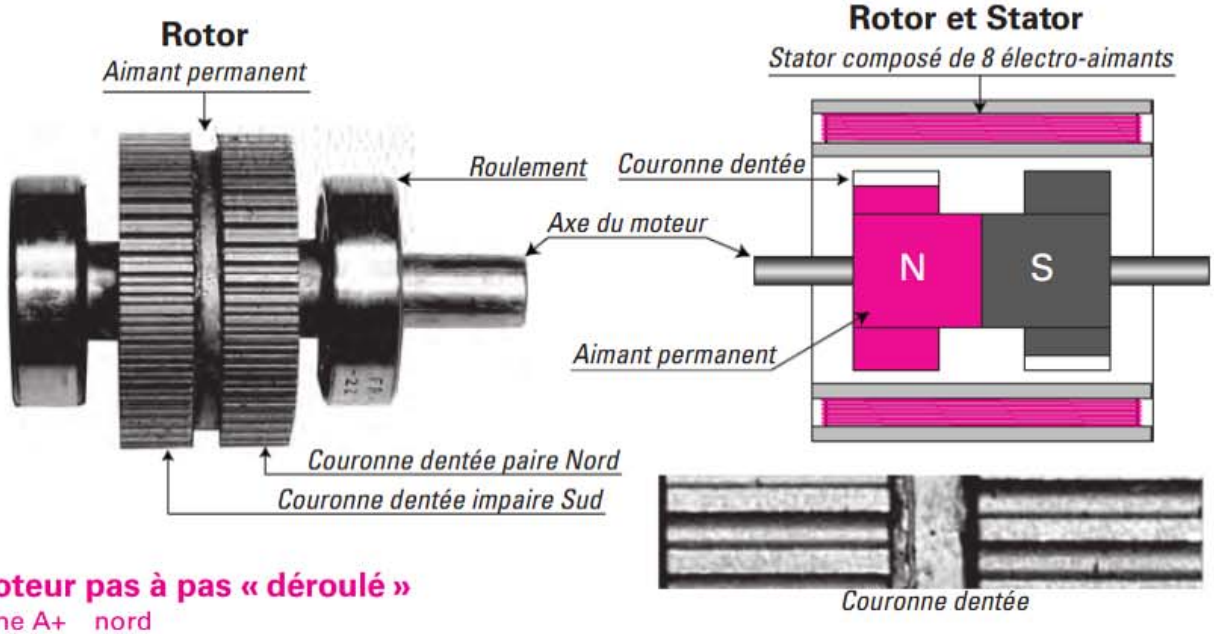
Le stator est constitué de 2 bobines A et B (modèle bipolaire) montées en 8 électro-aimants, soit 4 paires de pôles.

Le nombre de pas entiers possible est de :

50 × 4 soit 200 pas



• Constitution



• Moteur pas à pas « déroulé »

Bobine A+ nord
Bobine B+
Bobine A– sud
Bobine B–

Premier pas

Bobine A+
Bobine B+ nord
Bobine A–
Bobine B– sud

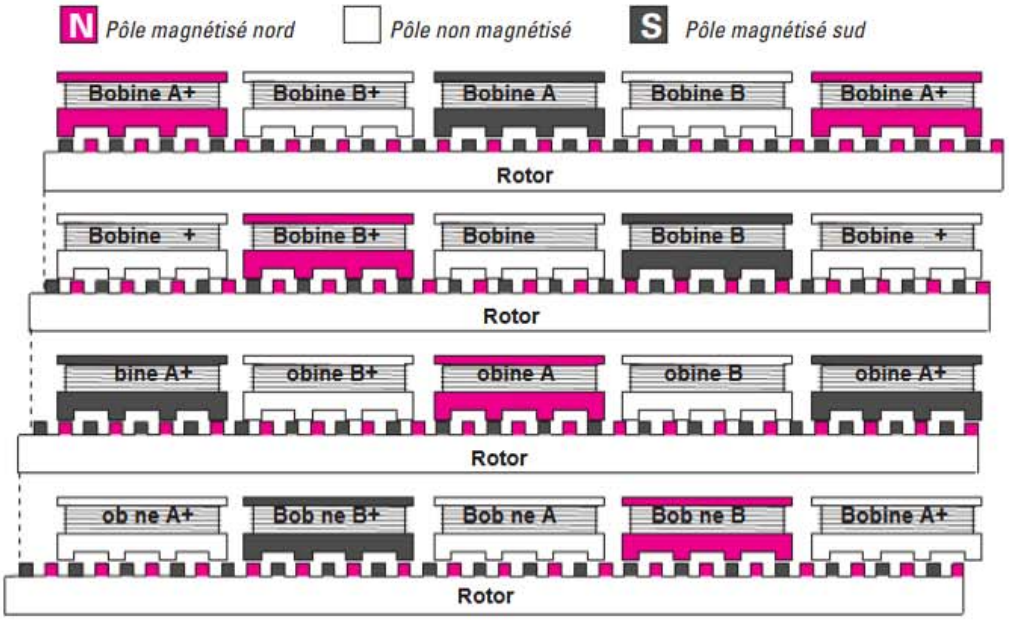
Deuxième pas

Bobine A+ sud
Bobine B+
Bobine A– nord
Bobine B–

Troisième pas

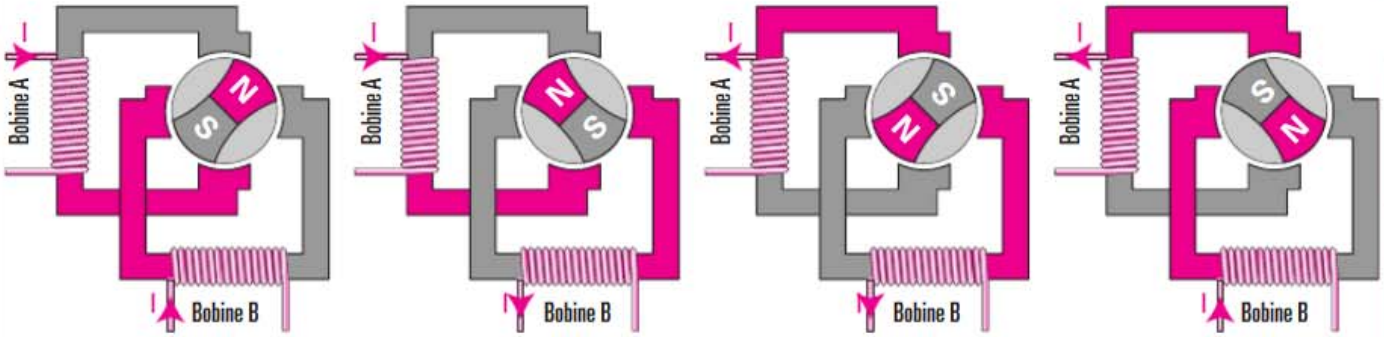
Bobine A+
Bobine B+ sud
Bobine A–
Bobine B– nord

Quatrième pas...

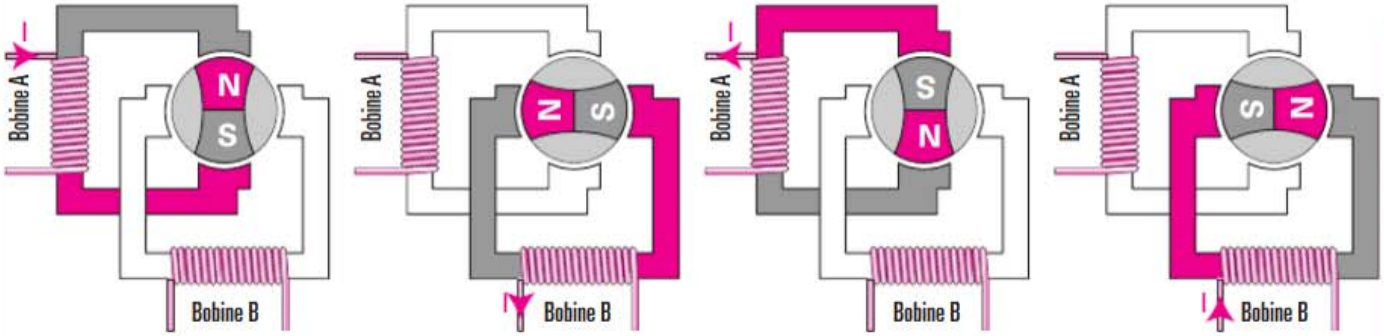


7.4.3. MODES D'EXCITATION ET DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR PAS À PAS

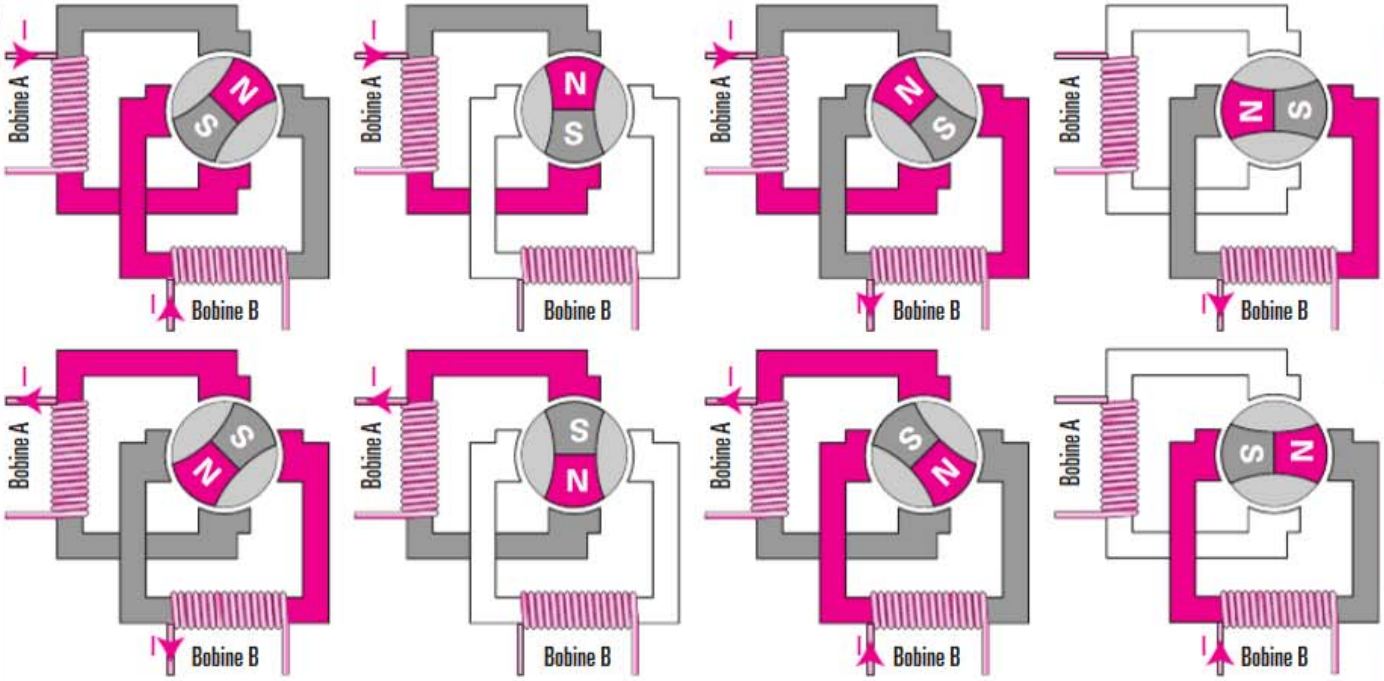
Excitation normale mode pas entier (voir graphe 1)



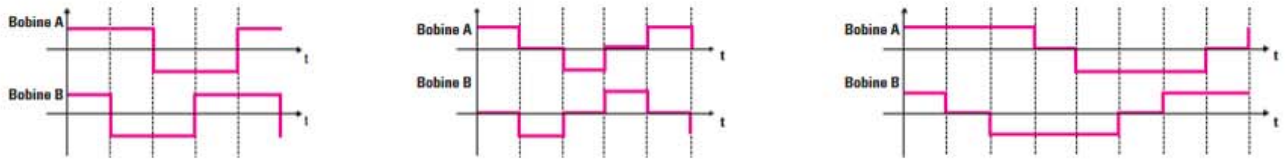
Excitation pleine onde mode pas entier (voir graphe 2)



Fonctionnement mode demi-pas (voir graphe 3)



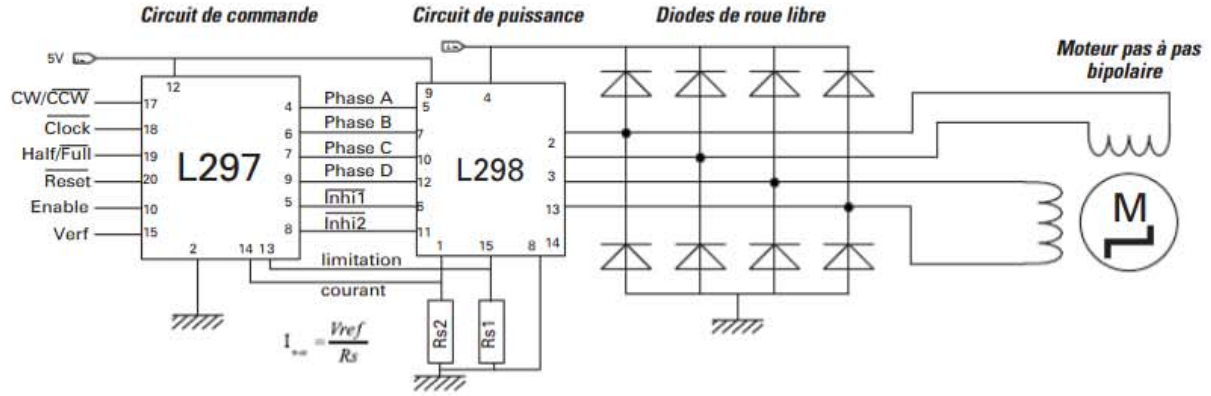
Graphes correspondant aux différents modes ci-dessus



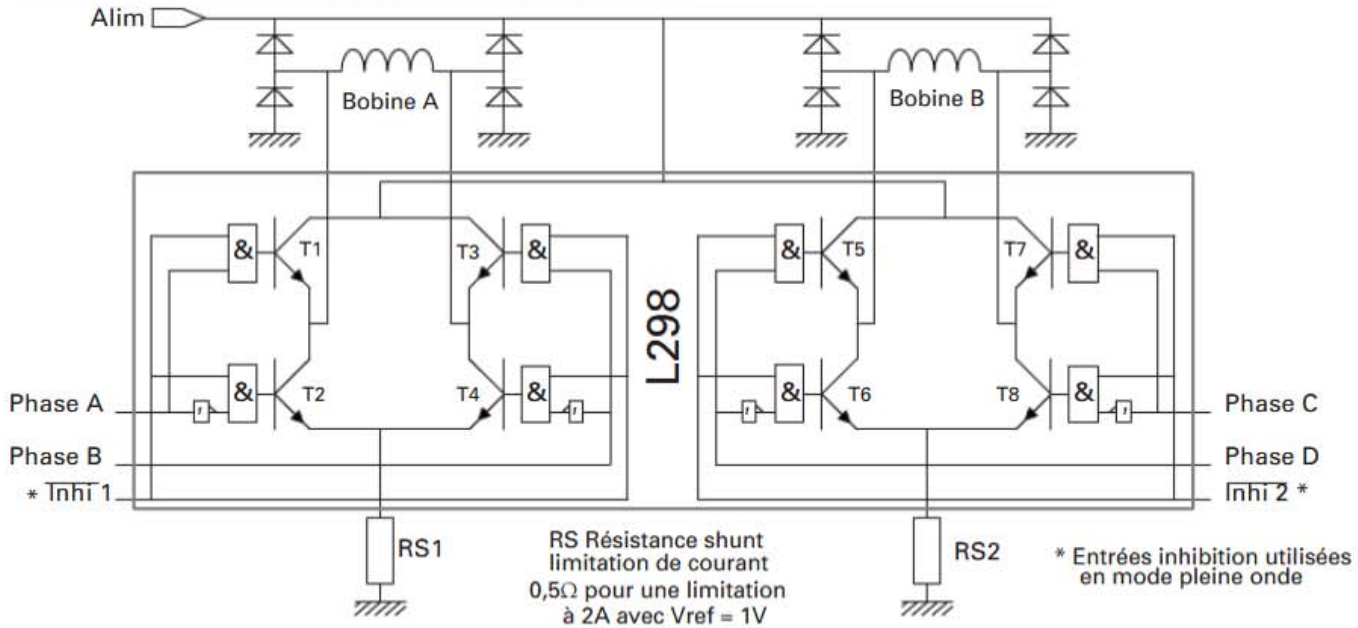
Graphe 1 Graphe 2 Graphe 3

7.4.4. COMMANDE D'UN MOTEUR PAS À PAS PAR UN CIRCUIT SPÉCIALISÉ

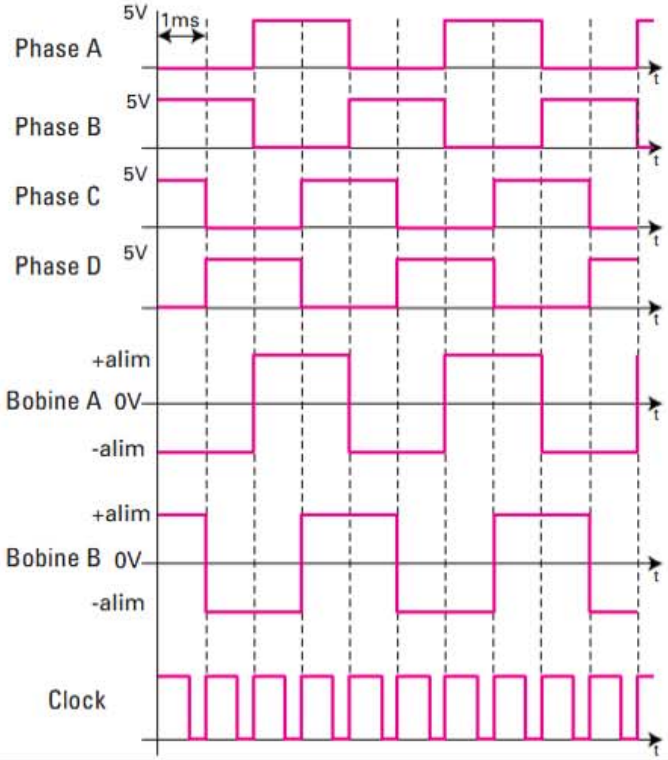
• Exemple circuit spécialisé L297, L298



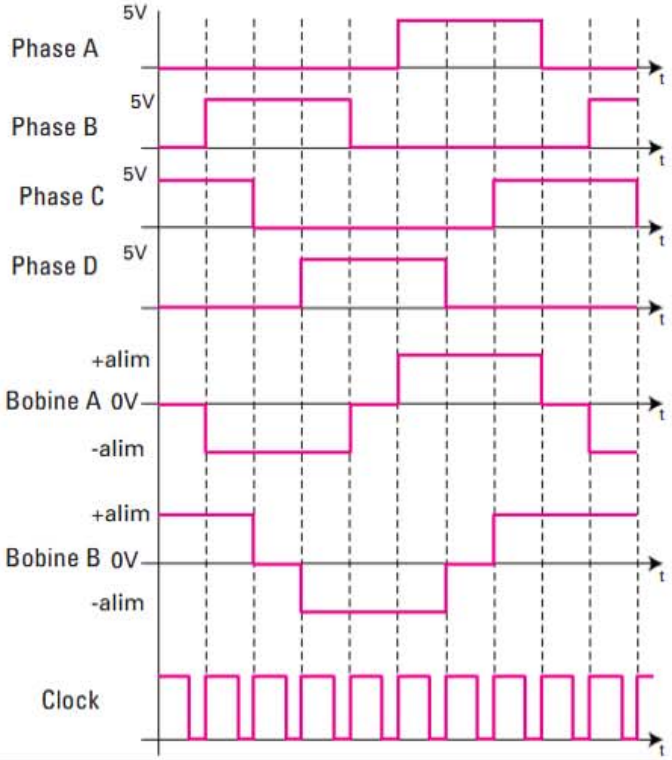
• Structure interne du double pont en H L298



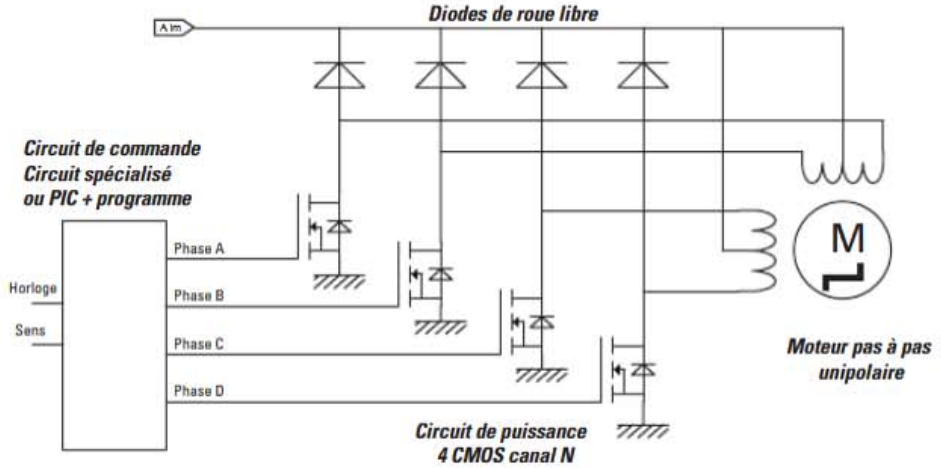
• Excitation normale mode pas entier



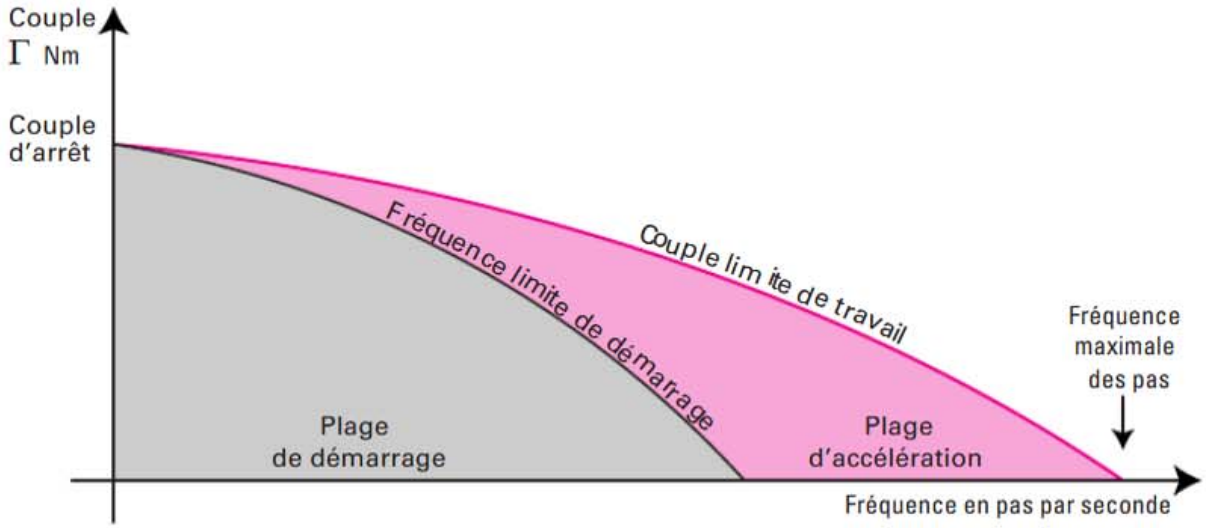
• Mode demi-pas



• Commande d'un moteur pas à pas unipolaire



7.4.5. CARACTÉRISTIQUE COUPLE-FRÉQUENCE



Couple d'arrêt ou couple de maintien : le couple maximum de rotation avec lequel on peut solliciter l'arbre d'un moteur pas à pas excité statiquement sans qu'il ne se produise de modification de son angle de rotation.

Plage de démarrage : plage dans laquelle un moteur pas à pas peut être actionné en synchronisation avec la fréquence de travail sans rampe d'accélération ou de décélération.

Fréquence limite de démarrage : fréquence maximale avec laquelle un moteur pas à pas ne peut démarrer à la charge indiquée, sans perdre de pas.

Plage d'accélération : plage de travail dans laquelle un moteur pas à pas peut être actionné en synchronisation avec la fréquence de travail, sans qu'il ne se produise d'erreur de pas. Il faut cependant qu'il soit actionné avec une rampe d'accélération et de décélération.

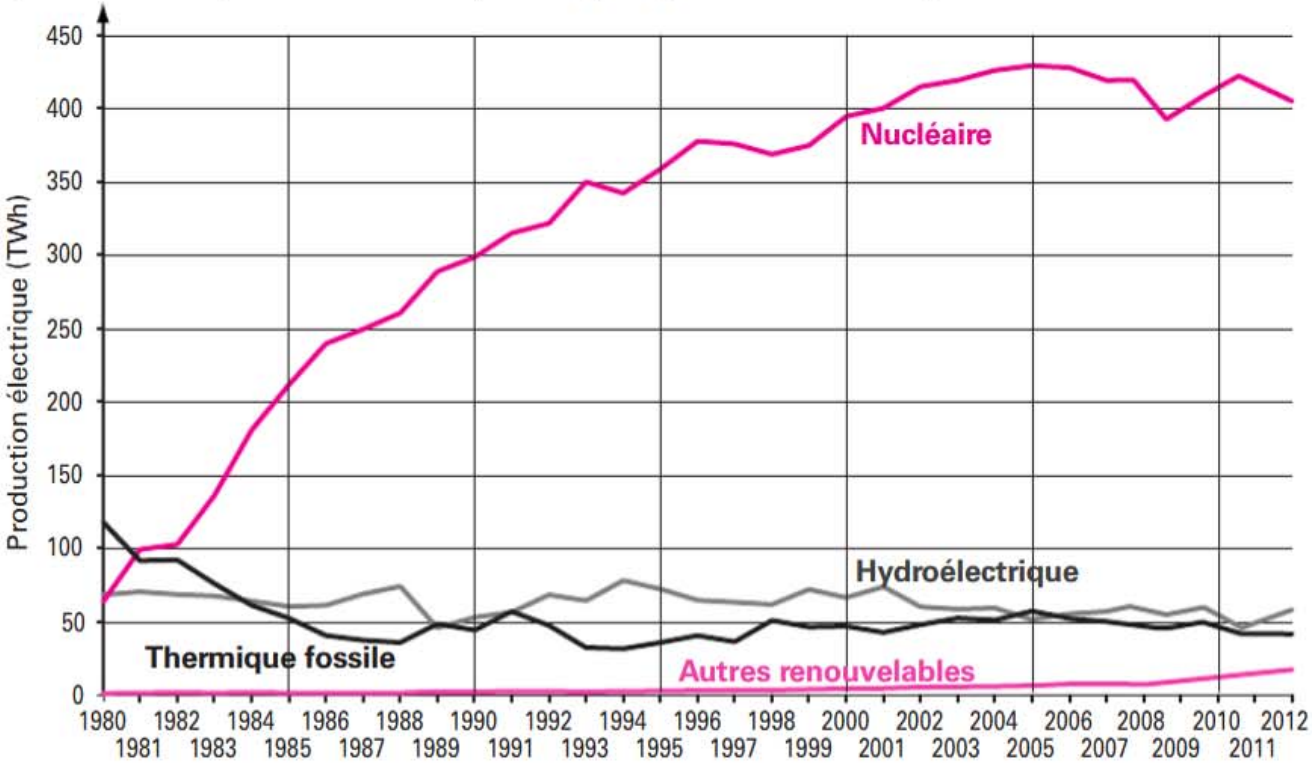
Couple limite de travail : le couple de rotation maximale avec lequel on peut solliciter un arbre de rotation avant qu'il ne sorte de la cadence.

Fréquence maximale des pas : la fréquence maximale admise avec laquelle un moteur pas à pas est actionné à vide sans perte de pas. Cependant, le moteur ne peut être démarré ou stoppé avec cette fréquence sans perte de pas.

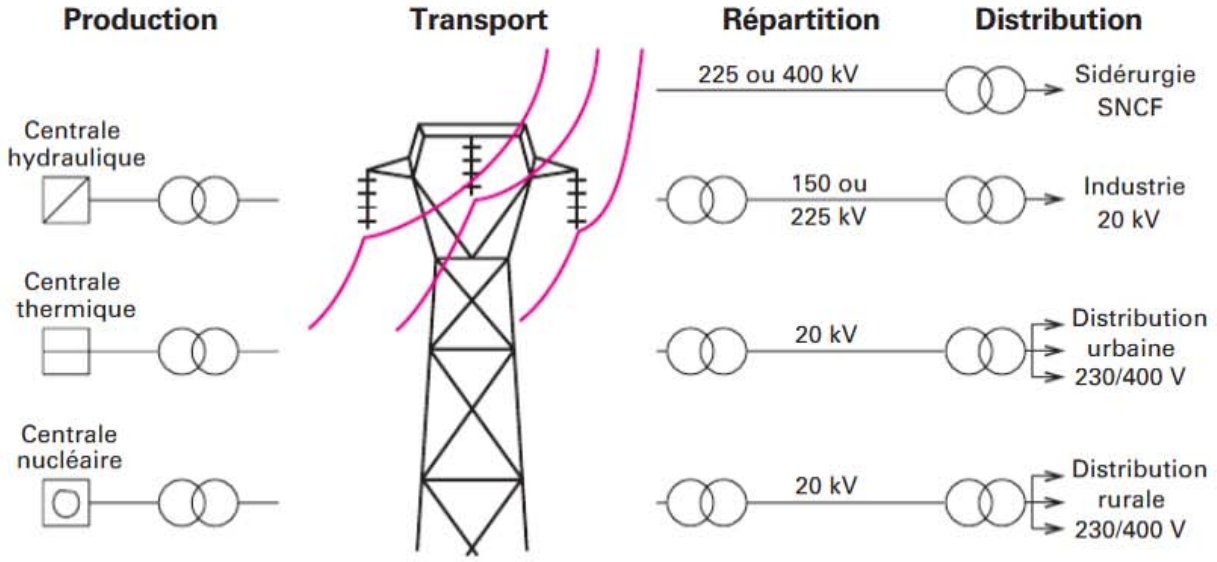
7.5. PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

• Evolution de la production d'électricité en France

Répartition de la production électrique française par sources d'énergie



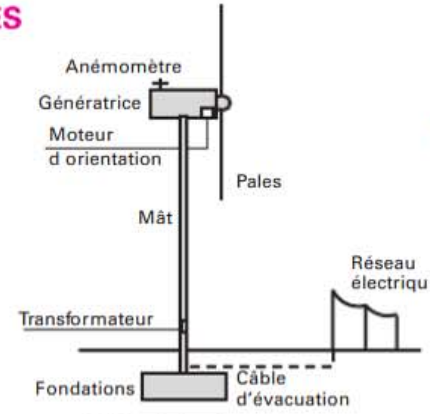
• Structure du réseau National



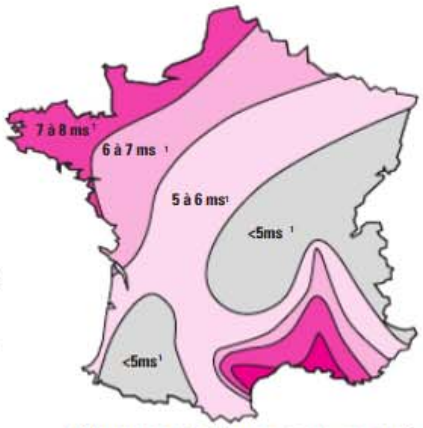
• Classification des installations électriques

Formes de courant	HTB *Haute Tension B*	HTA *Haute Tension A*	BT *Basse Tension*	TBT *Très Basse Tension*
Continu	U > 75 000 V	1500 < U ≤ 75 000 V	120 < U ≤ 1500 V	U ≤ 120 V
Alternatif	U > 50 000 V	1000 < U ≤ 50 000 V	50 < U ≤ 1000 V	U ≤ 50 V

7.5.1. PRODUCTION PAR ÉOLIENNES



Principe de fonctionnement d'une éolienne au réseau



Gisement éolien moyen en ms⁻¹

Un éolien (ou des éoliennes) est une machine utilisant la force motrice du vent. Cette force peut être utilisée pour produire de l'électricité (dans le cas d'un aérogénérateur). On parle de parc éolien ou de ferme éolienne pour décrire les unités de productions groupées (installées à terre ou en mer).

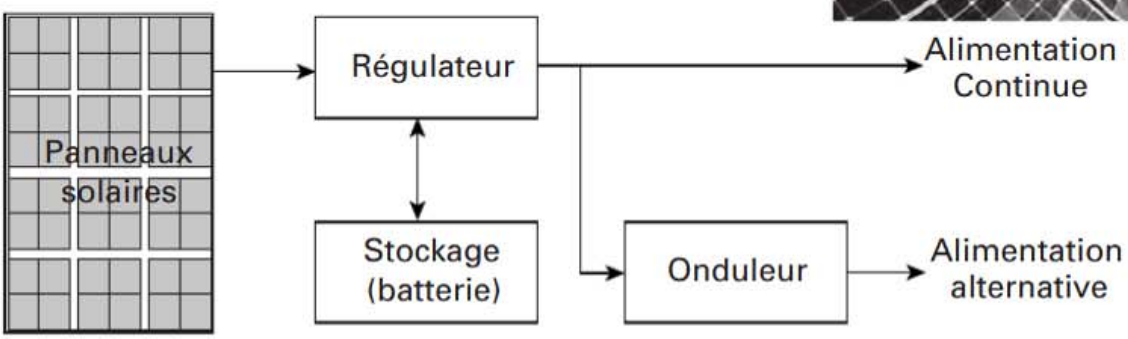
En France, les centrales éoliennes de production d'électricité sont en pleine expansion sur une grande partie du territoire. L'Aude et la Bretagne sont des zones géographiques pionnières en la matière.

7.5.2. PRODUCTION PAR PANNEAUX SOLAIRES (PHOTOVOLTAÏQUE)

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène.
Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.
Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si).
Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.
Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

Gisement solaire kWh par jour en juillet

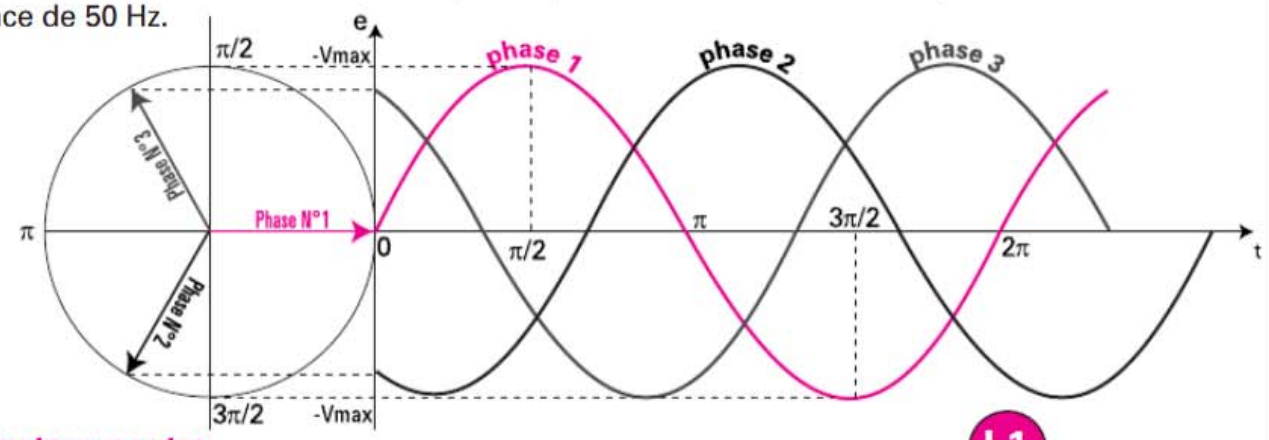
- Cellule en silicium monocristallin : rendement, de 15% à 18%
- Cellule en silicium multicristallin : rendement, de 14% à 16%
- Cellule en silicium amorphe : rendement, de 5% à 8%
- Force électromotrice d'une cellule : environ 0,6 V



7.6. LE MOTEUR TRIPHASÉ

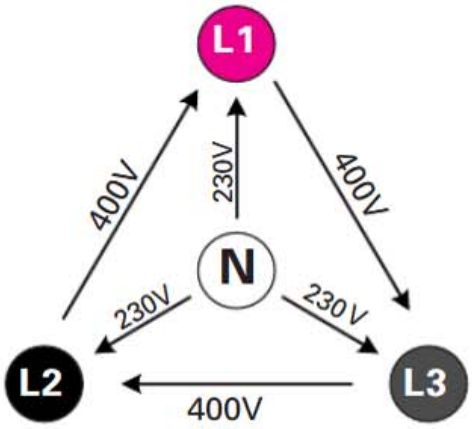
7.6.1. LE RÉSEAU TRIPHASÉ

Le réseau étudié est constitué de trois phases, d'un neutre et d'une terre, le tout cadencé à une fréquence de 50 Hz.



• Conducteur neutre

Dans tout système triphasé, équilibré de distribution, existe un neutre électrique situé au centre de gravité du triangle équilatéral représentatif des trois phases. La tension entre une des phases et le neutre est appelée tension simple (230 V) alors que la tension entre deux phases est appelée tension composée (400 V).



• Conducteurs « phases »

Les phases sont les conducteurs chargés de véhiculer l'énergie vers le récepteur. Dans un récepteur équilibré, le courant circulant dans le neutre est nul, il n'existe que dans les phases. La tension de chaque phase est décalée de 120° l'une par rapport à l'autre.

Phase 1: $V1 = V_{max} \sin \omega t$
Phase 2: $V2 = V_{max} \sin (\omega t - 2\pi/3)$
Phase 3: $V3 = V_{max} \sin (\omega t - 4\pi/3)$

• Conducteur de terre

La terre est le fil conducteur assurant une liaison électrique entre le sol et certaines parties de l'installation (carcasse métallique) de façon à fermer le circuit entre la phase qui touche une des parties de l'installation et la terre. Ceci évite que ce soit un individu, qui, touchant une partie métallique de l'installation ne ferme le circuit, car le neutre est relié au départ du transformateur de distribution à la terre.

• Réseau distribution

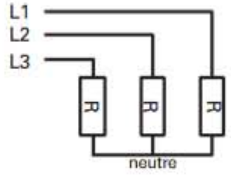
Pour le réseau français 230/400, on note :
V pour les tensions simples (monophasé) 230 V
U pour les tensions composées (triphasé) 400 V

$$U_{triphasé} = V_{simple} \cdot \sqrt{3}$$

Un système triphasé équilibré est équivalent à la juxtaposition de trois systèmes monophasés identiques.

• Puissance en triphasé

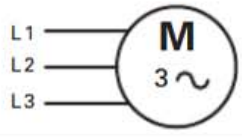
Puissance sur des éléments purement résistifs :



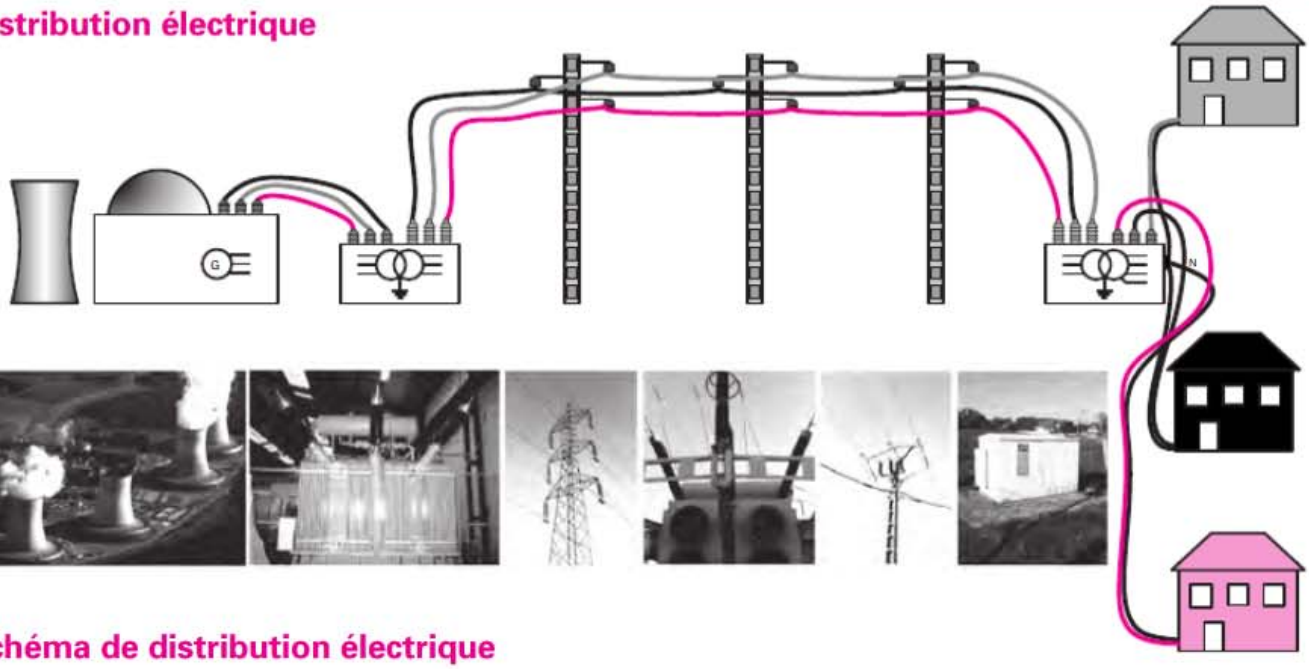
$$P = U.I.\sqrt{3} \qquad P = V.I.3$$

Puissance sur des éléments introduisant un déphasage φ :

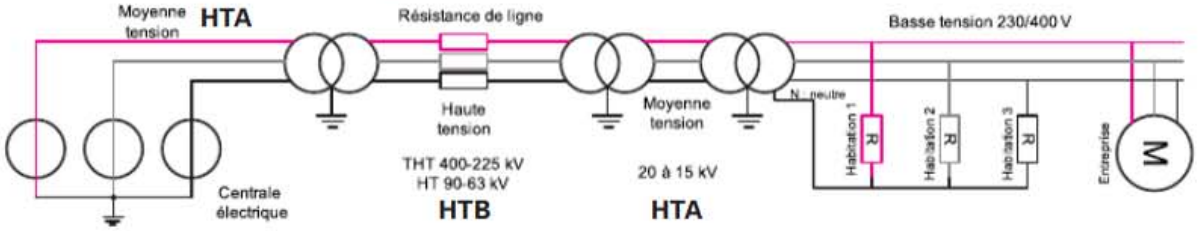
$$P = U.I.\sqrt{3}.\cos\varphi$$



• Distribution électrique



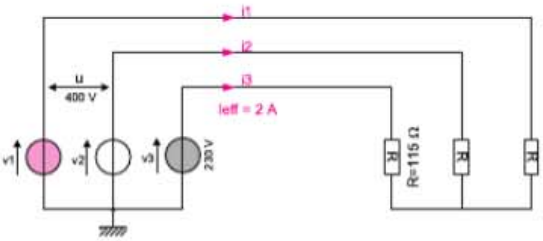
• Schéma de distribution électrique

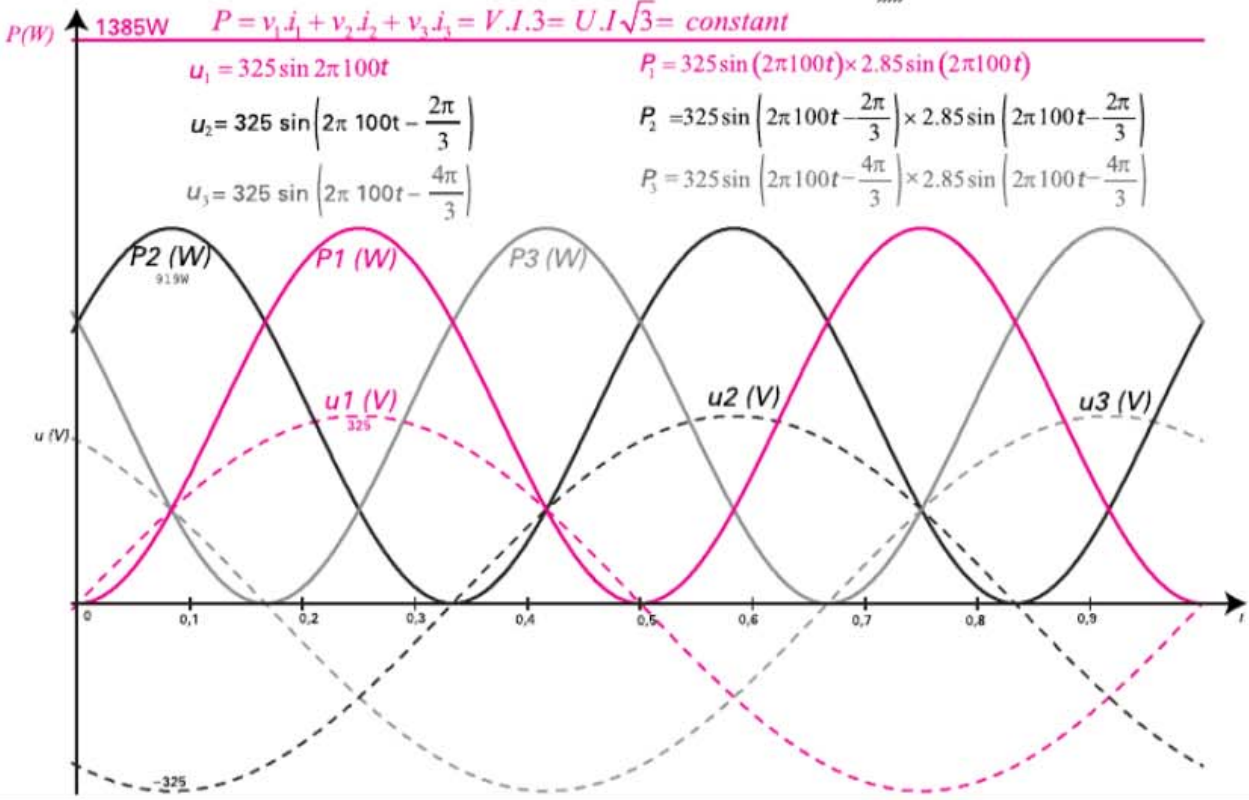


• Puissance en triphasé

La puissance d'un réseau triphasé équilibré est constante

Exemple : puissance sur des éléments résistifs.
Veff = 230 V, Ueff = 400 V, Ieff = 2 A





7.6.2. AVANTAGES DU COURANT TRIPHASÉ

La puissance instantanée fournie par un système triphasé équilibré est constante.

Ceci est très important dans les machines tournantes car on évite ainsi les fluctuations de puissance (et donc du moment du couple) qui sont à l'origine de vibrations mécaniques qui peuvent être préjudiciables aux systèmes (générateurs et récepteurs).

Les systèmes triphasés équilibrés permettent de créer des champs tournants qui sont essentiels dans le fonctionnement de bien des actionneurs électriques (moteur asynchrone et synchrone).

À masse égale (donc à coût égal), une machine triphasée permet de convertir plus d'énergie qu'une machine monophasée (de 50 % à 100 % de plus) car l'utilisation de l'espace pour le bobinage n'est pas optimale en monophasé.

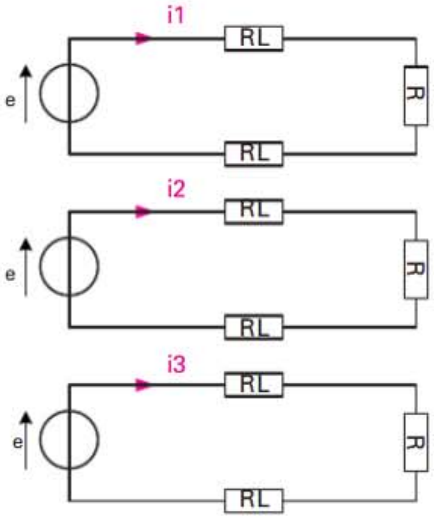
À puissance égale, les machines triphasées sont donc moins coûteuses que leurs homologues monophasées.

À puissance transmise identique, tension d'alimentation du récepteur et densité de courant par conducteur égales, les pertes par effet Joule dans une ligne triphasée équilibrée sont 2 fois moins importantes qu'une ligne monophasée. De plus, la ligne triphasée demande une quantité de matière 2 fois moins importante.

• Pertes en ligne

En monophasé, les pertes en lignes sont

$$PLmono = 2\left(\frac{RL}{3}\right)(3.I) = 6.RL.I^2$$



Volume de conducteur Vmono en monophasé

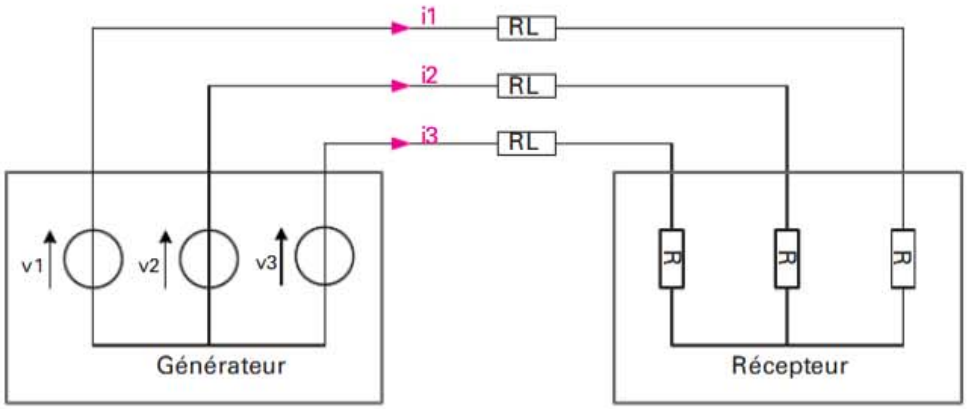
$$Vmono = 2.L.(3S) = 6.L.S$$

En triphasé, les pertes en lignes sont

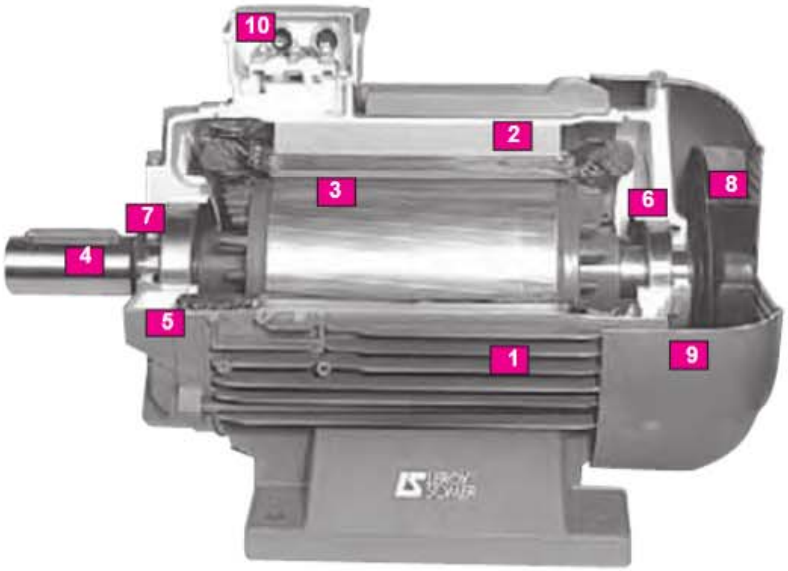
$$PLtri = 3.RL.I^2$$

Volume de conducteur Vtri en triphasé

$$Vtri = 3.L.S$$



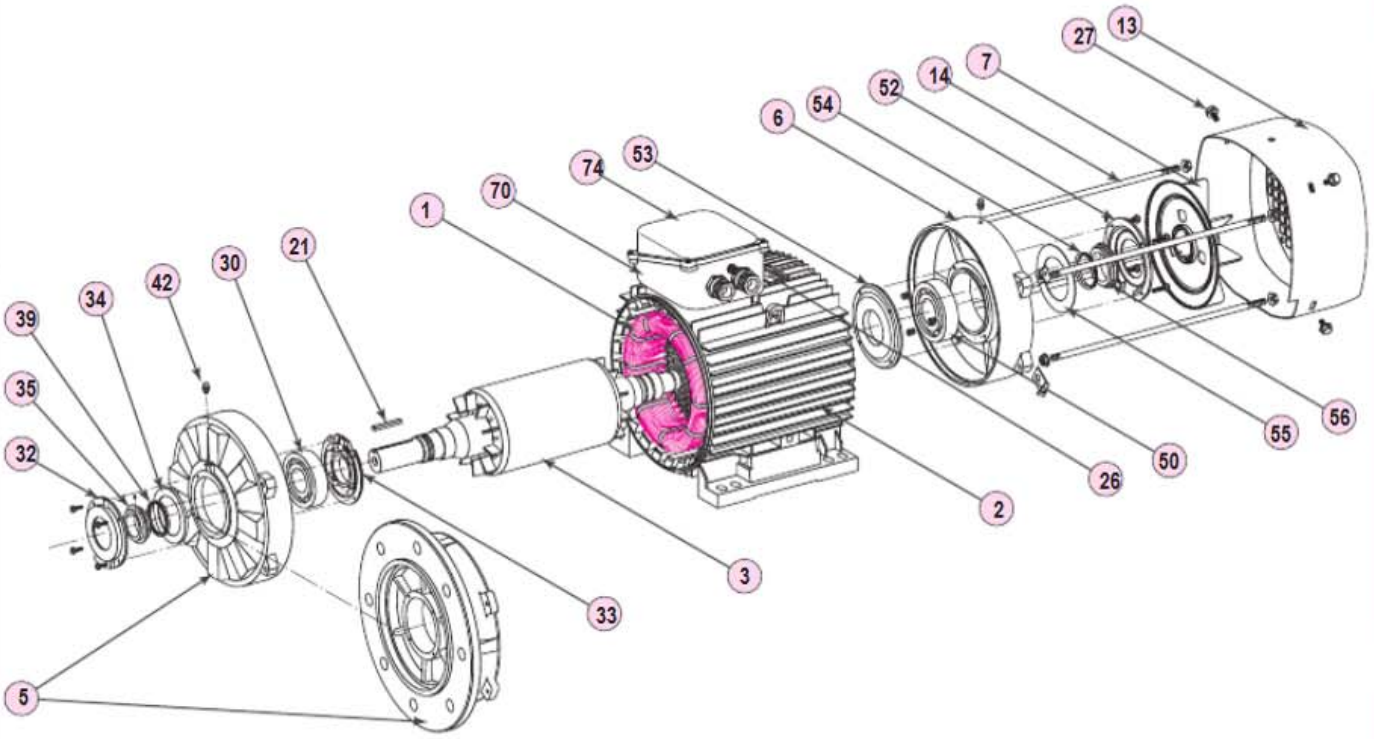
7.6.3. DESCRIPTION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE



1 : carcasse à ailettes
2 : stator bobiné
3 : rotor
4 : arbre
5 : flasques paliers
6 : roulements
7 : chicane et joints d'étanchéité
8 : ventilateur extérieur
9 : capot de ventilation
10 : boîte à bornes

LEROY SOMER

Identification, vues éclatées et nomenclature

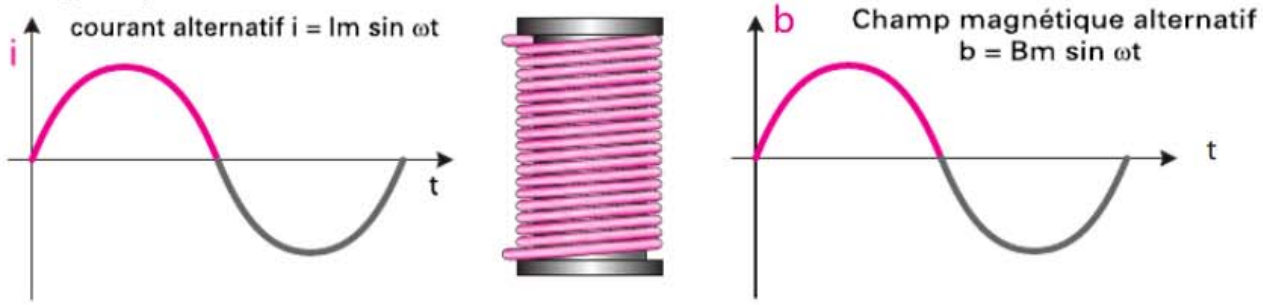


Rep.	Désignation	Rep.	Désignation	Rep.	Désignation
1	Stator bobiné	27	Vis de fixation du capot	52	Chapeau extérieur arrière
2	Carter	30	Roulement côté accouplement	53	Chapeau intérieur arrière
3	Rotor	32	Chapeau extérieur côté accouplement	54	Joint arrière
5	Flasque côté accouplement	33	Chapeau intérieur côté accouplement	55	Soupape à graisse fixe arrière
6	Flasque arrière	34	Soupape à graisse fixe côté accouplement	56	Soupape à graisse mobile arrière
7	Ventilateur	35	Soupape à graisse mobile côté accouplement	70	Corps de boîte à bornes
13	Capot de ventilation	39	Joint côté accouplement	74	Couvercle de boîte à bornes
14	Tiges de montage	42	Graisseurs		
21	Clavette	50	Roulement arrière		

7.6.4. LE CHAMP TOURNANT

• Champ magnétique

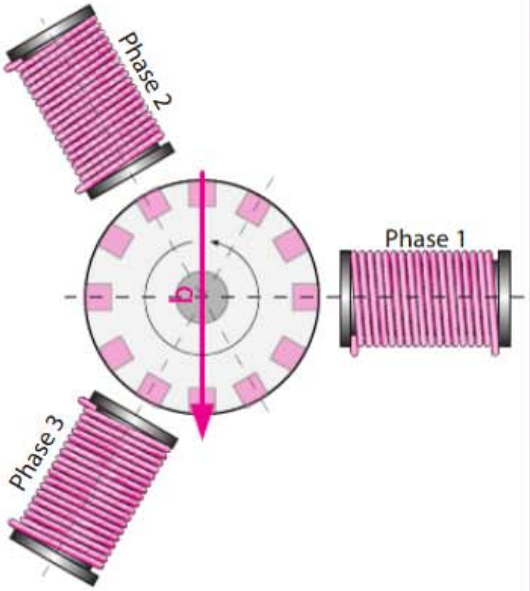
Champ magnétique dans une bobine alimentée en courant alternatif.



Une bobine parcourue par un courant alternatif crée un champ magnétique alternatif.
L'induction alternative d'amplitude b = Bm sin ωt

• Champ tournant

Un ensemble de trois bobines identiques, disposées aux trois sommets d'un triangle équilatéral, et parcourues par des courants triphasés, produisent au centre géométrique un champ tournant à une vitesse égale à la pulsation des courants.



Principe du moteur asynchrone triphasé

3 bobines forment une paire de pôles.
Une masse métallique (le rotor) est placée au centre des 3 bobines.

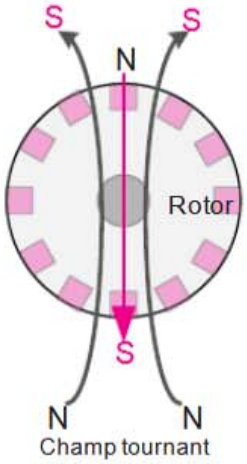
Le rotor subit l'influence du champ tournant.

Loi de Lenz : le sens du courant induit est tel que, par ses effets, il s'oppose à la cause qui lui donne naissance.

Le champ tournant induit dans le métal du rotor un courant électrique de très forte intensité.

Le courant électrique induit un champ magnétique opposé au champ tournant.

Le rotor devenu magnétique va suivre le champ tournant.
Le rotor va tourner sensiblement à la même vitesse que le champ tournant.



Si le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant, la vitesse relative entre le rotor et le champ tournant est NULLE.

L'induction ne peut donc pas exister !

Le rotor tourne **TOUJOURS moins vite** que le champ tournant.
De cette façon il est toujours balayé par le champ tournant et se transforme en une pièce magnétique.

Ce qui donne le nom de **moteur asynchrone.**
Cette différence de vitesse s'appelle le glissement.

• Équations

Vitesse de synchronisme (le champ tournant)

$$Ns = \frac{60 \cdot f}{P}$$

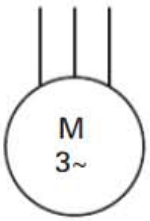
Glissement

$$g = \frac{Ns - N}{Ns}$$

N, Ns = vitesse en tr.min^{-1}
P = Nombre de paire de pôles
f = Fréquence d'alimentation en Hz

Le glissement est de l'ordre de 5 %

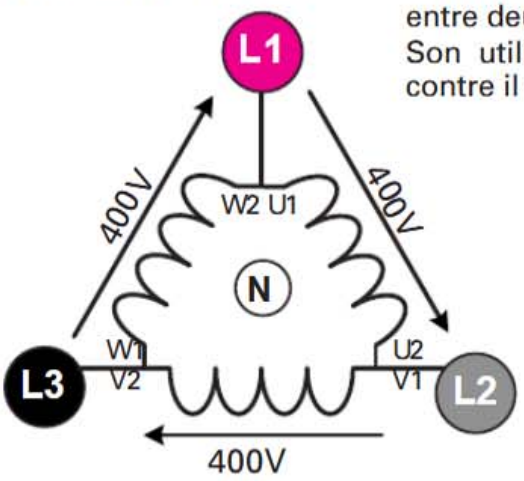
7.6.5. COUPLAGE D'UN MOTEUR TRIPHASÉ

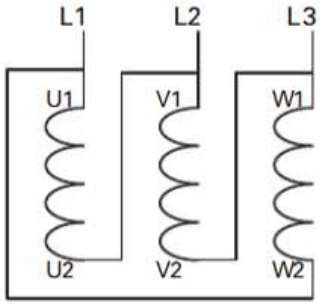


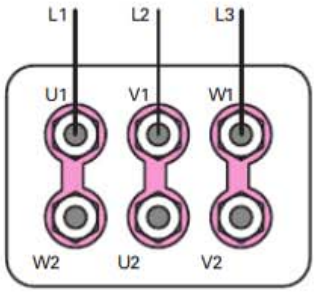
Moteur de 230 V/400 V indique : une tension maxi sur une bobine de 230 V.
On dispose de 2 types de couplages selon le réseau électrique.
Cette possibilité permet de concevoir des moteurs pouvant fonctionner partout dans le monde. Cela permet également de réaliser des démarrages en douceur grâce à un commutateur étoile triangle.

Couplages en triangle Δ

Pour un moteur 230 V/400 V couplé en triangle, il faut que la tension entre deux phases soit de 230 V maximum.
Son utilisation en France avec ce couplage est impossible. Par contre il est utilisable en Angleterre et USA (réseau 115 V/230 V)



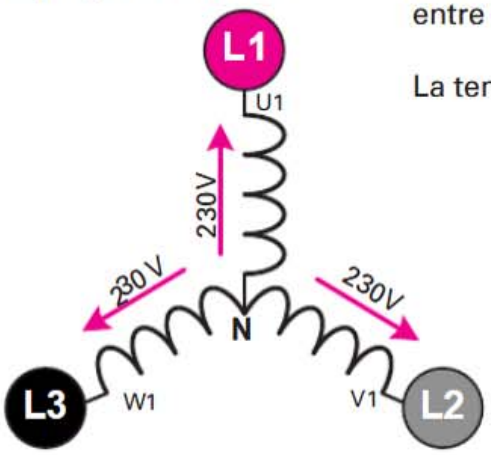


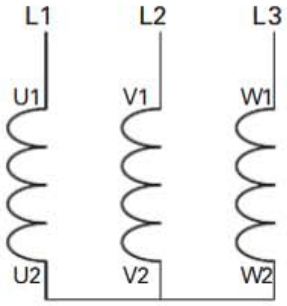


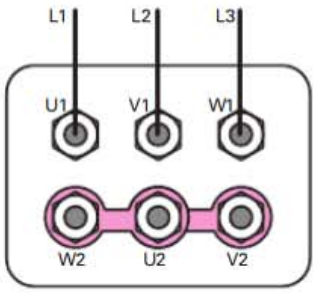
Couplages en étoile Y

Pour un moteur 230 V/400 V couplé en étoile, il faut que la tension entre deux phases soit de 400 V maximum.

La tension maxi sur une bobine reste à 230 V.





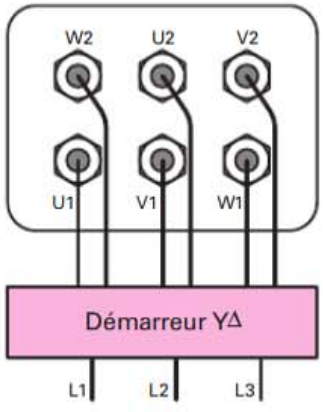


Couplages en étoile Y triangle Δ

Cette fonction est utilisée pour les démarrages des moteurs asynchrones triphasés. Dans un premier temps, les enroulements sont couplés en étoile pour le démarrage, (courant In et puissance 3 fois plus faible) et dans un deuxième temps, on effectue le couplage triangle pour obtenir la puissance nominale.

Il en résulte que le couple de démarrage en étoile est trois fois plus faible qu'en triangle.

Ceci n'est possible en France sur un réseau 230 V/400 V que sur des moteurs 400/700 V.



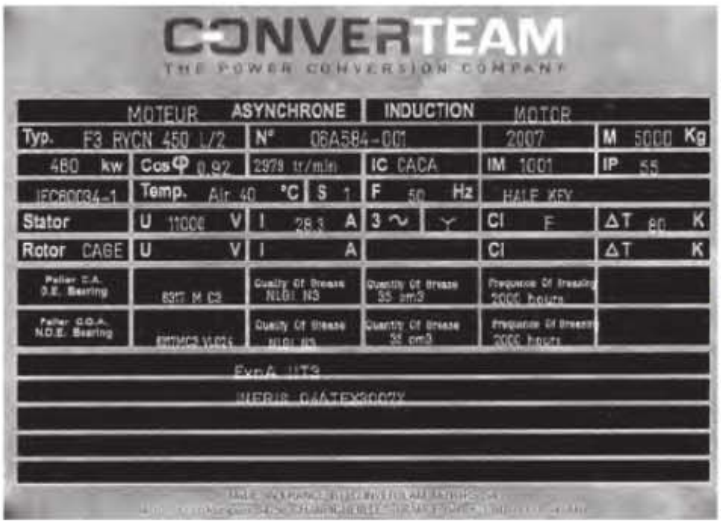
$$iY = \frac{U^2 \cos\varphi}{Z}$$

Courant en étoile

$$i\Delta = \frac{3U^2 \cos\varphi}{Z}$$

Courant en triangle

7.6.6. IDENTIFICATION D'UNE PLAQUE SIGNALÉTIQUE



MOTEUR ASYNCHRONE en anglais : INDUCTION MOTOR
Type : F3RYCN 450 L/2 référence constructeur.
N° 06A584-001 : N° de série.
2007 : année de fabrication.
M 5000 kg : poids.
480 kW puissance mécanique utile sur l'arbre du moteur.
cos φ 0,92 : facteur de puissance : permet le calcul de la puissance réactive consommée par le moteur.
2979 RPM : Vitesse en $tr.min^{-1}$. Indique la vitesse nominale du rotor. On connaît alors la vitesse de synchronisme **ns** du moteur ici 3000 $tr.min^{-1}$.
IC CACA : International Cooling : méthode et type de fluide pour le refroidissement.

IM 1001 : Classification des formes de construction et des dispositions de montage.
IP55 : Indice de protection, indique la résistance du moteur à la poussière et à l'eau.
IEC 60034-1 : Norme : caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement.
Temp. Air 40°C : température ambiante maximum sur le site d'exploitation.
S1: Régime de fonctionnement, S1 fonctionnement permanent.
50 Hz : Fréquence du réseau d'alimentation.
Pour le Stator :
11 000 V : Tension nominale d'alimentation.
28,3 A : Intensité en ligne (dans chaque phase).
3~ : Moteur triphasé.
Y : couplage en étoile (Δ pour un couplage en triangle).
Cl F : Classe d'Isolation (échauffement maximal admissible 105 K).
T 80K : Échauffement maximal admissible 80 K.
S'ajoutent des informations sur le graissage.

Documentation CONVERTEAM Champigneulles 54

• Formulaire

Désignation	Formules	Unités	Désignation	Formules	Unités
Puissance absorbée	$P_a = \frac{M \cdot \omega}{\eta}$	P en W M en Nm ω en rad/s η sans unité	Glissement	$g = \frac{N_S - N}{N_S}$	N : vitesse N_S : vitesse de synchronisme
Puissance fournie par le moteur (en triphasé)	$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta$	P en W	Vitesse de synchronisme	$N_S = \frac{60 \cdot f}{p}$	N_S en min^{-1} f en Hz p : paire de pôles
Puissance absorbée par le moteur (en triphasé)	$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$	P en W U en V I en A	Rendement du moteur	$\eta = \frac{P_u}{P_a}$	
Puissance réactive absorbée par le moteur	$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$	φ : déphasage courant-tension	Moment du couple	$M = F \cdot r$	M en Nm F en N r en m
Puissance réactive fournie par une batterie de condensateurs	$Q = \sqrt{3} \cdot U^2 \cdot C \cdot \omega$	C capacité en F ω pulsation du réseau	Puissance en rotation	$P_u = M \cdot \omega$	P en W M en Nm ω en rad/s
Moment d'accélération (couple)	$M_a = \frac{M_D + 2M_A + 2M_M + M_N}{6} - M_r$ Formule générale : $M_a = \frac{1}{N}\int_0^n (M_{mot} - M_r)\,dN$	M en Nm	Temps d'accélération	$t = J \cdot \frac{\omega}{M_A}$	t en s J en $kg.m^2$ ω en rad/s M_A en Nm
			Moment d'inertie Masse ponctuelle	$J = m \cdot r^2$	J en $kg.m^2$ m en kg r en m

7.6.7. FABRICATION D'UN MOTEUR DE FORTE PUISSANCE : ConverTeam Nancy Champigneulles.

Fabrication des bobinages.
Fil section rectangulaire isolé.

Totalement isolé, le bobinage est mis en forme, une forme dépendant de la taille du moteur et du nombre de pôles.

Des flans prédécoupés dans lesquels seront usinés le rotor et stator.

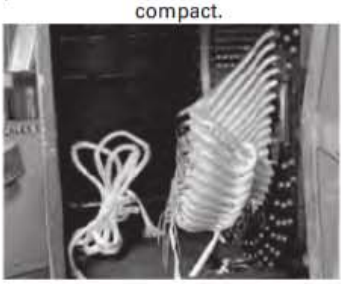
Après découpe par poinçonnage, les tôles du stator ou rotor sont empilées.

Les stators de grande taille sont formés de plusieurs segments.

Ils sont empilés sur un gabarit puis pressés afin de former un ensemble compact.

Assemblage définitif du stator dans sa cage de maintien.

Peinture du stator avant l'insertion des bobinages.


Insertion des bobinages dans les encoches du stator.

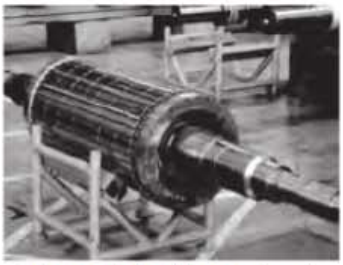
Bobinage terminé. Ajout des sondes de température, connexion des trois phases.

Imprégnation du bobinage et vernis anti-effluve.

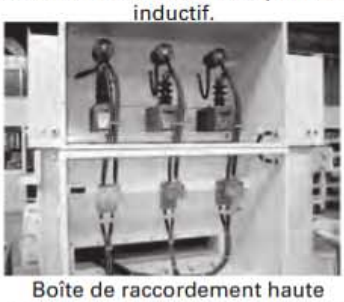
Assemblage des tôles constituant le rotor.

Insertion en force de l'axe.
Ajout des barres conductrices.

Mise en court-circuit des barres conductrices avec un anneau par brasage inductif.


Usinage et équilibrage du rotor et de son axe.

Ajout du carter refroidissement.
Palier à roulement film d'huile.

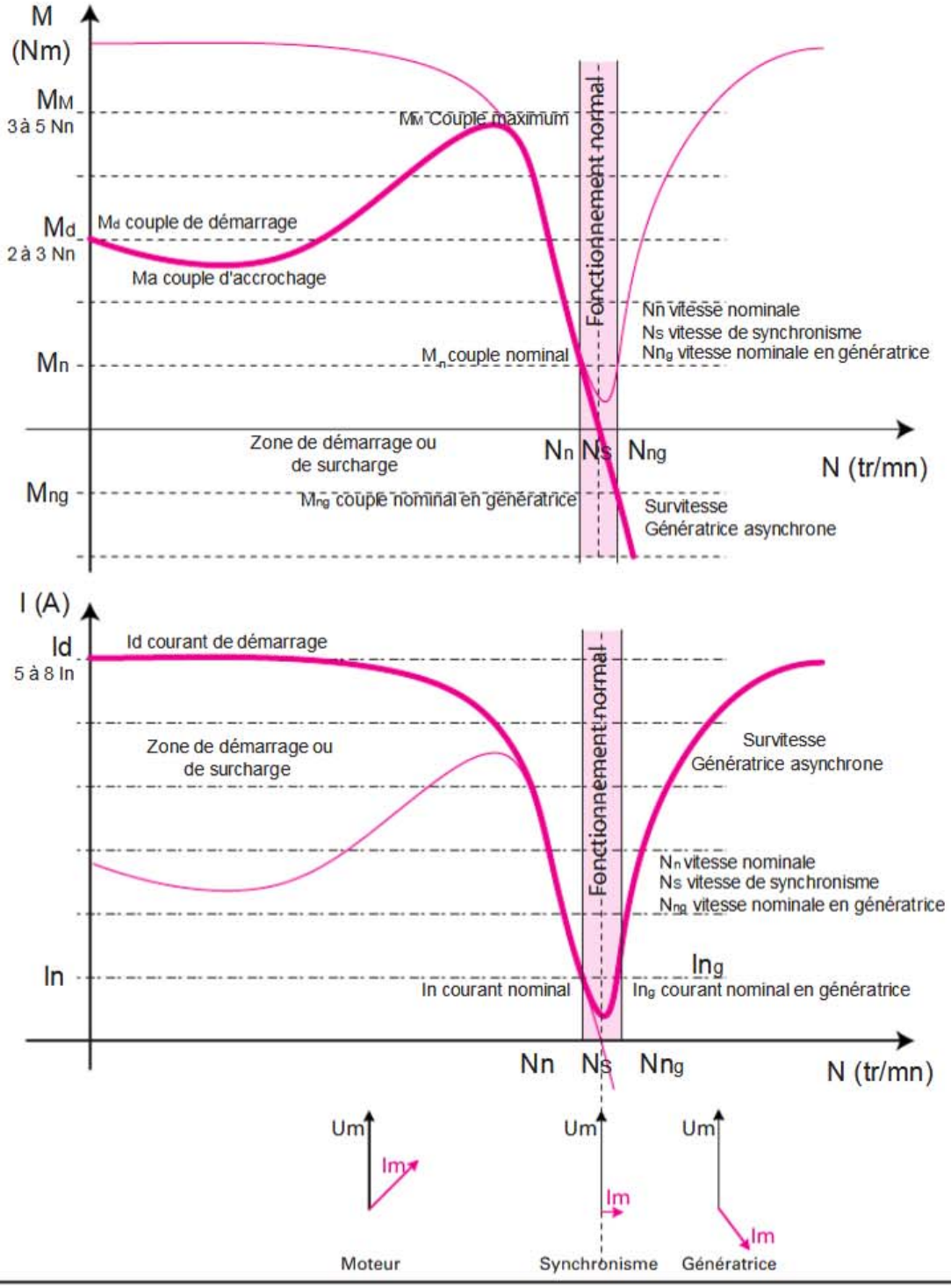

Boîte de raccordement haute tension avec ses condensateurs.

Moteur terminé. Test au banc d'essais jusqu'à 72 heures.

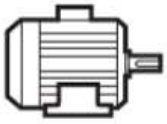
7.6.8. CARACTÉRISTIQUES COUPLE, INTENSITÉ

Démarrage direct d'un moteur asynchrone rotor à cage.
D'après les courbes ci-dessous, on constate que :
• le couple au démarrage est plus fort que le couple nominal (2 à 3 fois) ;
• l'intensité absorbée par le moteur au démarrage est importante par rapport à l'intensité nominale de fonctionnement (5 à 8 fois).
À l'arrêt, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire (ici le rotor) est en court-circuit, d'où la pointe d'intensité importante au démarrage dans les bobinages du stator.
Pour diminuer cette pointe d'intensité au démarrage, on peut utiliser le démarrage dit « étoile-triangle », à condition que les bobinages du stator soient prévus (chaque enroulement pouvant fonctionner sous la tension nominale du réseau).
On peut également insérer des résistances de démarrage en série avec chaque enroulement pour limiter l'intensité au démarrage ou utiliser un démarreur électronique.

• Courbe de moment et d'intensité en fonction de la vitesse



7.6.9. MODÉLISATION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE



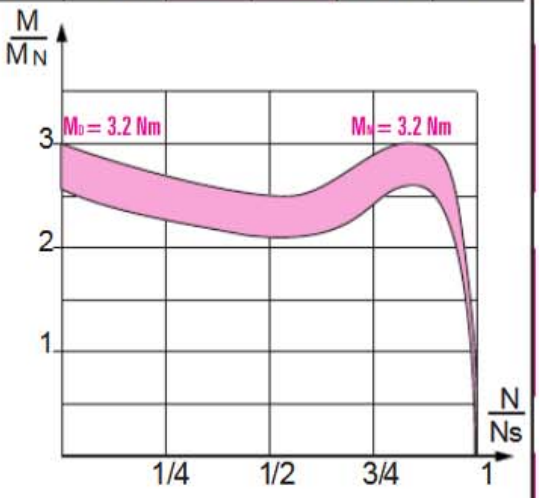
Le modèle qui va être simulé est le modèle LS63 230/400 50Hz 4 pôles

• Caractéristiques constructeur LS63M

Puissance nominale à 50 Hz	Vitesse nominale	Couple nominal	Intensité nominale	Facteur de puissance			Rendement			Courant démarrage / Courant nominal	Couple démarrage / Couple nominal	Couple maximal / Couple nominal	Puissance apparente nominale	Moment d'inertie	Masse
P_N kW	N_N min^{-1}	C_N N.m	$I_{N(\ 400V)}$ A	50 %	Cos φ 75 %	100 %	50 %	η 75 %	100 %	I_D / I_N	M_D / M_N	M_M / M_N	kVA_N	J kg.m²	IM B3 kg
0,18	1390	1,2	0,64	0,44	0,55	0,65	51	58	62	3,7	2,7	2,7	0,4	0,00048	5

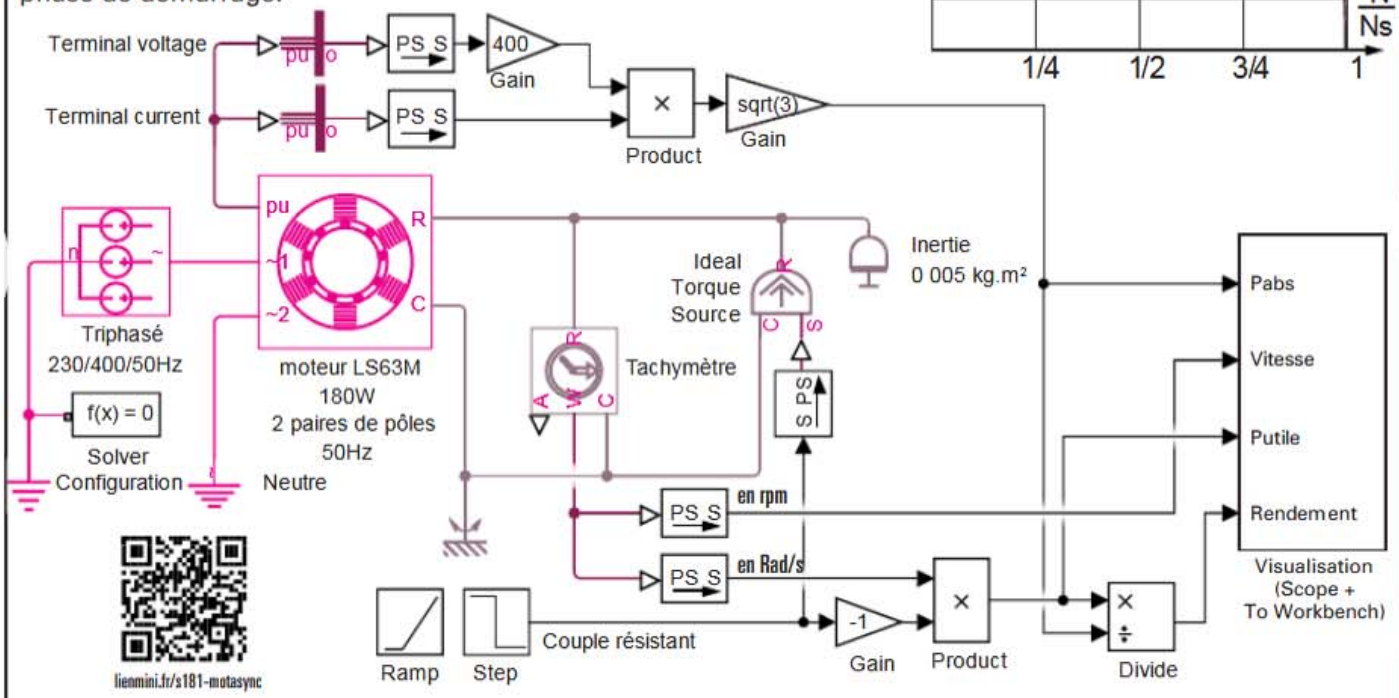
À partir des données du constructeur, on renseigne les paramètres du moteur.

Puissance apparente : 0,4 kVA = 400 VA
Tension d'alimentation : 400 V (triphasé)
Fréquence électrique 50 Hz
Nombre de paires de pôles = 2 (4 pôles).



On en déduit le couple de démarrage et le couple maximum :
$2,7 \times M_N \approx 3,2\ Nm$

L'inertie est volontairement 10 fois plus grande pour observer la phase de démarrage.



lienmini.fr/s181-motasync

• Description du modèle :

Le moteur est alimenté directement sur le réseau triphasé 400 V 50 Hz.
A la sortie du moteur est branché un tachymètre qui fournit la vitesse de l'arbre moteur. Les convertisseurs «PS S» transforment l'information de Simscape en Simulink soit en tours par minutes (rpm), soit en radian.s^{-1} (rad/s) pour le calcul de la puissance mécanique «Putile».
Un bloc «*Ideal Torque Source*» piloté par un bloc «*Step*» ou «*Ramp*» va opposer un couple résistant au moteur.
La puissance utile est calculée à partir du couple résistant et de la vitesse angulaire de l'arbre moteur :

$$Putile = M_R \times \omega$$

La puissance absorbée est calculée à partir de l'intensité du courant et de la tension de 400 V.

$$Pabs = \mathrm{Im} \times Um \times \sqrt{3}$$

Le rendement est calculé en faisant le rapport : $\eta = \dfrac{Putile}{Pabs}$

Le sous-circuit de visualisation regroupe un «*scope*» et des blocs «*to Workspace*» pour visualiser et tracer les caractéristiques.

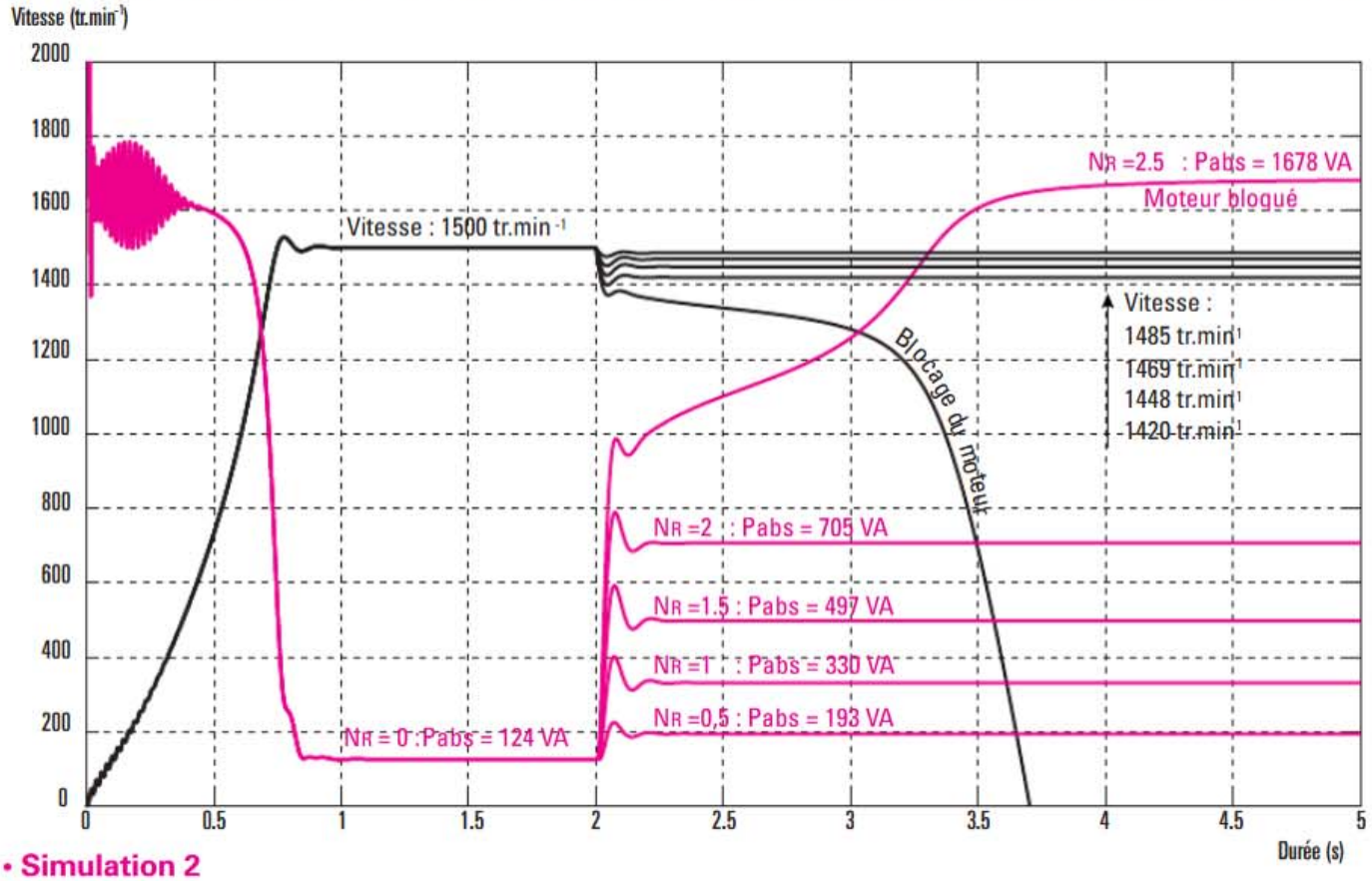
Modélisation et simulation d'un moteur triphasé

• Simulation 1

Cette simulation permet de voir le démarrage du moteur et son comportement avec différents couples résistants.

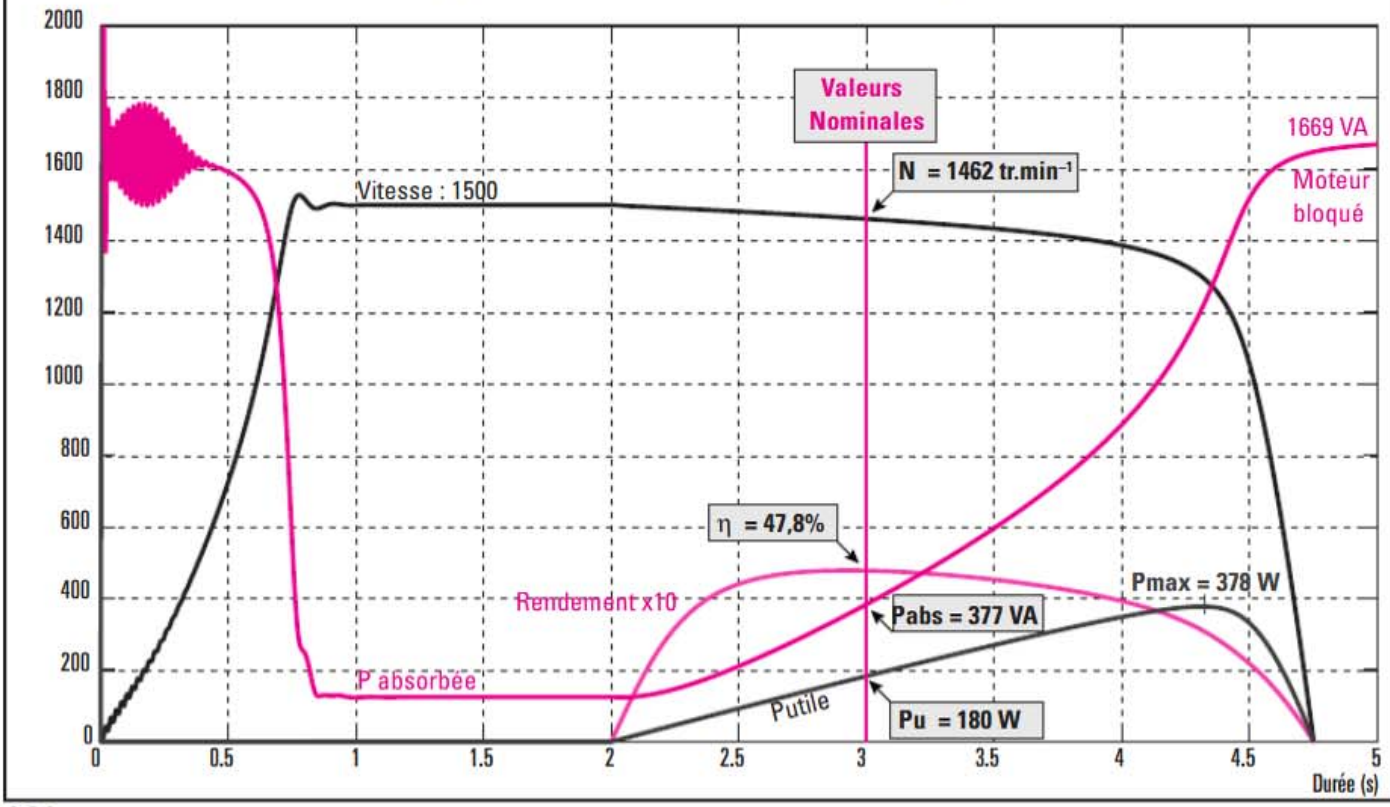
Le moteur démarre à vide, le couple résistant N_R est imposé au bout de 2 secondes.

L'opération est répétée avec des valeurs de couples augmentant de 0,5 Nm en 0,5 Nm jusqu'à 2,5 Nm.



• Simulation 2

Cette simulation va permettre de visualiser l'évolution du rendement en fonction du couple résistant. Le moteur démarre à vide, au bout de 2 secondes le couple résistant augmente linéairement de 0 à 3 Nm avec 1,2 Nm par seconde (on utilise le bloc «Ramp»).



•Caractérisationdesécarts.

Systèmesouhaité: valeurs issues du document constructeur.

Puissance nominale à 50 Hz	Vitesse nominale	Couple nominal	Intensité nominale	Facteur de puissance			Rendement			Courant démarrage / Courant nominal	Couple démarrage / Couple nominal	Couple maximal / Couple nominal	Puissance apparente nominale	Moment d'inertie	Masse
P_N kW	N_N min^{-1}	C_N Nm	$I_{N(\ 50V)}$ A	Cos ϕ 50 %	75 %	100 %	η 50 %	75 %	100 %	I_D / I_N	M_d / M_N	M_M / M_N	kVA_N	J kg.m²	IM B3 kg
0,18	1390	1,2	0,64	0,44	0,55	0,65	51	58	62	3,7	2,7	2,7	0,4	0,00048	5

SystèmesimuléaveclesécartsN°3

La «Ramp» génère un couple résistant augmentant de 1,2 Nm par seconde en démarrant à t = 2 s, à t = 3 s le couple = 1,2 Nm **soitlecouplenominaldumoteur**.

- La puissance utile est égale à la **puissancenominale180W**.
- La vitesse nominale est de 1462 tr.min^{-1} soit une différence de 72 tr.min^{-1} : **écart+5%.**
- Le rendement est de 48 % soit un **écartde12%.**
- La puissance utile maximum est de 378 W soit une différence de 108 W : **écart-28%.**
- Le couple maximum est de 2,3 Nm soit une différence de (1,2x2,7)-2,3 = 0,9 Nm **écartde-28%**

Conclusion:

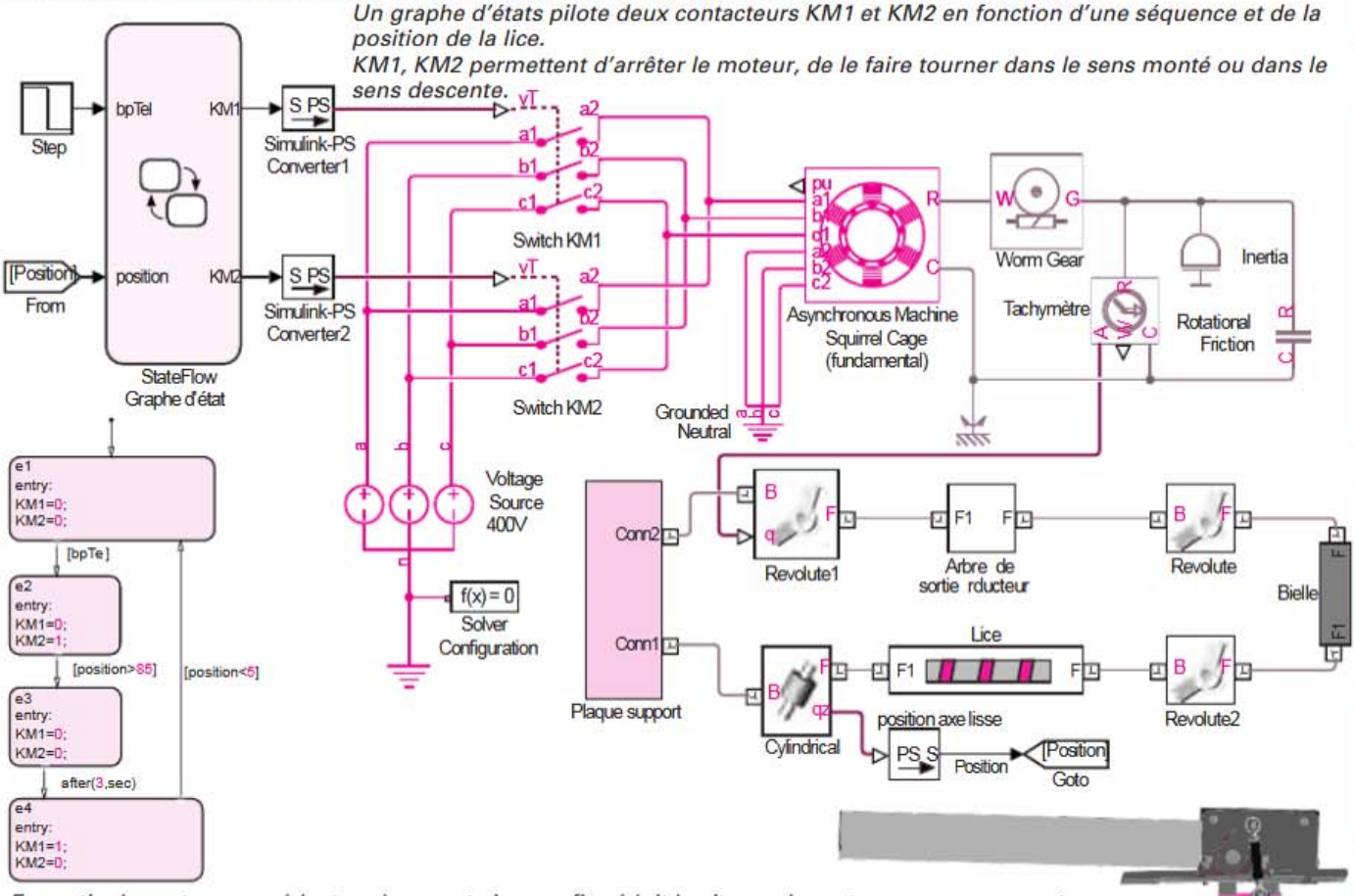
Soit les exigences sont élevées et le modèle demande à être modifié.

Soit on considère que les valeurs autour du point nominal sont proches des valeurs du constructeur et le modèle peut être validé est intégré dans un modèle plus complexe.

•Exempled'intégrationdumodèledansunsystèmepluscomplexe:barrièreDECMA.

Un graphe d'états pilote deux contacteurs KM1 et KM2 en fonction d'une séquence et de la position de la lice.

KM1, KM2 permettent d'arrêter le moteur, de le faire tourner dans le sens monté ou dans le sens descente.



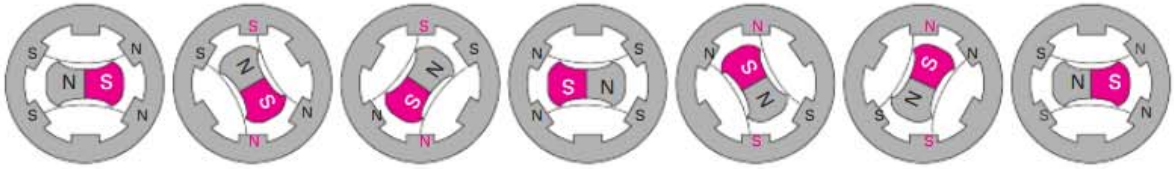
En sortie du moteur, un réducteur à roue et vis sans fin réduit la vitesse du moteur avec un rapport de 80. Une inertie et un bloc de friction simulent les frottements et l'inertie de la barrière. Le tachymètre fournit sur la sortie A le déplacement angulaire de l'arbre moteur qui va piloter la liaison «Revolut1» correspondant à l'axe de l'arbre moteur. L'ensemble du mécanisme issu du modeleur volumique sera visualisé sur une fenêtre en 3D.

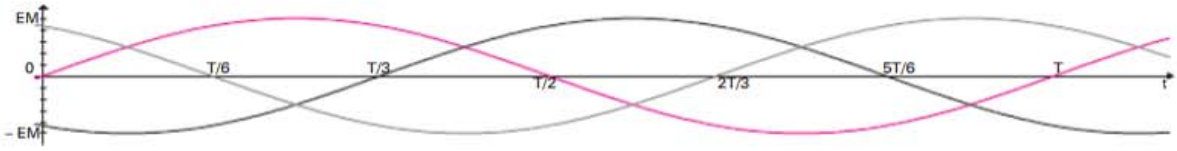
7.6.10. PRINCIPE DU MOTEUR SYNCHRONE

La construction du moteur synchrone est sensiblement la même que celle du moteur asynchrone à la différence que le rotor est une pièce magnétique ou électromagnétique.

Un courant alternatif triphasé crée, dans le stator, un champ magnétique tournant.
Le rotor est alimenté en courant continu, il agit comme un barreau aimanté.
Lorsqu'un barreau aimanté pivote dans un champ magnétique, il tourne jusqu'à ce que sa position s'accorde avec celle du champ. Si le champ tourne, le barreau aimanté tourne avec le champ. Si la puissance du champ tournant est importante, il exerce une grande force de rotation sur le barreau aimanté.

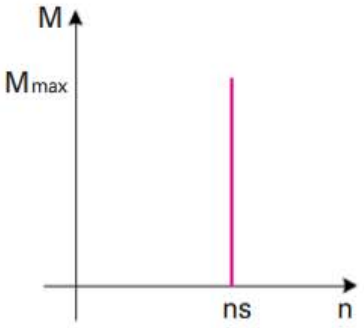
Le rotor tourne toujours en synchronisme avec le champ tournant





• Caractéristique couple en fonction de la vitesse

La caractéristique couple = f(n) est une droite verticale, conséquence de sa vitesse de rotation fixe en fonction de la fréquence.



$$ns = \frac{60\ f}{p}$$

ns = vitesse de synchronisme
f = fréquence en hertz
p = nombre de paires de pôles

• Démarrage du moteur synchrone

L'un des problèmes du moteur synchrone est le démarrage. L'application d'un courant alternatif 50 Hz triphasé au stator ne permet pas de faire démarrer le moteur. En effet, au moment où l'on applique au stator un courant alternatif, il se constitue tout de suite un champ magnétique qui tourne à une grande vitesse. Or, ce champ tournant passe devant les pôles du rotor à une vitesse telle que le rotor n'a pas la moindre chance de démarrer.

Généralement, les moteurs synchrones sont mis en marche comme des moteurs à cage d'écureuil. Une cage d'écureuil est placée sur le rotor, pour faire démarrer le moteur ; le stator est alimenté mais le rotor ne reçoit pas encore de courant continu.

La cage d'écureuil fait démarrer le rotor jusqu'à ce qu'il atteigne presque la vitesse synchrone. Puis le rotor est alimenté en courant continu, et il est ainsi mis à la même vitesse que le champ magnétique tournant.

Les moteurs synchrones sont utilisés dans les cas où la charge exige une vitesse constante à partir du point où la charge est nulle jusqu'au point de pleine charge.

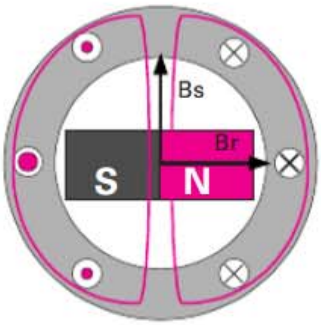
• Avantages des moteurs synchrones

Ils permettent d'obtenir une vitesse fixe et constante.
Ils permettent une correction du facteur de puissance par le moyen d'une surexcitation de l'inducteur du rotor. Le déphasage de la tension en ligne sur l'intensité est modifié.

7.6.11. LE MOTEUR SYNCHRONE AUTOPILOTÉ

• Principe

Pour pallier les désavantages d'un moteur synchrone (démarrage difficile et réglage de sa vitesse), on l'associe à un détecteur de position (resolver ou codeur de position numérique) permettant de connaître à tout moment la position du rotor et donc d'alimenter le stator d'une façon optimale. Le vecteur statorique Bs doit être en quadrature par rapport au vecteur rotorique Br pour obtenir le maximum de couple.

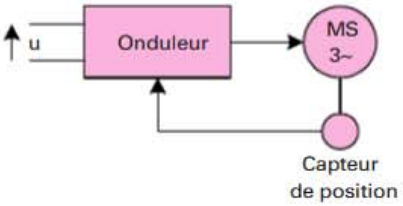


• Exemple de constitution moteur-variateur

Le **moteur** est de type synchrone sans balais. Il est constitué d'un stator triphasé 220 V-6 pôles, d'un rotor 6 pôles à aimant samarium cobalt (pôles inducteurs), muni d'un resolver de même polarité. Celui-ci fournit à chaque instant à l'électronique de commande l'information position angulaire rotor.

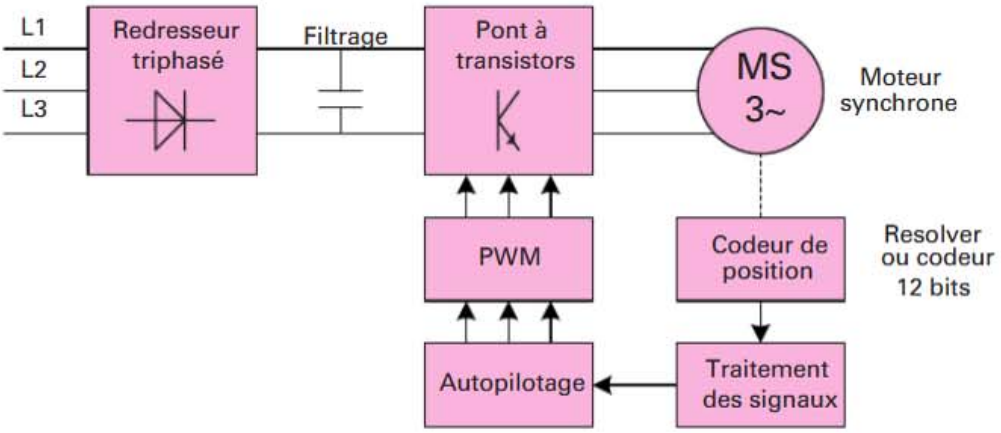
Le **variateur** associé génère 3 ondes de courant sinusoïdales à destination du stator moteur : leur fréquence est calquée en permanence sur celle du rotor de façon à disposer à tout instant du couple maximal pour un courant donné.

Leur amplitude est déterminée par la demande réelle de couple, issue du régulateur de vitesse.
L'électronique réalise donc la fonction commutation remplie par le collecteur pour un moteur courant continu.



Alimentation puissance 400 V triphasée suivie d'un redresseur et d'une cellule de filtrage.
Protection intégrée contre les pointes de courant à la mise sous tension.

Onduleur à transistors, type à modulation de largeur d'impulsions (MLI sinus), générant un courant de forme sinusoïdale. Découpage de 5 kHz à 25 kHz permettant un fonctionnement silencieux et sans ondulation de couple.



Caractéristiques et spécifications

Couple 0,4 à 100 Nm
Puissance 2,2 à 55 kW
Vitesse de 1 500 à 10 000 tr/min
Rapidité de positionnement
Rotor à faible inertie
Faible encombrement

Applications

Robotique
Usinage de précision
Disque dur
Ventilateur (brushless)

7.6.12. COMMANDE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE À DÉMARRAGE DIRECT

• Étude systémique de la mise en situation d'un moteur asynchrone triphasé

Objectif : l'étude systémique de la mise en situation d'un moteur permet de prendre en compte les conditions de démarrage direct définies par le constructeur ainsi que la sécurité des personnes.

Schéma fonctionnel de niveau 1

Schéma fonctionnel de niveau 2

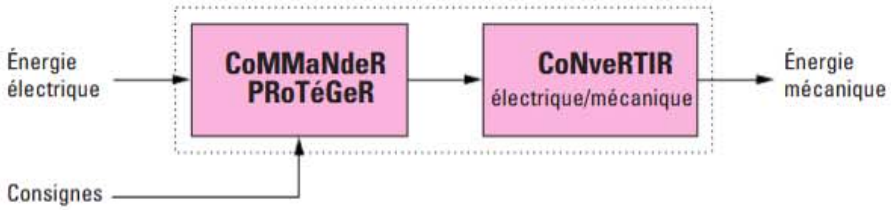


Schéma fonctionnel du premier degré

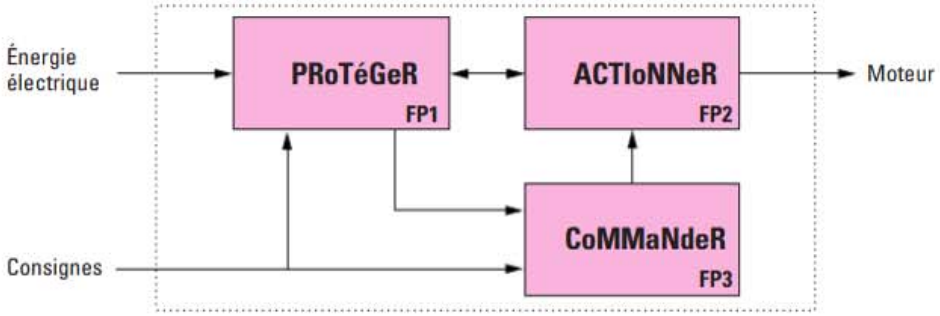
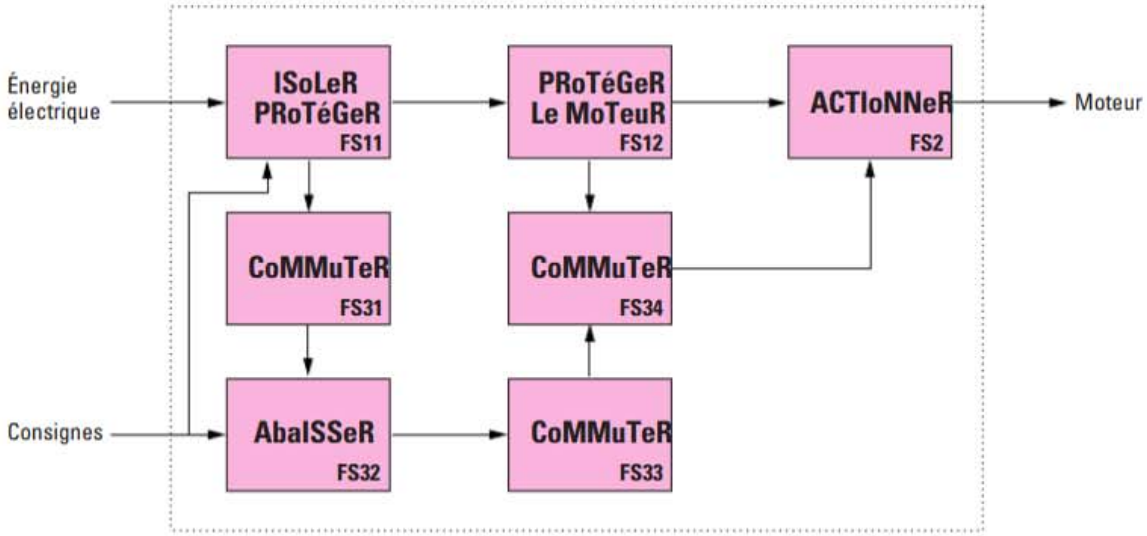
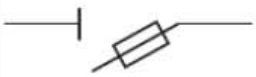
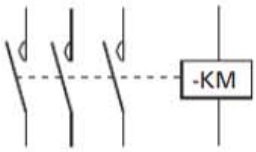
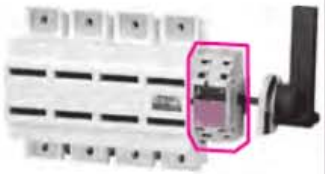
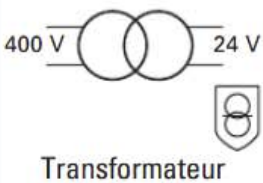
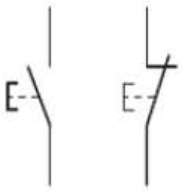


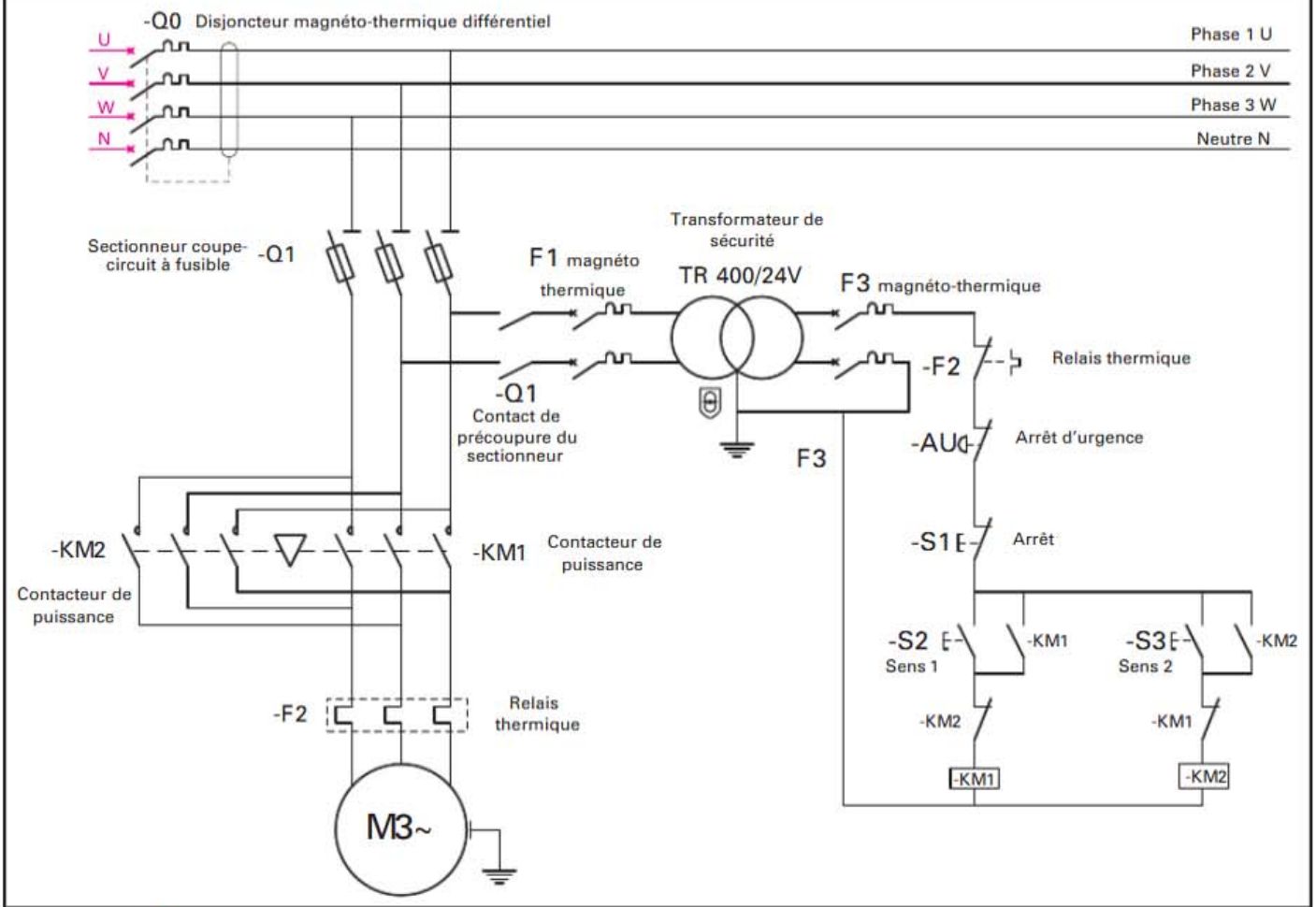
Schéma fonctionnel du second degré

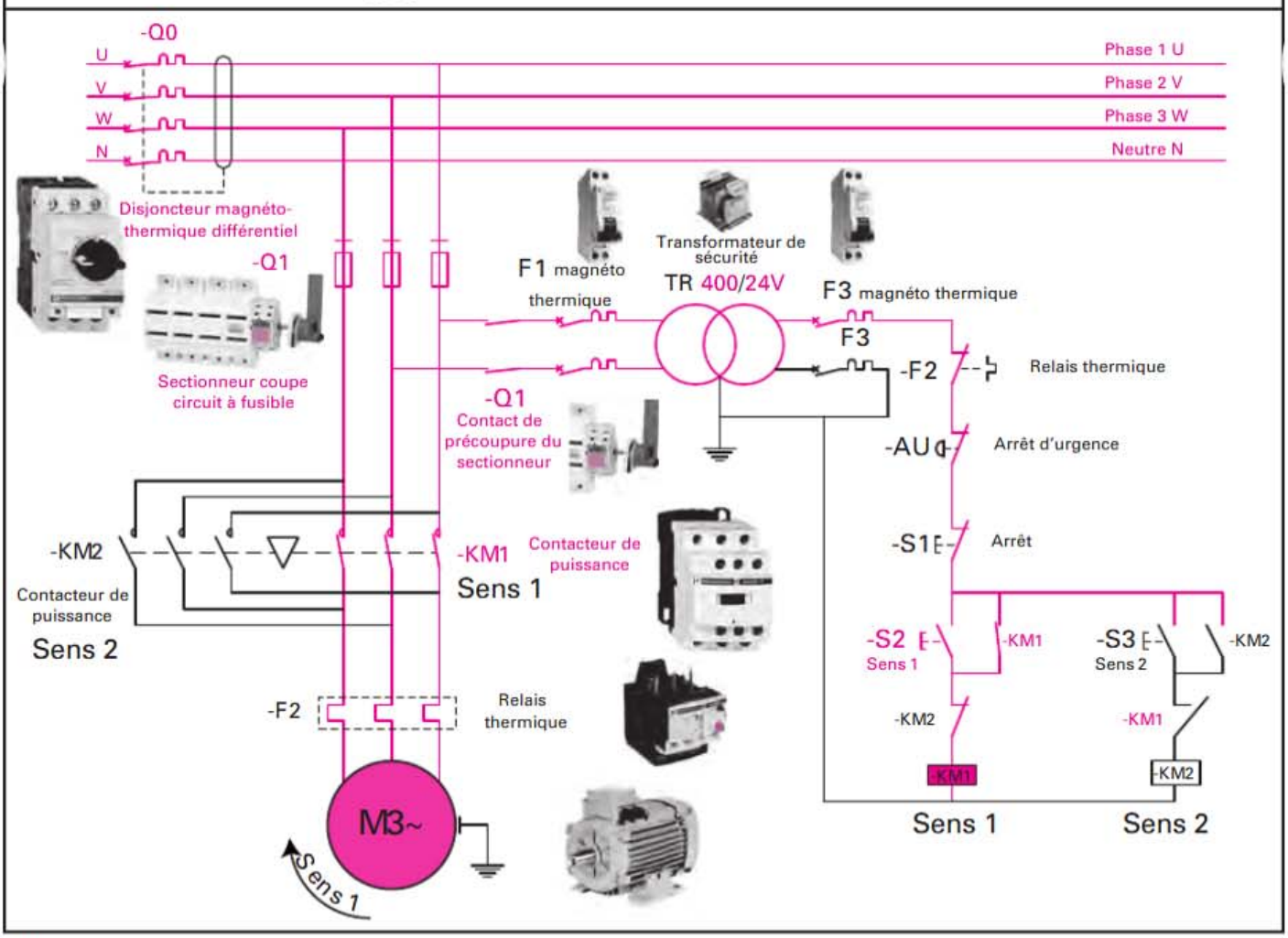


Commande d'un moteur asynchrone à démarrage direct

Désignation des fonctions	Symboles	Description	Illustration
FS 11	 Sectionneur	La fonction FS 11 permet d'isoler, en toute sécurité, le montage comme, par exemple, lors d'un changement du moteur. Elle permet d'intégrer des fusibles permettant la coupure immédiate dans le cas de court-circuit.	
FS 12	Relais thermique	La fonction FS 12 permet de détecter des surintensités de faible niveau qui peuvent, à long terme, provoquer des détériorations dans les équipements. L'information de défaut est transmise à la fonction FS 34.	
FS 2	 Contacteur tripolaire	La fonction FS 2 permet de pouvoir commuter et couper des courants de fortes valeurs. Pour ce faire, elle reçoit ses ordres de la fonction FP 3.	
FS 31	Interrupteur	La fonction FS 31 permet l'apport d'énergie à l'ensemble des fonctions composant FP 3. Elle inclut, également, une sécurité qui coupe ce même apport d'énergie, en cas d'utilisation prohibitive de la fonction FS 11, qui ne possède aucun pouvoir de coupure.	
FS 32	 Transformateur de sécurité	La fonction FS 32 permet d'abaisser la tension utilisée par les autres fonctions de FP 3 pour que celle-ci soit au niveau de sécurité défini par la norme. Elle permet également l'isolement de sécurité de la partie commande.	
FS 33	 Boutons-poussoirs	La fonction FS 33 permet à l'utilisateur de pouvoir entrer les informations de type « arrêt » ou « marche ».	
FS 34	Contact à ouverture	La fonction FS 34 permet, dans le cas où la fonction FS 12 a détecté un défaut, de couper la commande de la fonction FP 2, et ainsi d'arrêter le fonctionnement de l'ensemble (contact commandé par le relais thermique).	

7.6.13. COMMANDE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE À DEUX SENS DE ROTATION





7.6.14. PRINCIPALES FONCTIONS POUVANT ÊTRE RÉALISÉES PAR LES VARIATEURS

• Démarrage

Mise en vitesse d'une machine, depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse de fonctionnement, évitant les aléas électriques et mécaniques (pointes de courant, chutes de tension, à-coups mécaniques...).

• Variation de vitesse

Deux notions à discerner : la variation et la régulation.
Un variateur n'est pas obligatoirement un régulateur. C'est un système qui possède une commande électronique avec amplification de puissance mais qui n'a pas de boucle de retour.
La grandeur de sortie évolue en fonction des perturbations. C'est un système non asservi, il fonctionne en « boucle ouverte ».
Un régulateur est un système asservi. Il possède une commande électronique avec amplification de puissance et une boucle de retour. Il fonctionne en « boucle fermée ».
La grandeur de sortie (tension, courant, puissance, vitesse, position...) est asservie à la grandeur d'entrée appelée consigne ou référence.
Si la consigne est variable, le système est à la fois variateur et régulateur.

• Freinage d'arrêt

Décélération de la vitesse de fonctionnement jusqu'à la vitesse nulle, par application d'un couple de freinage contrôlé ou non, après action sur un « arrêt d'urgence » par exemple.

• Freinage de ralentissement

Décélération de la vitesse de fonctionnement jusqu'à une vitesse intermédiaire par application d'un couple de freinage contrôlé.

• Inversion du sens de marche

Possibilité d'ordonner l'autre sens de marche, l'inversion se faisant à vitesse nulle, après décélération forcée ou non.

• Unidirectionnel

Système de conversion électronique de l'énergie électrique ne permettant le passage de cette énergie que dans le sens réseau → récepteur.
Il ne permet pas de freinage statique, ni d'inversion statique du sens de marche.

• Réversible (bidirectionnel)

Système de conversion électronique de l'énergie électrique autorisant le transfert de cette énergie dans les deux sens réseau ↔ récepteur. Il permet le freinage par récupération d'énergie.
(Transmission au réseau de tout ou partie de l'énergie emmagasinée dans les pièces en mouvement de la machine.)

• Couple constant

Le fonctionnement est dit à « couple constant » lorsque le moteur peut fournir le couple nominal quelle que soit la vitesse (Système de traction, de levage...).

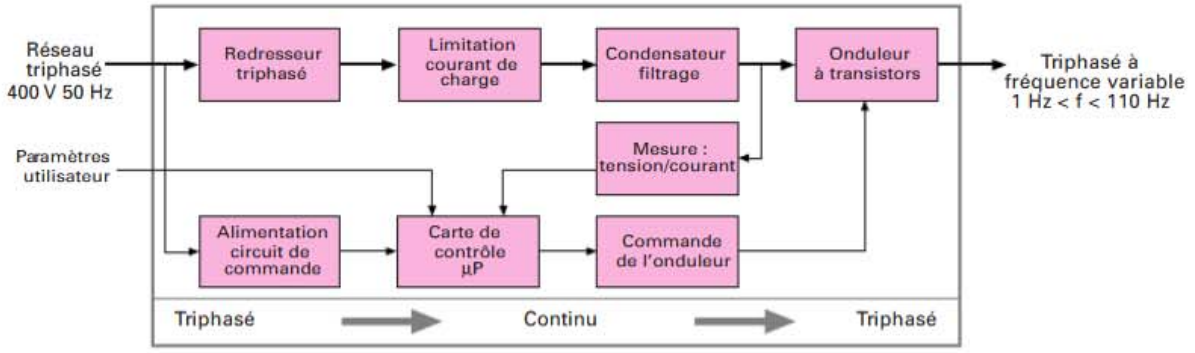
• Puissance constante

Le fonctionnement est dit à « puissance constante » lorsque le moteur peut fournir un couple inversement proportionnel à la vitesse angulaire (Enrouleur axial, tour...).

• Charge entraînante

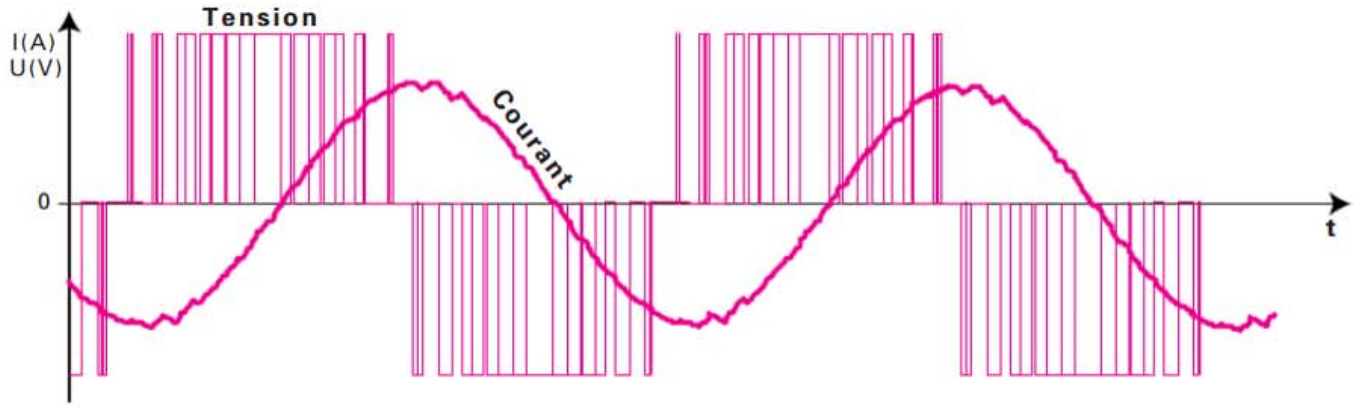
Une charge est dite « entraînante » lorsqu'elle provoque une vitesse supérieure à la vitesse de consigne. Gravité sur les mouvements de levage des charges. Balourd d'une pièce en rotation sur la moitié de chaque tour.

• Schéma fonctionnel d'un convertisseur de fréquence (ATV-452 Télémécanique)



7.6.15. MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION MLI

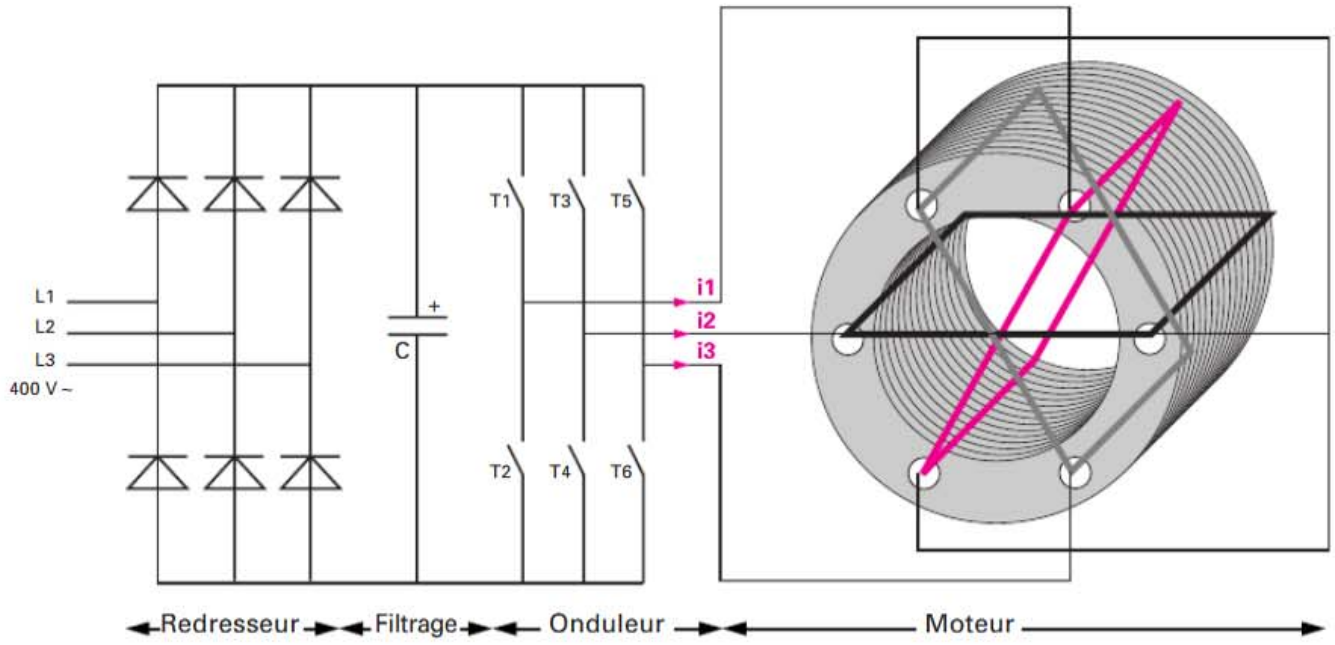
Elle permet d'utiliser une commande en tout ou rien pour obtenir un courant sinusoïdal : l'inductance du moteur lisse le signal MLI et le transforme en une onde plus ou moins sinusoïdale.



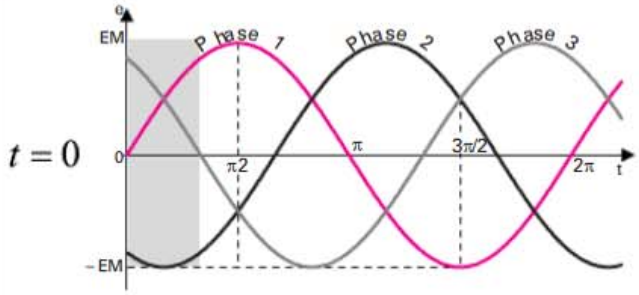
• Création d'un champ tournant moteur simplifié

Simplification : 1 spire par bobine, 1 paire de pôles, couplage étoile.

Chaque spire crée un champ magnétique représenté par un vecteur dont le module est proportionnel à la valeur instantanée du courant traversant cette spire. Le champ résultant est représenté par un vecteur (somme vectorielle des trois vecteurs).



7.6.16. CONVERSION D'UN CHAMP TOURNANT À PARTIR D'UN VARIATEUR

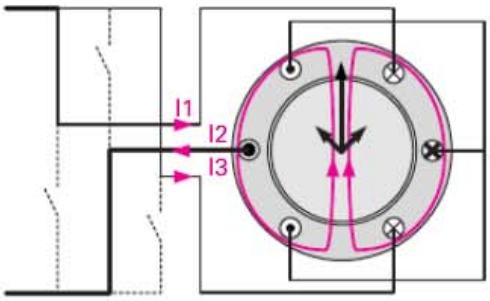


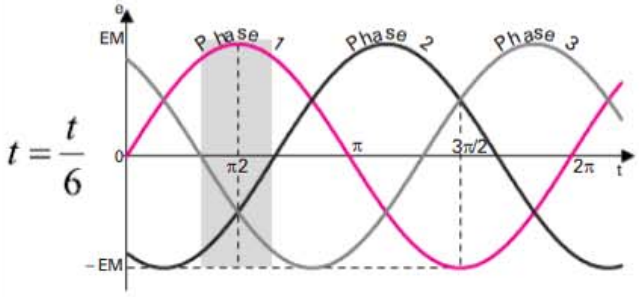
$t = 0$

$i_1 = \frac{im}{2}$

$i_2 = -im$

$i_3 = \frac{im}{2}$



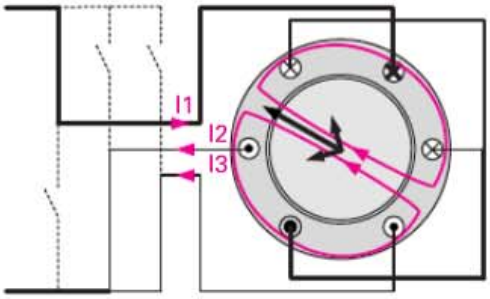


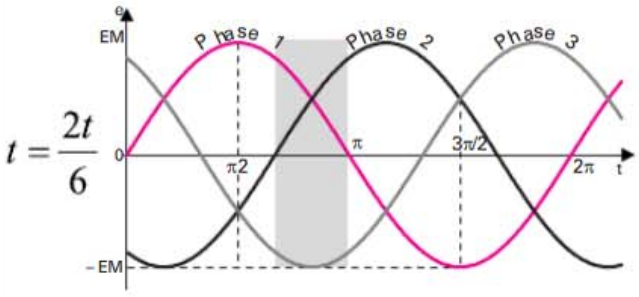
$t = \frac{t}{6}$

$i_1 = im$

$i_2 = \frac{-im}{2}$

$i_3 = \frac{-im}{2}$



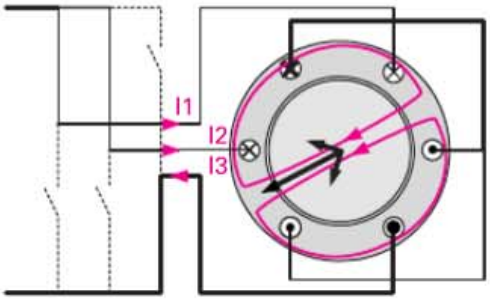


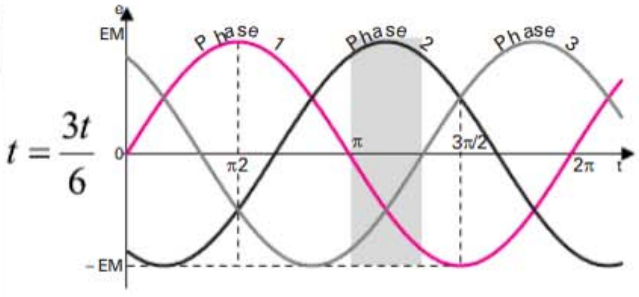
$t = \frac{2t}{6}$

$i_1 = \frac{im}{2}$

$i_2 = \frac{im}{2}$

$i_3 = -im$



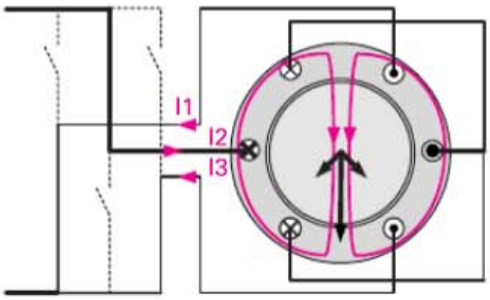


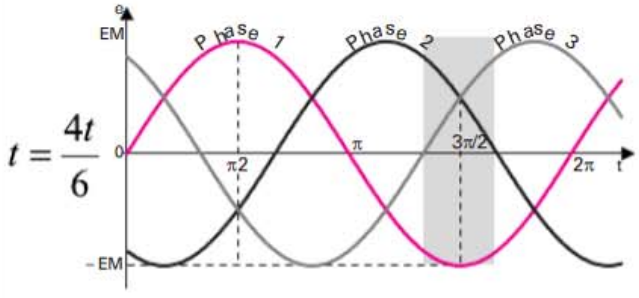
$t = \frac{3t}{6}$

$i_1 = \frac{-im}{2}$

$i_2 = im$

$i_3 = \frac{-im}{2}$



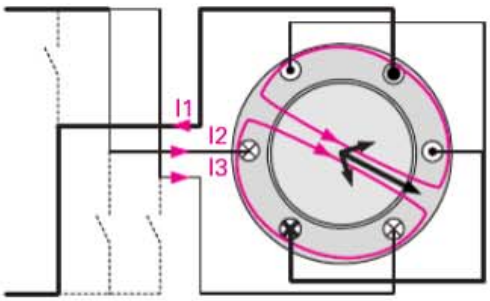


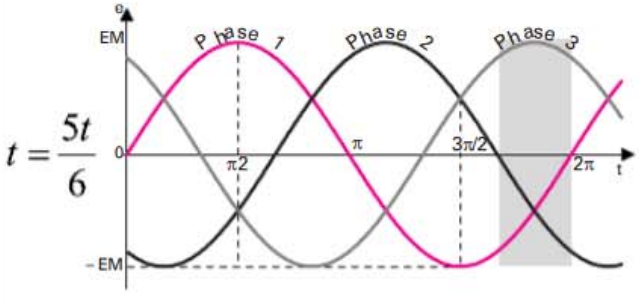
$t = \frac{4t}{6}$

$i_1 = -im$

$i_2 = \frac{im}{2}$

$i_3 = \frac{im}{2}$



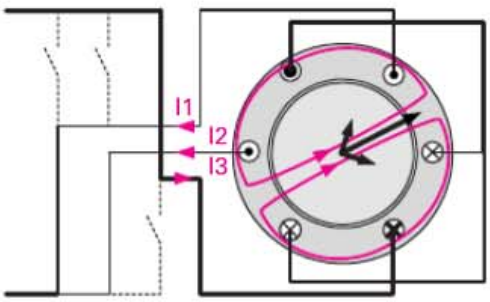


$t = \frac{5t}{6}$

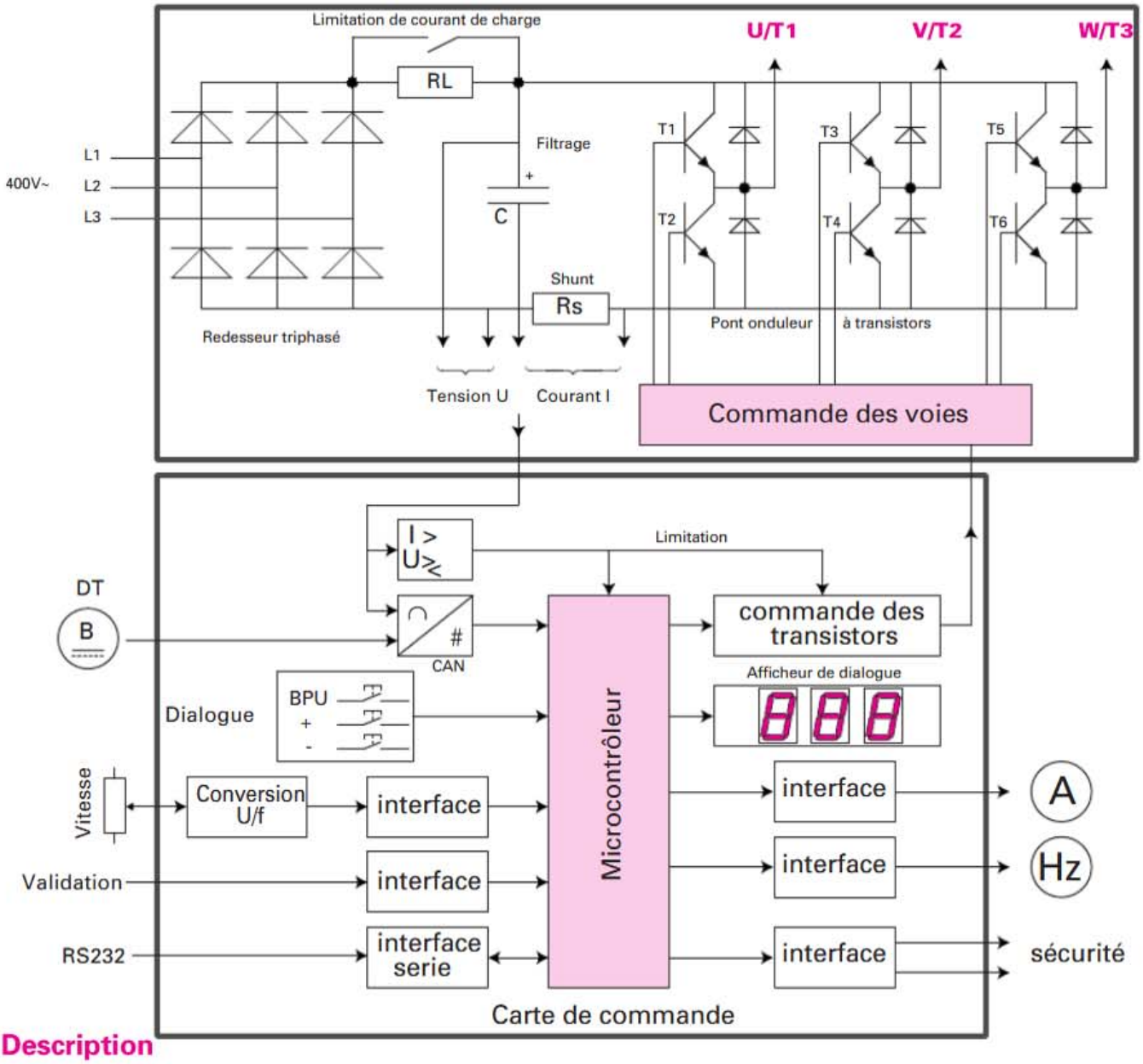
$i_1 = \frac{-im}{2}$

$i_2 = \frac{-im}{2}$

$i_3 = im$



7.6.17. STRUCTURE INTERNE D'UN CONVERTISSEUR DE FRÉQUENCE (ATV-452 Télémécanique)



• Description

Module de puissance

Redresseur triphasé : 6 diodes.
RL résistance de limitation de charge en service au démarrage, court-circuitée après.
Rs shunt de mesure, résistance de très faible valeur (0,1 Ω U = 0,1 I).
Condensateur de filtrage, il permet de filtrer l'alimentation de l'onduleur.
Les transistors, montés un « push pull », commutent les courants vers les bobines.
Les diodes, montées en roue libre, protègent les transistors contre les surtensions.

Module de commande

Microcontrôleur : il gère l'ensemble du variateur, accélération, sécurité, limitation, etc.
Limitation : circuit inhibant la commande des transistors en cas de surcharge.
CAN convertisseur analogique numérique transmettant les valeurs U, I, DT au CPU.
Commande des transistors : interface entre la partie commande et la partie puissance.
Afficheur : permet le dialogue avec l'utilisateur pour paramétrer le variateur.
Dialogue : 3 boutons-poussoirs permettant la sélection et la modification d'un paramètre.
Interface : circuit permettant la liaison entre le CPU et l'extérieur sorties : ampèremètre, fréquencemètre, commande de sécurité, entrées : variation de vitesse, validation, ligne RS232 permettant de piloter le variateur par un ordinateur.

7.7. PROTECTION DES MATÉRIELS ET DES PERSONNES

7.7.1. PROTECTION DES MATÉRIELS

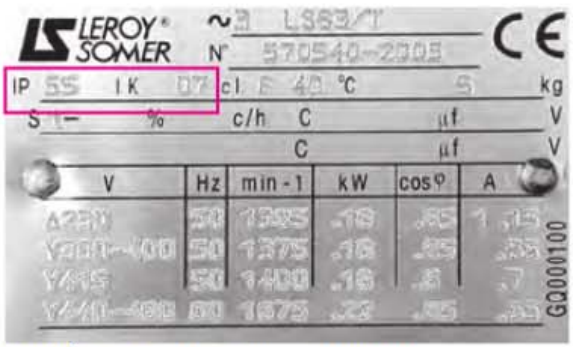
• Définitions des indices de protection IP et IK

Indices de protection des enveloppes des matériels électriques
Selon norme CEI 60034-5 - EN 60034-5 (IP) - EN 50102 (IK)

1er chiffre : protection contre les corps solides			2e chiffre : protection contre les liquides			3e chiffre : protection mécanique		
IP	Tests	Définition	IP	Tests	Définition	IK	Tests	Définition
0		Pas de protection	0		Pas de protection	00		Pas de protection
1	Ø 50 mm	Protégé contre les corps solides supérieurs à 50 mm (exemple : contacts involontaires de la main)	1		Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau (condensation)	01	150 g, 10 cm	Énergie de choc : 0,15 J
2	Ø 12 mm	Protégé contre les corps solides supérieurs à 12 mm (exemple : doigt de la main)	2	15°	Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale	02	200 g, 10 cm	Énergie de choc : 0,20 J
3	Ø 2.5 mm	Protégé contre les corps solides supérieurs à 2.5 mm (exemples : outils, fils)	3	60°	Protégé contre l'eau en pluie jusqu'à 60° de la verticale	03	250 g, 15 cm	Énergie de choc : 0,37 J
4	Ø 1 mm	Protégé contre les corps solides supérieurs à 1 mm (exemples : outils fins, petits fils)	4		Protégé contre les projections d'eau de toutes directions	04	250 g, 20 cm	Énergie de choc : 0,50 J
5		Protégé contre les poussières (pas de dépôt nuisible)	5		Protégé contre les jets d'eau de toutes directions à la lance	05	350 g, 20 cm	Énergie de choc : 0,70 J
6		Protégé contre toute pénétration de poussières.	6		Protégé contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer	06	250 g, 40 cm	Énergie de choc : 1 J
			7	0,15m, 1m	Protégé contre les effets de l'immersion entre 0,15 et 1 m	07	0,5 kg, 40 cm	Énergie de choc : 2 J
			8 ..m	..m	Protégé contre les effets prolongés de l'immersion sous pression	08	1,25 kg, 40 cm	Énergie de choc : 5 J
						09	2,5 kg, 40 cm	Énergie de choc : 10 J
						10	5 kg, 40 cm	Énergie de choc : 20 J

Exemple :

Cas d'une machine **IP 55**



IP : Indice de protection

5. : Machine protégée contre la poussière et contre les contacts accidentels.
*Sanction de l'essai : **pas d'entrée de poussière** en quantité nuisible, aucun contact direct avec des pièces en rotation.*
L'essai aura une durée de 2 heures.

.5 : Machine protégée contre les projections d'eau dans toutes les directions provenant d'une lance de débit 12,5 L/min sous 0,3 bar à une distance de 3 m de la machine.
L'essai a une durée de 3 minutes.
*Sanction de l'essai : **pas d'effet nuisible de l'eau** projetée sur la machine.*

7.7.2. PROTECTION DES PERSONNES

Effets du courant électrique sur l'homme

• **ÉLECTRISATION** : désigne tout accident électrique, mortel ou non. L'électrisation peut se traduire par une simple commotion qui peut ne pas avoir de suite, ou, à l'opposé, par un état de fibrillation ventriculaire, ou un choc cardiaque mortel.

• **ÉLECTROCUTION** : désigne un accident mortel d'origine électrique.

• **FIBRILLATION VENTRICULAIRE** : elle peut suivre l'électrisation. C'est un état transitoire de l'organisme dit de « mort apparente » qui correspond à un rythme de fonctionnement anarchique du cœur.

• **EFFETS ÉLECTROTHERMIQUES (effet Joule)** : ils se traduisent par des brûlures externes et internes.

• **ÉLECTRISATION SANS PERTE DE CONNAISSANCE** : elle va du simple picotement sans conséquence à la violente contraction correspondant à la tétanisation électrique. Une violente contraction musculaire peut provoquer la chute grave ou le collage par crispation de la main sur le conducteur.

• **ÉLECTRISATION AVEC PERTE DE CONNAISSANCE** (état de fibrillation ventriculaire) : la fibrillation cardiaque ventriculaire empêche l'irrigation du cerveau, cause des lésions irréparables au-delà de quelques minutes et entraîne la mort. Le maintien en survie nécessite des moyens appropriés.

• **ACTION DIRECTE DU COURANT** :

– première famille : électrisation ou électrocution due à un état prolongé de fibrillation. Ce sont des accidents dus à un courant sous basse tension, de faible intensité, traversant le corps pendant un temps assez court ;

– deuxième famille : électrocution due à des brûlures internes ou externes provoquées par un courant électrique d'intensité suffisante pendant un temps assez long. C'est en général le cas des courants sous haute tension.

Remarque : l'accident électrique le plus fréquent est l'accident en basse tension de la première famille, qui se traduit par un contact soit entre conducteurs, soit entre conducteurs et terre, avec ou sans interposition de la masse métallique d'un appareil.

• **ACTION INDIRECTE DU COURANT** :

– troisième famille : le corps n'est pas traversé par le courant. Il s'agit d'accidents dus à un arc électrique. En général, ils ne sont pas mortels mais peuvent provoquer des brûlures externes graves ;

– quatrième famille : le corps est soumis à des courants engendrés par le champ électrique dû au courant principal (tension au-dessus de 220 kV).

• Les quatre principaux cas d'électrisation

D'après LEGRAND

Les contacts directs : c'est le contact d'une personne avec des parties actives des matériels sous tension.

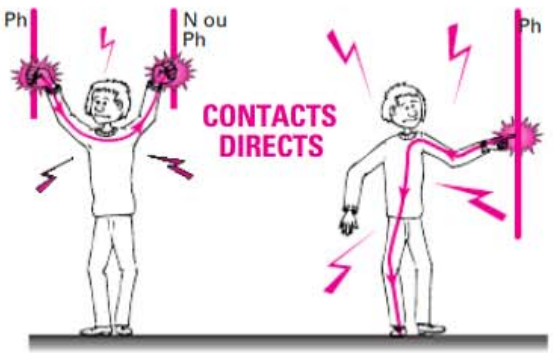
Accidents liés à l'imprudence et à la maladresse de l'utilisateur.

Une personne travaille sur un circuit et celui-ci est mis sous tension sans préavis.

Un enfant introduit des broches métalliques dans une prise de courant...

Une personne rentre dans un poste de distribution et touche à une barre sous tension.

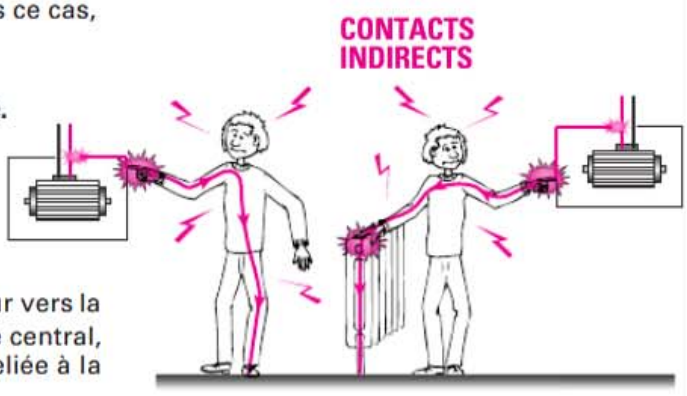
Une personne touche une canalisation encastrée avec l'extrémité d'un burin ...



Les contacts indirects : c'est le contact d'une personne avec des masses mises accidentellement sous tension. Dans ce cas, le courant passe à travers le corps et rejoint le sol.

Accidents liés seulement à l'état du matériel employé.

Une personne touche à la carcasse métallique d'un appareil électrique présentant un défaut d'isolement.
Utilisation d'appareils anciens ou n'ayant pas fait l'objet d'une révision préventive.
Comme dans ce cas, le récepteur est en défaut, le retour vers la terre peut s'effectuer soit par un radiateur de chauffage central, par une huisserie métallique, par une autre carcasse reliée à la terre...



• Exemples de risques encourus

Un conducteur mal isolé d'une machine électrique entre en contact avec sa carcasse métallique normalement reliée à la terre (voir figure ci-dessous).

1er cas : Une personne entre en contact avec la carcasse métallique. Quels sont les risques ?

- réseau 230 V,
- résistance de mise à la terre $R_e = 10\ \Omega$,
- résistance de prise de terre $R_T = 5\ \Omega$,
- résistance corporelle $R_c = 5\,000\ \Omega$.

Valeur du courant de défaut i_d :

$$i_d = \frac{U}{R_e + R_T} = \frac{230}{10 + 5} = 15{,}3\ \text{A}$$

Tension de contact sur la carcasse :

$$u_c = R_T \cdot i_d = 5 \times 15{,}3 = 76{,}6\ \text{V}$$

Courant corporel :

$$i_c = \frac{U_c}{R_c} = \frac{76{,}6}{5\,000} = 15\ \text{mA}$$

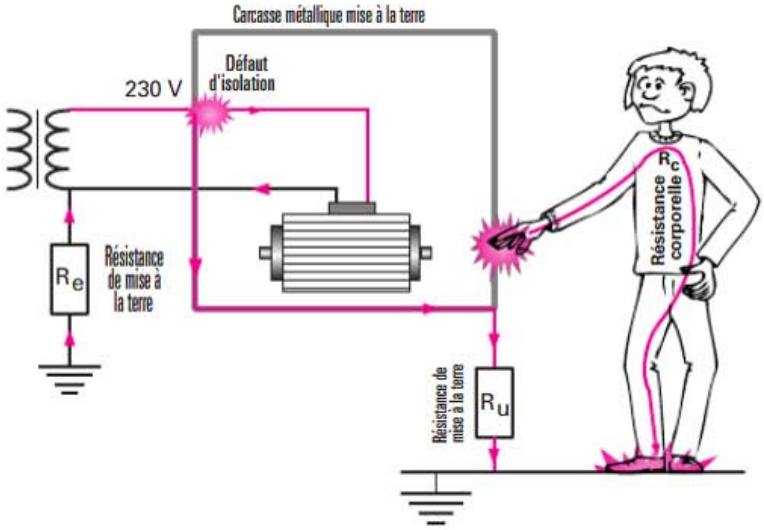
Dans ce cas d'accident électrique, il s'agit d'un **contact indirect**. La personne est soumise à des **crispations musculaires**.

2e cas : Dans la figure ci-contre, on suppose que la carcasse métallique n'est pas reliée à la terre.

La tension de contact (u_d) vaut alors 230 V.

Nouvelle valeur du courant corporel (i_c) :

$$i_c = \frac{u_c}{R_c} = \frac{230}{5\,000} = 46\ \text{mA}$$



Dans ce cas d'accident électrique, il s'agit d'un contact indirect. La personne est soumise à un phénomène **d'asphyxie**.

La norme définit des tensions de contact maximales ou tensions limites en fonction des lieux :

- habitations, bureaux, locaux tertiaires, industriels secs… **50 V** ;
- locaux industriels humides, chantiers, ports… **25 V** ;
- piscines, sauna… **12 V**.

Exemples de résistance corporelle R_c

– Un enfant, pieds et mains mouillés, présente une résistance de l'ordre de 600 à 1 000 Ω;
– un adulte, à la peau calleuse et sèche, présente une résistance de l'ordre de 3 000 à 5 000 Ω.

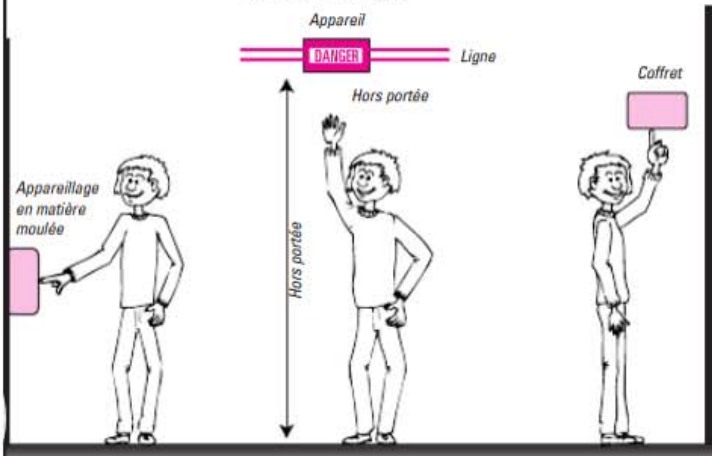
Protection des personnes

• Protection contre les contacts directs

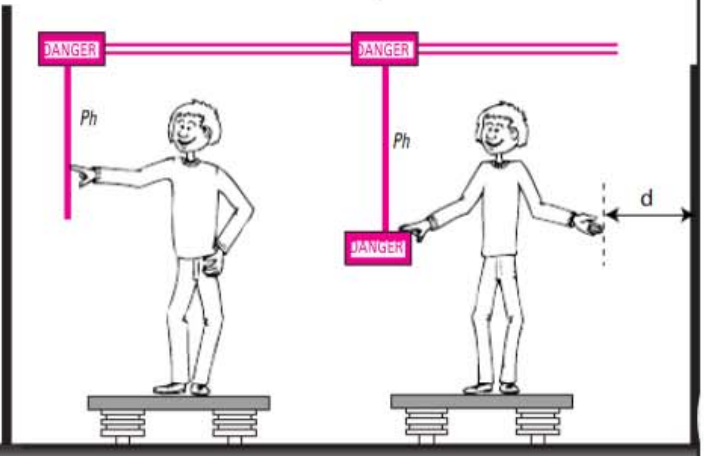
La protection est assurée :

- par la mise hors de portée par éloignement des parties actives ;
- par l'isolation des parties actives destinée à empêcher tout contact avec celles de l'installation électrique : matière isolante capable de supporter, d'une manière durable, les contraintes mécaniques, électriques et thermiques ;
- au moyen de barrières ou d'enveloppes de degré de protection convenable ;
- au moyen d'obstacles empêchant une approche fortuite des parties actives (rambardes, panneaux grillagés, etc.) ;
- par l'emploi de matériel double isolation ; ⧈
- par un dispositif de protection à courant différentiel-résiduel à haute sensibilité, destiné à produire rapidement la mise hors tension de l'installation électrique dès l'apparition d'un très faible courant de défaut à la terre (30 mA). Dispositif obligatoire sur toutes les prises de courant ;
- par l'utilisation de la très basse tension de sécurité TBTS ou de transformateur d'isolement.

Inaccessibilité des pièces métalliques sous tension



Isolation des personnes



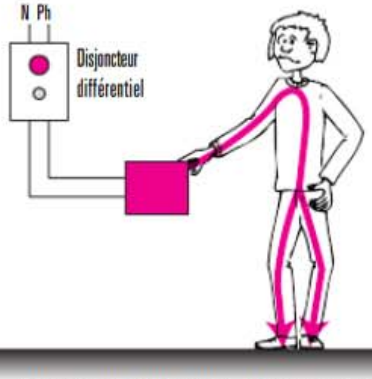
• Protection contre les contacts indirects

Cette protection passe obligatoirement par la coupure automatique du circuit d'alimentation dès l'apparition d'un courant de défaut. Elle est destinée à empêcher le maintien d'une tension de contact pendant une durée telle qu'il risque d'en résulter un danger pour les personnes.

Dans la pratique, cela conduit à l'utilisation de disjoncteurs différentiels déclenchant pour un courant de défaut de 10, 30, 300, 500 mA en protection des circuits terminaux.

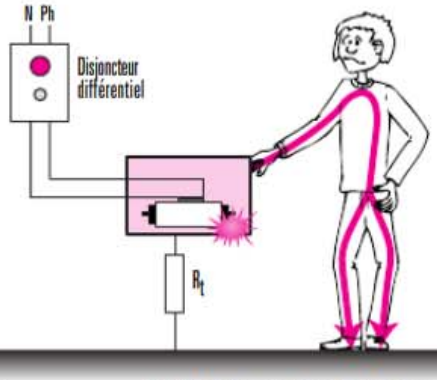
La mise à la terre des masses métalliques et les liaisons équipotentielles complètent le dispositif de protection qui tient compte du régime de neutre de l'installation.

Coupure automatique



Disjoncteur différentiel. Le courant i provoque instantanément le déclenchement.

Mise à la terre des masses métalliques et coupure automatique



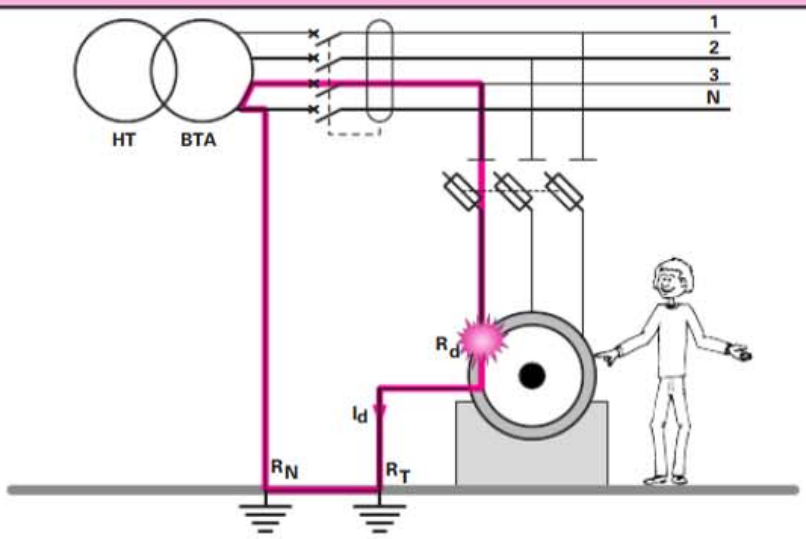
Rt : résistance de terre de la masse. Le courant de défaut provoque le déclenchement du disjoncteur.

Connexion équipotentielle

Réunion de toutes les masses métalliques.

• Neutre à la terre (schéma TT)

Étude d'un défaut d'isolement



La mise à la masse accidentelle de résistance R_d inconnue provoque un courant de défaut I_d qui circule en passant par les prises de terre R_T et R_N. En négligeant la résistance des conducteurs du circuit, on peut calculer le courant de défaut :

$$I_d = \frac{U}{R_T + R_N + R_d}$$

U : tension simple du réseau = **230 V**.

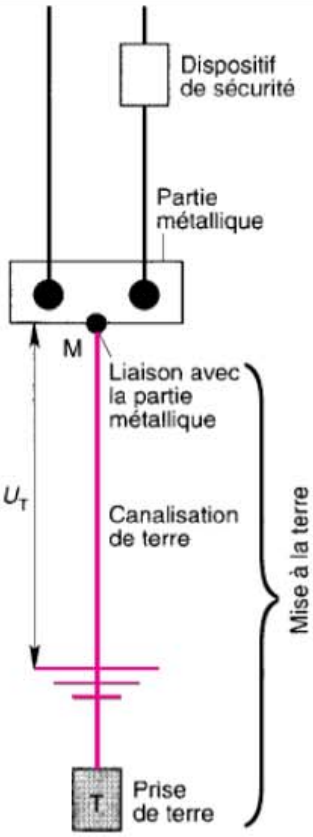
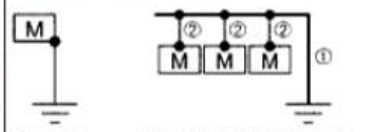
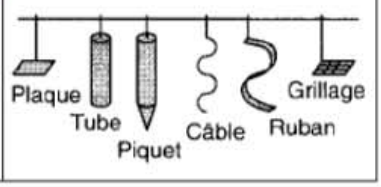
Une personne touchant la masse sera soumise à un potentiel U_d.
Soit $R_T = 20\ \Omega$, $R_N = 10\ \Omega$, $R_d = 0\ \Omega$ (cas le plus défavorable).

$$I_d = \frac{230}{20 + 10 + 0} = 7{,}66\ \text{A} \Rightarrow U_d = R_T \cdot I_d = 20 \times 7{,}66 = \mathbf{153\ V}.$$

Cette tension U_d est suffisamment élevée pour nécessiter un **déclenchement automatique**.

• Masse à la terre

Constitution générale d'une installation de mise à la terre

Installation	Conditions à remplir	Matériel utilisé
	Assurer la mise hors circuit automatique lorsque U_t dépasse 24 V (masses situées dans les locaux ou emplacements de travail très conducteurs) ou 50 V (autres cas).	Relais de masse, disjoncteur différentiel.
	Raccordement donnant toutes garanties (bon serrage).	Bornes
	Avoir une faible résistance (U_t<). Avoir une section proportionnée au courant. Avoir une bonne protection. Être indépendante des autres canalisations, accessible et assurer la continuité électrique.	Matériel conforme aux règlements de l'UTE 
	La liaison avec la terre doit se faire avec la plus faible résistance possible (U_t <) et un matériel offrant une grande résistance à la corrosion (pour sa conservation).	Éléments métalliques enfouis dans le sol. 

7.7.3. DISJONCTEUR DIFFÉRENTIEL (DD)

• Principe de fonctionnement

En l'absence de défaut (rupture d'isolant), nous aurons :

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 \Rightarrow \vec{I}_f = 0$$

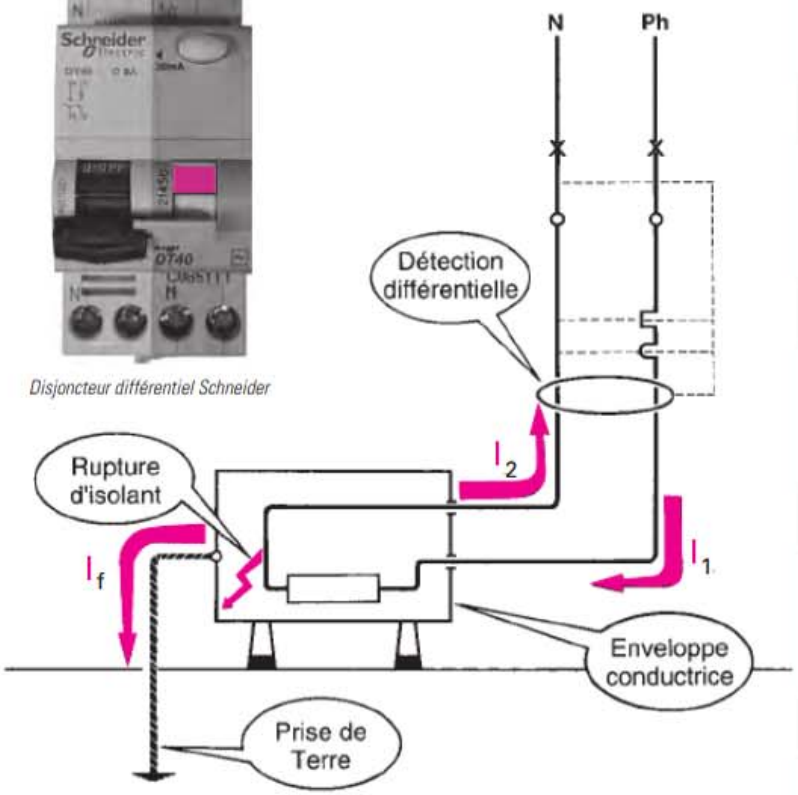
En présence d'un défaut d'isolement, nous aurons :

$$\vec{I}_1 > \vec{I}_2$$
$$\text{avec } \vec{I}_1 - \vec{I}_2 = \vec{I}_f$$

Le circuit de détection du différentiel va enregistrer cet écart entre le courant **sortant** et le courant **entrant**, ouvrant ainsi les contacts.

L'équipement sera automatiquement mis hors tension.

Disjoncteur différentiel Schneider



• Sensibilités des disjoncteurs différentiels

10 mA, 30 mA, 100 mA, 300 mA, 500 mA, 1 A.

Les DD 30 et 300 mA sont utilisés dans les installations électriques domestiques.

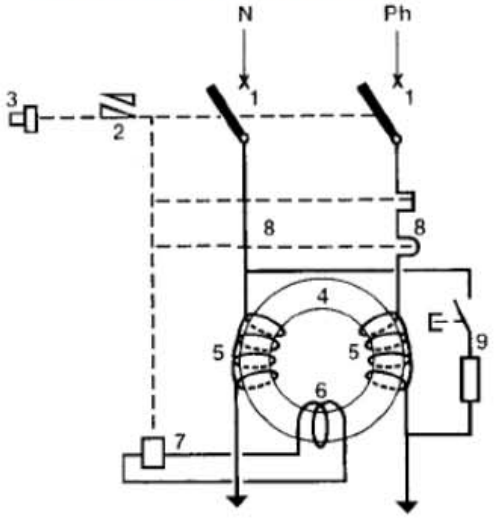
• Temps de coupure

La coupure du circuit doit être conforme au tableau de la norme NF C 15-100 ci-dessous.

Tension de contact présumée (V)	Temps de coupure maximal du dispositif de protection (s)	
	Courant alternatif	Courant continu
< 50	5	5
50	5	5
75	0,60	5
90	0,45	5
120	0,34	5
150	0,27	1
220	0,17	0,40
280	0,12	0,30
350	0,08	0,20
500	0,04	0,10
Durée maximale de maintien de la tension de contact		

Classe	$I_{\Delta n}$	2 $I_{\Delta n}$	10 $I_{\Delta n}$
T01	1 000 ms	150 ms	30 ms
T02	200 ms	100 ms	30 ms
T1	1 000 ms	250 ms	150 ms
T2	200 ms	100 ms	100 ms

• Structure interne d'un disjoncteur différentiel monophasé



1. Contacts de puissance
2. Accrochage mécanique
3. Élément de réarmement
4. Tore magnétique
5. Bobinages principaux
6. Bobine de détection
7. Relais sensible de détection
8. Détection thermique et magnétique
9. Bouton de test et résistance de test

7.7.4. HABILITATION

L'HABILITATION est la reconnaissance par l'EMPLOYEUR, de la capacité d'une personne placée sous son autorité, à accomplir en sécurité vis-à-vis du risque électrique, les tâches qui lui sont confiées.

• Tensions

Les installations et les équipements électriques ainsi que les ouvrages, sont classés en fonction de la **plus grande valeur des tensions nominales** (valeur efficace) existant :

- entre deux conducteur ou pièces conductrices quelconques,
- entre un conducteur ou pièces mécaniques et la terre (ou les masses).

Domaines de tension		Valeur de la tension nominale U_n exprimée en volts	
		en courant alternatif	en courant continu lisse
Très basse tension domaine TBT		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse tension	domaine BT	$50 < U_n \leq 1000$	$120 < U_n \leq 1500$
Haute tension	domaine HT A	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 75000$
	domaine HT B	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

Dans les conditions normales d'exploitation, la tension nominale d'un ouvrage peut dépasser de 10 % au maximum sans entraîner une modification du domaine des tensions. En courant continu cette augmentation peut aller jusqu'à 20 % (en traction électrique).

Cas particulier de la très basse tension (TBT)

Pour des travaux et interventions réalisés sur des installations ou équipements en **TBT**, il faut distinguer ceux :

- réalisés en très basse tension de sécurité (**TBTS**),
- réalisés en très basse tension de protection (**TBTP**),
- réalisés en très basse tension fonctionnelle (**TBTF**).

• Définitions

- **Installations :** ensemble des matériels qui transforment et distribuent par canalisations fixes l'énergie électrique.
- **Équipements :** canalisations et appareillages (y compris les circuits de commande et de protection) utilisant l'énergie électrique.
- **Interventions :** opérations de courte durée et n'intéressant qu'une faible étendue de l'ouvrage réalisé sur une installation ou un équipement. Les interventions font l'objet d'une analyse sur place. La notion d'intervention est limitée aux domaines TBT et BT. L'intervention est souvent synonyme de dépannage.
- **Travaux :** toute opération dont le but et de réaliser, de modifier, d'entretenir ou de réparer un ouvrage électrique. Les travaux font l'objet d'une préparation soit au coup par coup, soit générale.

Récapitulatif des éléments des symboles

1re caractère Domaine de tension	Tensions	B : basse tension (BT) et très basse tension (TBT) H : haute tension
2e caractère Type d'opération	Travaux d ordre non électrique	O : pour exécutant ou chargé de chantier
	Travaux d ordre électrique	1 : pour un exécutant 2 : pour un chargé de travaux
	Interventions BT	R : intervention BT générale S : Intervention BT élémentaire
	Consignation	C : pour un chargé de consignation électrique
	Opérations spécifiques	E : Essai, Mesurage, Vérification ou Manoeuvre
	Opérations photovoltaïques	P : Opérations photovoltaïques
3e caractère Lettre additionelle	Complète si nécessaire les travaux	V : travaux réalisés dans la zone de voisinage renforcé HT (zone 2) ou travaux d'ordre électriques hors tension dans la zone des opérations électriques BT (zone 4) : T : travaux sous tension N : nettoyage sous tension X : opération spéciale
Attribut	Complète si nécessaire les caractères précédents	Écriture en clair du type d'opération, d'essai de mesurage, de vérification, ou de manoeuvre d'un opérateur.

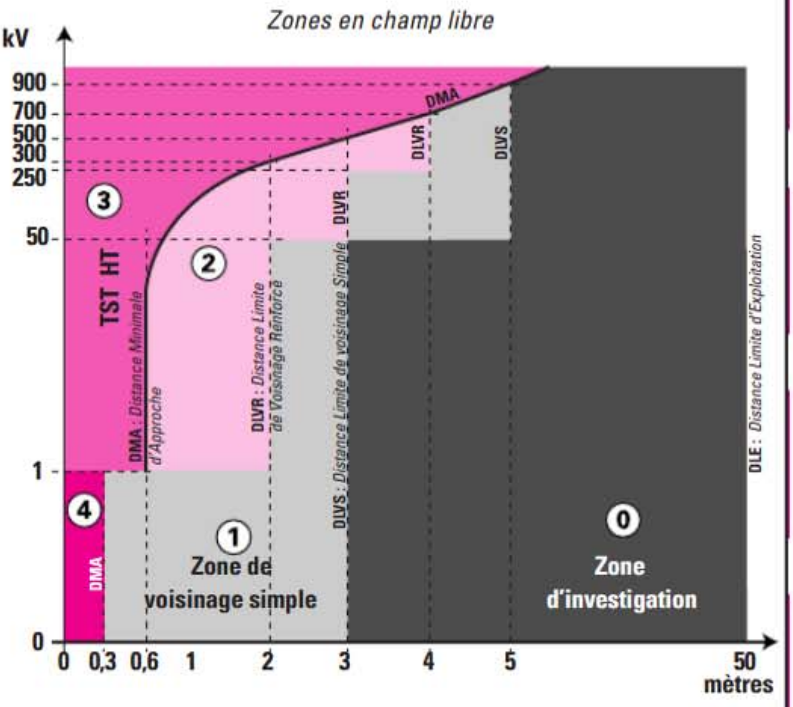
NOTE : Ce tableau ne permet pas à lui seul de déterminer les habilitations requises.

• Symboles d'habilitation utilisés pour les travaux d'ordre électrique

	Travaux sur ouvrage ou installation consigné BT et HT		Travaux dans la zone des opérations électriques BT (zone 4)				Travaux au voisinage simple BT et HT (zone 1)		Travaux au voisinage renforcé HT (zone 2)		Travaux dans la zone des travaux sous tension HT (zone 3)	
			Travaux hors tension		Travaux hors tension							
	Exécutant	Chargé de travaux	Exécutant	Chargé de travaux	Exécutant	Chargé de travaux	Exécutant	Chargé de travaux	Exécutant	Chargé de travaux	Exécutant	Chargé de travaux
BT	B1	B2	B1V	B2V	B1T B1N	B2T B2N	B1	B2	sans objet			
HT	H1	H2	sans objet				H1	H2	H1V	H2V	H1T H1N	H2T H2N

7.7.5. DISTANCES LIMITES DES ZONES D'ENVIRONNEMENT

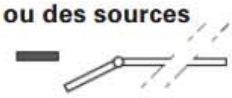
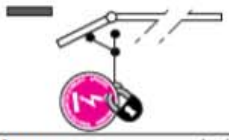
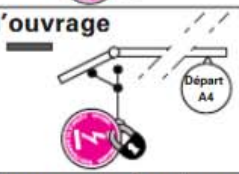
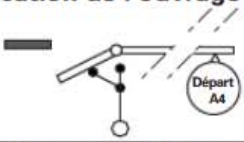
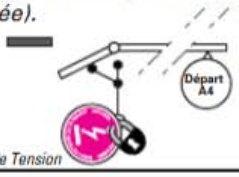
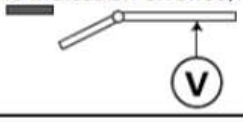
Les zones d'environnement à proximité de **P**ièces **N**ues **S**ous **T**ension (PNST) dépendent du niveau de tension de l'installation, de son type et de sa position. Ces zones sont définies entre des distances réglementaires établies à partir des PNST (**P**ièces **N**ues **S**ous **T**ension) accessibles. L'analyse du risque électrique dans l'environnement, préalablement à tous travaux, est indispensable. Elle doit se traduire par une évaluation précise des distances et une détermination des zones à risque dues à la présence de PNST.



0 Zone d'investigation : Le personnel non habilité peut y travailler sans franchir ses limites. Cette zone n'existe que pour les installations avec PNST en champ libre.
1 Zone de voisinage simple : Réservée au personnel habilité
2 Zone de voisinage renforcé HT : Réservée au personnel habilité. Cette zone n'existe qu'en haute tension.
3 Zone des travaux sous tension : Réservée aux électriciens habilités. Cette zone n'existe qu'en haute tension
4 Zone de voisinage renforcé BT : Réservée au personnel habilité. Cette zone n'existe qu'en basse tension.

7.7.6 CONSIGNATION

Suite d'opérations destinées à mettre hors tension des équipements, une installation ou une partie d'installation, pour qu'on puisse y effectuer des travaux ou des interventions sans risques de maintien ou de retour accidentel de la tension.

	Procédure obligée en BT	Remarques
Conditions d'exécution Préidentification	**Condition d'exécution** Vous effectuez une intervention de dépannage. La zone de travail est d'un accès limité aux seuls opérateurs pendant toute la durée de l'intervention.	*Connaissance de la situation géographique du chantier, des dossiers et schémas, des ouvrages et installations.* *Tout autre moyen approprié tel que le repérage sur place.*
Séparation de la ou des sources 	**Séparation de la ou des sources**	*Mise hors tension de tous les circuits de puissance et de commande de façon : pleinement apparente y compris les alimentations de secours.*
Condamnation (signalisation) 		*Verrouillage par un dispositif matériel difficilement neutralisable ; Exemple : cadenas. Information claire et permanente de la réalisation de la condamnation.*
Identification de l'ouvrage 	**Identification de l'ouvrage** 	*Elle a pour but de s'assurer que les travaux sont effectués sur l'installation ou l'équipement consigné. Pour cela, les schémas et le repérage des éléments devront être lisibles et mis à jour.*
Vérification de l'absence de tension *(vérifier que la VAT ne vous a pas fourni une indication erronée).*  **VAT** : *Vérification de l'Absence de Tension*	**Vérification de l'absence de tension** *(vérifier que la VAT ne vous a pas fourni une indication erronée).* 	*La VAT est testée avant et après la vérification.* *La vérification d'absence de tension s'effectue entre tous les conducteurs (y compris le neutre) entre eux et la terre.*

8 Automatisation des tâches

8.1. NOTIONS SUR LES ASSERVISSEMENTS 434
8.1.1. Commande en boucle ouverte 434
8.1.2. Structure d'un système asservi 435
8.1.3. Performances des systèmes asservis 436
8.1.4. Réponse indicielle 437
8.2. ARCHITECTURE GÉNÉRALE D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ 438
8.3. LES CAPTEURS 439
8.3.1. Différents types d'informations 439
8.3.2. Démarche générale de choix d'un détecteur (capteur « TOR ») 440
8.3.3. Typologie des principaux capteurs 441
8.3.4. Câblage d'un capteur TOR 442
8.3.5. Détecteur de proximité inductif (DPI) 443
8.3.6. Détecteur de proximité capacitif (DPC) 443
8.3.7. Détecteur de proximité optique (DPO) 444
8.3.8. Description des codes-barres ou codes-points 446
8.4. LE GRAFCET 447
8.4.1. Cycle de vie d'un système automatisé 447
8.4.2. Principes généraux 448
8.4.3. Modes de sortie 449
8.4.4. Application des règles d'évolution 449
8.4.5. Action continue ou monostable 452
8.4.6. Action mémorisée 452
8.4.7. Divergence, Convergence en « OU » 452
- Conflit 452
- Reprise de séquence 453
- Saut d'étapes 453
8.4.8. Divergence, convergence en « ET » 453
8.4.9. Action conditionnelle 454
8.4.10. Action temporisée 454
8.4.11. Front montant, front descendant 454
8.4.12. Compteur 455
8.4.13. Synchronisation 455
8.4.14. Structure en tâche 456
8.4.15. Macro-étape 456
8.4.16. Structuration par encapsulation 456
8.4.17. Exemple de résolution d'un problème (accès à un parking) 457
8.4.18. Le GRAFCET du point de vue système 457
8.4.19. Le GRAFCET du point de vue opérative 458
8.4.20. Le GRAFCET du point de vue commande 458
8.4.21. Synthèse d'un automatisme 459
- Schéma à contacts du système parking 459
- Schéma réalisé à l'aide des bistables RS 459
- Description d'un automate programmable Zeliologic 2 460
8.5. LE GRAPHE D'ÉTATS 462
8.5.1. StateFlow, définition, constitution 462
8.5.2. Transition 463
8.5.3. Super-états ou états composites 464
8.5.4. Diagrammes de flux : Flow Charts 465
8.5.5. Exemple, digicode avec un code à une longueur fixe de 6 chiffres 466

8.1. NOTIONS SUR LES ASSERVISSEMENTS

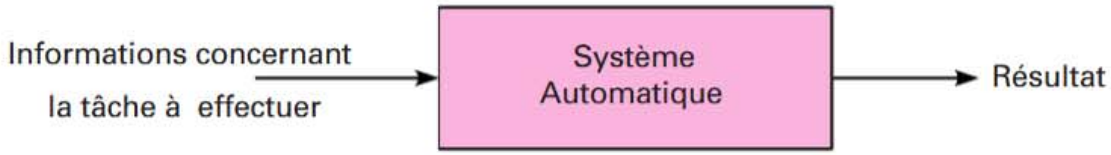
• Systèmes automatisés

Types de systèmes
Quelques exemples du monde industriel :
- Photocopieurs, robots de manutention, machines d'imprimeries, fours de traitement...

Il s'agit de systèmes réalisant des tâches avec un minimum d'intervention humaine.

Parmi tous ces systèmes, il existe deux familles d'automatismes :
- Les systèmes qui réalisent des opérations prédéterminées et invariables (on parle de cycles) : ces systèmes sont dits **combinatoires** ou **séquentiels** ;
- Les systèmes qui réalisent des opérations dont le déroulement ne peut être connu à l'avance (perturbations), **il s'agit de systèmes asservis**.

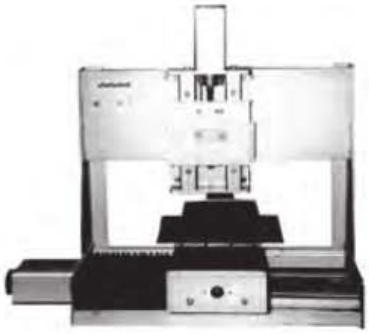
Représentation



8.1.1. COMMANDE EN BOUCLE OUVERTE

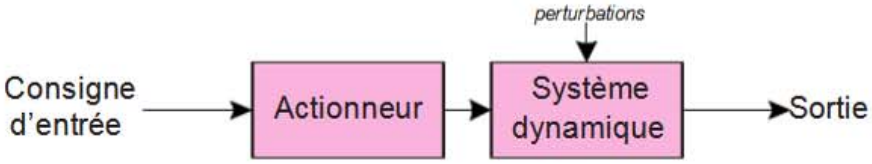
En régulation, un contrôle en boucle ouverte ou contrôle ouvert est une forme de contrôle d'un système qui ne prend pas en compte la réponse de ce système (appelée rétroaction).

Exemple : Usinage 3 axes Charly robot



Chaque axe est mis en mouvement par un moteur pas à pas.
Un moteur pas à pas permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire.
Ce type de moteur est très courant dans tous les dispositifs où l'on souhaite faire du **contrôle de vitesse ou de position en boucle ouverte**, typiquement dans les systèmes de positionnement. A chaque impulsion l'actionneur tourne d'une fraction de tour.

Inconvénient :
En cas de perturbation, il peut y avoir une de perte de position, le système n'est plus capable de connaître sa position réelle.



Ce contrôle, simple en principe, est à utiliser avec précaution si le système est naturellement instable. Pour le mettre en place, il faut au préalable avoir parfaitement modélisé le système, que la commande soit parfaitement adaptée et qu'il n'y ait aucune perturbation.

L'opposé du contrôle en boucle ouverte est le contrôle en boucle fermée qui, lui, intègre la rétroaction du système qui est en général négative (contre-réaction).

8 Automatisation des tâches

8.1. NOTIONS SUR LES ASSERVISSEMENTS 434
8.1.1. Commande en boucle ouverte 434
8.1.2. Structure d'un système asservi 435
8.1.3. Performances des systèmes asservis 436
8.1.4. Réponse indicielle 437
8.2. ARCHITECTURE GÉNÉRALE D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ 438
8.3. LES CAPTEURS 439
8.3.1. Différents types d'informations 439
8.3.2. Démarche générale de choix d'un détecteur (capteur « TOR ») 440
8.3.3. Typologie des principaux capteurs 441
8.3.4. Câblage d'un capteur TOR 442
8.3.5. Détecteur de proximité inductif (DPI) 443
8.3.6. Détecteur de proximité capacitif (DPC) 443
8.3.7. Détecteur de proximité optique (DPO) 444
8.3.8. Description des codes-barres ou codes-points 446
8.4. LE GRAFCET 447
8.4.1. Cycle de vie d'un système automatisé 447
8.4.2. Principes généraux 448
8.4.3. Modes de sortie 449
8.4.4. Application des règles d'évolution 449
8.4.5. Action continue ou monostable 452
8.4.6. Action mémorisée 452
8.4.7. Divergence, Convergence en « OU » 452
- Conflit 452
- Reprise de séquence 453
- Saut d'étapes 453
8.4.8. Divergence, convergence en « ET » 453
8.4.9. Action conditionnelle 454
8.4.10. Action temporisée 454
8.4.11. Front montant, front descendant 454
8.4.12. Compteur 455
8.4.13. Synchronisation 455
8.4.14. Structure en tâche 456
8.4.15. Macro-étape 456
8.4.16. Structuration par encapsulation 456
8.4.17. Exemple de résolution d'un problème (accès à un parking) 457
8.4.18. Le GRAFCET du point de vue système 457
8.4.19. Le GRAFCET du point de vue opérative 458
8.4.20. Le GRAFCET du point de vue commande 458
8.4.21. Synthèse d'un automatisme 459
- Schéma à contacts du système parking 459
- Schéma réalisé à l'aide des bistables RS 459
- Description d'un automate programmable Zeliologic 2 460
8.5. LE GRAPHE D'ÉTATS 462
8.5.1. StateFlow, définition, constitution 462
8.5.2. Transition 463
8.5.3. Super-états ou états composites 464
8.5.4. Diagrammes de flux : Flow Charts 465
8.5.5. Exemple, digicode avec un code à une longueur fixe de 6 chiffres 466

8.1. NOTIONS SUR LES ASSERVISSEMENTS

• Systèmes automatisés

Types de systèmes

Quelques exemples du monde industriel :

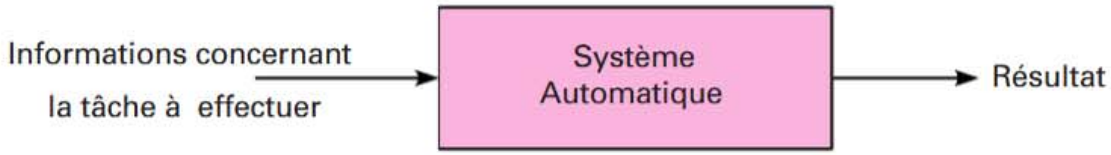
- Photocopieurs, robots de manutention, machines d'imprimeries, fours de traitement...

Il s'agit de systèmes réalisant des tâches avec un minimum d'intervention humaine.

Parmi tous ces systèmes, il existe deux familles d'automatismes :

- Les systèmes qui réalisent des opérations prédéterminées et invariables (on parle de cycles) : ces systèmes sont dits **combinatoires** ou **séquentiels** ;
- Les systèmes qui réalisent des opérations dont le déroulement ne peut être connu à l'avance (perturbations), **il s'agit de systèmes asservis**.

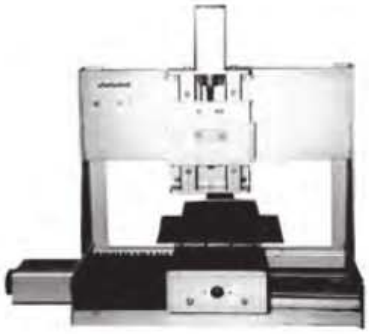
Représentation



8.1.1. COMMANDE EN BOUCLE OUVERTE

En régulation, un contrôle en boucle ouverte ou contrôle ouvert est une forme de contrôle d'un système qui ne prend pas en compte la réponse de ce système (appelée rétroaction).

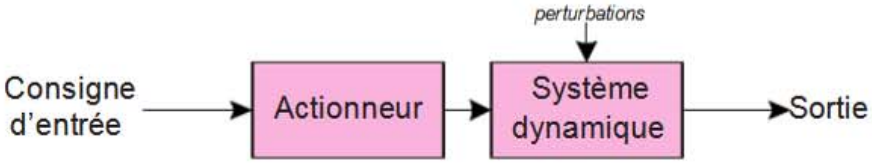
Exemple : Usinage 3 axes Charly robot



Chaque axe est mis en mouvement par un moteur pas à pas.
Un moteur pas à pas permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire.
Ce type de moteur est très courant dans tous les dispositifs où l'on souhaite faire du **contrôle de vitesse ou de position en boucle ouverte**, typiquement dans les systèmes de positionnement. A chaque impulsion l'actionneur tourne d'une fraction de tour.

Inconvénient :

En cas de perturbation, il peut y avoir une de perte de position, le système n'est plus capable de connaître sa position réelle.

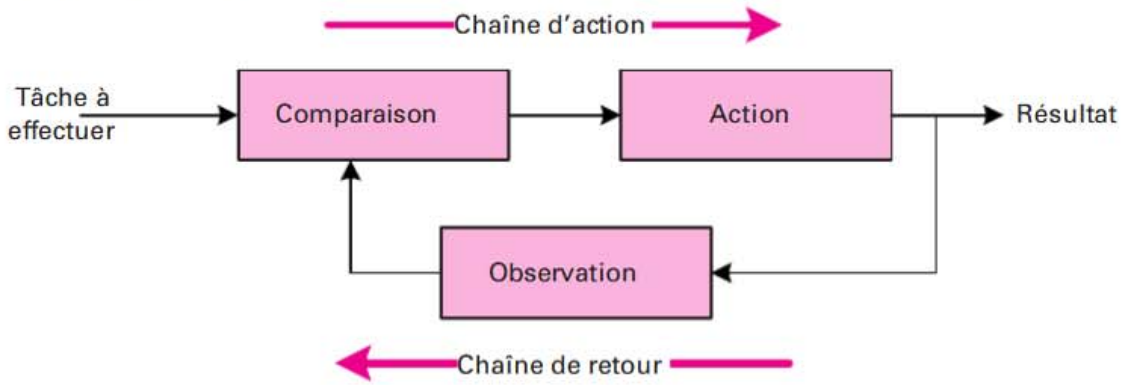


Ce contrôle, simple en principe, est à utiliser avec précaution si le système est naturellement instable. Pour le mettre en place, il faut au préalable avoir parfaitement modélisé le système, que la commande soit parfaitement adaptée et qu'il n'y ait aucune perturbation.

L'opposé du contrôle en boucle ouverte est le contrôle en boucle fermée qui, lui, intègre la rétroaction du système qui est en général négative (contre-réaction).

8.1.2. STRUCTURE D'UN SYSTÈME ASSERVI

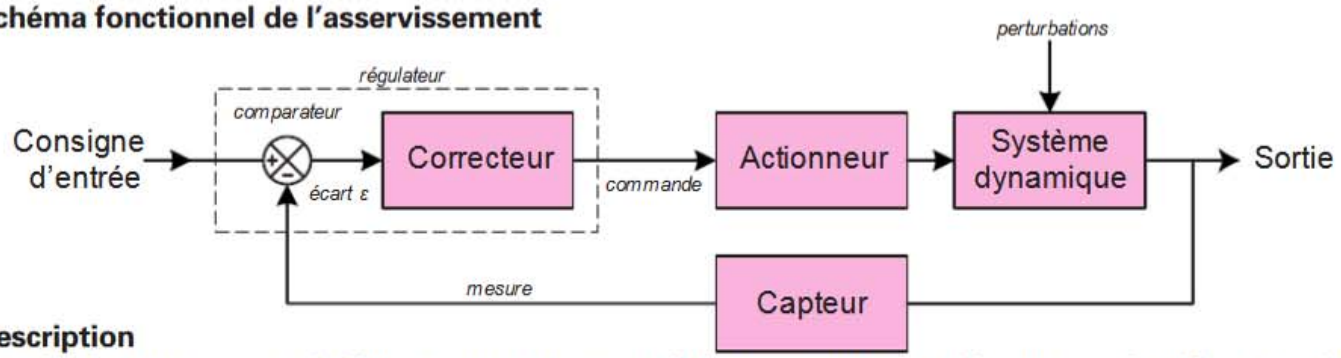
Chaîne d'action, chaîne de retour



Un système asservi est un système bouclé, doté d'une chaîne d'action (ou chaîne directe) et d'une chaîne de retour (ou chaîne d'acquisition).

Sur la représentation précédente, on s'aperçoit qu'il est nécessaire, au niveau du traitement, de pouvoir comparer l'entrée et la sortie. Plus exactement la consigne (demande faite au niveau de l'entrée) et le résultat de l'observation de la sortie.

Schéma fonctionnel de l'asservissement



Description

Le **régulateur**, composé d'un **comparateur** et d'un **correcteur**, est l'organe « intelligent » du système. Il contrôle la manière dont la **consigne** a été exécutée et modifie la commande si nécessaire.

L'**actionneur** fournit la puissance au processus à partir du signal élaboré par le régulateur.
C'est le « muscle » du système.

Le **système dynamique** évolue suivant les lois physiques qui le caractérisent. Il peut subir de l'extérieur des perturbations prévisibles ou non.

Le **capteur** est l'organe qui traduit une grandeur physique à mesurer en signal exploitable par le comparateur. C'est par exemple un codeur utilisé en capteur de position, une dynamo tachymétrique (capteur de vitesse), un débitmètre...

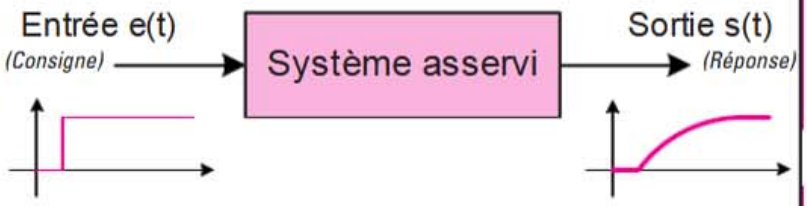
• Régulation et Asservissement

On parle de régulation lorsque le système asservi est commandé par une grandeur physique constante et qu'il doit maintenir une sortie constante quelles que soient les perturbations qu'il subit (exemple de la régulation de chauffage).

On parle d'asservissement ou de système suiveur lorsque la consigne du système asservi évolue au cours du temps.
Par exemple radar de poursuite.

8.1.3. PERFORMANCES DES SYSTÈMES ASSERVIS.

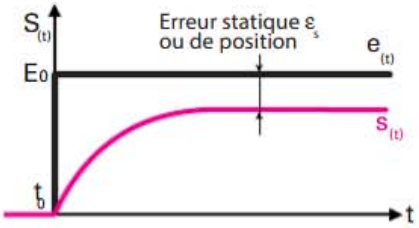
L'étude du comportement d'un système asservi permet de mettre en évidence trois caractéristiques essentielles de ces systèmes.



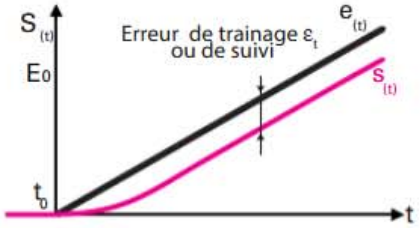
L'évolution de la sortie du système asservi soumis à une sollicitation en entrée, s'appelle aussi réponse.

• Précision

Sous l'action d'une entrée type e(t) ci-dessous, un système linéaire tend à présenter en sortie un signal s(t) du même type. Si, en régime établi (au bout d'un certain temps), il existe une différence entre la sortie et l'entrée, alors il y a une erreur permanente.



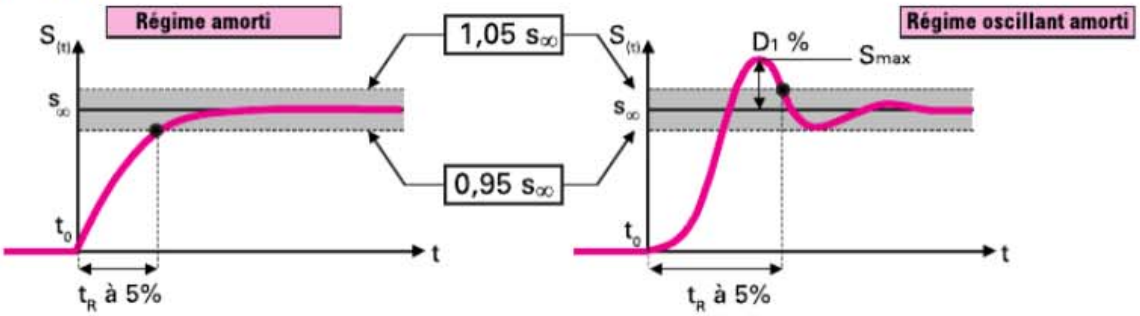
$S_{(t)}$: réponse à un échelon



$S_{(t)}$: réponse à une rampe

• Rapidité

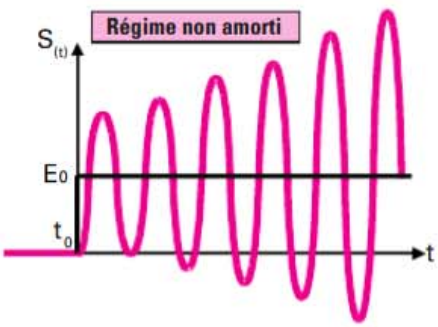
C'est le temps que met le système à réagir à une variation brusque de la grandeur d'entrée. Cette caractéristique est déterminée pour une entrée particulière : un échelon. La valeur finale s_∞ de s(t) étant souvent atteinte de manière asymptotique, la rapidité est généralement caractérisée par le temps de réponse à 5%.

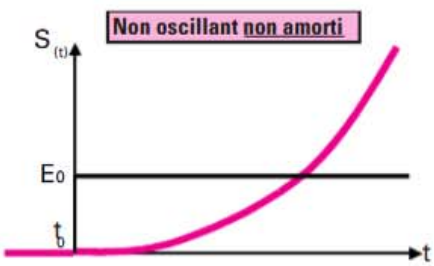


C'est le temps mis par la réponse s(t) pour que : $t \geq t_{R(5\%)} \Rightarrow 0,95 \cdot S_\infty \leq s_{(t)} \leq 1,05 \cdot S_\infty$

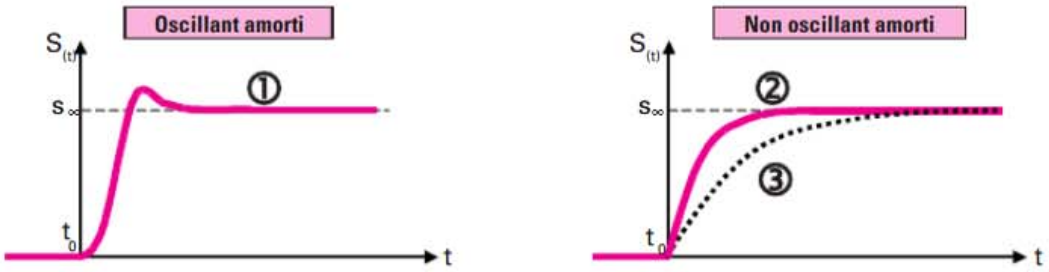
• Stabilité

Pour la grande majorité des systèmes, on ne peut pas accepter, qu'à consigne constante, la grandeur de sortie ne converge pas vers une valeur constante comme ci-dessous :





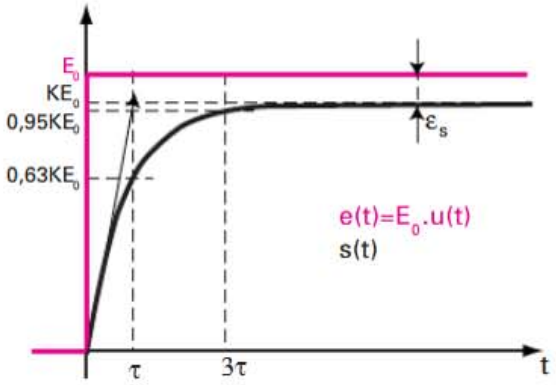
Le comportement que l'on souhaite normalement obtenir est semblable à ceux proposés ci dessous :



Si l'amortissement est trop important (courbe 3), cela conduit à une perte significative de rapidité pour le système. La réponse 1 propose un bon compromis entre amortissement et rapidité pour un système oscillant. On lui préfèrera la réponse 2 dans les applications où l'amplitude des oscillations doit impérativement rester nulle (cas d'un contrôle de la position d'un mobile).

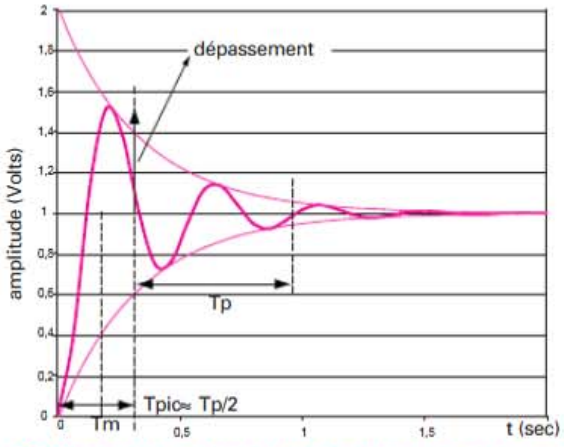
8.1.4. RÉPONSE INDICIELLE

Exemple : réponse indicielle d'un système du premier ordre



- La pente à l'origine est K.E0/τ
- La pente à l'infini est nulle.
- Pour t = 0, la réponse est s(0) = 0
- Pour t tendant vers l'infini, la réponse tend vers K.E0
- Au bout du temps τ la réponse atteint 63% de la réponse finale.
- Au bout d'un temps 3 τ, la réponse atteint 95% de la réponse finale.

Exemple : réponse indicielle d'un système du second ordre

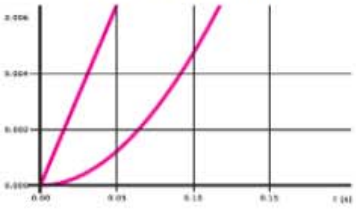


- Le comportement du système est donc oscillant amorti.
- L'amortissement est caractérisé par le dépassement.
- L'allure de la réponse dépend de la valeur de ξ.
  Pour ξ > 0,7 pas d'oscillation.
  Pour ξ = 0,7 le système est oscillant, l'oscillation n'étant plus perceptible après une demi-période.
  Pour ξ < 0,7 le système est franchement oscillant.

• Différence entre une réponse premier ordre et second ordre

Seul le début de la montée est modifié, notamment le départ qui est plus lent (tangente horizontale).

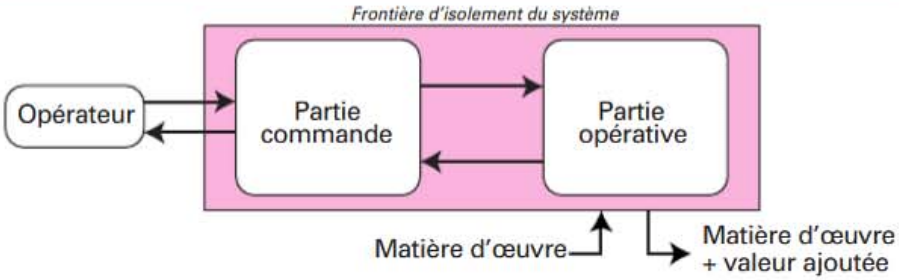
Zoom à l'origine



8.2. ARCHITECTURE GÉNÉRALE D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ

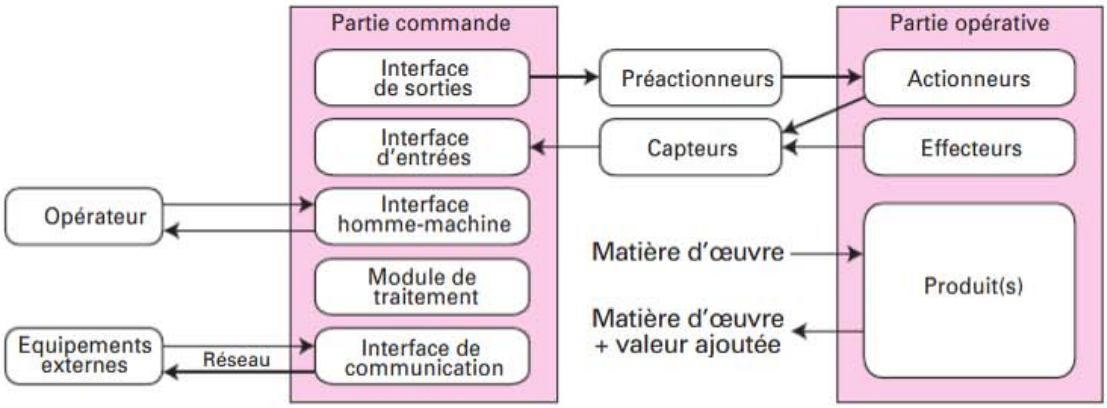
Un système industriel a pour but d'apporter une valeur ajoutée à une matière d'oeuvre.

Le système est automatisé si tout ou partie du savoir-faire (conférant la valeur ajoutée) **est confié au système.**



À l'intérieur de ce système apparaissent **deux parties en interrelations** : la **Partie Commande** et la **Partie Opérative.**

Lors de l'étude de chacune de ces parties, des frontières d'isolement sont nécessaires à la mise en évidence des interactions de ces parties avec leur environnement.



• Opérateur

Il supervise le déroulement des opérations automatisées réalisées sur le système :

- il reçoit des informations via des écrans, des voyants, etc.
- il transmet des informations au système via des unités de commande (boutons, commutateurs, etc.) ou des terminaux à écran tactile.

• Partie commande

Elle établit les relations permettant de déterminer chaque sortie en fonction des entrées.

- Interface de sorties : il génère les « ordres d'action ».
- Interface d'entrées : il reçoit les informations générées par les capteurs.
- Interface homme-machine (IHM) : elle assure la liaison entre l'opérateur et le système
- Module de traitement : il assure la gestion du fonctionnement du système par l'intermédiaire d'un automate programmable industriel (API) ou d'un ordinateur.
- Interface de communication : elle permet d'échanger des informations avec l'environnement du système (systèmes automatisés associés, services chargés d'exploiter les données du système, etc.).

• Préactionneurs

Ils gèrent et adaptent l'énergie. La partie commande est souvent réalisée à partir d'un système électronique faible puissance. Il faut donc adapter une faible énergie vers une énergie plus forte, ou vers une énergie non électrique. Les préactionneurs sont souvent des relais, contacteurs, distributeurs, etc.

• Capteurs

Ils acquièrent une grandeur physique et la transforment en une grandeur compatible avec la partie commande.

• Partie opérative

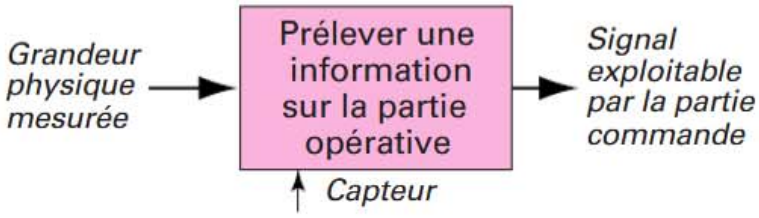
Elle permet d'agir sur la matière d'oeuvre et de procurer la valeur ajoutée.

- Module «Actionneurs» : il agit sur le processus.
- Module «Effecteurs» : il opère la transformation du produit.

8.3. LES CAPTEURS

Les capteurs sont des composants de la chaîne d'acquisition dans une chaîne fonctionnelle.

Les capteurs prélèvent une information sur le comportement de la partie opérative et la transforment en une information exploitable par la partie commande.



Une information est une grandeur abstraite qui précise un événement particulier parmi un ensemble d'événements possibles.

Pour pouvoir être traitée, cette information sera portée par un support physique (énergie), on parlera alors de signal.

Les signaux sont généralement de nature électrique (Pneumatique dans certains cas).

• Principales grandeurs physiques mesurées

- Position d'un mobile dans l'espace (présence d'un objet en un point donné).
- Vitesse.
- Effort.
- Température.
- Etc.
- Éclairement.
- Pression.
- Vitesse angulaire.

8.3.1. DIFFÉRENTS TYPES D'INFORMATIONS

Information à caractère analogique

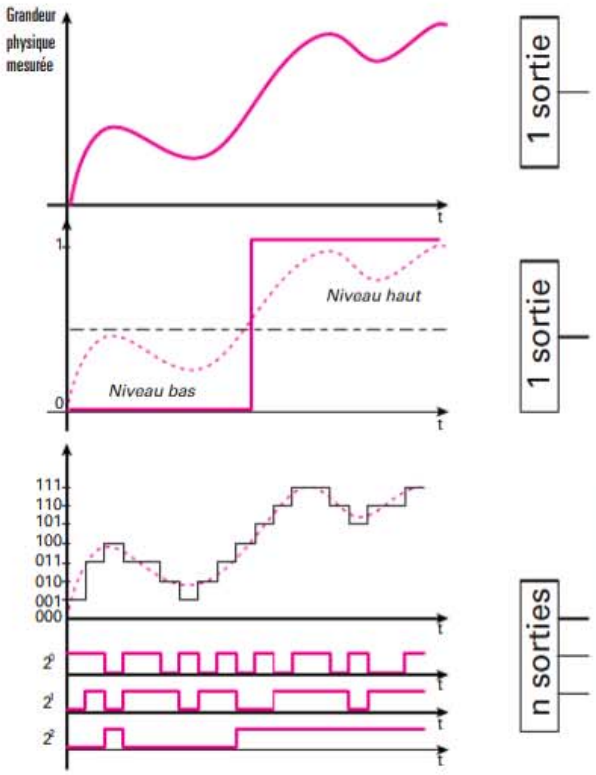
Signal véhiculé sur un conducteur et qui peut prendre une infinité de valeurs.

Information à caractère logique

Signal véhiculé sur un conducteur et qui peut prendre seulement 2 valeurs (0 ou 1).
Information dite «**T**out **O**u **R**ien» (**TOR**).

Information à caractère numérique

Signaux véhiculés sur plusieurs conducteurs ou sur un conducteur d'une manière sérielle.
Il peut prendre au maximum 2^n avec n le nombre de bits représentant la valeur numérique.
Chaque sortie individuelle a un caractère logique.
Le signal supportant l'information est quantifiable, il varie de façon discrète (par incrément).



• Caractérisation des capteurs

On peut caractériser les capteurs selon deux critères :

- **en fonction de la grandeur mesurée** ; on parle alors de capteur de position, de température, de vitesse, d'effort, de pression, etc. ;
- **en fonction du caractère de l'information délivrée** ; on parle alors de capteurs logiques appelés aussi détecteurs ou capteurs tout ou rien (TOR), de capteurs analogiques ou numériques.

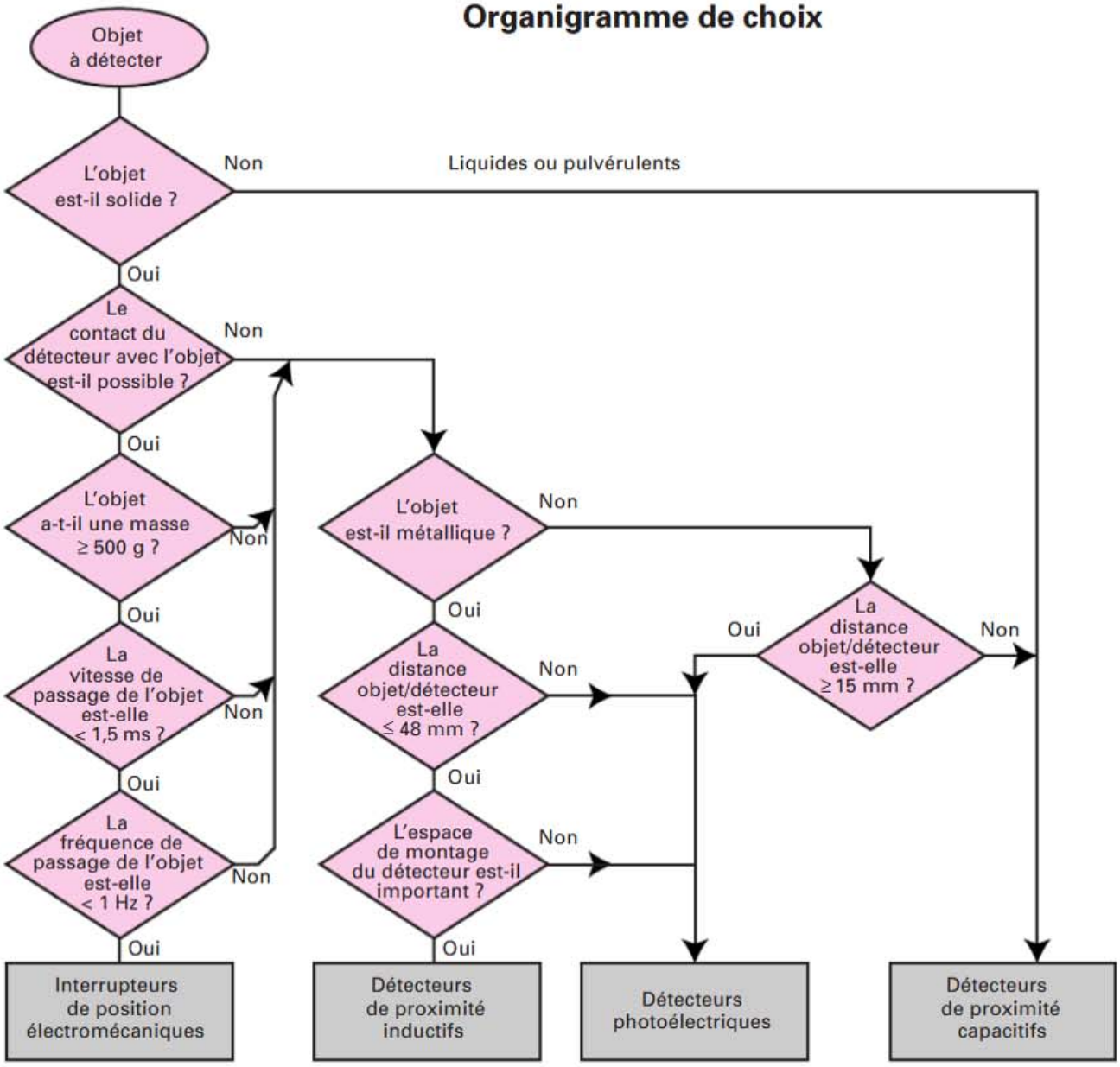
8.3.2. DÉMARCHE GÉNÉRALE DE CHOIX D'UN DÉTECTEUR (CAPTEUR «TOR»)

• Démarche générale de choix d'un détecteur de position *d'après SCHNEIDER ELECTRIC*

Principaux facteurs intervenant dans le choix d'un détecteur de position :

- les conditions d'exploitation, caractérisées par la fréquence de manœuvres, la nature, la masse et la vitesse du mobile à contrôler, la précision et la fidélité exigées, ou encore l'effort nécessaire pour actionner le contact,
- la nature de l'ambiance : humide, poussiéreuse, corrosive, température,
- le niveau de protection recherché contre les chocs, les projections liquides,
- le nombre de cycles de manoeuvres,
- la nature du circuit électrique,
- le nombre et la nature des contacts,
- la place disponible pour loger, fixer et régler le capteur,
- etc.

Organigramme de choix



Phase 1: Détermination de la famille de détecteurs adaptée à l'application (nature de l'objet à détecter, contact possible avec l'objet, distance objet/détecteur, masse de l'objet, vitesse de défilement, cadence de manœuvres...).

Phase 2 : Détermination du type et de la référence du détecteur recherché (environnement : température, poussières..., source de courant : alternatif ou continu, signal de sortie : électromécanique ou statique, raccordement,...).

8.3.3. TYPOLOGIE DES PRINCIPAUX CAPTEURS

• Sortie à caractère logique TOR

Grandeur physique : Position

Nature du signal de sortie : électrique

Interrupteur de position électromécanique : ouverture ou fermeture d'un circuit électrique par l'intermédiaire de contacts.
Détecteur de proximité inductif : perturbation d'un champ magnétique.
Détecteur de proximité capacitif : perturbation d'un champ électrique.
Détecteur photoélectrique : rupture ou perturbation d'un flux lumineux.

Interrupteur de position électromécanique

Détecteur de proximité inductif

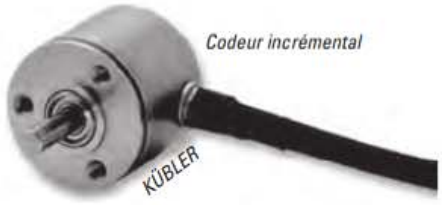
Détecteur de proximité capacitif

Détecteur photoélectrique

• Sortie à caractère numérique

Nature du signal de sortie : électrique

Codeur incrémental : comptage d'impulsions.
Codeur absolu : Indication d'un code binaire en fonction de la position angulaire de l'axe de sortie.
Capteur de température : capteur intégré à une sortie numérique série.


Codeur incrémental
KÜBLER

Codeur absolu
VISHAY SPECTROL

Capteur de température
MAXIM INTEGRATED PRODUCTS

• Sortie à caractère analogique

Nature du signal de sortie : électrique

Capteur de position linéaire : Variation d'une résistance (potentiomètre).
Capteur de vitesse : Dynamo tachymétrique.
Capteur de température : Thermocouple (Variation d'une tension (fem)).
Capteur de température : Thermistance CTN, CTP (Variation d'une résistance).
Capteur de déformation : Jauge d'extensiométrie (de contrainte) (Variation d'une résistance).
Capteur de champ magnétique : Sonde à effet Hall (Variation d'une tension (fem)).
Capteur d'humidité : Variation d'une résistance.
Capteur de gaz : Variation d'une résistance.
Capteur de vibration : Microphone (Variation d'une tension (fem)).

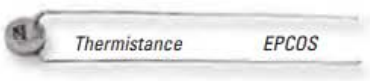
potentiomètre
PANASONIC

Thermocouple PT100
SN Microlide

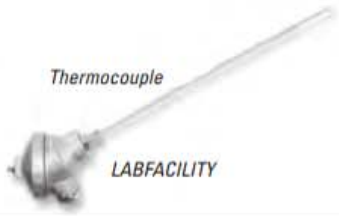
Capteur d'humidité
GE SENSING / THERMOMETRICS

Jauge d'extensiométrie
FUTEK

Sonde à effet Hall
ALLEGRO MICROSYSTEMS


Thermistance EPCOS

Smh
Dynamo tachymétrique

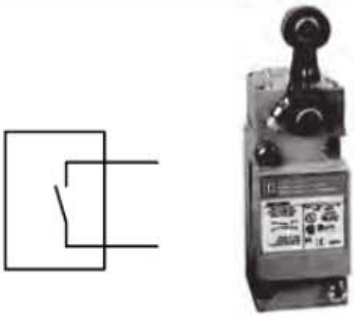

Thermocouple
LABFACILITY

Capteur de gaz
FIGARO

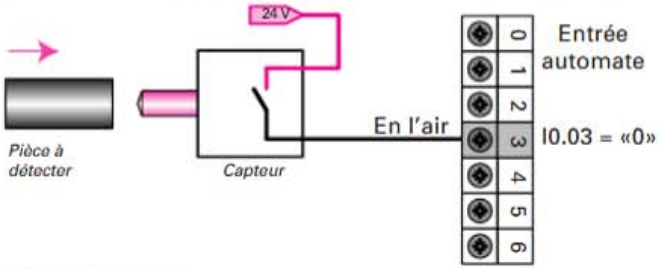
8.3.4. CÂBLAGE D'UN CAPTEUR TOR

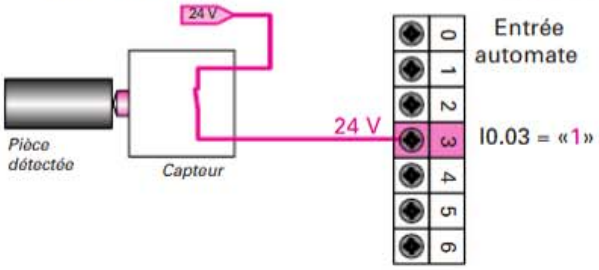
• Capteur passif

Lorsque la grandeur physique à détecter possède suffisamment d'énergie, il est possible d'utiliser un capteur passif.
Dans ce cas un ou une série de contacts s'ouvrent ou se ferment.
Ils se câblent comme des interrupteurs de position mécaniques.



Câblage d'un capteur passif
Exemple de raccordement à une entrée d'un automate programmable industriel

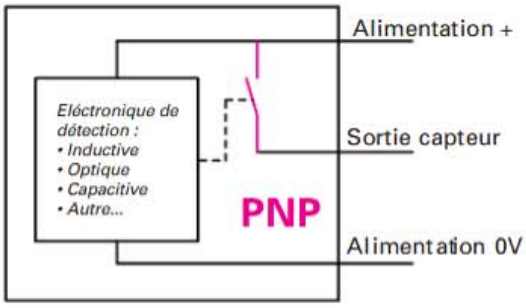




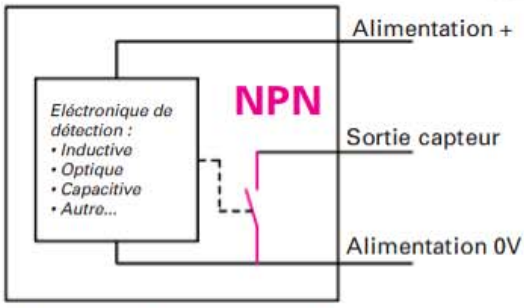
• Capteur actif

Pour détecter certaines grandeurs physiques, il est nécessaire d'ajouter un circuit électronique qui va détecter, amplifier et transformer cette grandeur physique pour permettre sa détection.
Ces capteurs nécessitent une alimentation externe permanente 0 V, 24 V par exemple.

Il existe deux types de capteurs TOR, de sortie :
- PNP pour les automates à masse commune
- NPN pour les automates à alimentation commune

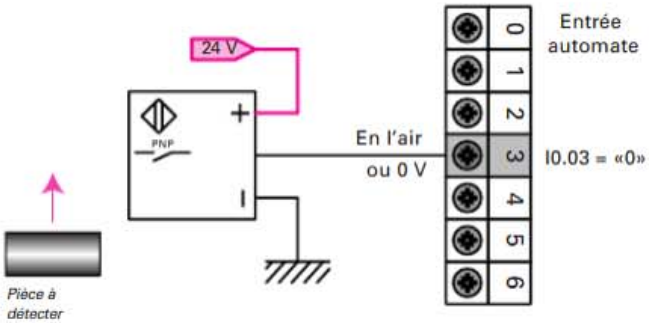


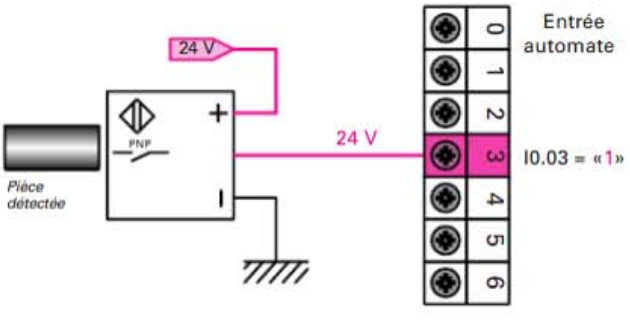
Le contact de sortie est un transistor PNP



Le contact de sortie est un transistor NPN

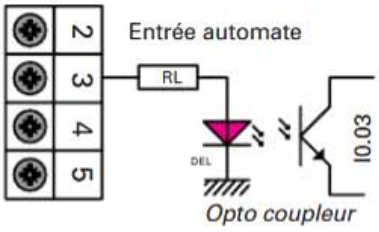
• Câblage d'un capteur de proximité inductif PNP sur une entrée automate à masse commune



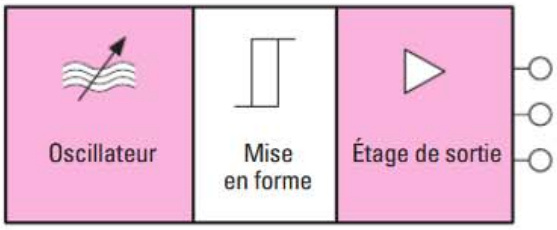


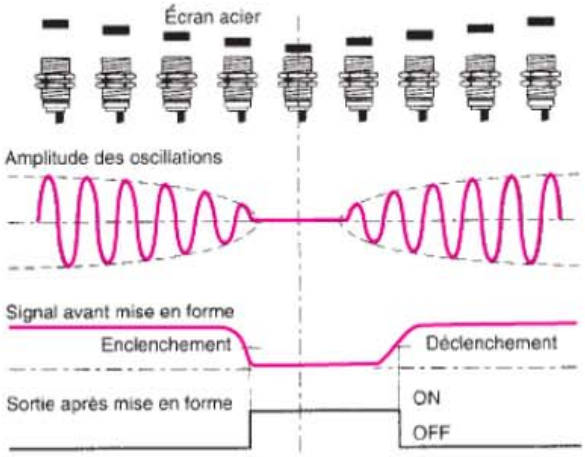
• Structure des entrées d'un automate programmable

Les entrées ont un commun 0 V déjà relié par le constructeur à l'intérieur de l'automate.
Le câblage des entrées de type «contact sans potentiel» est réalisé à l'aide d'un opto-coupleur afin d'isoler la structure interne de l'automate.



8.3.5. DÉTECTEUR DE PROXIMITÉ INDUCTIF (DPI)



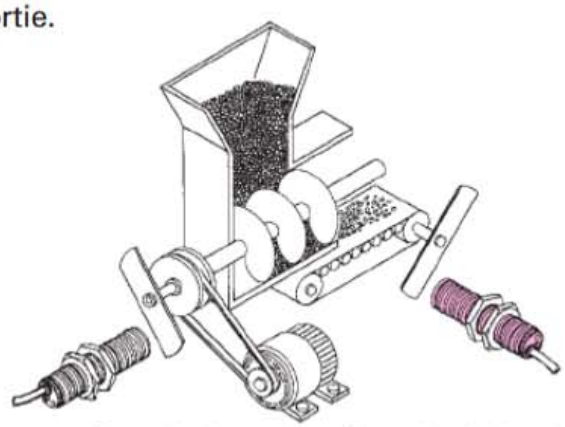


Principe de fonctionnement

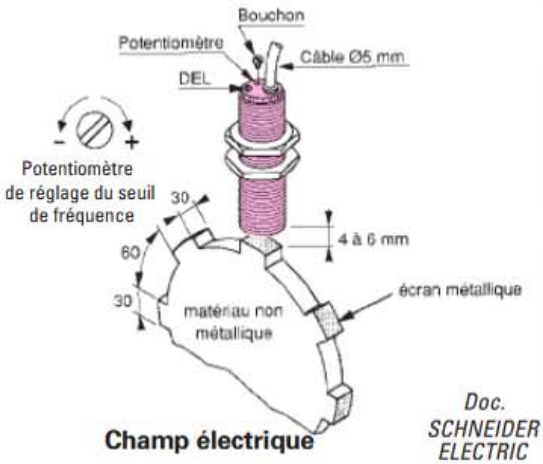
• Constitution

Un détecteur de proximité inductif détecte sans contact physique la présence de tout objet en matériau conducteur d'électricité.

Technologie basée sur **la variation d'un champ magnétique à l'approche d'un objet métallique**.
Un oscillateur comportant une bobine logée dans un circuit magnétique engendre un champ magnétique alternatif qui sort du corps du détecteur par sa face avant sensible. La présence d'un matériau conducteur dans le champ rayonné par le module de détection entraîne la diminution de l'amplitude de l'oscillation. Cette variation est exploitée par un amplificateur qui délivre un signal de sortie.



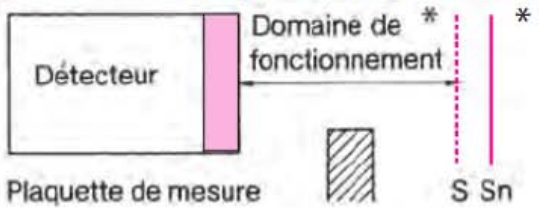
Contrôle de rotation d'un galet de bande



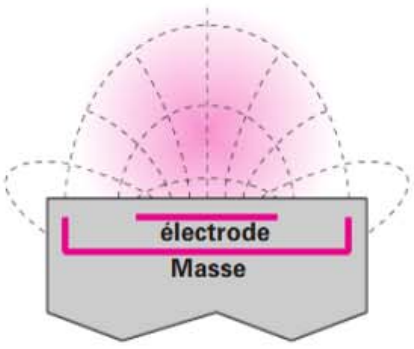
Champ électrique

Doc. SCHNEIDER ELECTRIC

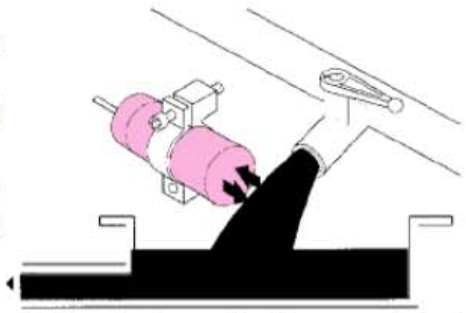
8.3.6. DÉTECTEUR DE PROXIMITÉ CAPACITIF (DPC)



* Espace dans lequel la mesure est certaine.
S : point d'enclenchement
Sn : point de déclenchement



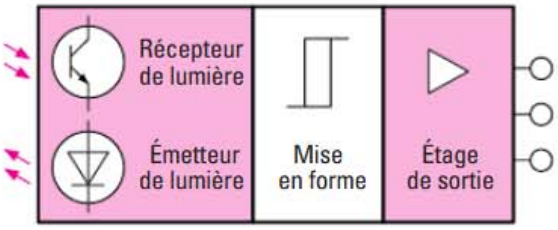
Technologie basée sur **la variation d'un champ électrique à l'approche d'un objet quel que soit le matériau.**
Le principe de la détection capacitive repose sur un circuit oscillant.
Le détecteur mesure la variation de la capacité qui est provoquée par le rapprochement d'un objet dans le champ électrique d'un condensateur.



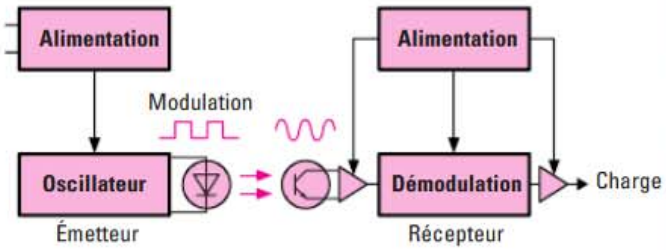
Détection d objets isolants (liquides ou pulvérulents)

8.3.7.DÉTECTEUR DE PROXIMITÉ OPTIQUE (DPO)

Doc. SCHNEIDER



Constitution



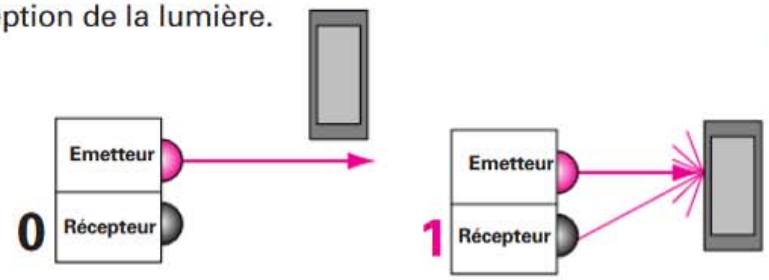
Principe de fonctionnement

Les détecteurs photoélectriques permettent la détection d'objets de toute nature (opaques, transparents, réfléchissants, etc.) dans des applications les plus diverses.
Technologie basée sur l'émission et la réception de la lumière.

• Différents modes d'utilisation

• Système de proximité

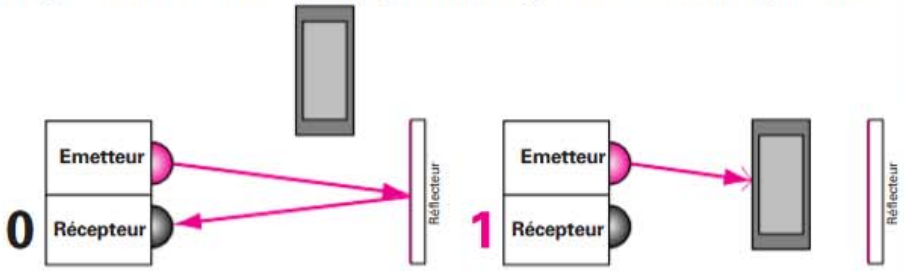
OPTEK



L'émetteur et le récepteur sont incorporés dans le même boîtier.
Le faisceau lumineux est réfléchi en partie vers le récepteur par tout objet se trouvant à proximité.

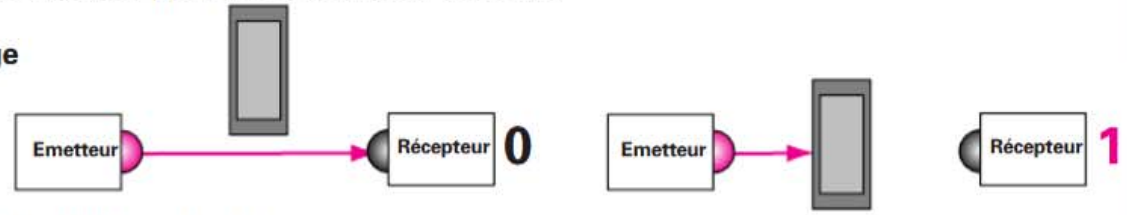
• Système reflex

VELLEMAN



Utilisé en moyenne distance.
L'émetteur et le récepteur sont incorporés dans le même boîtier.
Le retour du faisceau est assuré par un réflecteur monté en vis-à-vis.
La détection est assurée par l'interruption du faisceau.

• Système barrage



L'émetteur et le récepteur sont séparés.
Ce système permet de détecter tout objet interrompant le faisceau lumineux.

- **Barrage fourche** : permet la détection d'objets de petites et moyennes tailles.

- **Le barrage** : permet la détection d'objets de grande taille sur une distance importante 1 m à 10 m

Schneider Electric

- **Le barrage laser** : permet la détection sur de grandes distances (1 à 100 m) ou de petites pièces à distance moyenne.

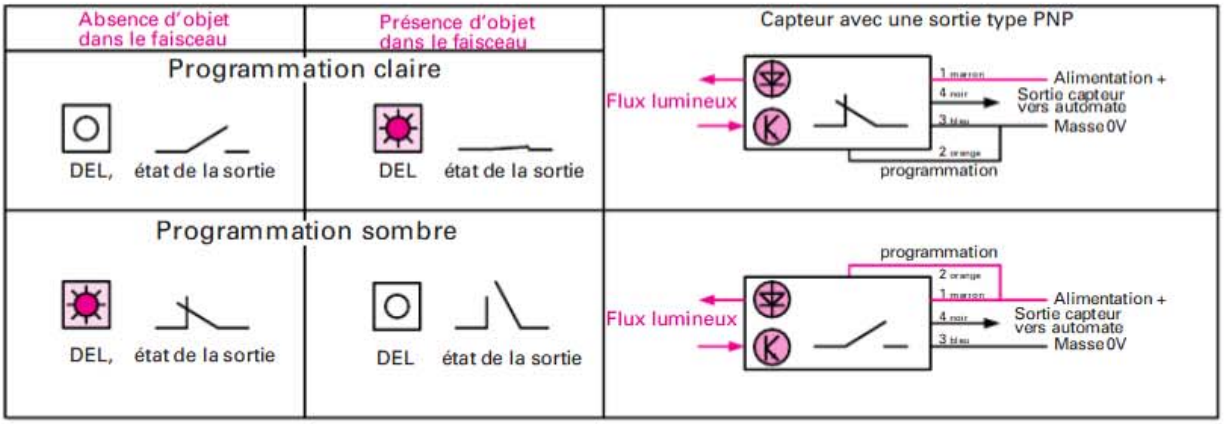
Omron

• Réglage et paramétrage d'un détecteur de proximité optique

Programmation «claire» et «sombre»

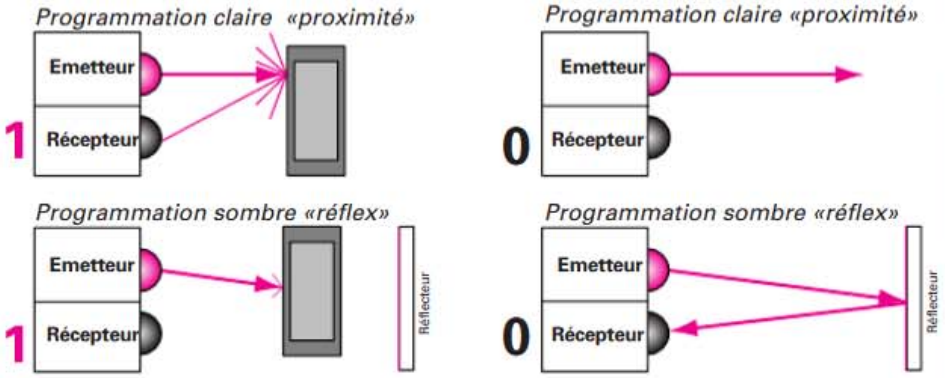
C'est un paramétrage disponible sur de nombreux capteurs.
Ce paramétrage est réalisé par un fil supplémentaire.

- Une programmation «claire» correspond à l'activation de la sortie pour la détection d'un objet.
- Une programmation «sombre» correspond à l'activation de la sortie pour la non-détection d'un objet.



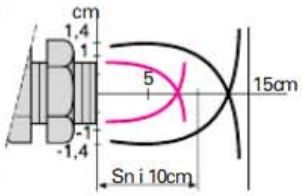
Ce type de capteur peut être utilisé en détecteur de proximité, ou utilisé avec un réflecteur en mode reflex.

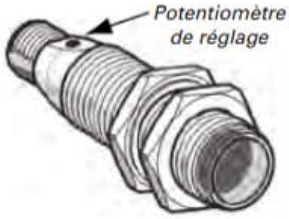
La seule modification à effectuer est le type de détection «claire» ou «sombre» également appelé «directe» «inverse»



Réglage de la sensibilité

Disponible sur certains capteurs, un potentiomètre permet d'ajuster la sensibilité de détection.
Exemple Osiris XUB (Schneider Electric).



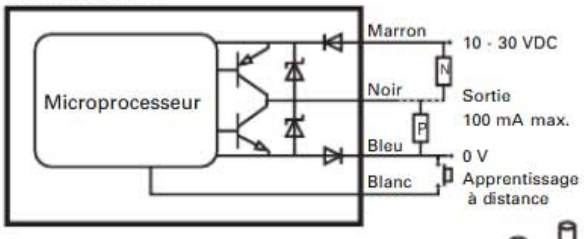


Capteur programmable exemple BAT 956s DINEL

Description :

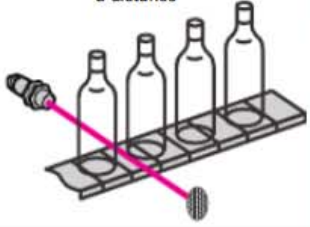
- Réglage simple et rapide par auto-apprentissage
- Émission-réception coaxiale
- Insensibilité aux réflexions parasites
- Temporisation réglable
- Aide à l'alignement
- Voyant d'encrassement
- Verrouillage du clavier
- Apprentissage déporté par entrée externe
- Fonction directe / inverse (claire sombre)
- Sortie statique universelle

Raccordement



Applications :

- Barrage sur convoyeur industrie du verre.
- Détection d'objets transparents (verre, PET, film plastique...)
- Détection de bouteille PET sur machine de soufflage.



8.3.8. DESCRIPTION DES CODES-BARRES OU CODES-POINTS

L'intérêt du code-barres

Le code-barres permet de limiter les temps de saisie des références d'un produit dans un processus de fabrication. La lecture automatique autorise l'interconnexion des systèmes d'information et leur mise à jour en temps réel.

Principe de lecture

Lors du passage d'une source lumineuse sur les barres d'un code, l'intensité lumineuse réfléchie varie. Celle-ci est captée, amplifiée, filtrée et digitalisée pour être convertie en information numérique.

Lecteur laser

Le lecteur laser utilise un seul rayon lumineux généré par une diode laser. Ce procédé autorise une lecture rapprochée ou distante de plusieurs mètres ainsi qu'une lecture au vol, sur des objets en mouvement. Le lecteur réalise un balayage sur la largeur et éventuellement sur la hauteur du code. Il permet la lecture des codes-barres linéaires.

Capteur CCD

Cette technique est bien adaptée à la lecture des codes bidirectionnels (QR code, dot matrix...) et codes empilés (PDF417).

Une caméra numérise le code-barres, l'image numérisée va subir :

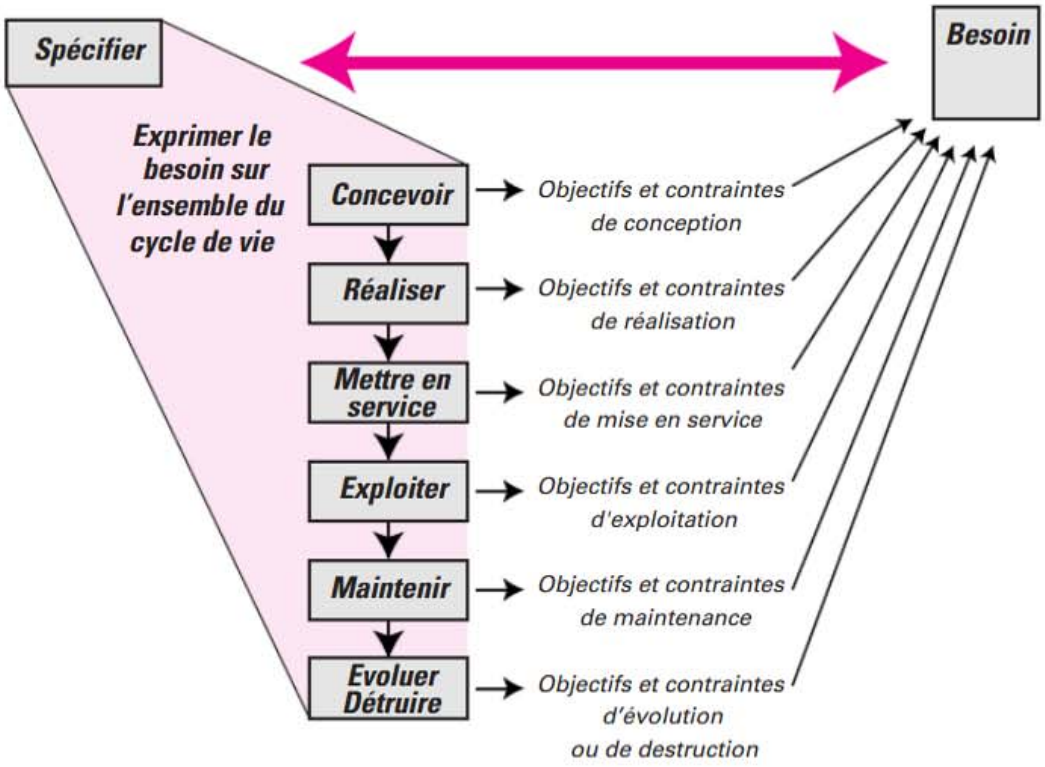
- un filtrage pour supprimer le bruit de fond,
- un ajustement de lumière afin d'obtenir une image bien contrastée,
- un réalignement pour orienter le code à l'horizontale, puis le décodage commence.

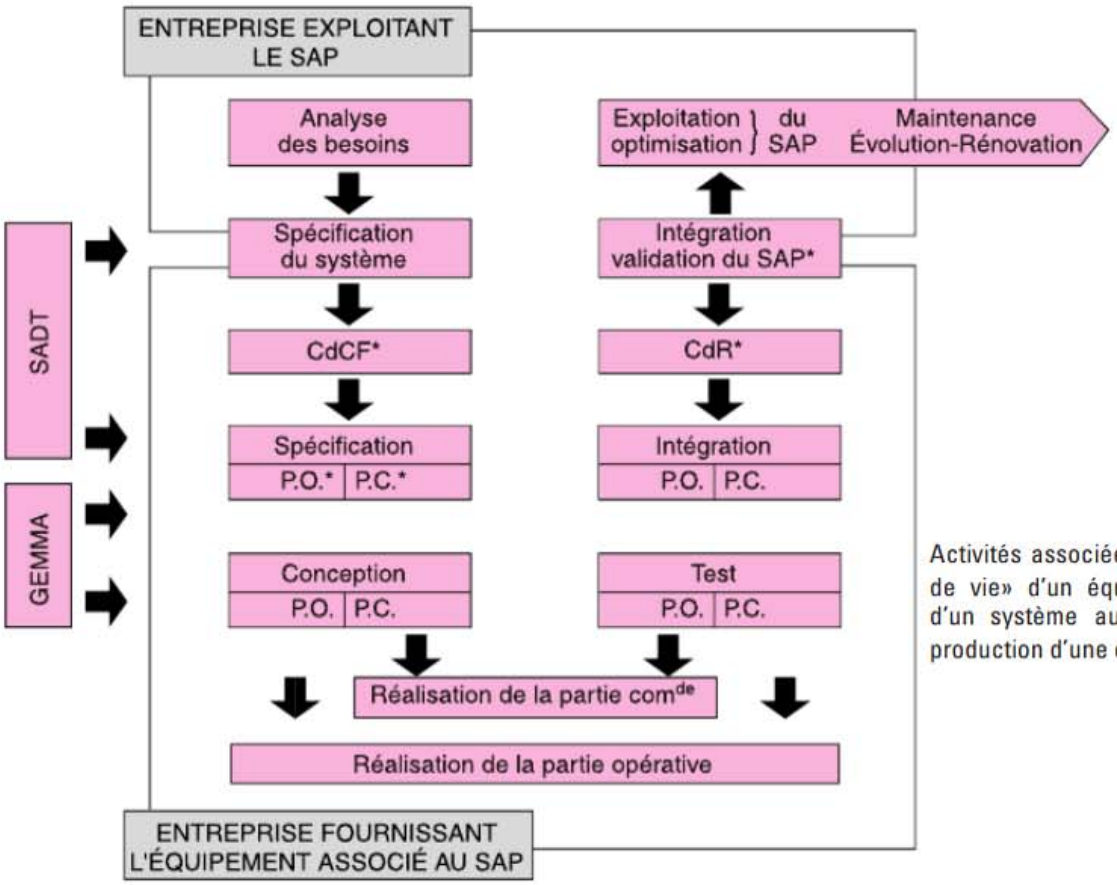
• Exemples de types de codes

2/5 entrelacé Numérique Longueur variable Lecture bidirectionnelle 012345678905	**Code 39** Alphanumérique et /*-.+$% Lecture bidirectionnelle MEMO	**Code 128** Table Ascii Longueur variable Lecture bidirectionnelle MEMOTECH
EAN13 Numérique Longueur 13 caractères Lecture bidirectionnelle 1 234567 890128	**QR Code** Alphanumérique et espace : $ % * + - . : / ; 4 niveaux de sécurité	**PDF 417** Bidimensionnel/Empilé Table Ascii/Iso Longueur 1850 chr Ascii/1000 Iso 8 niveaux de sécurité

8.4. LE GRAFCET

8.4.1. CYCLE DE VIE D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ





Activités associées au «cycle de vie» d'un équipement ou d'un système automatisé de production d'une entreprise.

GRAFCET : **GRA**phe **F**onctionnel de **C**ommande **É**tape **T**ransition *Norme NF EN 60848 octobre 2013*
Le GRAFCET se situe pratiquement à toutes les étapes du cycle de vie d'un système. *

*** Légende :**
SAP : **S**ystème **A**utomatisé de **P**roduction
CdCF : **C**ahier **d**es **C**harges **F**onctionnel
CdR : **C**ahier **d**e **R**ecette
P.O. : **P**artie **O**pérative
P.C. : **P**artie **C**ommande

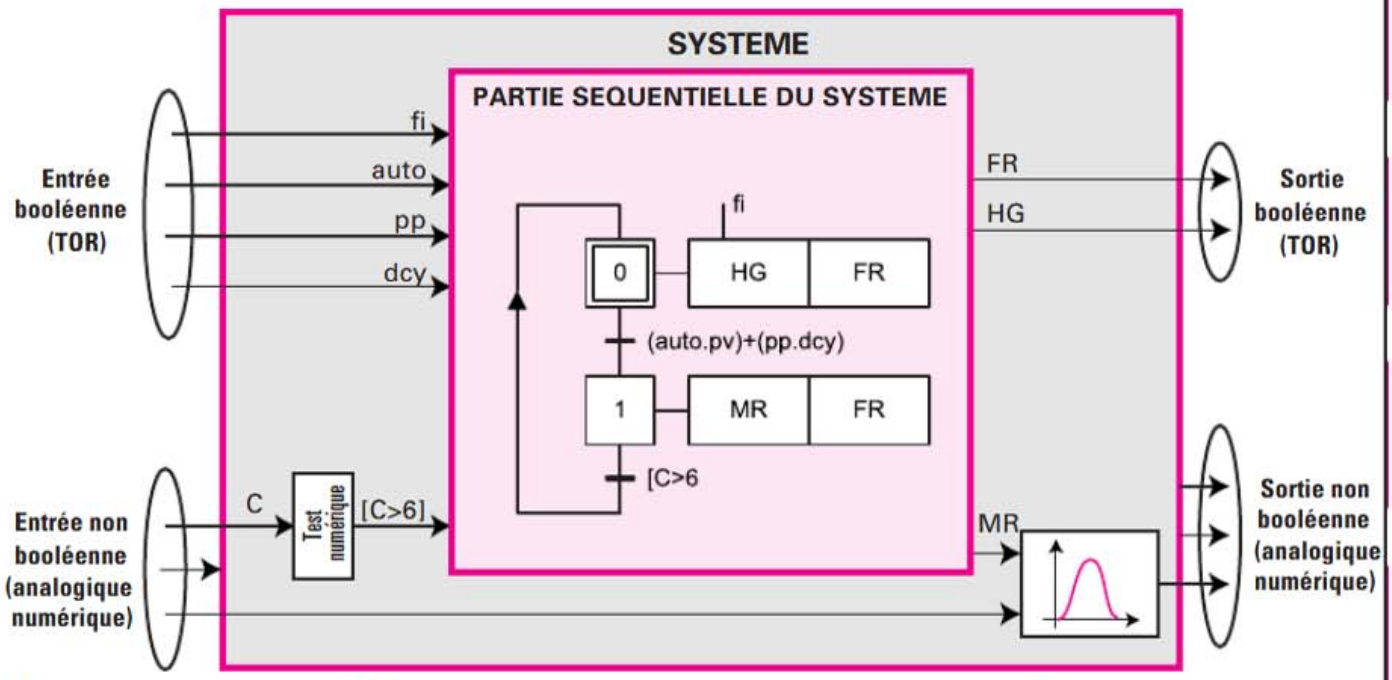
8.4.2. PRINCIPES GÉNÉRAUX

• Contexte

La réalisation d'un système automatisé requiert, notamment, une **description liant les effets aux causes.**

Pour cela on décrira l'aspect logique du comportement souhaité du système.

Le **GRAFCET** a pour objet de spécifier le comportement de la partie séquentielle des systèmes



Note : La partie séquentielle du système est caractérisée par **ses variables d'entrée, ses variables de sortie et son comportement**. Cette partie séquentielle ne comporte que des variables d'entrées et de sorties booléennes, toutefois le langage de spécification GRAFCET permet par extension (exemple : évaluation d'un prédicat ou affectation d'une valeur numérique à une variable) de décrire le comportement de variables non booléennes.

• Représentation graphique de la partie séquentielle d'un système

Le GRAFCET, un langage de spécification comportementale

Dans le GRAFCET plusieurs étapes peuvent être actives simultanément, la situation étant alors caractérisée par l'ensemble des étapes actives à l'instant considéré. Les conditions d'évolution d'un ensemble d'étapes vers un autre sont alors portées par une ou plusieurs transitions, caractérisées chacune par :

- ses étapes en amont,
- ses étapes en aval,
- sa réceptivité associée.

GRAFCET, présentation sommaire :

Le GRAFCET est un outil de description graphique et synthétique du comportement des systèmes. La représentation (fig. page suivante) distingue :

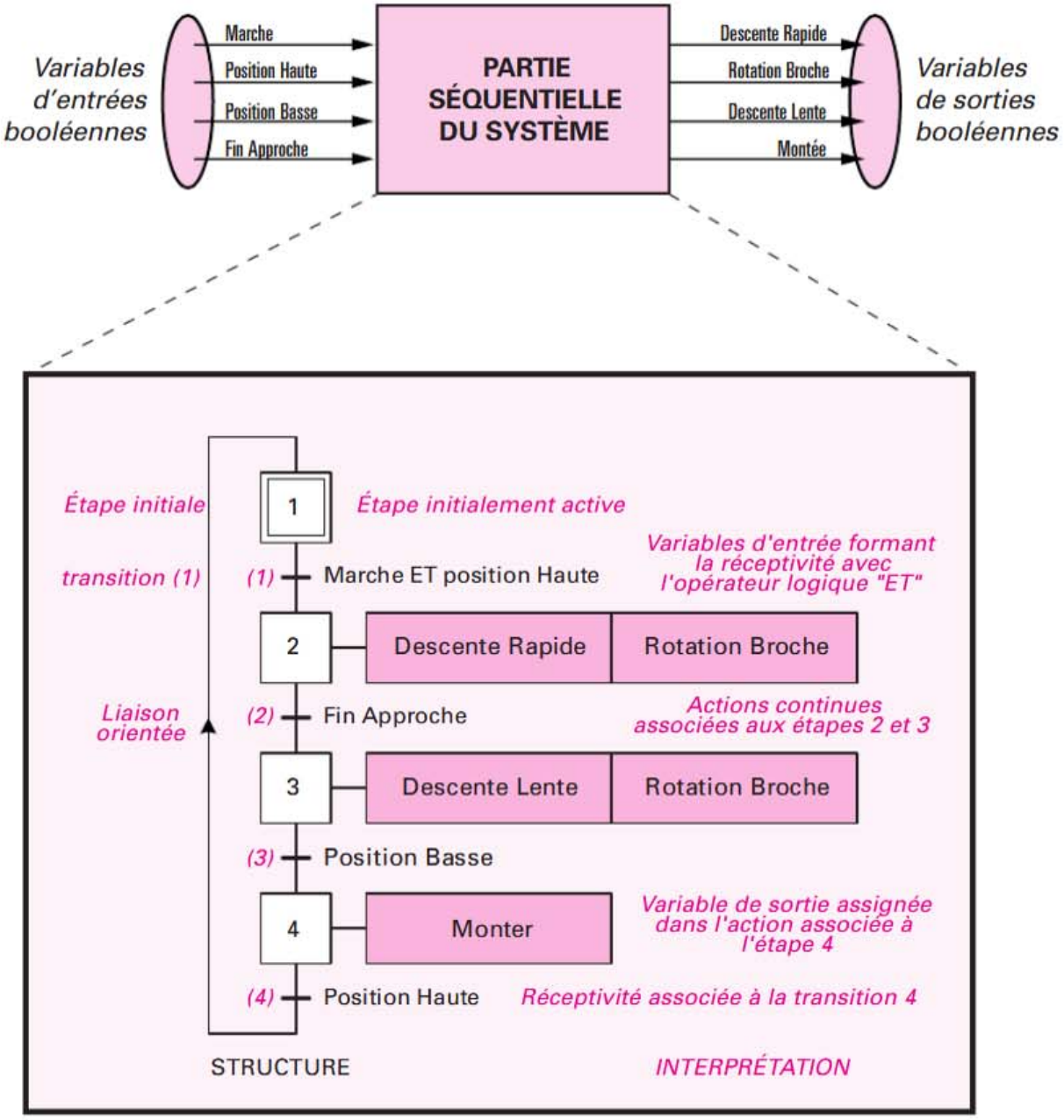
- la structure, qui permet de décrire les évolutions possibles entre les situations,
- l'interprétation, qui fait la relation entre les variations d'entrées, la structure et les variables de sorties (des règles d'évolution, d'assignation et d'affectation sont nécessaires pour réaliser cette interprétation).

Événements internes

Seuls certains événements d'entrée peuvent se produire à partir d'une situation donnée. La conjonction d'une situation et d'un événement d'entrée pouvant se produire à partir de celle-ci s'appelle un événement interne. Cette notion est principalement utilisée par le spécificateur pour conditionner une affectation de sortie à un ensemble d'événements internes.

8.4.3. MODES DE SORTIE

Les actions permettent d'établir le lien entre l'évolution du GRAFCET et les sorties. Deux modes de sortie, mode continu ou mode mémorisé, décrivent comment les sorties dépendent de l'évolution et des entrées du système.



Éléments de structure et d'interprétation utilisés dans un GRAFCET pour décrire le comportement de la partie séquentielle d'un système défini par ses variables d'entrée et de sortie.

8.4.4. APPLICATION DES RÈGLES D'ÉVOLUTION

L'interprétation intuitive de l'évolution, dite « pas à pas », désigne la démarche progressive qui permet, sur occurrence d'un événement d'entrée et à partir de la situation antérieure, de déterminer, par application successive des règles d'évolution sur chaque transition, la situation postérieure à l'événement considéré. Cette facilité d'interprétation est un artifice autorisant une spécification indirecte de l'évolution, mais le spécificateur doit prendre garde au fait que le franchissement des transitions situées sur ce chemin n'implique pas l'activation effective des situations intermédiaires.

Application des règles d'évolution

• Eléments de base

Le GRAFCET est un modèle de représentation des systèmes logiques. C'est un diagramme fonctionnel qui décrit l'évolution séquentielle (par étapes) des processus automatisés.
Il est composé d'un ensemble :

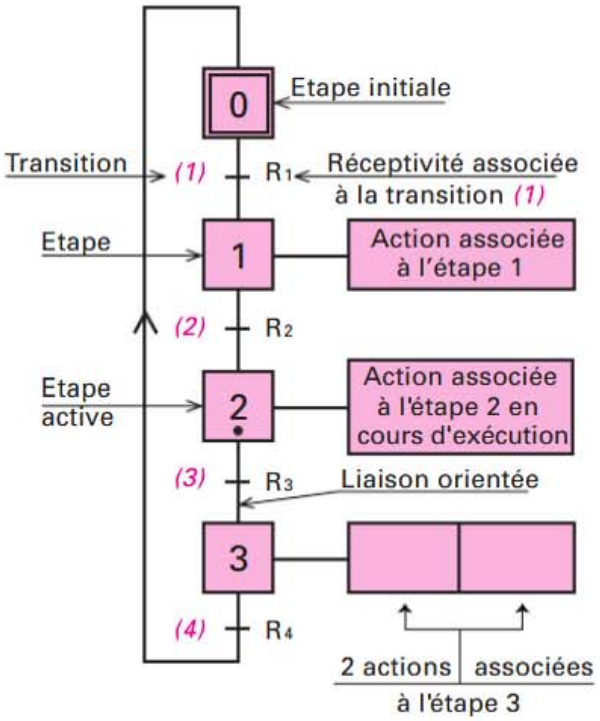
d'étapes qui caractérisent un comportement invariant d'une partie ou de la totalité du système. Suivant l'évolution du processus, **chaque étape peut être active (•) ou inactive.**

d'actions associées aux étapes :
Elles traduisent ce qui doit être fait chaque fois que les étapes auxquelles elles sont associées sont actives.

de transitions :
Elles indiquent la possibilité d'évolution entre étapes. Cette évolution s'accomplit par le franchissement de la transition.

de réceptivités associées aux transitions :
Ce sont des propositions logiques : vraies (= 1) ou fausses (= 0)

de liaisons orientées
Elles relient les étapes aux transitions et les transitions aux étapes. Elles précisent le sens de lecture (haut vers le bas).

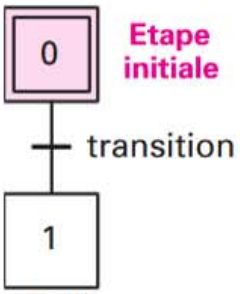


• Règles fondamentales d'évolution

Les règles précisent les conditions dans lesquelles le GRAFCET évolue (étapes actives ou inactives).

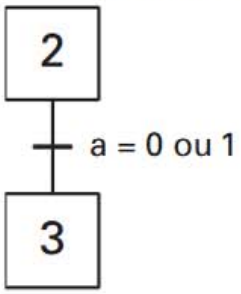
• Première règle : Situation initiale

La situation initiale du GRAFCET caractérise l'état du processus au début du fonctionnement de la partie commande.
Elle correspond aux étapes actives lorsque le système est considéré en situation initiale avant sa mise en fonctionnement.
L'étape initiale est représentée sur le GRAFCET par un double carré.

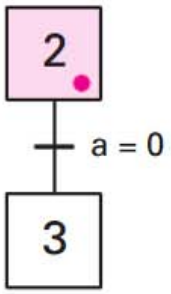


• Deuxième règle : Franchissement d'une transition

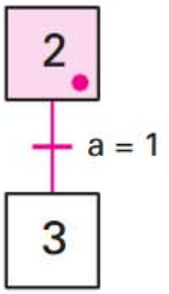
Le franchissement d'une transition ne s'effectue que lorsque **cette transition est validée,** c'est-à-dire lorsque **les étapes immédiatement précédentes sont actives et que la condition de transition (réceptivité) associée à ces étapes sont vraies.**
Lorsque ces deux conditions d'évolution sont réunies, la transition **devient franchissable et est alors obligatoirement franchie.**



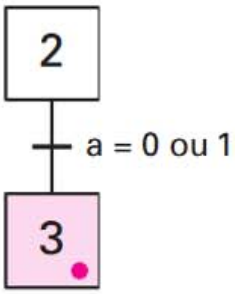
Transition non validée
La transition 2 → 3 est non validée car l'étape 2 est inactive.



Transition validée
La transition 2 → 3 est validée (étape 2 active) mais elle n'est pas franchissable (a = 0).



Transition franchissable
La condition de transition est vraie (a = 1), la transition devient franchissable.



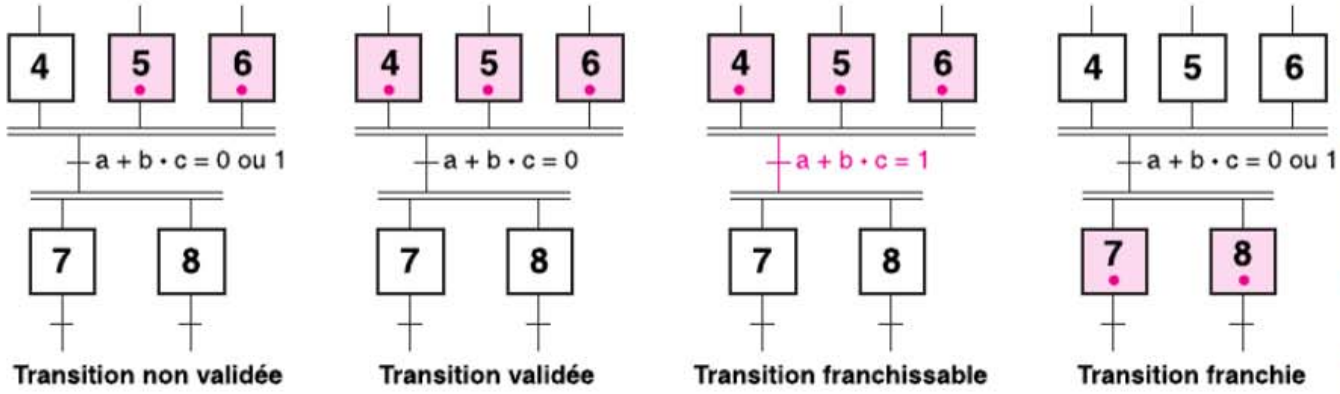
Transition franchie
Le franchissement de la transition entraîne l'activation de l'étape 3 et la désactivation de l'étape 2.

• Troisième règle : Evolution des étapes actives

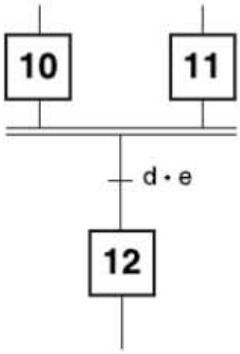
Le franchissement provoque simultanément : la désactivation de toutes les étapes immédiatement précédentes reliées à cette transition et l'activation de toutes les étapes immédiatement suivantes reliées à cette transition.

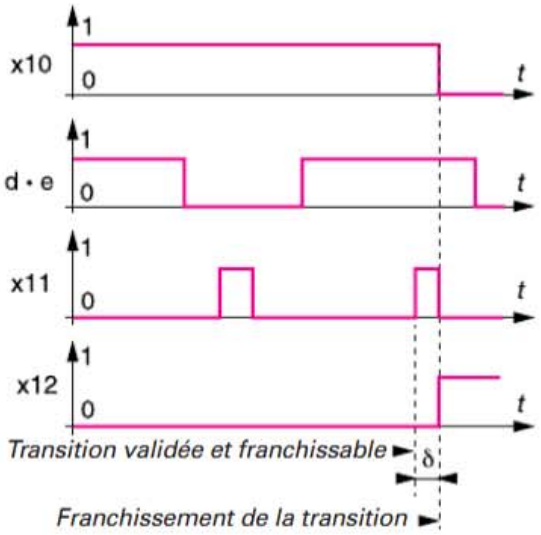
• Quatrième règle : Evolutions simultanées.

Plusieurs transitions simultanément franchissables sont simultanément franchies



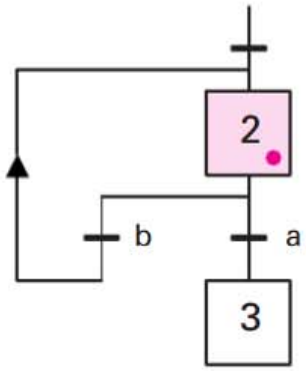
Chronogrammes d'évolution





• Cinquième règle : Activation et désactivation simultanées d'une étape.

Si au cours du fonctionnement une étape active est simultanément activée et désactivée alors elle reste active.

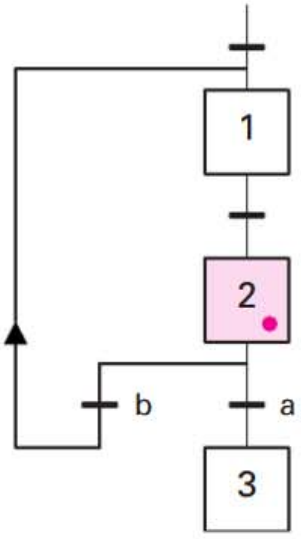


- L'étape 2 est active
- La réceptivité b est vraie
- La transition 2 vers 2 est validée.
- Activation de l'étape suivante (étape 2)
- Désactivation de l'étape précédente (étape 2)

Dans ce cas, l'étape 2 reste active.

Dans cet exemple la reprise de séquence n'a aucun intérêt. Pour une reprise de séquence, il convient de placer deux étapes au minimum (voir figure à droite).

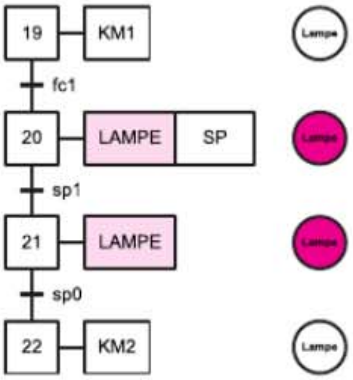
La règle 5 permet de fixer ce problème d'une éventuelle activation-désactivation simultanée.



8.4.5. ACTION CONTINUE OU MONOSTABLE

L'action sera effective pendant tout le temps où l'étape sera active.

Dans l'exemple ci-contre la lampe s'allume quand l'étape 20 est active et reste allumée à l'étape 21. Elle s'éteint à l'activation de l'étape 22 car elle n'est plus commandée.

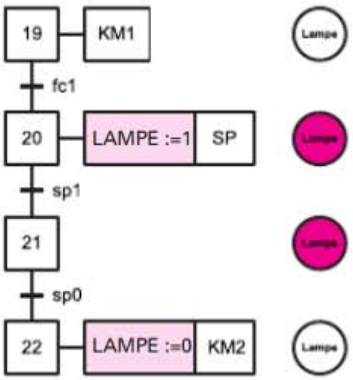


8.4.6. ACTION MÉMORISÉE

L'action sera effective à la mise à la valeur «vraie» de la variable et sera annulée à sa mise à la valeur «fausse».

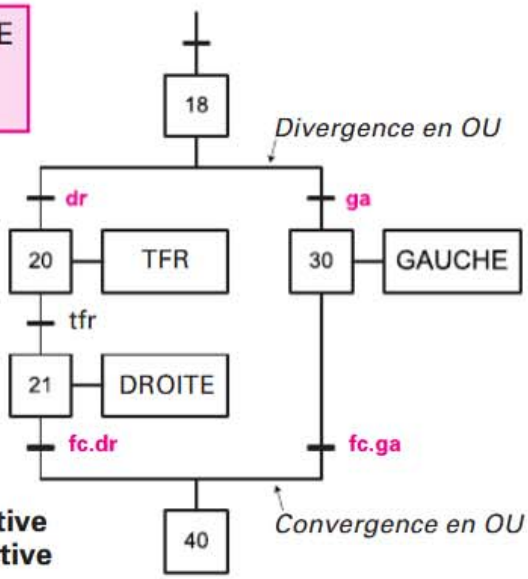
Dans l'exemple ci-contre la lampe s'allume quand l'étape 20 s'active. Elle sera éteinte lors de l'activation de l'étape 22.

Attention : les actions mémorisés peuvent poser des problèmes de sécurité. Dans ce cas, il faut préférer les actions monostables.



8.4.7. DIVERGENCE, CONVERGENCE EN «OU»

Une voie **OU** une autre voie : Solution ALTERNATIVE
Un simple trait
Une réceptivité par branche



Divergence en OU

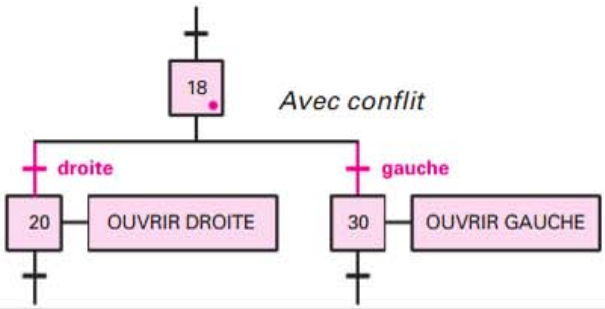
Franchissement des transitions :
Lorsque l'étape 18 est active, on se dirige soit :
Vers l'étape 20 si la réceptivité dr est vraie
Vers l'étape 30 si la réceptivité ga est vraie

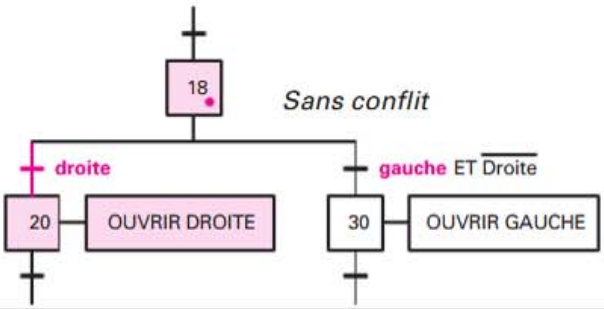
Convergence en OU

Franchissement des transitions :
L'étape 40 sera active soit :
Par la transition «21/40» si «fc.dr» est vraie et l'étape 21 active
Par la transition «30/40» si «fc.ga» est vraie et l'étape 30 active

• Conflit

Si les réceptivités «droite» et «gauche» sont à «1» avant l'activation de l'étape 18, il y a conflit ; les deux transitions vont être franchies et les étapes 20 et 30 seront actives. On peut éviter le conflit en inhibant une réceptivité par le complément de l'autre.





• Reprise de séquence

C'est une **divergence en OU** qui renvoie l'action vers des étapes précédentes.

Cette action permet de refaire une séquence jusqu'à ce qu'une réceptivité spécifique soit satisfaite.

Remarque : Il faut remonter au minimum deux étapes (règle N°5).

Dans l'exemple ci-contre la séquence 17 → 18 est exécutée une fois puis recommencée 5 fois jusqu'à ce que la réceptivité [pas = 6] soit vraie.

• Saut d'étapes

Le saut d'étapes permet de sauter une ou plusieurs étapes en fonction de la progression d'un cycle.

Pour l'exemple ci-contre :

Après l'étape 20, la divergence en OU à deux voies permet de sauter les étapes 21 et 22 si la réceptivité «f.e» est vraie.

Après l'étape 21, la divergence en OU à deux voies permet de sauter l'étape 22 si la réceptivité «f.g» est vraie.

La convergence en OU à trois voies avant l'étape 23 récupère les sauts d'étapes précédents.

8.4.8. DIVERGENCE, CONVERGENCE EN «ET»

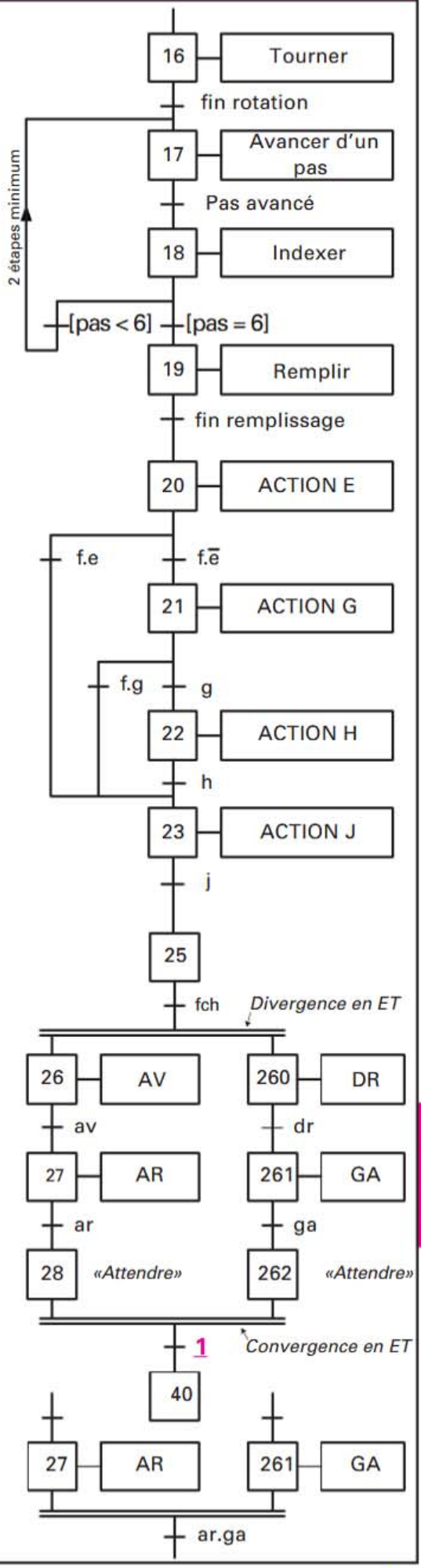
Une voie ET une autre voie. Cela permet de réaliser plusieurs tâches en même temps
Un double trait
Une SEULE réceptivité

Divergence en ET

Franchissement des transitions :
Lorsque l'étape 25 est active, et fch vraie, on se dirige vers les étapes 26 et 260 simultanément.
Les étapes 26 et 260 sont actives et le cycle se poursuit indépendamment dans chaque branche.

Convergence en ET

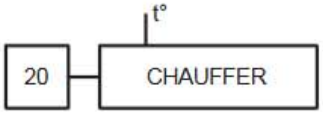
Franchissement des transitions :
Au niveau de l'exemple ci-contre : **lorsque les étapes 28 et 262 sont actives, la transition est validée et franchie.**
Les deux étapes d'attentes 28 et 262 ne sont pas obligatoires; sans elles, il aurait fallu noter une transition ar . ga
Dans ce cas, il est possible qu'une des deux actions AR ou GA reste commandée malgré la fin de son action.

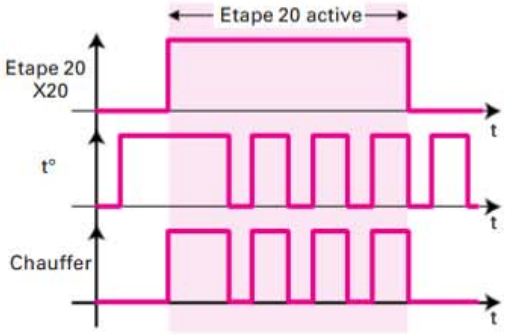


8.4.9. ACTION CONDITIONNELLE

L'action sera effective si l'étape est active et si la condition associée à l'étape est vérifiée.

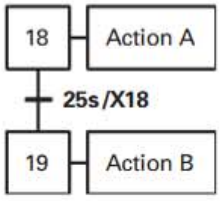
Le chauffage sera activé pendant la durée de l'étape 20 tant que t° sera égale à 1.





8.4.10. ACTION TEMPORISÉE

Enclenche un temporisateur.
Exemple :

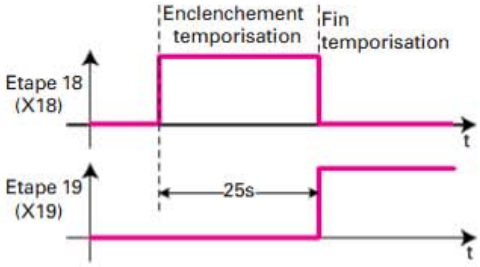


Syntaxe d'une réceptivité

Durée / Numéro d'étape

25s /X18

25s durée de la temporisation
X18 numéro de l'étape qui lance la temporisation



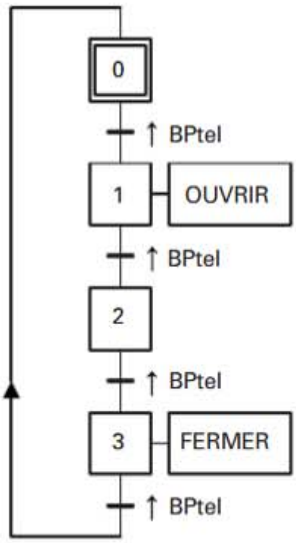
8.4.11. FRONT MONTANT, FRONT DESCENDANT

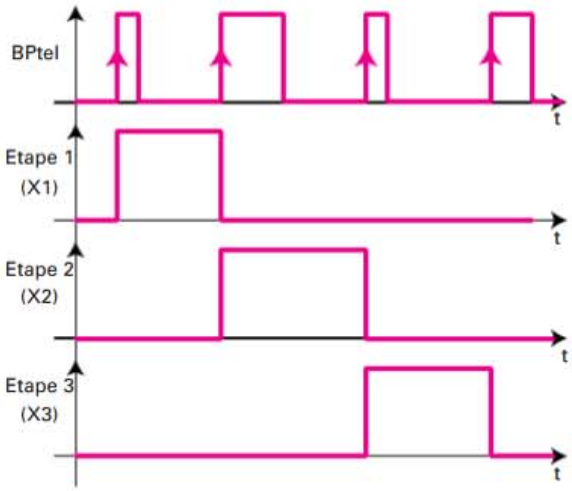
L'utilisation d'un front montant ou descendant permet d'utiliser la même variable pour activer en séquence les différentes tâches d'un GRAFCET.

Front montant ↑ : information vraie lors du passage d'un état bas vers un état haut.

Front descendant ↓ : information vraie lors du passage d'un état haut vers un état bas.

Ici le bouton BPtel permet l'évolution d'une étape à l'autre lors du passage de l'état bas vers l'état haut de l'information BPtel.

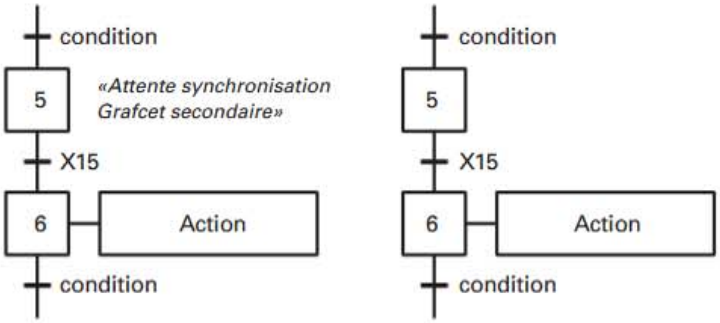




• Commentaire

On peut indiquer le rôle d'une étape avec ou sans action associée à l'aide de guillemets.

Si le commentaire n'a rien d'intéressant, ne rien mettre.



8.4.12. COMPTEUR

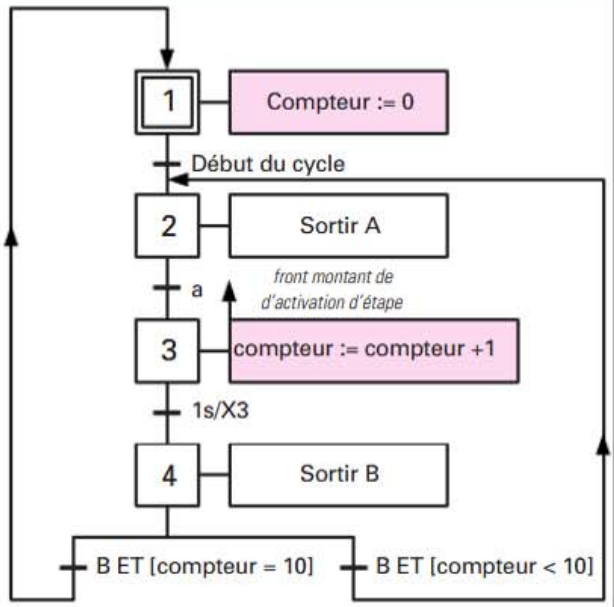
Un compteur peut être utilisé pour réaliser un cycle un certain nombre de fois.

Le compteur peut être **incrémenté (+ 1), décrémenté (- 1), mis à zéro ou mis à une valeur donnée**.

On peut utiliser les signes $=, \neq, <, \leq, \geq, >$ dans les réceptivités.

Dans l'exemple ci-contre :

- L'étape initiale met à zéro le compteur.
- L'étape 3 ajoute «1» au compteur.
- La séquence 2,3,4 va être répétée jusqu'à ce que compteur ait atteint la valeur 10.



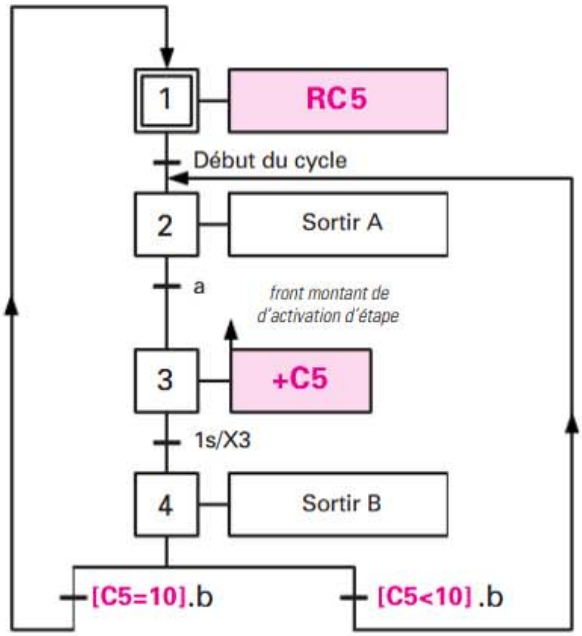
Exemple **Automgen**

Si l'incrémentation du compteur doit rester bloquée un certain temps sur une étape (ici une temporisation), il va incrémenter un grand nombre de fois le registre de comptage.

On peut utiliser le front montant de l'activation d'étape pour incrémenter une seule fois le compteur.

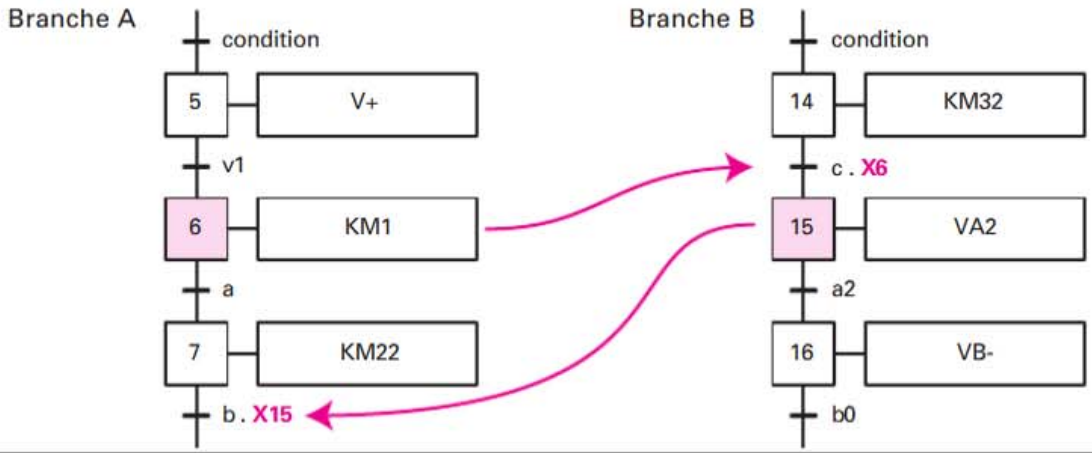
Dans l'exemple ci-contre :

- L'étape initiale met à zéro (**R**eset le **C**ompteur **5**).
- L'étape 3 ajoute «1»(**+**) au **C**ompteur **5** sur le front montant de l'action (événement unique)
- La séquence 2,3,4 va être répétée jusqu'à ce que **C**ompteur **5** ait atteint la valeur 10 **[C5=10]**.



8.4.13. SYNCHRONISATION

On peut rendre l'évolution de deux GRAFCET interdépendante en utilisant par exemple les mémoires d'étapes.
Les mémoires d'étapes d'un GRAFCET servent dans les réceptivités d'autres GRAFCET.
Dans l'exemple : l'étape 6 (X6) est utilisée comme réceptivité pour la transition 14 vers 15.
De même l'étape 15 (X15) est utilisée comme réceptivité pour la transition 7 vers 8.



8.4.14. STRUCTURE EN TÂCHE

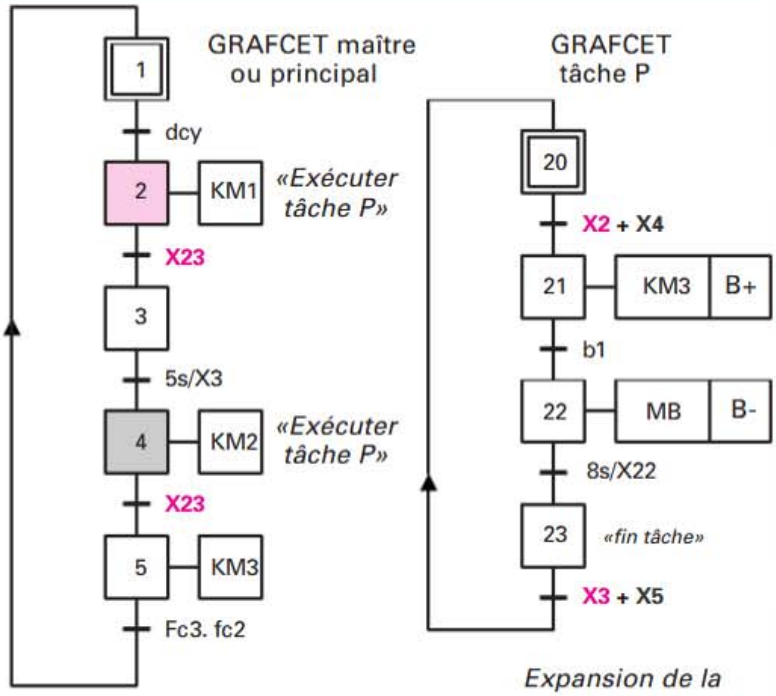
Une tâche peut être appelée à différents endroits du GRAFCET principal.

Dans l'exemple, **l'étape 2 OU 4 (X2 + X4)** appelle la **tâche P**.

La mémoire d'étape X2 (ou X4) permet le lancement de la tâche P.

L'étape 23 permet au GRAFCET principal de passer à l'étape suivante grâce à la synchronisation.

La mémoire d'étape 5 OU 3 permet à la tâche P de revenir à son étape initiale.

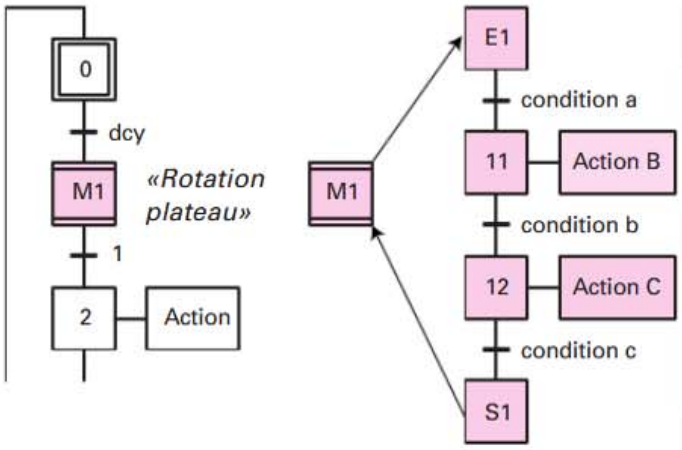


8.4.15. MACRO-ÉTAPE

La macro-étape est représentée par un rectangle dont les côtés horizontaux sont doublés.

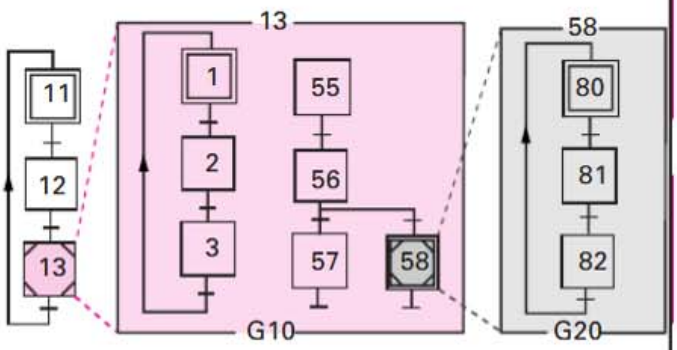
La macro-étape permet de contracter un GRAFCET en regroupant par exemple, des fonctions principales.

Exemple : la macro-étape M1 «Rotation plateau» regroupe les étapes E1 à S1.



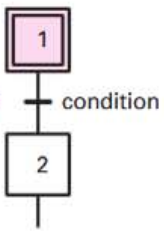
8.4.16. STRUCTURATION PAR ENCAPSULATION

L'activation de l'étape « encapsulante » 13, du GRAFCET partiel G1, active simultanément les étapes 55 et 1 du GRAFCET partiel G10.
L'activation de l'étape encapsulante initiale 58 active l'étape 80 du GRAFCET G20.
Les étapes 1, 2, 3, 55, 56, 57 et 58 sont dites : «encapsulées», même chose pour les étapes 80, 81 et 82 par rapport à l'étape 58 qui est encapsulée et encapsulante.
L'étape 58 doit contenir au moins une étape initiale (étape 80 du GRAFCET G20).



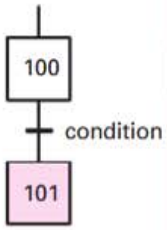
• Début de séquence par une étape source

Une étape source est une étape qui ne possède aucune transition amont.



• Fin de séquence d'une étape puits.

Une étape puits est une étape qui ne possède aucune transition aval



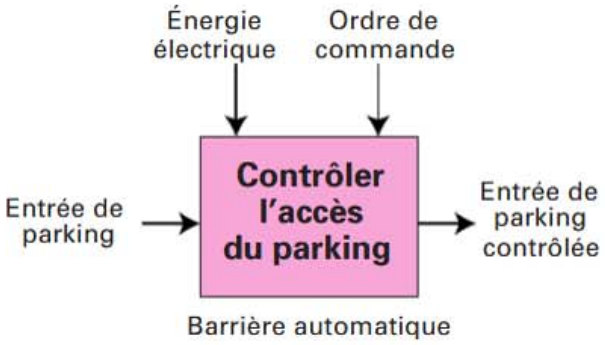
8.4.17. EXEMPLE DE RÉSOLUTION D'UN PROBLÈME (ACCÈS À UN PARKING)

• Expression du cahier des charges

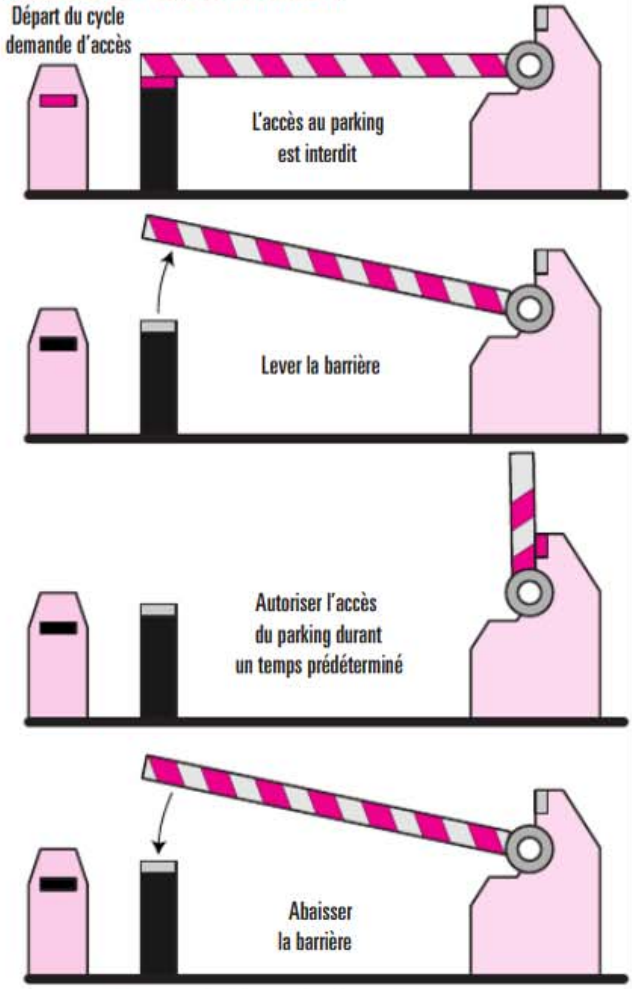
Une barrière automatique contrôle l'accès d'un parking.
Seuls certains conducteurs munis d'une clé ou d'une carte magnétique sont autorisés à en commander l'ouverture.
Après la commande de l'ouverture, l'accès est possible durant 15 secondes.

• Fonction globale

Elle se traduit par l'actigramme de niveau A-O de l'analyse fonctionnelle descendante.



Fonction globale de la barrière automatique



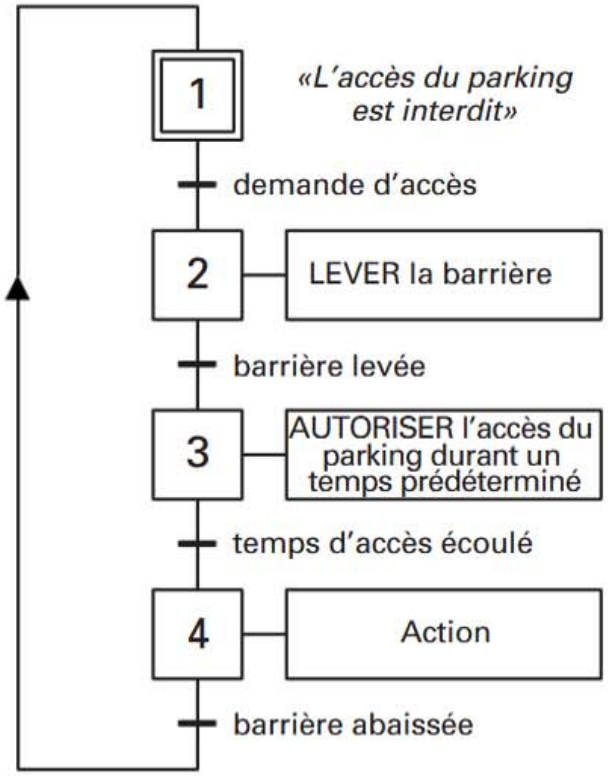
Description du fonctionnement de la barrière automatique

8.4.18. LE GRAFCET DU POINT DE VUE SYSTÈME

Le GRAFCET de la figure ci-contre traduit, sans présager les moyens techniques qui seront mis en œuvre pour le réaliser, le fonctionnement du système.

Ce GRAFCET, établi selon un **point de vue système**, indique la coordination des tâches principales nécessaires pour satisfaire la fonction globale spécifiée ci-dessus et pour donner la valeur ajoutée à l'entrée du parking.

Les différentes situations du cycle de fonctionnement peuvent être observées par toute personne, utilisatrice ou non du parking.



8.4.19. LE GRAFCET DU POINT DE VUE OPÉRATIVE

La partie opérative est assurée par des effecteurs mis en œuvre par des actionneurs et contrôlés par des capteurs.

• Le GRAFCET décrit

soit le fonctionnement des effecteurs en fonction des informations d'évolution de la PO (partie opérative) ;

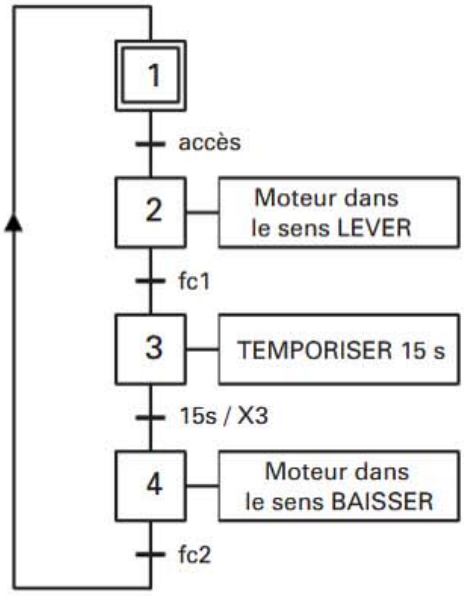
soit la mise en oeuvre des actionneurs en fonction des informations des capteurs.
Il est nécessaire de préciser ce qui est décrit :

Action = fonctionnement des effecteurs
réceptivités = information d'évolution de la PO

OU

Action = mise en oeuvre des actionneurs
réceptivités = information des capteurs

Exemple : Actionneurs + capteurs fin de course + consigne pupitre



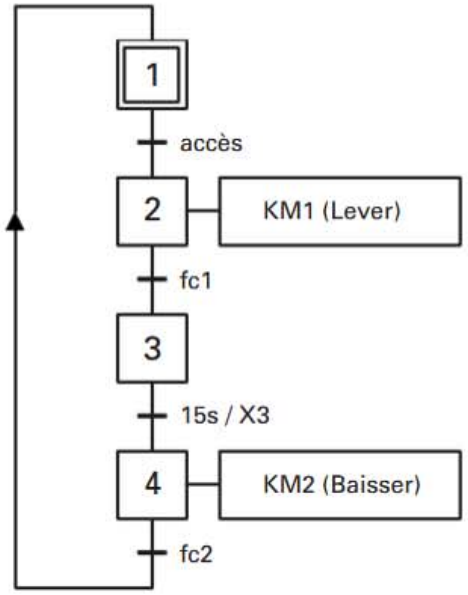
8.4.20. LE GRAFCET DU POINT DE VUE COMMANDE

Les actionneurs étant définis dans la partie opérative (PO), le choix technologique des préactionneurs permet d'établir le GRAFCET de la partie commande (PC). Il correspond à ce qui est réellement commandé par l'automate.

C'est ainsi que, pour le système barrière de parking, il est choisi :
- un contacteur KM1 pour le moteur sens Lever,
- un contacteur KM2 pour le moteur sens Baisser.

Les capteurs fins de courses sont ceux définis précédemment (fc1, fc2) ainsi que le capteur du lecteur de carte « accès ».

La temporisation est assurée par l'automate.



• Définition de la partie opérative

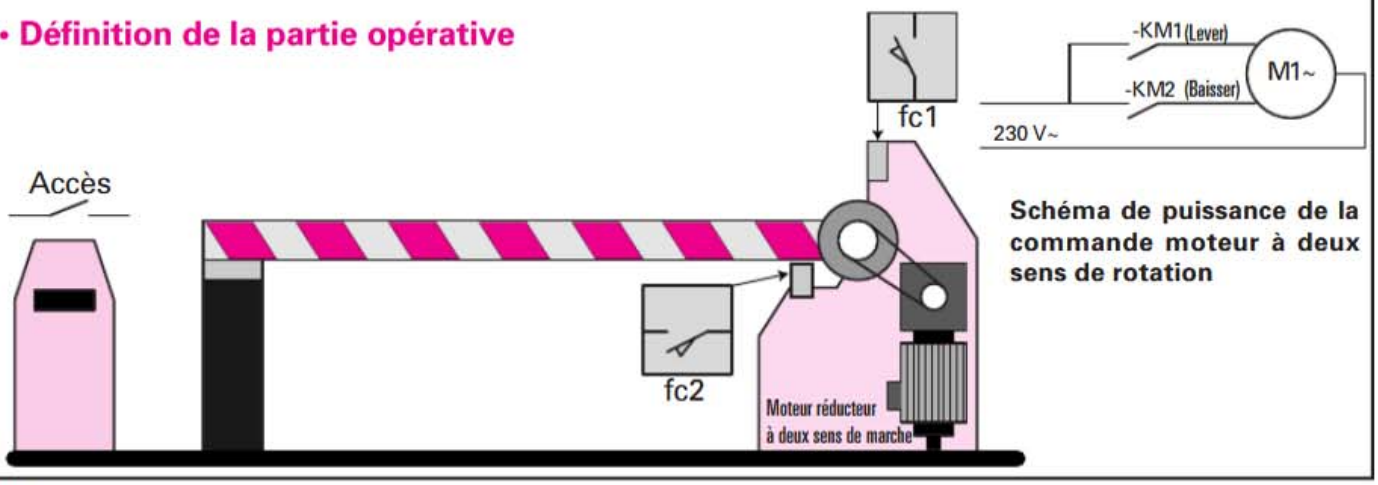
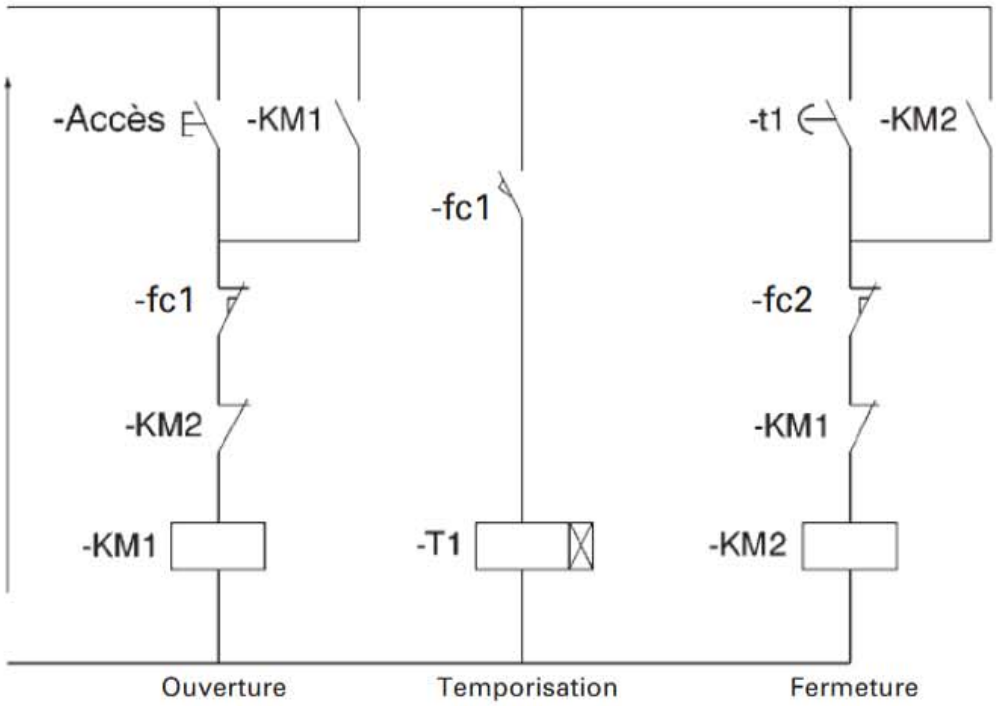


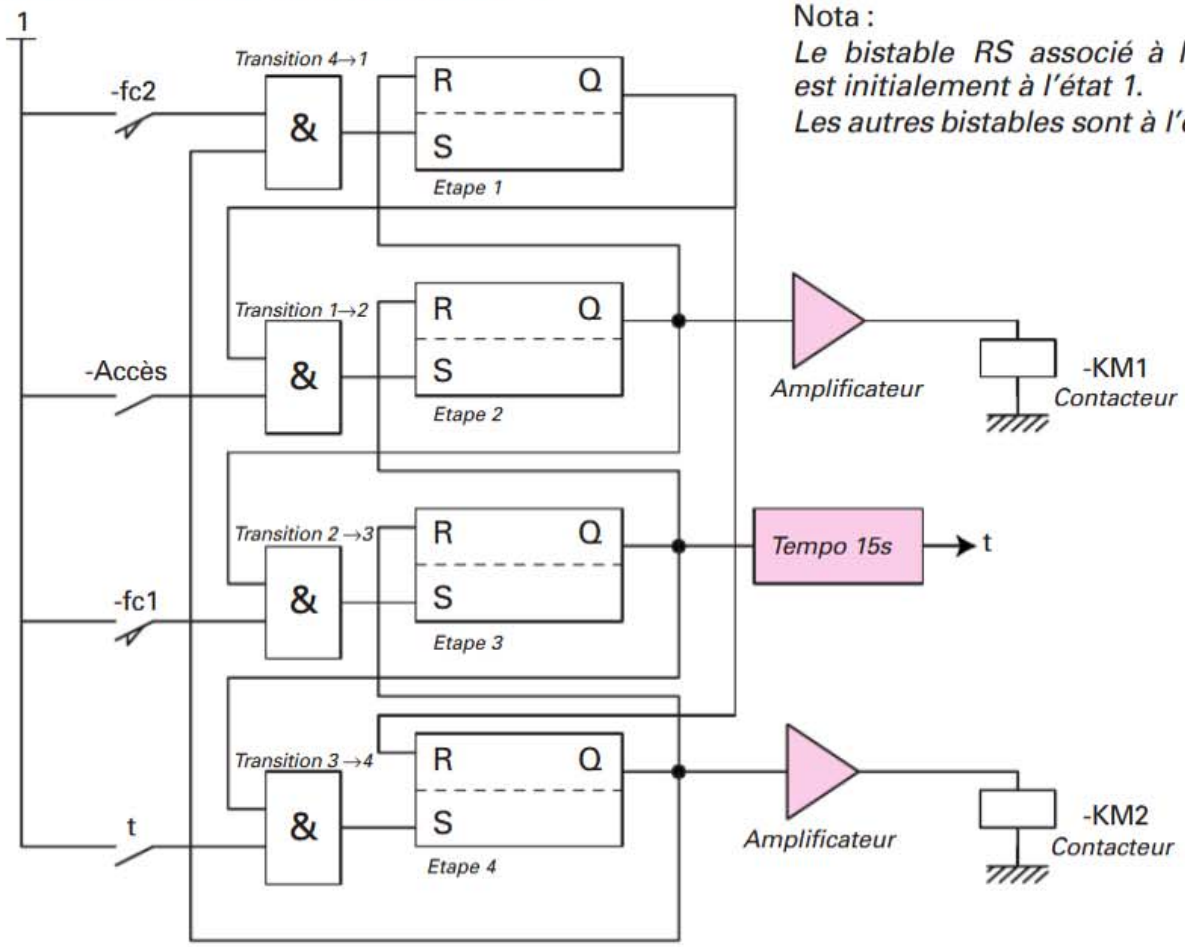
Schéma de puissance de la commande moteur à deux sens de rotation

8.4.21 SYNTHÈSE D'UN AUTOMATISME

• Schéma à contacts du système parking

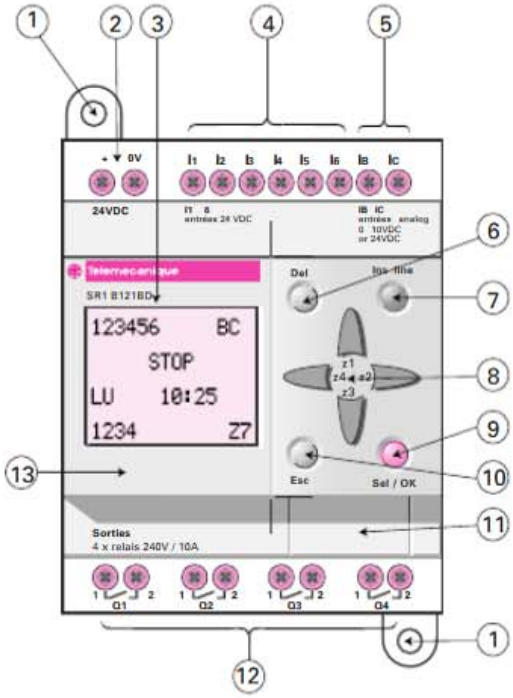


• Schéma réalisé à l'aide des bistables RS

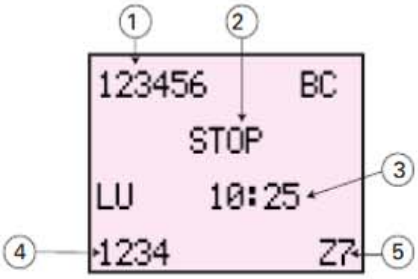


Nota :
Le bistable RS associé à l'étape est initialement à l'état 1.
Les autres bistables sont à l'état 0.

• Description d'un automate programmable Zelio Logic 2

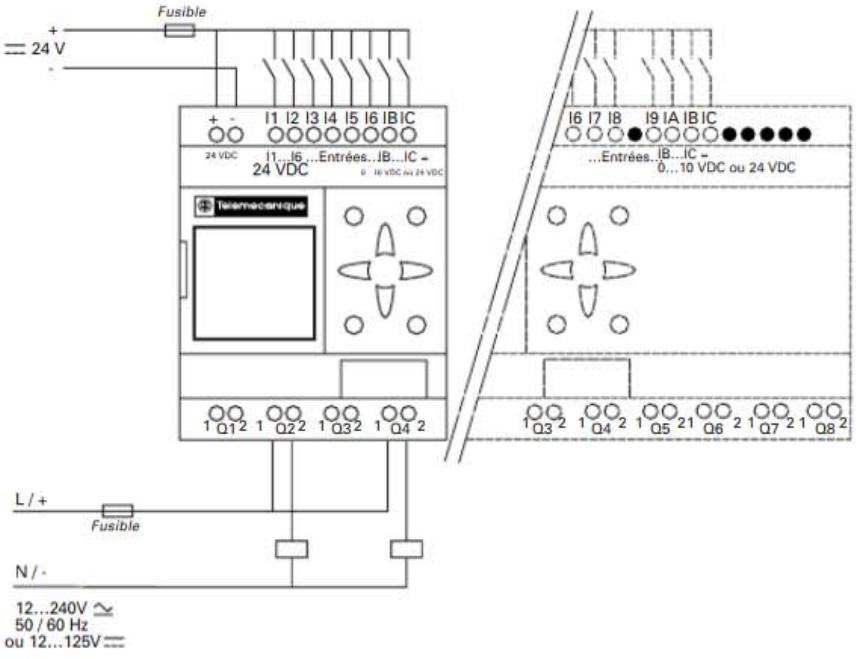


1 - Pattes de fixation rétractables
2 - Alimentation 24 VCC sur SR1**** BD, 100/240 VCA sur SR1**** FU
3 - Afficheur LCD, 4 lignes, 12 caractères
4 - Bornier à vis des entrées 24 VCC sur SR1 ****BD, 100/240 VCA sur SR1**** FU
5 - Sur SR1**** BD entrées analogiques 0-10 Volts utilisables en TOR 24 VCC
6 - Touche de suppression
7 - Touche insertion ligne
8 - Touches de navigation ou après configuration bouton poussoir Z
9 - Touche de sélection et validation
10 - Touche échappement
11 - Emplacement mémoire de sauvegarde ou câble de raccordement PC
12 - Bornier sorties relais
13 - Emplacement pour étiquette relégendable.

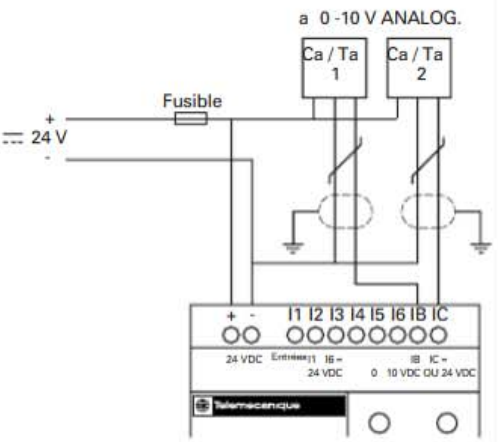


1 - Visualisation de l'état des entrées (B et C représentent les entrées analogiques)
2 - Visualisation du mode de marche (RUN/STOP)
3 - Visualisation d'un paramètre, par défaut jour et heure pour les produits avec horloge
4 - Visualisation de l'état des sorties
5 - Visualisation des touches Z lorsqu'elles sont activées.

Entrées et Sorties tout ou rien

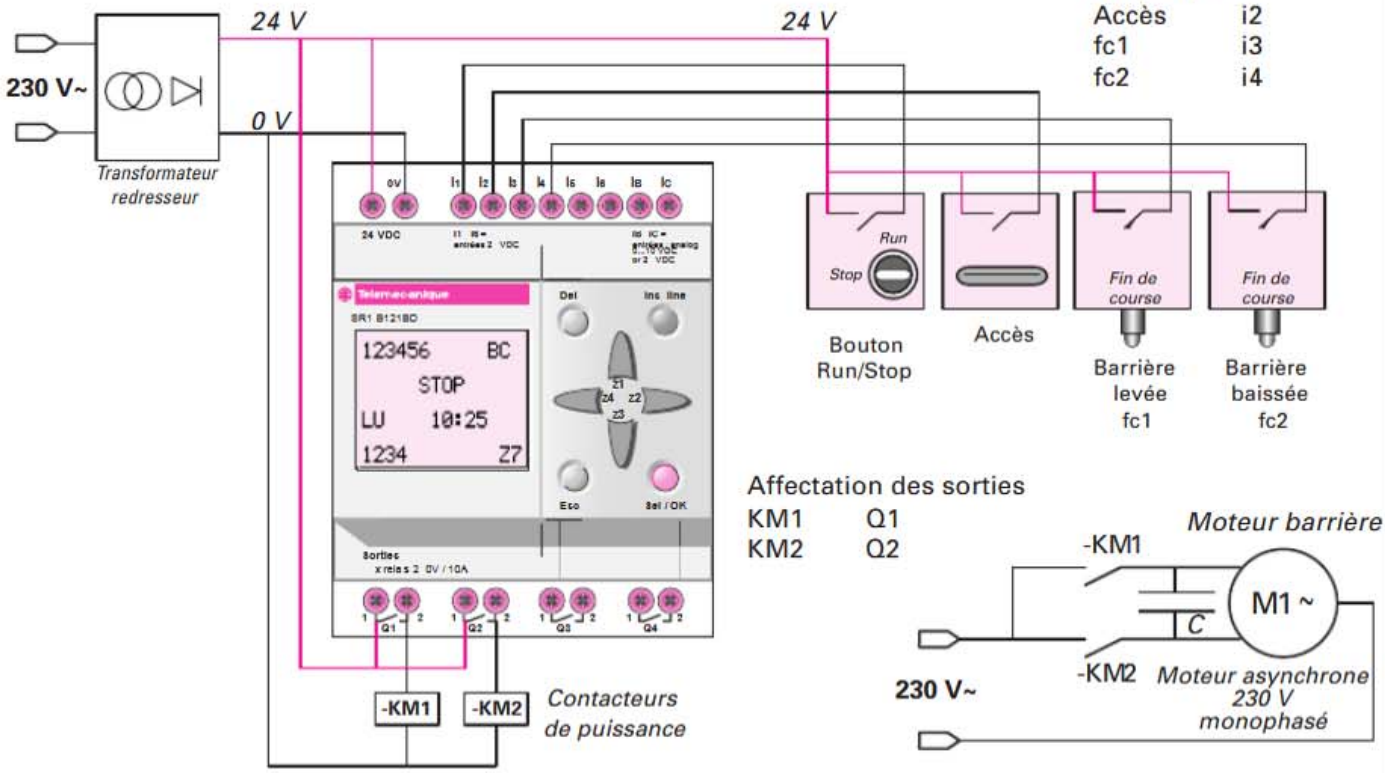


Entrées analogiques

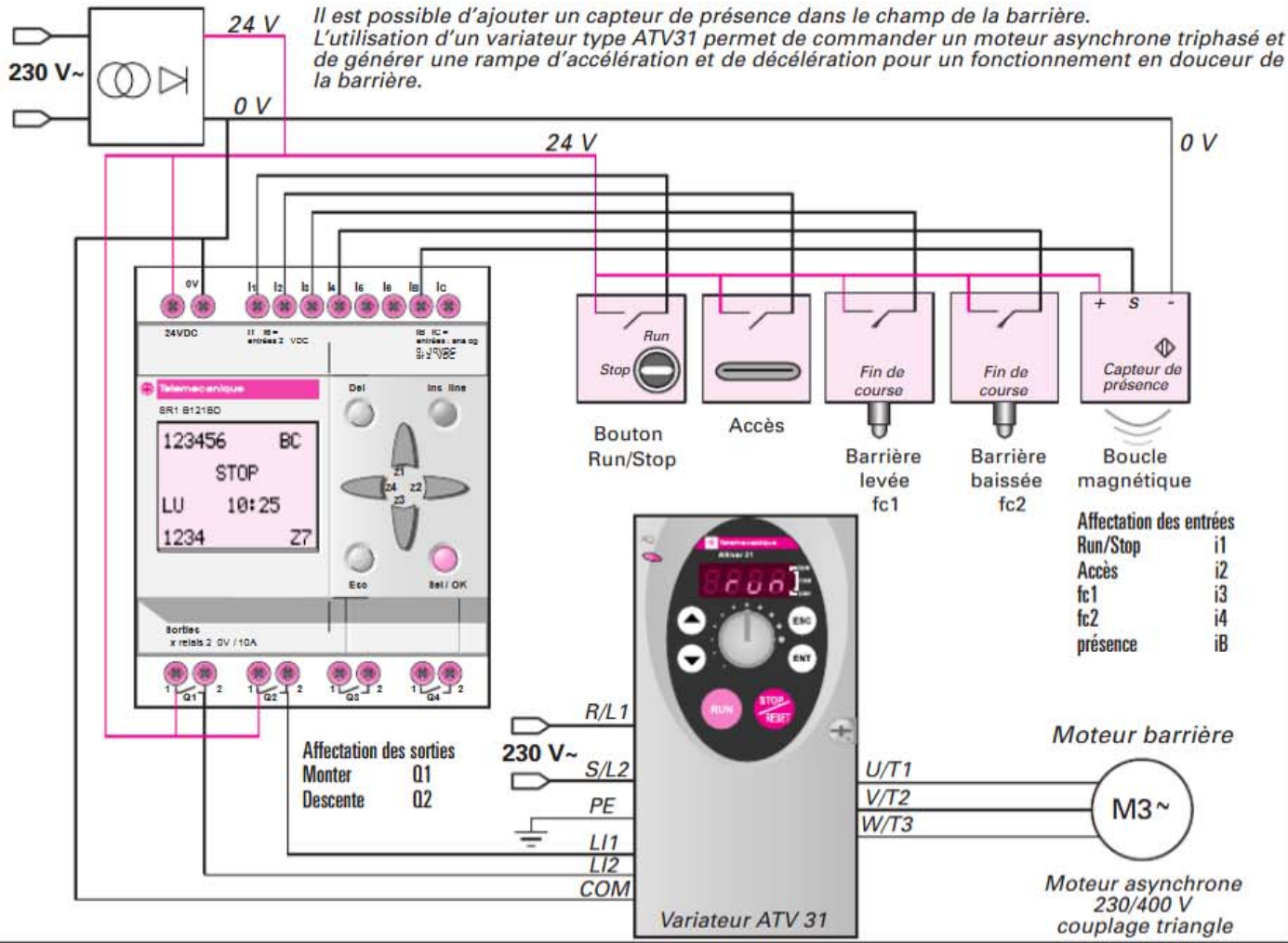


www.schneider-electric.com

• Schéma de câblage d'un API (accès de parking)



• Schéma de câblage d'un API avec améliorations.



8.5. LE GRAPHE D'ÉTATS

8.5.1. STATEFLOW, DÉFINITION ET CONSTITUTION

SysML est une extension du langage UML (*Unified Modeling Language*). Il est dédié à l'ingénierie système. Ce langage est articulé autour de diagrammes propres (diagrammes des exigences, paramétrique…) et de diagrammes issus de UML (cas d'utilisation, diagramme de séquence, diagramme d'état…). Le diagramme d'état noté STM : « *state machine* » a les principaux éléments syntaxiques très proches de ceux d'un **diagramme Stateflow de Matlab Simulink.**

Dans ces quelques pages sera décrite la façon d'utiliser Stateflow comme graphes d'état.

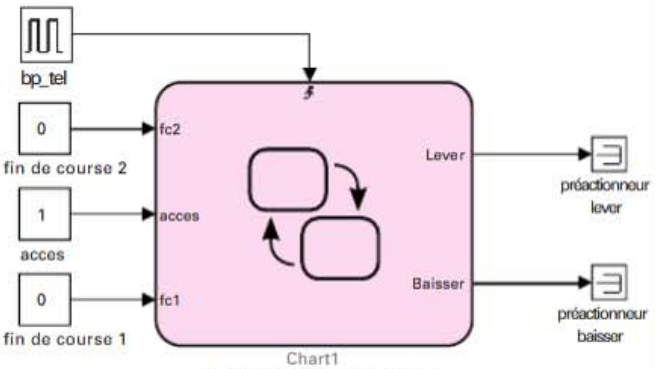
Définition :

La synthèse d'un graphe d'états permet d'obtenir une machine à états réalisant la partie commande d'un système.

Les états représentent toutes les valeurs que peuvent prendre au fil du temps les variables internes du circuit de logique séquentielle.

La notion d'événement intervenant dans ces systèmes pour le passage d'un état à un autre, ils sont également appelés systèmes à événements discrets ("discret" s'oppose à "continu").

Le graphe d'états, comme l'algorigramme et le GRAFCET, est essentiellement un outil graphique permettant de modéliser le comportement séquentiel, en termes de déroulement d'actions temporelles.



Exemple barrière automatique :

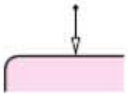
Constitution d'un graphe d'états

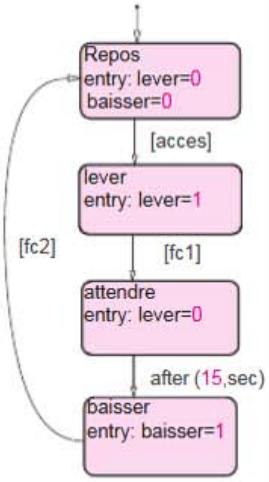
Etat

Chaque état est dessiné sous la forme d'un rectangle aux coins arrondis, contenant son nom. (ici *Repos, lever, attendre, baisser*), le logiciel d'édition propose par défaut les noms e1, e2, e3… e_n.

Il existe différentes sortes d'états :

L'état initial : pseudo-état qui indique un point d'entrée dans un graphe.

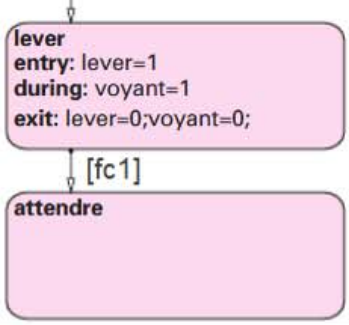




Etat : un état représente une période de la vie du système. Pendant cette période, le système accomplit une ou plusieurs "actions" (ou "activités"), ou attend un "événement". Il peut être actif ou non ; plusieurs états peuvent être actifs en même temps dans le même système.

On peut définir une ou des action(s) en activant l'état : «**entry**»
On peut définir une ou des action(s) pendant l'activité de l'état : «**during**»
On peut définir une ou des action(s) en désactivant l'état : «**exit**»

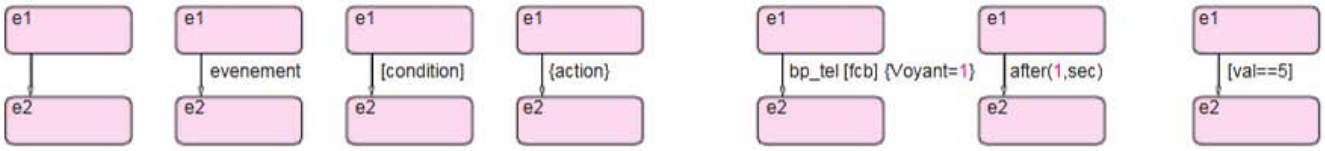
Si plusieurs actions sont associées à un mot-clé, elles seront séparées par un point-virgule ou une virgule.



8.5.2. TRANSITION

Une transition représente le passage instantané d'un état vers un autre. On appelle état source, l'état de départ d'une transition et état destination, l'état d'arrivée. Une transition n'est évaluée que si l'état source est actif. Une **transition** peut aussi être **automatique**, lorsqu'on ne spécifie pas l'événement qui la déclenche.

Evénement [condition de garde] {action sur condition}



Transition déclenchée par une **condition de garde** : il s'agit d'une expression booléenne **encadrée de crochets**, évaluée lorsque l'état précédant la transition est vrai et que l'événement déclencheur se produit. Si la condition de garde est vraie, la transition est alors franchie, sinon elle ne l'est pas et l'événement est perdu.

Il est possible d'écrire [acces] qui sous-entend que l'entrée «acces» =1
sinon il est possible d'écrire : [acces==1]
Pour la condition acces=0 on écrira : [~acces] ou [acces==0]

Une **transition** est **déclenchée par un événement**. C'est l'arrivée d'un événement (front montant ou descendant ou les deux) qui conditionne le franchissement de la transition. L'événement est **écrit sans crochet**. En exemple : bp_tel.

L'action sur transition, si elle existe, est réalisée lors de la transition. En exemple : {Voyant=1}

Écriture de la condition de transition : la syntaxe utilisée est celle du langage C

Valeur à 1 : [a==1] ou [a]
Valeur à 0 : [a==0] ou [!a] ou [~a] (a barre)
Opérateur d'inégalité : > < >= <= != <>

Opérations logiques :
a OU b → [a|b]
a ET b → [a&&b]
a XOR b → [a^b]

Événement temporisé :
le temps de simulation peut s'exprimer en **secondes (sec)**, en **millisecondes (msec)**, en **microsecondes (µsec)**. Le temps de simulation est un réel positif. Il dépend du processeur et de ses capacités à mener les calculs liés au modèle. Il ne correspond pas au temps réel.

Le temps d'échantillonnage « *sample time* » du solveur s'exprime en tick.
Il correspond à un pas de calcul et il est ajusté au moment de la définition du solveur. Le nombre de ticks est donc un nombre entier.

after, après le temps indiqué
after(valeur, unité) exemples : *after(15,sec), after(250,msec), after(100,usec), after(100,tick)*

before, condition avant que la durée indiquée soit écoulée
before(valeur, unité)[condition] exemple : *before(5,sec)[entree==1]*

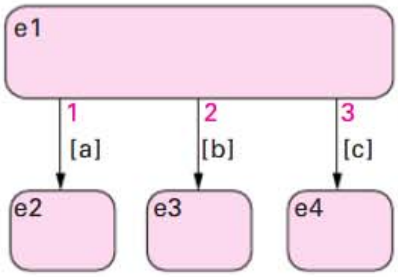
at, définit la date à laquelle la transition sera activée. **at(valeur,tick)** exemple : *at(10,tick)*

every, tous les n pas de calcul, faire...
every(valeur,tick):action exemple : *every(100,tick):compteur++*

Le graphe d'états

Hiérarchie des transitions

Le passage de l'état e1 vers les états e2, e3, e4 est contrôlé par les conditions de gardes [a], [b], [c]. Dans le cas où plusieurs conditions de gardes seraient vraies, c'est le nombre indiqué au départ de la transition qui définit la priorité de passage. Si [a], [b] ,[c] sont vraies, c'est la transition [a] qui sera validée, car elle a la priorité la plus élevée (1).

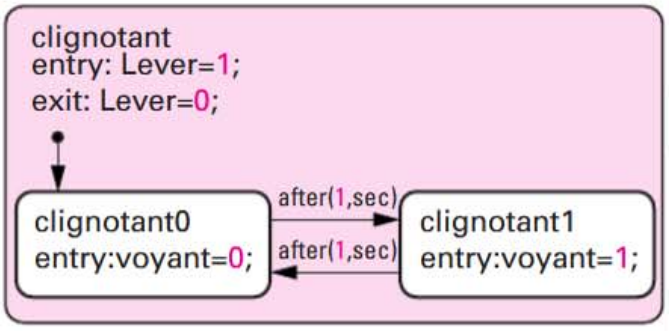


L'ordre d'évaluation des transitions peut être modifié en sélectionnant la ou les transitions à modifier, clic droit, « *Properties...* ». Sélectionner l'ordre d'évaluation dans la liste déroulante « *Execution order* ».

8.5.3. SUPER-ÉTATS OU ÉTATS COMPOSITES

Un super-état est un élément de structuration des diagrammes d'états (il s'agit d'un état qui englobe d'autres états et transitions).

L'exemple ci-contre décrit la levée de la barrière :

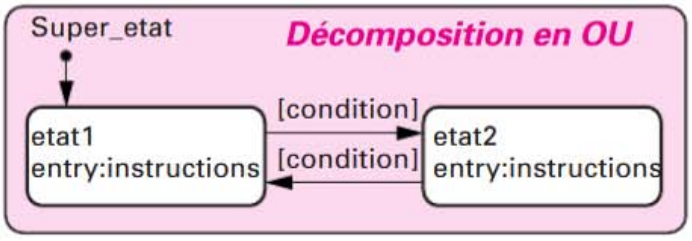


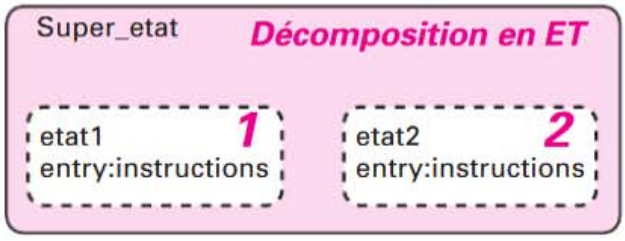
- À l'activation du super-état : la sortie «*Lever*» passe à 1 (entry:Lever=1;).
- Durant la durée de vie du super-état, le graphe d'états interne s'exécute.
  - Il est démarré par la transition initiale,
  - les deux états s'activent sucessivement toute les secondes pour générer le clignotement.
- À la désactivation du super-état, la sortie «*Lever*» passe à 0 (exit: Lever=0;) et le clignotement cesse.

Décomposition exclusive «OU» (OR) ou parallèle «ET» (AND) des états composites.

État «OU» : Les états «OU» représentent des états de fonctionnement mutuellement exclusifs. Des états «OU» ne peuvent pas être actifs ou s'exécuter en même temps. Il s'agit donc de la fonction Ou Exclusif. On parle alors d'états exclusifs, et on associe un nom à chaque état.

État «ET» : Les états «ET» représentent des états de fonctionnement totalement indépendants. Plusieurs états de même niveau hiérarchique peuvent être actifs simultanément. Ces états sont représentés graphiquement par un rectangle en trait pointillé, et un numéro indique l'ordre d'exécution. On associe un nom à chaque état.



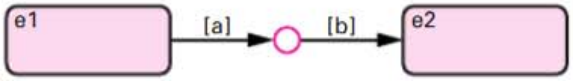


Dans le super-état en décomposition parallèle, lorsque **Super_etat** est activé alors **etat1** ET **etat2** sont actifs simultanément. La présence d'une transition par défaut affectée à **etat1** ou **etat2** n'a pas lieu d'être du fait de la simultanéité de l'activation des états.
On accède à la décomposition en sélectionnant le super-état par un clic gauche, puis clic droit, «*Decomposition...* »

8.5.4. DIAGRAMMES DE FLUX : FLOW CHARTS

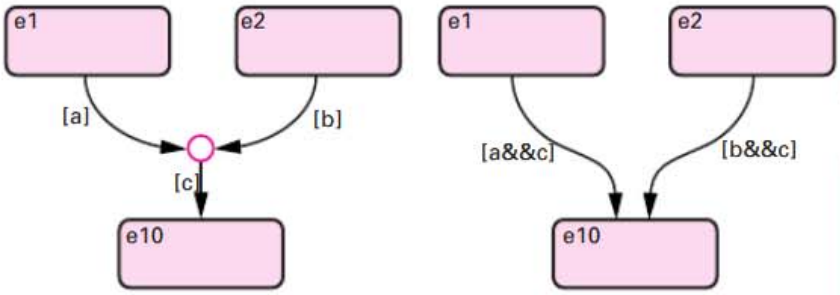
Les « *Flow Charts* » ou diagrammes de flux sont pratiques pour décrire les structures algorithmiques de base comme les structures alternatives ou de choix, et les structures itératives ou répétitives.
Le diagramme de flux contrairement aux diagrammes d'état (« *State Chart* ») ne comporte pas d'état, mais uniquement des transitions et des jonctions.

La jonction (« *Junction* »)



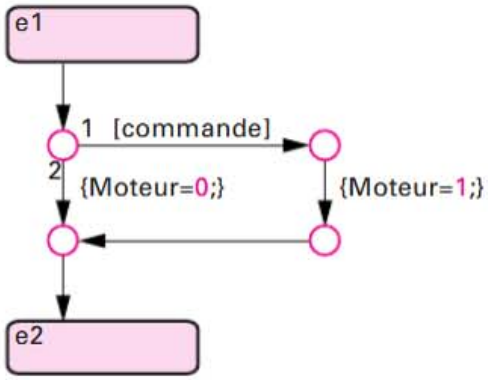
La jonction (« *Junction* ») est un pseudo-état utilisé par exemple pour factoriser des expressions booléennes associées à des conditions.

Dans l'exemple ci-contre, lorsque la condition [a] est vraie, la jonction devient active (c'est un pseudo-état), mais e1 n'est pas désactivé pour autant. e10 sera activé si [c] devient vrai, e1 est alors simultanément désactivé..
Lorsque [b] ET [c] est vraie e10 sera activé et e2 est alors simultanément désactivé, cela est équivalent aux transitions : [a&&c], [b&&c]



Exemples de diagrammes de flux
Condition si, alors, sinon

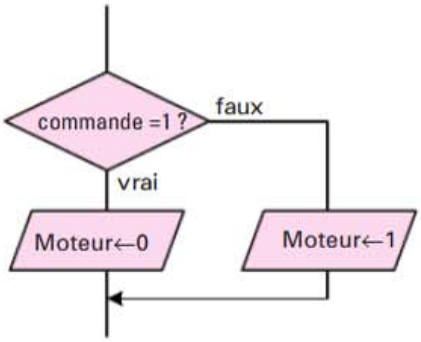
StateFlow



Algorithme

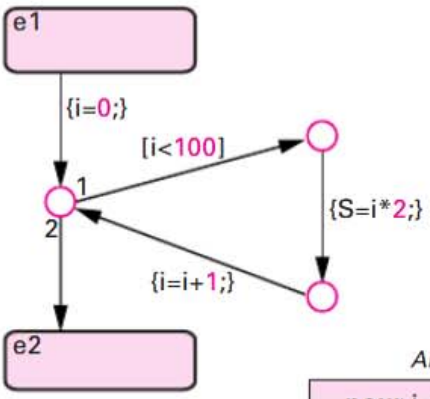
```
si commande =1
   alors Moteur←1
   sinon Moteur←0
finsi
```

Algorigramme

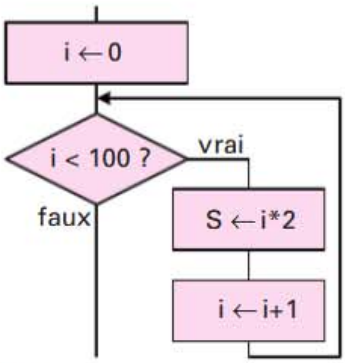


Boucle Pour

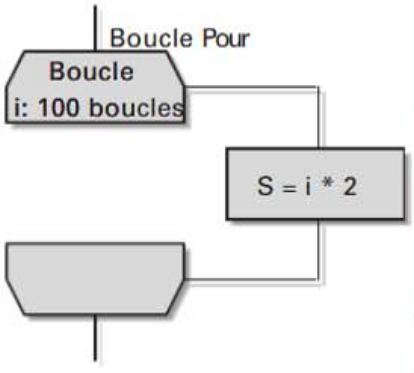
Stateflow



Algorigramme



Algorigramme Flowcode



Algorithme

```
pour i=0 à 100 faire
   S=i*2
finpour
```

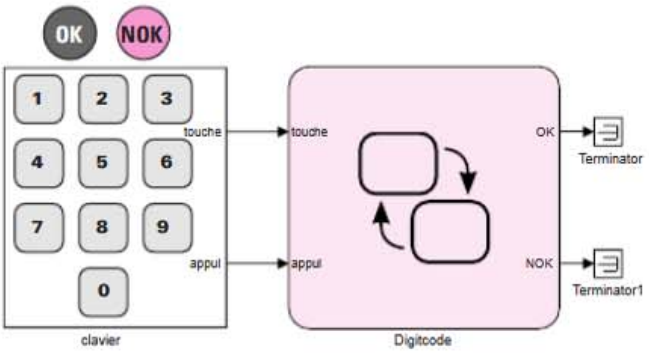
8.5.5. EXEMPLE, DIGICODE AVEC UN CODE À UNE LONGUEUR FIXE DE 6 CHIFFRES.

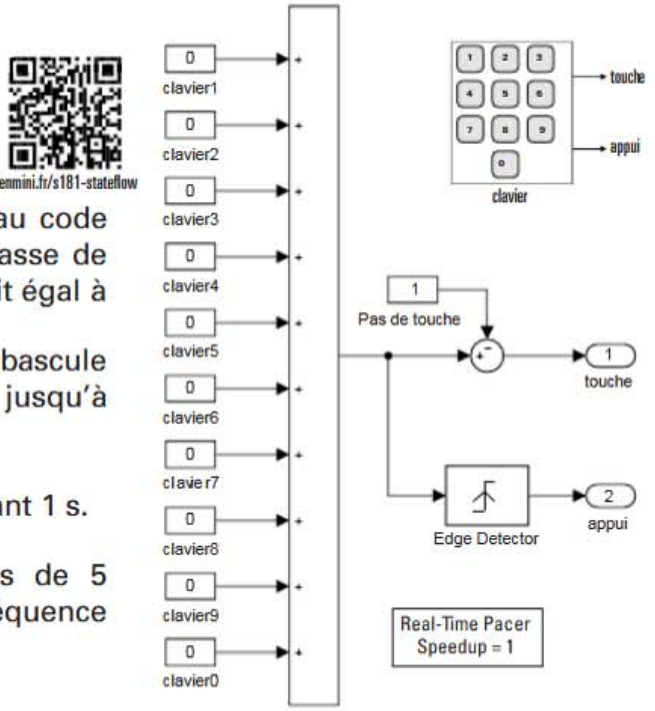
Le digicode renvoie deux informations :

- La valeur "touche" de la touche appuyée (de 0 à 9, -1 quand aucune touche n'est activée).
- Un front montant "appui" indique l'appui d'une touche.

Le graphe d'états :

- Reçoit les deux informations précédentes et renvoie en retour deux sorties "OK", "NOK" qui allument les deux voyants au-dessus du clavier rouge et vert.



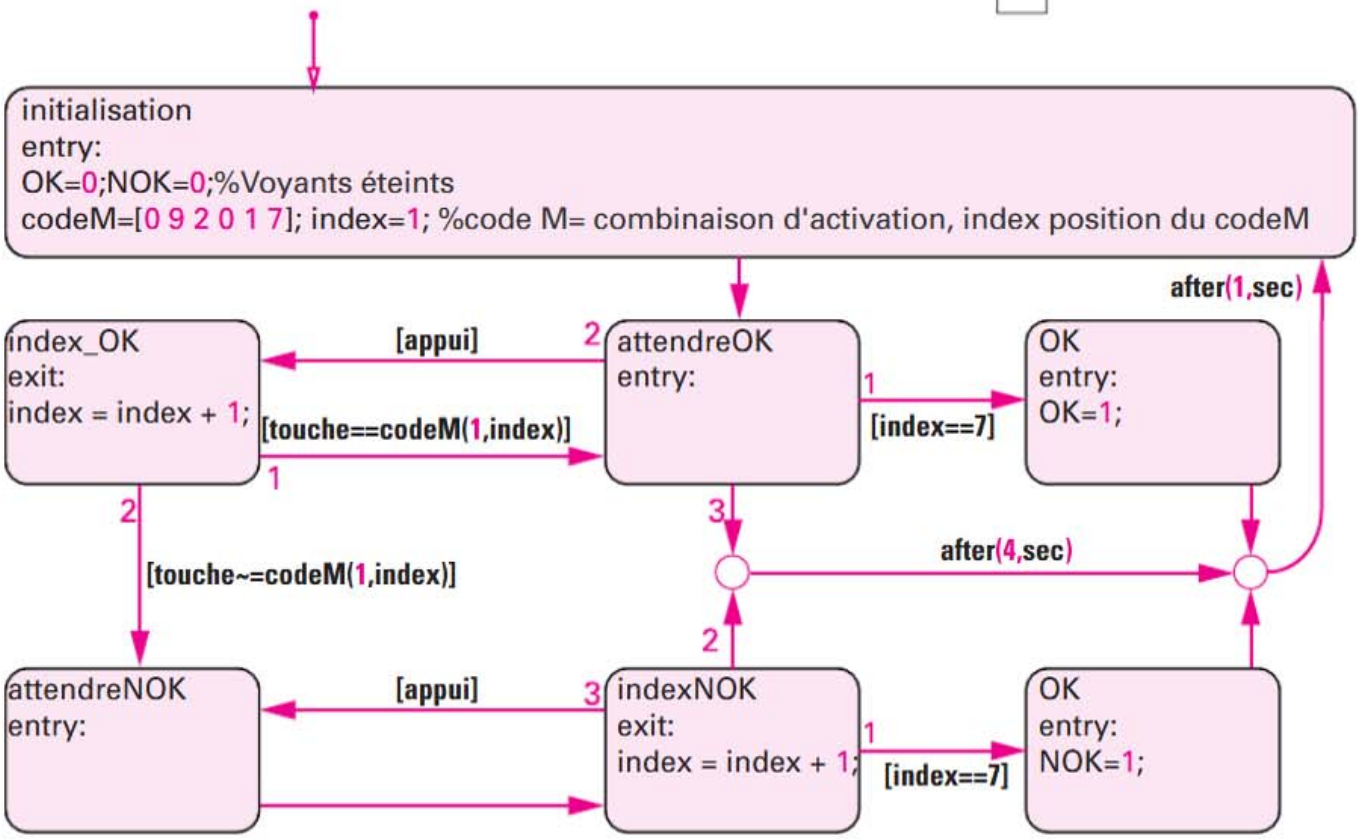


liemmini.fr/s181-stateflow

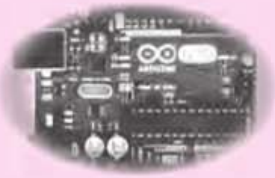
Fonctionnement :

À chaque appui, la valeur touche est comparée au code enregistré. Tant que le code est bon le graphe passe de «attendreOK» à «indexOK» jusqu'à ce qu'index soit égal à 7 soit 6 tests (incrémentation après le test).
Durant cette phase si le code est erroné le graphe bascule sur la ligne NOK et laisse entrer les codes restants jusqu'à ce qu'index soit égal à 7 soit 6 tests.

L'introduction du bon code active la sortie OK durant 1 s.
Toute autre séquence active NOK durant 1 s.
Durant l'introduction d'un code, si durant plus de 5 secondes (4+1) aucune touche n'est appuyée, la séquence se réinitialise.



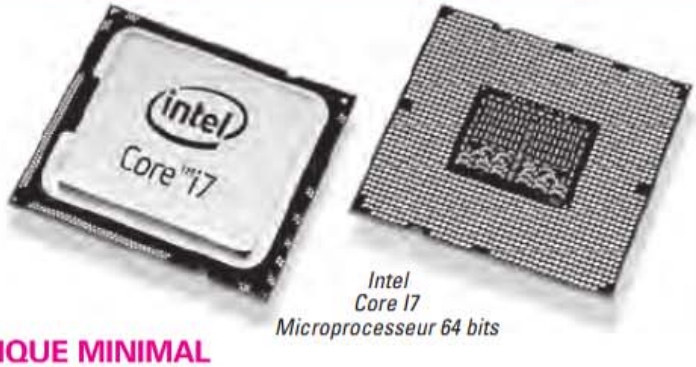
9 Traitement de l'information



9.1. STRUCTURE À MICROPROCESSEUR 468
9.1.1. Structure d'un système informatique minimal 468
9.1.2. Les bus 468
9.1.3. Description d'un microprocesseur 469
9.1.4. Organisation générale d'une unité centrale simple 8 bits 469
9.1.5. Les mémoires 471
9.1.6. Jeu d'instruction étendu CISC 473
9.1.7. Jeu d'instruction réduit RISC 473
9.1.8. Modes d'adressage pour les données 474
9.1.9. Opérations élémentaires entre registres 475
9.1.10. Architecture d'un système à microprocesseur 476
9.2. CARTES DE DÉVELOPPEMENT À MICROCONTRÔLEUR 477
9.2.1. Cartes Arduino 477
9.2.2. Programmer une carte Arduino 478
9.2.3. ATmega 238 479
9.2.4. Schéma structurel Arduino UNO 480
9.2.5. ATmega 2560 481
9.2.6. Schéma structurel Arduino MEGA 482
9.3. LES LANGAGES DE PROGRAMMATION 483
9.4. ALGORITHMIQUE 484
9.4.1. Étapes-clés de la programmation 484
9.4.2. Qu'est-ce que l'algorithmique ? 484
9.4.3. Notations générales 485
9.4.4. Déclaration de constantes et variables 485
9.4.5. Déclaration des fonctions et structures 486
9.4.6. Communiquer avec un programme 486
9.4.7. Les structures alternatives 486
9.4.8. Itérations et boucles (répétition) 487
9.4.9. Règles de l'algorithmique 488
9.4.10. Exemples de programmes 488
9.5. CHAÎNE D'ACQUISITION 490
9.5.1. Acquisition de données avec l'aide d'une carte microcontrôleur 490
9.5.2. Mesurer des tensions à l'aide d'une carte Arduino et Matlab Simulink 491
9.5.3. Capteur I²C : capteur de lumière numérique TSL2561 493
9.5.4. Capteur de lumière numérique TSL235 495
9.5.5. Capteur I²C : accéléromètre 3 axes MMA7455L 497
9.5.6. Capteur I²C : accéléromètre gyroscope 3 axes MPU-6050 498
9.5.7. Capteur de température numérique DS18B20 500
9.5.8. Capteur télémètre ultrason HC-SR04 501
9.6. MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE 503
9.7. LES LIAISONS NUMÉRIQUES 507
9.7.1. Signal continu ou discret 507
9.7.2. Liaison parallèle 507
9.7.3. Liaison série 509
9.7.4. Le protocole de communication série RS232 510
9.7.5. Transmission série asynchrone, synchrone 511
9.7.6. Liaison I²C 512
9.7.7. Mode de transmission, immunité aux perturbations 514
9.7.8. Le bus CAN 515
9.8. LES RÉSEAUX 518
9.8.1. Classification des réseaux informatiques selon leur taille 518
9.8.2. Topologie des réseaux informatiques 518
9.8.3. Les supports de transmission 519
9.8.4. Adressage 520
9.8.5. Le routage 521
9.8.6. Le modèle OSI 522
9.8.7. Le réseau Ethernet 523
9.8.8. Le protocole TCP/IP (transmission control protocol/internet protocol 523

9.1. STRUCTURE À MICROPROCESSEUR

MicroChip
PIC 16F628A
microcontrôleur 8 bits

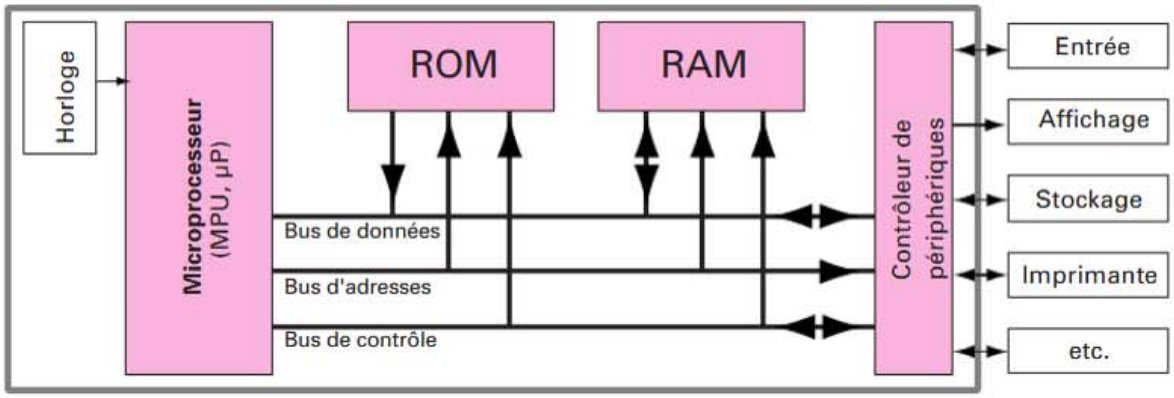


Intel
Core I7
Microprocesseur 64 bits

9.1.1.STRUCTURE D'UN SYSTÈME INFORMATIQUE MINIMAL

Il est constitué au minimum d'un microprocesseur, de mémoire morte (ROM) pour le démarrage et de mémoire vive pour le fonctionnement et d'un système d'entrée-sortie permettant de communiquer avec le monde extérieur (contrôleur de périphérique).

• Structure d'un microcontrôleur



9.1.2. LES BUS

Un bus est un groupement d'un certain nombre de fils électriques réalisant une liaison pour transporter des informations binaires codées sur plusieurs bits. Pour éviter de représenter 8, 16 ou 32 fils, on dessine une bande ou une liaison épaisse symbolisant le faisceau de fils.

• Le bus de données

Il transporte les données échangées entre les différents éléments du système. Le transfert a lieu, par exemple, de la mémoire vers le MPU (Microprocesseur Unit), du MPU vers la mémoire ou encore du MPU vers le contrôleur de périphérique. Le nombre de bits véhiculés par ce bus dépend du système informatique mais sera généralement de 8, 16, 32 ou 64 bits. 128 à 512 bits pour les cartes graphiques.

• Le bus d'adresses

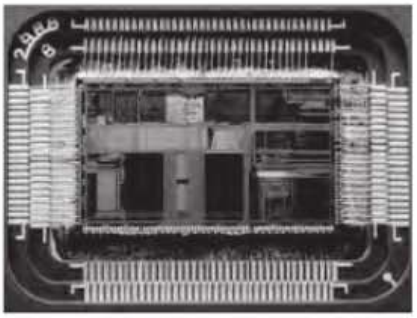
Il transporte les adresses générées par le MPU pour sélectionner une case mémoire ou un registre interne de l'un des boîtiers connectés au système. Cette adresse précise la source ou la destination des données qui transiteront sur le bus de données. Le nombre de bits véhiculés par ce bus dépend de la quantité de mémoire qui peut être adressée par le système.

- 16 bits pour un micro-processeur de 8 bits, ce qui permet d'adresser 64 kilo-octets
- 32 bits, pour les systèmes informatiques, qui permet d'adresser 4 096 Mo ou 4 Go.

• Le bus de contrôle ou bus de commande

Il transporte les différents signaux de synchronisation nécessaires au fonctionnement du système tels que les signaux lecture RD (Read), écriture WR (Write) et sélection CS (Chip Select : sélection du circuit).

9.1.3 DESCRIPTION D'UN MICROPROCESSEUR



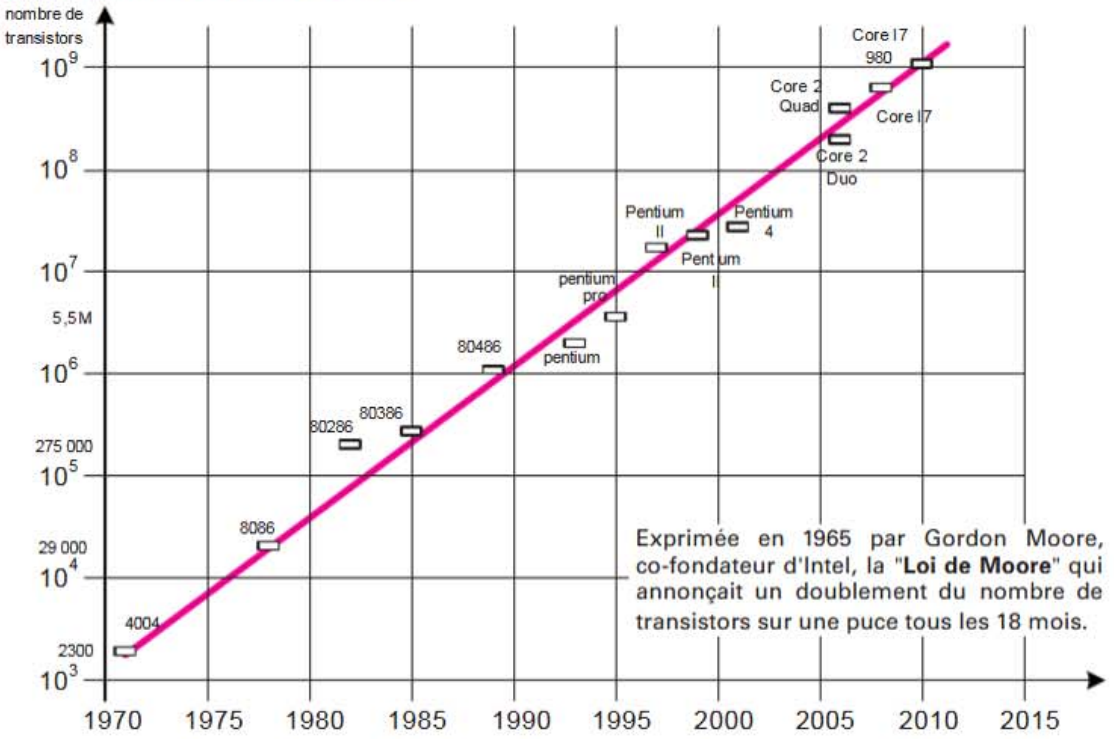
Intel 80486dx2

Un microprocesseur est un processeur dont les composants ont été suffisamment miniaturisés pour être regroupés dans un unique circuit intégré.
Fonctionnellement, le processeur est la partie d'un ordinateur qui exécute les instructions et traite les données des programmes.

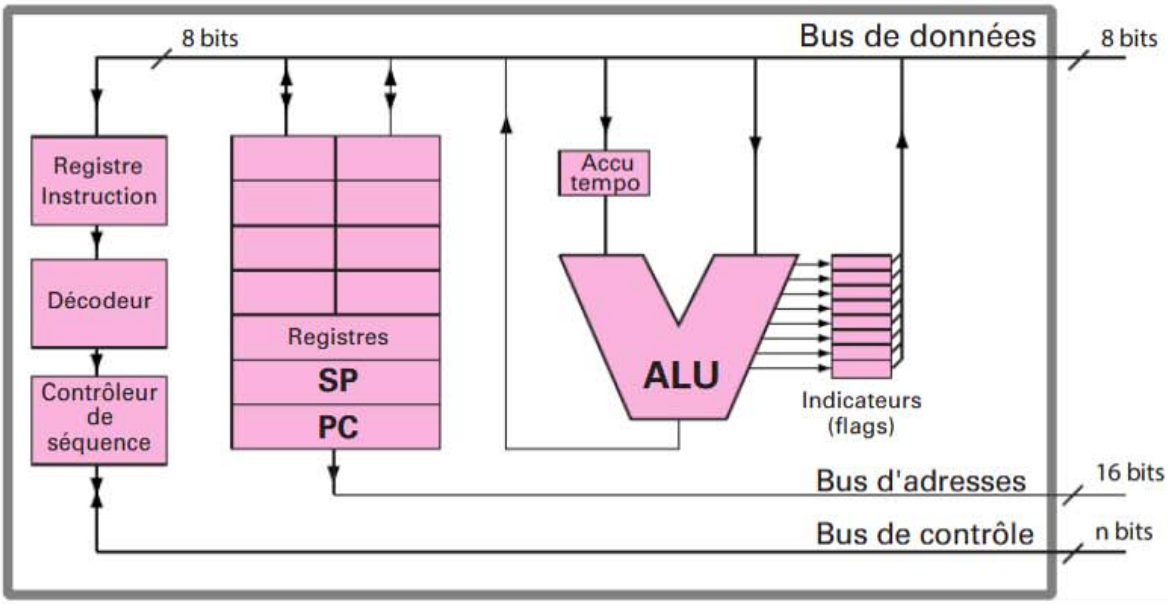
L'unité centrale d'un microprocesseur est constituée essentiellement :

- d'une unité arithmétique et logique ALU ou UAL (voir définition page suivante) ;
- d'une unité de contrôle de séquence (ou séquenceur) ;
- des registres.

• Évolution des microprocesseurs



9.1.4. ORGANISATION GÉNÉRALE D'UNE UNITÉ CENTRALE SIMPLE 8 BITS



Organisation générale d'une unité centrale simple 8 bits

• Description

L'unité arithmétique et logique (ALU ou UAL) : elle accomplit les opérations arithmétiques (addition, soustraction) et logiques (fonctions ET, OU, NON, ET-NON, OU-NON, XOR...). Elle est dotée, à l'une de ses entrées, d'un registre spécial appelé accumulateur. L'accumulateur présente la particularité de pouvoir être désigné, dans la même instruction, à la fois comme opérande source et comme opérande résultat.

Le registre indicateur d'état (flags) : à droite de l'ALU, se trouvent les indicateurs ou registres d'état. Leur rôle est de mémoriser des situations exceptionnelles qui peuvent survenir pendant le fonctionnement du microprocesseur. Le contenu du registre d'état peut être testé par des instructions spécialisées, ou lues sur le bus de données internes. Une instruction conditionnelle provoquera, ou ne provoquera pas, l'exécution d'une nouvelle partie du programme, selon la valeur de l'un de ces bits.

Les registres : leur rôle est de permettre de stocker temporairement des données sur lesquelles le microprocesseur va travailler. La majorité des instructions d'un microprocesseur utilise ces registres. Ils ont l'avantage d'être manipulés à grande vitesse car ils sont dans le microprocesseur.

Le compteur de programme PC : il est présent dans tout microprocesseur. Il contient l'adresse de la prochaine instruction à exécuter. Le contenu du PC est déposé sur le bus d'adresses et transmis à la mémoire. La valeur présente à l'adresse spécifiée est transférée vers le microprocesseur sur le bus de données. Cette valeur représente l'instruction recherchée.

Le pointeur de pile SP (de l'anglais Strack Pointer) : c'est un pointeur de zone mémoire particulier destiné à la gestion interne du microprocesseur.

• Décodage d'une instruction

Les instructions exécutées par le microprocesseur sont très diverses. On trouve des instructions de chargement (load), de sauvegarde (save), de déplacement (move), d'addition (add), de soustraction (sub), etc. Chaque instruction va déclencher un certain processus.

Le **C**ompteur de **P**rogramme **PC** envoie une adresse sur le bus d'adresse. Quelques nanosecondes plus tard arrive une donnée via le bus de données. Cette donnée sera la première instruction. Elle arrive au registre d'instruction, qui va la mémoriser, le bus de données est de nouveau libre. Le décodeur va décoder l'instruction à partir de sa table de référence. Une fois identifiée, elle est transférée au contrôleur de séquence.
Le contrôleur de séquence va exécuter l'instruction en pilotant toutes les autres fonctions du microprocesseur (registres ALU, etc.). Par exemple, utilisation de l'accu et de l'ALU pour réaliser une addition. C'est lui qui va séquencer si cela est nécessaire la recherche d'une donnée contenue en mémoire, pour l'additionner avec l'accu.
Une fois l'instruction terminée, le PC est incrémenté et on recommence ce cycle avec une nouvelle instruction.

• L'horloge

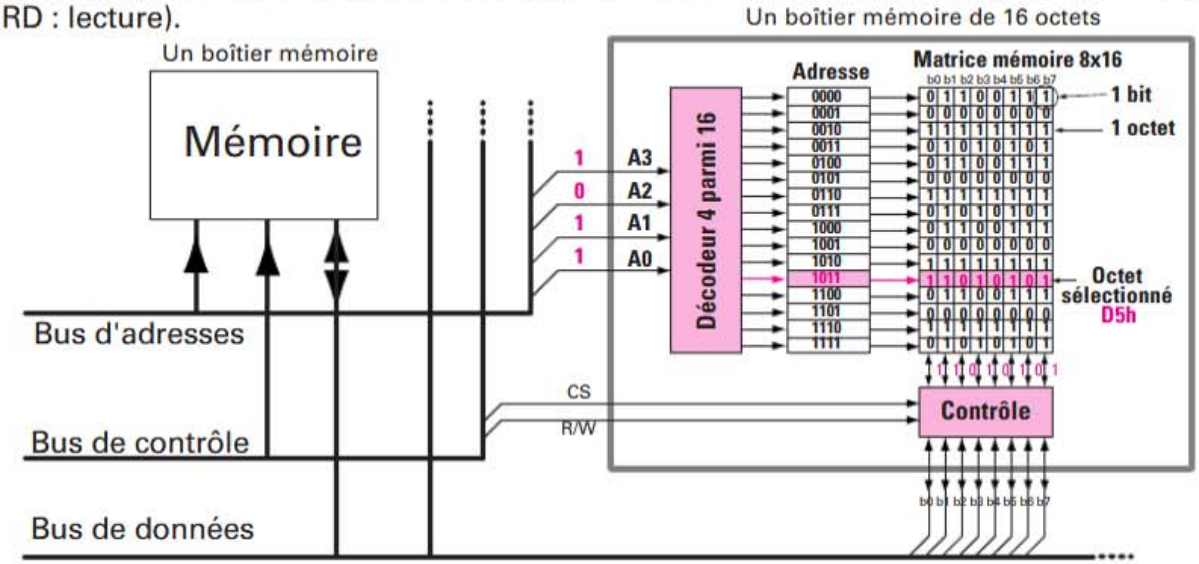
Le dernier élément est certainement le plus simple. Il s'agit d'un générateur de signaux périodiques dont la sortie est un signal rectangulaire de fréquence comprise entre 1 MHz et 4 GHz.
Chaque front du signal va déclencher une phase du fonctionnement du microprocesseur.
Approximativement 4 périodes d'horloge suffisent pour exécuter une instruction simple. Naturellement, plus la fréquence sera élevée plus les instructions seront rapidement exécutées.

Remarque : tous les circuits possèdent une vitesse d'accès minimale. Par exemple, sur une mémoire, on trouvera, sur le boîtier, la référence, dans la documentation constructeur est donné le temps d'accès mini. Exemple : K4B1G1646 il s'agit d'une SDRAM de 1Gb avec un temps d'accès moyen d'environ 13 ns, ce qui implique approximativement une fréquence d'accès de 77 MHz.

9.1.5. LES MÉMOIRES

La mémoire est composée de circuits intégrés permettant de mémoriser des mots qui sont très souvent des octets. Un microprocesseur travaille avec cette mémoire, il a besoin de milliers voire de millions d'octets. Pour sélectionner un octet parmi des milliers, il faut affecter à chaque octet une adresse. Cette adresse est véhiculée par le bus d'adresses.

Dans l'exemple ci-dessous, on dispose de 4 lignes d'adresses, soit 2^4 sélections possibles, donc 16 mémoires. Sur cette mémoire, on trouvera 8 liaisons pour les données, reliées au bus de données. Chaque case mémoire stocke 8 bits donc 1 octet. **C'est une mémoire de 16 octets ou 128 bits.**
Il reste 2 à 5 liaisons (bus de contrôle) permettant un contrôle sur cette mémoire, en l'isolant du bus de données (CS) ou en permettant aux données de rentrer dans la mémoire (WR : écriture) ou de sortir (RD : lecture).



• **Bit = Cellule mémoire** : circuit électrique ou dispositif qui stocke un seul bit (0 ou 1).

• **Mot mémoire** : groupe de bits dans la mémoire. On rencontre habituellement des mots de 8, 16, 32 ou 64 bits.

• **Octet** : expression spécifique à un mot de 8 bits.

• **Capacité** : nombre correspondant à la quantité de bits que l'on peut mémoriser. Par exemple, supposons une mémoire ayant 1 048 576 mots de 8 bits. Cela représente une capacité de mémorisation de 1 048 576 × 8 = 8 388 608 bits ou 8 192 kbits ou 8 Mbits. Le nombre de mots dans une mémoire est souvent un multiple de 1024 (1024 bits = 1 ko, 1024 ko = 1 Mo, 1024 Mo = 1 Go). La mémoire précédente peut s'exprimer sous la forme « 8 Mbits » ou « 1 Moctet ».

• **Adresse** : nombre qui permet la localisation physique d'un mot en mémoire. Par exemple, pour une mémoire de 1 kmots, si le premier mot est à l'adresse 000 H (H code hexadécimal), le dernier mot sera à l'adresse 3FF H car 3FF a pour équivalent décimal 1023.

• **Lecture** : opération pendant laquelle un mot binaire, stocké dans un emplacement mémoire est retrouvé puis transféré vers la sortie de la mémoire.

• **Écriture** : opération au cours de laquelle un nouveau mot est installé dans un certain emplacement mémoire. Chaque fois qu'un nouveau mot est installé dans un emplacement, il remplace le mot s'y trouvant déjà.

• **Temps d'accès** : cette valeur précise le temps qui s'écoule entre le moment où la mémoire reçoit le signal de commande d'une opération et le moment où cette opération est effectuée. Pour les mémoires du type ROM, ce temps vaut environ 100 à 200 ns alors que pour les mémoires RAM ce temps vaut environ 2 à 10 ns.

Les mémoires

• Les mémoires mortes

Dans un contexte d'utilisation normale, les données inscrites dans une mémoire morte sont inaltérables ; elles peuvent seulement être lues. Toutefois, certaines mémoires peuvent être effacées et reprogrammées aussi souvent qu'on le veut.

• **ROM (Read Only Memory)** : elle a été programmée par le fabricant en usine. Son programme ne pouvant être modifié, ce procédé ne convient qu'à des applications de très grandes séries.

• **PROM (Programmable ROM)** : elle est constituée de liaisons fusibles que l'utilisateur peut programmer en détruisant ou non ces liaisons. Dès que le fusible a fondu, il est impossible de revenir en arrière.

• **EPROM (Erasable PROM)** : une EPROM peut être programmée par un utilisateur, mais il est en outre possible de l'effacer par exposition de la mémoire à une lumière ultraviolette, puis de la reprogrammer.
Inconvénient : il faut les retirer de leur support pour les effacer et les programmer. L'effacement touche tout le contenu de la mémoire. Il faut quelques minutes pour l'effacer et autant pour la reprogrammer.

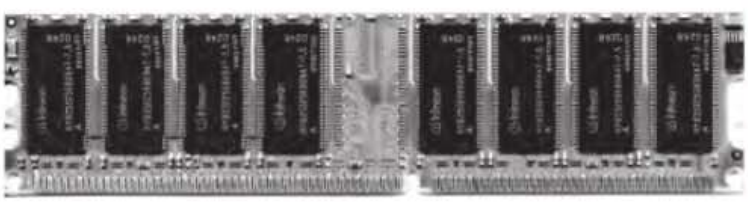
• **EEPROM (Electrically EPROM)** : elle peut être effacée et reprogrammée par application de tensions appropriées (de 12 V à 25 V), ce qui permet de ne pas retirer le composant du circuit si certains composants spécifiques font déjà partie intégrante du montage. Elle permet, de plus, la reprogrammation de mots individuels, et le temps de réécriture est inférieur à 10 ms.

• Les mémoires vives

• **RAM (Random Access Memory)** : la RAM est une mémoire que l'on peut lire et sur laquelle on peut aussi écrire. Dans un système de contrôle, la quantité de RAM sera généralement réduite à la taille nécessaire au rangement des données (quelques dizaines à quelques milliers d'octets).
Au contraire, dans un contexte bureautique et multimédia, la quantité de RAM sera plus importante, pour contenir à la fois les programmes et les données (de 8 Go à 32 Go en 2017).
Elles sont fabriquées à partir de transistors bipolaires (NPN ou PNP) ou MOS (metal oxide semiconductor), mais quelle que soit la technologie employée, on trouve des mémoires vives statiques ou dynamiques. Les informations seront de toute façon perdues à la coupure de l'alimentation

• **RAM statiques** : la cellule de base (mémoire élémentaire) est la bascule. Il suffit donc de maintenir la tension d'alimentation du circuit pour conserver l'information. Les capacités actuelles vont de 1 ko à 128 Mo.

• **RAM dynamiques** : il s'agit de mémoires intégrées utilisant des capacités (capacité de grille source d'un transistor MOS) comme support physique.
L'utilisation de la capacité comme élément mémorisant présente deux avantages : la simplicité et la possibilité d'intégrer un grand nombre de cases mémoires dans un même circuit (de 64 Kbits à 1 Gbits). Par contre, l'affaiblissement rapide de chaque charge nécessite un dispositif de régénération, on dit encore de rafraîchissement qui, toutes les quelques millisecondes, doit procéder à la lecture puis à la réécriture des informations mémorisées. La mémoire dynamique est donc intéressante économiquement pour des systèmes nécessitant une capacité mémoire importante.



9.1.6. JEU D'INSTRUCTION ÉTENDU CISC

CISC en anglais : **C**omplex **I**nstruction **S**et **C**omputer

Un microprocesseur à jeu d'instructions étendu, désigne un microprocesseur possédant un jeu d'instructions comprenant de très nombreuses instructions mixées à des modes d'adressages complexes. L'architecture CISC est opposée à l'architecture RISC.

Avantages
Possibilité de microprogrammation, donc de corriger le jeu d'instructions.
Permet d'utiliser des instructions très complexes.

Inconvénients
Le microprocesseur est plus compliqué à accélérer.
Le processeur est globalement plus complexe.
Les compilateurs ont des difficultés à générer des instructions complexes.

9.1.7. JEU D'INSTRUCTION RÉDUIT RISC

RISC en anglais : **R**educed **I**nstruction **S**et **C**omputer

L'architecture RISC fait le choix de limiter le jeu d'instructions à seulement quelques instructions. Le processeur se comporte comme s'il y avait une instruction exécutée par cycle d'horloge. De plus, la division de chaque instruction en plusieurs étapes autorise une fréquence d'horloge plus grande puisque la profondeur combinatoire entre deux registres est diminuée. Ces deux caractéristiques ont pour conséquence une division du temps d'exécution pour toutes les instructions de base.

Avantages
Du fait que chaque instruction est simple, le décodage et l'exécution par le processeur est très rapide, idéalement en un seul cycle.

Inconvénients
Diminution de la lisibilité du code si l'on programme en assembleur.

• Les instructions

Format des instructions : les instructions d'un système de traitement de l'information peuvent comporter un, deux, trois ou quatre octets. Une instruction sert à spécifier l'action que doit accomplir le microprocesseur ou microcontrôleur.
Chaque instruction est constituée d'un code-opération suivi d'un opérande optionnel, sur un ou deux mots, qui peut être un littéral ou une adresse.

Instruction : code-opération, opérande

Exemple instruction PIC 16xxx (architecture RISC)

- Additionner la valeur 10 au registre de travail **W** (work).
- Opération (mnémonique) : **ADDLW 0x10**. *(0x indique une valeur en hexadécimale)*
- Le registre **W** contient une valeur.
- En exécutant l'instruction **ADDLW 0x10**, le microcontrôleur présente à l'entrée de UAL (Unité Arithmétique et Logique) le **contenu de W et la valeur 10**.
- Après l'addition, le résultat est stocké dans le registre W. ***W=W+10***
- Les instructions peuvent opérer sur les registres, mais également sur la mémoire.

Exemple instruction x 86 (architecture CISC)

- Multiplication 32 bits, résultat dans deux registres de 32 bits. **mul ebx**
- **EAX contient le multiplicateur**. Le multiplicande peut se trouver dans n'importe quel registre. Le résultat de la multiplication (64 bits) sera mis dans un double registre EDX: EAX.
- **EDX** contient les 32 bits de poids fort et **EAX** les 32 bits de poids faible.

9.1.8. MODES D'ADRESSAGE POUR LES DONNÉES

De nombreuses instructions font référence à des données se trouvant à différents endroits du microcontrôleur : registres internes du processeur, ROM, RAM, ports d'E/S. On appelle modes d'adressage les différentes façons de spécifier les endroits où se trouvent les données dont on a besoin.

• Adressage implicite
Certaines opérations ne peuvent être réalisées que sur une donnée se trouvant en un endroit bien précis du processeur (par exemple, le registre ou la pile). Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de spécifier l'adresse du registre en question et on parle d'adressage implicite.

• Adressage registre ou inhérent
Le processeur dispose d'un certain nombre de registres de travail. De nombreuses instructions y font référence ; vu leur nombre peu élevé (8, par exemple), il suffit d'un petit nombre de bits pour spécifier le registre désiré (3 dans notre cas). On parle dans ce cas d'adressage registre ou inhérent.

• Adressage direct
Dans ce mode d'adressage, on donne l'adresse (généralement en 16 bits) de la donnée en mémoire (RAM, ROM ou port d'E/S s'il est intégré à la mémoire). Ce mode d'adressage permet d'indiquer n'importe quel endroit dans la mémoire, le prix à payer étant que l'on doit spécifier l'adresse concernée dans son intégralité (2 à 4 octets).

• Adressage direct restreint :
L'adresse ne comporte qu'un octet, et ce mode ne permet d'accéder qu'aux données se trouvant sur la page courante (adresses ayant donc les mêmes bits de poids fort) ou sur la page 0 (adresses ayant donc les bits de poids fort à 0).

• Adressage indirect à registre
Dans ce mode d'adressage, l'adresse de la donnée se trouve dans un registre spécial du processeur (du même nombre de bits que son bus d'adresses), le pointeur de données. L'avantage, par rapport à l'adressage direct, est que l'adresse peut être manipulée commodément, par exemple pour accéder à une suite de données consécutives en mémoire. Ceci est particulièrement utile lorsqu'on manipule des données stockées dans un tableau.

• Adressage immédiat
C'est un peu un abus de langage que de parler d'adressage dans ce cas-ci. En effet, la donnée suit tout simplement l'instruction.

• Adressage indexé
Ce mode est assez semblable à l'adressage indirect à registre. Il fait appel à un registre spécial appelé « registre d'index ». Certains microcontrôleurs ne supportent pas ce mode, d'autres au contraire ont 1 ou même 2 registres d'index. Deux registres d'index sont particulièrement bienvenus lorsqu'il s'agit de déplacer un bloc de données dans la mémoire RAM.

• Opérations sur les registres

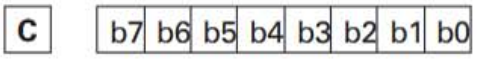
• Comparaison
L'opération de comparaison est réalisée en effectuant une soustraction. Le résultat de cette soustraction n'est pas gardé mais elle positionne l'indicateur d'état. Si l'indicateur d'état Z (zéro) est actif, les deux opérandes sont identiques. L'indicateur d'état C (Carry : retenu ou report) pourra indiquer lequel des deux opérandes est supérieur à l'autre.

Exemple : CMPA 80. Comparaison de l'accumulateur A avec la valeur 80.

9.1.9. OPÉRATIONS ÉLÉMENTAIRES ENTRE REGISTRES

Un registre est une mémoire élémentaire interne au microprocesseur ou microcontrôleur.
Ce registre peut être constitué de **8, 16, 32, 64 ou 128 bits**.
Il est utilisé pour le système de traitement de l'information pour réaliser des opérations diverses d'une façon très rapide.
Parmi ces opérations, on trouve les **additions, soustractions, décalage à droite, décalage à gauche, rotation, transfert**...
Pour toutes ces opérations, ces registres sont associés à un **bit de report appelé C (Carry)**.

Exemples sur des registres de 8 bits



• Opérations de décalage

Décalage logique à droite
Le registre est **décalé logiquement vers la droite**. Un zéro est placé dans le bit **7** et le contenu du bit **0** va dans l'indicateur de report **C**.

Décalage à gauche (logique ou arithmétique)
Le registre est **décalé logiquement vers la gauche**. Le contenu du bit **7** allant dans l'indicateur de rapport **C** et un **0** étant forcé dans le bit **0**.

Décalage arithmétique à droite
Le registre est décalé arithmétiquement vers la **droite**, le contenu du bit **0** allant dans l'indicateur de report **C** et le bit **7** demeurant inchangé.

• Opération de rotation

Rotation du registre à droite sans le rapport
Le contenu du registre est **décalé circulairement vers la droite d'un bit**.
Le contenu du bit **0** va dans l'indicateur de report **C** en même temps que dans le bit **7**.

Rotation du registre à gauche sans le rapport
Le contenu du registre est **décalé circulairement vers la gauche d'un bit**.
Le contenu initial du bit 7 va dans l'indicateur de report **C** en même temps que dans le bit **0**.

• Opérations d'incrémentation et de décrémentation

Incrémentation
Le contenu du registre est **incrémenté** **R = R + 1**

0	1	0	0	1	0	0	1	avant
0	1	0	0	1	0	1	0	après

Décrémentation
Le contenu du registre est **décrémenté** **R = R – 1**

0	1	0	0	1	0	0	1	avant
0	1	0	0	1	0	0	0	après

Décodeur d'adresses
Exemple décodeur mémoire

Le nombre de lignes d'adresses est de 16. On dispose donc de 65536 cases mémoires qu'il est possible d'adresser une à une. On veut pouvoir accéder à la mémoire de l'adresse 0000H à 1FFFH et de 8000H à 9FFFH. Dans ces deux zones de 8192 octets la sortie du décodeur CS doit être à "1"

8192 représente une variation de 0000 à 1FFF, soit un changement d'adresse de 13 bits donc A0 à A12 changeront d'état dans la zone mémoire. Pour sélectionner cette zone on doit utiliser les adresses restantes à savoir A13 à A15

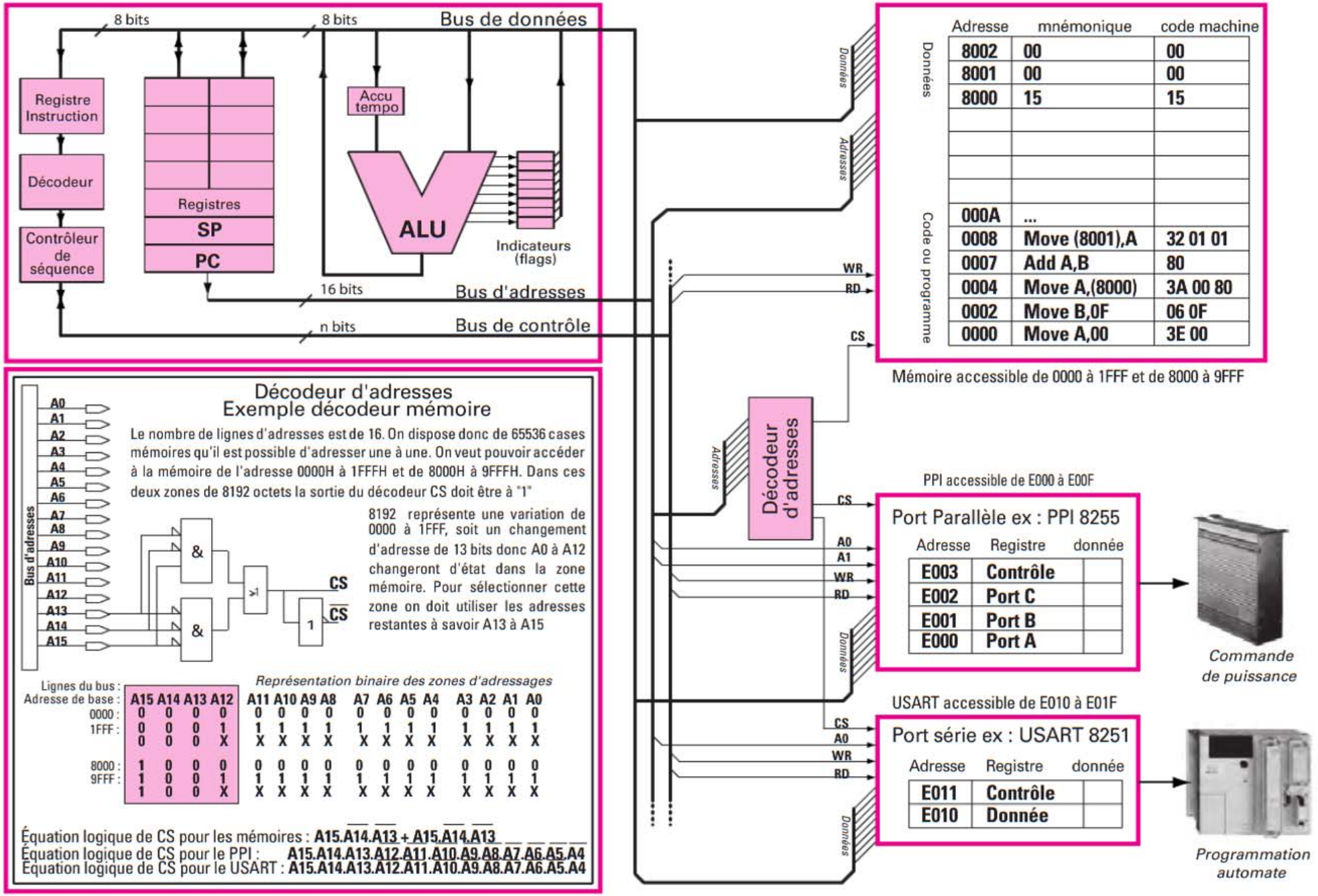
Représentation binaire des zones d'adressages

Lignes du bus :	A15	A14	A13	A12	A11	A10	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0
Adresse de base :																
0000 :	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1FFF :	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
8000 :	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9FFF :	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Équation logique de CS pour les mémoires : $\overline{A15}.\overline{A14}.\overline{A13} + A15.A14.A13$

Équation logique de CS pour le PPI : $\overline{A15}.\overline{A14}.\overline{A13}.\overline{A12}.\overline{A11}.\overline{A10}.\overline{A9}.\overline{A8}.\overline{A7}.\overline{A6}.\overline{A5}.\overline{A4}$

Équation logique de CS pour le USART : $\overline{A15}.\overline{A14}.\overline{A13}.\overline{A12}.\overline{A11}.\overline{A10}.\overline{A9}.\overline{A8}.\overline{A7}.\overline{A6}.\overline{A5}.\overline{A4}$



	Adresse	mnémonique	code machine
Données	8002	00	00
	8001	00	00
	8000	15	15
Code ou programme	000A	...	
	0008	Move (8001),A	32 01 01
	0007	Add A,B	80
	0004	Move A,(8000)	3A 00 80
	0002	Move B,0F	06 0F
	0000	Move A,00	3E 00

Mémoire accessible de 0000 à 1FFF et de 8000 à 9FFF

PPI accessible de E000 à E00F

Port Parallèle ex : PPI 8255

Adresse	Registre	donnée
E003	Contrôle	
E002	Port C	
E001	Port B	
E000	Port A	

Commande de puissance

USART accessible de E010 à E01F

Port série ex : USART 8251

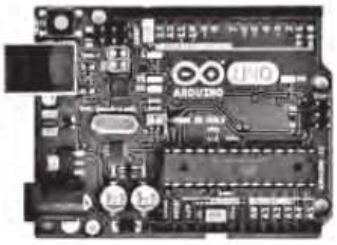
Adresse	Registre	donnée
E011	Contrôle	
E010	Donnée	

Programmation automate

9.2. CARTES DE DÉVELOPPEMENT À MICROCONTRÔLEUR

9.2.1. CARTES ARDUINO

• Présentation



Arduino est un circuit imprimé en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique, le pilotage d'un robot, la mise en œuvre de capteurs, etc.

Arduino peut être utilisé pour construire des objets interactifs indépendants (prototypage rapide), ou bien peut être connecté à un ordinateur pour communiquer avec ses logiciels (exemple : Macromedia Flash, Matlab, etc.).

• Le matériel

Les deux modèles Arduino les plus populaires sont généralement construits autour d'un microcontrôleur Atmel AVR. (**ATmega328** ou **ATmega2560**), et de composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage avec d'autres circuits.

Pour les deux modèles cités précédemment, chaque module possède au moins un régulateur de tension de 5 V et un oscillateur à quartz 16 MHz. Le microcontrôleur est préprogrammé avec un bootloader de façon à ce qu'un programmateur dédié ne soit pas nécessaire. Les modules sont programmés au travers d'une connexion série, gérée par le module USB.

L'Arduino utilise la plupart des entrées/sorties du microcontrôleur pour l'interfaçage avec les autres circuits.

Le modèle Uno par exemple, possède 14 entrées/sorties numériques, dont 6 peuvent produire des signaux PWM, et 6 entrées analogiques. Les connexions sont établies au travers de connecteurs femelles HE14 situés sur le dessus de la carte, les modules d'extension venant s'empiler sur l'Arduino. Plusieurs sortes d'extensions sont disponibles dans le commerce.

• Programmation

La programmation peut être réalisée de différentes façons :

Le logiciel Arduino IDE : Est une application Java, libre et multi-plate-forme, servant d'éditeur de code et de compilateur, il peut transférer le firmware et le programme au travers de la liaison USB. Ce mode de programmation est attrayant grâce à la profusion d'exemples et de bibliothèques disponibles sur Internet. **Le langage de programmation utilisé est le C++.**

Matlab Simulink : Logiciel commercial, il permet de programmer une carte Arduino (de préférence Arduino Mega) et de l'intégrer dans un modèle multiphysique. Sous Simulink, les fonctions disponibles sont : entrée-sortie logique, entrées analogiques, sortie PWM, commande servomoteur, communication série, I2C, SPI, Ethernet, WIFI. Le modèle peut être compilé et transféré au travers de la liaison USB pour être autonome ou permettre une interaction avec un modèle multiphysique plus vaste.

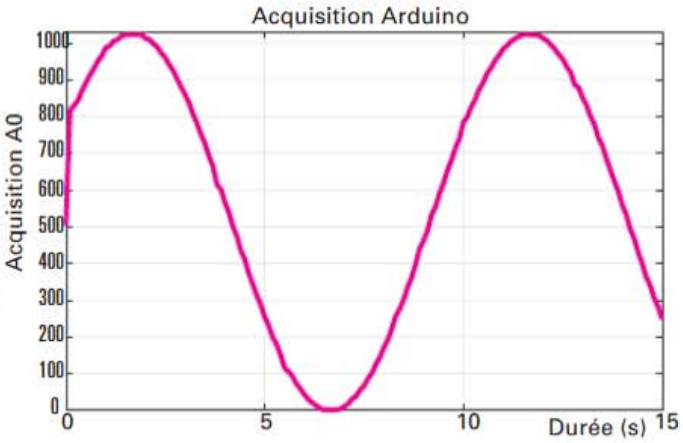
Flowcode (version AVR) : Logiciel commercial permettant d'éditer, de **programmer d'une façon algorithmique** et de compiler (sans être obligé d'apprendre le code C). Comme précédemment le transfert se fait au travers de la liaison USB.

9.2.2. PROGRAMMER UNE CARTE ARDUINO

Cahier des charges :
Toutes les 100 ms, acquérir une grandeur analogique sur l'entrée A0 et afficher le résultat sous forme d'un graphe.

• Matlab Simulink

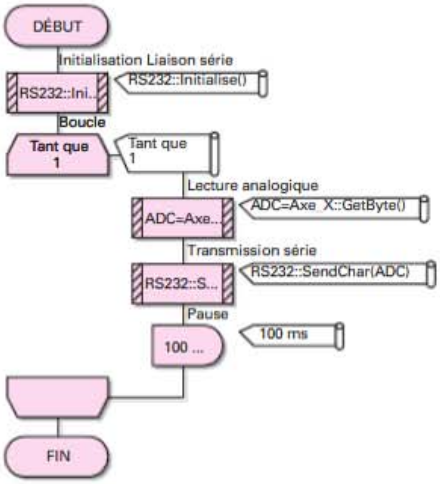
La mise en œuvre est simple : un bloc d'acquisition analogique et un «scope» pour visualiser le résultat.
L'intervalle de 100 ms est paramétré dans le bloc «Analog Input» champ «sampletime».

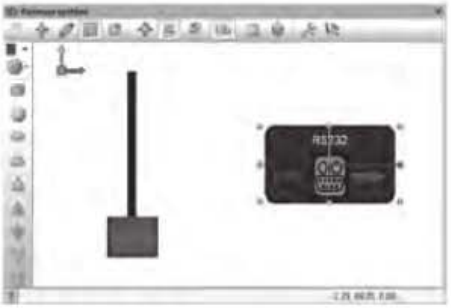


• Flowcode, 6 AVR

Le programme reste simple et se présente sous une forme algorithmique.

Pour restituer le signal acquis, il conviendra de stocker les données transmises par la liaison série dans un fichier et d'utiliser un logiciel permettant de tracer des courbes.

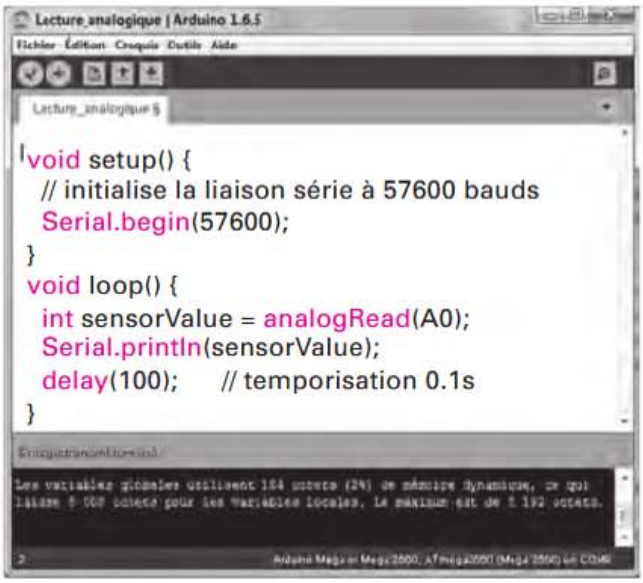




• IDE Arduino

Le programme se présente sous la forme d'un code proche du C.

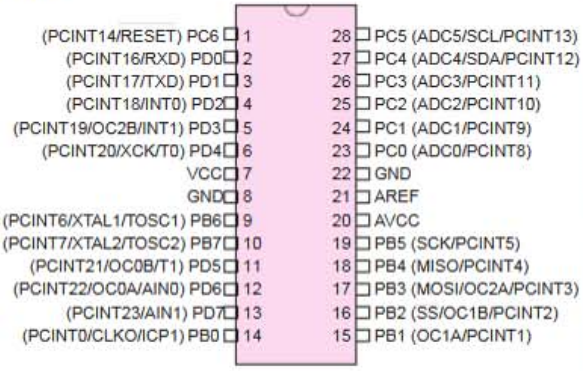
Pour restituer le signal acquis, il conviendra de stocker les données transmises par la liaison série dans un fichier et d'utiliser un logiciel permettant de tracer des courbes.



9.2.3. ATmega 238

Extraits du document constructeur :

Microcontrôleur ATMEL 8 bits avec 32 ko de mémoire flash



Principales caractéristiques :
Microcontrôleur 8 bits.

Architecture RISC avancée :
- 131 instructions.
- Plus de 20 MIPS à 20 MHz.
- Multiplication intégrée en 2 cycles.

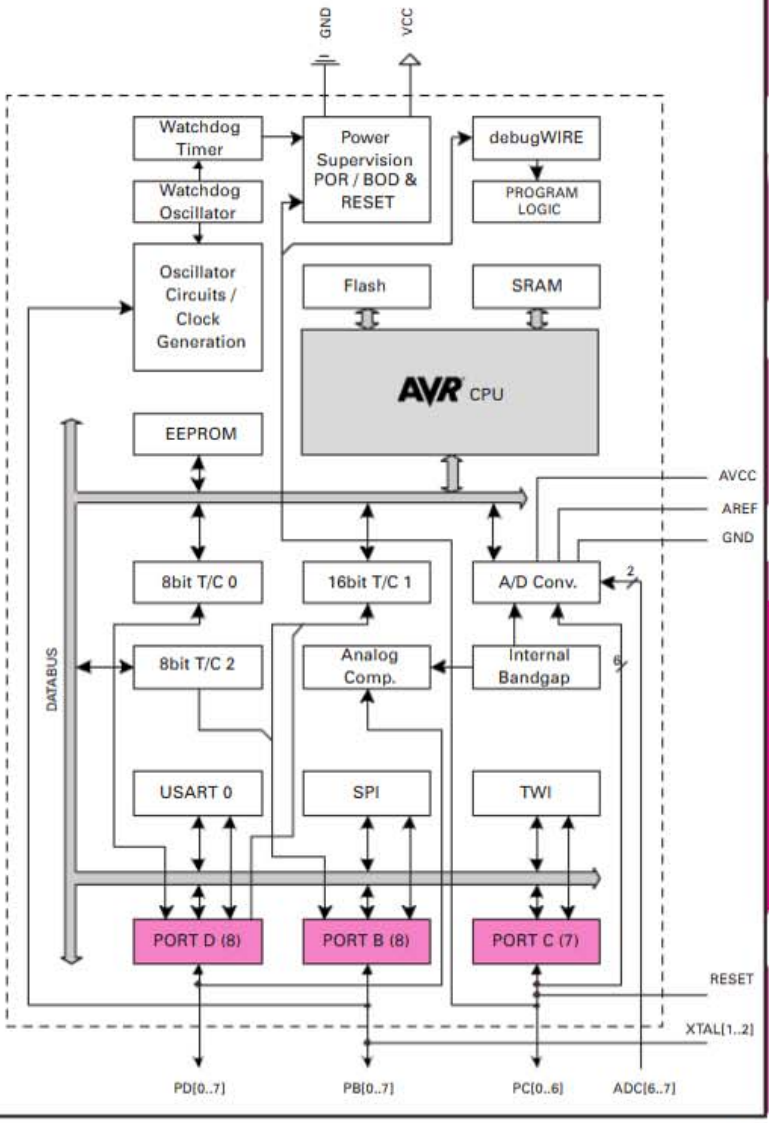
Mémoire haute endurance :
- **32 ko de mémoire programme flash.**
- **1 ko de mémoire EEPROM.**
- **2 ko de mémoire RAM.**

Périphériques :
23 lignes d'entrées sorties.
2 compteurs/timers de 8 bits avec prédiviseur et comparateur.
1 compteur/timer de 16 bits avec prédiviseur, comparateur et capture.
Compteur temps réel avec oscillateur séparé.
6 canaux PWM (modulation de largeur d'impulsion MLI).
6 canaux ADC (*analogique digital converter*) de 10 bits.
1 liaison série programmable USART (Tx0 Rx0).
1 interface SPI maître esclave.
1 interface série compatible I²C.
1 timer chien de garde (Watchdog).
1 comparateur analogique.

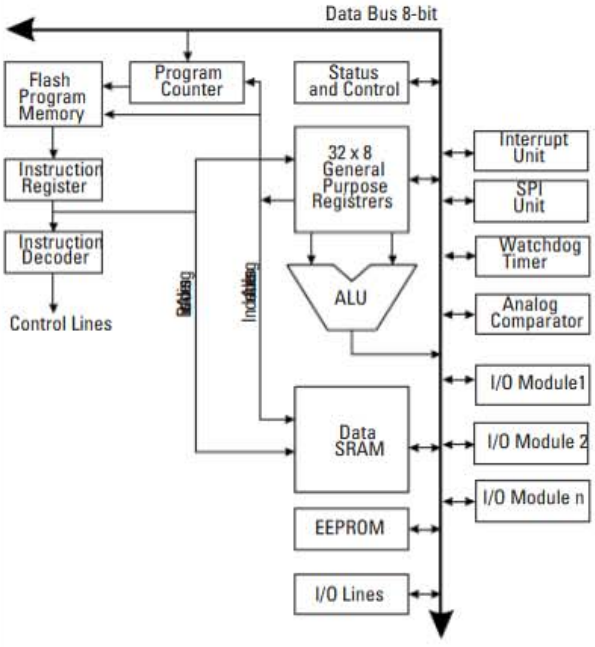
Caractéristiques électriques :
Tension d'alimentation : 1.8 - 5.5 V
Température d'utilisation : -40 °C à 85 °C

Fréquence d'horloge :
0 - 4 MHz@1.8 - 5.5 V,
0 - 10 MHz@2.7 - 5.5 V,
0 - 20 MHz @ 4.5 - 5.5 V

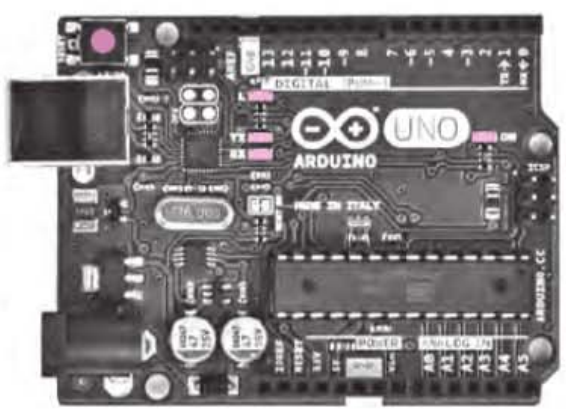
Diagramme bloc



AVR CPU



9.2.4. SCHÉMA STRUCTUREL ARDUINO UNO (REV3)



9.2.5. ATmega 2560

Extraits du document constructeur :
Microcontrôleur ATMEL 8 bits avec 256 ko de mémoire flash

Principales caractéristiques :

Microcontrôleur 8 bits

Architecture RISC avancée :
- 135 instructions
- plus de 16 MIPS à 16 MHz
- Multiplication intégrée en 2 cycles

Mémoire haute endurance :
- **256 ko de mémoire programme flash.**
- **4 ko de mémoire EEPROM**
- **8 ko de mémoire RAM**

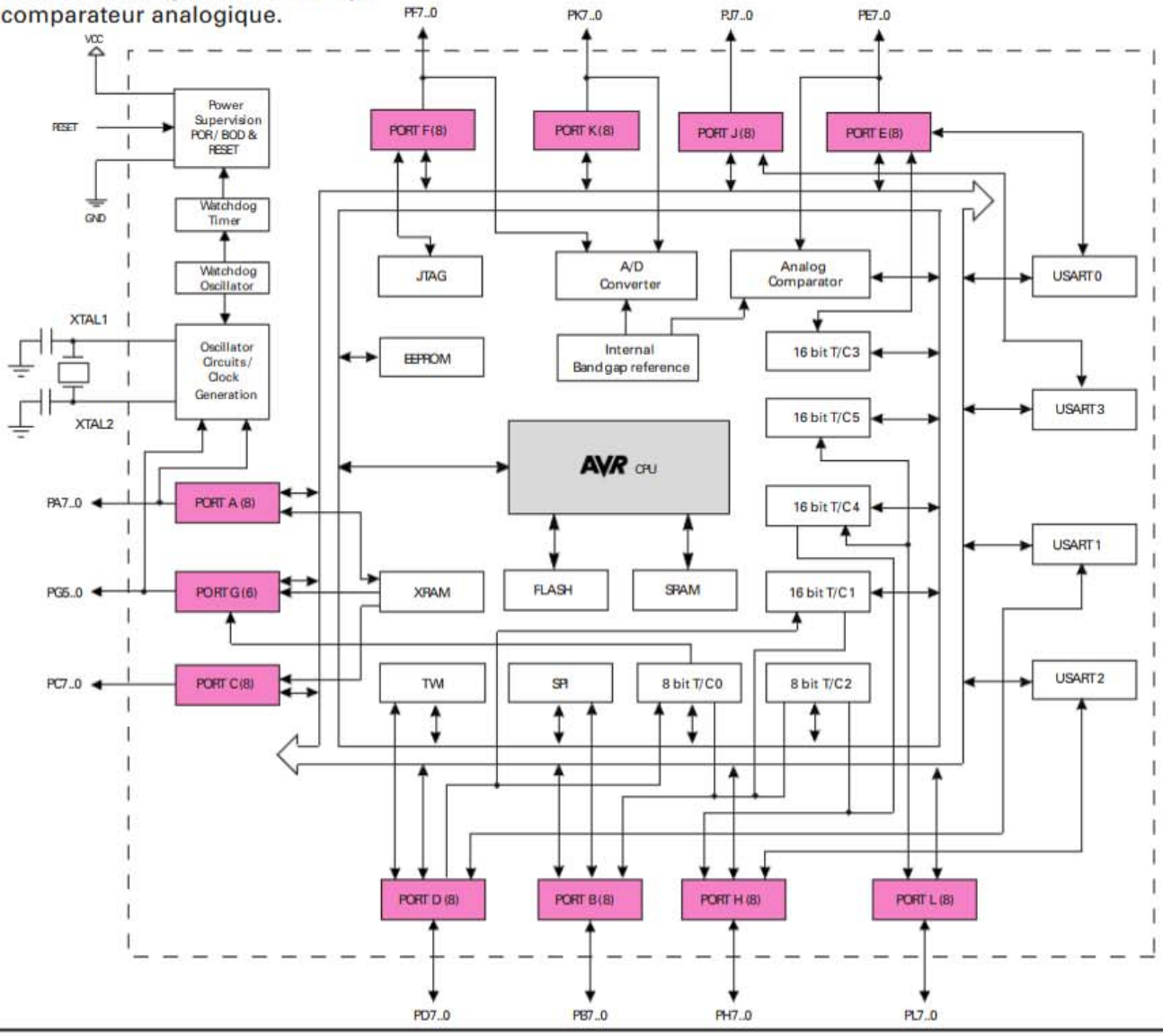
Caractéristiques électriques :
Tension d'alimentation : 4.5 - 5.5 V
Température d'utilisation : -40°C à 85°C

Fréquence d'horloge :
0 - 2 MHz @ 1.8 V - 5.5 V
0 - 8 MHz @ 2.7 V - 5.5 V
0 - 16 MHz @ 4.5 V - 5.5 V

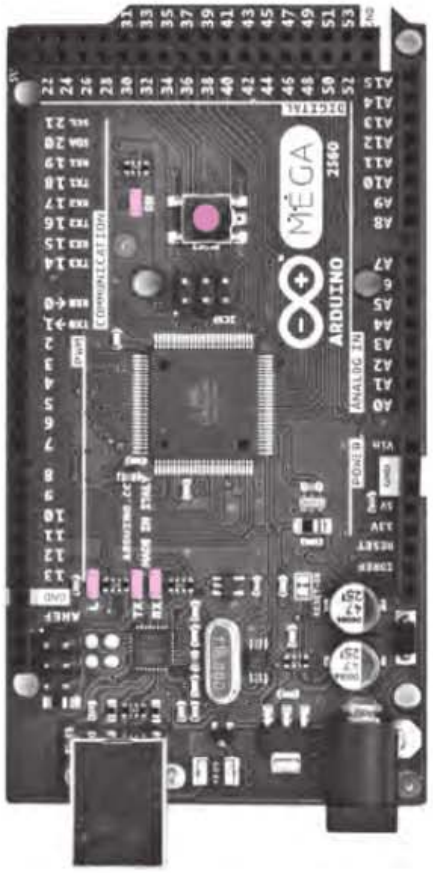
Périphériques :

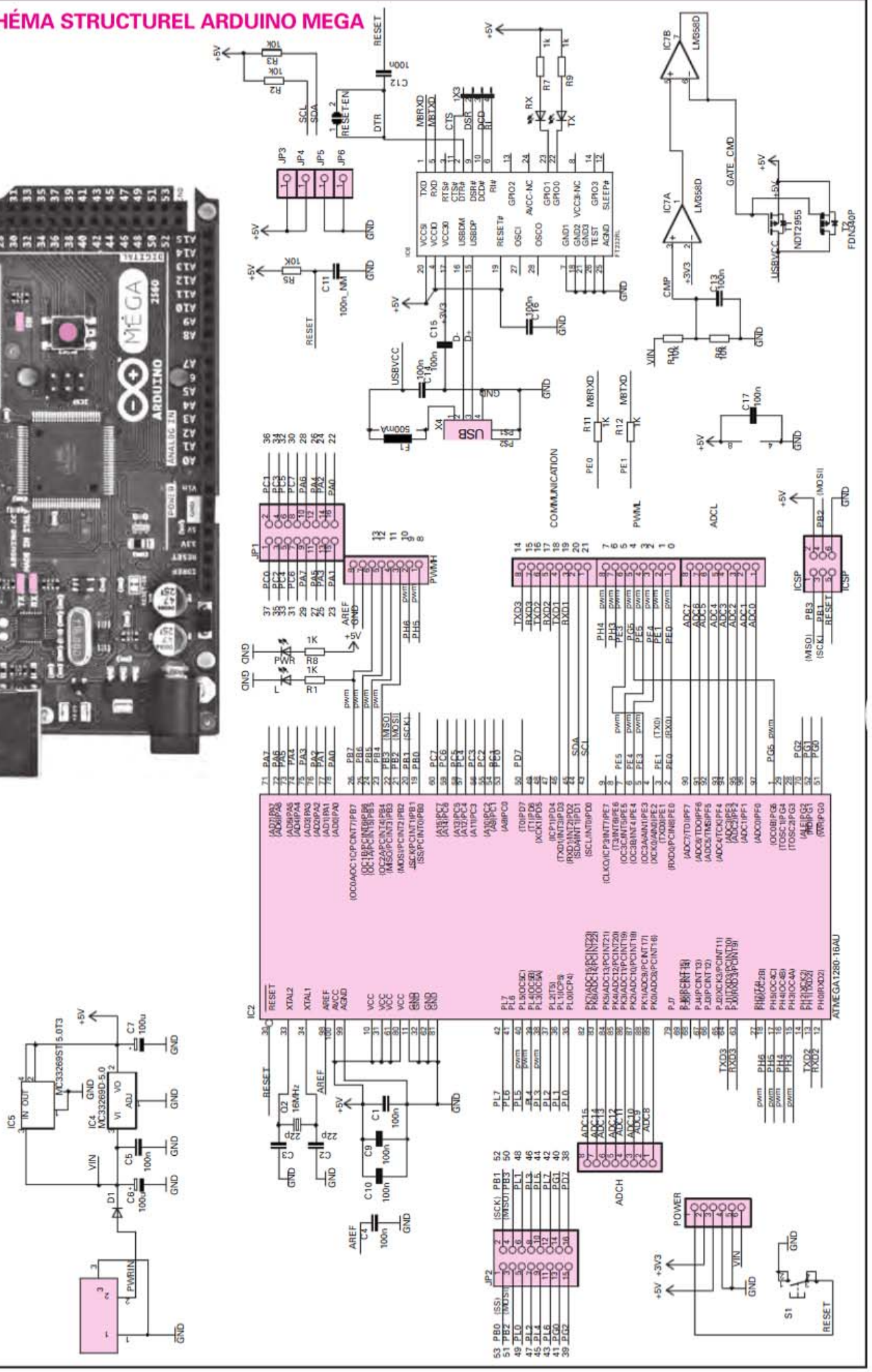
86 lignes d'entrées sorties.
2 compteurs/timers de 8 bits avec prédiviseur et comparateur.
4 compteurs/timers de 16 bits avec prédiviseur, comparateur et capture. Sortie modulation.
Compteur temps réel avec oscillateur séparé.
4 canaux PWM 8 bits, 12 canaux PWM programmables de 2 à 16 bits.
16 canaux ADC (analogique digital converter) de 10 bits.
4 liaisons séries programmables USART (Txn Rxn).
1 interface SPI maître esclave.
1 interface série compatible I²C.
1 timer chien de garde (Watchdog).
1 comparateur analogique.

Diagramme bloc



9.2.6. SCHÉMA STRUCTUREL ARDUINO MEGA





9.3. LES LANGAGES DE PROGRAMMATION

• Langage machine (bas niveau)

Le **langage machine**, ou **code machine**, est la suite de bits qui est interprétée par le processeur d'un ordinateur exécutant un programme informatique. C'est le langage natif d'un processeur, c'est-à-dire le seul qu'il puisse traiter. Il est composé d'instructions et de données à traiter codées en binaire (affiché ci-contre en hexadécimal).

```
0000: 2A21 3FFF 3FFF 3FFF 00FF 0E03 1283 1303
0008: 00A0 0E0A 00A1 0E04 00A2 118A 120A 2A24
0010: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0BB4
0018: 2810 0008 08A6 1D03 281E 0008 30F9 3EFF
0020: 1D03 281F 0000 0BA6 281E 0008 01AF 01B0
0028: 01B2 01B3 01B1 1A31 0008 1003 0DB2 0DB3
```

Chaque processeur possède son propre langage machine donc un code machine ne peut s'exécuter que sur la machine pour laquelle il a été préparé.

Le **code machine** est aujourd'hui généré automatiquement, généralement par la **compilation** d'un langage de programmation.

```
ORG   0x0000

GOTO      Label_0001
ORG       0x0004
MOVWF     0x7F
SWAPF     STATUS   , W
BCF       STATUS   , RP0
BCF       STATUS   , RP1
MOVWF     0x20
SWAPF     PCLATH   , W
MOVWF     0x21
SWAPF     FSR      , W
MOVWF     0x22
BCF       PCLATH   , 03
BCF       PCLATH   , 04
GOTO      Label_0002
```

Un **langage d'assemblage** ou **langage assembleur** ou simplement **assembleur** par abus de langage, abrégé **ASM** est, en programmation informatique, **un langage de bas niveau** qui représente le langage machine sous une forme lisible par un humain. Les combinaisons de bits du langage machine sont représentées par des symboles dits « **mnémoniques** ». Le programme assembleur convertit ces mnémoniques en langage machine en vue de créer un fichier exécutable.

• Un langage de programmation (haut niveau)

Un langage de programmation est un langage informatique, permettant à un être humain d'écrire un code source qui sera analysé par une machine, généralement un ordinateur.
Le code source subit ensuite une **compilation** ou une évaluation dans une forme exploitable par la machine, ce qui permet d'obtenir un programme.
Les langages permettent souvent de faire abstraction des mécanismes de bas niveau de la machine, de sorte que le code source représentant une solution puisse être écrit et compris par un être humain.

Langage C

```
int main(void)
{
  short int tab [1][8] ={128,64,32,16,8,4,2,1};
  int compt1,j,k,x=0;

  printf("Mot binaire:\n");
  for(compt1=0;compt<8;compt1++)
  {
     scanf("%d",&tab[1][compt1]);
  }
  for(j=0;j<8;j++)
  {
     printf("case:%d = %d\n",j,tab[1][j]);
  }
   for(k=0;k<8;k++)
   {
      if(tab [1][k]==1)
      {
      x=x+tab[0][k];
      }
   }
   printf("En binaire =%d\n",x);
}
```

• Famille de langages

Une famille de langages de programmation est un ensemble de langages de programmation partageant un lien de parenté ou des caractéristiques communes.

Les grandes familles de langages par parenté sont :

la famille du C : C++, Objective-C, Java, C#, Perl, PHP, JavaScript
la famille Pascal : Turbo Pascal, Delphi
la famille Lisp : Common Lisp, Scheme
la famille ML : SML, Caml, Objective Caml puis F#
la famille Smalltalk : Objective-C, Ruby, Lisaac
la famille BASIC : QBasic, Visual Basic, Visual Basic .Net, Visual Basic for Applications, VBScript

9.4. ALGORITHMIQUE

9.4.1. ÉTAPES-CLÉS DE LA PROGRAMMATION

• **Définition d'un cahier des charges fonctionnel** : ce que doit faire le programme…

• **Définition de l'environnement** : A quelle broche relier telles ou telles commandes ?

• **Ecriture du programme** : A partir du cahier des charges fonctionnel (CdCf), le programmeur écrit le programme. Le langage utilisé est l'algorithme ou l'algorigramme.

• **Le codage** : A partir de l'algorithme le codeur va transcoder l'algorithme ou algorigramme en un langage de haut niveau : *C, C++, Basic*, ou en un langage de bas niveau : *assembleur*. A ce stade le programme peut être simulé afin de vérifier que son exécution est conforme.

• **La Compilation** : La compilation consiste à transformer le langage de haut ou bas niveau en code machine directement exécutable par le microcontrôleur.

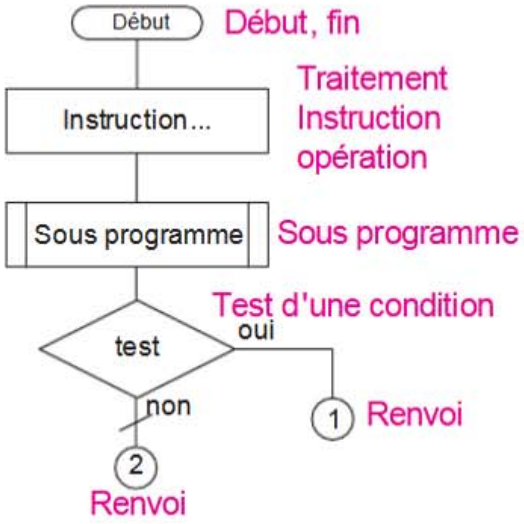
• **Programmation des composants** : Le code machine et les variables de fonctionnement vont être introduits dans les différentes mémoires du microcontrôleur.

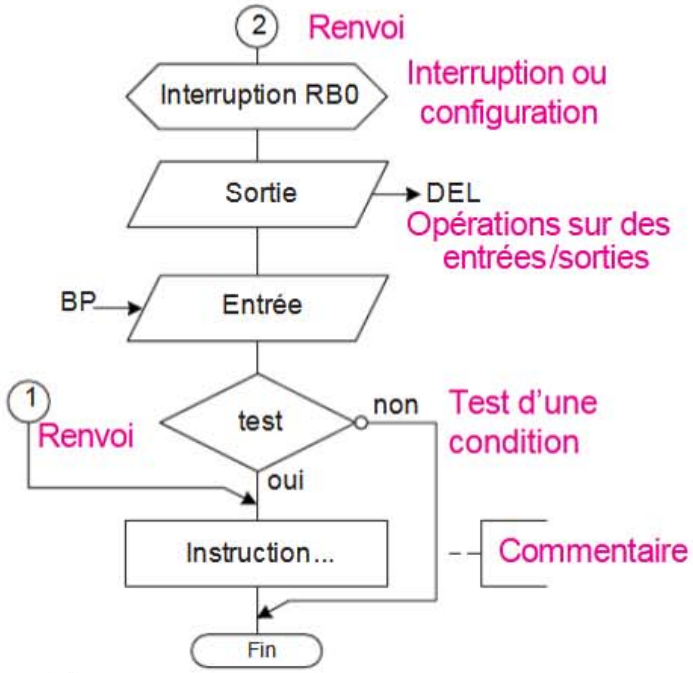
• **Vérification** : Elle se fait directement sur le système.

9.4.2. QU'EST-CE QUE L'ALGORITHMIQUE ?

Définition d'un algorithme : C'est un ensemble de règles opératoires rigoureuses, ordonnant à un processeur d'exécuter dans un ordre déterminé un nombre fini d'opérations élémentaires ; il oblige à une programmation structurée.
Un algorithme est écrit en utilisant un langage de description d'algorithme.
L'algorithme ne doit pas être confondu avec le programme proprement dit.

Définition d'un algorigramme : C'est une représentation graphique de l'algorithme. Pour le construire, on utilise des symboles normalisés.





• **Sens conventionnel des liaisons**

Le sens général des lignes de liaison doit être de haut en bas, de gauche à droite.
Lorsque le sens ainsi défini n'est pas respecté, des pointes de flèches à cheval sur la ligne indiquent le sens utilisé.

9.4.3. NOTATIONS GÉNÉRALES

Un algorithme a :

- **un nom**
- **une déclaration de constantes, variables, procédures, fonctions…**
- **un début**
- **une fin.**

Tous les mots-clés sont **soulignés** et **écrits en minuscule**

9.4.4. DÉCLARATION DE CONSTANTES ET VARIABLES

Une **variable** ou **constante** permet d'identifier une donnée sur laquelle agit un programme.
Il faut choisir avec soin les noms des variables :

Monter ← Bpmonter + vent + non soleil est plus compréhensible que : *M ← B+v+/s*

Les constantes :

Elles représentent des chiffres, des nombres, des caractères, des chaînes de caractères, … dont la valeur ne peut pas être modifiée au cours de l'exécution de l'algorithme.

- **Mot-clé : const** **Exemple :** **const** seuil **c'est** 10

Les variables :

Elles peuvent stocker des chiffres, des nombres, des caractères, des chaînes de caractères,… dont la valeur peut être modifiée au cours de l'exécution de l'algorithme.

- **Mot-clé : var**

• Il faut typer les constantes ou variables

L'entier notation : 25, 125, –42, 0 … en décimal
1Ah, 0FCh, 64h … en hexadécimal
% 10100111, %1001 … en binaire

- **Mot-clé : entier**

Le réel notation : -3.1428, 6.258, –125.145, 5.6e-3

- **Mot-clé : réel**

Le booléen Il ne peut prendre que deux états : **VRAI ou FAUX**

- **Mot-clé : booléen**

Le caractère notation : 'a', 'B','*','7','z',' ?'….

- **Mot-clé : car**

La chaîne de caractères 'Sciences', 'de l ingénieur'…

- **Mot-clé : chaîne**

• Exemple

```
algorithme exemple
var     niveau : entier
        moyenne : réel
        bitA : booléen
const   seuil c'est 10
        chr c'est «Mémotech SSI»
début
        lire niveau ← capteur
        niveau ← seuil - niveau
        moyenne ← niveau / 3
        ...
        écrire ecran ← chr
        ...
fin
```

9.4.5. DÉCLARATION DES FONCTIONS ET STRUCTURES

• La procédure :
C'est un ensemble d'instructions référencé par un nom, et dont l'exécution est provoquée par le simple énoncé de ce nom.

• Mot-clé : proc

• La fonction :
Comme pour la procédure, l'exécution d'une fonction est provoquée par la simple évocation de son nom, à la différence qu'elle se voit assigner une valeur dont le type doit être défini.

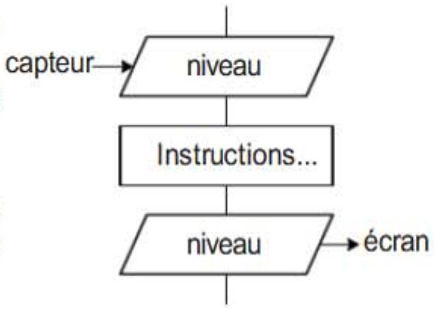
• Mot-clé : fonc

```
algorithme niveau parfum
var nbip, comp : entier
proc clignoter
        écrire PortB0 ← 1
        attendre 0,5s
        écrire PortB0 ← 0
        attendre 0,5s
fin proc
fonc buzzer (nbip)
    pour comp de 0 à nbip
        écrire PortB2 ← 1
        attendre 0,3s
        écrire PortB2 ← 0
        attendre 0,7s
    fin pour
fin fonc
début
        clignoter
        buzzer (5)
fin
```

9.4.6. COMMUNIQUER AVEC UN PROGRAMME

• Mot-clé : lire Lire des données en provenance d'un périphérique (*capteur*) et l'affecter à une variable (*niveau*)

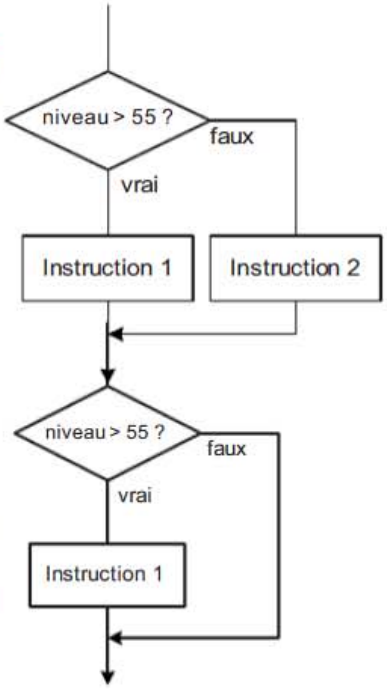
• Mot-clé : écrire Ecrit des données d'une variable (*niveau*) sur un périphérique (*écran*).




```
algorithme niveau parfum
var       niveau : entier
début
    lire niveau ← capteur
         ....
    écrire écran ← niveau
fin
```

9.4.7. LES STRUCTURES ALTERNATIVES

La structure alternative n'offre que deux issues possibles à la poursuite de l'algorithme et s'excluant mutuellement.




```
algorithme niveau parfum
var niveau, pompe : entier
début
    lire niveau ← capteur
    si niveau > 55
        alors pompe ← 0
        sinon pompe ← 1
    fin si
fin
```

La structure alternative réduite se distingue de la précédente par le fait que seule la situation correspondant à la validation de la condition entraîne l'exécution du traitement, l'autre situation conduisant systématiquement à la sortie de la structure.


```
algorithme niveau parfum
var niveau, pompe : entier
début
    lire niveau ← capteur
    si niveau > 55
        alors pompe ← 0
    fin si
fin
```

Alternative multiple
Les **cas** permettent d'éviter un grand nombre d'imbrications

```
cas [variable_clé]
        [condition_booléenne_1 sur variable_clé] [action_1]
        [condition_booléenne_2 sur variable_clé] [action_2]
        ...
        [condition_booléenne_n sur variable_clé] [action_n]
        sinon [action_autre]
fin cas
```

```
algorithme niveau parfum
var état, affiche : entier
début
    lire état ← capteur
    cas état
        = 30 : affiche ← 01
        = 50 : affiche ← 02
        = 80 : affiche ← 04
        sinon affiche ← 00
    fin cas
fin
```

9.4.8. ITÉRATIONS ET BOUCLES (RÉPÉTITION)

La structure itérative répète l'exécution d'une opération ou d'un traitement.

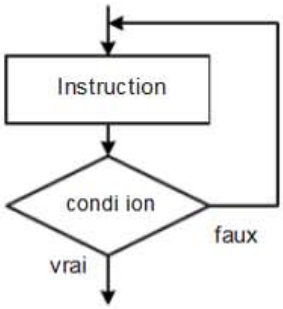
• **Premier cas** : Le nombre de répétitions n'est pas connu ou est variable.

On distingue 2 structures de base :

Structure **répéter ... jusqu'à**

Dans cette structure, le traitement est exécuté une première fois puis sa répétition se poursuit jusqu'à ce que la condition soit vérifiée.

L'action est toujours exécutée au moins une fois.

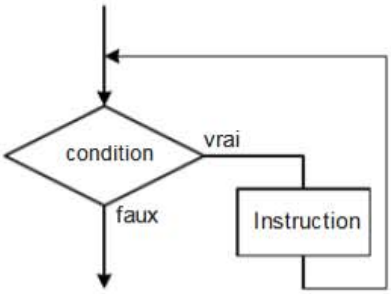



```
algorithme boucle
début
    répéter
        ...
        ...
    jusqu'à condition vraie
fin
```

Structure **tant que ... faire**

Dans cette structure, on commence par tester la condition ; si elle est vérifiée, le traitement est exécuté.

L'action peut ne jamais être exécutée.




```
algorithme boucle
début
    tant que condition vraie faire
        ...
        ...
    fin tant que
fin
```

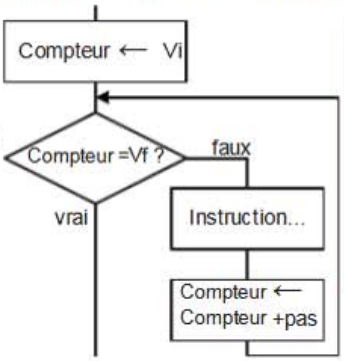
Deuxième cas : le nombre de répétitions est connu.

Structure **pour...de..à.. faire**

Dans cette structure, la sortie de la boucle d'itération s'effectue lorsque le nombre souhaité de répétitions est atteint.

On utilise une variable (ou indice) de contrôle d'itération caractérisée par :

- sa valeur initiale,
- sa valeur finale,
- son pas de variation (*par défaut le pas vaut 1*).

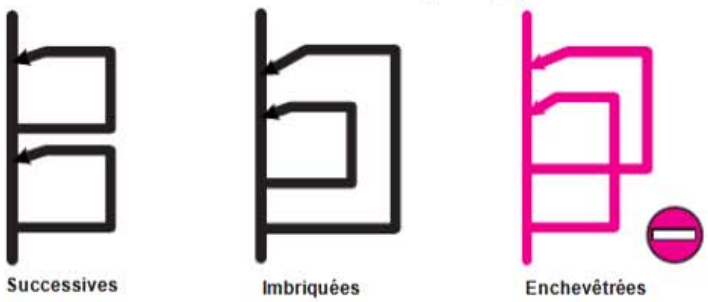



```
algorithme Compteur
var compteur; Vi; Vf; incrément : entier
début
    pour compteur de Vi à Vf pas incrément faire
        écrire écran ← compteur
    fin pour
fin
```

Règle : ne jamais modifier la variable de contrôle d'itération dans une boucle.

Si la valeur finale de l'indice est inférieure à sa valeur initiale, le pas de variation est négatif, la structure est dite « pour décroissante » dans le cas contraire, le pas est positif et la structure est dite « pour croissante »

Règle : Deux boucles peuvent être successives ou imbriquées, jamais enchevêtrées.



9.4.9. RÈGLES DE L'ALGORITHMIQUE

- L'algorithmique est faite pour décrire l'aspect temporel des processus :
  Un algorithme sans fin ne peut représenter qu'un programme mal fait.
  Tout algorithme a un début et une fin.
- Les mots-clés de l'algorithmique s'emploient toujours **soulignés** et en **minuscules**.
- Les couples suivants fonctionnent comme des parenthèses algébriques :

début	**tant que**	**répéter**	**pour ...**	**si**	**cas**
fin	**fin tant que**	**jusqu'à**	**fin pour**	**fin si**	**fin cas**

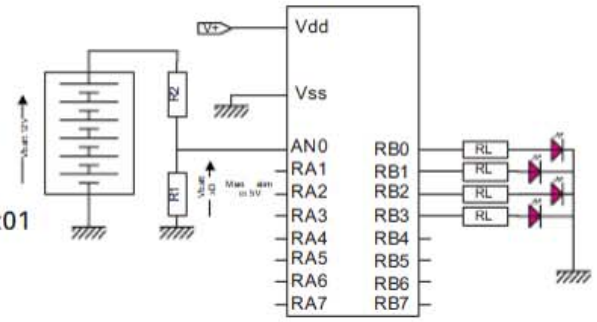
A une ouverture correspond une et une seule fermeture sans enchevêtrement et sont toujours reliés par des traits verticaux de validation.

- Le signe « = » a toujours une valeur de **test booléen** : une question à laquelle la réponse ne peut être que **oui** ou **non**, une affirmation qui ne peut être que **vraie** ou **fausse**. (**si** variable = 25...)
- l'affectation est toujours représentée par son signe « **prend pour valeur** » : ← (variable ← 25)
- Tout algorithme peut se représenter en algorigramme et réciproquement.
- Un « si » ne contrôle jamais une boucle.
  Ce sont les structures « tant que » et « répéter ... jusqu'à » qui contrôlent les boucles légitimes.
- Une boucle algorithmique est toujours exécutée un nombre entier de fois.

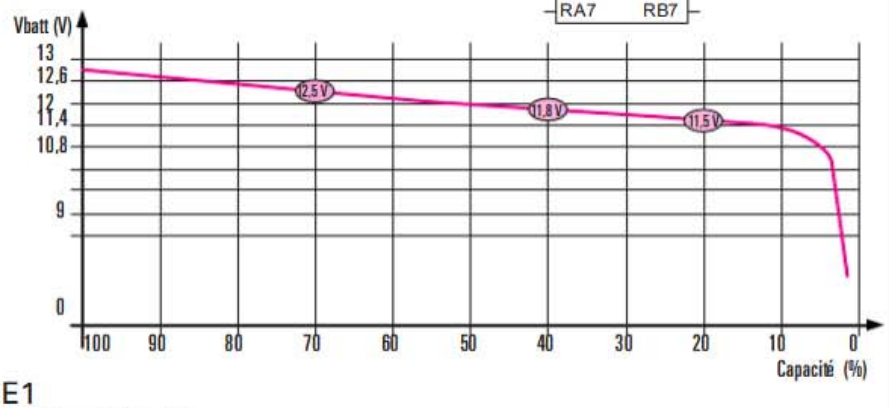
9.4.10. EXEMPLES DE PROGRAMMES

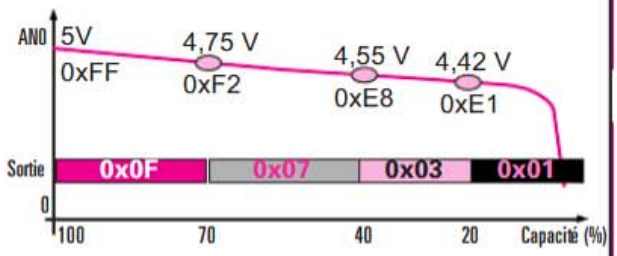
• Exemples : Indicateur de charge d'une batterie plomb acide 12 V

- La tension de la batterie est ramenée dans le domaine d'alimentation du microcontrôleur grâce au diviseur potentiométrique R1, R2.
- de 5 à 4,75 V (0xFF à 0xF2) pour 70% sortie B à 0x0F
- de 4,75 V à 4,55 V (0xF1 à 0xE8) pour 40% sortie B à 0x07
- de 4,55 V à 4,42 V (0xE7 0xE1) pour 20% sortie B à 0x03
- inférieur à 4,42 V (0xE0 à 0x00) pour déchargé, sortie B à 0x01




```
algorithme niveau de charge
var charge : entier
fonc NivBatt : charge
    échantillonnage PA0
    attendre 1ms
    lire charge ← PA0
fin fonc
début
    NivBatt
    si charge < 0xF2
        alors si charge < 0xE8
                alors si charge < E1
                        alors écrire PortB 0x01
                        sinon écrire PortB 0x03
                    fin si
                sinon écrire PortB 0x07
            fin si
        sinon écrire PortB 0x0F
    fin si
fin
```



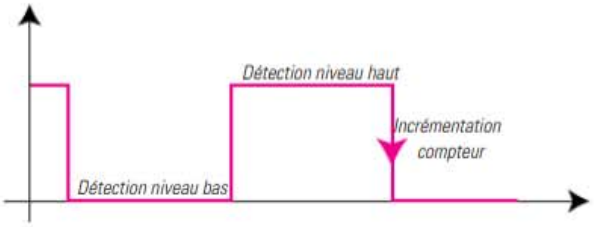


• Exemple compteur

Incrémenter un compteur à chaque appui sur un bouton poussoir branché sur l'entrée (A0)

Affichage de la valeur sur un afficheur LCD (procédure non détaillée)

Principe :
Attendre le niveau bas, attendre le niveau haut, incrémenter le compteur.




```
algorithme compteur
var compteur, bp: entier
proc detection
    tant que bp=0 faire
    | lire bp ← portA0
    fin tant que
    tant que bp=1 faire
    | lire bp ← portA0
    fin tant que
fin proc
début
    compteur ← 0
    tant que 1 faire
        detection
        compteur ← compteur +1
        écrire LCD ← compteur
    fin tant que
fin
```

• Exemple fréquencemètre

Mesurer une fréquence présente sur l'entrée A0 et l'afficher sur un afficheur LCD (procédure non détaillée)

Principe :
Compter le nombre de périodes en une seconde.
La procédure ***detection*** détecte une période.

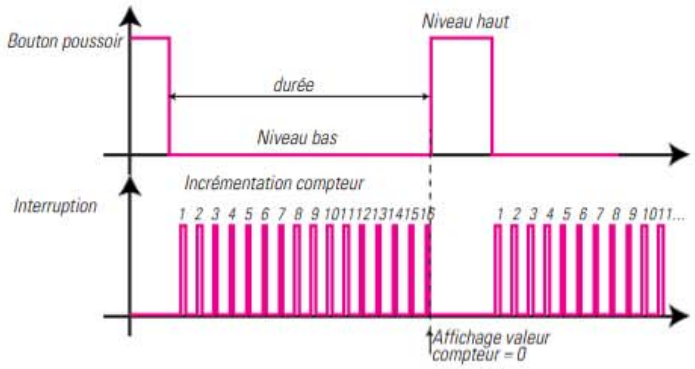
Un timer est un compteur interne qui génère une interruption à la fin de son comptage.
La durée de comptage du timer dépend de la fréquence d'horloge du microcontrôleur et de la valeur du timer.

```
algorithme fréquencemètre
var bp, periode entier
fonction interruption : periode
    afficher_lcd periode
    periode ← 0
finfonc
proc detection
    tant que bp=0 faire
    | lire bp ← portA0
    fin tant que
    tant que bp=1 faire
    | lire bp ← portA0
    fin tant que
fin proc
début
    autoriser interruption timer à 1s
    tant que 1 faire
        detection
        periode ← periode +1
    fin tant que
fin
```

• Exemple : mesure de durée

Mesurer un intervalle de temps où le bouton-poussoir est enfoncé (niveau «0»)

Principe :
Initialiser un timer de mesure à 1/100 s et compter le nombre d'interruptions durant lequel le bouton poussoir est enfoncé.
Limitations : durée entre deux interruptions
valeur maximums de la variable «duree»

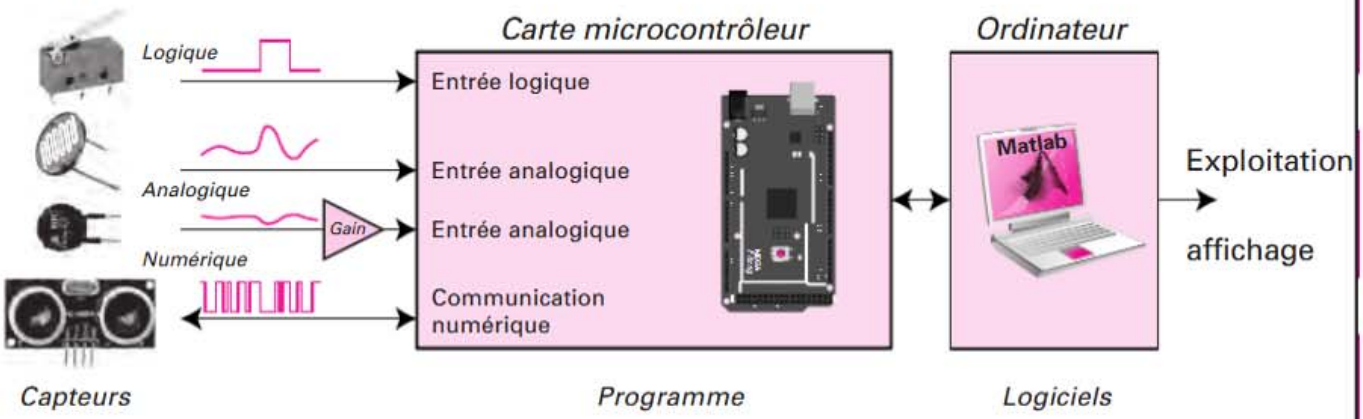



```
algorithme durée
var bp, duree entier
fonc interruption : duree
| duree ← duree +1
finfonc
début
    tant que 1 faire
        autoriser interruption timer à 10ms
        tant que bp=0 faire
        | lire bp ← portA0
        fin tant que
        Interdire interruption
        Afficher LCD_var duree
        duree ← 0
        tant que bp=1 faire
        | lire bp ← portA0
        fin tant que
    fin tant que
fin
```

9.5. CHAINE D'ACQUISITION

9.5.1. ACQUISITION DE DONNÉES AVEC L'AIDE D'UNE CARTE MICROCONTRÔLEUR.

Principe général



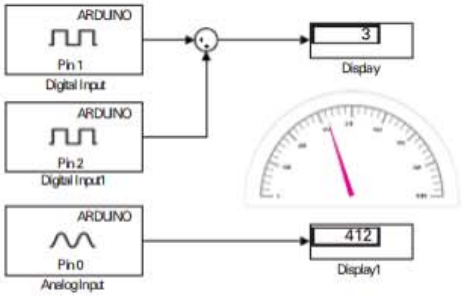
Programme du microcontrôleur, deux approches :

La carte microcontrôleur est intégrée dans le modèle multiphysique

La modélisation est simple, mais peu rapide : environ un millier d'échantillons par seconde pour Matlab 2016b.

Elle permet la lecture en temps réel et une interaction avec la simulation.

Cette simulation fonctionnera à condition de lancer la simulation en mode «external»

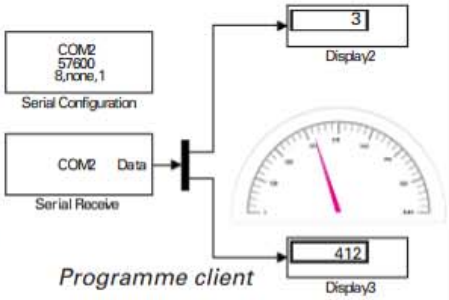


La carte microcontrôleur fonctionne d'une façon autonome.

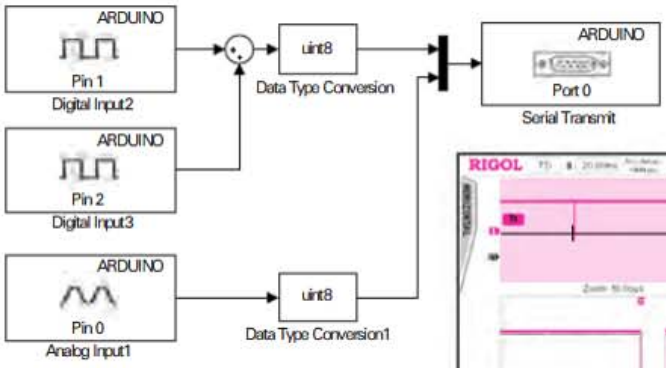
Le principe consiste à créer un programme autonome dans la carte microcontrôleur qui communique avec l'ordinateur avec la liaison série (principe du client serveur).

Le programme peut être réalisé avec Matlab Flowcode ou autre. Il sera transféré sur la carte microcontrôleur. Le modèle de simulation multiphysique reçoit les octets via la liaison série. Cette technique permet une plus grande rapidité du modèle multiphysique en déchargeant une partie du travail sur la carte microcontrôleur. Le gain de vitesse est très important.

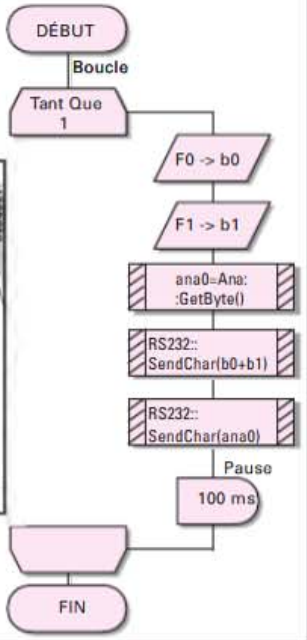
- Réception des données série sur le port COMx (ici x= 2).
- Démultiplexage des deux octets pour affichage.



Programme serveur Matlab Simulink



Programme serveur Flowcode 6



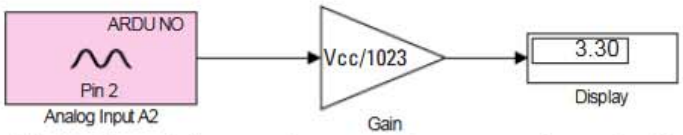
lienmini.fr/s181-acquisition

9.5.2. MESURER DES TENSIONS À L'AIDE D'UNE CARTE ARDUINO ET MATLAB SIMULINK

Mesurer une tension simple

Principe : utiliser le ADC (Analogique, Digital, Converter) 10 bits

Modèle Simulink

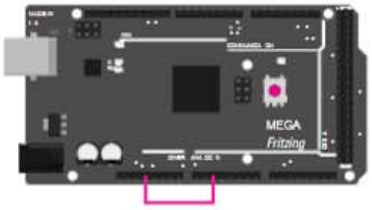


On utilise l'entrée An2 (par exemple). Cette entrée renvoie une valeur comprise entre 0 et 1023

Le gain est égal à la tension d'alimentation de la carte Arduino divisée par 1023 (2^{10}-1) soit 5/1023.
Pour obtenir une mesure précise, il convient de mesurer la tension d'alimentation V+ de la carte Arduino.
Dans cet exemple, la mesure donne : Vcc = 4,961 V

Le gain pour obtenir une valeur correcte est donc : $Gain = \frac{Vcc}{2^{10}-1} \approx \frac{4,961}{1023}$

Pour vérifier le bon fonctionnement du montage, il est possible d'utiliser la pin 3.3V qui est une tension régulée assez précise.



Précision de la mesure
La précision dépend essentiellement du convertisseur analogique numérique du processeur Atmega soit 10 bits.

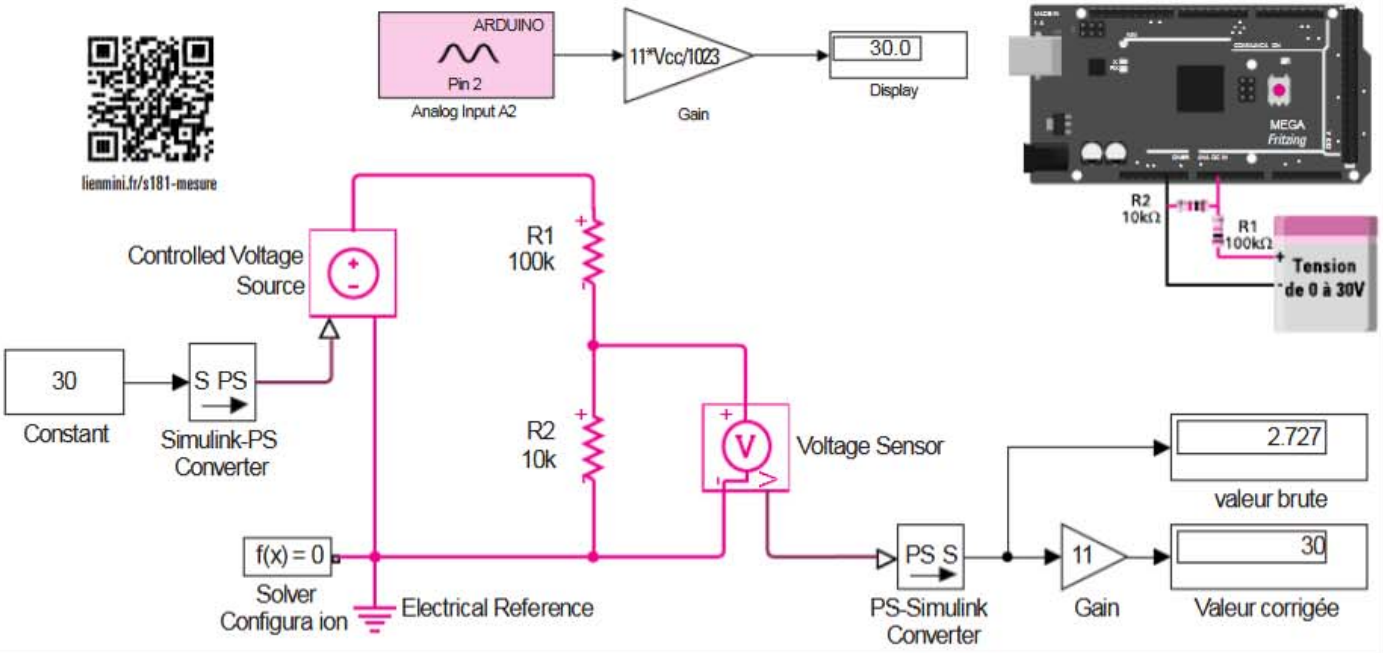
Le quantum de tension est de : $\Delta v = \frac{Vcc}{2^{10}-1} \approx \frac{4,961}{1023} \approx 4,85\ mV$

Mesurer une tension supérieure à 5 V : Exemple : mesurer une tension pouvant atteindre 30 V.

Il faut réaliser un diviseur potentiométrique ou diviseur de tension.
L'impératif est de ne pas dépasser la tension d'alimentation 5 V sur les entrées de la carte Arduino.
Le rapport le plus simple est Ve/10. Ce rapport est donné par : $V_{Pin2} = Ve\frac{R2}{R1+R2}$

Pour obtenir Ve/10, il faut que R1, R2 soient dans un rapport de 9 par exemple 10 kΩ pour R2 et 90 kΩ pour R1.
Trouver une résistance qui soit 9 fois plus grande (ou plus petite) que l'autre n'est pas facile.
En utilisant R1 = 100 kΩ et R2 = 10 kΩ on obtient un rapport de division de 0,09009 ou 100k/110k.
Pour afficher la bonne valeur de tension, il suffit d'ajouter après l'acquisition un gain de 110/100 soit 11.

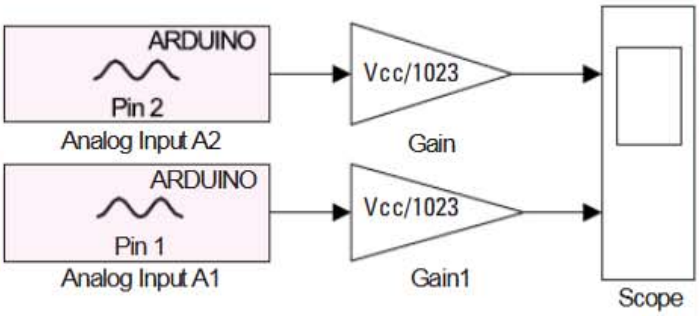
Simulation du modèle



Mesurer des tensions à l'aide d'une carte Arduino et Matlab Simulink (Suite)

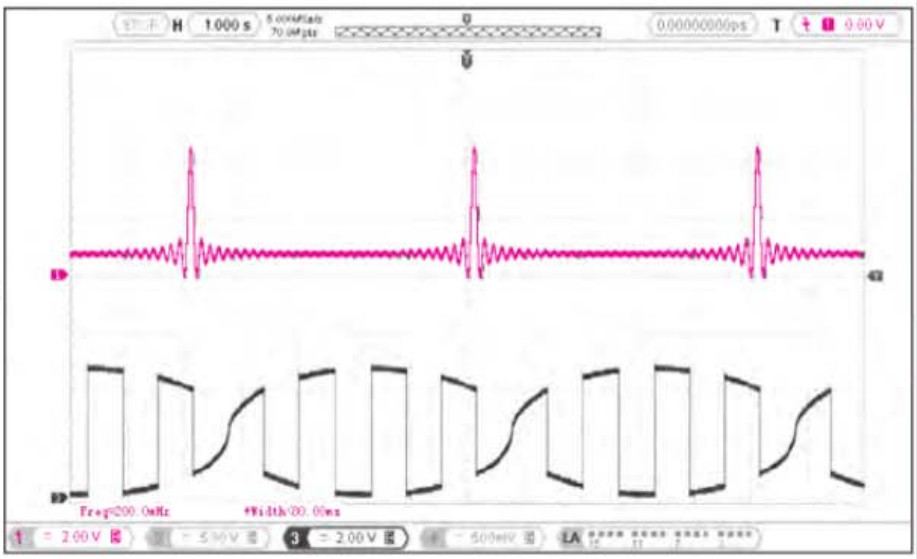
Oscilloscope multi-trace.

Le dialogue entre Simulink et la carte Arduino n'est pas très rapide, on peut compter sur quelques centaines d'échantillons par seconde. Cela limite la visualisation à des signaux lents. Exemple : décharge de condensateur ou de batterie, etc. Une programmation plus agressive et plus complexe permettrait d'obtenir jusqu'à 15 kSPS (échantillon par seconde) pour une résolution de 10 bits.



Acquisition réalisée avec un véritable oscilloscope

période du signal 5 s



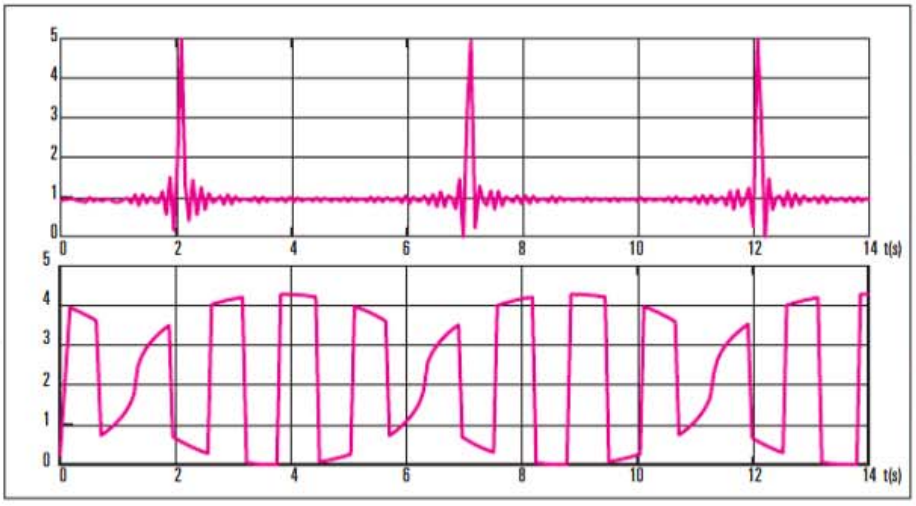
Avantages

- Vitesse d'acquisition très élevée.
- Précision des mesures.
- Plage de tension en entrée 10 mV à 50 V.

Inconvénients :

- Ne possède que 2 ou 4 voies.
- Son prix.

Acquisition réalisée avec une carte Arduino



Avantages

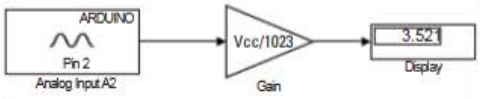
- Prix faible
- 8 à 16 entrées analogiques

Inconvénients

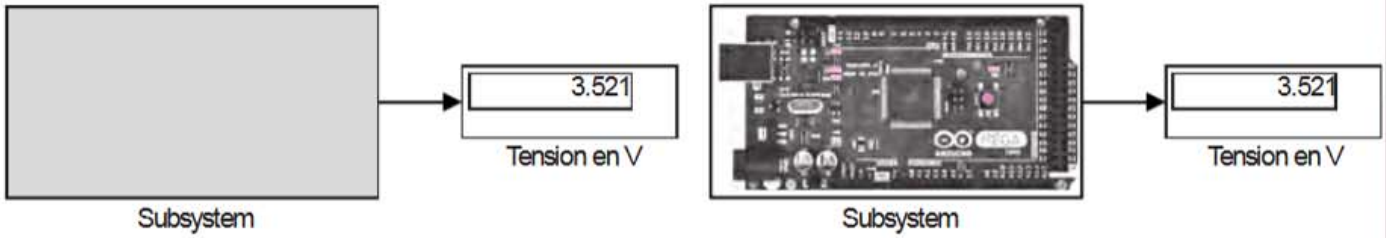
- Vitesse acquisition très faible.
- Plage de tension en entrée fixe 5 V.
- Demande une programmation et une exploitation des traces.

Habillage du modèle.

Sélectionner "Analog Input A2" et le "gain" dans un sous-circuit :



Créer un "Mask" : Ctrl + M
Ajoutez le texte suivant image('nomdufichierimage').
L'image doit être dans le même répertoire que le fichier Simulink

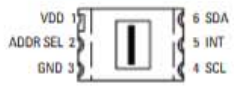


9.5.3. CAPTEUR I²C CAPTEUR DE LUMIÈRE NUMÉRIQUE TSL2561

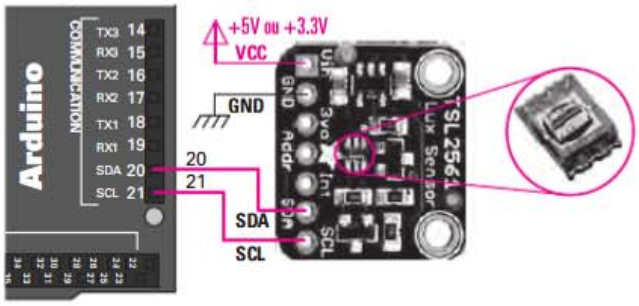
Caractéristiques principales

- Réponse proche de l'oeil humain.
- Interruption programmable en fonction des seuils haut et bas définis par l'utilisateur.
- Sortie numérique 16-Bit en I2C en mode rapide 400 kHz.
- Gain analogique, intégration, durée d'acquisition programmable.
- Dynamique de mesure de 1 à 1 000 000.
- Rejette automatiquement l'ondulation 50/60 Hz.
- Faible consommation 0,75 mW typique.

lienmini.fr/s181-arduino



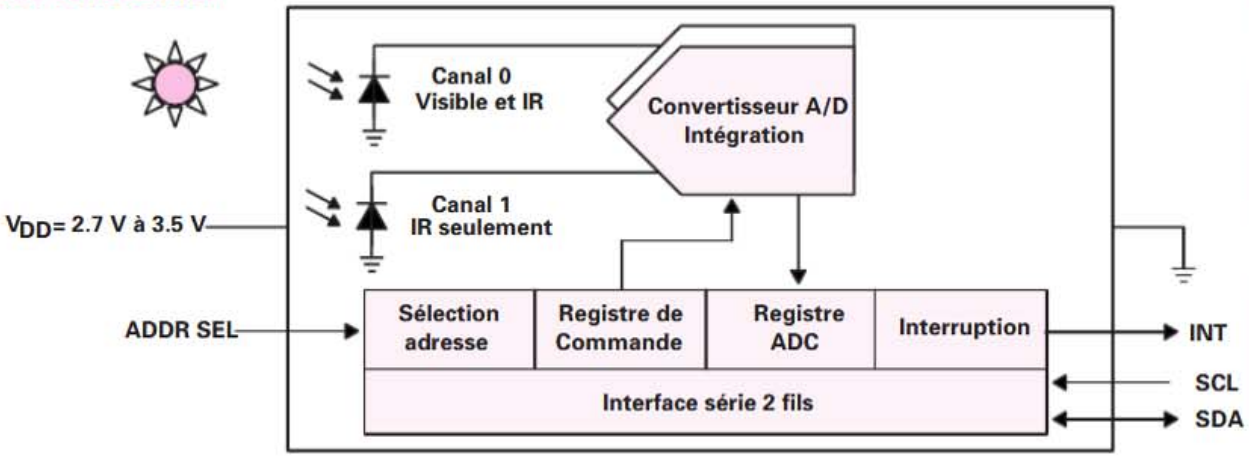
Câblage et adressage



Adresse I²C : 39h (0x39) (57d) ***adresse par défaut.***

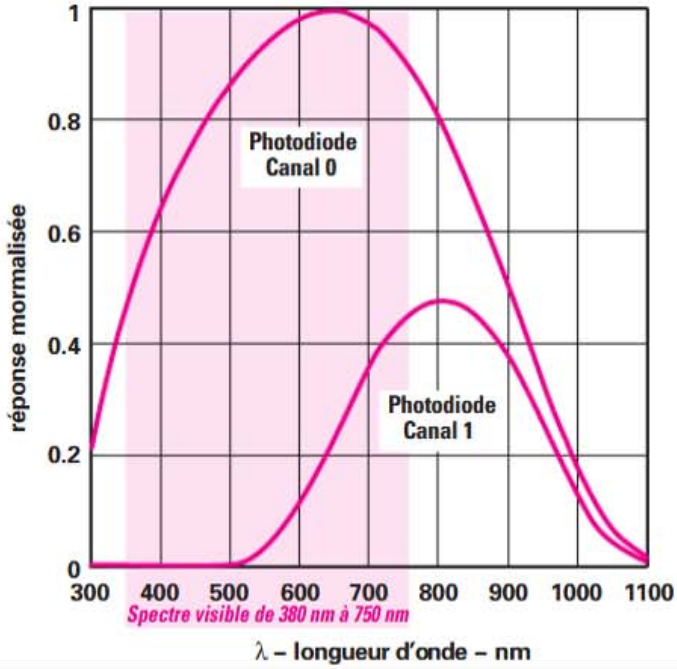
Le kit rend le câblage extrêmement simple. Alimentation 5 V, un régulateur de tension sur le kit ramène la tension à 3,3 V pour une alimentation du circuit intégré. Les résistances de tirages sont incorporées au kit pour les deux lignes de l'I²C (SDA, SCL) .

Diagramme fonctionnel

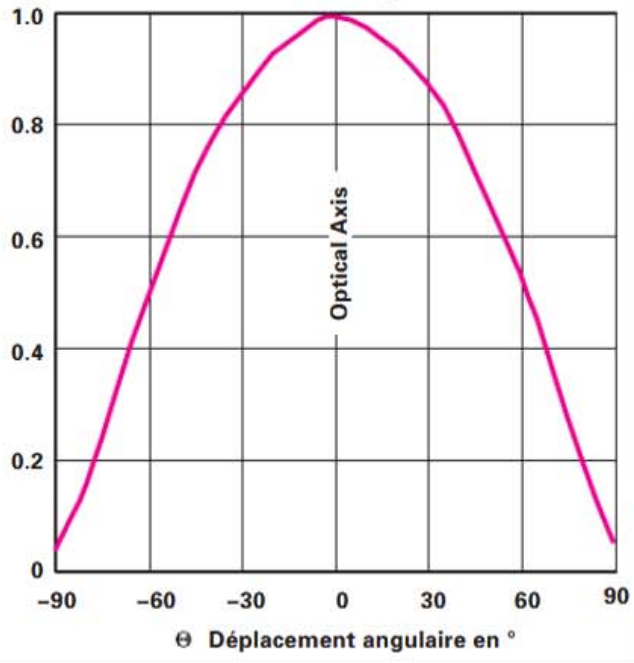


Caractéristiques optiques

Réponse spectrale

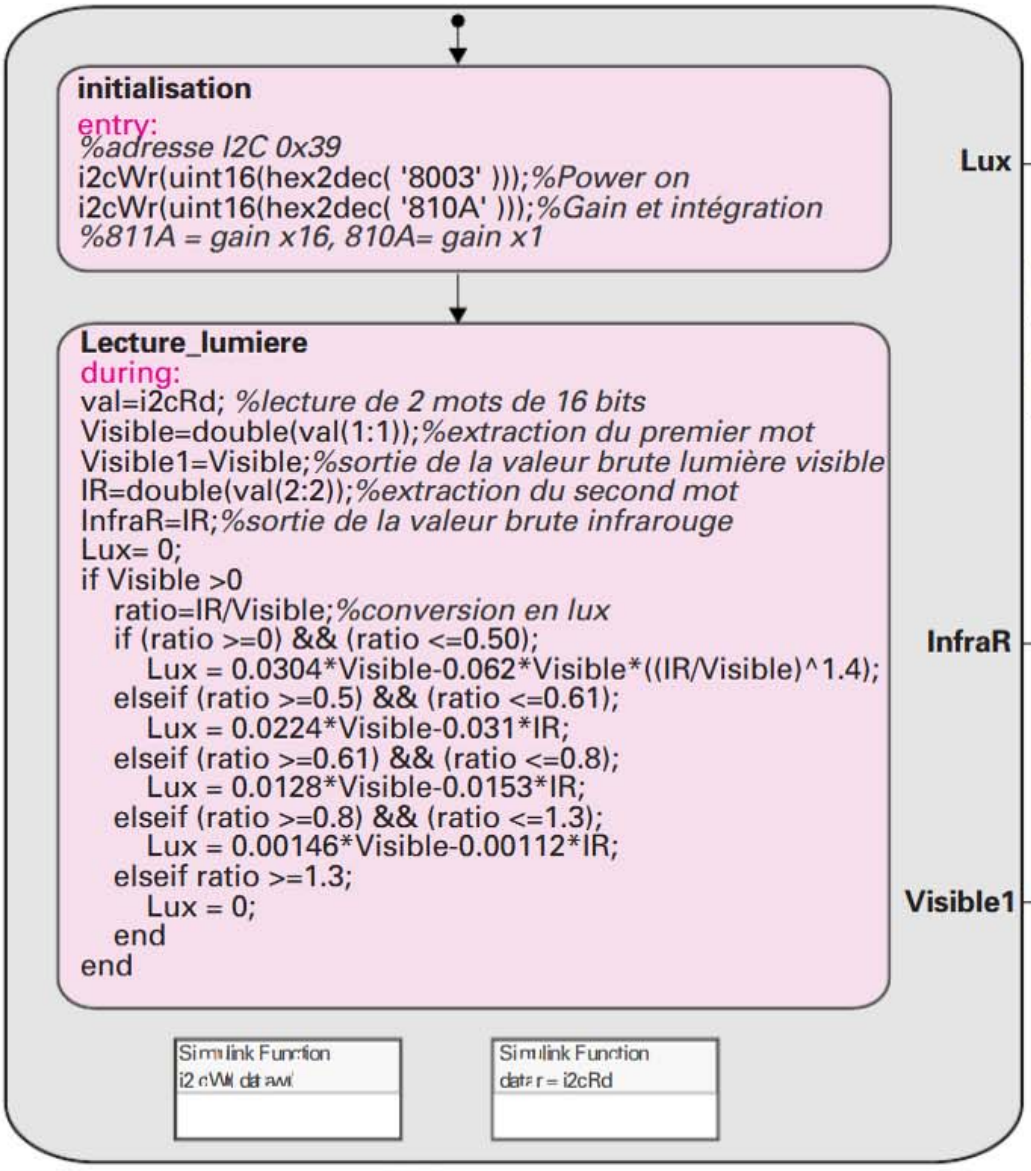


Variation de la réponse en fonction de l'angle incident



9.5.4. CAPTEUR I²C CAPTEUR DE LUMIÈRE NUMÉRIQUE TSL2561 (suite)

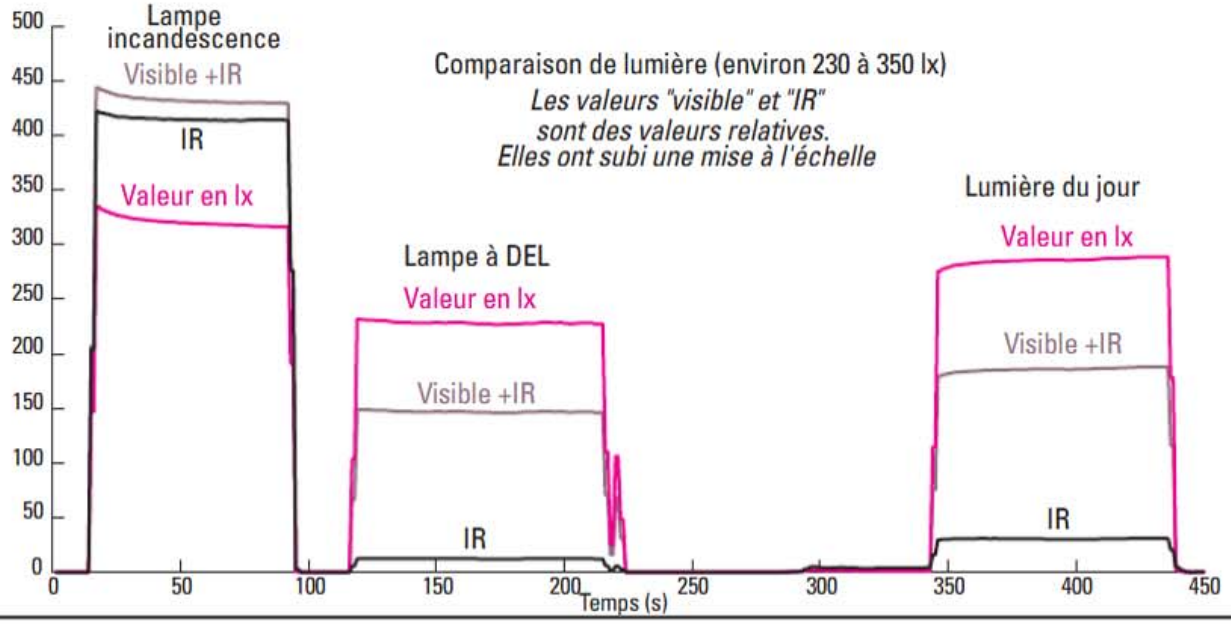
Programme Matlab Simulink StateFlow : mise œuvre du capteur.



Si le paramètre d'initialisation est X1 (810A) le gain en sortie sera de 16.
Si le paramètre d'initialisation est X16 (811A) le gain en sortie sera de 1.

TSL2561

Exemple de mesure

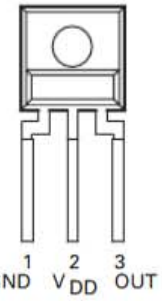


9.5.5. CAPTEUR DE LUMIÈRE NUMÉRIQUE TSL235

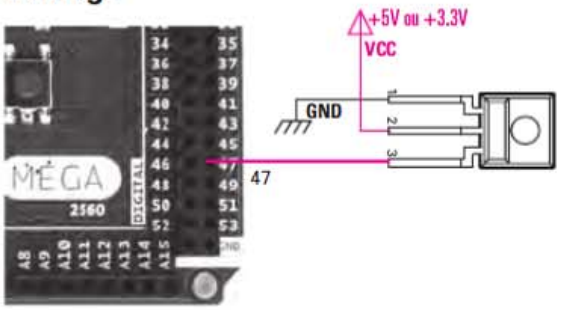
Caractéristiques principales

- Conversion haute résolution de l'intensité lumineuse en fréquence sans composant annexe.
- Communique directement avec un microcontrôleur.
- Compact, boitier plastique transparent trois broches.
- Alimentation simple, fonctionnement jusqu'à 2,7 V.
- Erreur typique de non-linéarité 0,2% à 100 kHz.
- Stablilité 150 ppm / °C.

lienmini.fr/s181-lumiere



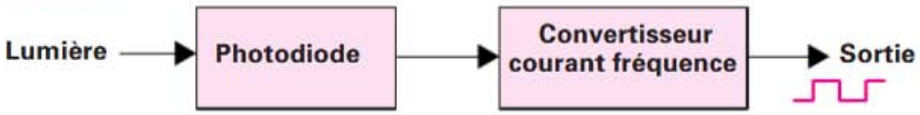
Câblage



Description

Le convertisseur TSL235R lumière-fréquence combine une photodiode au silicium et un convertisseur courant-fréquence sur un seul circuit intégré CMOS monolithique. La sortie est une onde carrée (rapport cyclique de 50 %) avec une fréquence directement proportionnelle à l'intensité de lumière (irradiance) sur la photodiode. La sortie numérique permet une interface directe à un microcontrôleur ou un autre circuit logique. Le dispositif a été compensé en température pour la gamme de 320 nm à 700 nm ultraviolet à la lumière visible et répond sur la gamme de lumière de 320 nm à 1050 nm.

Diagramme fonctionnel

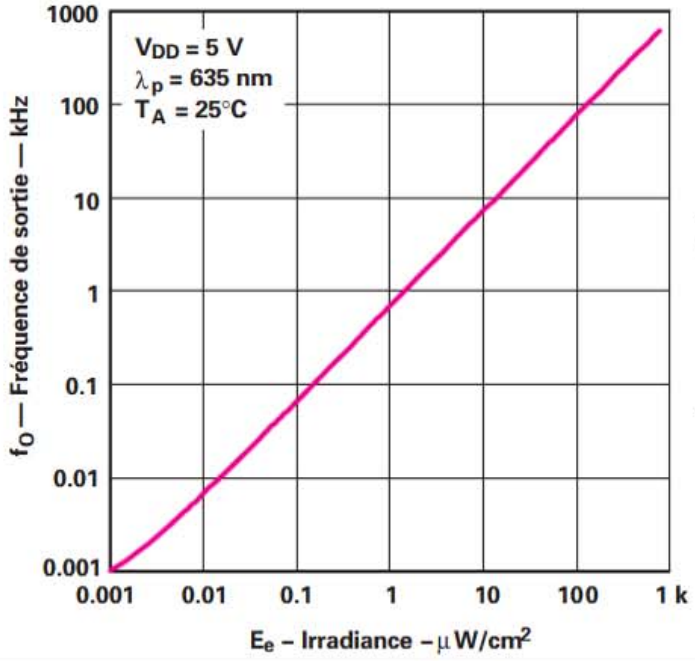


Caractéristiques opérationnelles à VDD = 5 V, TA = 25 °C

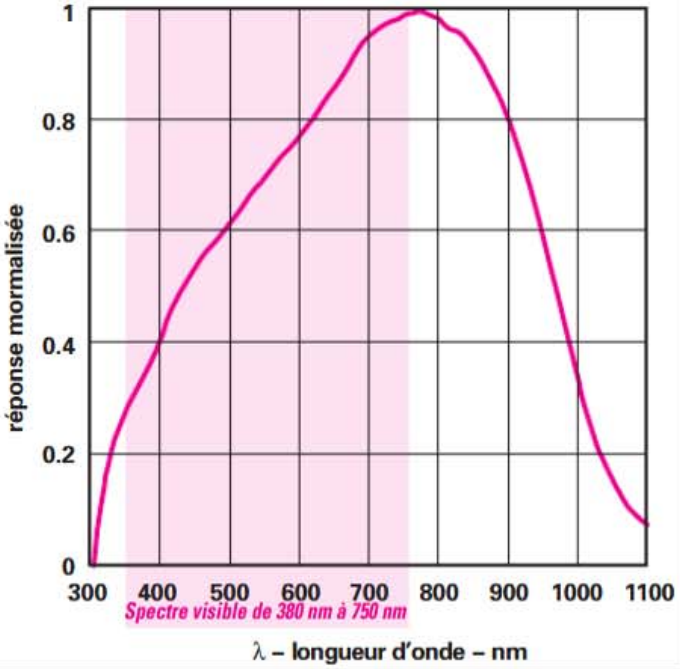
PARAMETRE	CONDITIONS DE TEST	MIN	TYP	MAX	UNITE
f_O Fréquence de sortie	E_e = 430 µW/cm², λ_p = 635 nm	200	250	300	kHz
	E_e = 0 µW/cm²		0,4	10	Hz
Non linéarité	f_O = 0 kHz to 10 kHz		±0,1%		%F.S.
	f_O = 0 kHz to 100 kHz		±0,2%		%F.S.

Caractéristiques optiques

Fréquence de sortie = *f* (Irradiance)



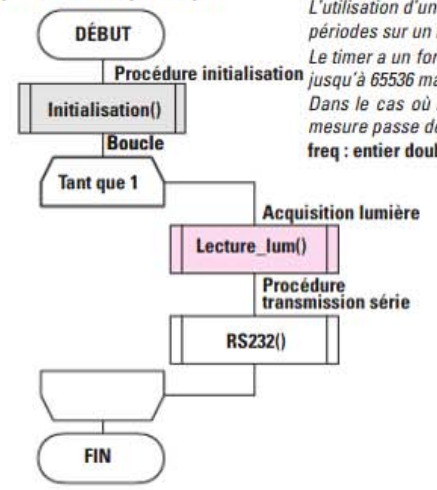
Réponse spectrale



Capteur de lumière numérique TSL235 (suite)

Programme Flowcode : mise œuvre du capteur

programme principal

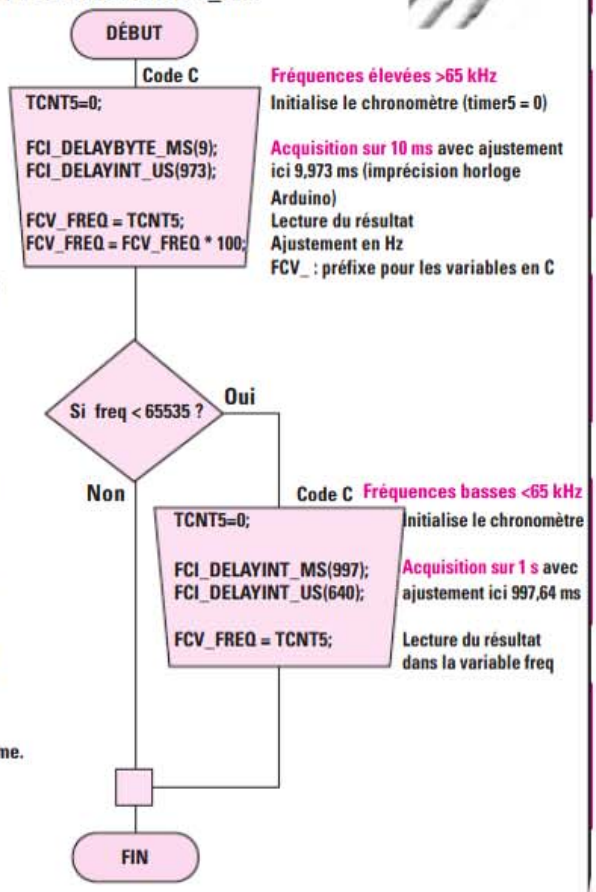


Principe :

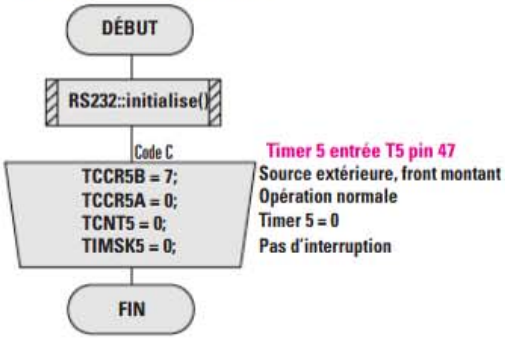
L'utilisation d'un «timer» permet de mesurer le nombre de périodes sur un laps de temps donné.
Le timer a un format de 16 bits ce qui permet de compter jusqu'à 65536 maxi
Dans le cas où la fréquence est <65 kHz, la période de mesure passe de 10 ms à 1 s.
freq : entier double long 32 bits

Nota :
Seul le timer 5 sur Arduino Mega a une entrée reliée aux connecteurs (T5 sur pin 47)

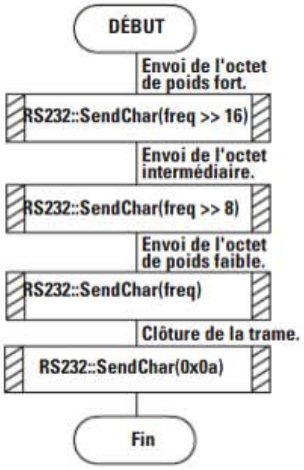
Procédure : lecture_lum



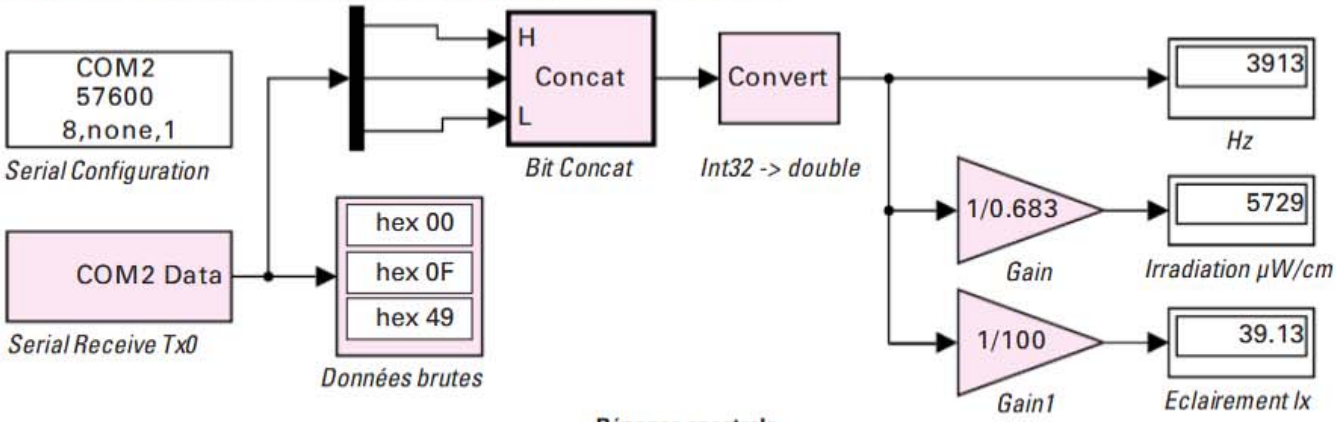
Procédure : Initialisation



Procédure : RS232



Programme Matlab Simulink : exploitation des mesures

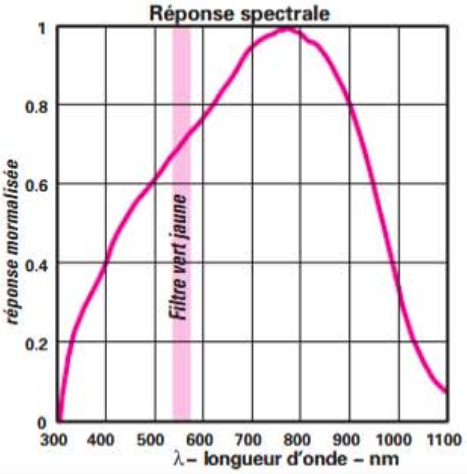


Luxmètre

Le capteur est très sensible aux infra-rouges.
Il n'est pas adapté pour la mesure en lux.

Pour adapter sa réponse spectrale, il est possible d'ajouter un filtre de couleur jaune vert. Cela permet de réaliser des mesures en lux en appliquant la formule :

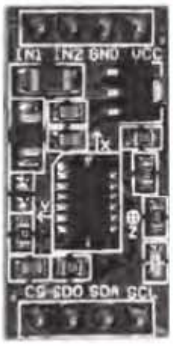
$$lx = \frac{fréquence}{100}$$



Un simple embout de stylo à bille de couleur verte permet d'obtenir des résultats en lux semblables au capteur TSL2561

9.5.5. CAPTEUR I²C : ACCÉLÉROMÈTRE 3 AXES MMA7455L

Freescale Semiconductor

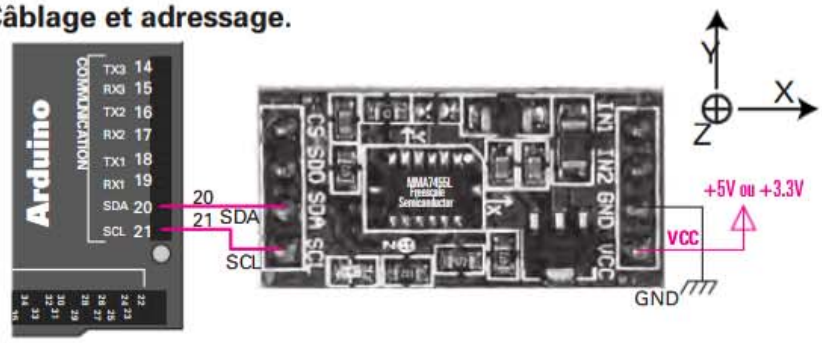


Caractéristiques principales :

- Sortie numérique I2C / SPI.
- Alimentation circuit intégré : 2,4 V - 3,6 V (le kit possède un régulateur de tension 3,3 V).
- Seuil d'interruption programmable.
- Niveau de détection pour la reconnaissance de mouvement (chocs, vibrations, chute libre).
- Détection et reconnaissance d'une simple ou double impulsion.
- Sensibilité (64 LSB / g pour 2g et 8g en mode 10 bits).
- Sensibilité sélectionnable (± 2g, ± 4g, ± 8g) pour le mode 8-bit.

lienmini.fr/s181-accelero

Câblage et adressage.

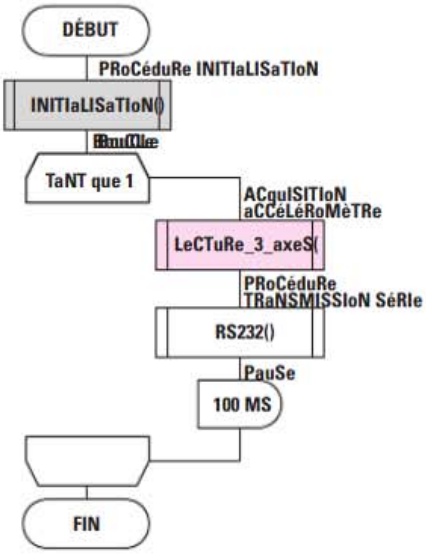


Adresse I²C : 1Dh (0x1D) (29d)

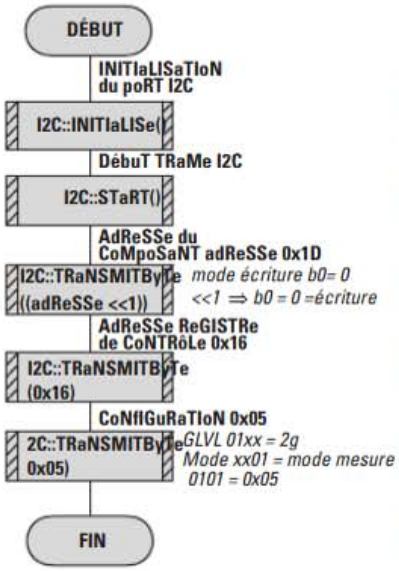
Le kit rend le câblage extrêmement simple. Alimentation 5 V et deux lignes de l'I²C (SDA SCL) ; les résistances de tirages sont incorporées au kit.

Programme Flowcode : mise œuvre du capteur

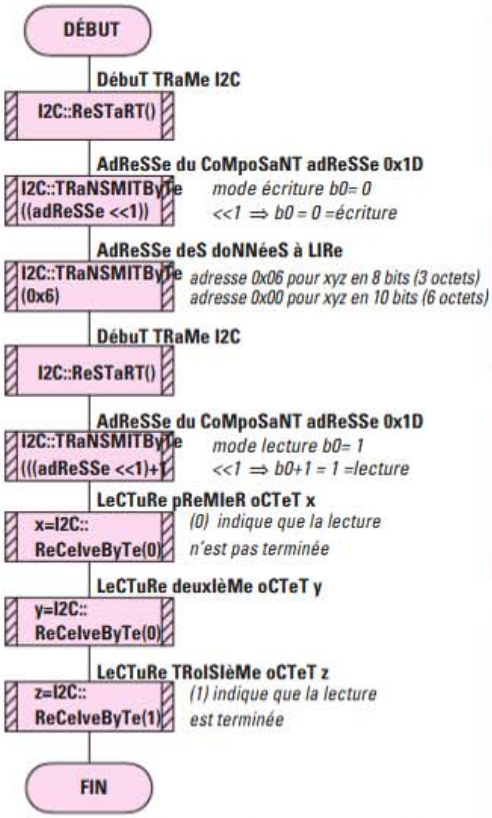
PRoGRaMMe pRINCIpaL



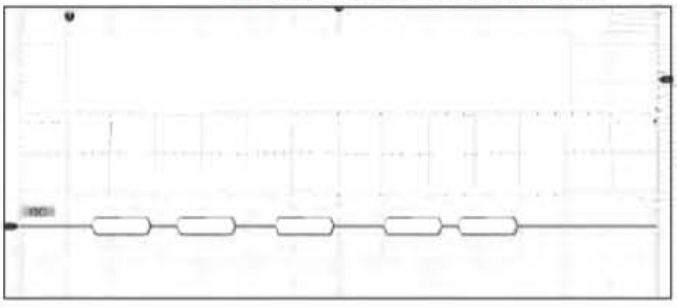
PRoCéduRe : INITIaLISaTIoN



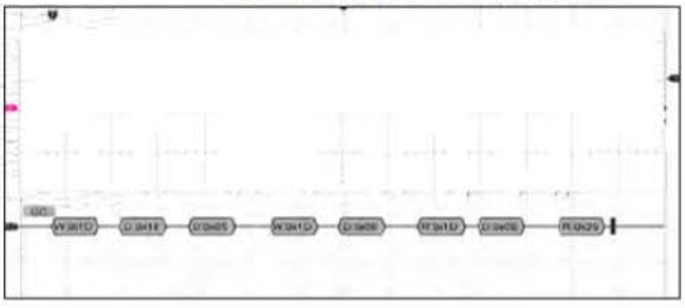
PRoCéduRe : LeCTuReS_3_axeS



OSCILLoGRaMMeS INITIaLISaTIoN



OSCILLoGRaMMeS LeCTuRe deS axeS



9.5.6. CAPTEUR I²C : ACCÉLÉROMÈTRE GYROSCOPE 3 AXES MPU-6050

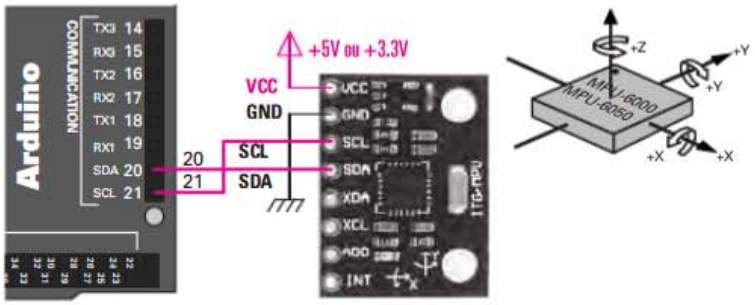
InvenSense

Caractéristiques principales :

- Sortie numérique, 16 bits par registre, AX, AY, AZ, GX, GY, GZ, T.
- Gyroscopes, pleine échelle programmable de ± 250, ± 500, ± 1000, et ± 2000 °/s.
- Accéléromètre, pleine échelle programmable de ± 2g, ± 4g, ± 8g et ± 16g
- Tension d'alimentation de 2,375 V-3,46 V
- Capteur de température numérique.
- Filtres numériques programmables.
- I²C rapide à 400 kHz.

liemmini.fr/s181-gyro

Câblage et adressage

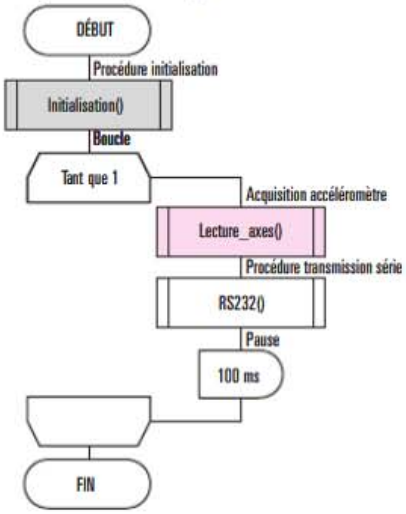


Adresse I²C : 68h (0x68) (104d)

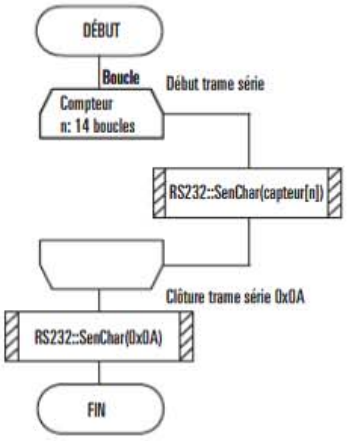
Le kit rend le câblage extrêmement simple : alimentation 5 V et deux lignes de l'I²C (SDA SCL), les résistances de tirages sont incorporées au kit.

Programme Flowcode : mise œuvre du capteur

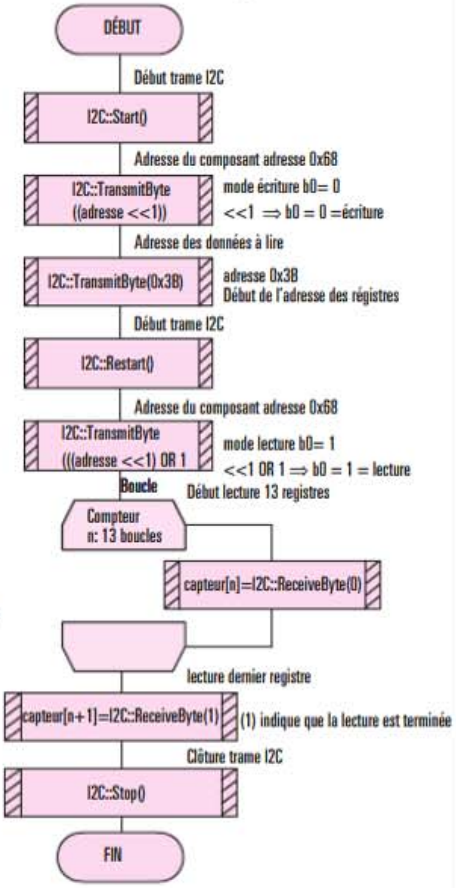
Programme principal



Procédure : RS232



Procédure : Lectures_axes

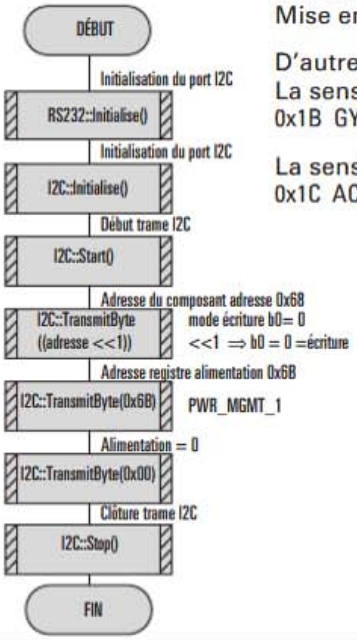


Procédure : Initialisation

Initialisation des communications série et I²C
Mise en service du capteur, 0 dans le registre 6Bh

D'autres paramètres peuvent être initialisés comme :
La sensibilité gyroscope 250 à 2000°/s.
0x1B GYRO_CONFIG bits FS_SEL (bits 4-3)

La sensibilité de l'accéléromètre 2g à 16g.
0x1C ACCEL_CONFIG bits AFS_SEL (bits 4-3)



Lecture axes :

Écriture dans le capteur de l'adresse qui va être lue 3Bh.
Lecture **en boucle** de 13 registres à partir de 3Bh.
Les données sont stockées dans une table ***capteur[14]*** .
capteur[n]=I2C::ReceiveByte(0) n est incrémenté par la boucle.
La dernière lecture se fait hors de la boucle pour indiquer à la liaison I2C la fin de lecture (1).

RS232 :

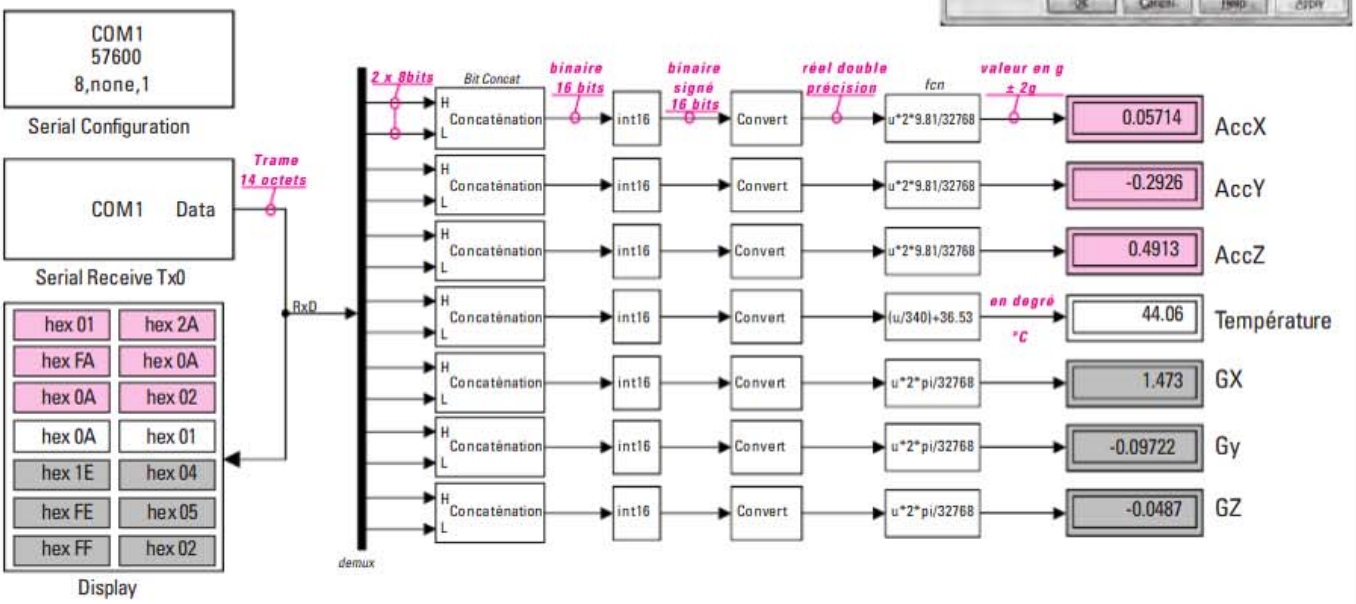
Écriture dans la liaison série en boucle des 14 valeurs du capteur : capteur[n]
clôture de trame avec 0Ah (LF).

Capteur I²C : accéléromètre gyroscope 3 axes MPU-6050 (suite)

Programme Matlab Simulink

Configuration série :

Communication port *: Utiliser le port COMx propre à votre installation ici c'est le COM1*
Header *: pas d'entête.*
Terminator *: Line Feed =0x0A : côture de la trame série.*
Data size *: 14 x 1 octets.*
Data type *: uint8 = Entier 8 bits non signé.*
Block sample time *: temps d'échantillonnage, même durée que dans le programme 100 ms.*



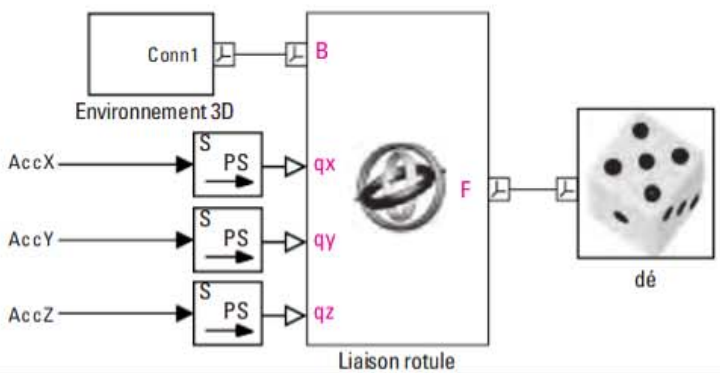
Principe :

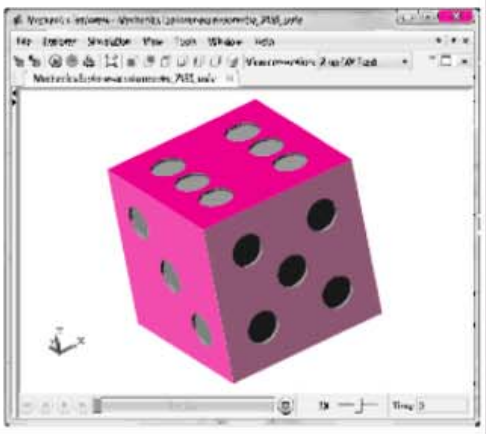
Le bloc série *: transmet la trame avec les 14 octets sans l'octet de clôture (0x0A).*
Demux *: extrait les octets un par un (14 sorties).*
Bit Concat *: réalise la concaténation (l'assemblage) des octets de poids forts et de poids faibles.*
int16 *: transforme le mot de 16 bits non signé en un mot de 16 bits signé (-32768 à +32768).*
Convert *: transforme le mot de 16 bits signé en un réel en double précision (64 bits virgule flottante).*
fcn *: fonction y=ƒ(u). A adapter en fonction de l'utilisation finale.*

- *Accélération : Valeur par défaut ±2g. y=u x 2 x 9.81 /32768 soit : ± 2.g.*
- *Température : formule du constructeur (u/340)+36.53 en °C.*
- *Gyroscope (gyromètre) : Valeur par défaut ±250°.s⁻¹ y=u x 250 /32768 soit : ±250°.s⁻¹*

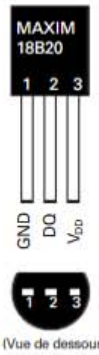
Exemple d'exploitation :

Un dé à jouer a été modélisé sous un modeleur volumique et importé dans Simulink.
Ajout d'une liaison rotule. Pilotage de la liaison avec les valeurs de l'accéléromètre.
Le dé va suivre le mouvement de l'accéléromètre.





9.5.7. CAPTEUR DE TEMPÉRATURE NUMÉRIQUE DS18B20



lienmini.fr/s181-temperature

"pdf Used by permission of Maxim Integrated Products (http://www.maxim-ic.com)"

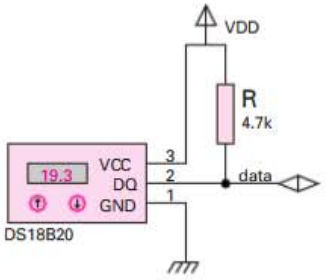
Caractéristiques principales :

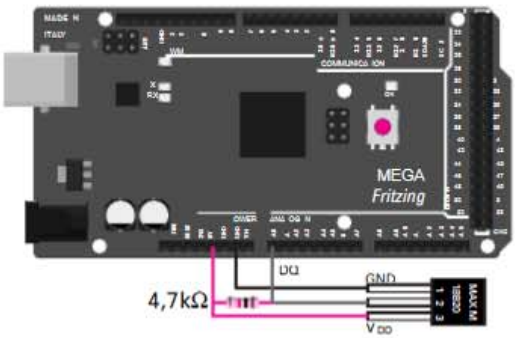
- Protocole de communication 1 Wire® .
- Chaque composant dispose d'un code 64 bits de série unique.
- Alimentation 3,0 V à 5,5 V.
- Plage de température de -55 °C à + 125 °C.
- Précision de ± 0,5 °C (-10 °C à + 85 °C).
- Résolution est sélectionnable par l'utilisateur de 9 à 12 bits.
- Durée de conversion 750 ms (Max) pour une résolution de 12 bits.

Relation température, câblage, précision

Température (°C)	Sortie numérique (hexadécimale)
+125	07D0h
+85 *	0550h
+25.0625	0191h
+10.125	00A2h
+0.5	0008h
0	0000h
-0.5	FFF8h
-10.125	FF5Eh
-25.0625	FE6Fh
-55	FC90h

Valeur +85°C dans le registre température après un reset.

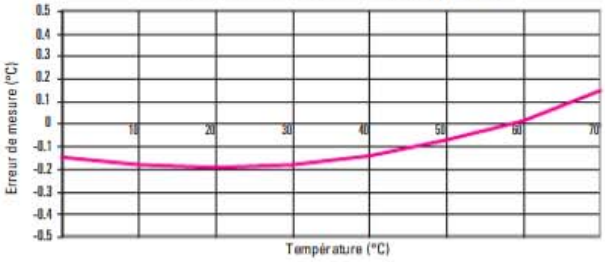




Relation.

$$t_{\circ C} = \frac{N_{10}}{16}$$

Courbe d'imprécision typique

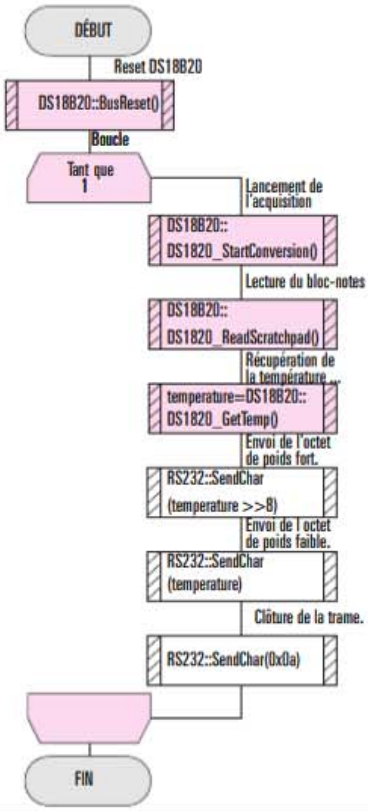


Exemples :

- *capteur = 0190h ⇒ 400d température = 400/16 = 25°C*
- *capteur = FE70h => -400d température = -400/16=-25°C*

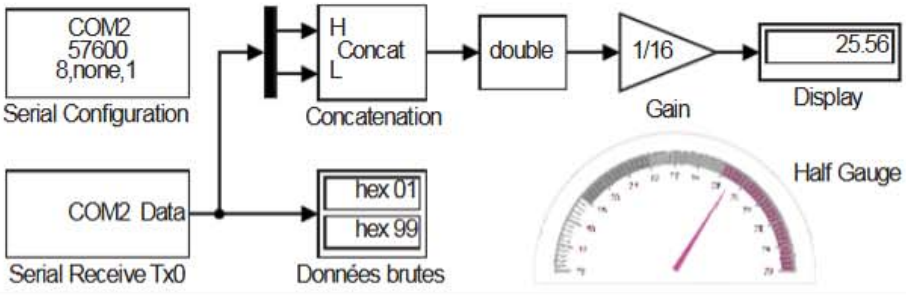
La valeur numérique du capteur est donnée en complément à deux.

Programme Flowcode : mise œuvre du capteur



Programme Flowcode :
On utilise des «macros» (fonctions) intégrées au logiciel.
BusReset(): reset du ou des capteur(s) sur la ligne.
StartConversion(): Lancement de l'acquisition de la température (750 ms pour une résolution de 12 bits (valeur par défaut)).
ReadScratchpad(): Transfert de la valeur de température dans le bloc-note du capteur.
GetTemp() : Transfert de la valeur de température via la liaison et protocole OnWire.
RS232 : Envoi de deux octets contenant la température et un octet de clôture de trame (0x0A).

Programme Simulink :
Récupération des octets de température, concaténation pour obtenir 16 bits, conversion pour une valeur en double précision, division par 16 pour obtenir la température en degrés Celsius.



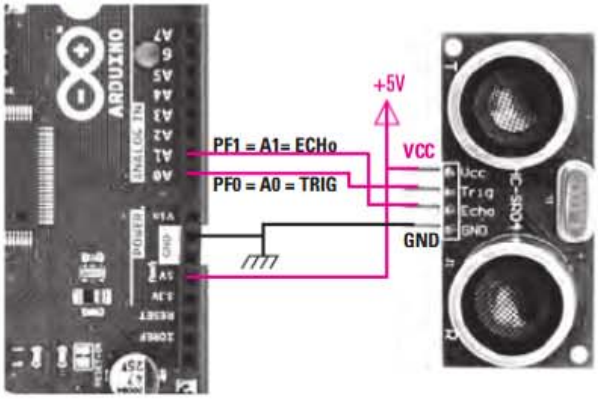
9.5.8. CAPTEUR TÉLÉMÈTRE ULTRASON HC-SR04

lienmini.fr/s181-radar

Caractéristiques principales :

- Tension d'alimentation 5 V, consommation 15 mA.
- Fréquence ultrason 40 kHz.
- Mesures de 2 cm à 4 m.
- Signal de sortie de niveau TTL durée proportionnelle à la distance.
- Signal de déclenchement 10 µs min. Impulsion TTL.

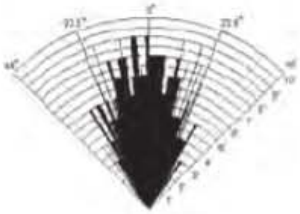
Câblage



Principe :

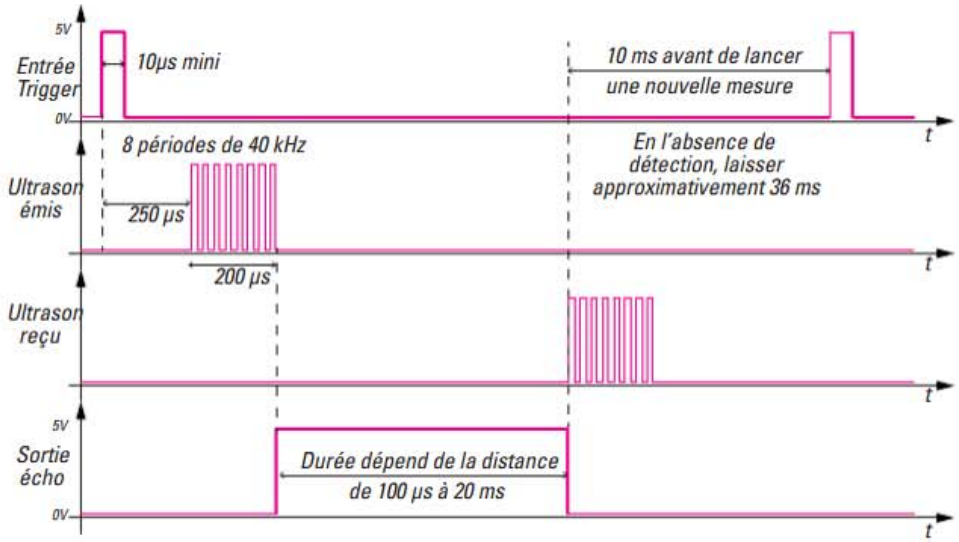
L'émetteur émet une salve de 8 périodes d'une onde ultrasonore à 40 kHz directionnels.
Lorsqu'il est déclenché, il démarre une mesure de durée.
Le récepteur à ultrasons détecte l'onde réfléchie et arrête la mesure.
La vitesse du son est de 340 m/s dans l'air.

La distance est divisée par deux pour prendre en compte l'aller-retour du son sur l'objet à détecter.

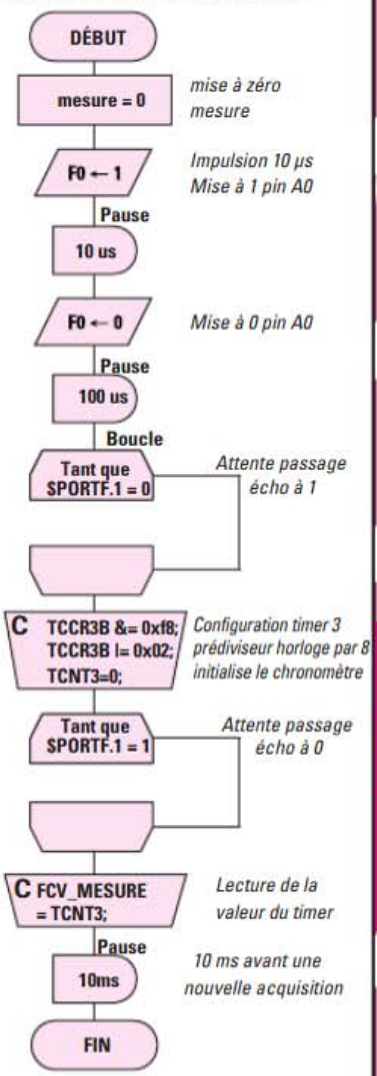


$$d = \frac{340 \times t}{2}$$

Programme Flowcode : mise œuvre du capteur



Procédure : Lecture_distance



DeSCRIpTIoN :

- La variable «*mesure*» est un entier long 16 bits.
- Génération de l'impulsion de déclenchement de 10 µs.
- Attente de 100 µs avant d'attendre la détection du signal «écho» à l'état 1.
- Initialisation d'un timer (chronomètre) 16 MHz/8 = 2 MHz soit **500 ns par incrément**.
- Lecture du timer lorsque l'entrée «écho» passe à 0 (fin de l'impulsion de mesure).
- La valeur «*mesure*» représente le nombre contenu dans le timer.
- Attente de 10 ms pour commencer une nouvelle acquisition.

$$t_m = MESURE \times incrément$$

$$t_m = MESURE \times 5.10^{-7}$$

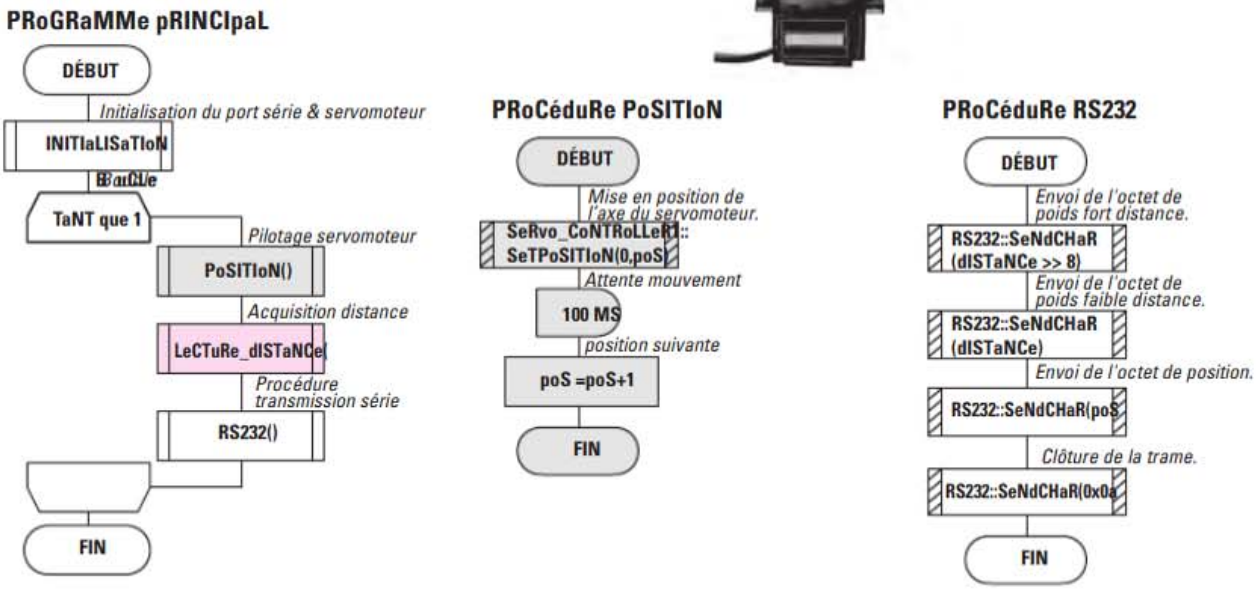
$$Distance_{(m)} = \frac{340 \times t_m}{2}$$

Capteur télémètre ultrason HC-SR04 (suite)

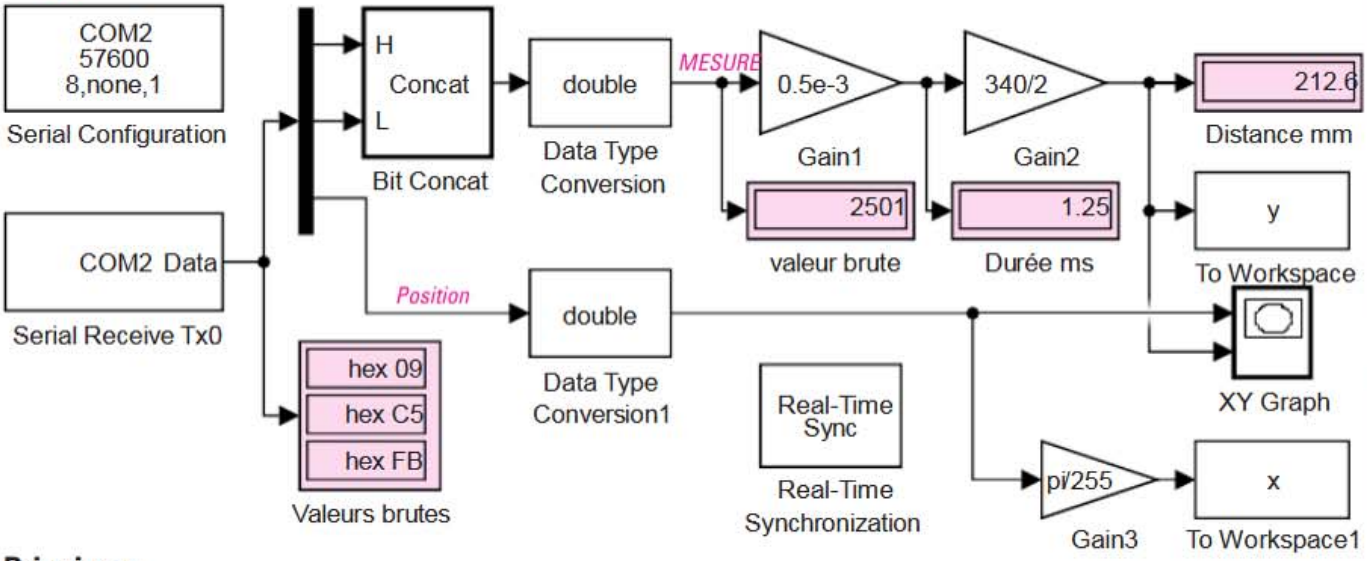
Exemple d'application : radar 2D

Le capteur est monté sur l'axe d'un servomoteur.

Programme Flowcode

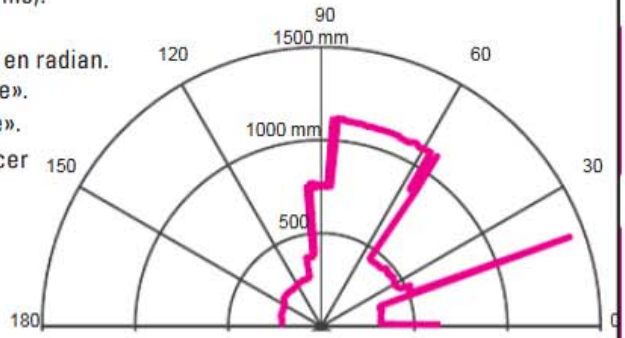


Programme Matlab Simulink



Principe :

- **Le bLoC SéRIe** : transmet la trame avec les 3 octets sans l'octet de clôture (0x0A).
- **DeMux** : extrait les octets un par un (3 sorties).
- **BIT CoNCaT** : réalise la concaténation (l'assemblage) des octets de poids fort et de poids faible.
- **DoubLe** : transforme le mot de 16 bits non signé en un mot décimal double précision.
- **GaIN1** : transforme la valeur issue du timer (1 = 500 ns) en un temps (en ms).
- **GaIN2** : applique la relation durée distance 340/2, valeur en mm.
- **GaIN3** : transforme la position d'un entier 8 bits en une valeur angulaire en radian.
- La distance est stockée dans un tableau «x» stocké dans le «Workspace».
- La position est stockée dans un tableau «y» stocké dans le «Workspace».
- A la fin de la simulation, la commande «**poLaR(x,y)**» est lancée pour tracer la distance mesurée en fonction de la position.
- **ReaL-TIMe SyNCHRoNISaTIoN** , permet d'effectuer une simulation en temps réel.

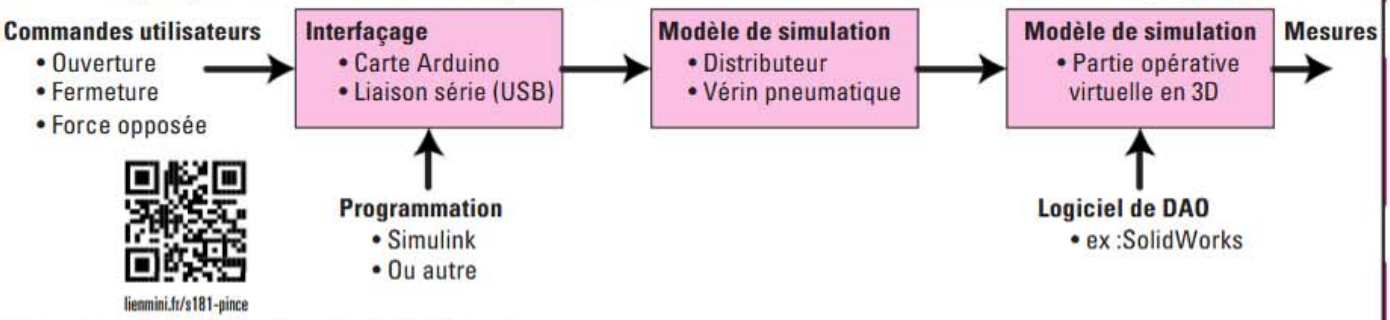


9.6. MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

Exemple de modélisation multiphysique à l'aide de Matlab Simulink.

Modélisation de la pince NewMat

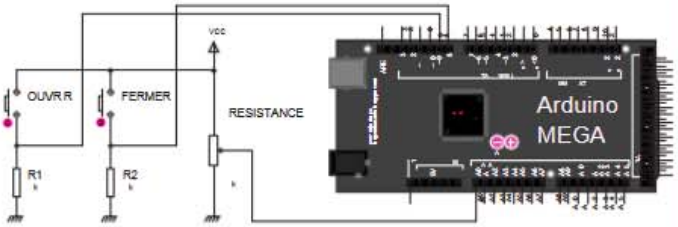
Cet exemple permet de montrer les possibilités étendues de la modélisation multiphysique :



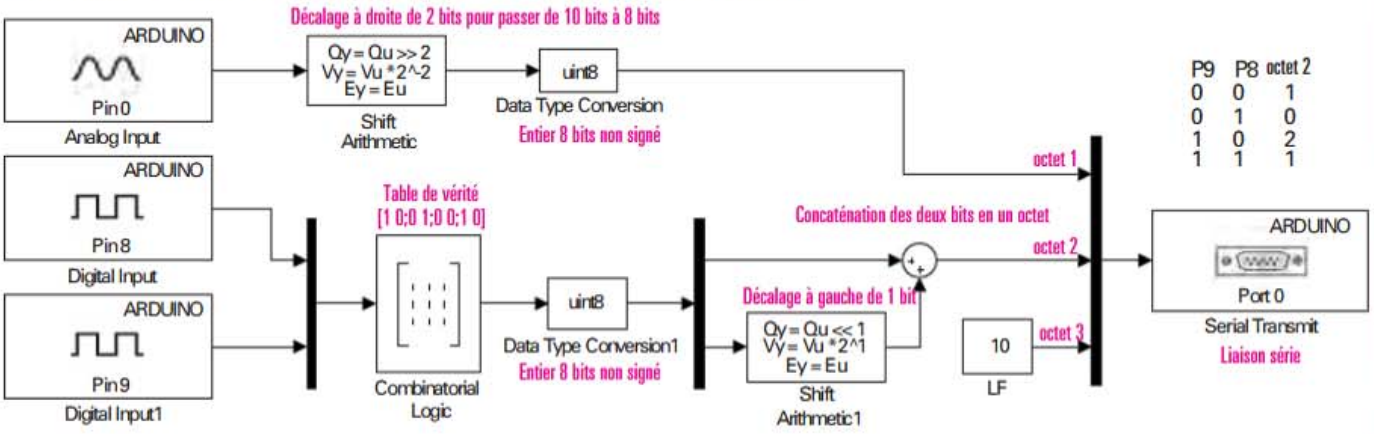
lienmini.fr/s181-pince

Commandes utilisateur & interfacage :

Deux boutons poussoirs :
- OUVRIR (la pince) pin9
- FERMER (la pince) Pin8
- Un potentiomètre fournit une grandeur variable An0, elle représentera l'effort s'opposant à la fermeture de la pince.

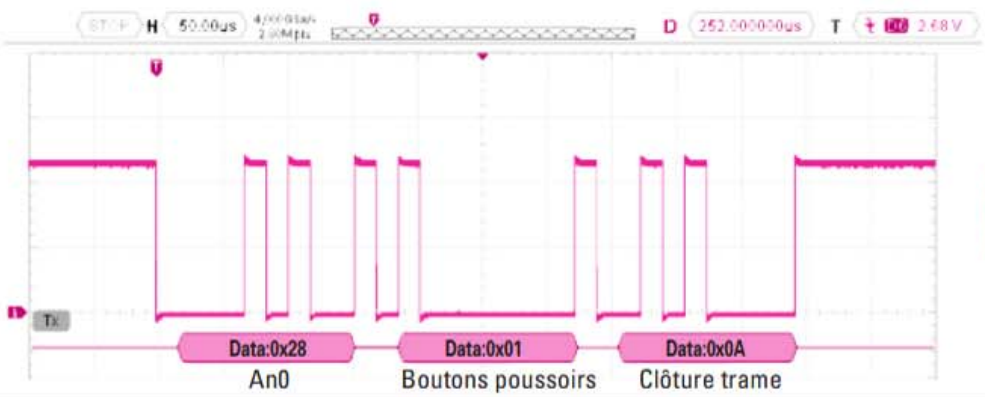


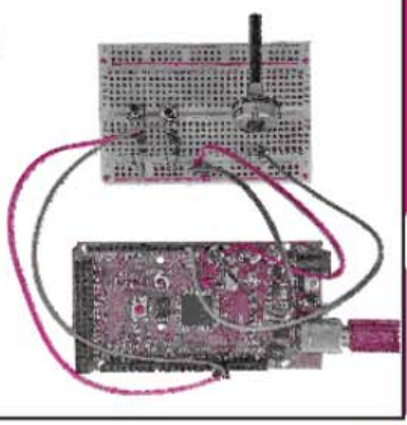
Modèle de simulation pour programmer la carte Arduino :



Toutes les 100 ms la carte envoie via la liaison série (via l'USB) trois octets :
- La valeur du potentiomètre ramenée de 10 à 8 bits par un registre à décalage.
- Les deux boutons-poussoirs sont encodés de la façon suivante : les deux bits P9 P8 passent par une table de vérité puis sont fusionnés pour réaliser un octet prenant les valeurs 0, 1 ou 2.
- Le troisième octet est un mot de clôture de trame 0x0A (LF = *Line feed*).

La programmation de la carte Arduino sera réalisée en lançant une simulation sur cible externe ou en utilisant le bouton «*Deploy to Hardware*» pour un fonctionnment autonome du modèle de simulation sur la carte Arduino.



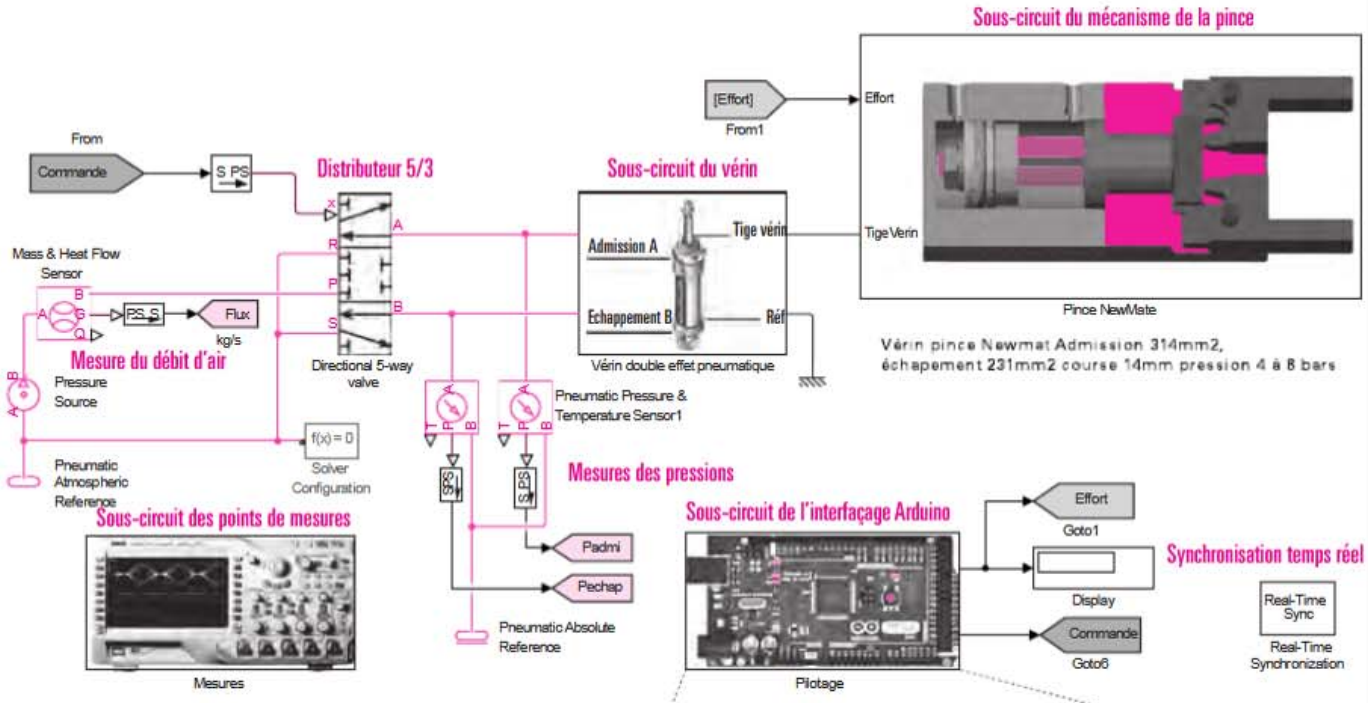


Exemple de modélisation multiphysique à l'aide de Matlab Simulink : Pince NewMat (suite).

Circuit général

Mise en place d'un distributeur pneumatique 5/3 (5 orifices, 3 positions) connecté à un vérin pneumatique, piloté par les informations fournies par la carte Arduino.
Le vérin produit une force sur sa tige en fonction de son alimentation, celle-ci est communiquée à la partie opérative de la pince.
Le pilotage de la partie opérative se fait sur la liaison glissière de la tige du vérin.
Ce pilotage prend en compte l'ensemble cinématique ainsi que la force s'opposant à la fermeture de la pince.

On trouve un certain nombre de capteurs permettant de visualiser l'ensemble des paramètres de simulation :
Commande, position de la tige, effort sur la tige, débit d'air de la source, pression d'air dans les chambres d'admission et d'échappement du vérin.
Un certain nombre d'éléments sont regroupés en sous-circuits pour une meilleure lisibilité et illustrés par un «Mask» permettant d'illustrer le sous-circuit par une illustration appropriée.

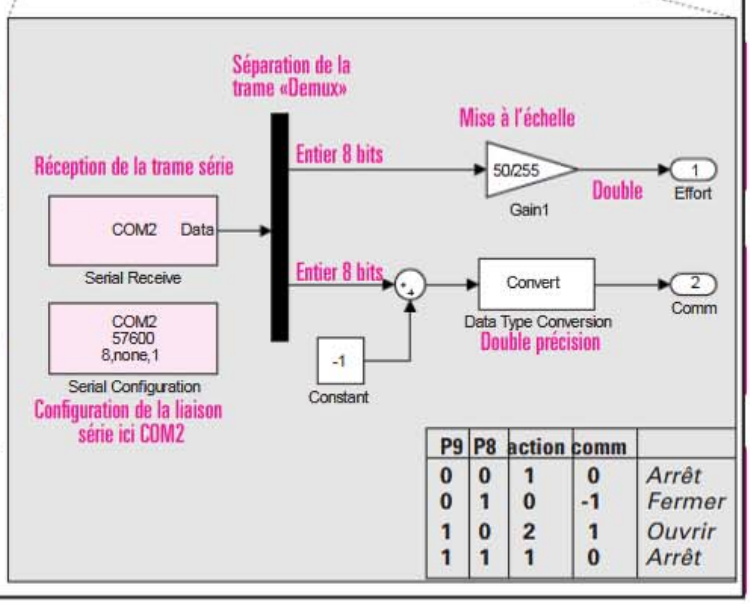


Interfaçage de pilotage par la liaison série

La carte Arduino avec son programme vu précédemment envoie les informations de pilotage de la pince.
Le «Demux» sépare de la trame les deux octets de pilotage.

Le premier octet :
• valeur de potentiomètre : il est mis à l'échelle ici 50 Nm.

• Le second octet : la commande avec transformation de l'information pour obtenir la table de vérité ci-contre.



P9	P8	action	comm	
0	0	1	0	*Arrêt*
0	1	0	-1	*Fermer*
1	0	2	1	*Ouvrir*
1	1	1	0	*Arrêt*

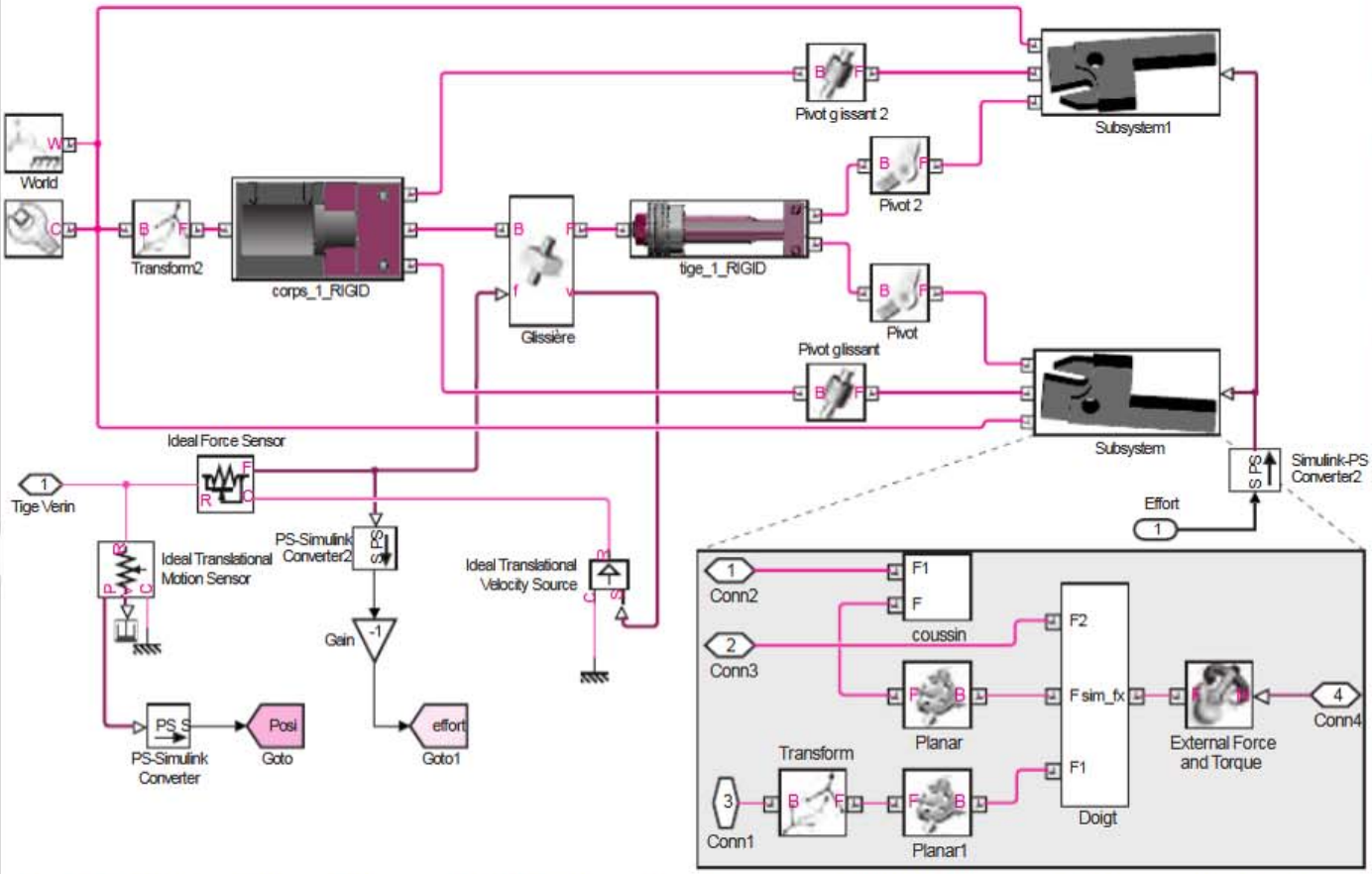
Exemple de modélisation multiphysique à l'aide de Matlab Simulink : Pince NewMat (suite).

Détail des sous-circuits

Après l'importation du modeleur volumique (SolidWorks ou autre), il est intéressant de regrouper les éléments constituant les éléments principaux en sous-circuit et en mettant les photos des pièces sur des groupements, on obtient une illustration de la partie opérative très claire.
Ainsi nous obtenons :

- le corps de la pince ;
- la tige du vérin ;
- les deux doigts de préhensions.

Ces principaux éléments sont liés entre eux par des liaisons (liaisons définies dans le logiciel de DAO, mais qui peuvent être modifiées).

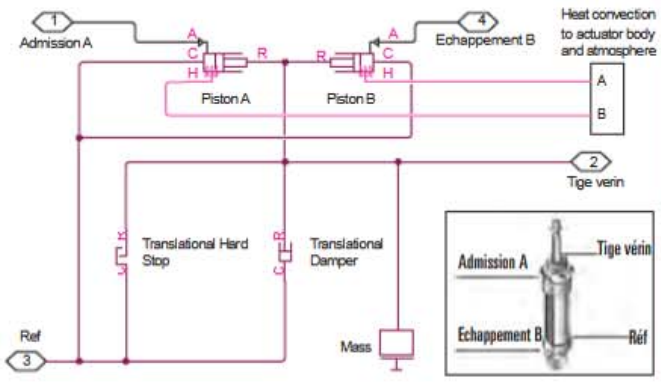


Pour simuler le fonctionnement de la pince, il faut piloter la liaison glissière piston/corps en appliquant l'effort dû à la pression de l'air sur le piston issu du modèle Simulink. Un frottement piston/corps peut être défini.

Un effort extérieur sur le bout des doigts simulera la résistance à la fermeture de la pince.
Toutes les informations statiques dans les différentes liaisons seront alors définies dans la simulation.

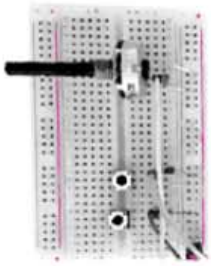
Tous ces éléments seront regroupés dans un sous-circuit et illustrés par la photo de la pince.

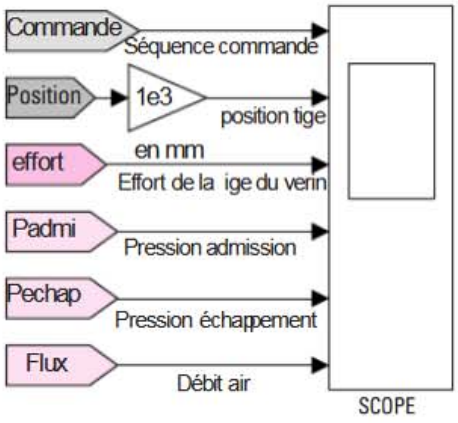
Les sous-circuits, distributeurs et vérins pneumatiques double effet sont issus des bibliothèques Simscape du logiciel. Il est possible de modifier ces sous-circuits (ci-contre le détail du modèle vérin pneumatique double effet).

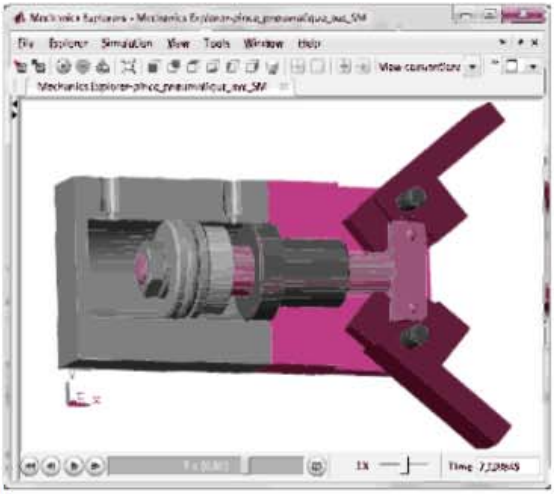


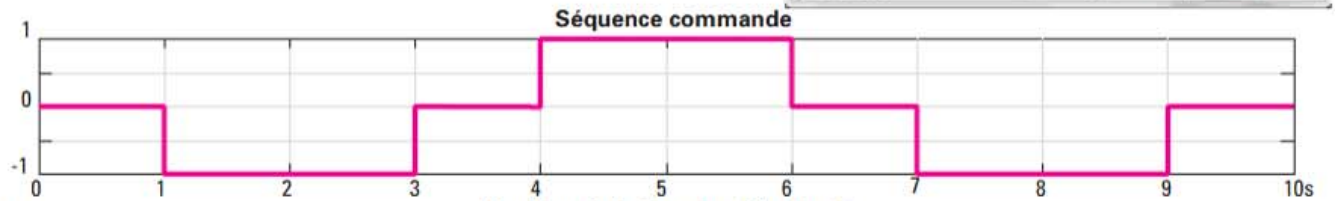
Exemple de modélisation multiphysique à l'aide de Matlab Simulink : Pince NewMat (suite).

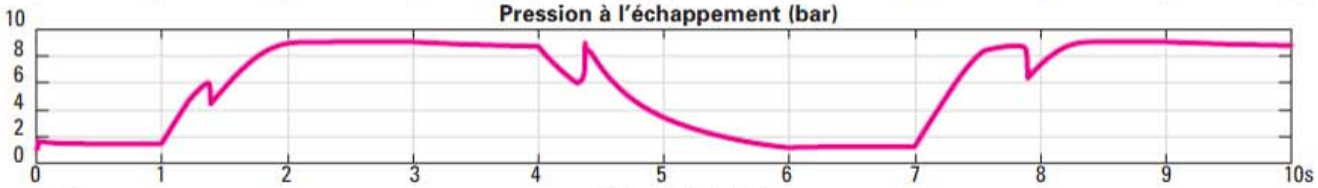
Visualisation exploitations des mesures :
On centralise les informations dans un sous-circuit sur lequel on place une photo d'oscilloscope. L'oscilloscope permet une visualisation en temps réel permettant d'interagir avec les boutons poussoirs ainsi que le potentiomètre.

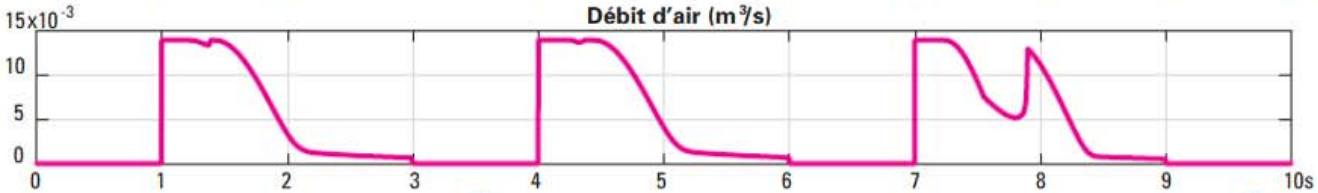








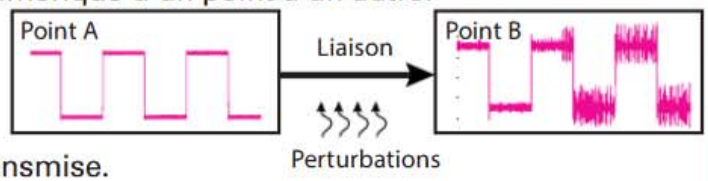




9.7. LES LIAISONS NUMÉRIQUES

Introduction

Problématique : transmettre une information numérique d'un point à un autre.



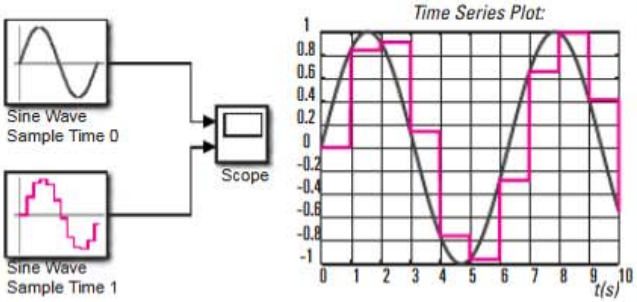
La réponse dépend :

- De la distance.
- De la complexité de l'information.
- De la vitesse à laquelle l'information est transmise.
- De la nature de l'information.
- Du niveau de fiabilité voulu.

9.7.1. SIGNAL CONTINU OU DISCRET

Continu : se dit d'une grandeur pouvant prendre toutes les valeurs réelles d'un intervalle déterminé.

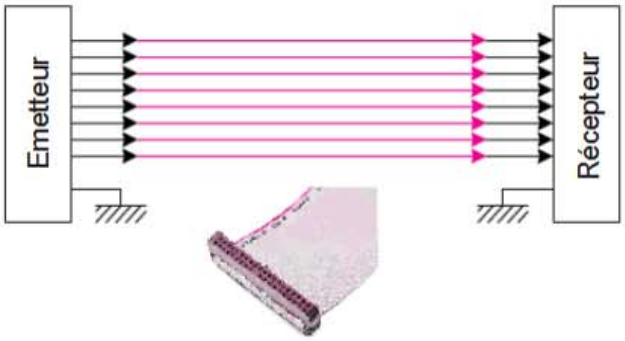
Discret : se dit d'une grandeur, d'une quantité ne pouvant prendre qu'un ensemble fini ou dénombrable de valeurs. Un système traitant une information qui est prélevée à des instants précis, est appelé **séquentiel ou échantillonné ou discret**.
Exemple : le récepteur lit la valeur de la donnée au moment où la donnée est prête ou périodiquement.



9.7.2. LIAISON PARALLÈLE

Pour transmettre un mot numérique (un octet pour faire simple) on peut réaliser une liaison avec 1 conducteur par bit, une référence de tension (masse), une validation des données soit 8+1+1 =10 conducteurs.

Ce type de liaison est appelé **liaison parallèle**.
Ce type de liaison est de moins en moins utilisé, car elle nécessite un câblage important.



L'interface parallèle

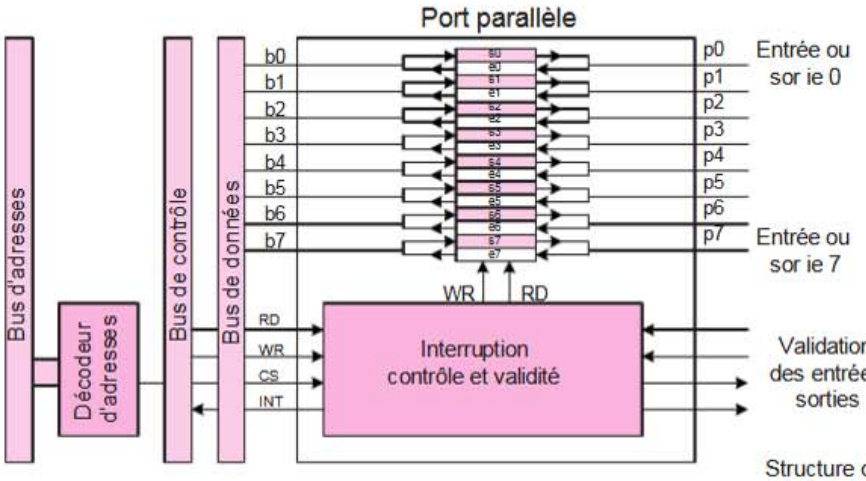
L'interface parallèle permet de transmettre ou recevoir un mot (souvent de 8 bits) en une opération d'entrée-sortie. Une interface parallèle requiert des bascules et des portes à 3 états.

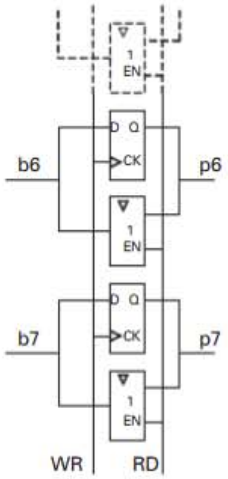
En entrée : il est constitué de portes OUI à 3 états (états haut, bas, en l'air (haute impédence)) qui prélèvent les signaux venant d'un périphérique et les transmet sur le bus de données quand le microprocesseur demande cette information par la ligne lecture RD (Read).

En sortie : il est constitué de bascules qui maintiennent stables les données issues du système jusqu'à ce qu'elle soient sorties. Le système mémorise l'information par la commande «écriture» WR (Write). Les bascules maintiennent cette sortie jusqu'à une nouvelle opération de sortie.

Il faut un registre d'état indiquant s'il y a des données à lire ou si les données à sortir ont été prises. De tels ports peuvent être construits à partir de composants discrets (74HCT244, 74HCT374), mais il existe des circuits spécialisés offrant des fonctions supplémentaires : plusieurs ports, gestion des interruptions, configuration pour une même ligne en entrée ou en sortie, etc.

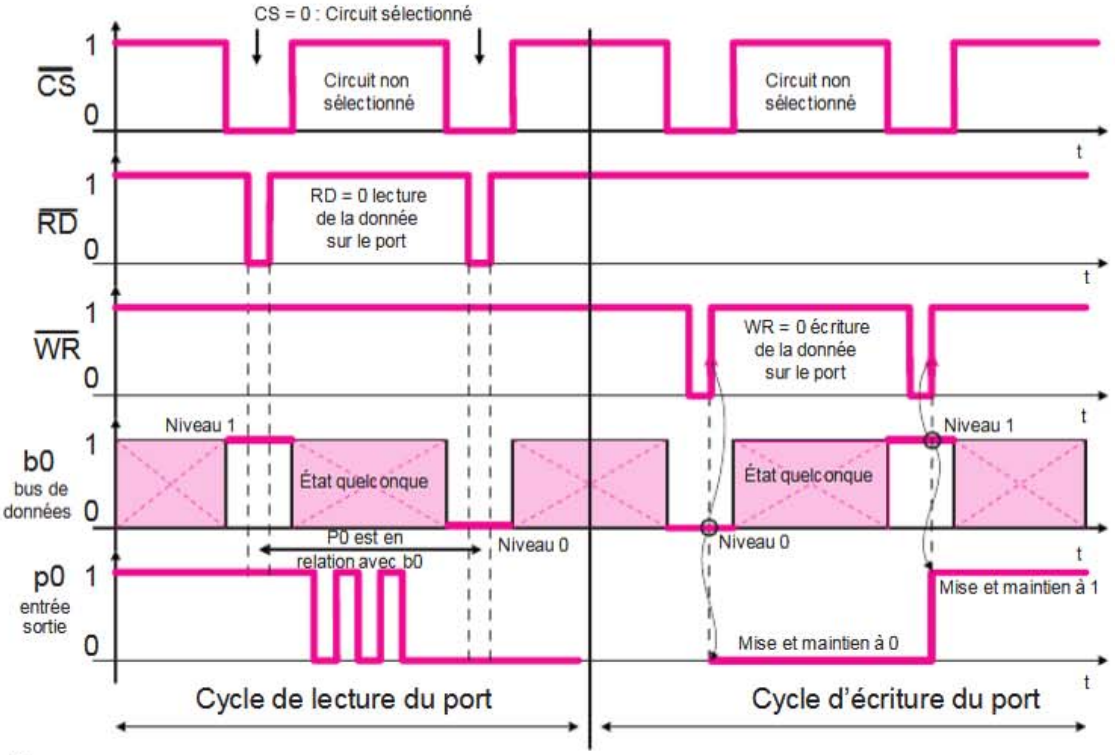
• Structure d'un port parallèle





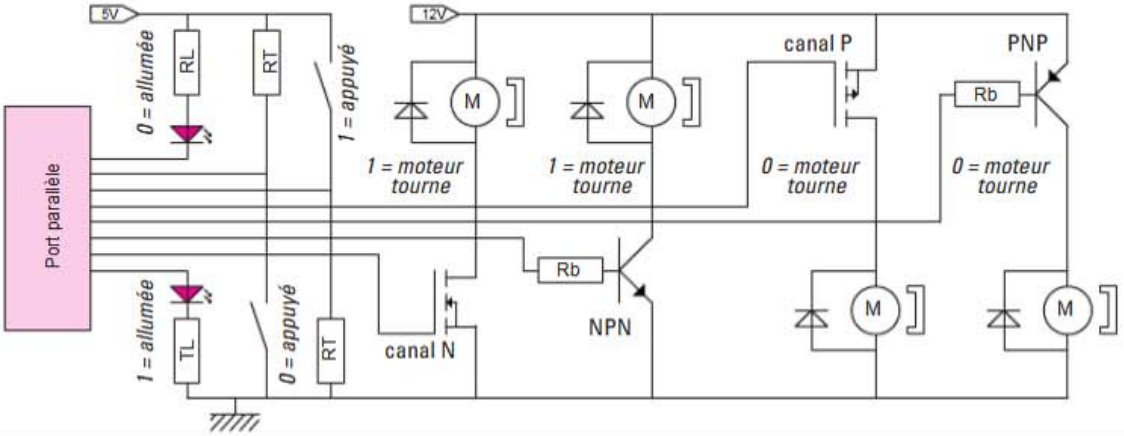
Structure du port :
– porte OUI 3 états
– bascule D.

• Chronogrammes de lecture-écriture sur un port parallèle



• Applications

La majorité des applications actuelles des ports parallèles sont la commande d'éléments comme des DEL, des pré-actionneurs, ou la lecture des états logiques issus de capteurs.



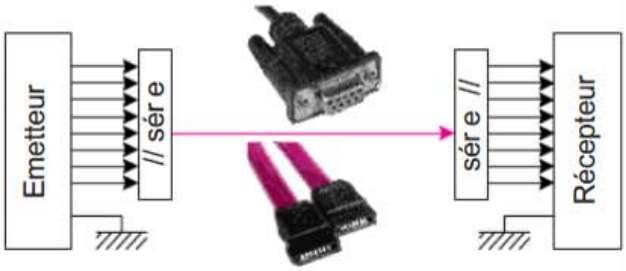
9.7.3. LIAISON SÉRIE

Pour permettre de parcourir une certaine distance avec un minimum de conducteurs a été développée la **liaison série**. L'idée est de transmettre sur le même conducteur les « bits de données » les uns après les autres. On parle de liaison série.
C'est l'un des plus anciens modes de transmission de données numériques. Il fut utilisé dans les premiers systèmes télégraphiques (**Emile Baudot** dans les années 1870).

Principe :

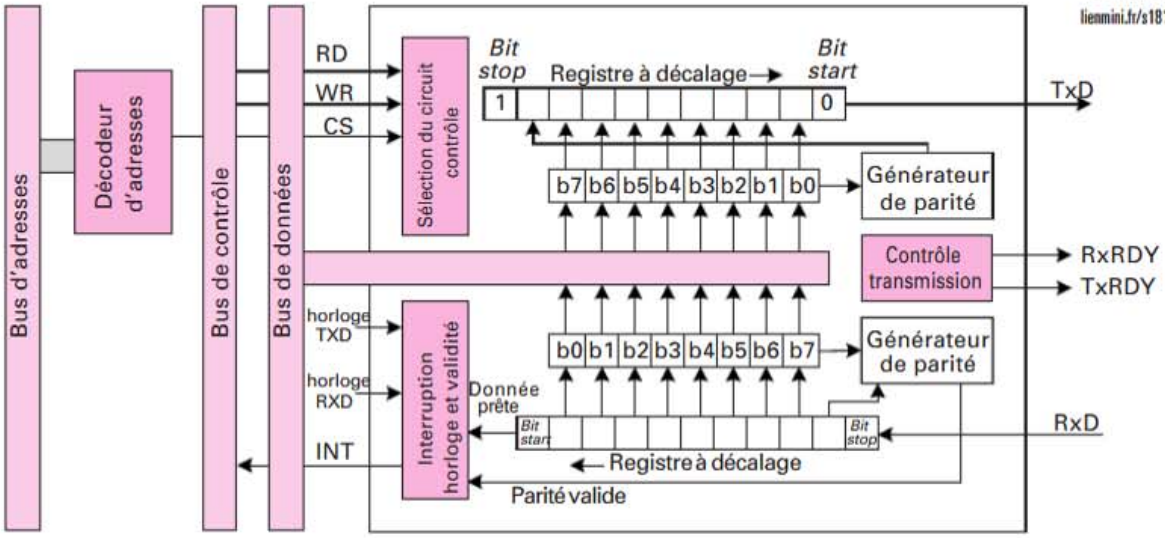
Les « n » bits de la donnée à transmettre entre le système et le périphérique **sont envoyés les uns après les autres (en série)**. Le câble de transmission nécessite un nombre réduit de conducteurs :

- **TxD** transmission de données ;
- **RxD** réception de données ;
- la référence électrique (masse) ;
- eventuellement des lignes de contrôle de flux.

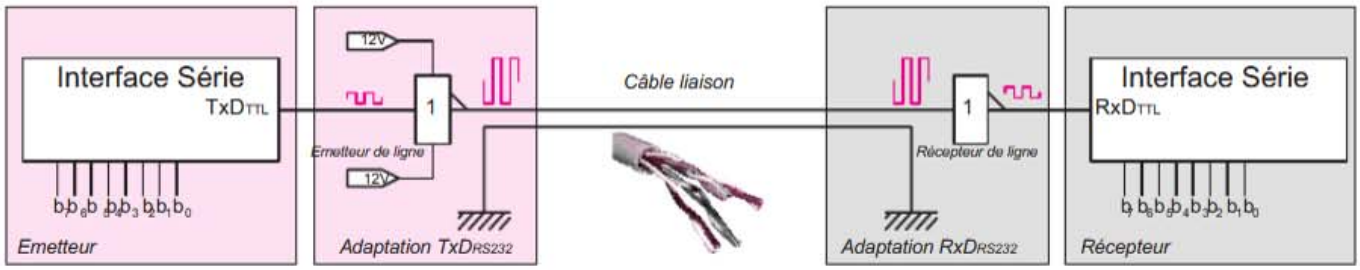


lienmini.fr/s181-liaisonserie

• Structure d'une interface série

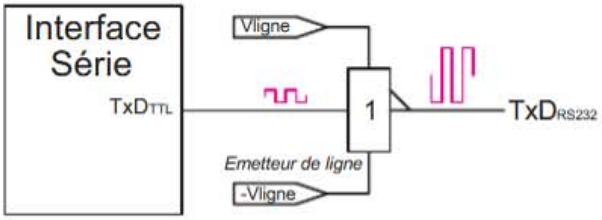


• Structure d'une transmission série du type RS232



Les niveaux de tension RS232 sont obtenus après le passage dans un amplificateur inverseur.

TxDTTL : « 0 » = 0 V, « 1 »= +5 V
TxDRS232 : « 0 » = +12 V, « 1 »= -12 V



Pour gérer cette transmission, il est nécessaire d'ajouter **un protocole**.

Définition :
Un protocole de communication est un ensemble de règles et de contraintes permettant d'établir une communication entre deux entités.
Exemple de protocole de communication : MODBUS, SATA, busCAN, USB, RS232, etc.

9.7.4. LE PROTOCOLE DE COMMUNICATION SÉRIE RS232

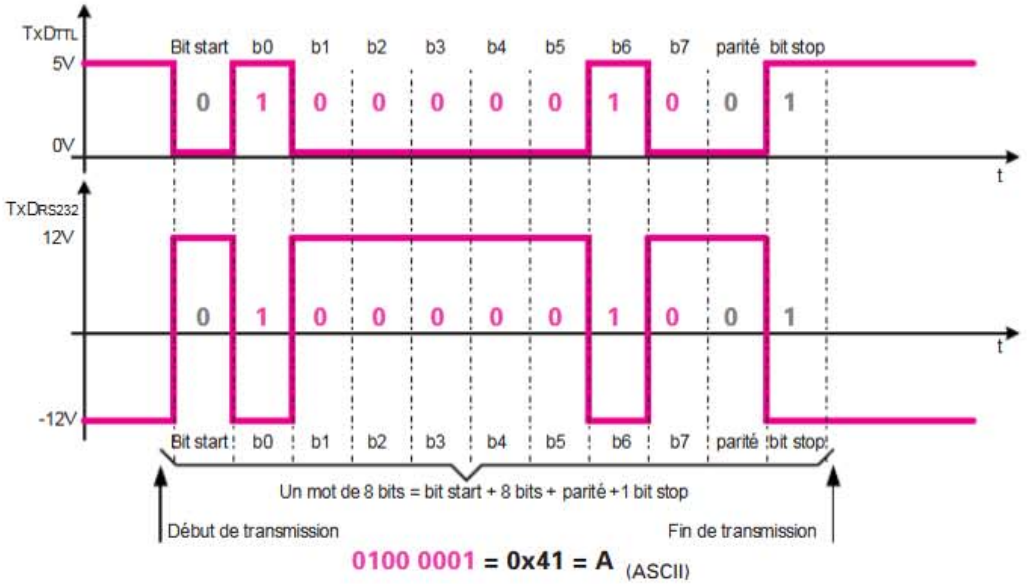
Ce protocole indique :
- La vitesse de transmission, en Bauds (bits par seconde) de 75 à 115 200 Bd.
- Le début de transmission commence par un « bit start » (toujours à « 0 »).
- Le nombre de bits transmis est de 7 ou 8 bits.
- Un bit de parité optionnel.
- La fin de la transmission 1 ou 2 bits « bit Stop » (toujours à « 1 »).
- L'ordre de transmission des bits de b0 à b7.
- Le niveau de tension haut -3 V à -25 V, le niveau de tension bas +3 V à +25 V.
- Limites : distance, débit.

Débit ($bits.s^{-1}$)	Longueur (m)
2400	1000
9600	150
19200	15
57600	8

Le nombre de bits envoyés pendant un temps d'une seconde définit la vitesse de liaison en **bauds** (1 baud = 1 bit par seconde, bit de données et de contrôle).

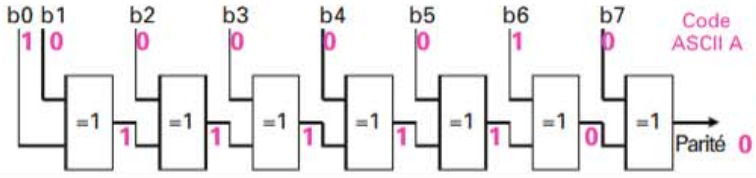
Exemple : vitesse de 9 600 bauds
durée d'un bit : 1/9 600 = 104 µs.
durée d'un mot 11 x 104 µs = 1,14 ms (un mot = bit start + bits données + parité + bit stop).
vitesse donnée utile : 872 transmissions par seconde soit 6982 $bits_{(utiles)}$ par seconde.

Chronogrammes d'une liaison série RS232 8 bits 1 bit stop



0100 0001 = 0x41 = A (ASCII)

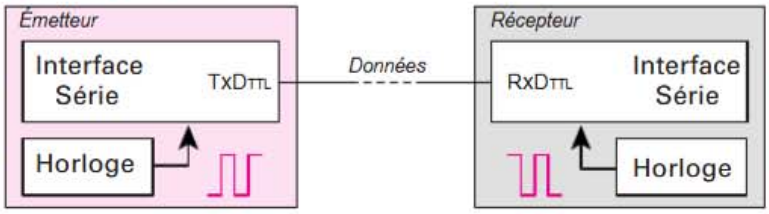
Structure du générateur de parité



La parité permet de vérifier la validité de la transmission. Un bit de parité est inséré à l'émission. Le bit de parité est lu à la réception et comparé au nombre de bits de données à un. Si la parité n'est pas cohérente par rapport à celle qui est inscrite dans le mot, on considère qu'il y a eu une erreur de transmission.

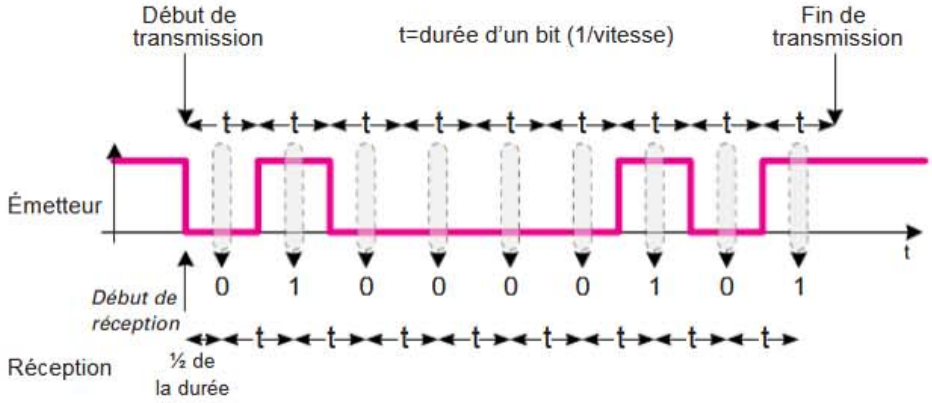
9.7.5. TRANSMISSION SÉRIE ASYNCHRONE, SYNCHRONE

Transmission série asynchrone



L'émetteur et le récepteur ont des horloges de fréquences très proches.
La transmission se fait en général par une séquence de 8 bits, octet par octet.
Le bit de start indique au récepteur, par un premier front descendant du signal en ligne, le début d'une séquence.

Le récepteur synchronise la réception à partir de ce front et utilise son horloge locale pour récupérer les bits suivants. Sur une séquence de 8 bits, les différences entre l'horloge de l'émetteur et celle du récepteur resteront négligeables.
On parle de transmission asynchrone, car les deux horloges ne sont pas parfaitement identiques.

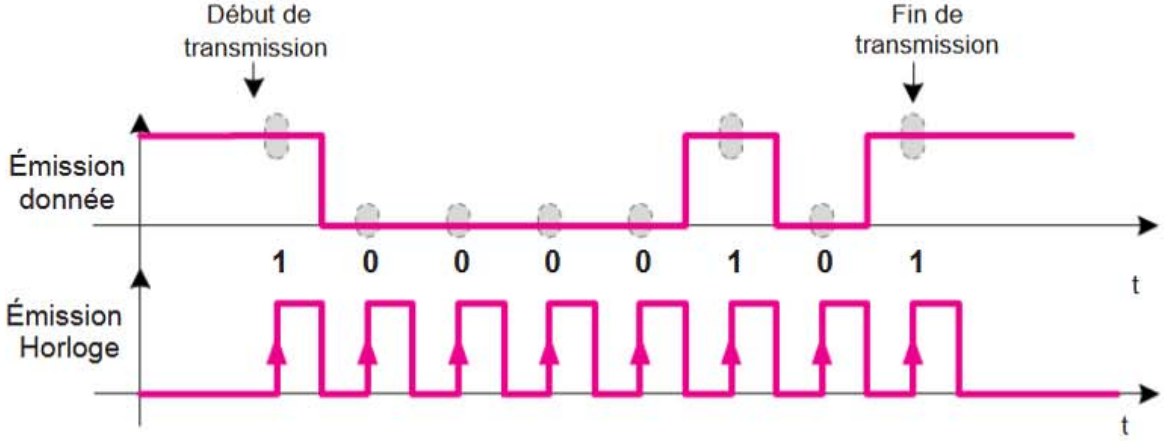


Transmission série synchrone

La transmission synchrone permet de transmettre un bloc de bits d'information, appelé trame, sous la forme d'un flot continu de bits sans bits de synchronisation «bit start» et «bit stop».

Les données sont synchronisées par une horloge. La synchronisation des horloges est obtenue soit en générant un signal sur une ligne séparée, soit en utilisant les signaux de données comme référence d'horloge. La dernière méthode est la plus utilisée, car elle permet d'utiliser moins de fils.

Ce type de transmission implique d'ajouter des éléments de synchronisation pour déterminer le début et la fin d'une trame. Un préambule, et un postambule doivent être générés au début et à la fin d'une trame.



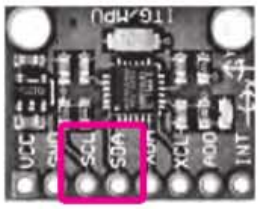
9.7.6. LIAISON I²C

I²C (signifie : **I**nter-**I**ntegrated **C**ircuit, en anglais) est un bus informatique conçu par Philips pour les applications de domotique et d'électronique domestique. Il permet de relier facilement un microprocesseur et différents circuits, notamment ceux d'une télévision : récepteur de la télécommande, réglages des amplificateurs basses fréquences, tuner, horloge, gestion des prises HDMI, etc.

Il existe d'innombrables périphériques exploitant ce bus, il est même implémentable par logiciel dans n'importe quel microcontrôleur.

Les capteurs préinstallés sur de petits circuits imprimés sont facilement reconnaissables par le nom des broches : **SCL, SDA.**

Capteur de luminosité TSL2561



Accéléromètre gyroscope MPU6050

Capteur barométrique BMP180

Topologie I²C est un **bus série synchrone bidirectionnel half-duplex**.

Plusieurs équipements, soit maîtres, soit esclaves, peuvent être connectés au bus.
Les échanges ont toujours lieu entre un seul maître et un (ou tous les) esclave(s), toujours à l'initiative du maître (jamais de maître à maître ou d'esclave à esclave).

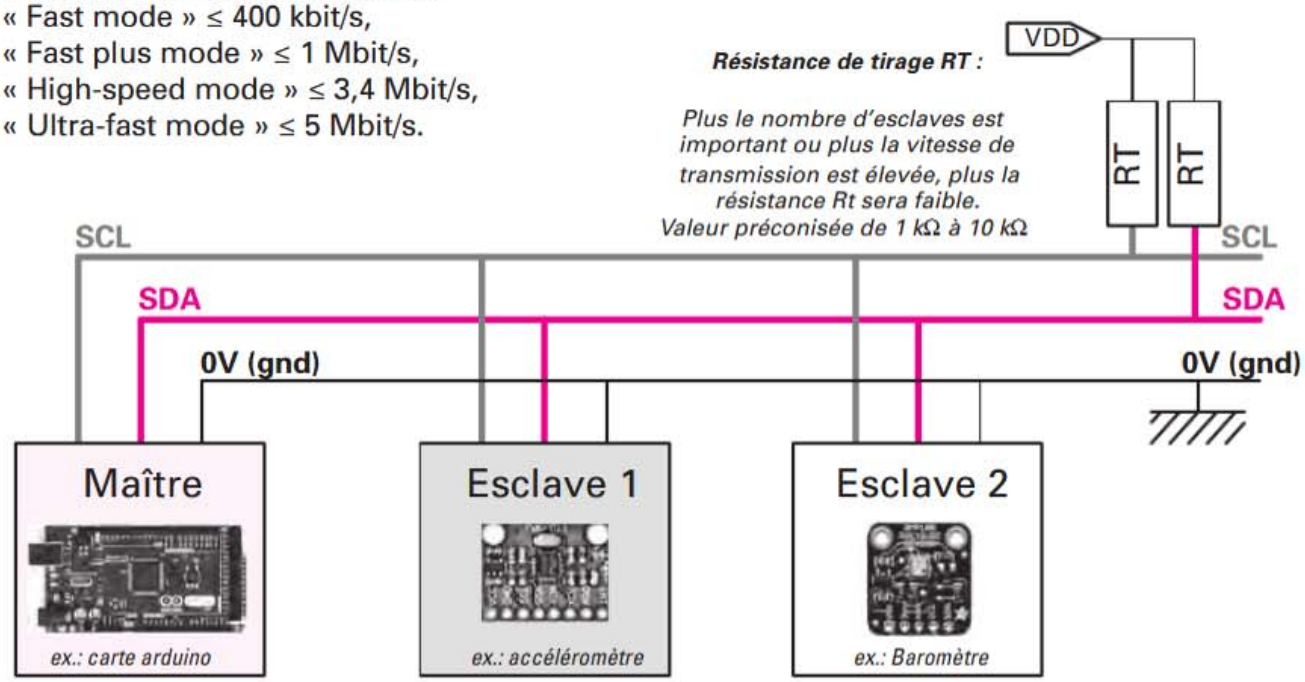
La connexion est réalisée par l'intermédiaire de deux lignes :
- **SDA** (**S**erial **D**ata **L**ine) : ligne de données bidirectionnelle,
- **SCL** (**S**erial **C**lock **L**ine) : ligne d'horloge de synchronisation bidirectionnelle.
- La masse qui doit être commune aux équipements.
- Les 2 lignes sont tirées au niveau de tension VDD à travers des résistances de tirages (RT).

Le nombre maximal d'équipements est limité par le nombre d'adresses disponibles :
7 bits pour l'adresse et un bit pour définir si on écrit ou on lit, soit 128 périphériques.

Il existe cinq vitesses de transmission standard :
- « Standard mode » ≤ 100 kbit/s,
- « Fast mode » ≤ 400 kbit/s,
- « Fast plus mode » ≤ 1 Mbit/s,
- « High-speed mode » ≤ 3,4 Mbit/s,
- « Ultra-fast mode » ≤ 5 Mbit/s.

Résistance de tirage RT :

Plus le nombre d'esclaves est important ou plus la vitesse de transmission est élevée, plus la résistance Rt sera faible.
Valeur préconisée de 1 kΩ à 10 kΩ



Échange maître esclave

Le message peut être décomposé en deux parties :

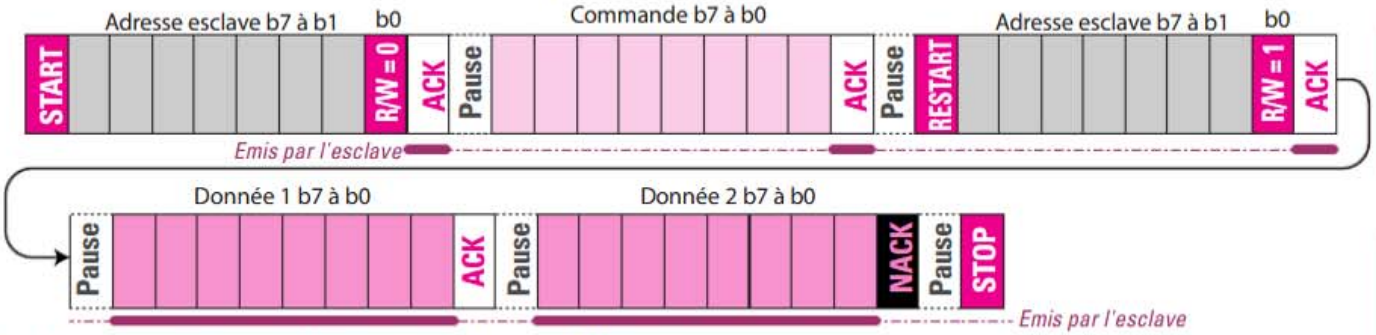
Le maître est l'émetteur, l'esclave est le récepteur :

- Émission d'une condition de **START** par le maître.
- Émission de l'octet d'adresse par le maître pour désigner un esclave, avec le **bit R/W à 0**.
- Réponse de l'esclave par un bit d'acquittement **ACK** (ou de non-acquittement **NACK**).
- Émission d'un octet de commande par le maître pour l'esclave.
- Réponse de l'esclave par un bit d'acquittement **ACK** (ou de non-acquittement **NACK**).
- Émission d'une condition de **RESTART** par le maître.
- Émission de l'octet d'adresse par le maître pour désigner le même esclave, avec le bit **R/W à 1**.

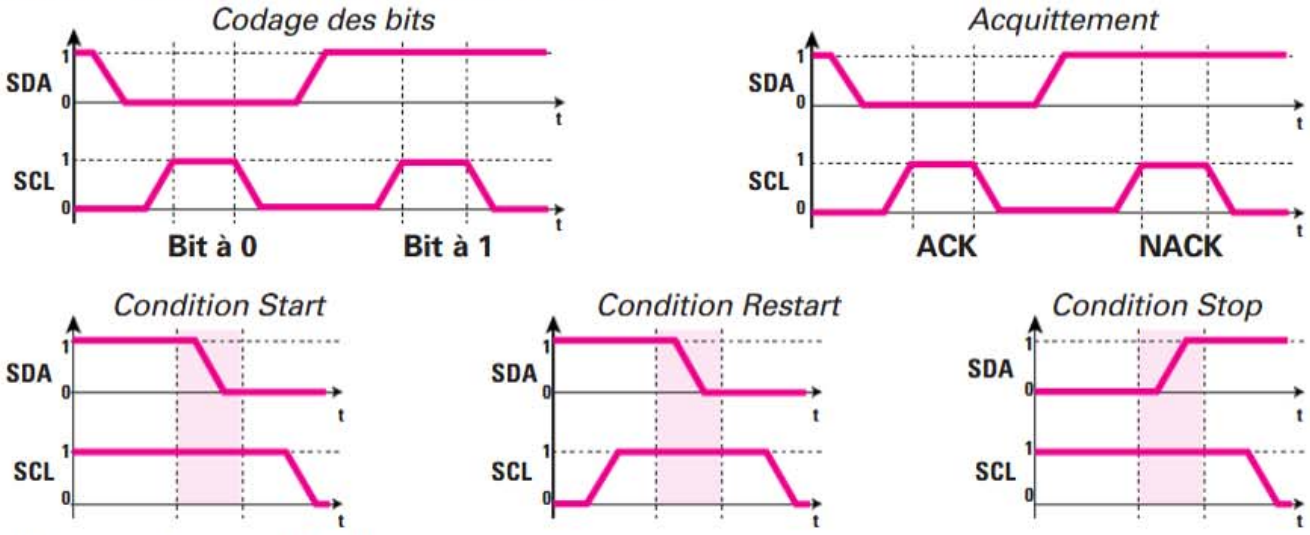
Le maître devient récepteur, l'esclave devient émetteur :

- Émission d'un octet de données par l'esclave pour le maître.
- Réponse du maître par un bit d'acquittement **ACK** (ou de non-acquittement **NACK**).
- Émission d'autres octets de données par l'esclave avec acquittement du maître.
- Pour le dernier octet de données attendu par le maître, il répond par un **NACK** pour mettre fin au dialogue.
- Émission d'une condition de **STOP** par le maître.

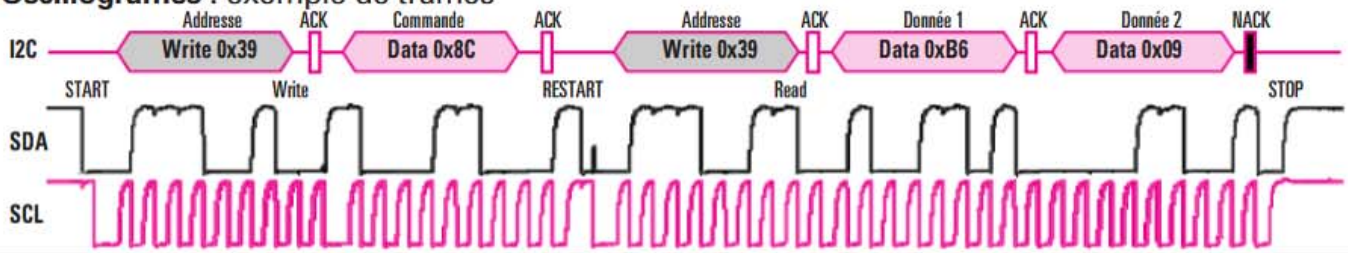
Structure d'une communication : exemple de la récupération de deux octets dans l'esclave.



Codage des niveaux logiques et des conditions.



Oscillogrames : exemple de trames



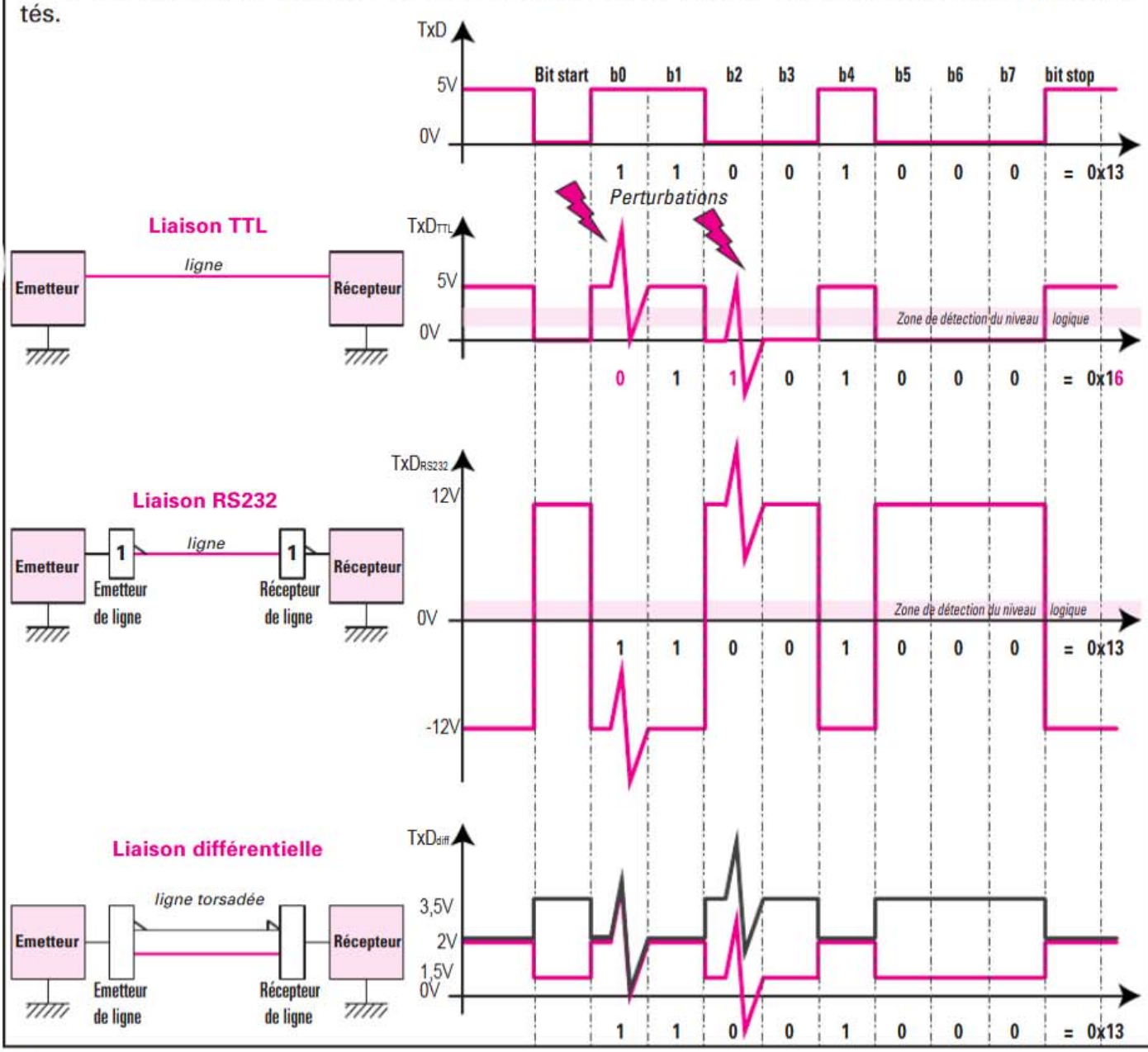
9.7.7. MODE DE TRANSMISSION, IMMUNITÉ AUX PERTURBATIONS.

Unipolaire, bipolaire, différentiel :
En fonction des contraintes, distance, immunité aux parasites, il convient d'adapter la ligne de transmission.

Liaison unipolaire, exemple **liaison TTL** : souvent utilisée pour les prototypes, elle simplifie l'interfaçage en faisant l'économie de drivers de lignes. Les signaux sont du type logique ; la sensibilité aux parasites interdit l'utilisation sur de longues distances. Une perturbation peut facilement modifier le message transmis.

Liaison bipolaire, exemple **liaison RS232** : pour garder une grande marge par rapport à d'éventuelles perturbations, on augmente les niveaux de tensions et on les rend bipolaires. Dans l'exemple, il faudrait une perturbation d'environ 12 V pour modifier le contenu du message transmis.

Liaison différentielle : plutôt qu'augmenter les niveaux de tension, on préfère transmettre l'information sous forme différentielle. Le «0» logique correspond à une différence de 3 V, le «1» logique correspond à une différence quasi nulle. Si une perturbation touche la ligne de transmission, elle modifiera le potentiel sur les deux lignes et les niveaux différentiels ne seront pas affectés.



9.7.8. LE BUS CAN

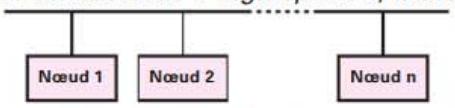
Présentation générale

Le bus CAN (*Controller Area Network*) est un bus système série ; il a été normalisé avec la norme ISO 11898.
Le principe consiste à raccorder à un même câble (un bus) un grand nombre de calculateurs et capteurs qui communiqueront à tour de rôle. Cette technique élimine le besoin de câbler des lignes dédiées pour chaque information à faire transiter (connexion point-à-point). Dès qu'un système (voiture, avion, réseau téléphonique...) atteint un certain niveau de complexité, l'approche point-à-point devient compliquée du fait de l'importance du câblage.

Topologie

CAN est un bus de données **série bidirectionnel half-duplex.**
Chaque équipement connecté, appelé « nœud », peut communiquer avec tous les autres.

Pour un bus CAN « *low-speed* », le nombre de nœuds est limité à 20. Pour un bus CAN « *high-speed* », il est limité à 30.

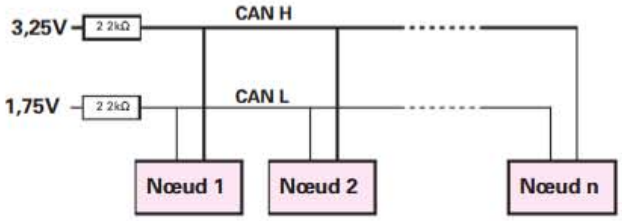


Support

Chaque nœud est connecté au bus par l'intermédiaire d'une paire torsadée.

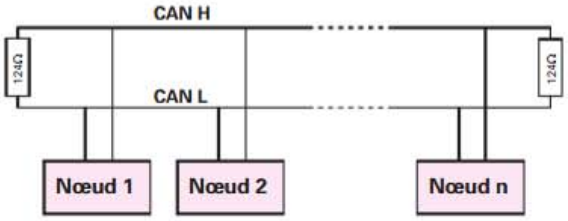
ISO 11519-2 : Low Speed CAN Fault Tolerant

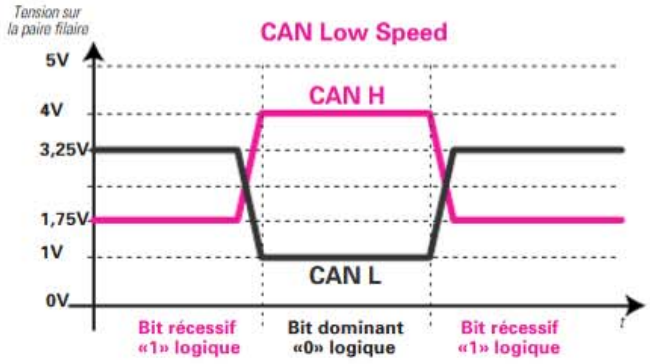
< 125 kbps

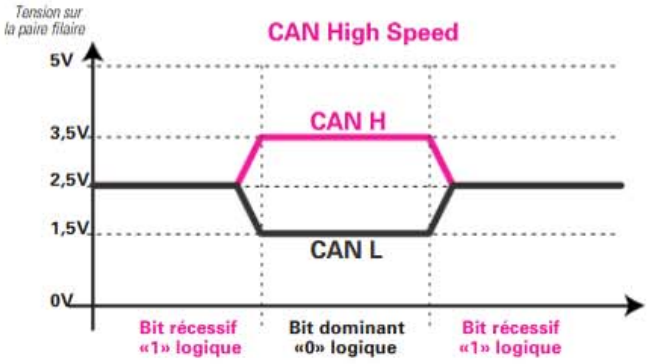


ISO 11898 : High Speed CAN

125 kbps - 1 Mbps







L'accès au bus CAN suit la technique CSMA/CR (écoute de chaque station avant de parler mais pas de tour de parole, résolution des collisions par priorité).

La longueur maximale du bus est déterminée par la vitesse utilisée :

Vitesse (kbit.s^{-1})	Longueur (m)	Durée d'un bit
1000	30	1 µs
800	50	1,25 µs
500	100	2 µs
250	250	4 µs
125	500	8 µs
62,5	1000	16 µs
20	2500	50 µs
10	5000	100 µs

Encodage des bits

L'encodage utilisé est de type NRZ (non retour à 0) :

Niveaux électriques

Les nœuds sont câblés sur le bus par le principe du « ET câblé » du point de vue logique, ce qui veut dire qu'en cas d'émission simultanée de deux nœuds, la valeur 0 écrase la valeur 1.
On dit donc que :

l'état logique « 0 » est l'état « dominant »
l'état logique « 1 » est l'état « récessif ».

Le bus CAN (suite)

Modèle OSI

Les couches 7, 6, 5 : Application, Présentation, Session dépendent de l'utilisation et de l'environnement dans lequel le bus CAN est implanté.

Les couches 5, 4, 3 : Transport, Réseau sont gérées par le protocole CAN Open.

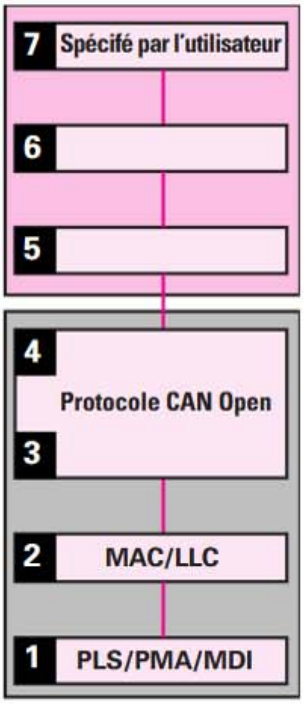
La couche 2 : Liaison

LLC (*Logic Link Control*) Filtrage d'acceptance ; Notification de overload ; Recovery Management.
MAC (*Medium Access Control*) Encapsulation/Décapsulation des données ; Codage de trame (*Stuffing/Destuffing*) ; Medium Access Management ; Détection d'erreur, signalisation d'erreur, acquittement, sérialisation/désérialiation.

La couche 1 : Physique

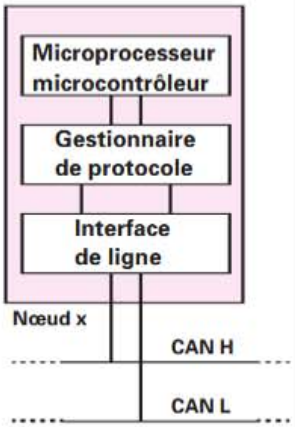
PLS (*Physical Signalling*) Codage/décodage bit ; Bit timing Synchronisation.
PMA (*Physical Medium Attach.*) Caractéristiques Driver/Receiver.
MDI (*Medium Dependent Interf.*) Connecteurs.

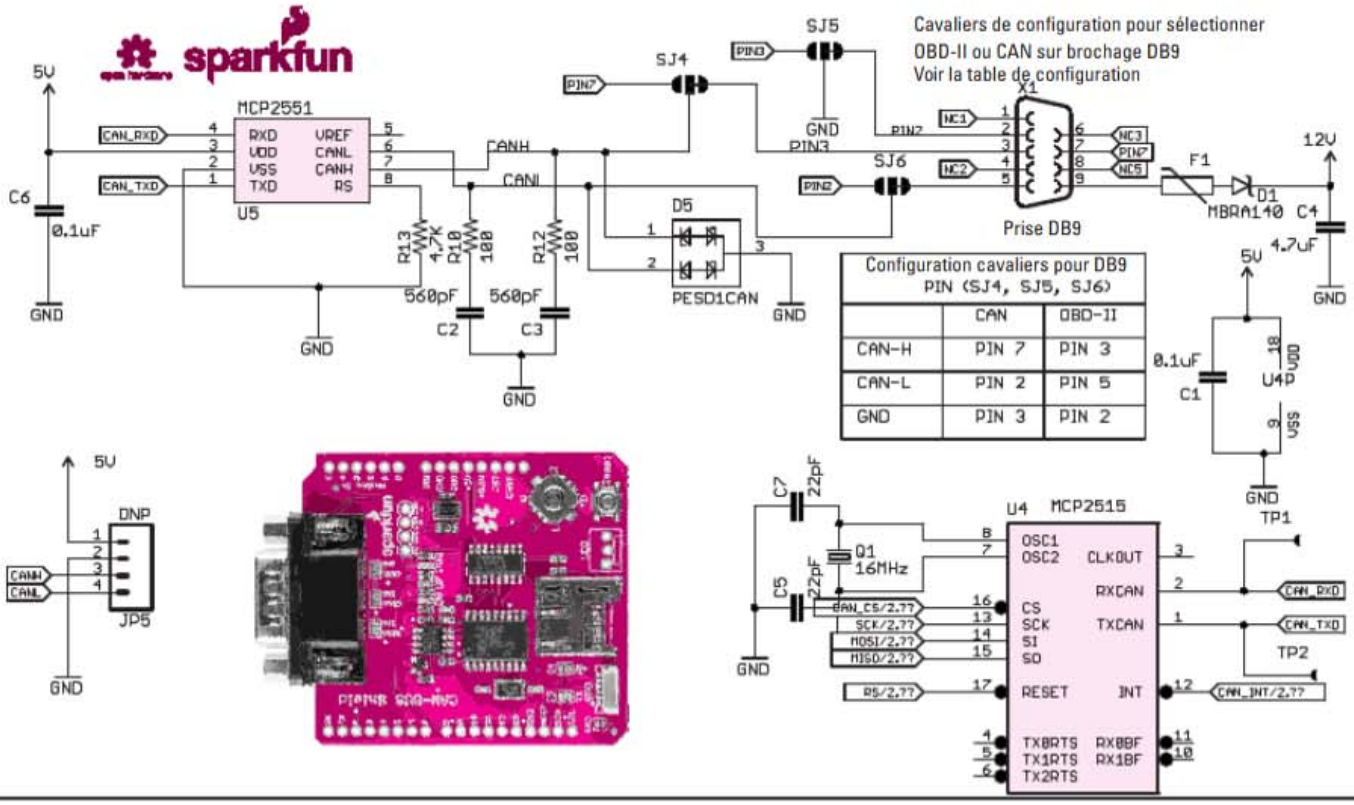
Les sous-couches LLC, MAC et PLS sont traitées par les circuits contrôleurs de bus CAN (microcontrôleur, circuits spécialisés).



Constitution d'un noeud : exemple d'une carte Arduino et CAN-BUS Shield de Sparkfun

- Un microprocesseur ou microcontrôleur : carte Arduino.
- Un gestionnaire de protocole (certains microcontrôleurs ont un gestionnaire CAN intégré) le circuit MCP2515 de Microchip.
- Une interface de ligne le circuit MCP2551 de Microchip.





Le bus CAN (suite)

l'état logique « 0 » est l'état « dominant »
l'état logique « 1 » est l'état « récessif ».

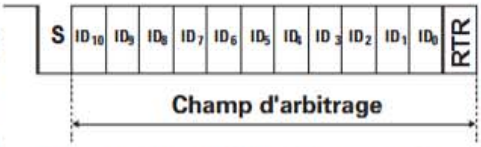
Constitution d'une trame en format standard

Une trame se répartit en 7 éléments :

Au repos la ligne est dans un état récessif (niveau logique 1).

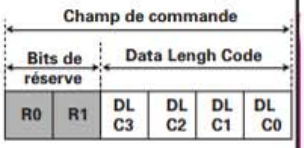
• **Le début de trame SOF** (***S**tart **O**f **F**rame*), 1 bit dominant (niveau logique 0).
Le bit **SOF** (début de trame de données) signale à toutes les stations le début d'un échange. Cet échange ne peut démarrer que si le bus était précédemment au repos.

• **Le champ d'arbitrage** (12 bits) (*arbitration field*) :
Composée de 12 bits (zone d'identification de la trame (11 bits + RTR)) :
La longueur de l'identificateur est de 11 bits, les bits sont transmis dans l'ordre de ID_10 à ID_0 (le moins significatif est ID_0). Par ailleurs, les 7 bits les plus significatifs (de ID_10 à ID_4) ne doivent pas être tous récessifs. ID = 1111111XXXX (X valeur indéterminée), c'est-à-dire un nombre maximal d'identificateurs de : $(2^{11} - 2^4) = 2048 - 16 = 2032$ combinaisons.

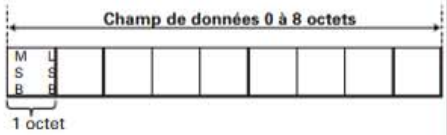


Le bit **RTR** (***R**emote **T**ransmission **R**equest*) : détermine s'il s'agit d'une trame de données ou d'une trame de requête.
Le bit à 0 (dominant) pour une trame de données et le bit à 1 (récessif) pour une trame de requête.

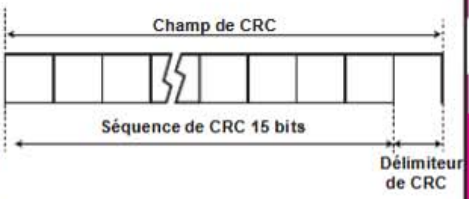
• **Le champ de commande** (6 bits) (*control field*) :
les 2 premiers serviront pour une éventuelle évolution du protocole (bits de réserve)
Les 4 derniers permettent de coder le nombre d'octets du champ de données :
0000 pour 0 octet à 1000 pour 8 octets.



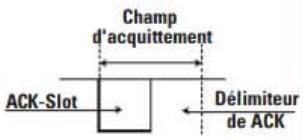
• **Le champ de données** de 0 à 8 octets (0 à 64 bits) (*data field*) :



• **Le champ de CRC** (16 bits) (**C***yclic* **R***edundancy* **C***ode*) :
Il est composé de la séquence de CRC sur 15 bits suivis du CRC Delimiter (1 bit récessif).
La séquence de CRC permet de vérifier l'intégrité des données transmises. Les bits utilisés dans le calcul du CRC sont ceux du SOF, du champ d'Arbitration, du champ de Control et du champ Data Field.
Le CRC est un polynôme calculé de la même manière par l'émetteur et par le récepteur de la trame : le message est vu par l'algorithme comme un polynôme qui est divisé par $X^{15}+X^{14}+X^{10}+X^8+X^7+X^4+X^3+1$ et le reste de cette division est la séquence CRC transmise avec le message.



• **Le champ d'acquittement** (**ACK***nowledgement field*) :
Il est composé de 2 bits, l'ACK Slot et le ACK Delimiter (1 bit récessif).
Un nœud en train de transmettre envoie un bit récessif pour le ACK Slot.
Un nœud ayant reçu correctement un message en informe le transmetteur en envoyant un bit dominant pendant le ACK Slot : il acquitte le message.



• **Zone de fin de trame EOF** (**E***nd* **O***f* **F***rame*), 7 bits récessifs (à l'état 1).
Remarque : 3 bits à l'état 1 séparent obligatoirement 2 trames consécutives.

9.8. LES RÉSEAUX

• Introduction

Les réseaux informatiques qui permettaient à leur origine de relier des terminaux passifs à de gros ordinateurs centraux autorisent à l'heure actuelle l'interconnexion de tous types d'ordinateurs que ce soient de gros serveurs, des stations de travail, des ordinateurs personnels ou de simples terminaux graphiques. Les services qu'ils offrent font partie de la vie courante des entreprises et administrations (banques, gestion, commerce, bases de données, recherche, etc.) et des particuliers (messagerie, loisirs, services d'informations par **Internet**...).

9.8.1. CLASSIFICATION DES RÉSEAUX INFORMATIQUES SELON LEUR TAILLE

• BUS

Les bus que l'on trouve dans un ordinateur pour relier ses différents composants peuvent être considérés comme des réseaux dédiés à des tâches très spécifiques (< 1 m).

• LAN

Un réseau local **LAN** (*Local Area Network*) peut s'étendre de quelques mètres à quelques kilomètres et correspond au réseau d'une entreprise. Il peut se développer sur plusieurs bâtiments et permet de satisfaire tous les besoins internes de cette entreprise.

• MAN

Un réseau métropolitain **MAN** (*Metropolitan Area Network*) interconnecte plusieurs lieux situés dans une même ville, par exemple les différents sites d'une université ou d'une administration, chacun possédant son propre réseau local.

• WAN

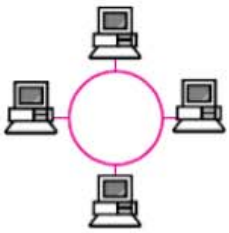
Un réseau étendu **WAN** (*Wide Area Network*) permet de communiquer à l'échelle d'un pays, ou de la planète entière, les infrastructures physiques pouvant être terrestres ou spatiales à l'aide de satellites de télécommunications.

9.8.2. TOPOLOGIE DES RÉSEAUX INFORMATIQUES

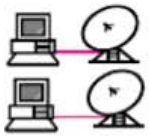
• Réseau en diffusion

En bus

En anneau

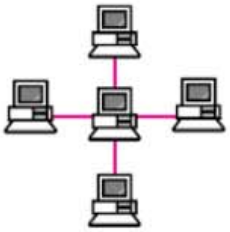


Satellite

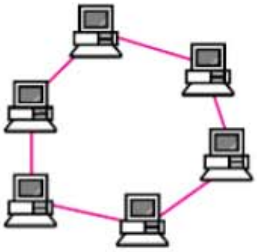


• Réseau en mode point à point

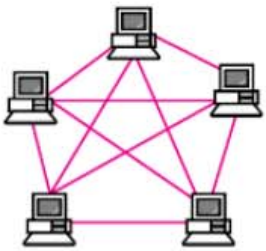
En étoile



Simple ou double boucle



Maillage régulier ou irrégulier



• Mode de diffusion

Ce mode de fonctionnement consiste à partager un seul support de transmission. Chaque message envoyé par un équipement sur le réseau est reçu par tous les autres. C'est l'adresse spécifique placée dans le message qui permettra à chaque équipement de déterminer si le message lui est adressé ou non. Les réseaux locaux adoptent pour la plupart le mode diffusion sur une architecture en bus ou en anneau et les réseaux satellitaires ou radio suivent également ce mode de communication. Dans une telle configuration, la rupture du support provoque l'arrêt du réseau ; par contre la panne d'un des éléments ne provoque pas (en général) la panne globale du réseau.

• Mode point à point

Dans ce mode, le support physique (le câble) relie une paire d'équipements seulement. Quand deux éléments non directement connectés entre eux veulent communiquer, ils le font par l'intermédiaire des autres nœuds du réseau.
Dans le cas de l'**étoile**, le site central reçoit et envoie tous les messages ; le fonctionnement est simple, mais la panne du nœud central paralyse tout le réseau.
Dans une **boucle simple**, chaque nœud recevant un message de son voisin en amont le réexpédie à son voisin en aval. Si l'un des éléments du réseau tombe en panne, alors tout s'arrête.
Dans le **maillage régulier**, l'interconnexion est totale, ce qui assure une fiabilité optimale du réseau ; par contre c'est une solution coûteuse en câblage physique. Si l'on allège le plan de câblage, le maillage devient irrégulier et la fiabilité peut rester élevée.

9.8.3. LES SUPPORTS DE TRANSMISSION

La **paire torsadée** est un câble téléphonique constitué à l'origine de deux fils de cuivre isolés et enroulés l'un sur l'autre (d'où le nom). Actuellement on utilise plutôt des câbles constitués de 2 ou 4 paires torsadées. Cette technologie autorise, sur de courtes distances, des débits de l'ordre de 10 Mbit/s voire 1 Gbit/s. Chaque extrémité d'un tel câble est munie d'une prise **RJ45**.
Dans ce type de réseaux locaux, chaque poste est relié à un *hub* ou un commutateur (*switch*), par une liaison point à point, formant physiquement une étoile (dont le centre est un *hub*).

Le **câble coaxial** est constitué d'un cœur qui est un fil de cuivre. Ce cœur est dans une gaine isolante, elle-même entourée par une tresse de cuivre, le tout est recouvert d'une gaine isolante. On le rencontre dans sa version **10 Base2** (ou **Ethernet** fin 10 Mbit/s sur 200 m maximum) pour la réalisation de réseaux locaux à topologie en bus. Les connexions de chaque poste sur le bus se font à l'aide de connecteur en T et la connexion du câble sur le poste se fait à l'aide de **BNC** pour l'Ethernet. Il est actuellement beaucoup utilisé pour relier entre eux deux éléments actifs (hub, routeur...).

La **fibre optique** est un support plus récent mais son utilisation prend de l'ampleur de jour en jour car elle permet des débits de plusieurs gigabits sur de très longues distances. Elle est particulièrement adaptée à l'interconnexion de réseaux par exemple entre plusieurs bâtiments d'un même site. En plus de ses capacités de transmission, ses grands avantages sont son immunité aux interférences électromagnétiques et sa plus grande difficulté d'écoute, contrairement aux supports électriques, ce qui la rend également attrayante dans les contextes où la confidentialité est requise.

Les **liaisons sans fil** sont possibles grâce à des liaisons infrarouges ou laser sur de courtes distances et grâce aux faisceaux hertziens pour les liaisons satellitaires. Les débits sont très élevés mais les transmissions sont sensibles aux perturbations et les possibilités d'écoute sont nombreuses.

9.8.4. ADRESSAGE

Chaque ordinateur du réseau Internet dispose d'une adresse IP unique codée sur 32 bits (4 milliards d'adresses possibles). Plus précisément, chaque interface dispose d'une adresse IP particulière. En effet, un même routeur interconnectant deux réseaux différents possède une adresse IP pour chaque interface de réseau. Une adresse IP est toujours représentée dans une notation décimale pointée constituée de 4 nombres (1 par octet) compris chacun entre 0 et 255 et séparés par un point. 194.214.114.34 est l'adresse IP d'une machine du réseau de l'académie de Nancy-Metz.

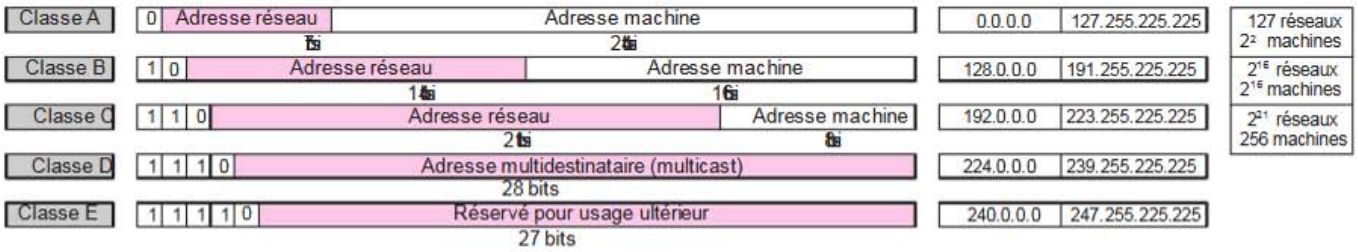
• Les cinq classes d'adresses IP

Plus précisément, une adresse IP est constituée d'une paire (id. de réseau, id. de machine) et appartient à une certaine classe (A, B, C, D ou E) selon la valeur de son premier octet, comme détaillé dans la figure ci-dessous. Elle donne l'espace d'adresses possibles pour chaque classe.

Ainsi, les adresses de classe A sont utilisées pour les très grands réseaux qui comportent plus de 2^{16} = 65 536 ordinateurs. La politique actuelle est de ne plus définir de tels réseaux.

Les adresses de classe B sont utilisées pour les réseaux ayant entre 2^8 = 256 et 2^{16} = 65 536 ordinateurs, 14 bits définissent l'adresse du réseau et 16 bits celle d'une machine sur le réseau. Seules 256 machines sont possibles sur un réseau de classe C dont le nombre possible dépasse les 2 millions (= 2^{21}).

L'obtention d'une adresse IP pour créer un nouveau réseau est gérée par l'INTERNIC de manière décentralisée, à savoir qu'un organisme national gère les demandes pour chaque pays. En France c'est l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) qui est chargé de cette tâche.



Toutes les combinaisons mathématiquement possibles pour identifier un réseau ou une machine ne sont pas permises car certaines adresses ont des significations particulières.

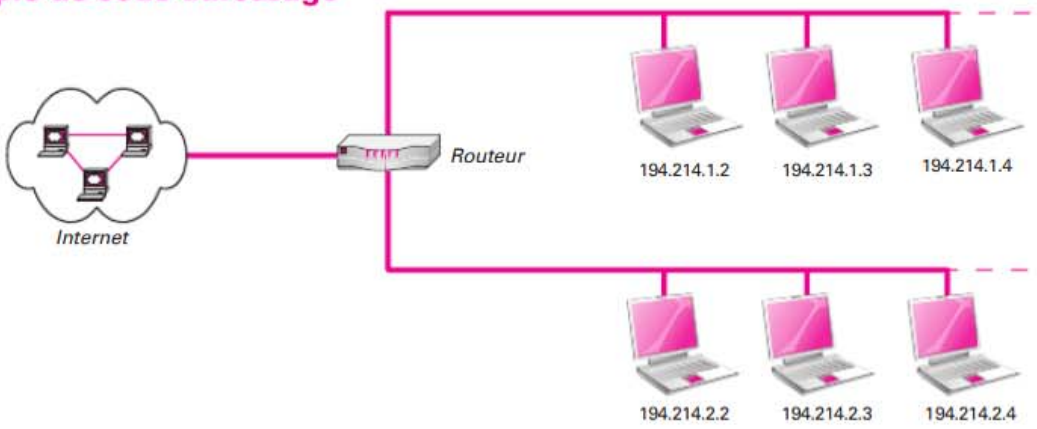
0.0.0.0 est utilisée par une machine pour connaître sa propre adresse IP.

255.255.255.255 est une adresse de diffusion locale car elle désigne toutes les machines du réseau auquel appartient l'ordinateur qui utilise cette adresse.

Les adresses de classe A de 10.0.0.0 à 10.255.255.255, de classe B de 172.16.0.0 à 172.31.255.255 et de classe C de 192.165.0.0 à 192.168.255.255 sont réservées à la constitution de réseaux privés autrement appelés intranet.

Le système des adresses IP permet également la définition d'adresses de sous-réseaux en découpant la partie réservée à l'adresse des machines sur un réseau en deux parties dont la première sera un identificateur de sous-réseau. Ainsi un seul réseau de classe B, sur lequel on pourrait nommer 65 536 machines pourra être décomposé en 254 sous-réseaux de 254 machines.

• Exemple de sous-adressage



Un site avec deux réseaux physiques utilisant le sous-adressage de manière à ce que ses deux sous-réseaux soient couverts par une seule adresse IP de classe B.

9.8.5. LE ROUTAGE

Le routage est un processus décentralisé, c'est-à-dire que chaque routeur possède des informations sur son voisinage. Chaque routeur maintient une liste des réseaux connus, chacun de ces réseaux étant associé à un ou plusieurs routeurs voisins à qui le message peut être passé. Cette liste s'appelle la table de routage, et contient trois types de routes :

- les routes correspondant à des réseaux directement connectés : pour ces réseaux, le routeur peut acheminer le paquet directement à la destination finale,
- les routes statiques, configurées en dur sur le routeur par l'administrateur du réseau,
- les routes dynamiques, apprises d'un protocole de routage dynamique dont le rôle est de diffuser les informations concernant les réseaux disponibles.

Une table de routage peut être réduite à sa plus simple expression en ne comportant que la liste des réseaux directement connectés ainsi qu'une route par défaut, c'est-à-dire que tous les paquets qui ne correspondent pas à un réseau connu dans la table de routage seront dirigés vers un routeur déterminé (le routeur par défaut). La route par défaut peut être statique ou bien apprise dynamiquement. À l'inverse, un routeur qui ne dispose pas de route par défaut doit connaître toutes les destinations possibles. C'est le cas des routeurs participant à la dorsale d'Internet, on dit alors qu'ils disposent d'une table de routage complète (ce qui représente actuellement plus de 320 000 réseaux individuels)

• Exemple de routage

De mon ordinateur personnel près de Nancy vers le site http://www.casteilla.fr/

Saut	IP	Nom	Réseau
0	192.168.1.10	mon ordinateur	réseau local
1	192.168.1.1	modem ...box	réseau local
2	79.58.105.17	DSLAM Tomblaine	Neuf Cegetel
3	86.70.238.165	165.238.70-86.rev.gaoland.net	Neuf Cegetel
4	84.103.252.237	237.252.103-84.rev.gaoland.net	Neuf Cegetel
5	84.96.186.86	86.186.96-84.rev.gaoland.net	Neuf Cegetel
6	86.66.127.118	010G.th2-1-6k.routers.ovh.net	BIB network
7	213.186.32.162	gsw-2-6k.fr.eu	OVH SAS
8	91.121.131.213	rbx-g2-a9.fr.eu	OVH SAS
9	91.121.131.29	vss-1-6k.fr.eu	OVH SAS
10	94.23.110.3	www.casteilla.fr	Cabinet SD2i

9.8.6. LE MODÈLE OSI

Le modèle **OSI** (de l'anglais **O**pen **S**ystems **I**nterconnection : Interconnexion de systèmes ouverts) d'interconnexion en réseau des systèmes ouverts est un modèle de communications entre ordinateurs proposé par l'**ISO** (Organisation internationale de normalisation). Il décrit les fonctionnalités nécessaires à la communication et l'organisation de ces fonctions.

• Architecture en couches

Le modèle comporte 7 couches .

Les 3 couches supérieures sont plutôt orientées application et plutôt réalisées par des bibliothèques ou un programme spécifique. Dans le monde IP, ces 3 couches sont rarement distinguées. Dans ce cas, toutes les fonctions de ces couches sont considérées comme partie intégrante du protocole applicatif.

Les 4 couches inférieures sont plutôt orientées communication et sont souvent fournies par un système d'exploitation.

Par ailleurs, les couches basses sont normalement transparentes pour les données à transporter, alors que les couches supérieures ne le sont pas nécessairement, notamment au niveau présentation.

Certaines fonctions comme la détection des erreurs de transmission et leur correction, le contrôle de flux peuvent être présentes dans plusieurs couches.

• Caractérisation résumée des couches

7 La couche « application » est le point d'accès aux services réseaux, elle n'a pas de service propre spécifique et entrant dans la portée de la norme.

6 La couche « présentation » est chargée du codage des données applicatives, précisément de la conversion entre données manipulées au niveau applicatif et chaînes d'octets effectivement transmises.

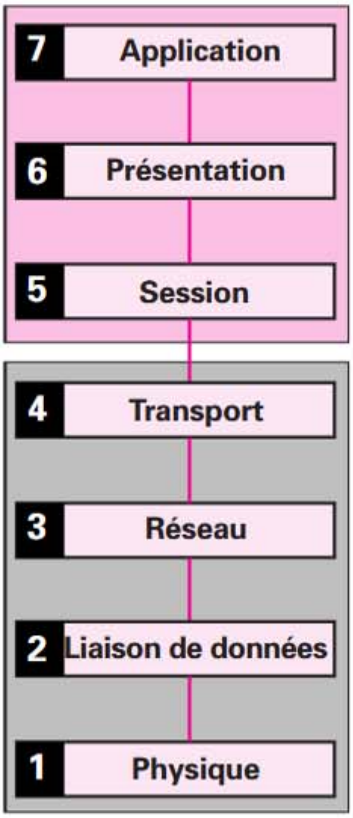
5 La couche « session » gère la synchronisation des échanges et les «transactions», permet l'ouverture et la fermeture de session.

4 La couche « transport » gère les communications de bout en bout entre processus (programmes en cours d'exécution).

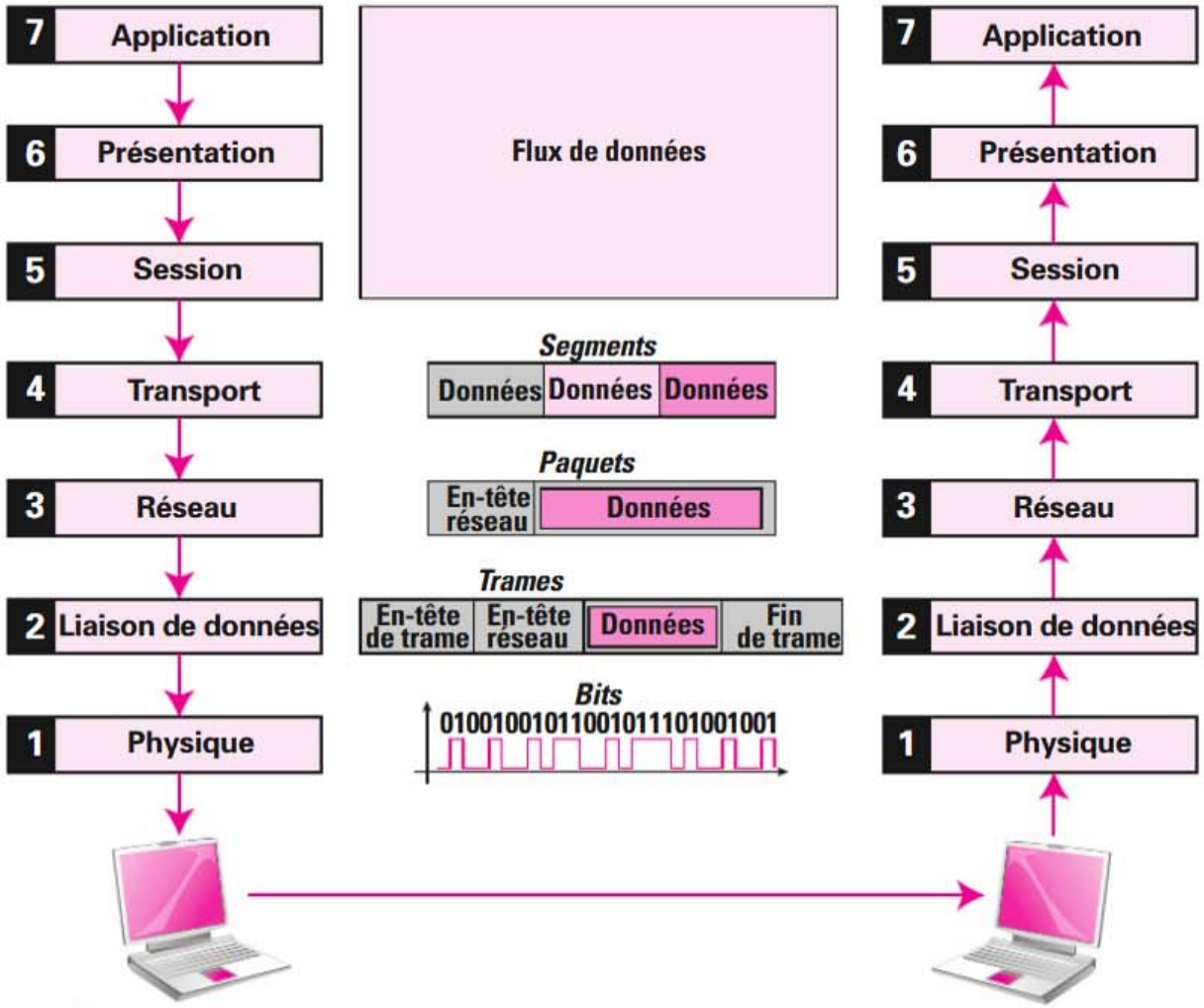
3 La couche « réseau » gère les communications de proche en proche, généralement entre machines : routage et adressage des paquets.

2 La couche « liaison de données » gère les communications entre 2 machines adjacentes, directement reliées entre elles par un support physique.

1 La couche « physique » est chargée de la transmission effective des signaux entre les interlocuteurs. Son service est limité à l'émission et la réception d'un bit ou d'un train de bit continu.



• Echange de données avec le modèle OSI



9.8.7. LE RÉSEAU ETHERNET

Ethernet est le nom donné à une des technologies les plus utilisées pour les réseaux locaux en bus. Elle a été inventée par Xerox au début des années 70 et normalisée par l'IEEE (Institute for Electrical and Electronics Engineers) vers 1980 sous la norme IEEE 802.

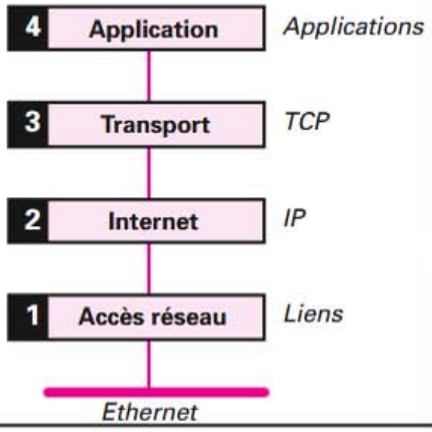
Structure d'une trame (ou paquet) Ethernet

9.8.8. LE PROTOCOLE TCP/IP (TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL/INTERNET PROTOCOL)

Le modèle **TCP/IP**, inspiré du modèle **OSI**, reprend l'approche modulaire (utilisation de modules ou couches) mais en contient uniquement quatre :

- Couche Application
- Couche Transport
- Couche Internet
- Couche Accès Réseau

C'est aussi un modèle de plus en plus utilisé.



Le protocole TCP/IP

La couche réseau ou couche IP (Internet Protocol) gère la circulation des paquets à travers le réseau en assurant leur routage.

La couche transport assure tout d'abord une communication de bout en bout en faisant abstraction des machines intermédiaires entre l'émetteur et le destinataire. Elle s'occupe de réguler le flux de données et assure un transport fiable (données transmises sans erreur et reçues dans l'ordre de leur émission) dans le cas de TCP (Transmission Control Protocol).

La couche application est celle des programmes utilisateurs comme Telnet (connexion à un ordinateur distant), FTP (File Transfer Protocol), SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), etc.

• Trame TCI/IP

• Nommage

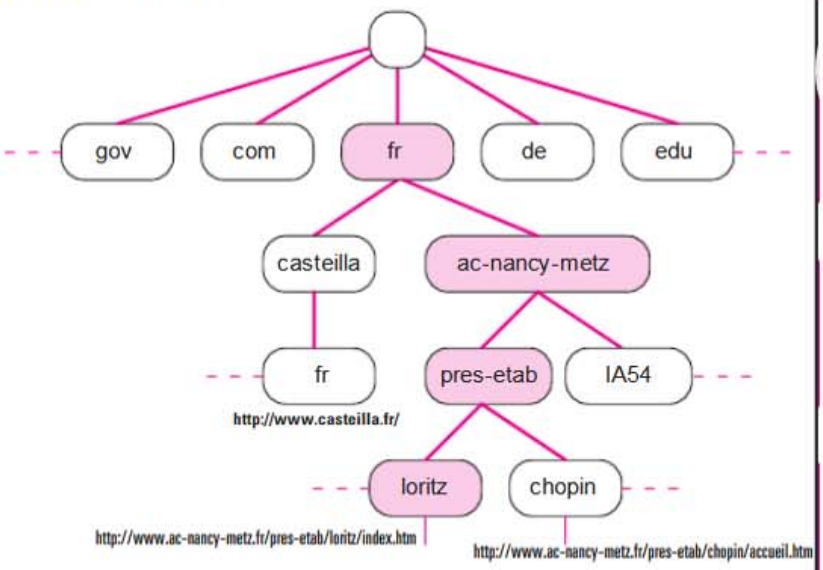
Bien que la numérotation IP à l'aide d'adresses numériques soit suffisante techniquement, il est préférable pour un humain de désigner une machine par un nom explicite. Mais se pose alors le problème de la définition des noms et de leur mise en correspondance avec les numéros IP. Pour faire face à l'explosion du nombre d'ordinateurs reliés à Internet, il a été mis en place un système de base de données distribuées : le système de noms de domaines (DNS : Domain Name System) qui fournit la correspondance entre un nom de machine et son numéro IP.

• Exemple

http://www.ac-nancy-metz.fr/pres-etab/loritz/index.htm
http://www.casteilla.fr/

En fait, le DNS est un espace de noms hiérarchisé comme illustré ci-contre. Chaque nœud a un nom d'au plus 63 caractères et la racine de l'arbre a un nom nul (les minuscules et majuscules sont indifférenciées).

Une zone est un sous-arbre de cette hiérarchie. Le nom de domaine d'un nœud est la concaténation de son nom avec celui de ses ancêtres dans l'arbre. La responsabilité du nommage est subdivisée par niveaux, les niveaux supérieurs déléguant leur autorité aux sous-domaines qu'ils créent eux-mêmes.



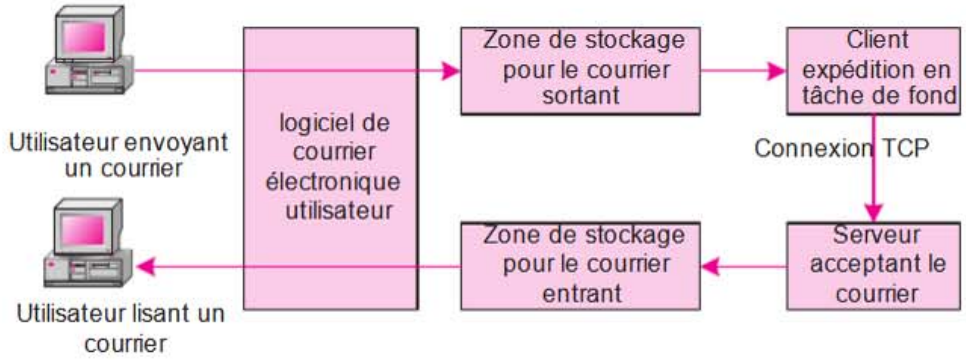
Le système est géré au niveau mondial par l'**IANA** (**I**nternet **A**ssigned **N**umbers **A**uthority www.iana.org qui gère aussi l'attribution des adresses IP). Des organismes ou sociétés assurent ce service par délégation pour les sous-domaines. En France, l'**AFNIC** (**A**ssociation **F**rançaise pour le **N**ommage **I**nternet en **C**oopération www.afnic.fr) assure ce service pour le domaine .fr.

Le mécanisme qui permet la résolution d'un nom en une adresse IP est géré par des serveurs de noms qui représentent une base de données distribuée des noms de domaine. Quand une personne a reçu l'autorité de gérer une zone, elle doit maintenir au moins deux serveurs de noms : un primaire et un ou plusieurs secondaires. Les secondaires ont des serveurs redondants par rapport au primaire de manière à faire face à une défaillance d'un système.

• Courrier électronique : smtp

Le courrier électronique au sein d'Internet est géré par le protocole SMTP (Simple Mail Transfer Protocol). Il permet d'échanger des messages entre un expéditeur et un ou plusieurs destinataires pourvu que leurs adresses soient connues. Une adresse de courrier électronique se présente sous la forme nom@domaine et doit être composée de lettres (minuscules ou majuscules sont indifférenciées), de chiffres, de _ (souligné) et de . (point).

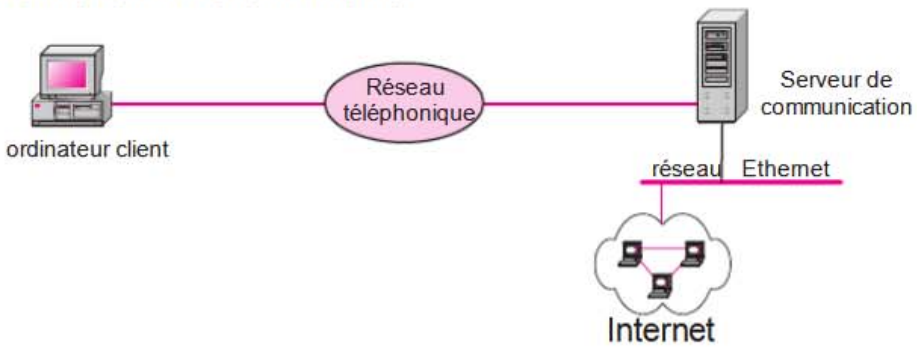
Une des caractéristiques principales du protocole SMTP est d'effectuer une remise différée du courrier qui assure que le service sera correctement rendu même si le réseau ou l'ordinateur destinataire sont momentanément en panne ou surchargés.
Pour cela le système de messagerie fonctionne de la manière décrite ci-dessous. Un courrier expédié par un utilisateur est d'abord copié dans une mémoire de stockage, accompagné des noms de l'expéditeur, du récepteur, de l'ordinateur destinataire et de l'heure de dépôt. Puis le système de messagerie active en tâche de fond le processus de transfert de courrier qui devient un client. Il associe le nom de l'ordinateur destinataire à une adresse IP et tente d'établir une connexion TCP avec le serveur SMTP de celui-ci.
Si cela réussit, le processus de transfert envoie une copie du message au destinataire qui l'enregistre dans une zone de stockage spécifique. Lorsque le client et le serveur se sont confirmés l'envoi et l'enregistrement complet du message, le client supprime sa copie locale.
Si le client n'arrive pas à établir une connexion TCP, ou si elle est rompue lors du transfert d'un message, il enregistre l'heure de cette tentative et réessaye quelque temps plus tard d'expédier le message. D'une manière générale, un système de messagerie examine régulièrement sa zone de stockage en envoi et tente d'expédier les messages (nouveau ou en attente à cause d'échec) qui s'y trouvent. Il finira par retourner à son expéditeur un message « impossible à expédier » après un délai important. Ce mode de fonctionnement (établir une connexion de bout en bout) assure qu'aucun message ne peut se perdre, soit il est délivré, soit son expéditeur est prévenu de l'échec.



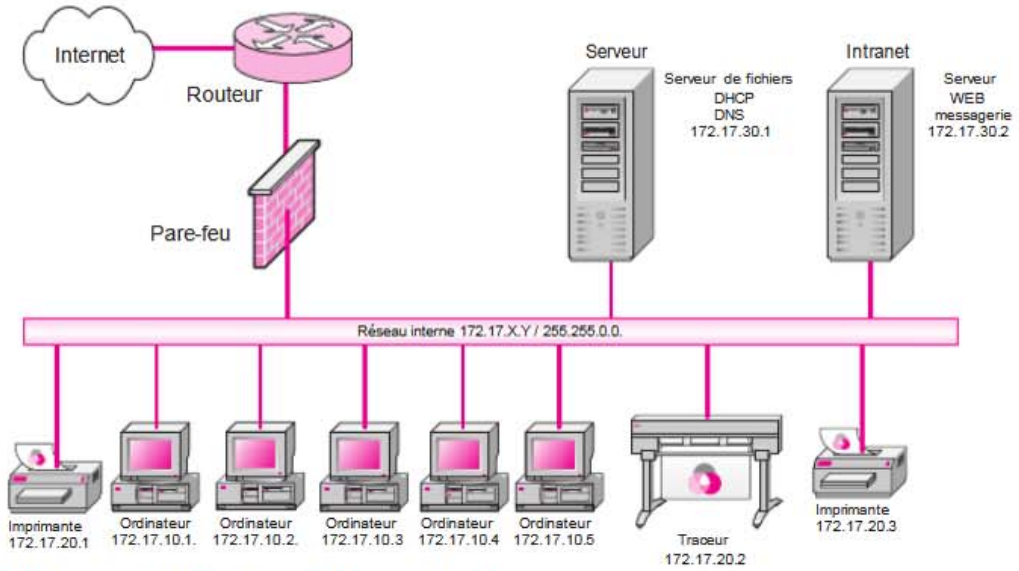
• World Wide Web: http://

HTTP (HyperText Transfer Protocol) est le protocole de communication du Web permettant d'échanger des documents hypertextes contenant des données sous la forme de texte, d'images fixes ou animées et de sons.
Tout client Web communique avec le port 80 d'un serveur HTTP par l'intermédiaire d'une ou plusieurs connexions TCP simultanées, chacune des connexions TCP ouvertes servant à récupérer l'un des composants de la page Web.

Exemple de connexion au réseau Internet



• Exemple d'un réseau de classe B avec accès à Internet

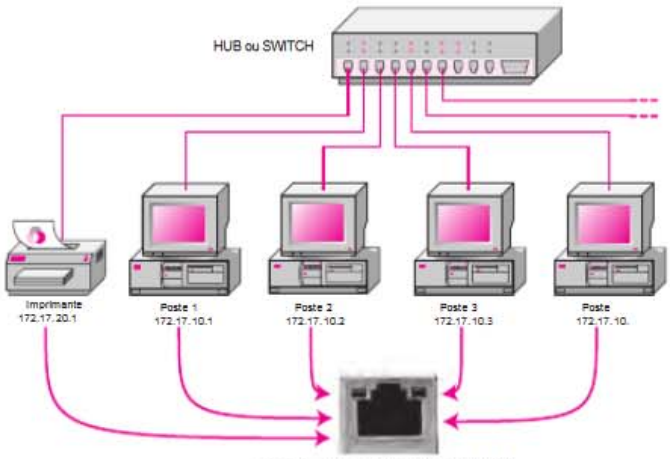


Chaque équipement doit comporter une carte réseau.

Ce type de connexion impose un réseau en étoile et donc un poste central qui fait office d'aiguillage. Ce poste central n'est pas un ordinateur, mais un hub ou un switch.

Le pare-feu ou firewall vérifie tout ce qui entre ou sort du PC et bloque les données indésirables.

DHCP signifie Dynamic Host Configuration Protocol. Il s'agit d'un protocole qui permet à un ordinateur qui se connecte sur un réseau local d'obtenir dynamiquement et automatiquement sa configuration IP, le but principal étant la simplification de l'administration d'un réseau.



Carte réseau prise RJ45

• Configuration logicielle

Dans la configuration logicielle apparaît le protocole TCP/IP. Dans ce protocole on doit configurer l'adresse IP.

Soit cette adresse est attribuée automatiquement par un serveur DHCP, soit elle est spécifiée manuellement.

Dans notre exemple, l'adresse 172.17.10.1 correspond à l'adresse du poste 1 (dans ce type de réseau, il est plus facile de laisser le DHCP attribuer automatiquement les adresses).

Le masque sous-réseau 255.255.0.0 indique que ce réseau possède au maximum 65 536 postes (Classe B).

Les champs DNS donnent l'adresse de l'ordinateur hébergeant le serveur DNS (172.17.30.1).

Ce type de réseau permet de partager des unités de stockage disque dur, CD-ROM, de partager les imprimantes, de lancer des applications depuis le serveur, de jouer à des jeux en réseau, etc.

10 CPGE

10.1. ASPECTS GÉNÉRAUX 528
10.1.1. Systèmes automatisés 528
10.1.2. Structure d'un système asservi 528
10.1.3. Régulation et asservissement 529
10.1.4. Performances des systèmes asservis 529
10.1.5. Signaux tests 530
10.2. SYSTÈMES LINÉAIRES 531
10.2.1. Définitions 532
10.2.2. Transformée de Laplace 533
10.2.3. Résolution d'équations différentielles 533
10.2.4. Transformées des signaux test 534
10.2.5. Transformées usuelles et propriétés 535
10.3. FONCTION DE TRANSFERT 536
10.3.1. Définition 536
10.3.2. Fonction de transfert d'un système asservi 536
10.3.3. Algèbre des schémas blocs 537
10.3.4. Fonction de transfert complexe 539
10.4. SYSTÈMES DU PREMIER ORDRE 541
10.4.1. Système du premier ordre classique 541
- Réponse indicielle, réponse à une rampe 541
- Réponse fréquentielle 542
- Réponse temporelle à une entrée sinusoïdale 543
10.4.2. Système du premier ordre généralisé 544
- Réponse fréquentielle 545
10.5. SYSTÈME DU DEUXIÈME ORDRE 548
10.5.1. Généralités 548
10.5.2. Réponses aux entrées types 548
10.5.3. Réponse indicielle en régime oscillatoire 549
10.5.4. Réponse indicielle en régime apériodique 550
10.5.5. Influence de la pulsation propre non amortie 551
10.5.6. Réponse à une rampe 552
10.5.7. Réponse harmonique 554
10.6. STABILITÉ D'UN SYSTÈME ASSERVI 559
10.6.1. Définition 559
10.6.2. Critère de Routh 560
10.6.3. Autre critère graphique de stabilité : contour de Hall 561
10.6.4. Critère graphique de stabilité, critère de Nyquist 563
10.6.5. Critère graphique simplifié de stabilité, critère du revers. 563
10.6.6. Causes d'instabilité. 563
10.7. PRÉCISION ET RAPIDITÉ D'UN SYSTÈME ASSERVI 565
10.7.1. Définition de l'écart ou erreur en régime permanent 565
10.7.2. Ecart (ou erreur) de position (dit aussi statique) 566
10.7.3. Ecart (ou erreur) de vitesse (dit aussi dynamique, de traînage ou en poursuite) 566
10.7.4. Ecart (ou erreur) en accélération 566
10.7.5. Influence des perturbations 567
10.7.6. Rapidité – Régime transitoire 568
10.8. CORRECTION DES SYSTÈMES ASSERVIS 571
10.8.1. Correction proportionnelle 572
10.8.2. Correction dérivée 573
10.8.3. Correction intégrale 575
10.8.4. Détermination des paramètres de correction 575
10.8.5. Correction par avance de phase 578

10.1. ASPECTS GÉNÉRAUX

10.1.1. SYSTÈMES AUTOMATISÉS

• Types de systèmes

Quelques exemples du monde industriel :

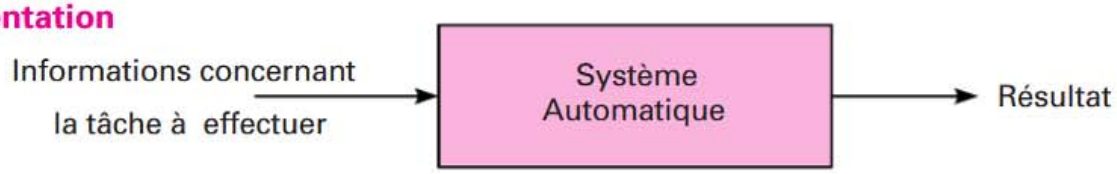
- Photocopieurs, robots de manutention, machines d'imprimeries, fours de traitement...

Il s'agit de systèmes réalisant des tâches avec un minimum d'intervention humaine.

Parmi tous ces systèmes, il existe deux familles d'automatismes :

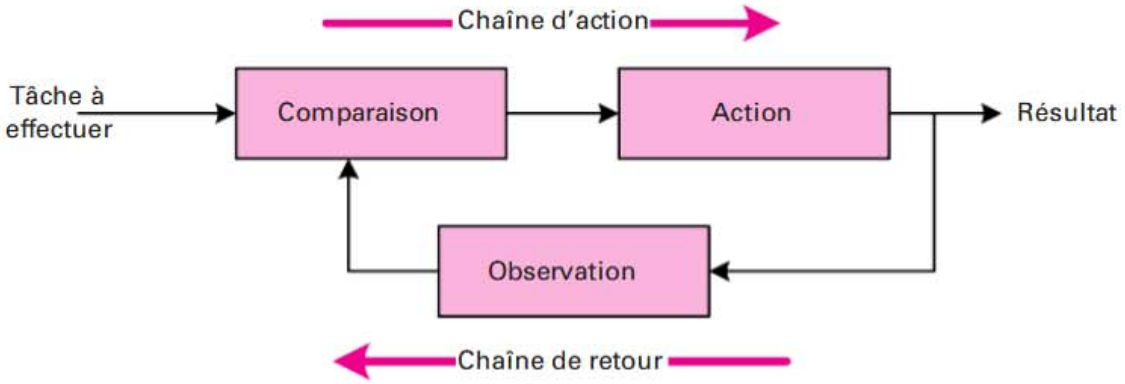
- Les systèmes qui réalisent des opérations prédéterminées et invariables (on parle de cycles) : ces systèmes sont dits **combinatoires** ou **séquentiels** ;
- Les systèmes qui réalisent des opérations dont le déroulement ne peut être connu à l'avance (perturbations), **il s'agit de systèmes asservis**.

• Représentation



10.1.2. STRUCTURE D'UN SYSTÈME ASSERVI

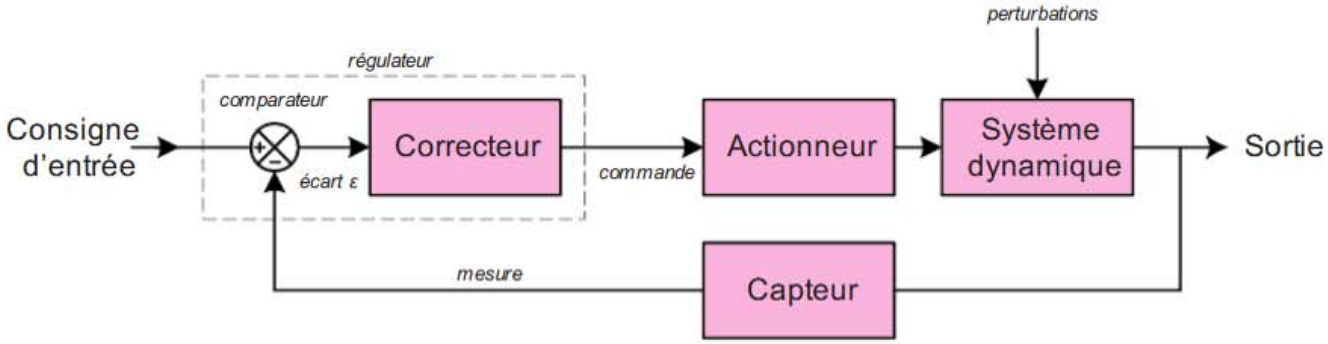
• Chaîne d'action, chaîne de retour



Un système asservi est un système bouclé, doté d'une chaîne d'action (ou chaîne directe) et d'une chaîne de retour (ou chaîne d'acquisition).

Sur la représentation précédente, on s'aperçoit qu'il est nécessaire, au niveau du traitement, de pouvoir comparer l'entrée et la sortie. Plus exactement la consigne (demande faite au niveau de l'entrée) et le résultat de l'observation de la sortie.

• Schéma fonctionnel de l'asservissement



• Description

Le **régulateur**, composé d'un **comparateur** et d'un **correcteur**, est l'organe « intelligent » du système. Il contrôle la manière dont la **consigne** a été exécutée et modifie la commande si nécessaire.

L'**actionneur** fournit la puissance au processus à partir du signal élaboré par le régulateur. C'est le « muscle » du système.

Le **système dynamique** évolue suivant les lois physiques qui le caractérisent. Il peut subir de l'extérieur des perturbations prévisibles ou non.

Le **capteur** est l'organe qui traduit une grandeur physique à mesurer en signal exploitable par le comparateur. C'est par exemple un codeur utilisé en capteur de position, une dynamo tachymétrique (capteur de vitesse), un débitmètre...

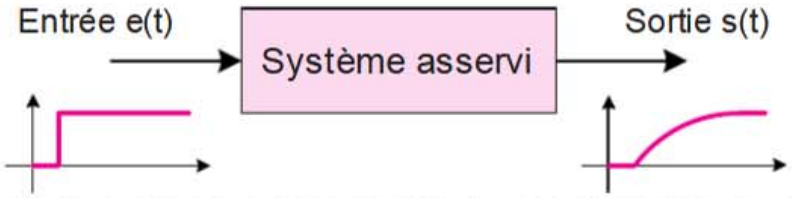
10.1.3. RÉGULATION ET ASSERVISSEMENT

On parle de régulation lorsque le système asservi est commandé par une grandeur physique constante et qu'il doit maintenir une sortie constante quelles que soient les perturbations qu'il subit (exemple de la régulation de chauffage).

On parle d'asservissement ou de système suiveur lorsque la consigne du système asservi évolue au cours du temps.
Par exemple radar de poursuite.

10.1.4. PERFORMANCES DES SYSTÈMES ASSERVIS

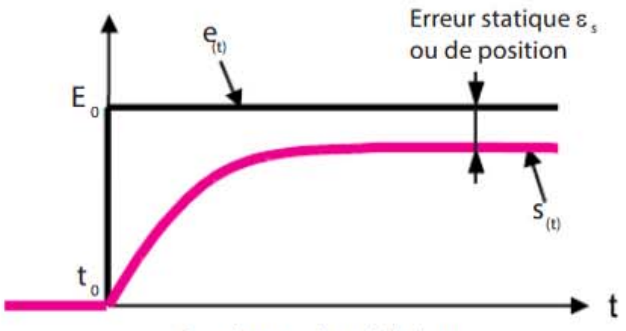
L'étude du comportement d'un système asservi, permet de mettre en évidence trois caractéristiques essentielles de ces systèmes.



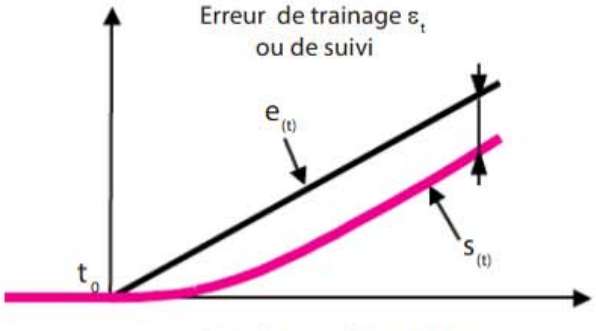
L'évolution de la sortie du système asservi soumis à une sollicitation en entrée, s'appelle aussi réponse.

• Précision

Sous l'action d'une entrée type e(t) ci-dessous, un système linéaire tend à présenter en sortie un signal s(t) du même type. Si, en régime établi (au bout d'un certain temps), il existe une différence entre la sortie et l'entrée, alors il y a une erreur permanente.



$S_{(t)}$: réponse à un échelon

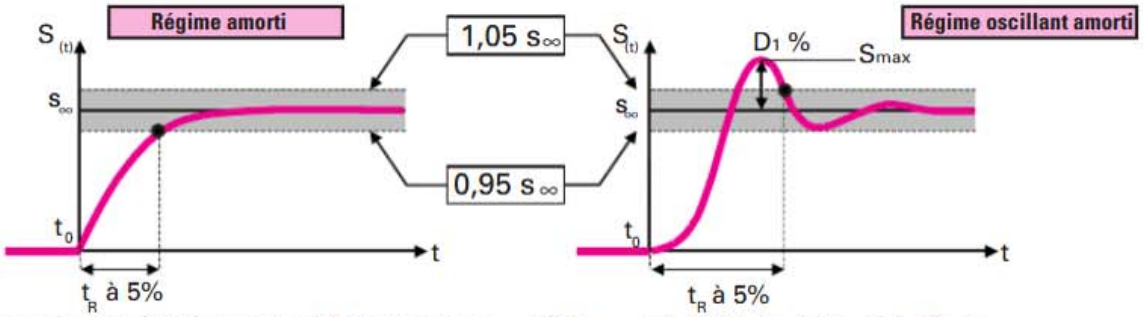


$S_{(t)}$: réponse à une rampe

Performances des systèmes asservis

• Rapidité

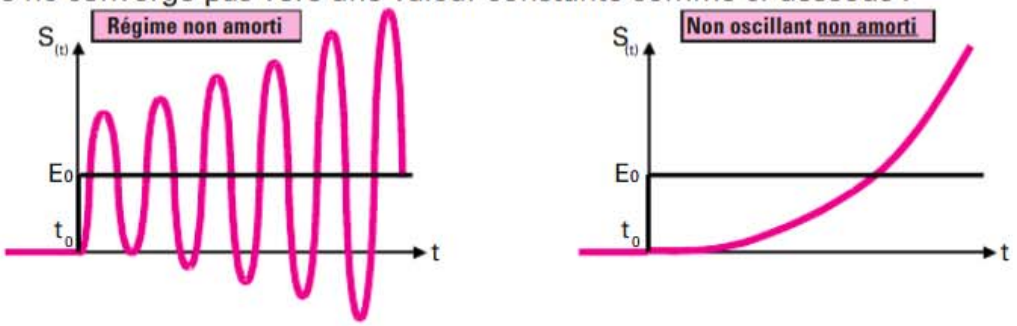
C'est le temps que met le système à réagir à une variation brusque de la grandeur d'entrée. Cette caractéristique est déterminée pour une entrée particulière : un échelon (voir plus loin les signaux types). La valeur finale s_∞ de s(t) étant souvent atteinte de manière asymptotique, la rapidité est généralement caractérisée par le temps de réponse à 5 %.



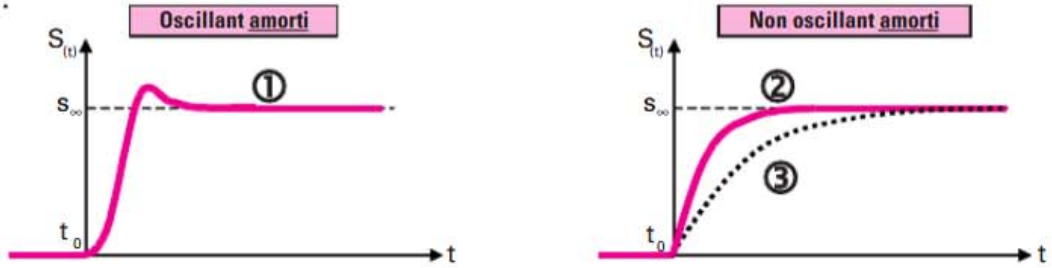
C'est le temps mis par la réponse s(t) pour que : $t \geq t_{R\,(5\,\%)} \Rightarrow 0,95 \cdot S_\infty \leq s_{(t)} \leq 1,05 \cdot S_\infty$

• Stabilité

Pour la grande majorité des systèmes, on ne peut pas accepter, qu'à consigne constante, la grandeur de sortie ne converge pas vers une valeur constante comme ci-dessous :



Le comportement que l'on souhaite normalement obtenir est semblable à ceux proposés ci dessous :



Si l'amortissement est trop important (courbe 3), cela conduit à une perte significative de rapidité pour le système. La réponse 1 propose un bon compromis entre amortissement et rapidité pour un système oscillant. On lui préfèrera la réponse 2 dans les applications où l'amplitude des oscillations doit impérativement rester nulle.

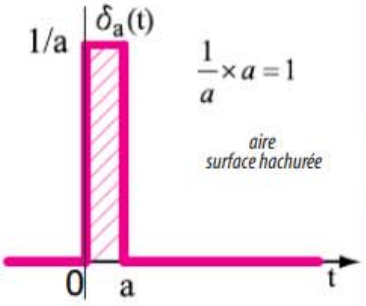
10.1.5. SIGNAUX TESTS

Pour déterminer les caractéristiques d'un système dynamique pour lequel il n'est pas toujours simple de traduire sous forme d'équations le comportement des signaux particuliers peuvent être utilisés. La réponse des systèmes linéaires soumis à des entrées différentes, pourra être déterminée en utilisant le principe de superposition.

• Impulsion

L'impulsion est un signal très bref mais suffisamment durable pour conduire à un effet mesurable. Ce signal noté δ(t) vaut zéro en tout point sauf au voisinage de t = 0.

L'impulsion de Dirac peut être obtenue comme limite d'une famille de fonctions $\delta_a(t)$ dont la figure ci-contre représente le tracé.

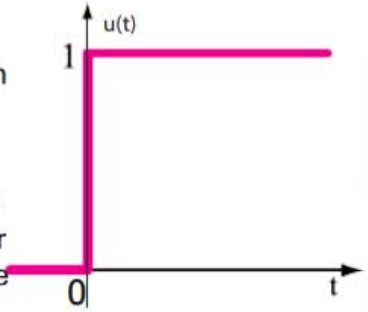


On vérifie que pour tout a>0 $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta_a(t)dt = 1$

L'impulsion de Dirac est alors définie par : $\delta(t) = \lim_{a \to 0^+} \delta_a(t)$

Lorsquel'impulsion de Dirac est utilisée en entrée d'un système, on parle de **réponse impulsionnelle**.

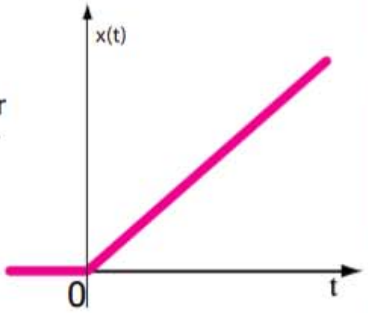
• Échelon



Cette fonction échelon **unitaire** (d'amplitude 1) ou encore fonction d'**Heaviside** notée u(t) est définie par : $\begin{cases} u(t) = 0 \quad pour \quad t < 0 \\ u(t) = 1 \quad pour \quad t \geq 0 \end{cases}$

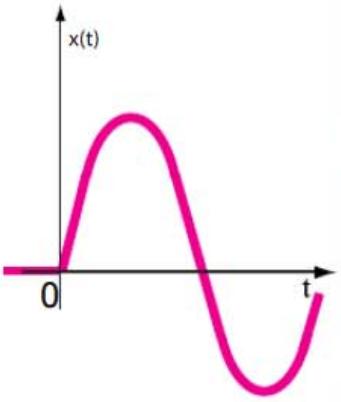
La réponse indicielle d'un système correspond à l'évolution de sa sortie lorsqu'un échelon est appliqué à son entrée. Ce signal est utilisé pour déterminer l'erreur statique d'un système et donc sa précision, ainsi que pour déterminer le temps de réponse.

• Rampe



L'évolution d'un signal x(t) en **rampe** est donné figure ci-contre.
Ce signal vaut 0 pour t < 0 et varie de manière linéaire avec le temps pour t > 0. Cette rampe permet de déterminer l'erreur de trainage ou erreur dynamique d'un système.
L'expression de cette fonction est donnée par : x(t) = k.t.u(t)
avec k un coefficient qui déterminera la pente et u(t) l'échelon unitaire.

• Sinusoïde

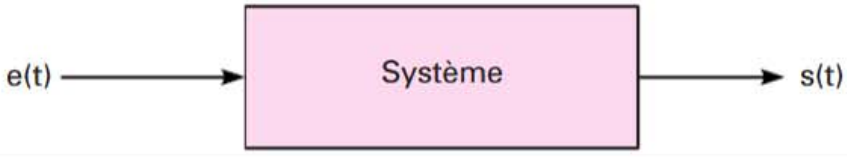


Les entrées **sinusoïdales** sont très utilisées pour étudier le comportement dynamique des systèmes. La sortie est, dans ce cas, appelée **réponse harmonique ou fréquentielle**.

Un signal sinusoïdal $x(t) = x_0 \sin(\omega t)$ est caractérisé par son amplitude x_0 et par sa pulsation ω (en radians par seconde). Sa fréquence f (en Hertz) est telle que $\omega = 2\pi f$. Sa période T (en secondes) vaut $T = 2\pi / \omega$.
Lorsqu'on connait la réponse harmonique d'un système pour n'importe quelle pulsation du signal d'entrée, on peut en déduire la réponse d'un système pour tout signal périodique appliqué en entrée. Utilisation du principe de superposition et décomposition d'une fonction périodique grâce aux séries de Fourier.

10.2 SYSTÈMES LINÉAIRES

On distingue deux classes essentielles de systèmes asservis suivant leur type de régulateur.
Ce sont les systèmes continus et les systèmes échantillonnés. On ne s'intéresse qu'aux premiers cités, pour lesquels le traitement de l'information ne s'effectue que sur des grandeurs analogiques. (amplificateur intégré). La mesure et la commande sont alors réalisées de manière continue, contrairement aux systèmes échantillonnés, où elles sont effectuées de manière discrète suivant un découpage temporel de l'information appelé échantillonnage (DSP ou micro-contrôleur).



CPGE

10.2.1. DÉFINITIONS

• Système continu

Un système est continu si et seulement si toutes les fonctions qui décrivent son fonctionnement, sont des fonctions continues du temps.

• Système linéaire

Un système est dit linéaire si la fonction qui le décrit est elle-même linéaire. Cette dernière vérifie alors le principe de superposition : si une fonction F est linéaire, elle vérifie la relation :

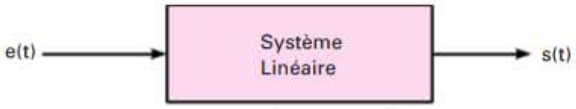
$$F[\alpha.e_1(t) + \beta.e_2(t)] = \alpha.F[e_1] + \beta.F[e_2]$$

• Système invariant

Un système invariant est tel que ses caractéristiques ne changent pas au cours du temps.

• Systèmes linéaires continus invariants

Le comportement d'un système linéaire mono-variable est modélisable par une équation différentielle linéaire à coefficients constants.



$$b_0 s(t) + b_1 \frac{ds(t)}{dt} + b_2 \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + \cdots + b_n \frac{d^{(n)} s(t)}{dt^n} = a_0 e(t) + a_1 \frac{de(t)}{dt} + a_2 \frac{d^2 e(t)}{dt^2} + \cdots + a_m \frac{d^{(m)} e(t)}{dt^m}$$

Si une constante apparaît dans un membre de l'égalité, il suffit de faire un changement de variable du type $s_1(t) = s(t)\frac{C}{b_0}$ pour retrouver le même type d'équation que précédemment.

• Réponse libre, réponse forcée

La résolution d'une telle équation repose sur la propriété suivante : la solution de l'équation différentielle est la somme de deux contributions $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$

$s_1(t)$ est la solution générale de l'équation sans second membre

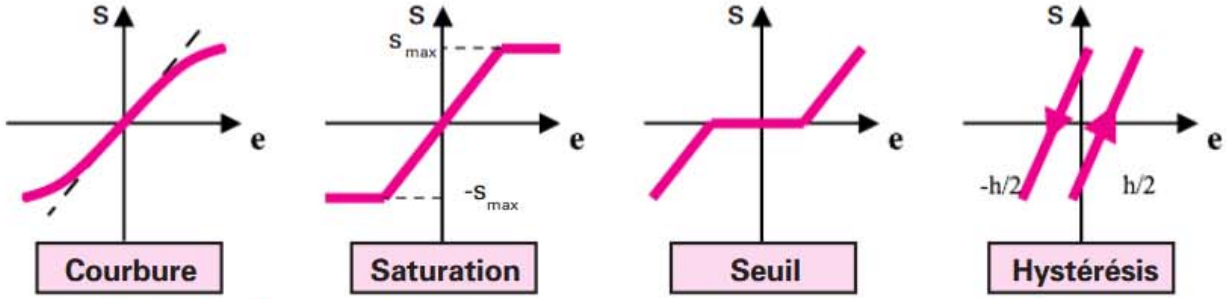
$s_2(t)$ est une solution particulière de l'équation avec second membre

• La solution $s_1(t)$ est la **réponse libre**. Elle caractérise le **régime transitoire**. Elle dépend des conditions initiales du système physique. Cette contribution s'annule au bout d'un certain temps.

• La solution $s_2(t)$ est la **réponse forcée**. Elle caractérise le **régime établi** (ou permanent), c'est-à-dire celui que tend à imposer au système l'entrée ***e(t)***.

• Les non linéarités

Toutefois, on peut les linéariser pour de petites amplitudes autour d'un point de fonctionnement ou par limitation du domaine d'utilisation du système.



• Transformée de Laplace

Un autre outil utilisé pour résoudre les équations différentielles est la transformée de Laplace. Cela permettra de remplacer l'équation différentielle par une équation polynomiale comme nous allons le voir plus loin.

10.2.2. TRANSFORMÉE DE LAPLACE

• Définition

Soit f une fonction du temps. Si f est définie et continue par morceaux pour $t \geq 0$, et que $\lim_{t\to\infty} e^{-t} f(t)$ est fini, alors f(t) admet une transformée de Laplace F(p) définie par : $F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t)dt$ *(fonction unilatérale)*

Dans ces conditions, f(t) est la fonction originale de F(p). p est la variable symbolique (réelle positive ou complexe) à partie réelle positive. Ceci est noté $F(p) = \mathcal{L}[f(t)]$ ou encore $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(p)]$

• Propriétés

Unicité

A f(t) correspond F(p) unique et à F(p) correspond f(t) unique. La correspondance entre une fonction et sa transformée de Laplace est biunivoque.

$$f(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} F(p) \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} f(t)$$

Linéarité

Soient f et g deux fonctions du temps, la linéarité de l'intégration permet d'établir :

$$\forall \lambda, \mu \in \mathbb{R} \ \ \mathcal{L}[\lambda f(t) + \mu g(t)] = \lambda \mathcal{L}[f(t)] + \mu \mathcal{L}[g(t)]$$

Différentiation

Si $F(p) = \mathcal{L}[f(t)]$ alors en intégrant par partie, on montre que :

$$\mathcal{L}[f'(t)] = pF(p) - f(0^+) \quad avec \quad f(0^+) = \lim_{t\to 0} f(t)$$

A partir de la définition : $\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = \int_0^{\infty} e^{-pt}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] dt$

En posant : u = e^{-pt} donc du = $-pe^{-pt}$ et dv = (df(t)/dt)dt donc v = f(t)

$$\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = [e^{-pt}f(t)]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} -pe^{-pt}f(t)dt \quad \text{et comme} \quad \lim_{t\to\infty} e^{-pt}f(t) = 0$$

$$[e^{-pt}f(t)]_0^{\infty} = -f(0\ ) \quad \text{et} \quad -\int_0^{\infty} -pe^{-pt}f(t)dt = pF(p)$$

$$\boxed{\mathcal{L}[f'(t)] = pF(p) - f(0^+)}$$

Ce résultat se généralise aux ordres supérieurs par récurrence :

$$\mathcal{L}[f^{(n)}(t)] = p^n F(p) - p^{n-1}f(0^+) - p^{n-2}f'(0^+) - \cdots - f^{(n-1)}(0^+)$$

Dans le cas où la fonction f et ses dérivées successives sont nulles à l'instant zéro (conditions initiales nulles ou conditions d'Heaviside), on obtient le résultat fondamental :

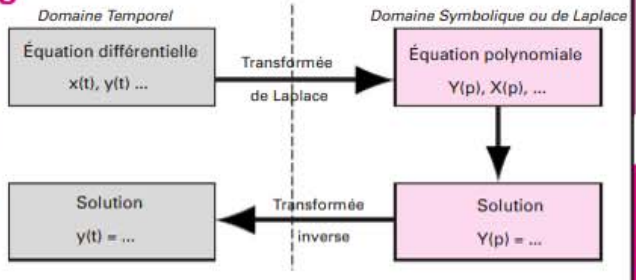
$$\boxed{\mathcal{L}[f'(t)] = pF(p), \mathcal{L}[f''(t)] = p^2F(p), \mathcal{L}[f^{(n)}(t)] = p^nF(p)}$$

Ce résultat est très important pour la résolution des équations différentielles puisque dans le domaine de Laplace cela correspond à des équations polynomiales.

10.2.3. RÉSOLUTION D'ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES

• Principe

La modélisation d'un système par la connaissance des propriétés qui lui sont propres amène à résoudre une équation ou un système d'équations différentielles. La résolution peut se faire par une méthode classique, mais aussi en utilisant les transformées de Laplace.



CPGE

10.2.4. TRANSFORMÉES DES SIGNAUX TEST

Comme on vient de le voir précédemment, il est nécessaire de connaître la transformée de Laplace des fonctions courantes et surtout celles que nous serons amenés à rencontrer dans la résolution de nos problèmes. Pour connaître les performances de nos systèmes, nous utiliserons les signaux test, il faut donc définir ces transformées particulières.

• Impulsion de Dirac

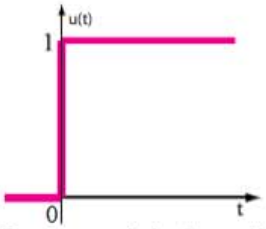
Par définition $\mathcal{L}[\delta(t)] = \int_0^\infty e^{-pt}\delta(t)dt$ or le terme $e^{-pt}\delta(t)$ est nul pour tout t sauf au voisinage de t = 0

De plus $\lim_{t\to 0} e^{-pt} = 1$ donc $\mathcal{L}[\delta(t)] = e^{-p.0}\int_0^\infty \delta(t)dt = 1$

La transformée de l'impulsion de Dirac vaut : $1\mathcal{L}[\delta(t)] = 1$

• Échelon

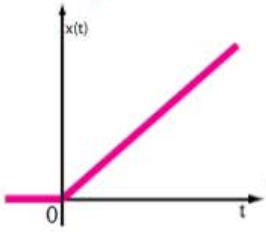
Pour un échelon unitaire u(t) =1 pour tout t ≥ 0. $\mathcal{L}[u(t)] = \int_0^\infty e^{-pt}u(t)dt = \int_0^\infty e^{-pt}dt = \left[-\frac{1}{p}e^{-pt}\right]_0^\infty = \frac{1}{p}$



La transformée de l'échelon unitaire vaut : $\frac{1}{p}.\mathcal{L}[u(t)] = \frac{1}{p}$

Pour un échelon d'amplitude K, on utilise la linéarité : $\mathcal{L}[Ku(t)] = K\mathcal{L}[u(t)] = \frac{K}{p}$

• Rampe



Équation d'une rampe de pente 1 : x(t) = t.u(t) avec x(0) = 0
On peut remarquer (pour éviter le calcul) x'(t) = u(t) et donc en utilisant la propriété de la transformée de la dérivée, écrire : $\mathcal{L}[x'(t)] = pX(p)$
avec X(p) la transformée de la rampe et sachant que pour l'échelon unitaire $\mathcal{L}[u(t)] = \frac{1}{p}$ on peut en déduire : $\mathcal{L}[x(t)] = \frac{1}{p^2}$

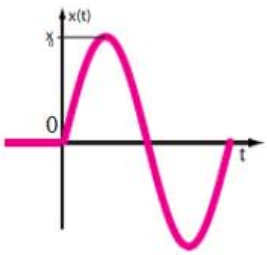
La transformée de la rampe de pente 1 vaut : $1/p^2.\mathcal{L}[x(t)] = 1/p^2$

Pour une pente K, il suffira de multiplier par K la transformée de la rampe de pente 1.

• Sinusoïde

Sinusoïde d'amplitude X_0 de période T, donc de pulsation ω=(2π)/T

Équation de la sinusoïde : $x(t) = X_0 \sin\omega t$ $\quad x(t) = \frac{X_0}{2i}\left(e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}\right)x(t)$



$$\mathcal{L}[x(t)] = \mathcal{L}[X_0\sin\omega t] = \frac{X_0}{2i}\mathcal{L}\left[e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}\right] = \frac{X_0}{2i}\left[\mathcal{L}\left[e^{i\omega t}\right] - \mathcal{L}\left[e^{-i\omega t}\right]\right]$$

$$\mathcal{L}[x(t)] = \frac{X_0}{2i}\left[\frac{1}{p-i\omega} - \frac{1}{p+i\omega}\right] = \frac{X_0\omega}{p^2+\omega^2}$$

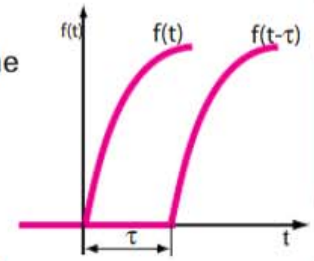
La transformée de la sinusoïde d'amplitude X_0 de pulsation ω vaut : $\mathcal{L}[x(t)] = \frac{X_0\omega}{p^2+\omega^2}$

10.2.5. TRANSFORMÉES USUELLES ET PROPRIÉTÉS

f(t).u(t)	F(p)	Temporel	Symbolique
K	$\frac{K}{p}$	$a.f_1(t) + b.f_2(t)$	$a.F_1(p) + b.F_2(p)$
Kt	$\frac{K}{p^2}$	f(at)	1/a F(p/a)
e^{-at}	$\frac{1}{p+a}$	$e^{-\omega t}$ f(t)	F(p + ω)
sin ωt	$\frac{\omega}{p^2+\omega^2}$	-t f(t)	F'(p)
cos ωt	$\frac{p}{p^2+\omega^2}$	t^2 f(t)	F''(p)
e^{-at}. sin ωt	$\frac{\omega}{(p+a)^2+\omega^2}$	$\int_0^t f(v)dv$	$\frac{F(p)}{p}$
e^{-at}. cos ωt	$\frac{p+a}{(p+a)^2+\omega^2}$	$\int_0^t f(t-\tau)g(\tau)d\tau$	F(p).G(p)

• Théorème du retard

Soit f(t) une fonction du temps et la même fonction retardée de τ. On cherche l'expression de la transformée de Laplace de cette fonction retardée de τ .



$\mathcal{L}[f(t-\tau)] = \int_0^\infty e^{-pt} f(t-\tau)dt$ comme de 0 à τ, f(t-τ) = 0

Nous avons : $\mathcal{L}[f(t-\tau)] = \int_0^\tau 0dt + \int_\tau^\infty e^{-pt} f(t-\tau)dt$

Si on pose T = t-τ, il vient dT = dt (il faudra changer les bornes d'intégration)

$$\mathcal{L}[f(t-\tau)] = \int_0^\infty e^{-p(T+\tau)} f(T)dT = \int_0^\infty e^{-pT} e^{-p\tau} f(T)dT = e^{-p\tau} \int_0^\infty e^{-pT} f(T)dT$$

De plus $F(p) = \int_0^\infty e^{-pt} f(t).dt$ on en déduit que : $\mathcal{L}[f(t-\tau)] = e^{-p\tau} F(p)$

• Théorèmes aux limites

Théorème de la valeur initiale : $\lim_{t\to 0} f(t) = \lim_{p\to\infty} p.F(p)$

Ce théorème ne s'applique que si le degré du dénominateur est supérieur au degré du numérateur. Donc sur des systèmes stables.

Théorème de la valeur finale : $\lim_{t\to\infty} f(t) = \lim_{p\to 0} p.F(p)$

Ce théorème est valable si les pôles de p.F(p) ont leur partie réelle strictement négative (critère de stablilité).

Les théorèmes sur les limites ne sont valables que si les limites existent.

Exemple : $\lim_{t\to 0} f(t) = \lim_{p\to\infty} p.F(p) = \lim_{p\to\infty} \frac{p}{p+a} = \frac{1}{1+\frac{a}{p}} = 1$

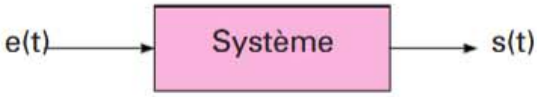
$f(t) = e^{-at} \rightarrow F(p) = \frac{1}{p+a}$

$\lim_{t\to\infty} f(t) = \lim_{p\to 0} p.F(p) = \lim_{p\to 0} \frac{p}{p+a} = 0$

CPGE

10.3. FONCTION DE TRANSFERT

10.3.1 DÉFINITION



Nous avons déjà signalé le fait que l'application des lois de la physique à un système conduit souvent à une (ou des) équation(s) différentielle(s) décrivant son comportement. Pour un système linéaire continu quelconque, l'équation différentielle peut prendre la forme :

$$b_0 s(t) + b_1 \frac{ds(t)}{dt} + b_2 \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + \cdots + b_n \frac{d^{(n)} s(t)}{dt^n} = a_0 e(t) + a_1 \frac{de(t)}{dt} + a_2 \frac{d^2 e(t)}{dt^2} + \cdots + a_m \frac{d^{(m)} e(t)}{dt^m}$$

L'idée est d'utiliser la transformation de Laplace pour obtenir une équation algébrique entre la sortie et l'entrée sans résoudre cette équation.
Appliquons la transformation de Laplace aux deux membres de l'égalité en faisant l'hypothèse que le système part du repos donc que les conditions initiales sont nulles.
Les propriétés de la dérivation donnent l'équation suivante :

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_1 p a_0) S(p) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_1 p + b_0) E(p)$$

En faisant le rapport de la sortie sur l'entrée, nous obtenons :

$$\frac{S(p)}{E(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_1 p + a_0} = H(p)$$

La fonction H(p) est appelée **Transmittance** ou **Fonction de Transfert** du système. Cette fonction est une fraction rationnelle en p. En explicitant les racines complexes et/ou réelles des polynômes du numérateur et du dénominateur, on peut écrire H(p) sous la forme :

$$H(p) = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{K(p - z_1)(p - z_2) \ldots (p - z_m)}{(p - p_1)(p - p_2) \ldots (p - p_n)}$$

• Coefficients de la fonction transfert

- Les z_i sont les **zéros** de la fonction transfert (réels ou complexes)
- Les p_i sont les **pôles** de la fonction transfert (réels ou complexes)
- Le degré du dénominateur D(p) est appelé **ordre** de la fonction transfert ou du système
- L'équation D(p) = 0 est appelée équation caractéristique.
- S'il existe une racine nulle d'ordre α de D(p), un terme en p^α apparaît au dénominateur.

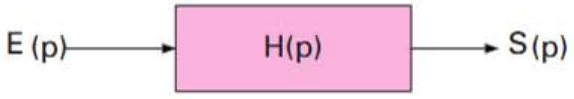
α est la classe de la fonction transfert ou du système.

On peut, en faisant des mises en facteur, écrire la fonction transfert sous une autre forme :

$$H(p) = \frac{G(1 + c_1 p + \cdots + c_m p^m)}{1 + d_1 p + \cdots + d_n p^n}$$

Dans ce cas, le facteur constant G est appelé **gain statique** du système.

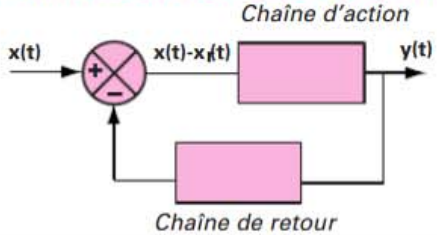
• Représentation



Le bloc est décrit par sa fonction de transfert, on a alors S(p) = H(p) . E(p)

10.3.2. FONCTION DE TRANSFERT D'UN SYSTÈME ASSERVI

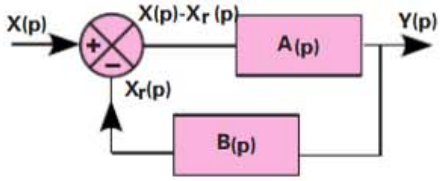
• Le schéma blocs dans le domaine temporel



La constitution d'un système asservi est caractérisée par une boucle dans laquelle on retrouve la chaîne d'action et la chaîne de retour. A chaque chaîne est associé un bloc. Le passage du domaine temporel au domaine symbolique se fera en associant à chaque bloc sa fonction de transfert et en remplaçant toutes les fonctions temporelles par leur transformée.

• Le schéma blocs dans le domaine symbolique

A la chaîne d'action est associée la fonction transfert A(p) et à la chaîne de retour est associée la fonction transfert B(p).
Le comparateur idéal établit toujours une relation algébrique entre ses entrées.



• Éléments de base des schémas blocs

Le bloc

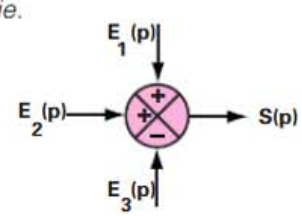
Il représente une fonction de transfert ou transmittance. Il a **une** entrée et **une** sortie. Les flèches sont orientées de l'entrée vers la sortie.

$$H(p)=\frac{S(p)}{E(p)}$$

L'entrée est indépendante de la sortie.

Le sommateur

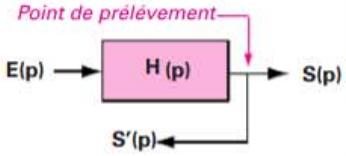
Il peut avoir plusieurs entrées mais une seule sortie. Les signes + ou – associés aux branches entrantes précisent si l'entrée s'additionne ou si elle se soustrait.



$$S(p)=E_1(p)+E_2(p)-E_3(p)$$

La jonction

Une **branche de prélèvement** prend le même signal que la branche principale et n'affecte pas le signal de cette branche principale.

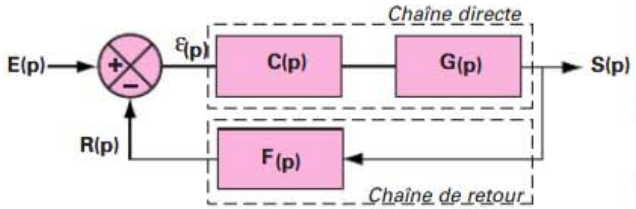


$$S'(p) = S(p) = H(p)E(p)$$

Système bouclé

En utilisant les propriétés précédentes, on peut écrire le système d'équations suivant :

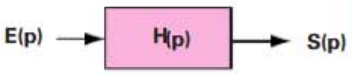
$$R(p) = S(p).F(p)$$
$$\varepsilon(p) = E(p) - R(p)$$



Ce qui donne après élimination des variables intermédiaires :

$S(p) = [E(p) - S(p).F(p)].C(p).G(p)$ et il vient $S(p)=\dfrac{C(p)G(p)}{1+C(p)G(p)F(p)}E(p)$

La fonction $\dfrac{C(p)G(p)}{1+C(p)G(p)F(p)}$ est appelée : **F**onction de **T**ransfert en **B**oucle **F**ermée du système (notée **F.T.B.F.**). On pourra donc représenter notre système asservi par :

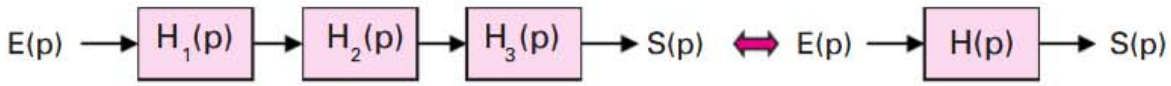


- Avec $H(p)$ la **F.T.B.F.** du système
- Cette fonction décrit le fonctionnement du système en incluant la boucle.

On peut définir d'autres fonctions de Transfert :
Fonction de **T**ransfert en **B**oucle **O**uverte (**F.T.B.O.**)
$FTBO(p) = C(p).G(p).F(p)$, l'ouverture se faisant au niveau du comparateur.
Fonction de **T**ransfert de la **C**haîne **D**irecte (**F.T.C.D.**) $FTCD(p) = C(p).G(p)$

10.3.3. ALGÈBRE DES SCHÉMAS BLOCS

• Blocs en série

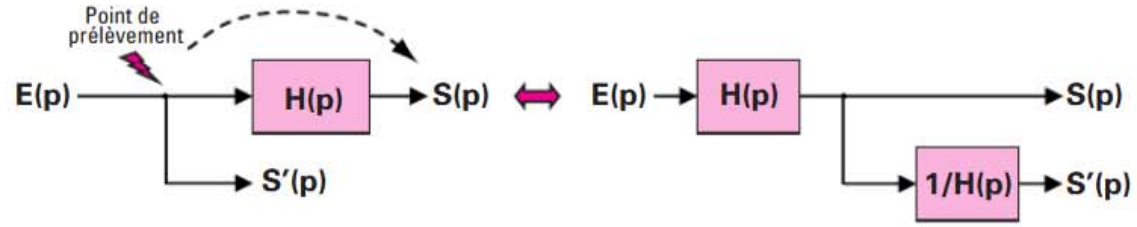


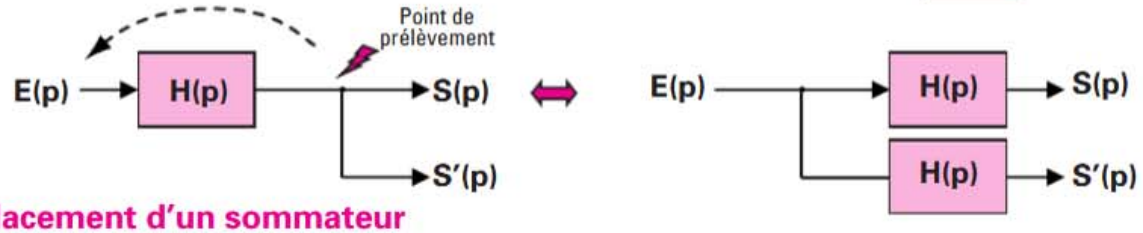
La fonction de transfert de l'ensemble est égale au produit des fonctions de transfert de chaque bloc.

$$H(p)=H_1(p)\,H_2(p)\,H_3(p)$$

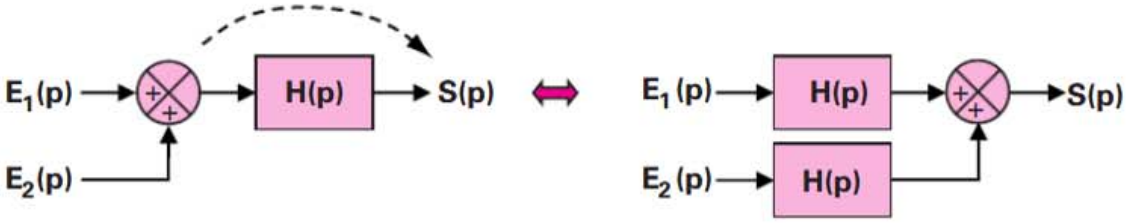
Algèbre des schémas blocs

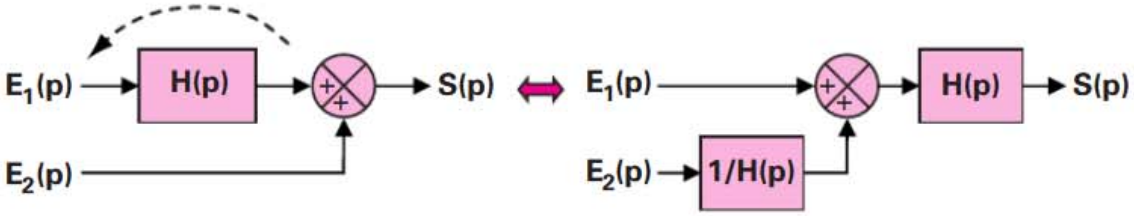
• Déplacement d'un point de prélèvement





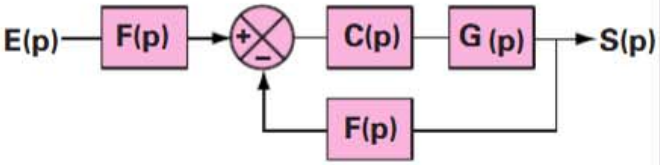
• Déplacement d'un sommateur



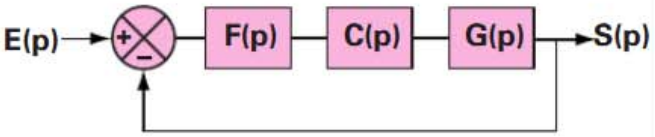


• Boucle à retour unitaire

Un système à retour unitaire est un système dont la fonction de transfert F(p) de la chaîne de retour est égale à 1.
Le schéma est alors du type de celui ci-contre :



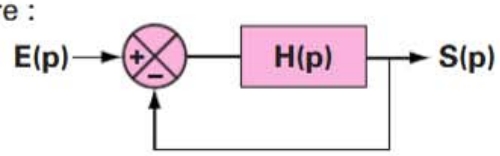
Les relations établies précédemment se simplifient en remplaçant F(p) par 1.



Fonction de transfert en boucle ouverte :
FTBO (p) = F(p).C(p).G(p)

Fonction de transfert en boucle fermée pour un retour unitaire :

$$FTBF(p) = \frac{F(p)C(p)P(p)}{1+F(p)C(p)P(p)} = \frac{FTBO(p)}{1+FTBO(p)}$$

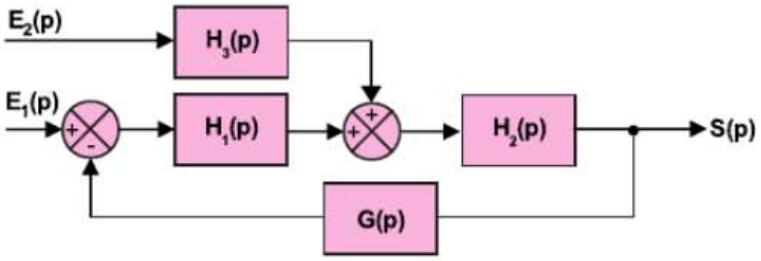


FTBF généralisée : $FTBF(p) = \frac{FTCD(p)}{1+FTBO(p)}$

Résultat important : La FTBF s'exprime directement en fonction de la FTBO par une relation élémentaire du type : $\frac{u}{1+u}$

Les propriétés de la FTBO à retour unitaire et de la FTBF sont donc liées.

• Système à deux entrées



Ce système possède deux fonctions

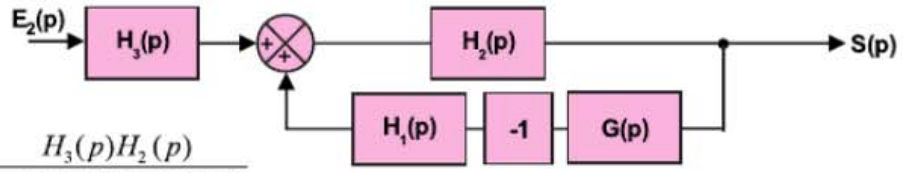
$$S(p) = FT_1(p).E_1(p) + FT_2(p).E_2(p)$$

$$\left(\frac{S(p)}{E_1(p)}\right)_{E_2=0} \quad et \quad \left(\frac{S(p)}{E_2(p)}\right)_{E_1=0}$$

$FT_1(p)$ $\qquad$ $FT_2(p)$

Pour l'entrée $E_2(p)=0$ $\quad \left(\frac{S(p)}{E_1(p)}\right)_{E_2=0} = \frac{H_1(p)H_2(p)}{1+G(p)H_1(p)H_2(p)}$

Pour l'entrée $E_1(p)=0$



$$\left(\frac{S(p)}{E_1(p)}\right)_{E_1=0} = \frac{H_3(p)H_2(p)}{1+G(p)H_1(p)H_2(p)}$$

En appliquant le théorème de superposition, nous obtenons :

$$S(p) = \frac{H_1(p)H_2(p)E_1(p) + H_2(p)H_3(p)E_2(p)}{1+G_1(p)H_1(p)H_2(p)}$$

10.3.4. FONCTION DE TRANSFERT COMPLEXE

• Fonction de Transfert complexe d'un système bouclé

La fonction de transfert complexe d'un système (ou transmittance isochrone) est obtenue en remplaçant dans la fonction de transfert la variable de Laplace p par un terme complexe jω, imaginaire pur. H(p) devient donc H(jω). Cette nouvelle fonction de transfert possède des propriétés très intéressantes.

Considérons un système de fonction de transfert H(p), soumis à une entrée harmonique d'amplitude E_0 : $e(t) = E_0 \sin \omega t$.

Nous savons que la réponse en régime permanent est de la forme : $s(t) = S_0 \sin(\omega t+\varphi)$, caractérisée par son amplitude S_0 et son déphasage φ par rapport au signal d'entrée.

On démontre que $H(j\omega) = \frac{S_0}{E_0} e^{j\varphi}$

$H(j\omega)$ est donc un nombre complexe de module $\frac{S_0}{E_0}$ d'argument φ.

H(jω) est appelée réponse en fréquence du système et elle le caractérise complètement. Il n'y a plus besoin de résoudre l'équation différentielle entrée / sortie du système pour connaître sa réponse à une entrée harmonique.

• Lieux de transfert

La fonction H(jω) est une fonction complexe de la variable ω. Les méthodes de calcul des asservissements linéaires utilisent la représentation de cette fonction complexe. Cette représentation appelée réponse en fréquence peut se faire sur différents diagrammes, qui prennent tous en compte le fait qu'une fonction complexe comprend deux termes : amplitude en fonction de ω et phase en fonction de ω. Nous allons décrire les diagrammes de **BODE**, **NYQUIST** et **BLACK**.

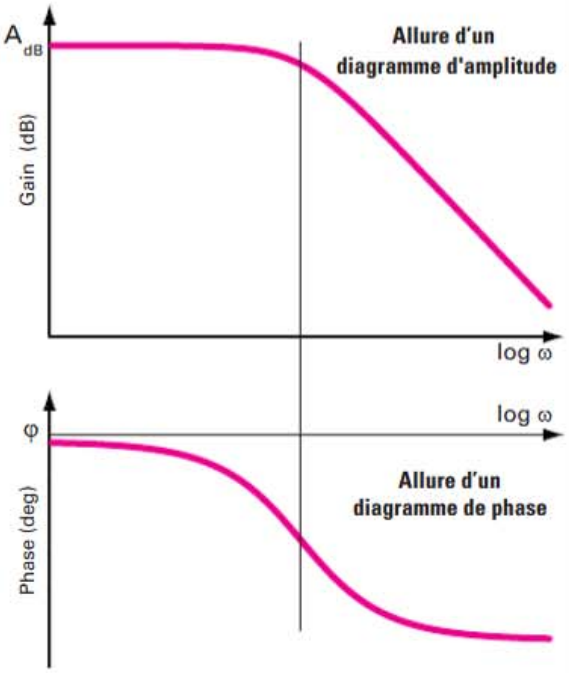
Fonction de transfert complexe

• Diagramme de BODE

La représentation dans le plan de Bode de la réponse en fréquence consiste à effectuer deux tracés, l'un d'amplitude (ou module) et l'autre de phase (ou argument).

La première représente le rapport d'amplitude $A(\omega)=\frac{|S(\omega)|}{|E(\omega)|}$ de H(jω) en décibels, définie par :
$A_{dB}(\omega)=20\ log_{10}|H(j\omega)|$ en fonction de $log_{10}(\omega)$. C'est donc une représentation en coordonnées semi-logarithmiques.

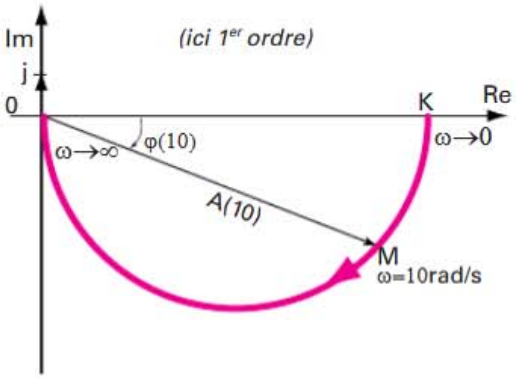
La seconde représente la phase (ou déphasage) également en fonction de $log_{10}\ \omega$.
Pour une valeur donnée de la pulsation, on lit l'amplitude et le déphasage correspondants sur chacun des diagrammes. Le déphasage est en général négatif (réponse en retard) et les amplitudes tendent vers zéro lorsque les pulsations augmentent (ceci est dû au caractère fondamentalement passe-bas des servomécanismes).
La représentation de Bode, contrairement au diagramme de Black, ne permet pas le passage de la FTBO vers la FTBF.



• Diagramme de NYQUIST

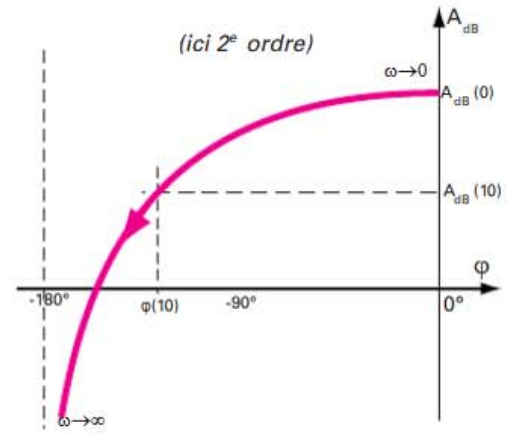
Ce diagramme est le plus naturel car il est tout simplement la représentation de H(jω) dans le plan complexe. C'est en fait la représentation des points de module $A(\omega)=|H(j\omega)|$ et d'argument $\varphi(\omega)=Arg[H(j\omega)]$.

Attention le module n'est pas en décibels.
Pour une pulsation donnée (ici 10 rad.s^{-1}), on lit l'amplitude A(10) en mesurant le segment OM et le déphasage φ(10) en mesurant l'angle polaire. C'est une représentation en coordonnées polaires. La flèche sur le tracé indique le sens croissant des pulsations.



• Diagramme de BLACK

La réponse en fréquence dans le plan de Black est la représentation de l'amplitude A(ω) de H(jω) en décibels, définie par $A_{dB}(\omega)=20\ log_{10}|H(j\omega)|$ en fonction de la phase φ(ω) en degrés.
Comme dans le diagramme de Nyquist, la courbe obtenue est graduée en ω. L'amplitude et le déphasage correspondant à une pulsation donnée (ici 10 rad.s^{-1}) sont lus respectivement en ordonnée et en abscisse.
La flèche sur le tracé indique le sens croissant des pulsations.



Hendrik W. BODE
1905-1982

Harry NYQUIST
1889-1976

Harold S. BLACK
1898-1983

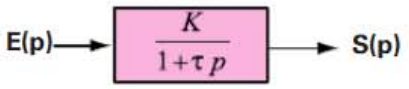
10.4. SYSTÈMES DU PREMIER ORDRE

10.4.1. SYSTÈME DU PREMIER ORDRE CLASSIQUE

• Définition

Un système est du premier ordre classique si la fonction de transfert de ce système est de la forme (il correspond à une équation différentielle du 1er ordre) : $H(p)=\frac{K}{1+\tau p}$

avec K : gain statique $\left(K=\frac{Sortie}{Entrée}\right)$ et τ : constante de temps

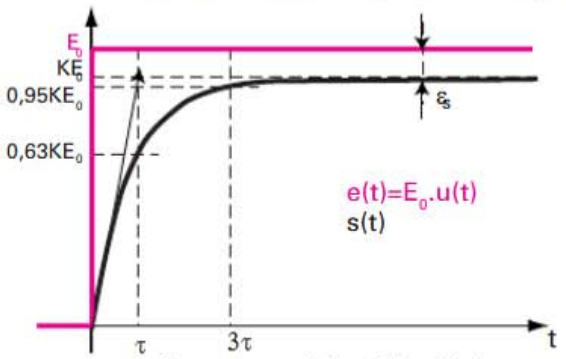


• Réponse indicielle

Soumettons le système à un échelon E_0 : soit $e(t) = E_0.u(t)$

$S(p)=K\frac{E_0}{p(1+\tau p)}=KE_0\left[\frac{1}{p}-\frac{\tau}{1+\tau p}\right]$ soit s(t) la réponse d'un tel système, alors elle pourra se mettre sous la forme : $s(t)=KE_0(1-e^{\frac{-t}{\tau}})u(t)$ avec u(t) la fonction échelon unitaire.

- La pente à l'origine est $K.E_0/\tau$
- La pente à l'infini est nulle.
- Pour t = 0, la réponse est s(0) = 0
- Pour t tendant vers l'infini, la réponse tend vers $K.E_0$
- Au bout du temps τ la réponse atteint 63% de la réponse finale.
- Au bout d'un temps 3 τ, la réponse atteint 95% de la réponse finale.



Réponse temporelle à un échelon (K <1)

Temps de réponse à 5% qui permet de caractériser la rapidité du système et de définir les régimes transitoire et permanent.

$$T_{r5\%} \approx 3\tau$$

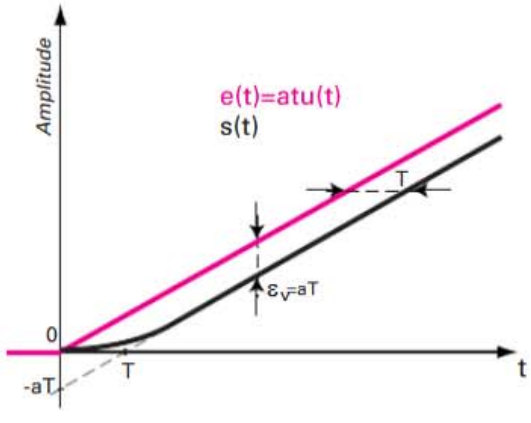
Erreur de position (différence entre consigne et réponse en régime permanent).

$$\varepsilon_s = E_0\,(1\text{-}K)$$

Un système du premier ordre classique ne possède pas d'erreur de position si son gain statique est égal à 1

• Réponse à une rampe

Soumettons le système à une rampe de pente a : soit e(t) = a.t.u(t)
En utilisant les transformées de Laplace et considérant que le système part du repos, la réponse du système est de la forme : $S(p)=\frac{K.a}{p^2(1+\tau p)}$ la réponse s(t) est la transformée inverse, déterminée par décomposition de cette fraction en éléments simples. $s(t)=Ka\left[t-\tau+\tau e^{\frac{-t}{\tau}}\right]u(t)$



Réponse temporelle à une rampe de pente a pour K = 1

Pour K = 1,
s(t) = 0 pour t = 0
s(t) tend vers a (t-τ), droite parallèle à e(t) lorsque t tend vers l'infini.
Tangente horizontale à l'origine.
L'écart de traînage est égal à aτ. On dit que la sortie suit l'entrée avec un retard τ.
Si K est différent de 1, alors la réponse tend vers une droite d'équation y = K.a (t-τ) qui dans tous les cas conduit au résultat suivant : l'écart de traînage tend vers l'infini.

Un système du premier ordre classique n'admet une erreur de traînage constante que si son gain statique vaut 1.

CPGE

Système du premier ordre classique

• Réponse fréquentielle

La fonction de transfert complexe s'écrit : $H(j\omega) = \dfrac{K}{1 + j\tau\omega}$

• Diagrammes de BODE

$$G_{dB} = 20\log K - 20\log\sqrt{1+\tau^2\omega^2}$$

• Pour des pulsations faibles

$\omega \to 0 \quad G_{dB} \to 20\log K$ Il s'agit d'une asymptote horizontale.

$\tau^2\omega^2 >> 1$

• Pour les pulsations élevées

$\omega \to \infty \quad G_{dB} \to 20\log K / \tau - 20\log\omega$ Asymptote oblique de pente -20 dB/décade Intersection des deux asymptotes pour $\omega_c =$ (Pulsation de cassure).

Décalage de la courbe par rapport aux asymptotes, 1 dB pour les pulsations double et moitié de la pulsation de cassure et 3 dB pour la pulsation de cassure.

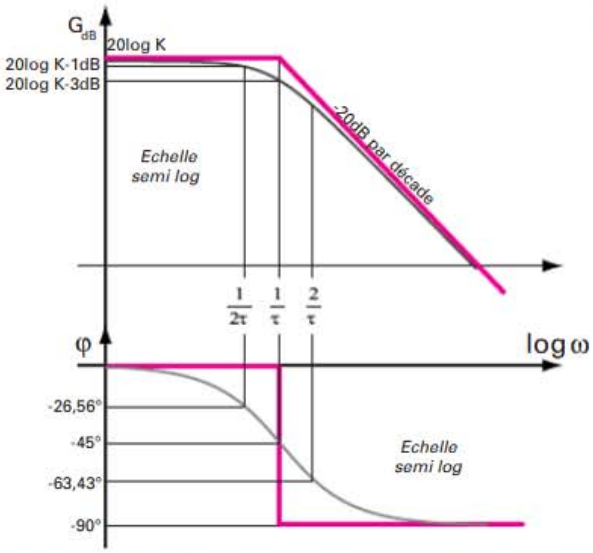


Diagramme asymptotique de gain

$$G_{dB} = 20\log K - 20\log\sqrt{1+\tau^2\omega^2}$$

Diagramme asymptotique de phase

$$\varphi = Arg\left[H(j\omega)\right] = Arg\left[\frac{K}{1+j\tau\omega}\right] = -\arctan(\tau\omega)$$

La représentation donnée ici correspond au diagramme asymptotique. Les valeurs particulières pour la pulsation de cassure et les asymptotes suffisent au tracé.

• Diagramme de NYQUIST

Le diagramme de Nyquist est la représentation de H(jω) dans le plan complexe.

C'est la représentation de la fonction complexe : $H(j\omega) = \dfrac{K}{1+j\tau\omega} = \dfrac{K(1-j\tau\omega)}{1+\tau^2\omega^2} = \dfrac{K}{1+\tau^2\omega^2} + j\dfrac{-K\tau\omega}{1+\tau^2\omega^2}$

On obtient un demi-cercle de rayon K/2. Pour un point M de la courbe, la phase est l'angle polaire φ et l'amplitude est le module OM.

Cette courbe doit être graduée en pulsations, la flèche indiquant le sens croissant.

- à pulsation très faible, le déphasage est nul et l'amplitude est K.
- La pulsation de cassure ωc = 1/T correspond au point d'abscisse K/2 et d'ordonnée K/2. A cet endroit, on retrouve une phase (angle polaire) = - π/4.
- A haute pulsation, le gain tend vers 0 : point (0,0) sur le diagramme (ce point n'est jamais atteint puisqu'il correspond à une pulsation infinie). La phase tend vers -π/2.

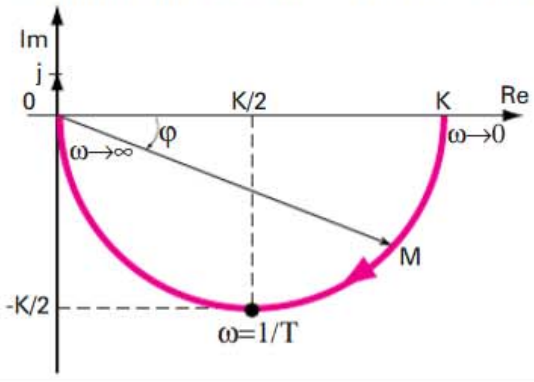


Diagramme de Nyquist
1er Ordre Classique

$$H(j\omega) = \frac{K}{1+j\tau\omega} = \frac{K(1-j\tau\omega)}{1+\tau^2\omega^2} = \frac{K}{1+\tau^2\omega^2} + j\frac{-K\tau\omega}{1+\tau^2\omega^2}$$

• Diagramme de BLACK

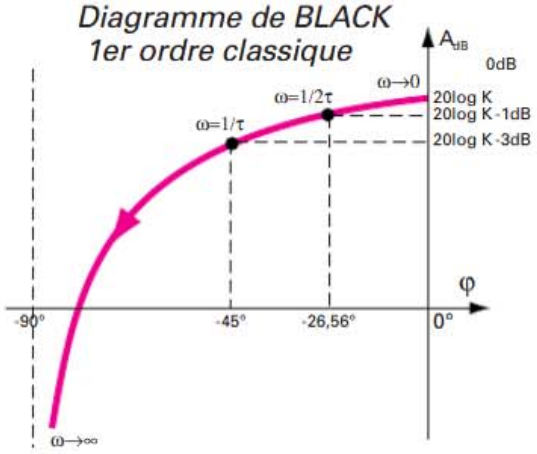
Le diagramme de Black est la représentation dans le plan (ω, φ) de H(jω).
La courbe peut se tracer point par point en utilisant les valeurs particulières trouvées précédemment à savoir :

Pulsation ω	Amplitude AdB	Phase φ
$\omega \to 0$	$20\log K$	0
$\omega = \frac{1}{2\tau}$	$20\log K - 1\,dB$	-26,56°
$\omega = \frac{1}{\tau}$	$20\log K - 3\,dB$	- 45°
$\omega \to \infty$	$-\infty$	- 90°

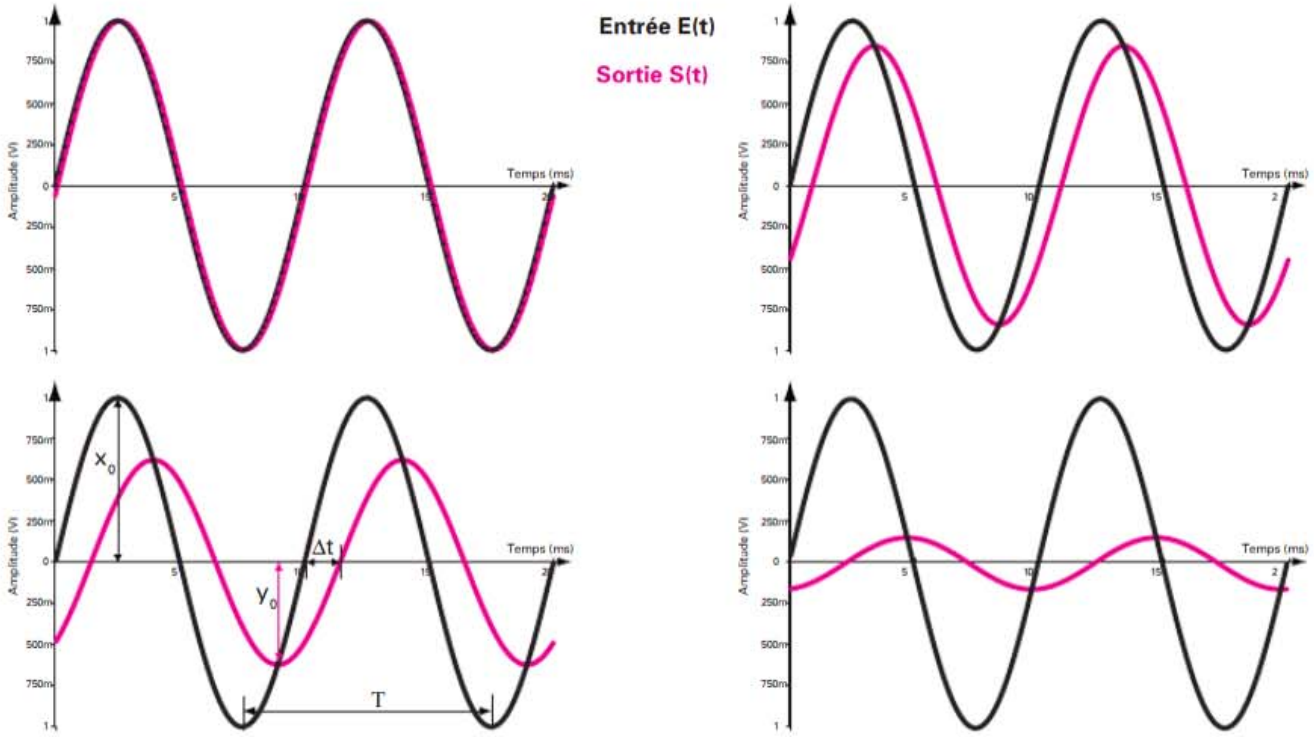
L'avantage de cette représentation réside dans le fait qu'une modification du gain statique se traduit par une simple translation verticale de la courbe de réponse.

Le diagramme de **Black** est très utilisé pour déterminer le réglage ou la correction d'un système asservi.
Il est gradué d'une manière particulière (permettant le passage FTBO vers FTBF) et s'appelle alors abaque de **Black-Nichols**.

Diagramme de BLACK
1er ordre classique



• Réponse temporelle à une entrée sinusoïdale



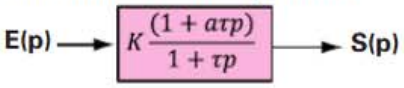
La lecture des différents diagrammes n'étant pas forcément très simple, on pourra comparer pour un même système du premier ordre sa réponse fréquentielle pour différentes valeurs de la pulsation d'entrée et constater l'évolution de l'amplitude du signal de sortie ainsi que son déphasage. On constate que ce système laisse passer les pulsations faibles mais filtre les pulsations élevées. Ce système se comporte comme un filtre passe-bas.

10.4.2. SYSTÈME DU PREMIER ORDRE GÉNÉRALISÉ

• Définition

Un système est du premier ordre généralisé si la fonction de transfert de ce système est de la forme :

$$H(p) = K\frac{(1+a\tau p)}{1+\tau p}$$



avec K : gain statique τ : constante de temps et **a** une constante strictement positive.

• Réponse indicielle

$$S(p) = KE_0\frac{(1+a\tau p)}{p(1+\tau p)} = KE_0\left[\frac{1}{p(1+\tau p)} - \frac{a\tau}{1+\tau p}\right] \quad \text{avec} \quad E(p) = \frac{E_0}{p}$$

avec u(t) la fonction échelon.

Il reste à déterminer la transformée inverse de la deuxième partie, à savoir :

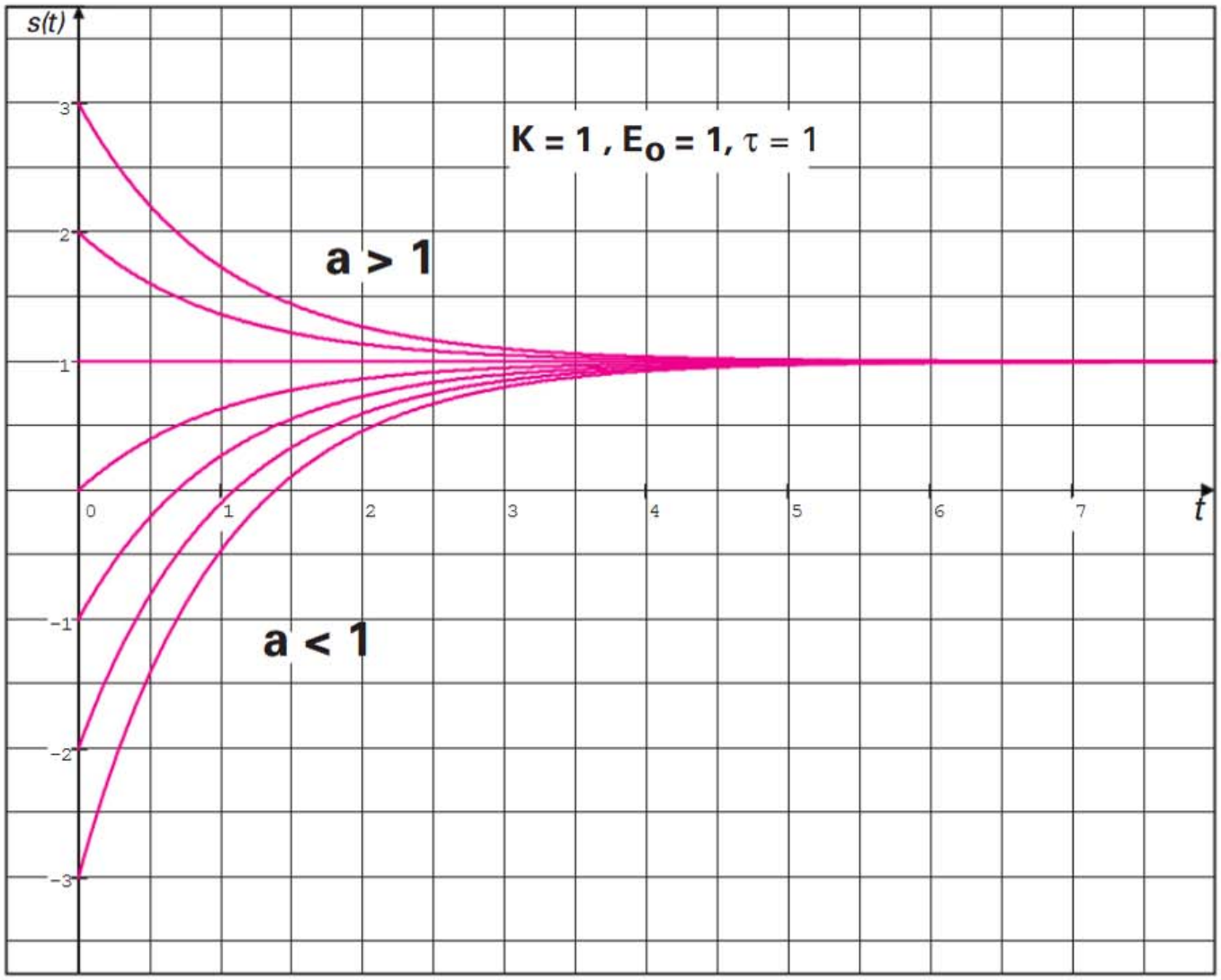
$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{KE_0 a}{p+\frac{1}{\tau}}\right] = KE_0 a e^{\frac{-t}{\tau}}u(t)$$

la solution sera donc de la forme : $s(t) = KE_0\left[1+(a-1)e^{\frac{-t}{\tau}}\right]u(t)$

$$s(0) = KE_0 a \quad \lim_{t\to\infty} s(t) = KE_0$$

$$s'(t) = -KE_0\frac{(a-1)}{\tau}e^{\frac{-t}{\tau}} \quad s'(0) = -KE_0\frac{(a-1)}{\tau}$$

Ce qui donne la représentation suivante :



• Réponse fréquentielle

La fonction de transfert complexe est de la forme $H(j\omega) = K\dfrac{1 + aj\tau\omega}{1 + j\tau\omega}$

• Diagrammes de BODE

$G_{db} = 20\log|1 + aj\tau\omega| + 20\log\left|\dfrac{K}{1 + j\tau\omega}\right|$ le deuxième terme a déjà été étudié

On va donc étudier la représentation de la première partie et pour obtenir la représentation globale, il suffira de faire une somme.

$$G_{db} = 20\log|1 + aj\tau\omega| = 20\log\sqrt{1 + a^2\tau^2\omega^2}$$

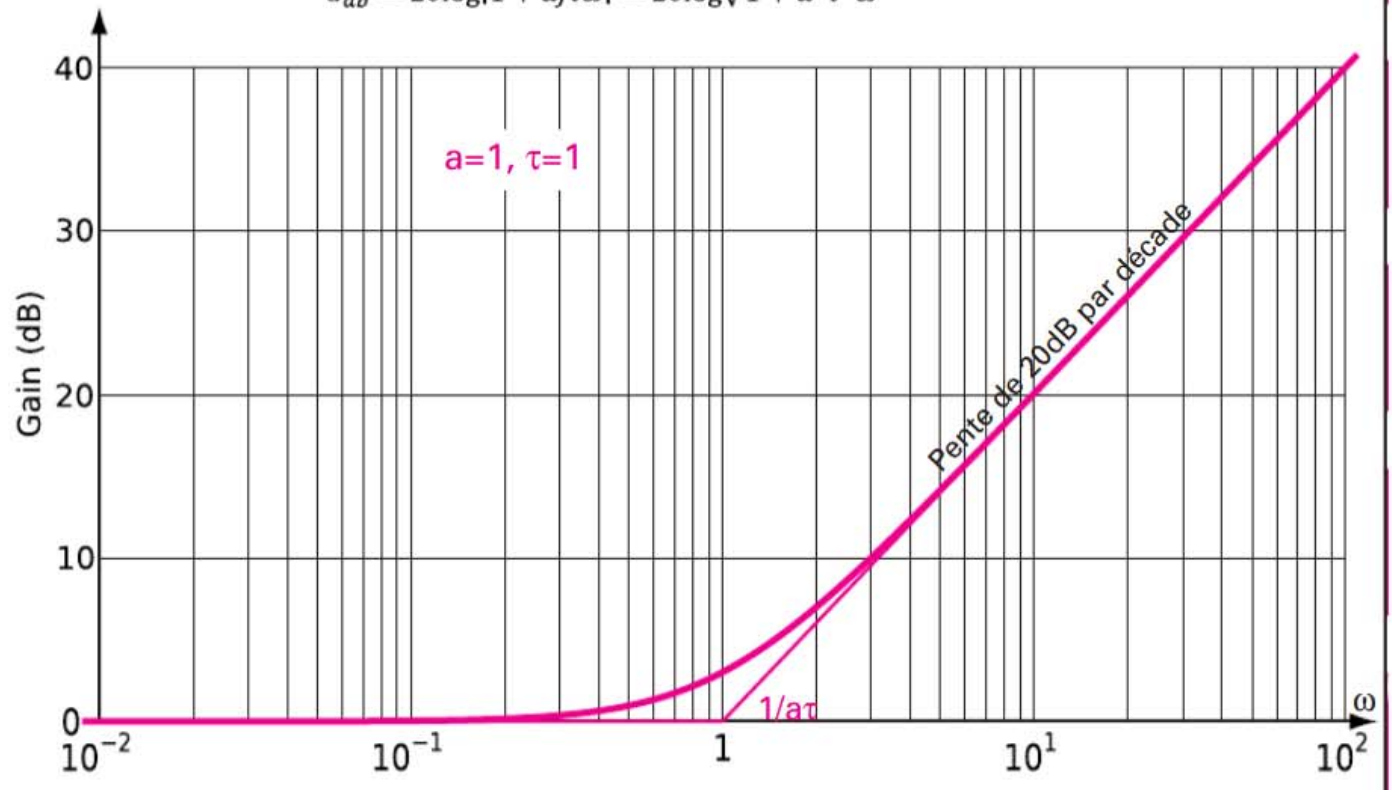
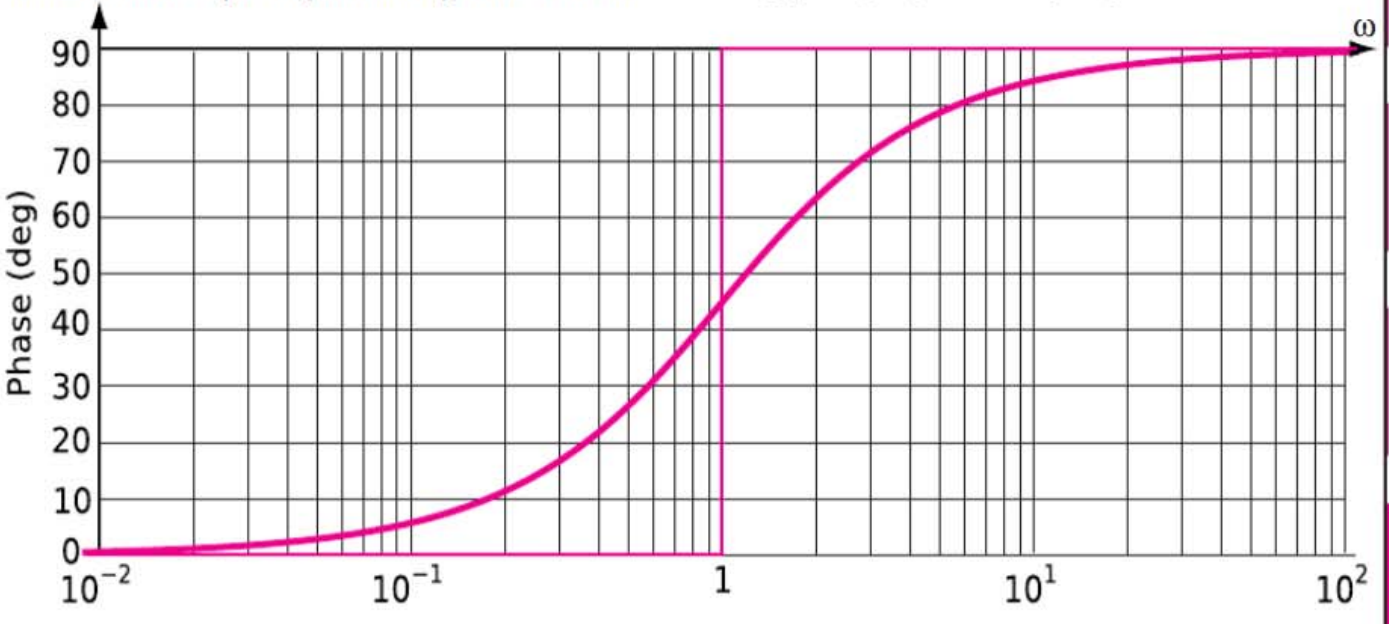


Diagramme de phase $\varphi = Arg(1 + aj\tau\omega) + Arg\left[\dfrac{K}{1 + j\tau\omega}\right]$

Comme pour le gain, nous pouvons remarquer que la deuxième partie a déjà été traitée. Il ne reste à étudier que la première partie à savoir : $\varphi = Arg(1 + aj\tau\omega) = \arctan(a\tau\omega)$



Système du premier ordre généralisé

• Diagrammes de BODE généralisé

Diagramme de gain $G_{db} = 20\log|1 + aj\tau\omega| = 20\log\sqrt{1 + a^2\tau^2\omega^2}$

Pour la somme on retrouvera deux cas :

a >1 et donc $\omega_{c1} < \omega_{c2}$ **a <1** et donc $\omega_{c1} > \omega_{c2}$

Point d'inflexion pour ω_M (intersection de l'asymptote avec la courbe).

$$20\log K a\tau\omega_M = 20\log\frac{K\sqrt{1+a^2\tau^2\omega_M{}^2}}{\sqrt{1+\tau^2\omega_M{}^2}} \quad \text{Et donc} \quad \omega_M = \frac{1}{\tau\sqrt{a}}$$

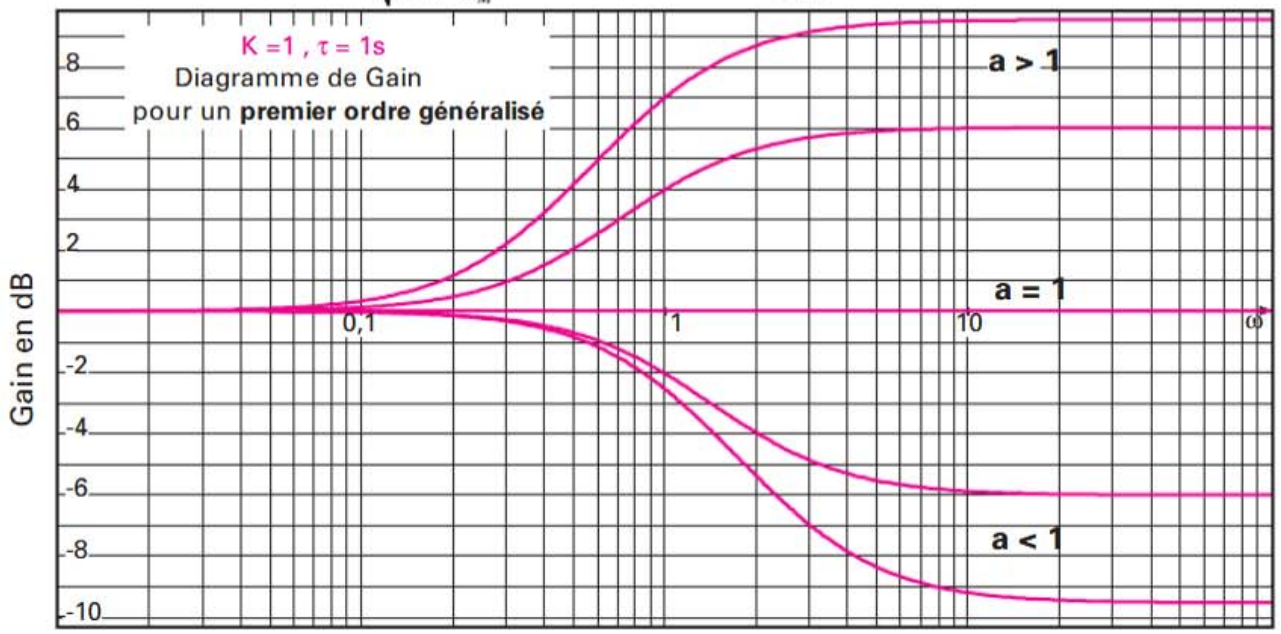
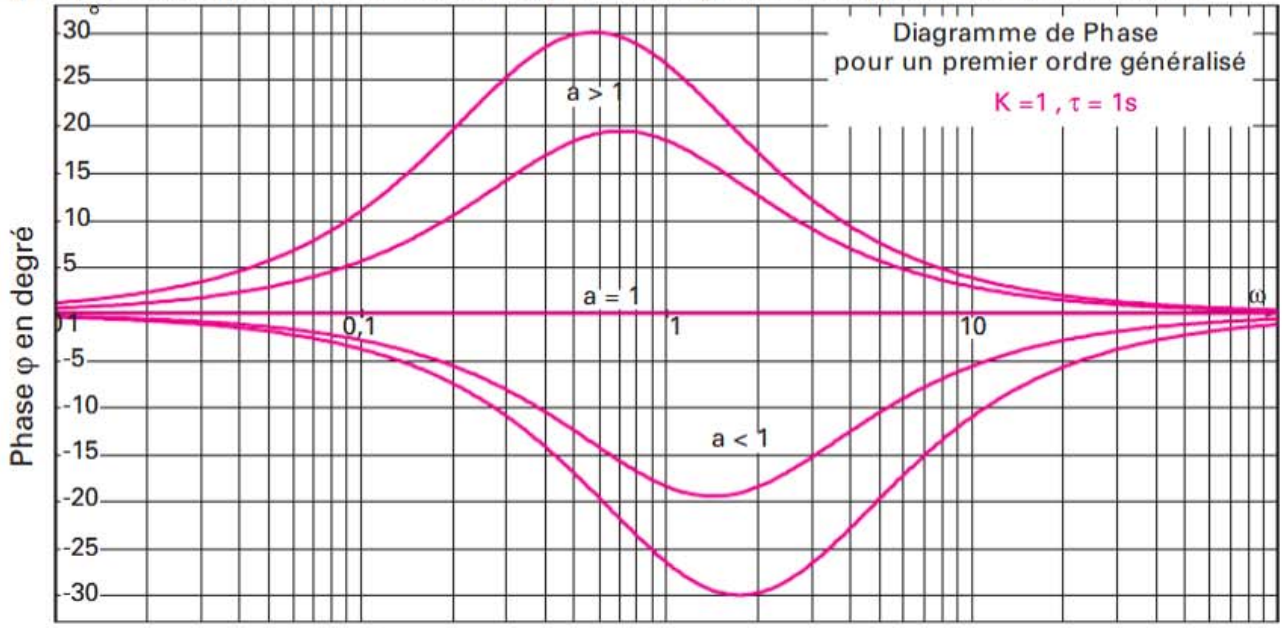


Diagramme de phase : $\varphi = Arg(1 + aj\tau\omega) + Arg\left[\frac{K}{1 + j\tau\omega}\right]$ $\varphi = Arg(1 + aj\tau\omega) = \arctan(a\tau\omega)$

ce qui après superposition nous donnera pour le diagramme de phase en fonction de a :



Valeur de l'extrémum pour $\frac{d\varphi}{d\omega} = 0 \quad pour \quad \omega = \frac{1}{\tau\sqrt{a}} = \omega_M$

Valeur maxi du déphasage $\tan\varphi_M = \frac{a-1}{2\sqrt{a}} \quad (a>1)$ $\tan\varphi_M = \frac{1-a}{2\sqrt{a}} \quad (a<1)$

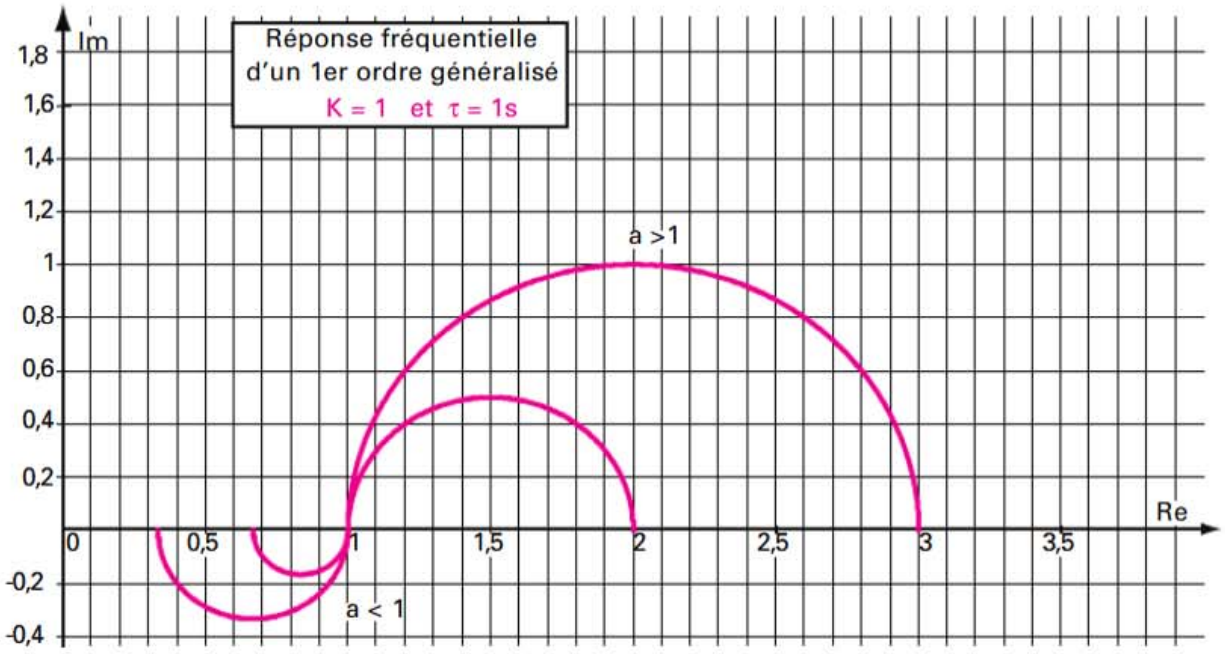
Le déphasage maxi est indépendant du gain et ne dépend que de **a**. A remarquer que si **a** est supérieur à 1 on peut avoir de l'avance de phase, ce qui correspond à une réponse en avance par rapport à l'entrée.

• Diagramme de NYQUIST

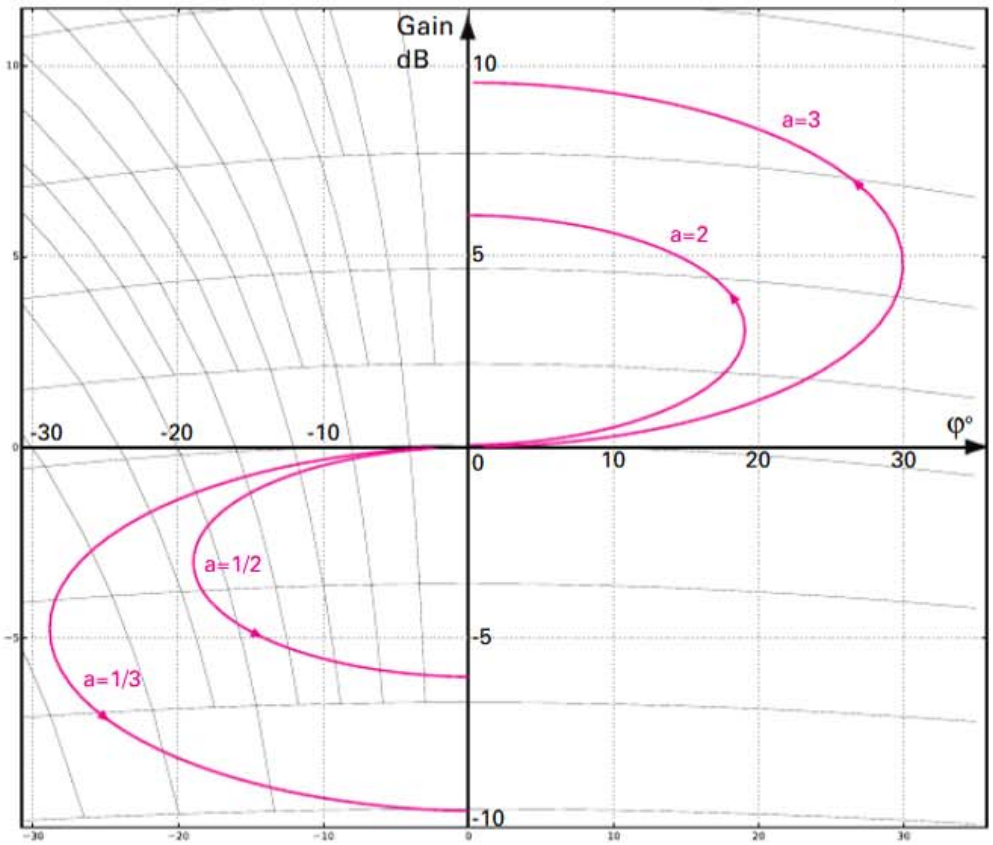
Relation entre la partie réelle et la partie imaginaire du nombre complexe H(jω)

$$[\Im(H(j\omega))]^2 = (\Re(H(j\omega)) - K)(aK - \Re(H(j\omega)))$$

La partie imaginaire est positive pour a>1 et négative sinon.
Point particulier pour $\omega \to 0$, $Re[H(j\omega)]=K$



• Diagramme de BLACK



10.5. SYSTÈME DU DEUXIÈME ORDRE

10.5.1. GÉNÉRALITÉS

• Définition

Ces systèmes sont caractérisés par une équation différentielle du deuxième ordre.

$$a_2\,\ddot{y}(t)+a_1\,\dot{y}(t)+a_0\,y(t)=b_0\,x(t)$$

Afin de standardiser la représentation des systèmes du deuxième ordre, des paramètres normalisés se substituent aux coefficients a_0, a_1, a_2 et b_0.
L'équation différentielle s'écrit sous la forme : $\dfrac{1}{\omega_0^{\,2}}\dfrac{d^2s(t)}{dt^2}+\dfrac{2\xi}{\omega_0}\dfrac{ds(t)}{dt}+s(t)=Ke(t)$

Les paramètres ont chacun une signification physique
que nous justifierons par la suite :

K : gain statique
ξ: facteur d'amortissement
ω_0 : pulsation propre non amortie en rad.s^{-1}

Cherchons dans l'espace fréquentiel, la fonction de transfert du système. Ceci en supposant qu'il part du repos à l'instant t=0
La fonction de transfert (avec s(0)=s'(0)=0)

$$s(t)\xrightarrow{\mathcal{L}}S(p)$$
$$\frac{ds(t)}{dt}\xrightarrow{\mathcal{L}}pS(p)-s(0^+)\qquad \textit{théorème de la dérivation}$$
$$\frac{d^2s(t)}{dt^2}\xrightarrow{\mathcal{L}}p^2S(p)-ps(0^+)-s'(0^+)$$
$$\mathcal{L}\left[f^{(n)}(t)\right]=p^nF(p)-p^{n-1}f(0^+)-p^{n-2}f'(0^+)-\cdots$$

$$\frac{1}{\omega_0^{\,2}}p^2S(p)+\frac{2\xi}{\omega_0}pS(p)+S(p)=KE(p)$$
$$S(p)\left[\frac{p^2}{\omega_0^{\,2}}+p\frac{2\xi}{\omega_0}+1\right]=KE(p)$$

$$H(p)=\frac{S(p)}{E(p)}=\frac{K}{\left[1+\dfrac{2\xi}{\omega_0}p+\dfrac{1}{\omega_0^2}p^2\right]}$$

10.5.2. RÉPONSES AUX ENTRÉES TYPES

• Réponse à un échelon

$\dfrac{1}{\omega_0^{\,2}}\dfrac{d^2s(t)}{dt^2}+\dfrac{2\xi}{\omega_0}\dfrac{ds(t)}{dt}+s(t)=Ke(t)$ avec $e(t)=E_0\,u(t)$

Remarque : Si l'entrée du système reste constante, lorsque le régime permanent est atteint, les dérivées première et seconde de la sortie s(t) sont nulles. La sortie est alors proportionnelle à l'entrée (rapport K). Ceci justifie le nom de gain statique donné au coefficient K (à mettre quand système stable).
La transformée de Laplace appliquée à l'entrée e(t) conduit à : $E(p)=\dfrac{E_0}{p}$

$$S(p)=E_0K\left[\frac{1}{p}-\frac{\dfrac{p}{\omega_0^{\,2}}+\dfrac{2\xi}{\omega_0}}{1+\dfrac{2\xi}{\omega_0}p+\dfrac{p^2}{\omega_0^{\,2}}}\right]=E_0K\left(\frac{1}{p}-\hat{S}(p)\right)\qquad \text{D'où}\quad S(p)=\frac{E_0K}{p\left[1+\dfrac{2\xi}{\omega_0}p+\dfrac{p^2}{\omega_0^{\,2}}\right]}$$

La décomposition en éléments simples conduit à : $S(p)=E_0K\left[\dfrac{1}{p}-\dfrac{\dfrac{p}{\omega_0^{\,2}}+\dfrac{2\xi}{\omega_0}}{1+\dfrac{2\xi}{\omega_0}p+\dfrac{p^2}{\omega_0^{\,2}}}\right]=E_0K\left(\dfrac{1}{p}-\hat{S}(p)\right)$

Pour faire la décomposition en éléments simples du second membre, il faut s'intéresser aux solutions de $1+\dfrac{2\xi}{\omega_0}p+\dfrac{p^2}{\omega_0^{\,2}}=0$ c'est-à-dire aux pôles de la fonction de transfert.

Le discriminant réduit s'écrit : $\Delta'=b'^2-ac\quad avec\ b=2b'$

$$\Delta'=\frac{1}{\omega_0^2}\left(\xi^2-1\right)$$

Il faut envisager trois cas :

$\xi < 1 \Rightarrow \Delta' < 0$ il y a deux racines complexes $p_{1,2} = -\xi\omega_0 \pm j\omega_0\sqrt{1-\xi^2}$

$\xi = 1 \Rightarrow \Delta' = 0$ il y a une racine double $p_{1,2} = -\omega_0$

$\xi > 1 \Rightarrow \Delta' > 0$ il y a deux racines réelles $p_{1,2} = -\xi\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\xi^2-1}$

10.5.3 RÉPONSE INDICIELLE EN RÉGIME OSCILLATOIRE ($\xi < 1$)

$$\tilde{S}(p) = \frac{p+2\xi\omega_0}{\omega_0^2+2\xi\omega_0 p+p^2} = \alpha\underbrace{\frac{p+a}{(p+a)^2+b^2}}_{\mathcal{L}^{-1}=\exp(-at).\cos(bt)} + \beta\underbrace{\frac{b}{(p+a)^2+b^2}}_{\mathcal{L}^{-1}=\exp(-at).\sin(bt)}$$

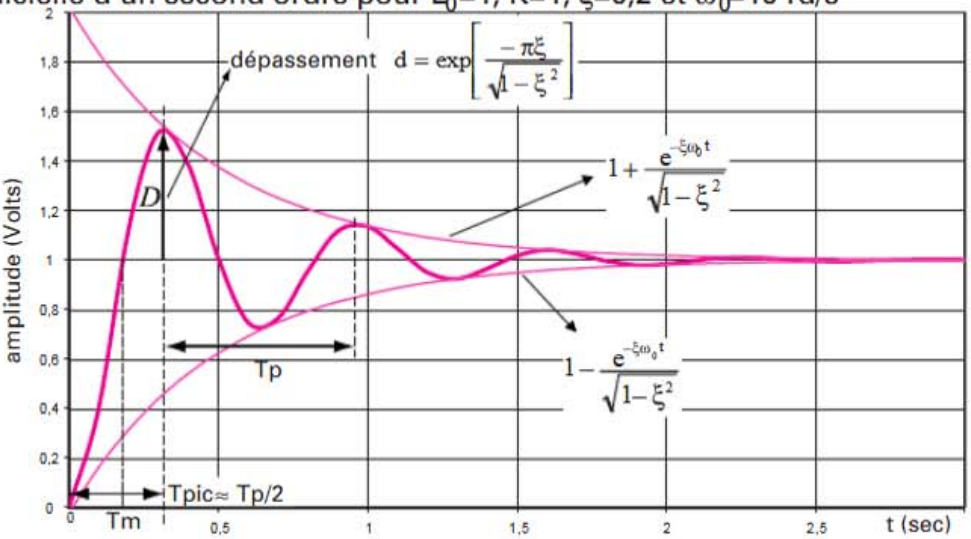
L'identification terme à terme sur les dénominateurs $\Rightarrow a=\xi\omega_0$ et $b=\omega_0\sqrt{1-\xi^2}$

Il vient ensuite $\alpha=1$ et $\beta=\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$ D'où $\tilde{S}(p) = \frac{p+\xi\omega_0}{(p+\xi\omega_0)^2+\omega_0^2(1-\xi^2)} + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\frac{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}}{(p+\xi\omega_0)^2+\omega_0^2(1-\xi^2)}$

Après transformation inverse, la solution s(t) peut se mettre sous la forme :

$$s(t) = E_0K\left[1-\frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin\left(\omega_0 t\sqrt{1-\xi^2}+\varphi\right)\right] \quad \text{avec} \quad \varphi = \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right)$$

Réponse indicielle d'un second ordre pour E_0=1; K=1; ξ=0,2 et ω_0=10 rd/s



- Le comportement du système est donc oscillant amorti. La pseudo-période des oscillations est caractérisée par la pseudo pulsation $\omega_p = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$ et $T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$
- L'amortissement est caractérisé par le dépassement. Le dépassement est l'amplitude de la première oscillation $d = \frac{D}{KE_0}$ exprimé en %.

Le dépassement vaut pour K=1 et E_0=1 : $d = 100\exp\left[\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right]$ (exprimé en %)

- Le temps de pic (1er maximum) : $t_{pic} = \frac{T_p}{2} = \frac{\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}}$ et $t_{k^{ème}\,pic} = \frac{k\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}}$
- Le temps de réponse à n % se mesure lorsque s(t) rentre dans une bande (K(1-n %), K(1+n %)) autour de la valeur finale et n'en ressort plus. $tr_{n\%} \approx \frac{1}{\xi\omega_0}Ln\left(\frac{100}{n}\right)$ En particulier pour n=5% $tr_{5\%} \approx \frac{3}{\xi\omega_0}$
- L'allure de la réponse dépend de la valeur de ξ.

Pour $\xi > 0,7$ pas d'oscillation.
Pour $\xi = 0,7$ le système est oscillant, l'oscillation n'étant plus perceptible après une demi-période.
Pour $\xi < 0,7$ le système est franchement oscillant.

- **La pente à l'origine est toujours nulle** et la réponse permanente tend vers KE_0.
- L'erreur de position ou l'écart statique est nul si K=1 et vaut $E_0(1-K)$ sinon $K \neq 1$.

10.5.4. RÉPONSE INDICIELLE EN RÉGIME APÉRIODIQUE (ξ >1)

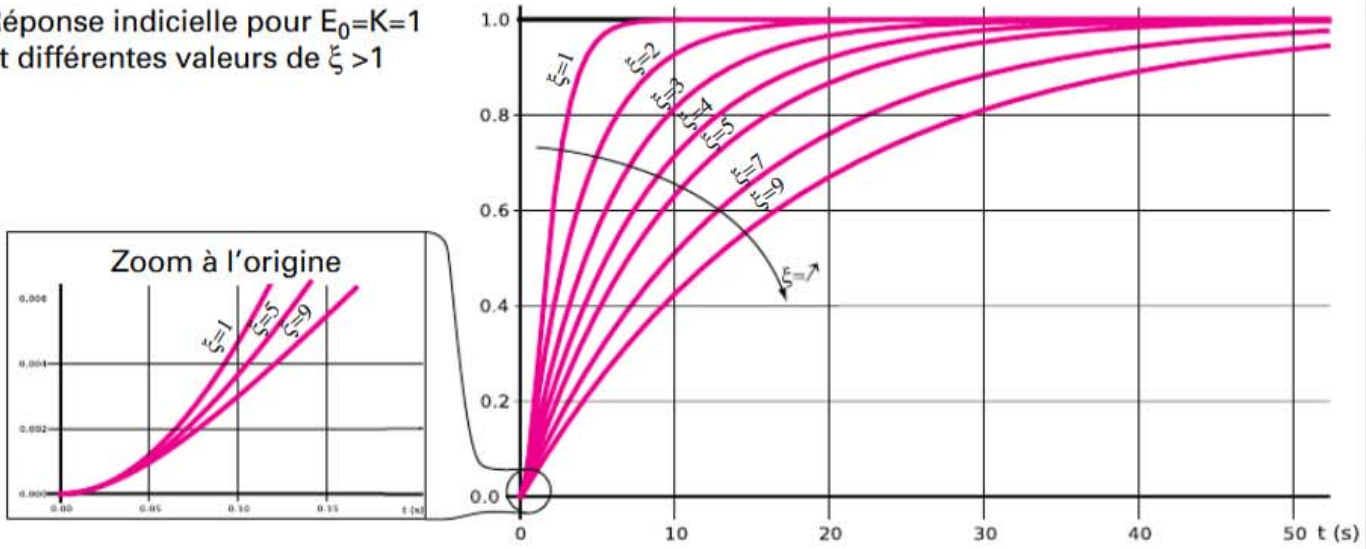
$$\bar{S}(p)=\alpha\frac{\tau_1}{1+\tau_1 p}+\beta\frac{\tau_2}{1+\tau_2 p} \quad \text{avec} \quad \tau_1=-\frac{1}{p_1}=\frac{1}{\omega_0\left(\xi+\sqrt{\xi^2-1}\right)} \qquad \tau_2=-\frac{1}{p_2}=\frac{1}{\omega_0\left(\xi-\sqrt{\xi^2-1}\right)}$$

L'identification donne $\alpha=\dfrac{1/\tau_1}{1/\tau_1-1/\tau_2}$ et $\beta=\dfrac{1/\tau_2}{1/\tau_2-1/\tau_1}$

La transformée de Laplace inverse de $\dfrac{\tau}{1+\tau p}$ est $\dfrac{1}{\tau}e^{-t/\tau}$

D'où $s(t)=E_0K\left[1-\dfrac{1}{\tau_1-\tau_2}\left(\tau_1e^{-t/\tau_1}-\tau_2e^{-t/\tau_2}\right)\right]$

Réponse indicielle pour E_0=K=1 et différentes valeurs de ξ >1



Le comportement du système est non oscillant amorti. Les exposants des exponentielles sont les pôles de la fonction de transfert.

L'allure de la courbe ressemble à celle d'un premier ordre, avec pour différence notable, la tangente horizontale à l'origine (dérivée nulle en t=0).
La valeur de la réponse tend vers KE_0 au bout d'un temps infini.
L'écart statique est défini de la même manière que pour un premier ordre et on retrouve le résultat suivant : l'écart statique est nul si K=1 et est constant non nul égal à E_0(1-K) dans les autres cas.

• Réponse indicielle en régime apériodique critique (ξ=1)

$$\bar{S}(p)=\frac{p+2\xi\omega_0}{\omega_0^2+2\xi\omega_0 p+p^2}=\frac{p+2\omega_0}{(\omega_0+p)^2} \qquad \bar{S}(p)=\underbrace{\frac{1}{\omega_0+p}}_{\mathcal{L}^{-1}=\exp(-\omega_0 t)}+\underbrace{\frac{\omega_0}{(\omega_0+p)^2}}_{\mathcal{L}^{-1}=\omega_0 t\exp(-\omega_0 t)}$$

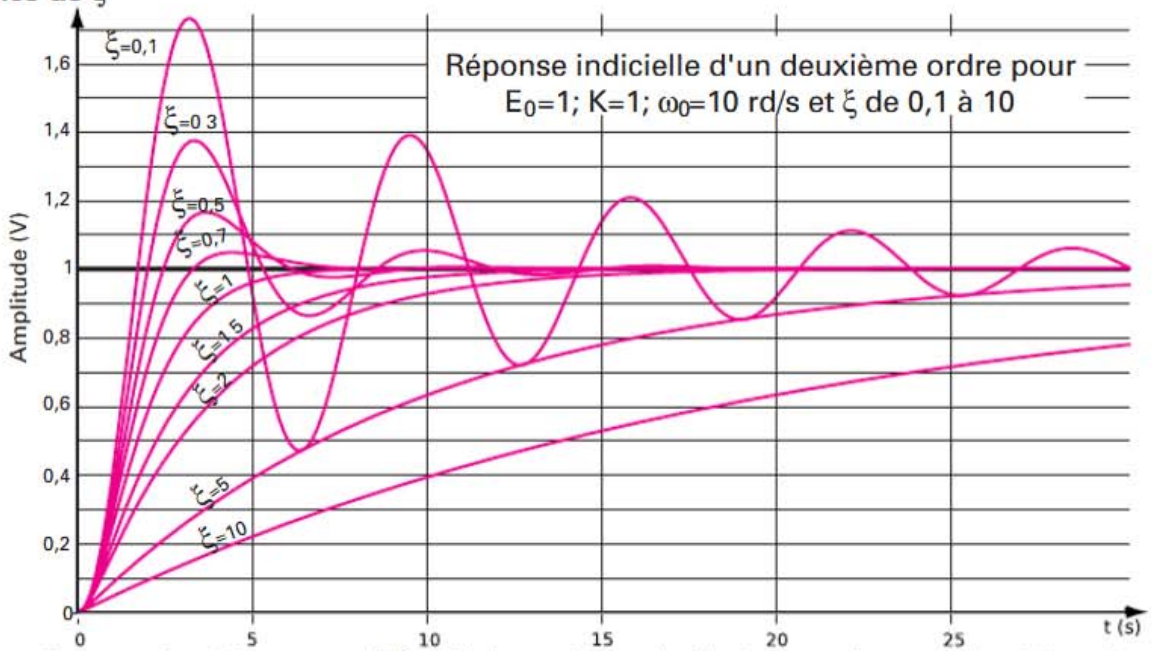
d'où $s(t)=E_0K\left[1-(1+\omega_0 t)e^{-\omega_0 t}\right]$

Le régime apériodique critique est un cas particulier du régime apériodique avec une racine double.
L'allure de la réponse temporelle est donc identique.
La pente à l'origine est nulle.
La valeur de la réponse en régime permanent est KE_0.
L'écart statique est nul si K=1. Dans le cas contraire l'écart est constant et égal à E_0(1-K).

On remarque que le système est plus rapide que dans le cas précédent.
Comme l'amortissement correspond à des pertes d'énergie, une diminution de l'amortissement provoque une augmentation du rendement.

Influence de ξ et ω_0

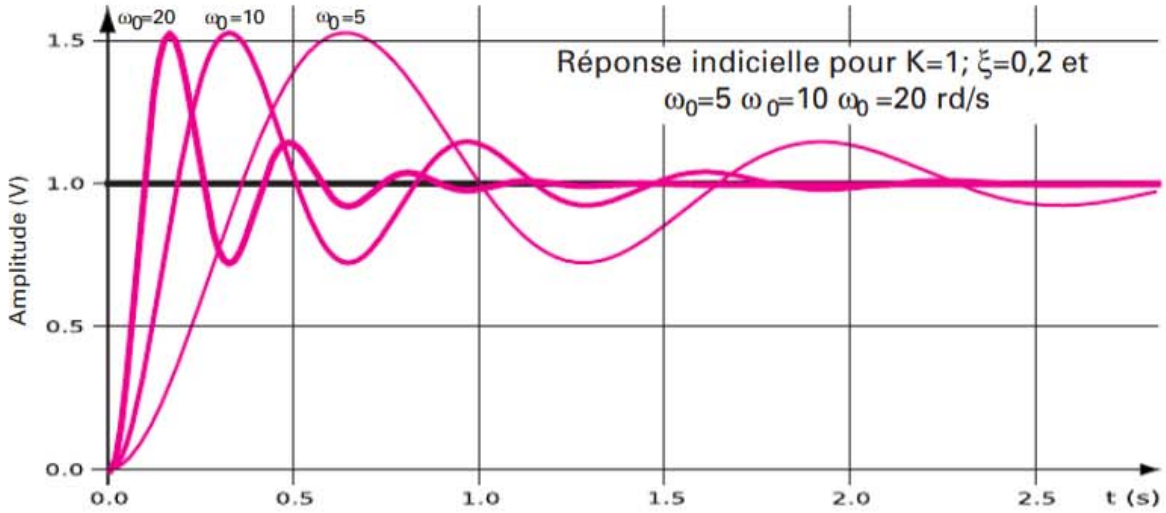
Influence de ξ



Si l'amortissement est trop grand (ξ=10), le système devient excessivement lent (courbe inférieure).

- Pour $\xi \geq 1$, il n'y a ni dépassement ni oscillation.
- Pour ξ=0,7, le système est oscillant, l'oscillation n'étant plus perceptible après une demi-période.
- Avec ξ=0,5, le système oscille sur une période.
- Si l'amortissement est trop faible, ($\xi \leq 0,2$), le système devient très oscillatoire.

10.5.5. INFLUENCE DE LA PULSATION PROPRE NON AMORTIE



A amortissement constant, plus la valeur de la pulsation est élevée, plus la réponse monte rapidement. Au bout de 2 secondes, la réponse correspondant à la pulsation de 5 rad/s est encore très oscillante alors que celle correspondant à 20 rad/s a atteint le régime permanent.

On remarque que l'amplitude de la première ondulation est identique dans les trois cas. Il en va de même pour les ondulations suivantes. Cela est dû au fait que l'amortissement entre deux vibrations consécutives, est indépendant de la pulsation propre non amortie.

Il est alors évident que, la réponse diminuant d'une valeur donnée à chaque vibration, un système qui vibre plus vite est plus rapide. Insistons sur le fait que ceci n'est vrai qu'à amortissement constant.

10.5.6. RÉPONSE À UNE RAMPE

e(t)=Vt u(t) donc $E(p)=\frac{V}{p^2}$

$$S(p)=\frac{V\,K}{p^2\left[1+\frac{2\xi}{\omega_0}p+\frac{p^2}{\omega_0^{\,2}}\right]}$$

La réponse s(t) est la transformée inverse de S(p) que l'on détermine après décomposition en éléments simples de la fraction rationnelle S(p).

$$S(p)=K\left[\frac{a}{p^2}+\frac{b}{p}+\frac{cp+d}{1+\frac{2\xi}{\omega_0}p+\frac{p^2}{\omega_0^2}}\right]$$ L'identification donne $a=1;\quad b=-\frac{2\xi}{\omega_0};\quad c=\frac{2\xi}{\omega_0^{\,3}};\quad d=\frac{4\xi^2-1}{\omega_0^2}$

De la même manière que précédemment la décomposition de $\frac{cp+d}{1+\frac{2\xi}{\omega_0}p+\frac{p^2}{\omega_0^2}}$ dépend des racines de $1+\frac{2\xi}{\omega_0}p+\frac{p^2}{\omega_0^{\,2}}$ c'est-à-dire de la valeur de ξ par rapport à 1.

Il existe donc trois cas :

• Réponse indicielle en régime oscillatoire (ξ <1)

Après transformation inverse, on obtient : $$s(t)=VK\left[t-\frac{2\xi}{\omega_0}+\frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}}\sin\left(\omega_0 t\sqrt{1-\xi^2}+\phi\right)\right]$$

Avec $\varphi=\arctan\left(\frac{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}{2\xi^2-1}\right)=2\arctan\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right)$

• Réponse indicielle en régime apériodique(ξ >1)

S(p) peut se mettre sous la forme suivante $S(p)=\frac{KV}{p^2(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)}$

Après transformation inverse, on obtient : $$s(t)=VK\left[t-\tau_1-\tau_2-\frac{1}{\tau_2-\tau_1}\left(\tau_1 e^{-t/\tau_1}-\tau_2 e^{-t/\tau_2}\right)\right]$$

Avec $\tau_1=\frac{1}{\omega_0\left(\xi-\sqrt{\xi^2-1}\right)}$ et $\tau_2=\frac{1}{\omega_0\left(\xi+\sqrt{\xi^2-1}\right)}$

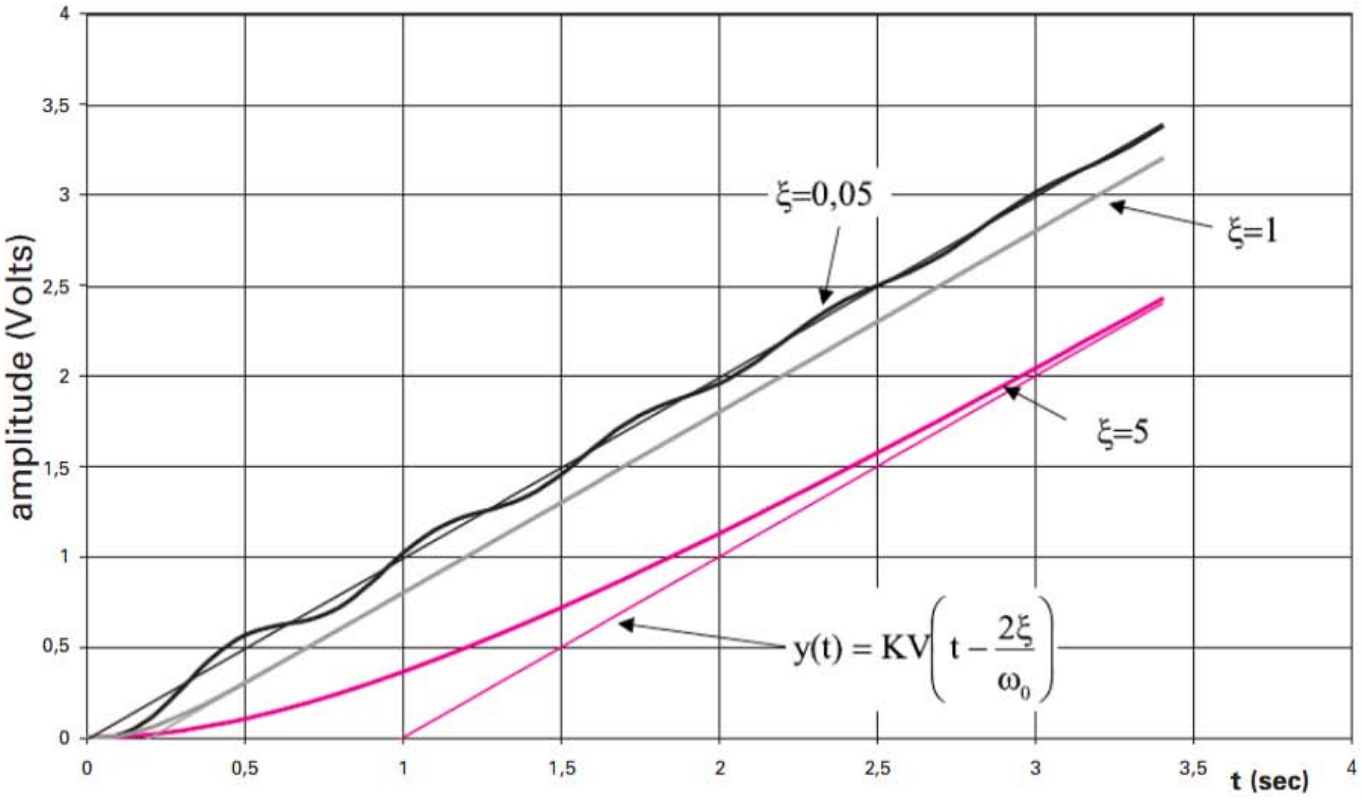
• Réponse indicielle en régime apériodique critique (ξ =1)

S(p) peut se mettre sous la forme suivante $S(p)=\frac{KV}{p^2(1+\tau p)^2}$

Après transformation inverse, il vient : $$s(t)=VK\left[t-2\tau+(t+2\tau)e^{-t/\tau}\right]$$

Avec $\tau=\frac{1}{\omega_0}$

• Allure des réponses



Réponse à une rampe pour K=1; V=1; ω=10 rad/s et ξ=0,05; 1; 5

La réponse temporelle ressemble à celle d'un premier ordre en régime permanent avec :

une réponse qui tend asymptotiquement vers une droite d'équation $y(t) = KV\left(t - \frac{2\xi}{\omega_0}\right)$

• Erreur de traînage

Quand K=1 : $\lim_{t\to\infty}\left(s(t) - e(t)\right) = -\frac{2V\xi}{\omega_0}$

On remarque que le terme $\frac{2\xi}{\omega_0}$ joue un rôle analogue à celui du terme τ pour un système du premier ordre.

L'écart de traînage augmente proportionnellement à l'amortissement (cf. graphe ci-dessus) et inversement proportionnellement à la pulsation non amortie.

Quand K≠1 : l'écart tend vers l'infini : le système ne suit pas.

Le régime transitoire est oscillant ou non suivant la valeur de ξ.

10.5.7. RÉPONSE HARMONIQUE

$$H(p)=\frac{S(p)}{E(p)}=\frac{K}{\left[1+\frac{2\xi}{\omega_0}p+\frac{1}{\omega_0^2}p^2\right]}$$ On remplace p par jω $\Rightarrow H(j\omega)=\frac{K}{\left[1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}+j\frac{2\xi}{\omega_0}\omega\right]}=\frac{K}{1-u^2+j2\xi u}$

avec $u=\frac{\omega}{\omega_0}$ = pulsation réduite

Amplitude : $\|H(j\omega)\|=\frac{K}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2+\left(\frac{2\xi\omega}{\omega_0}\right)^2}}=\frac{K}{\sqrt{\left(1-u^2\right)^2+\left(2\xi u\right)^2}}$

Phase : $\varphi=Arg\left[H(j\omega)\right]$ $\varphi=-\arctan\left[\frac{\frac{2\xi\omega}{\omega_0}}{1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}}\right]=-\arctan\left[\frac{2\xi u}{1-u^2}\right]$ Rappel : $Arg\left[\frac{1}{a+jb}\right]=-\arctan\frac{b}{a}$

• Diagramme de Bode

Amplitude en dB $\Rightarrow H_{dB}=20\log\left|H(j\omega)\right|$

$$H_{dB}=20\log K-20\log\sqrt{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2+\left(\frac{2\xi\omega}{\omega_0}\right)^2}=20\log K-20\log\sqrt{\left(1-u^2\right)^2+\left(2\xi u\right)^2}$$

$$H_{dB}=20\log K-10\log\left[\left(1-u^2\right)^2+\left(2\xi u\right)^2\right]$$

• Etude des limites de H_{dB}

- Quand ω→0 ; u→0 et H_{dB} = 20logK = constante
  La première asymptote est donc une droite horizontale d'ordonnée K_{dB}.
- Quand ω→∞ ; u→∞ et $\left[\left(1-u^2\right)^2+\left(2\xi u\right)^2\right]\rightarrow u^4$

$H_{dB} \approx 20 \log K-10 \log u^4$
$H_{dB} \approx 20 \log K - 40 \log u$
$H_{dB} \approx 20 \log K\omega_0^2 - 40 \log \omega$

H_{dB} tend asymptotiquement vers une droite de pente négative –40 dB / décade.

Le point d'intersection des 2 asymptotes s'effectue en un point tel que :

$$20\log K = 20\log K - 40\log u \quad \Rightarrow \quad u=1 \quad \Rightarrow \omega=\omega_0$$

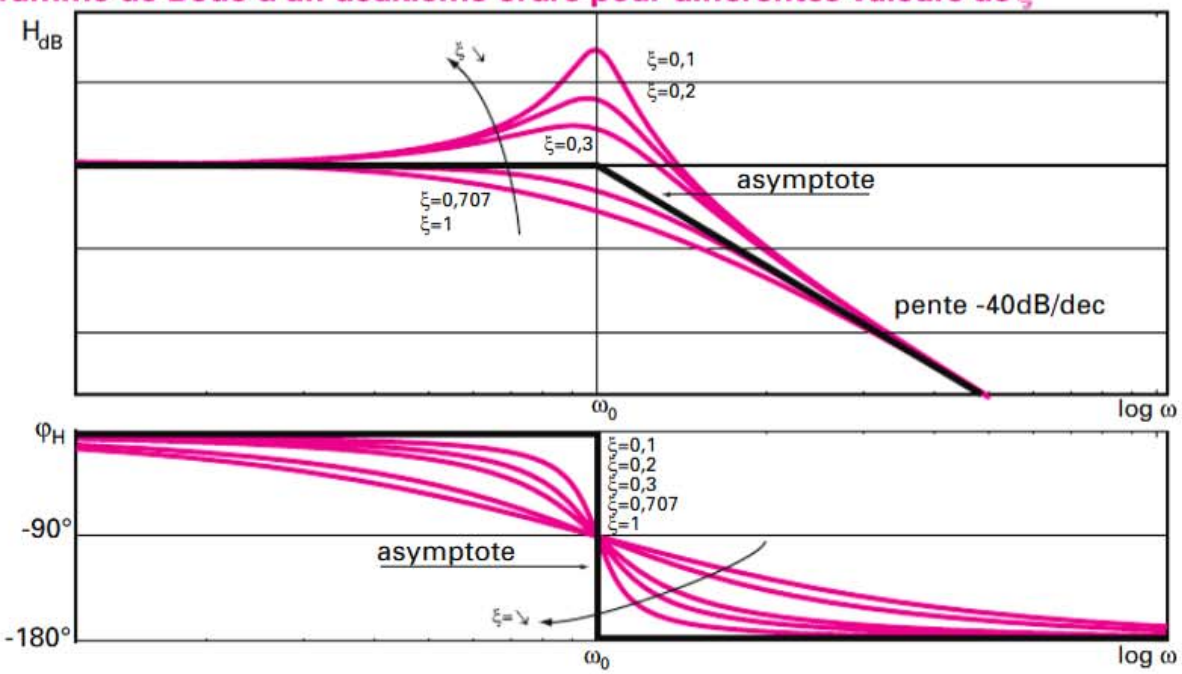
Remarque : Le facteur d'amortissement n'influe pas sur le diagramme asymptotique. Son influence est visible au niveau des courbes réelles de gain et de phase.

Examinons ce qui se passe pour $\omega=\omega_0$

$$H_{dB}=20\log K-10\log\left(2\xi\right)^2=20\log K-20\log 2\xi$$

- Quand ξ→0 $20\log 2\xi\rightarrow-\infty\Rightarrow H_{dB}\rightarrow+\infty$
- Quand ξ→1 $20\log 2\xi=6\,dB\Rightarrow H_{dB}=20\log K-6\,dB$
- Quand ξ>0 $20\log 2\xi\nearrow\Rightarrow H_{dB}\searrow$
- Si ξ = 0,7; on peut approximer la courbe de gain par le diagramme asymptotique.

• Diagramme de Bode d'un deuxième ordre pour différentes valeurs de ξ



On constate que la courbe de gain lorsque $\xi < 0{,}7$ présente un maximum à la pulsation ω_R (inférieure à ω_0) appelée pulsation de résonance.

Pour trouver ω_R on cherche $u_R = \frac{\omega_R}{\omega_0}$ / $\frac{d}{du}|H(u)| = 0 \Rightarrow \omega_R = \omega_0\sqrt{1-2\xi^2}$

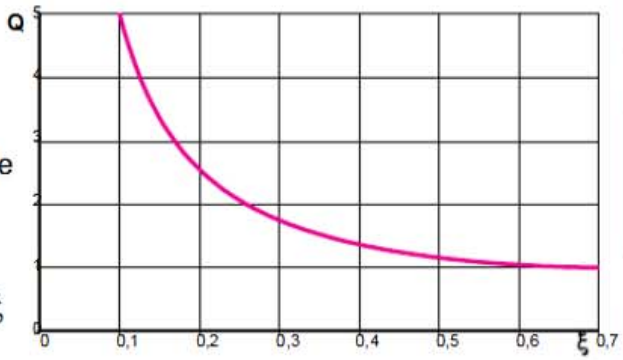
L'amplitude max vaut alors : $|H(j\omega_R)| = \frac{K}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$

Plus ξ est petit, plus l'amplitude de résonance est grande. Ceci est caractérisé par un facteur Q appelé **coefficient de surtension** ou **facteur de résonance**.
Il est défini par le rapport entre l'amplitude de résonance et l'amplitude en régime statique.

$$Q = \frac{|H(j\omega_R)|}{H(0)} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

Ou $QdB = \max(HdB) - HdB(0)$

La figure ci-contre montre l'évolution du coefficient de surtension en fonction du coefficient d'amortissement.

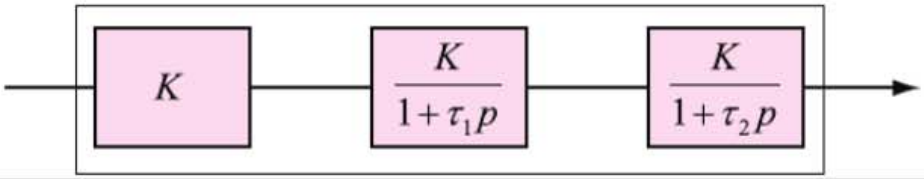


On constate que plus le coefficient d'amortissement ξ est faible, plus la surtension Q est élevée.

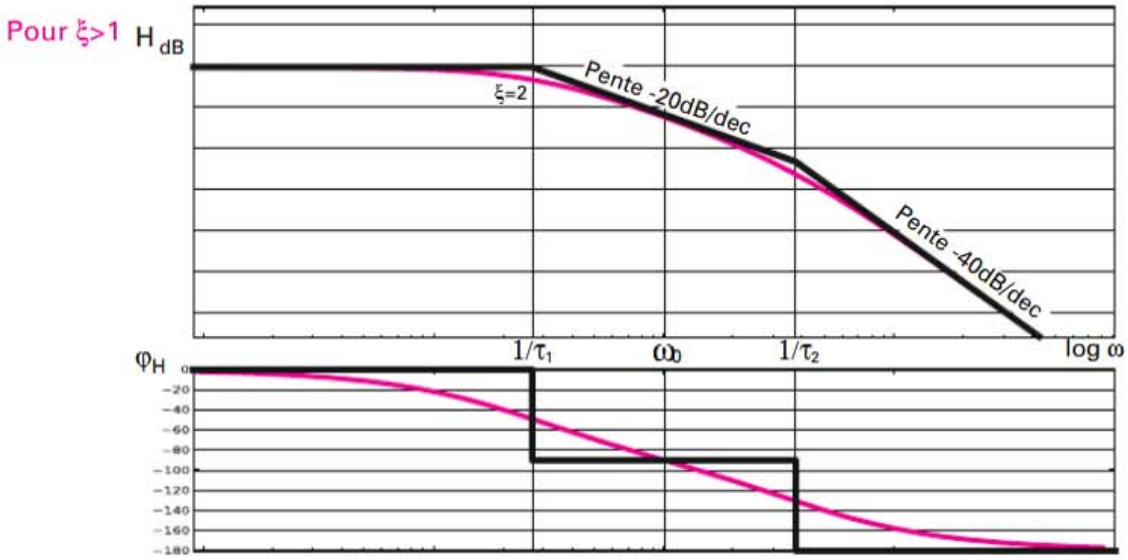
Plus la surtension de la réponse harmonique est grande plus le dépassement de la réponse à un échelon est grand.

Remarque : Dans le cas où les pôles de la fonction de transfert sont réels c'est-à-dire pour $\xi > 1$
H(p) peut se mettre sous la forme $H(p) = \frac{K}{(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)}$ avec $\frac{1}{\tau_1\tau_2} = \omega_0^{\,2} \Rightarrow \omega_0$ est au milieu de $\frac{1}{\tau_1}\frac{1}{\tau_2}$ en échelle log.

Le système du deuxième ordre peut alors être considéré comme le produit de deux premiers ordres.



Réponse harmonique



Remarques :

- Pour les amortissements de valeur 0,7 ou 1, l'allure des courbes est identique à celle des systèmes du premier ordre (mais attention, la pente est de –40 dB / décade pour l'amplitude et le déphasage maximum est de –180° pour la phase).

- Pour les amortissements de valeur plus importante (ξ=5), il apparaît une perte de signal importante même à basse fréquence (-3 dB et –45° pour 1 rd/s).

- Pour les amortissements faibles (ξ=0,2 ou 0,01) apparaît le phénomène de résonance, c'est-à-dire une augmentation de l'amplitude du signal de sortie aux abords de la pulsation propre non amortie. En effet, $\omega_R = \omega_0\sqrt{1-2\xi^2}$. La valeur de la pulsation de résonance est donc proche de celle de la pulsation propre non amortie pour les faibles valeurs de ξ.

- Le phénomène de résonance est parfois recherché lorsque l'on désire, en électronique, capter une station radio par exemple : on utilise un circuit résonant du deuxième ordre de facteur d'amortissement très faible (< 0,05) donc de coefficient de surtension supérieur à 10 et on fait travailler ce circuit autour de la fréquence que l'on désire capter.

Mais attention, la résonance ne correspond pas à un rendement du système supérieur à 1 qui est physiquement impossible. Le fait de dire que "l'amplitude du signal de sortie est plus grande que celle du signal d'entrée" impose d'abord que les grandeurs physiques soient identiques, ce qui n'est pas le cas général et surtout ne permet pas d'affirmer que le bilan énergétique est supérieur à 1 (d'ailleurs, la première affirmation est vraie pour tout système de gain statique supérieur à 1 même en l'absence de résonance, le gain d'énergie provenant alors d'une source extérieure au système).

Le phénomène de résonance est particulièrement redouté en génie civil : les ouvrages comme les ponts par exemple, peuvent entrer en résonance à certaines fréquences et sont alors sollicités mécaniquement d'une manière importante. C'est également le cas des vieilles voitures qui vibrent d'une manière inquiétante au voisinage d'une certaine vitesse et dont les vibrations cessent lorsque cette vitesse est dépassée. Ceci est vrai pour toutes les structures, mêmes complexes, la résonance apparaissant pour les systèmes linéaires d'ordre supérieur à deux.

En commande d'axe, on cherchera à limiter la résonance qui est liée à un régime oscillatoire et à un dépassement important nocifs pour la mécanique (rappel : le facteur de surtension qui caractérise l'importance de la résonance augmente lorsque ξ diminue). Un réglage courant en avant-projet consiste à choisir Q=1,3 correspondant à un facteur d'amortissement ξ=0,43.

• Diagramme de Black

C'est la représentation dans le plan de 20 log |H(jω),| en fonction de φ(ω).

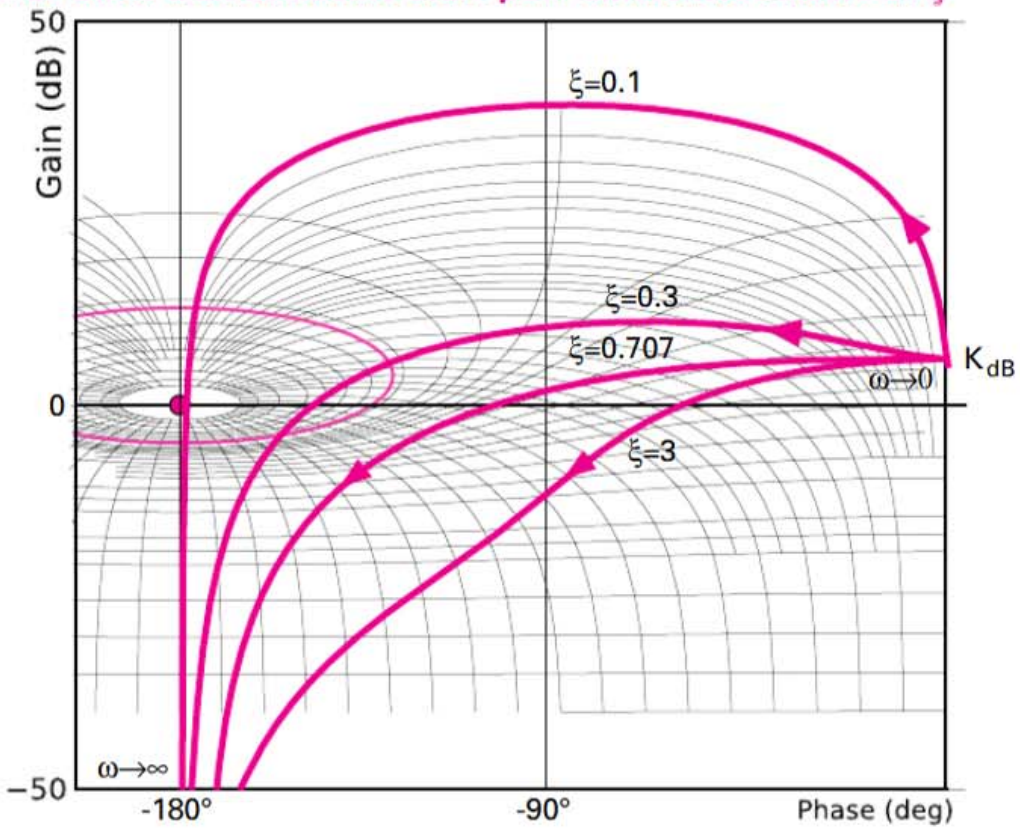
$$H_{dB} = 20 \log \left[\frac{K}{\sqrt{\left(1-u^2\right)^2 + \left(2\xi u\right)^2}} \right] \qquad \varphi = -\arctan\left[\frac{2\xi u}{1-u^2} \right]$$

De même que pour le diagramme de Bode, il existe autant de réponses que de valeurs du facteur d'amortissement ξ.

Les valeurs remarquables sont :

Pulsation ω	Amplitude HdB	Phase φ
0	$20 \log K$	0
ω_R	$20 \log\left(\frac{K}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \right)$	Dépend de ξ
ω_0	$20 \log\left(\frac{K}{2\xi} \right)$	-90°; (-π/2)
$\omega \to \infty$	$-\infty$	-180°; (-π)

• Diagramme de Black d'un deuxième ordre pour différentes valeurs de ξ



• Diagramme de Nyquist

C'est la représentation de H(jω) dans le plan complexe. $H(j\omega) = \frac{K}{\left(1-u^2\right) + j\left(2\xi u\right)}$

$$\mathrm{Re}\left(H(j\omega)\right) = K \frac{1-u^2}{\left(1-u^2\right)^2 + \left(2\xi u\right)^2} \qquad \mathrm{Im}\left(H(j\omega)\right) = K \frac{-2\xi u}{\left(1-u^2\right)^2 + \left(2\xi u\right)^2}$$

On peut donner le lieu de H(jω) en coordonnées polaires :

$$r(\omega) = \left|H(j\omega)\right| = \frac{K}{\sqrt{\left(1-u^2\right)^2 + \left(2\xi u\right)^2}} \qquad \varphi(\omega) = -\arctan\left(\frac{2\xi u}{1-u^2} \right)$$

Réponse harmonique

• Diagramme de Nyquist

Points remarquables :

- Pour $\omega \to 0$, $|H(j\omega)|=K$ réel pur ($r=K$ et $\varphi=0°$)
- Pour $\omega=\omega_0$, $H(j\omega)=K/2\xi$ imaginaire pur ($\varphi=-90°$) : la pulsation de cassure ω_0 est située à l'intersection de la courbe de réponse avec l'axe des imaginaires.
- Pour $\omega=\omega_R$, (cas où $\xi < 0,7$), on obtiendra le module maximum, c'est-à-dire la plus grande valeur de OM.
- Pour ω tendant vers l'infini, $H(j\omega)$ tend vers zéro par valeurs négatives : à haute fréquence, le gain tend vers 0: point (0,0) sur le diagramme (ce point n'est jamais atteint puisqu'il correspond à une pulsation infinie). La phase tend vers $-\pi$.

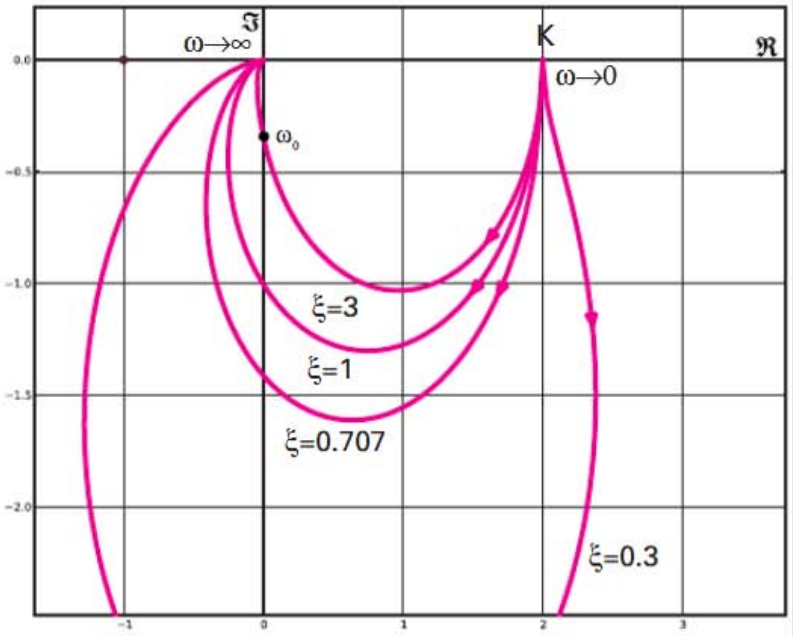


Diagramme de Nyquist d'un deuxième ordre pour différentes valeurs de ξ

• Fréquences remarquables

Les systèmes du deuxième ordre possèdent plusieurs fréquences remarquables qui ne sont pas toujours notées de la même manière par les différents auteurs. Il s'agit donc de bien les différentier pour pouvoir les reconnaître.

$\omega_0 = \omega_n$ = pulsation propre non amortie. C'est la pulsation à laquelle le système oscillerait si le facteur d'amortissement ξ était nul (système non amorti). C'est également la pulsation de cassure sur le diagramme asymptotique de Bode, pulsation pour laquelle le déphasage est de –90°.

ω_p : pseudo-pulsation. C'est la pulsation des oscillations transitoires de la réponse indicielle. Elle dépend de ξ : $\omega_p = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$

ω_R : pulsation de résonance. C'est la pulsation pour laquelle le module de la fonction de transfert harmonique est maximal. Elle dépend aussi de ξ
et n'existe que si $\xi \leq 0,7$: $\omega_R = \omega_0\sqrt{1-2\xi^2}$

ω_c : pulsation de coupure à -λdB. Elle est telle que pour tout $\omega > \omega_c$: $H_{dB}(0) - H_{dB}(\omega) \geq \lambda$dB
A partir de cette pulsation est définie la bande passante, qui est la bande de fréquences pour laquelle la réponse harmonique présente une atténuation inférieure à λdB.
On travaille souvent avec la pulsation de coupure à –3 dB.
Une atténuation de 3 dB correspond à une atténuation de 30% du signal de sortie.
On rencontre aussi la fréquence de coupure à –6 dB, ce qui représente une atténuation du signal de 50 %.
On montre que la fréquence de coupure
à –3 dB dépend également de ξ et est égale à : $\omega_c = \omega_0\sqrt{1-2\xi^2+\sqrt{1+\left(1-2\xi^2\right)^2}}$

UN SYSTEME DU DEUXIEME ORDRE EST UN FILTRE PASSE-BAS.

Attention : ne pas confondre la pulsation de cassure et la pulsation de coupure à –3 dB.

- Systèmes du premier ordre : pulsation de cassure et pulsation de coupure à –3 dB identiques $\omega_c = 1/\tau$
- Systèmes du deuxième ordre : pulsation de cassure ω_0 et pulsation de coupure à –3 dB : ω_c

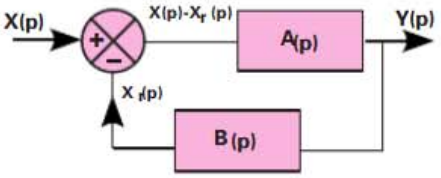
10.6. STABILITÉ D'UN SYSTÈME ASSERVI

10.6.1.DÉFINITION

On ne peut parler d'**instabilité** que pour les **systèmes bouclés**. Cette instabilité provient de la comparaison entre la sortie et l'entrée.
Un système oscillant n'est pas nécessairement instable. L'instabilité est un tout autre phénomène causé par le bouclage qui se caractérise par une tendance du système à osciller à amplitude et à fréquence constante quel que soit le signal d'entrée : c'est le **pompage**.
L'instabilité est essentiellement due à :

- la boucle de retour,
- un retard dans la chaîne directe,
- un gain de boucle élevé.

• Condition de stabilité



$$H(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}=\frac{A(p)}{1+A(p)B(p)}$$

On pose :

$$A(p)=\frac{n(p)}{d(p)} \text{ et } B(p)=\frac{N(p)}{D(p)} \quad \text{alors : } H(p)=\frac{n(p)D(p)}{d(p)D(p)+n(p)N(p)}$$

$d(p)D(p)+n(p)N(p)$ est le polynôme caractéristique du système.

Le système est stable si les pôles de H(p) sont à partie réelle strictement négative.
Ce qui revient à dire que les pôles de 1+A(p)B(p) ou de d(p)D(p)+n(p)N(p) sont à partie réelle négative.

• Pôles dominants

Un cas particulier important peut être examiné, c'est celui où l'une des constantes de temps est beaucoup plus grande que l'autre. Supposons par exemple , que nous examinions la réponse à un échelon puis la réponse harmonique du système du deuxième ordre possédant deux constantes de temps très différentes.

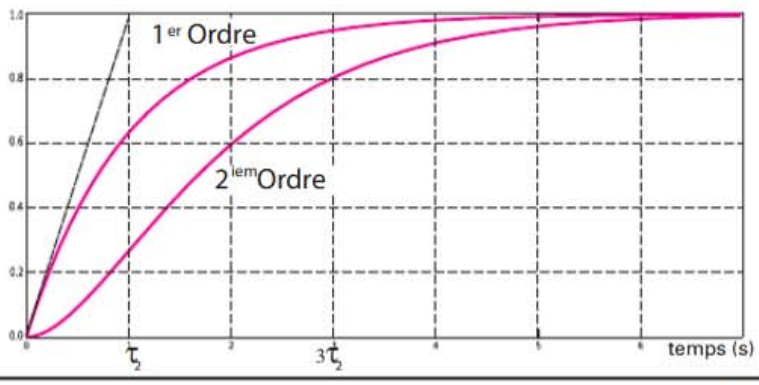
• Réponse à l'échelon

Soit le système $H(p)=\frac{K}{(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)}$,on prend K = 1 sans perte de généralité dans le calcul.

a) Déterminer à l'aide des tables de transformées sa réponse à l'échelon $E_0.u(t)$.
b) Dessiner cette réponse dans le cas où $\tau_1 = 10\tau_2$ avec $\tau_2 = 1$ s.
c) Dessiner aussi la réponse du système du premier ordre $\frac{1}{1+\tau_1 p}$ et comparer.
d) Calculer la différence entre les deux courbes pour $\tau = \tau_1 = 10$ s.
Montrer que la réponse du système du second ordre se confond avec celle du premier ordre pour $t > \tau_1$, et que seul le début du régime exponentiel est différent.
e) Montrer que la réponse du système du deuxième ordre présente une tangente horizontale au démarrage, ce qui le distingue du système du premier ordre qui, lui, démarre rapidement avec une pente initiale non nulle.

La réponse du premier ordre de constante de temps τ_2 est éteinte au bout de $3\tau_2$ donc au bout de $0{,}3\tau_1$ son influence est négligeable.

Seul le début de la montée est modifié, notamment le départ qui est plus lent (tangente horizontale).



CPGE

Stabilité d'un système asservi

• Critères de stabilité.

Les critères de stabilité proviennent tous de la **résolution de l'équation caractéristique de la fonction de transfert en boucle fermée.**

Trois méthodes sont couramment utilisées :

- le critère de **Routh**
- le critère du **revers**
- le **lieu des pôles** (lieu d'Evans) → place des pôles dans le plan complexe → méthode générale qui renseigne directement sur la nature du ou des modes instables.

10.6.2. CRITÈRE DE ROUTH

Il résulte de la propriété des polynômes, en particulier du polynôme caractéristique.

$$P_c(p) = d(p)D(p) + n(p)N(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + ... + a_1 p + a_0$$

• Condition nécessaire et insuffisante

Tous les coefficients du polynôme caractéristique doivent être strictement positifs.

Remarque : Le polynôme caractéristique de la FTBF est la somme du numérateur ***nN*** et du dénominateur ***dD*** de la FTBO : $FTBO = AB = \frac{nN}{dD}$ et $FTBF = \frac{nD}{dD + nN}$

• Condition nécessaire

Dans le cas où la première condition est vérifiée, on construit le tableau de Routh à partir des cœfficients du polynôme caractéristique. $P_c(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + ... + a_1 p + a_0$

Ce tableau possède (n+1) lignes. Les deux premières lignes s'obtiennent en reportant les cœfficients du polynôme.

p^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	.....	a_2	a_0
p^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	.....	a_1	
p^{n-2}	b_1	b_2	b_3			
.....	c_1	c_2	.....			
.....	.....	.....				
.....	.....	.....				
$p^1 = p$	.....					
$p^0 = 1$	.....					

avec : $b_1 = \frac{-1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}$ $b_2 = \frac{-1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-5} \end{vmatrix}$ $c_1 = \frac{-1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix}$ etc...

L'interprétation se fait en analysant les coefficients de la première colonne appelée **colonne des pivots.**

Une condition nécessaire pour que le système soit stable est que tous les coefficients de la colonne des pivots soient strictement positifs.

Remarque : Si on obtient une ligne de zéros, cette ligne doit être remplacée par les coefficients de la dérivée du polynôme construit à partir de la ligne supérieure.

Autre critère graphique de stabilité : contour de Hall

Exemple : $FTBF(p)=\dfrac{1}{p^4+p^3+2p^2+p+1} \Rightarrow P_c(p)=p^4+p^3+2p^2+p+1$

p^4	**1**	2	1
p^3	**1**	1	
p^2	b_1**=1**	b_2=1	0
p^1	**0**	0	
p^0			

En construisant le tableau de **Routh**, on voit apparaître une ligne n°4 de zéros.

On remplace la ligne n°4 de p^1 par les coefficients de la dérivée du polynôme construit à partir de la ligne supérieure :

$1\times p^2+0\times p^1+1=p^2+1$

$\dfrac{d(p^2+1)}{dp}=2p+0 \Rightarrow c_1=2$ et $c_2=0$

$P_c(p)=(p^2+1)(p^2+p+1)$

d'où le tableau suivant :

p^4	**1**	2	1
p^3	**1**	1	
p^2	b_1**=1**	b_2=1	0
p^1	**2**	0	
p^0	**1**		

Tous les termes de la première colonne sont strictement positifs, donc le système est stable.

En réalité, il est juste oscillant car il y a deux racines imaginaires pures $p=\pm j$ solutions de : $p^2+1=0$

On aurait pu remarquer que : $P_c(p)=(p^2+1)(p^2+p+1)$

• Conclusion sur le critère de Routh

• **Avantages** : Le critère permet de savoir rapidement si un système a des pôles qui engendrent une instabilité. Il permet de déterminer la valeur d'un paramètre pour lequel le système franchit le seuil de la stabilité.

• **Inconvénients** : Les calculs deviennent vite complexes dès que l'ordre de la fonction de transfert devient important. Sa mise en œuvre nécessite la connaissance de la FTBF obtenue par identification le plus souvent. Il renseigne sur la stabilité mais non sur la robustesse de cette stabilité.

• Résolution de l'équation caractéristique : *1+A(p)B(p) = 0*

Soit à résoudre : $A(p)B(p)=-1$

On passe dans le domaine fréquentiel de façon à trouver la pulsation d'oscillation.

On fait le changement de variable (cisoïdal) $p = j\omega$

$$A(j\omega)B(j\omega)=-1 \Rightarrow \begin{cases} |A(j\omega)|\times|B(j\omega)|=1 \\ Arg\left[A(j\omega)\right]+Arg\left[B(j\omega)\right]=-180° \end{cases}$$

Exemple : $A(p)=\dfrac{3K}{p(p+1)(p+3)}$; $B(p) = 1$ Retour unitaire $\Rightarrow A(j\omega)=\dfrac{K}{j\omega(1+j\omega)(1+j\frac{\omega}{3})}$

$K^2=\omega^2(1+\omega^2)(1+\dfrac{\omega^2}{9})$ et $-90°-\arctan\omega-\arctan\dfrac{\omega}{3}=-180$

$\arctan\omega+\arctan\dfrac{\omega}{3}=90° \Rightarrow \dfrac{\omega+\frac{\omega}{3}}{1-\frac{\omega^2}{3}}\to\infty \Rightarrow \boxed{\omega=\sqrt{3}\ rad/s}$

La pulsation d'oscillation du système est de $\sqrt{3}\ rad/s$

La valeur limite de *K* est donnée par $K^2=\omega^2(1+\omega^2)(1+\dfrac{\omega^2}{9})$ soit **K = 4**

CPGE

• Conditions pratiques de stabilité : marges de sécurité

Un système à la limite de la stabilité (prêt à devenir instable) n'est pas fiable. La moindre perturbation peut à tout moment le rendre instable.

En pratique, on assure la stabilité d'un système en prenant des marges de sécurité.
Ces marges se traduisent par une distance minimale à respecter entre le lieu de la FTBO et le point critique d'affixe –1.

• Marge de gain

L'affixe du point critique a pour module 1 et pour argument –180°. Lorsqu'on se fixe une marge de gain, on se donne une distance à respecter entre le point de la FTBO pour lequel la phase vaut –180° et le point critique. Une valeur de marge de gain couramment utilisée est **MG = 10 dB.**

• Marge de phase

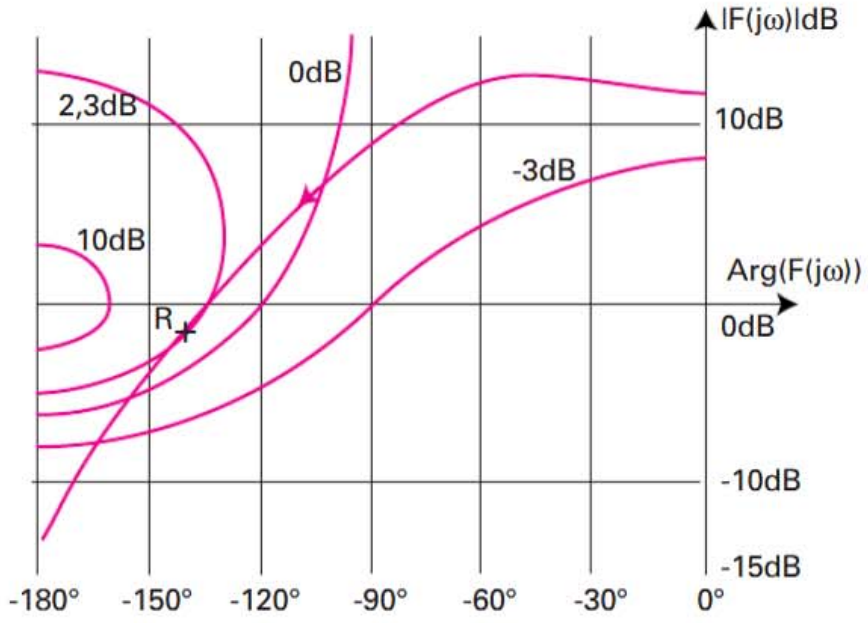
La marge de phase est la différence entre la phase du point de la FTBO de module 1 et la phase du point critique –180°. On utilise couramment une marge de phase de valeur **Mφ = 45°**

10.6.3. AUTRE CRITÈRE GRAPHIQUE DE STABILITÉ : CONTOUR DE HALL

Ce critère s'applique à un système bouclé à retour unitaire.
Cet autre critère permettant d'assurer une marge de stabilité consiste à limiter l'amplitude de la FTBF à la résonance. L'abaque de Black, particulièrement intéressant dans ce cas, permet de connaître l'amplitude et la phase de la FTBF (représentation en coordonnées curvilignes) à partir du lieu de la FTBO (représentation en coordonnées rectangulaires).

Un réglage couramment utilisé consiste à limiter cette amplitude à 2,3 dB (on souhaite habituellement que la résonance ne représente pas plus de 30% de la valeur du gain statique de la FTBF). Il faut pour cela que le lieu de la FTBO soit tangent à la courbe isomodule 2,3 dB. En pratique, ce critère est un peu plus délicat à utiliser, car il faut déterminer le point de tangence de la FTBO avec une courbe isomodule.

• Marge de stabilité assurée par le facteur de résonance



10.6.4. CRITÈRE GRAPHIQUE DE STABILITÉ, CRITÈRE DE NYQUIST

• Enoncé du critère de Nyquist

Pour qu'un système soit stable en boucle fermée, il faut et il suffit que le lieu de Nyquist de la FTBO(jω) complété et parcouru dans le sens des ω croissants :

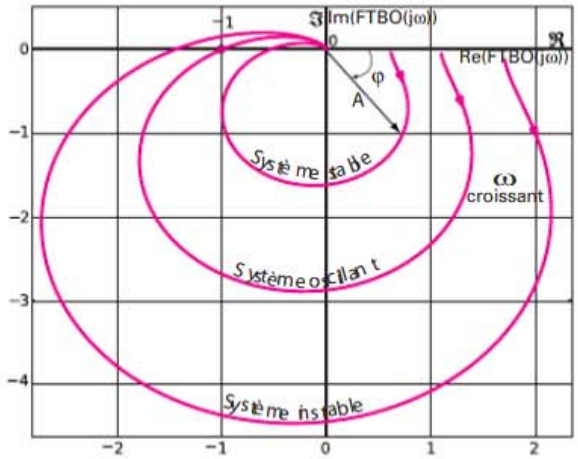
- entoure le point critique –1 dans le sens trigonométrique autant de fois qu'il y a de pôles à partie réelle strictement positive dans FTBO(p).
- ne passe pas par le point critique –1.

10.6.5. CRITÈRE GRAPHIQUE SIMPLIFIÉ DE STABILITÉ, CRITÈRE DU REVERS

Sauf cas particuliers, la structure des FTBO permet de simplifier l'application du critère de Nyquist.

Un système est stable en boucle fermée si en parcourant le lieu de Nyquist de la FTBO, dans le sens des ω croissants, on laisse le point critique –1 sur la gauche.

Le système est un oscillateur en boucle fermée si le lieu de Nyquist de la FTBO passe par le point critique –1.

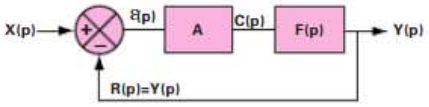


10.6.6. CAUSES D'INSTABILITÉ

Plusieurs raisons (en particulier : gain élevé, retard et présence d'intégrateurs) peuvent rendre un système instable.

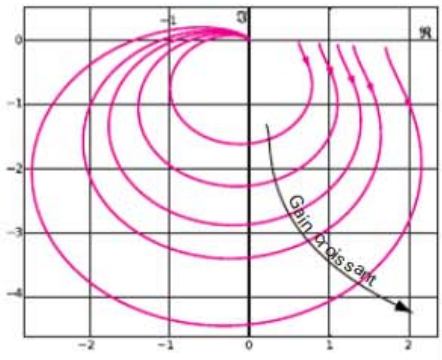
• Influence du gain

Soit le système dont la FTBO vaut A.F(p) où A représente un coefficient réel positif dont on peut modifier la valeur (gain réglable).



Le lieu de Nyquist varie en fonction de A.

La courbe de la FTBO « gonfle » avec le gain A.
A partir d'une certaine valeur de a, le point critique –1 est laissé sur la droite : **le système devient instable**.
Pour garantir une bonne stabilité, il faut veiller à ce que le point critique reste bien à gauche du lieu de Nyquist.

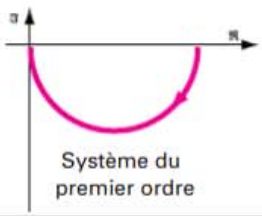


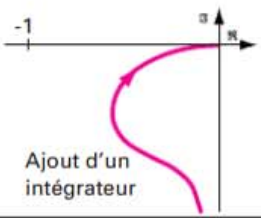
• Influence de la présence d'intégrateurs

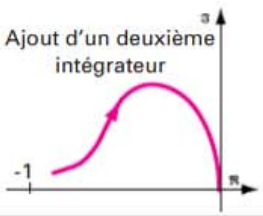
Soit un système dont la FTBO est un premier ordre de la forme. $\frac{1}{1+\tau p}$
Ce système est stable en boucle fermée.

On y ajoute un intégrateur pur $\frac{1}{p}$. La FTBO(p) devient $\frac{1}{p(1+\tau p)}$ et le système est toujours stable mais moins que précédemment.

Si on ajoute un deuxième intégrateur, la FTBO(p) est égale à $\frac{1}{p^2(1+\tau p)}$ et le système devient instable en boucle fermée.





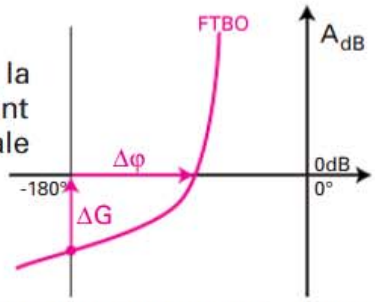


Causes d'instabilité

• Degré de stabilité (marges)

Critère de la marge de phase

- Graphiquement la marge de phase (ou déphasage marginal) est la distance $\Delta\varphi$ (en degré) du point critique (0 dB; -180°) au point d'intersection de la courbe FTBO(jω) avec la droite horizontale passant par $A_{dB} = 0$



- Analytiquement on a : $\Delta\varphi = 180° + Arg\left(FTBO(j\omega_{0dB})\right)$

Critère de la marge de gain

- Graphiquement, la marge de gain (ou gain marginal) est la distance ΔG (en dB) du point critique (0 dB; -180°) au point d'intersection de la courbe FTBO(jω) avec la droite verticale passant par φ = -180°
- Analytiquement on a : $\Delta GdB = -20\log\left|FTBO(j\omega_{\varphi=-180°})\right|$

Un système stable possède des marges de stabilité positives.
Les valeurs de **marge de phase égale à 45° et de marge de gain égale à 10 dB** sont considérées comme satisfaisantes pour la plupart des systèmes asservis (elles seront néanmoins modulées selon la qualité des modèles utilisés).

Critère de la surtension en boucle fermée

En « commande d'axe » par exemple, pour optimiser les performances, on choisit un facteur d'amortissement ξ_{BF} = 0,43 ; on en déduit le facteur de résonance (en boucle fermée)

$$Q = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} = 1,28$$ d'où QdB = 20.log(1,28) = 2,3 dB

Ce contour à 2,3 dB est mis en évidence sur tous les abaques et sur les logiciels de simulation, et on cherche dans ce cas à faire en sorte que la courbe de FTBO soit tangente à ce contour à 2,3 dB.

• Compromis : stabilité - précision

Influence du gain sur la stabilité

Nous verrons que l'augmentation du gain K était bénéfique pour la précision du système.

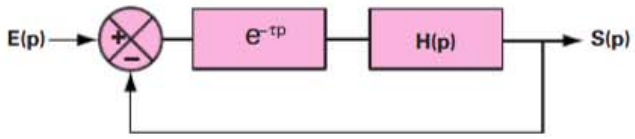
Pour certains systèmes, on constate que l'augmentation du gain K conduit à un risque d'instabilité.
Le choix du gain sera un compromis entre la précision désirée et le risque d'instabilité que l'on accepte.

Influence de la présence d'intégrateur sur la stabilité

Nous savons que la présence d'un intégrateur dans la FTBO améliore les qualités de précision du système.
Par contre, la présence de cet intégrateur dans la FTBO apporte un déphasage de - 90°, ce qui rapproche le lieu de transfert du point critique, donc tend à déstabiliser le système.

Influence de la présence d'un retard pur, sur la stabilité

Le schéma-blocs du système comporte un retard pur de τ seconde.
Le retard $e^{-\tau p}$ apporte un déphasage croissant lorsque la pulsation croît.



Justification :

Donnons l'expression analytique du déphasage de FTBO(jω) en fonction de la pulsation ω :

$$\varphi°\left(FTBO(j\omega)\right) = Arg\left(H(j\omega)e^{-\tau j\omega}\right) = Arg\left(H(j\omega)\right) + Arg\left(e^{-\tau j\omega}\right) = -\tau\omega + Arg\left(H(j\omega)\right)$$

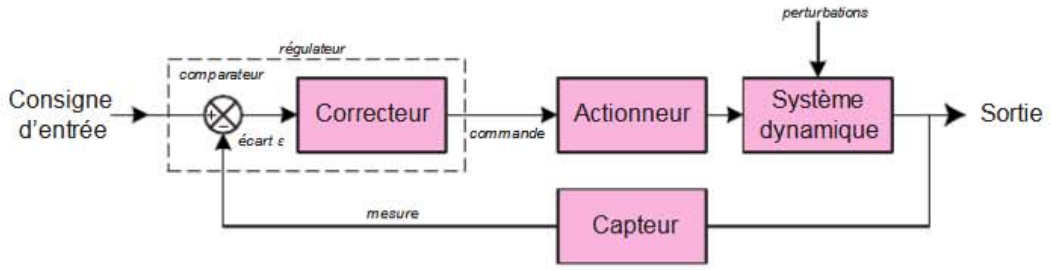
On observe que le retard $e^{-\tau p}$ de la FTBO donne une expression du déphasage dans laquelle le terme τω vient se soustraire au déphasage existant.

Ce retard conduit à rendre le système moins stable, puisque la courbe se rapproche du point critique (0 dB, -180°).

10.7. PRÉCISION ET RAPIDITÉ D'UN SYSTÈME ASSERVI

• Précision et rapidité d'un système asservi

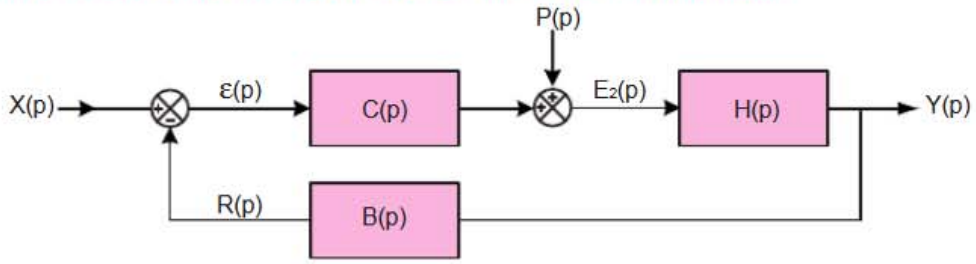
On considère le système asservi représenté par le schéma blocs suivant.



On souhaite que la sortie évolue en fonction du temps conformément à la consigne d'entrée. Afin d'évaluer la précision du système, on définit comme erreur à un instant donné la différence entre la valeur de l'entrée et la valeur de retour. Le comportement idéal correspond à une erreur nulle à chaque instant. En réalité, cette erreur est non nulle pour deux raisons :

- La première est que l'entrée varie dans le temps. Minimiser l'erreur lorsque l'entrée du système varie, c'est résoudre un **problème de poursuite**.
- La deuxième raison qui entraîne une erreur non nulle provient des perturbations qui se superposent au signal d'entrée du système. Minimiser l'erreur malgré l'existence de ces perturbations, c'est résoudre un **problème de régulation**.

10.7.1. DÉFINITION DE L'ÉCART OU ERREUR EN RÉGIME PERMANENT



On considère le système bouclé ci-dessus avec une perturbation nulle (P(p) = 0).

On a $FTBO(p) = C(p)H(p)B(p)$

On note la FTBO(p) sous la forme : $FTBO(p) = \dfrac{K(1+b_1p+\ldots+b_mp^m)}{p^\alpha(1+a_1p+\ldots+a_np^n)}$ avec $\begin{cases}\alpha \text{ classe la } FTBO \\ K \text{ gain statique}\end{cases}$

L'écart est une fonction du temps ε(t) dont la transformée de Laplace est ε(p).

$$\varepsilon(t) = x(t) - r(t) \Rightarrow \varepsilon(p) = X(p) - R(p) = X(p) - FTBO(p)\ \varepsilon(p) \text{ soit } \varepsilon(p) = \frac{X(p)}{1+FTBO(p)}$$

L'écart en régime permanent ne dépend que de :

- l'entrée X(p)
- la FTBO(p)

Le système sera dit précis si son écart ε(t) tend vers zéro quand t tend vers l'infini.
En utilisant le théorème de la valeur finale,

$$\lim_{t\to\infty}\varepsilon(t) = \lim_{p\to 0} p\varepsilon(p) = \lim_{p\to 0}\left[\frac{pX(p)}{1+FTBO(p)}\right]$$

10.7.2. ECART (OU ERREUR) DE POSITION (DIT AUSSI STATIQUE)

L'écart de position est l'écart $\varepsilon_p(t)$ ou $\varepsilon_s(t)$ en régime permanent quand l'entrée x(t) est un échelon et la perturbation supposée nulle.

$$x(t) = E_0.u(t) \Rightarrow X(p) = \frac{E_0}{p}$$

$$\lim_{t\to\infty} \varepsilon_s(t) = \lim_{p\to 0}\left[\frac{E_0}{1+FTBO(p)}\right] = \lim_{p\to 0}\left[\frac{E_0}{1+\frac{K}{p^\alpha}}\right] = \lim_{p\to 0}\left[\frac{E_0.p^\alpha}{p^\alpha+K}\right]$$

Si la FTBO est de classe 0, $\alpha = 0$, l'écart de position est égal à $\frac{E_0}{1+K}$

Si la FTBO est de classe supérieure ou égale à 1, $\alpha \geq 1$, l'écart de position est nul.

• Conclusion

- Pour avoir un écart de position nul, il faut au moins une intégration dans la FTBO.
- Si la FTBO ne possède pas d'intégration, l'écart de position décroît quand le gain statique de la FTBO augmente.
- L' écart de position est proportionnel à la valeur de la consigne E_0.

10.7.3. ECART (OU ERREUR) DE VITESSE (DIT AUSSI DYNAMIQUE, DE TRAÎNAGE OU EN POURSUITE)

L'écart de vitesse est l'écart $\varepsilon_v(t)$ ou $\varepsilon_d(t)$ en régime permanent quand l'entrée x(t) est une rampe (échelon de vitesse) et la perturbation supposée nulle.

$$x(t) = a.t.u(t) \Rightarrow X(p) = \frac{a}{p^2}$$

$$\lim_{t\to\infty} \varepsilon_v(t) = \lim_{p\to 0}\left[\frac{a}{p(1+FTBO(p))}\right] = \lim_{p\to 0}\left[\frac{a}{p(1+\frac{K}{p^\alpha})}\right] = \lim_{p\to 0}\left[\frac{a.p^{\alpha-1}}{p^\alpha+K}\right]$$

Si la FTBO est de classe 0, $\alpha = 0$, l'écart de vitesse est infini.
Si la FTBO est de classe 1, $\alpha = 1$, l'écart de vitesse est égal à a/K
Si la FTBO est de classe supérieure ou égale à 2, $\alpha \geq 2$, l'écart de vitesse est nul.

• Conclusion

- Pour avoir un écart de vitesse nul, il faut au moins deux intégrations dans la FTBO.
- Si la FTBO possède une intégration, l'écart de vitesse décroît quand le gain statique de la FTBO augmente.
- L' écart de vitesse est proportionnel à la valeur de la pente de la consigne « a » si $\alpha = 1$.

10.7.4. ECART (OU ERREUR) EN ACCÉLÉRATION

Lorsque le signal appliqué en entrée est parabolique, $x(t) = b.\frac{t^2}{2}.u(t) \Rightarrow X(p) = \frac{b}{p^3}$

L'erreur en accélération $\varepsilon_a(t)$ en régime permanent a pour expression :

$$\lim_{t\to\infty} \varepsilon_a(t) = \lim_{p\to 0}\left[\frac{b}{p^2(1+FTBO(p))}\right] = \lim_{p\to 0}\left[\frac{b}{p^2(1+\frac{K}{p^\alpha})}\right] = \lim_{p\to 0}\left[\frac{b.p^{\alpha-2}}{p^\alpha+K}\right]$$

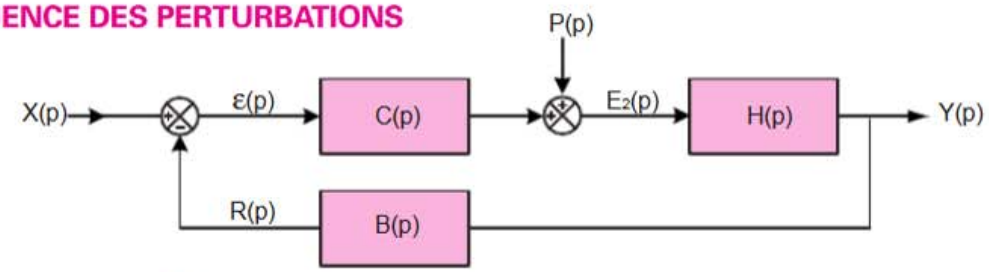
Il s'ensuit que pour un système à FTBO de classe 0 ou 1, l'erreur est infinie.
Pour un système à FTBO de classe 2, elle vaut b/K.
Pour un système à FTBO de classe supérieure ou égale à 3, elle est nulle.

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes erreurs en fonction de la classe de la FTBO du système. Ainsi, on observe que pour diminuer l'erreur en régime permanent, il faut :

- **Augmenter la classe du système, c'est-à-dire le nombre d'intégrations dans la FTBO,**
- **Augmenter le gain de la FTBO.**

Erreur	Statique ε_s	Dynamique ε_d ou ε_v	Accélération ε_a
Consigne / Classe α	E_0	at	$\frac{bt^2}{2}$
$\alpha = 0$	$\frac{E_0}{1+K_{B0}}$	∞	∞
$\alpha = 1$	0	$\frac{a}{K_{B0}}$	∞
$\alpha = 2$	0	0	$\frac{b}{K_{B0}}$

10.7.5. INFLUENCE DES PERTURBATIONS



L'écart ε(p) est la somme de deux erreurs :

- Ex(p) due à la consigne d'entrée
- Ep(p) due aux perturbations

On calcule l'expression de $\varepsilon(p) = X(p) - B(p).Y(p)$ et on effectue la différence suivante :

$$Y(p) = H(p).P(p) + C(p).H(p).\varepsilon(p)$$

$$-Y(p) = \frac{X(p)}{B(p)} - \frac{\varepsilon(p)}{B(p)} \qquad 0 = H(p).P(p) + \left(C(p).H(p) + \frac{1}{B(p)}\right).\varepsilon(p) - \frac{X(p)}{B(p)}$$

D'où $$\varepsilon(p) = \frac{1}{1+C(p).H(p).B(p)}X(p) - \frac{H(p).B(p)}{1+C(p).H(p).B(p)}P(p)$$

L'erreur est composée de deux termes :

- Le premier = erreur en poursuite Ex(p) due à l'entrée X(p)
- Le second = erreur en régulation Ep(p) due à la perturbation P(p)

On n'étudie ensuite que l'erreur due à la perturbation.

• Perturbation en échelon

La perturbation p(t) est un échelon $p(t) = P_0.u(t) \Rightarrow P(p) = \frac{P_0}{p}$

L'entrée x(t) est supposée nulle et on note l'écart $\varepsilon_p(t)$ de transformée $E_p(p)$.

$$\lim_{t\to\infty} \varepsilon_p(t) = \lim_{p\to 0}\left[\frac{P_0.H(p).B(p)}{1+FTBO(p)}\right] = \lim_{p\to 0}\left[\frac{P_0.Kh.p^{ac}}{p^{ac+ah}+Kc.Kh}\right]$$

Influence des perturbations

D'où le tableau des résultats pour différentes valeurs de αc et αh représentant respectivement la classe de la FT en amont de la perturbation et la classe de la FT en aval de la perturbation.

α_c et α_h entier > 0	$\alpha_c = 0$		$\alpha_c \geq 1$	
	$\alpha_h = 0$	$\alpha_h \geq 1$	$\alpha_h = 0$	$\alpha_h \geq 1$
Erreur	$\frac{P_0.Kh}{1+Kc.Kh}$	$\frac{P_0}{Kc}$	0	0

• Conclusion

L'erreur statique due à une perturbation en échelon est nulle uniquement s'il y a au moins une intégration dans la chaîne d'action en amont de la perturbation. Une éventuelle intégration en aval de la perturbation n'a pas d'influence sur la précision vis-à-vis de la perturbation.

• Perturbation en rampe

La perturbation p(t) est une rampe $p(t) = r.t.u(t) \Rightarrow P(p) = \frac{r}{p^2}$

L'entrée x(t) est supposée nulle et on note l'écart $\varepsilon_p(t)$ de transformée Ep(p).

$$\lim_{t \to \infty} \varepsilon_p(t) = \lim_{p \to 0} \left[\frac{1}{p} . \frac{r.H(p).B(p)}{1+FTBO(p)} \right]$$

$$\lim_{t \to \infty} \varepsilon_p(t) = \lim_{p \to 0} \left[\frac{1}{p} . \frac{r.Kh.Nh(p).p^{\alpha c} Dc(p)}{p^{\alpha c}.Dc(p).p^{\alpha h}.Dh(p) + Kc.Nc(p).Kh.Nh(p)} \right] = \lim_{p \to 0} \left[\frac{r.Kh.p^{\alpha c-1}}{p^{\alpha c+\alpha h} + Kc.Kh} \right]$$

D'où le tableau des résultats pour différentes valeurs de α_c représentant la classe de la FT en amont de la perturbation .

	$\alpha_c = 0$	$\alpha_c = 1$	$\alpha_c \geq 2$
Erreur	∞	$\frac{r}{Kc}$	0

• Conclusion

L'erreur dynamique due à une perturbation en rampe est nulle uniquement s'il y a au moins deux intégrations dans la chaîne d'action en amont de la perturbation. Une augmentation du gain Kc en amont de la perturbation diminue l'erreur d'un système comportant une seule intégration en amont.

• Généralisation

L'erreur en régime permanent provoquée par une perturbation de Laplacien $\frac{P_0}{P^n}$ est nulle s'il existe au moins n intégrations en amont de la perturbation.

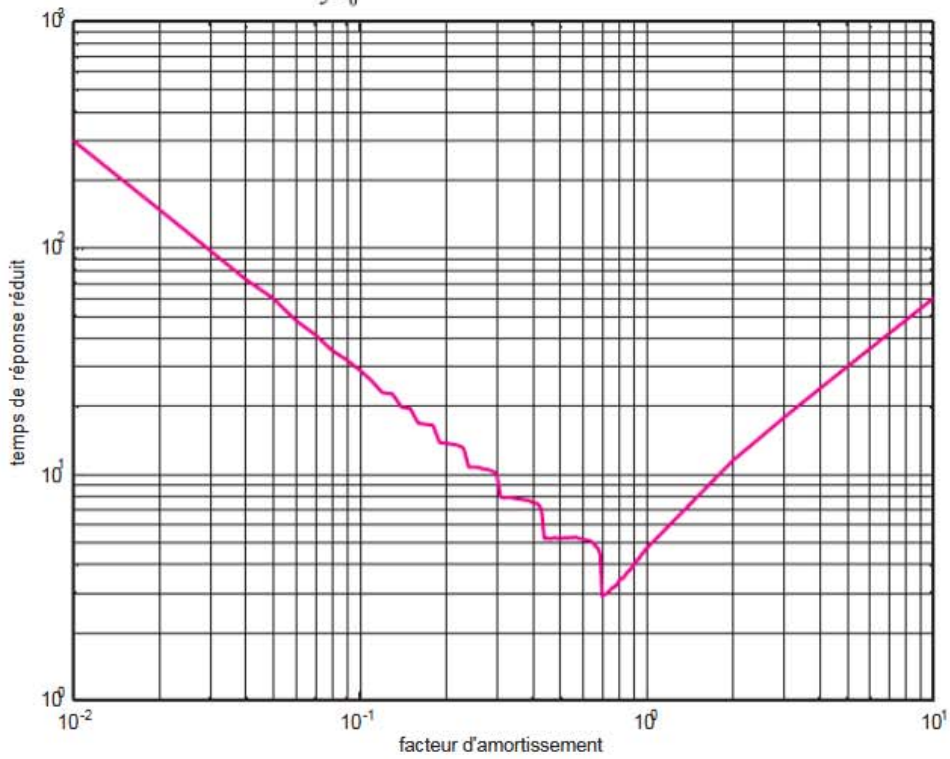
10.7.6. RAPIDITÉ – RÉGIME TRANSITOIRE

Une des questions que l'on s'est déjà posée est : le système asservi est-il rapide ? On y a répondu en définissant un critère de rapidité qui est le temps de réponse à 5% (c'est le temps de stabilisation à ± 5% de la valeur finale).

Pour les systèmes du premier ordre, l'étude détaillée de la réponse indicielle a permis d'établir une relation entre $tr_{5\%}$ et la constante de temps τ : $tr_{5\%} = 3\tau$.

Pour les systèmes du deuxième ordre, on dispose d'une formulation approchée des temps de réponse à x% pour les faibles facteurs d'amortissement ξ : $tr_{x\%} = \frac{1}{\xi\omega_0}\ln\left(\frac{100}{x}\right)$

en particulier, pour $x\% = 5\% \Rightarrow tr_{5\%} \approx \frac{3}{\xi\omega_0}$. On donne l'abaque du temps de réponse réduit en fonction de ξ.

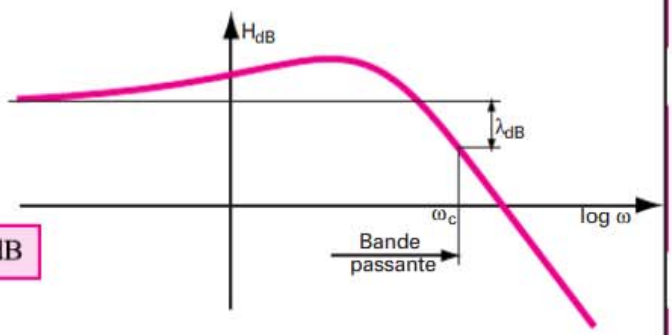


• Notion de bande passante

Dans le cas général, on met en place un critère qui permet d'évaluer la rapidité d'une autre manière : c'est la **bande passante**.

Définition :
La bande passante à –λdB d'un système asservi (de FTBF H(p)) est la bande de fréquences (ou de pulsations) définie par la pulsation propre de coupure ω_c telle que pour tout $\omega > \omega_c$:

$$H_{dB}(0) - H_{dB}(\omega) \geq \lambda dB$$

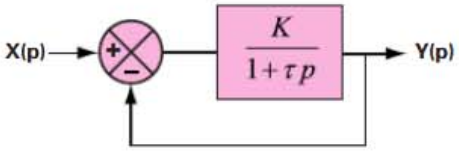


La bande passante à –3 dB est définie par :

$\forall\ (\omega < \omega_c),\ \frac{H(0)}{|H(j\omega)|} \leq 10^{-3/20} = 0,708$, ce qui correspond à une atténuation de 30%

Il est à remarquer que l'étude de la bande passante porte sur le système asservi donc sur sa FTBF.

Exemple :
Soit le système asservi tel que la FTBO soit un 1er ordre $G(p) = \frac{K}{1+\tau p}$



La pulsation de coupure ω_{c0} à 0 dB de la FTBO est telle que :

$$|G(j\omega_{c0})| = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{K^2}{1 + \tau^2\omega_c^2} = 1 \quad \Rightarrow \quad \omega_{c0} = \sqrt{\frac{K^2 - 1}{\tau^2}} \approx \frac{K}{\tau} \text{ si } K >> 1$$

La FTBF H(p) a pour expression : $H(p) = \dfrac{\dfrac{K}{1+\tau p}}{1+\dfrac{K}{1+\tau p}} = \dfrac{K}{1+\tau p+K} = \dfrac{\dfrac{K}{1+K}}{1+\dfrac{\tau}{1+K}p} = \dfrac{K_{BF}}{1+\tau_{BF}p}$

Dans le cas d'un 1er ordre, si on note $(\tau = \tau_{BO})$, $\omega_{c(-3dB)} = \dfrac{1}{\tau_{BF}}$ avec $\tau_{BF} = \dfrac{\tau_{BO}}{1+K}$

On peut en déduire $\omega_{c(-3dB)} = \dfrac{1+K}{\tau_{BO}} \approx \dfrac{K}{\tau_{BO}}$ si $K >> 1$

Ainsi, pour un système du 1er ordre en boucle fermée, la bande passante à –3 dB de la FTBF est égale à la pulsation de coupure à 0 dB de la FTBO dans le cas où le gain statique de la FTBO est nettement supérieur à 1.

Ce résultat valable pour un 1er ordre peut se généraliser (moyennant une certaine incertitude) et ainsi fournir une estimation de la bande passante en FTBF.

La bande passante à –3 dB d'un système asservi peut être approximée par la pulsation de coupure à 0 dB de sa fonction de transfert en boucle ouverte.
Inversement, la pulsation de coupure à 0 dB de la FTBO correspond sensiblement, pour un gain K de la FTBO suffisamment élevé par rapport à 1, à la pulsation de coupure à –3 dB de la FTBF.

• Influence de la bande passante sur la rapidité

Dans le cas particulier du système du 1er ordre, plus τ est faible, plus $tr_{5\,\%} = 3\tau$ le temps de réponse à 5 % est faible et donc **plus le système est rapide**.

En observant la valeur $\omega_{c(-3dB)} \approx \dfrac{K}{\tau_{BO}}$ si $K >> 1$, on peut aussi en déduire que **le système est d'autant plus rapide que la bande passante est élevée.**

C'est le cas pour tous les autres systèmes physiques.

• Influence du gain sur la rapidité

Les systèmes physiques se comportent comme des filtres passe-bas.
Sur l'exemple du système du 1er ordre, l'augmentation de K, gain de la FTBO, entraîne l'augmentation de la bande passante et par conséquent la rapidité.

L'augmentation du gain augmente la rapidité.

• Dilemme rapidité/stabilité et précision/stabilité

Pour qu'un système soit rapide, il faut que le gain de la FTBO du système soit grand, ce qui est contradictoire avec les conditions de stabilité d'un système asservi.

On parle de **dilemme rapidité/stabilité**.

De la même façon, pour qu'un système soit précis, il faut que le gain de la FTBO du système soit grand, ce qui est contradictoire avec les conditions de stabilité d'un système asservi.

On parle de dilemme **précision/stabilité**.

Les différents correcteurs que l'on étudiera par la suite permettent d'atténuer partiellement ces dilemmes.

10.8. CORRECTION DES SYSTÈMES ASSERVIS

• Nécessité de la correction

Un système étant défini, il possède des caractéristiques propres qui sont rarement satisfaisantes vis-à-vis des objectifs fixés.
Pour un système commandé, on souhaite généralement :

- une bonne stabilité,
- une bonne précision,
- de la rapidité en réponse,
- une insensibilité aux perturbations.

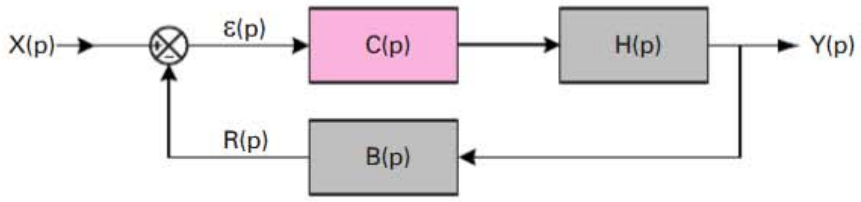
Afin d'améliorer les performances du système, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- modifier le système physique par des choix technologiques différents,
- modifier la structure de l'asservissement en ajoutant des composants qui corrigeront les signaux transmis entre les différents blocs.

On n'étudiera que cette deuxième façon de procéder. Les composants ajoutés au système d'origine sont modélisés dans le diagramme fonctionnel par de nouveaux blocs : **les correcteurs**.

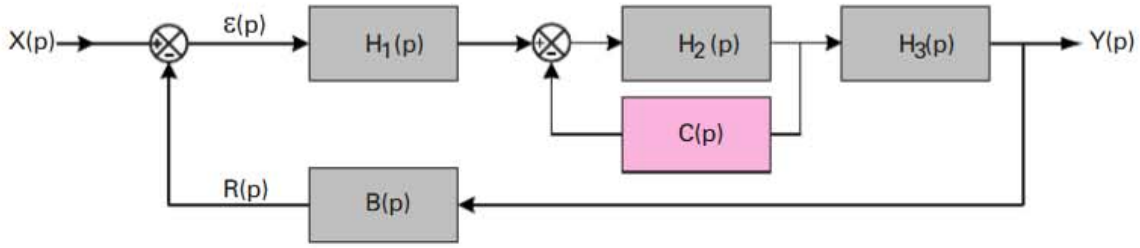
• Emplacement des correcteurs

Correcteur en série (ou en cascade)



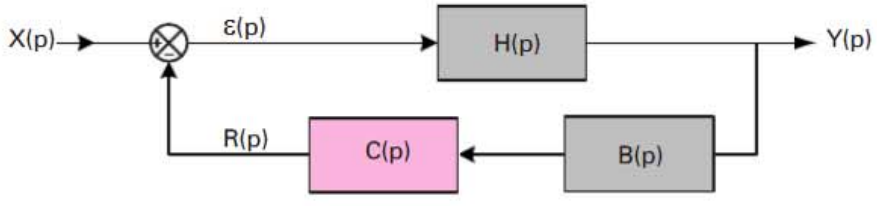
C'est la position la plus naturelle d'un correcteur qui est piloté par l'écart mesuré.

Correcteur en boucle de retour interne (en parallèle)



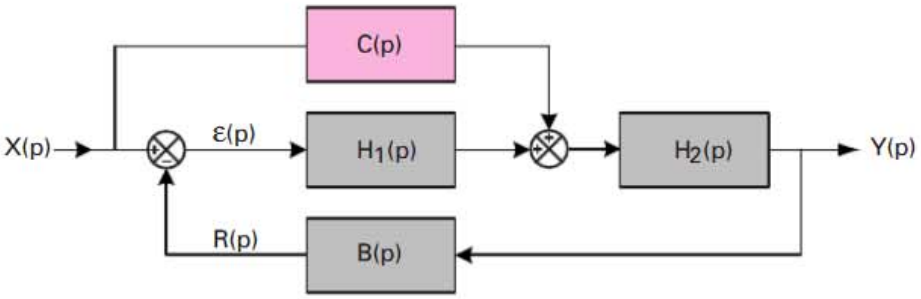
C'est une disposition assez courante notamment pour le retour de la boucle de vitesse (génératrice tachymétrique) d'un asservissement de position.
Si C(p) = K, on parle de correction tachymétrique simple.

Correcteur en boucle de retour principale (en parallèle)



C'est une disposition moins courante.
Le signal de retour est alors transformé par le correcteur, ce qui peut poser problème.

Correcteur par anticipation



C'est une compensation de l'écart dû à l'entrée. L'écart ε(p) est compensé par la mise en place d'un correcteur en parallèle avec le premier bloc suivant l'écart.

10.8.1. CORRECTION PROPORTIONNELLE $C(p) = K$

Le correcteur est placé en cascade. On a déjà vu (cours de stabilité et précision) que ce correcteur qui augmente le gain (K > 1) de la FTBO provoque :

- une « montée » de son diagramme de Black ;
- une « montée » du diagramme du gain dans le plan de Bode sans changement de phase ;
- un « gonflement » du diagramme de Nyquist.

Un correcteur qui augmente le gain de la FTBO provoque en général :

- un système moins stable ;
- un système plus précis ;
- une augmentation de la bande passante ;
- une plus grande raideur.

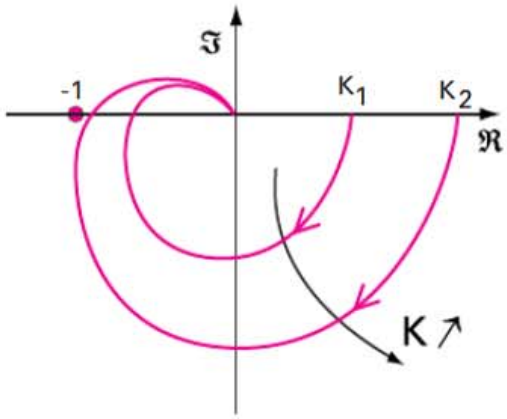
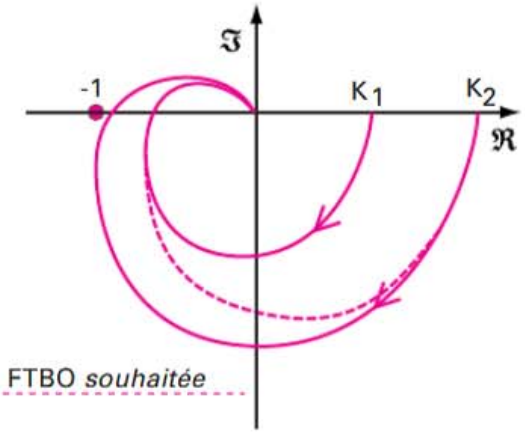


Diagramme de Nyquist

Pour satisfaire le critère de précision, il faudrait avoir le gain K_2. Par contre, pour satisfaire le critère de stabilité il vaudrait mieux avoir le gain K_1. Ces deux critères ne peuvent être vérifiés simultanément par le seul réglage d'un gain K unique.

Pour concilier le critère de précision et le critère de marge de stabilité, il faudrait que la FTBO corresponde au tracé en pointillé ci-contre dans le diagramme de Nyquist. C'est-à-dire que son module soit grand pour les faibles pulsations et faible pour les pulsations élevées.

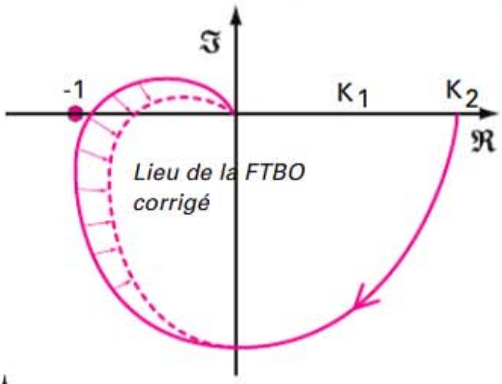


Le réglage du seul paramètre gain n'est pas suffisant pour que ces deux conditions soient simultanément vérifiées. Cependant, il est possible de concilier ces deux conditions car elles concernent des régions différentes de la fonction de transfert.

Les corrections **dérivée** et **intégrale** vont permettre de modifier localement la fonction de transfert du système.

10.8.2. CORRECTION DÉRIVÉE

Cette correction n'affecte que la région des pulsations élevées et permet donc d'augmenter la marge de stabilité. Lorsque l'on utilise un correcteur dérivé, on commence par régler le gain du système non corrigé conformément au critère de précision, puis, le paramètre du correcteur dérivé est choisi de manière à ce que les marges de stabilité en gain et en phase soient respectées.



La fonction de transfert théorique de ce correcteur est de la forme : $C(p) = 1 + \tau p$

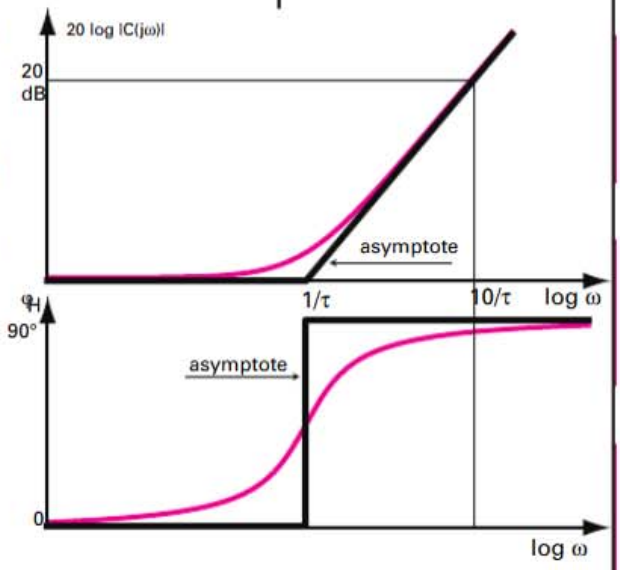
Il apporte de la phase dans les hautes fréquences, augmentant ainsi la stabilité. Un tel correcteur n'est pas physiquement réalisable car le degré du numérateur est supérieur au degré du dénominateur. On l'approxime par une transmittance de la forme :

$\frac{a\tau p}{1+\tau p}$ avec a > 1

Le correcteur a alors pour transmittance :

$$C(p) = 1 + \frac{a\tau p}{1+\tau p} = \frac{1+(1+a).\tau p}{1+\tau p}$$

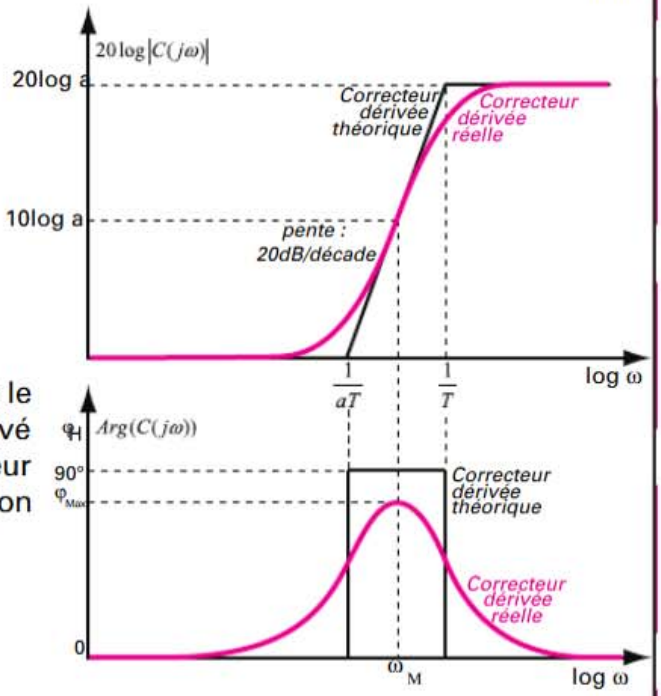
$$C(p) \approx \frac{1+a\tau p}{1+\tau p} \quad a >> 1$$



En pratique, on utilisera un correcteur réel dont la fonction de transfert est de la forme :

$$C(p) = \frac{1+a\tau p}{1+\tau p} \quad avec \ a > 1$$

La différence entre le correcteur dérivé théorique et le correcteur dérivé réel se situe dans la région des pulsations très élevées $\omega > \frac{1}{\tau}$. L'amplification des signaux de pulsation élevée est plus faible pour le correcteur dérivé réel que pour le correcteur dérivé théorique. C'est en fait un avantage pour le correcteur réel puisque les signaux parasites de haute pulsation seront ainsi atténués.



Ce correcteur est aussi désigné par correcteur à « **avance de phase** ».

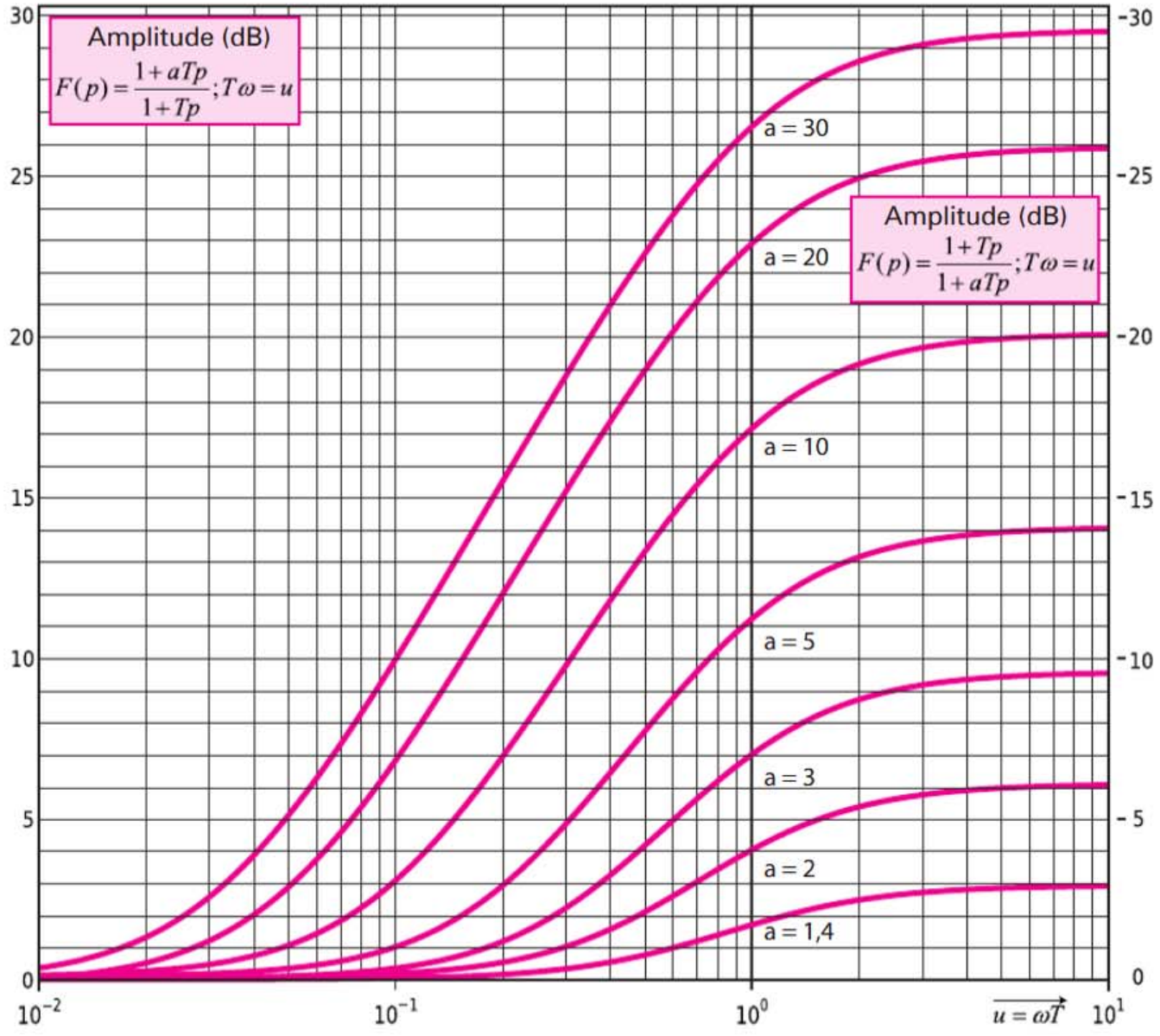
On montre que la phase admet un maximum $\varphi_{Maxi} = \arcsin\frac{a-1}{a+1}$ *pour* $\omega = \omega_M = \frac{1}{T\sqrt{a}}$

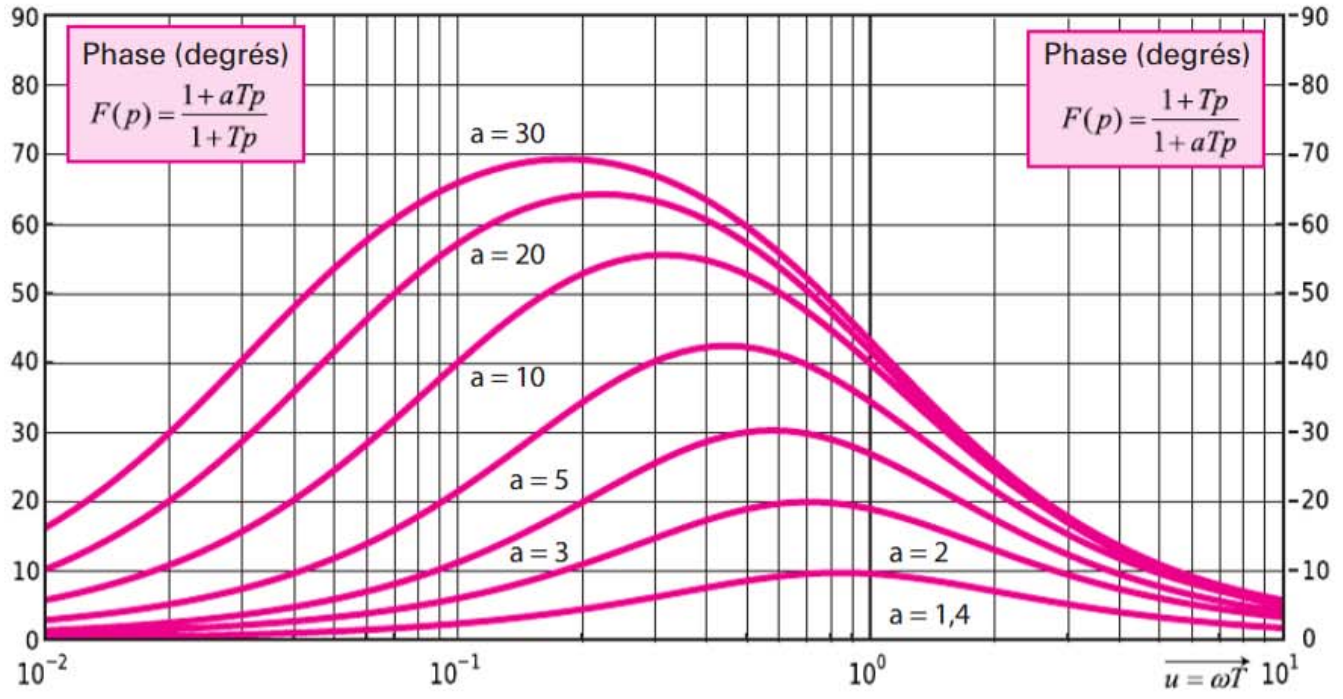
$\varphi = \arctan a\omega T - \arctan \omega T$ et $\frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{aT}{1+(a\omega T)^2} - \frac{T}{1+(\omega T)^2}$ s'annule pour a = 1 et pour $a\omega^2 T^2 = 1$

soit $\omega = \omega_M = \frac{1}{T\sqrt{a}}$. Géométriquement, ω_M est au milieu du segment défini par $\omega = \frac{1}{aT}$ *et* $\omega = \frac{1}{T}$

On donne sur la page suivante le lieu de transfert dans Bode de ce correcteur.

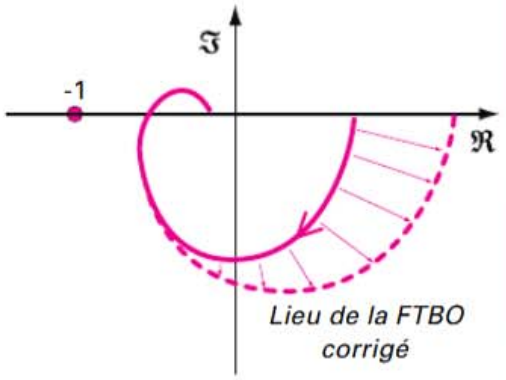
Correction dérivée





10.8.3. CORRECTION INTÉGRALE

Cette correction n'affecte que la région des faibles pulsations. Lorsqu'un tel correcteur est utilisé, on commence par régler le système vis-à-vis de la condition de stabilité, puis, le correcteur intégral est choisi afin d'obtenir une précision satisfaisante du système, par augmentation du gain pour les pulsations faibles.



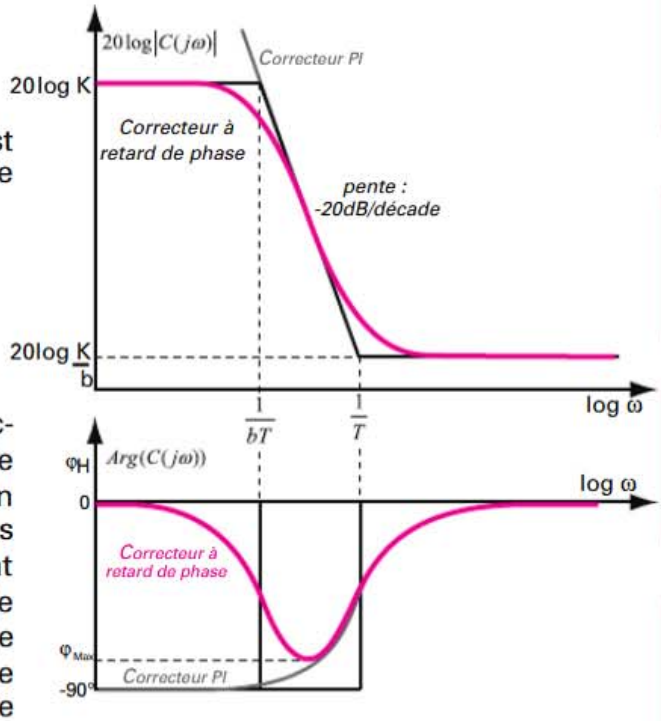
La fonction de transfert théorique de ce correcteur est de la forme :

$$C(p) = K\left(1+\frac{1}{\tau p}\right) = K\left(\frac{1+\tau p}{\tau p}\right)$$

Un correcteur PI (réalisable physiquement) est souvent remplacé par un correcteur à retard de phase.

Sa fonction de transfert est :

$$C(p) = K\left(\frac{1+\tau p}{1+b\tau p}\right) \quad b>1$$



Les diagrammes ci-contre représentent ces correcteurs dans Bode. L'observation du module permet de voir dans quel cas ces correcteurs seront utilisés. On remarque que les pulsations basses sont amplifiées par rapport aux pulsations hautes. Ils se comportent donc comme des filtres passe-bas. Ceci permet de les utiliser pour améliorer la précision d'un système en augmentant le gain en boucle ouverte du système corrigé tout en évitant de modifier la fonction de transfert au voisinage du point critique et de préserver la stabilité du système en boucle fermée.

10.8.4. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE CORRECTION

Correction proportionnelle C(p) = K

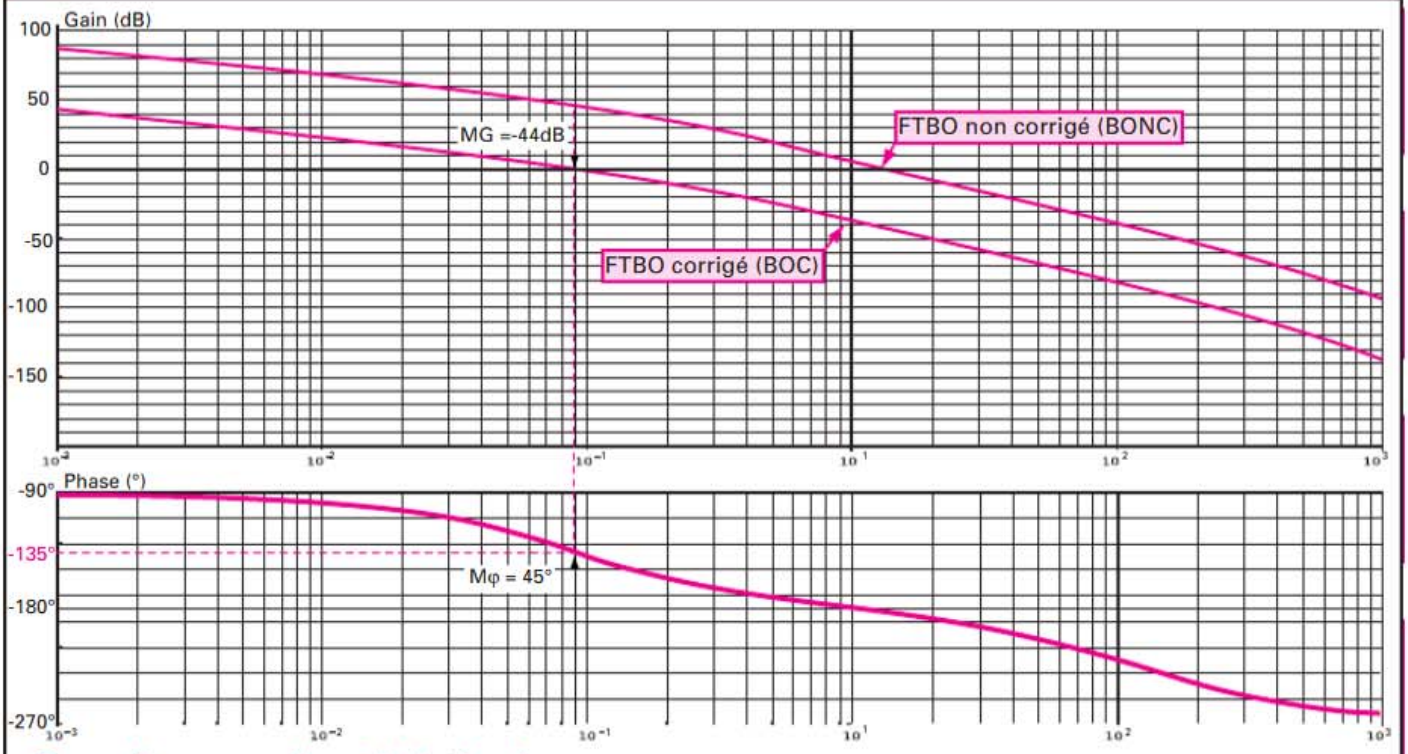
Exemple : Soit un système dynamique à retour unitaire de $\text{FTBO(p)} = \dfrac{20}{p(1+p)(1+10p)}$

Ce système est instable car à un module de 0 dB correspond une phase de –183°, donc il n'y a pas de marge de phase et à une phase de –180° correspond un module de + 5 dB, il n'y a pas de marge de gain donc le système est instable en boucle fermée.
Si on souhaite une marge de phase de Mφ = 45°, il faut que la phase de la BOC (boucle ouverte corrigée) soit égale à (-180° + 45°) = -135° quand son module est à 0 dB. Il faut donc « descendre » la courbe de module de la BONC (boucle ouverte non corrigée) de moins le module de la FTBONC à la pulsation ω(φ= -135°).

Dans l'exemple, pour $\varphi = -135°, \omega = 0,0905 \text{ rads}^{-1}$ et $|\text{FTBONC}| = 44 \text{ dB}$

Il faut donc descendre la courbe BONC de – 44 dB, c'est-à-dire multiplier le gain statique de la FTBONC par $10^{\frac{-44}{20}} = 10^{-2,2} = 63.10^{-4}$
On place en amont de la FTBONC un correcteur proportionnel K = 63.10^{-4}.
Graphiquement, on représente cette action proportionnelle sur deux diagrammes superposés.

Détermination des paramètres de correction



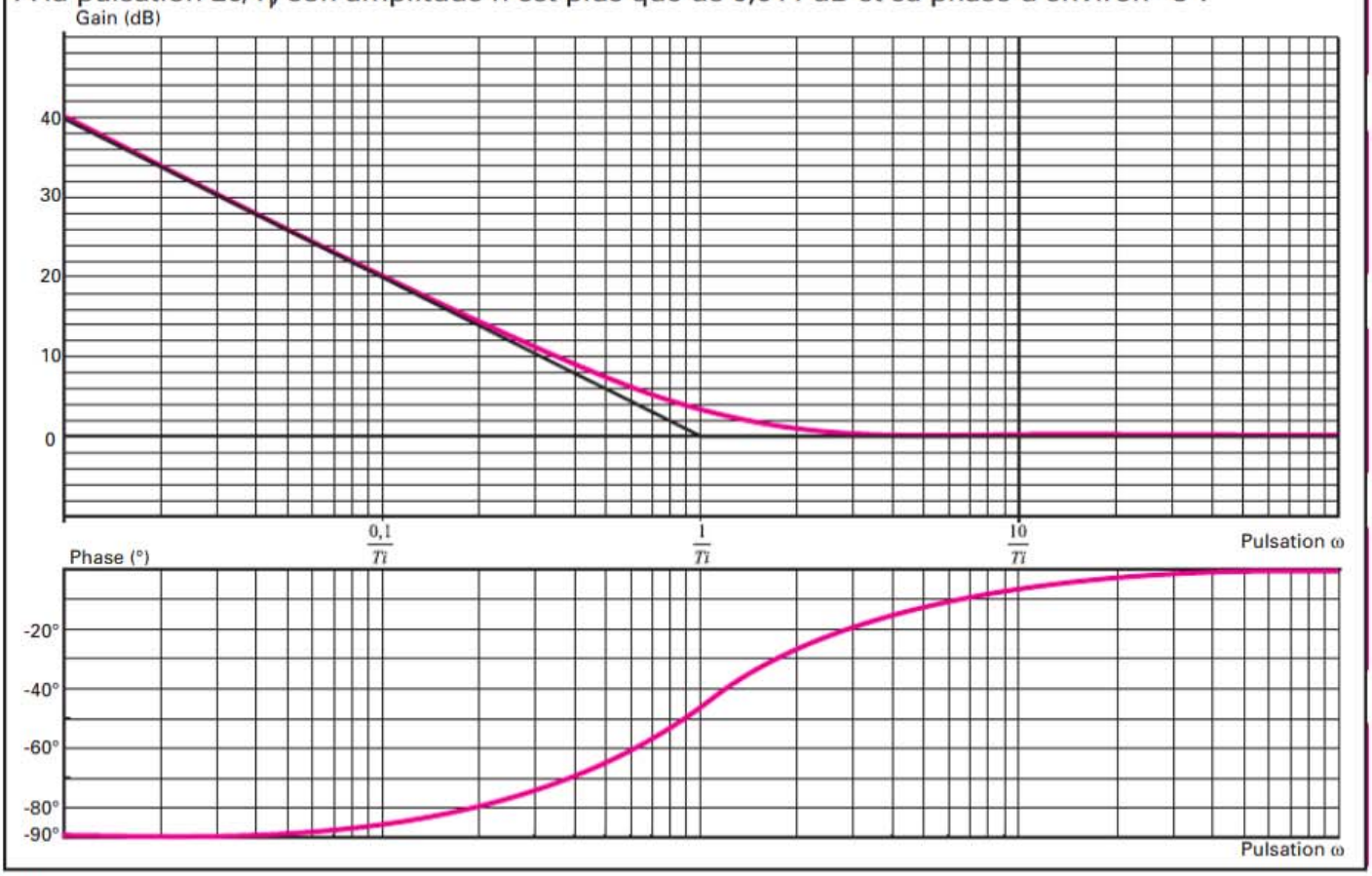
• Correction proportionnelle intégrale

Sa fonction essentielle est d'apporter une intégration dans la FTBO de façon à augmenter la précision sans trop modifier la stabilité.

$$C(p) = K\left(\frac{1+T_i p}{T_i p}\right)$$

Le diagramme de Bode représenté ci-dessous est celui du correcteur I $C(p) = \dfrac{1+T_i p}{T_i p}$

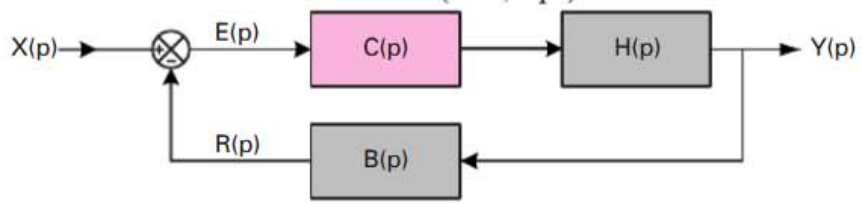
On remarque qu'à la pulsation de cassure 1/Ti, son amplitude est de 3 dB et sa phase de –45°.
A la pulsation $10/T_i$, son amplitude n'est plus que de 0,042 dB et sa phase d'environ –6°.
A la pulsation $20/T_i$, son amplitude n'est plus que de 0,011 dB et sa phase d'environ –3°.



ω	$\frac{1}{T_i}$	$\frac{10}{T_i}$	$\frac{12}{T_i}$	$\frac{15}{T_i}$	$\frac{20}{T_i}$
A(dB)	3	0,042	0,03	0,019	0,011
φ (°)	-45	-5,7	-4,7	-3,8	-2,8
A(dB) approché	3	0	0	0	0
φ (°) approché	-45	-6	-5	-4	-3

C'est un correcteur qui n'apporte pas de gain et « déphase » peu dans les fréquences élevées, notamment à des fréquences supérieures à 10 fois sa pulsation de cassure 1/Ti.

Exemple : Soit un système dynamique $H(p) = \frac{5}{(1+0{,}05p^2)}$ à retour unitaire B(p) = 1 et C(p) = 1



L'amplitude de FTBO(jω) = H(jω) vaut 0 dB à la pulsation ω_c = 40 rad/s et la phase de FTBO(jω) est égale à –127°, soit une marge de phase Mφ = 53° et une marge de gain MG = ∞. Le système est donc stable avec des marges suffisantes.

Par contre, comme la FTBO est de classe 0, l'erreur statique n'est pas nulle et vaut $\varepsilon_s = \frac{1}{1+5} = 0{,}16$ et l'erreur ε_v est infinie (le système est incapable de faire de la poursuite).

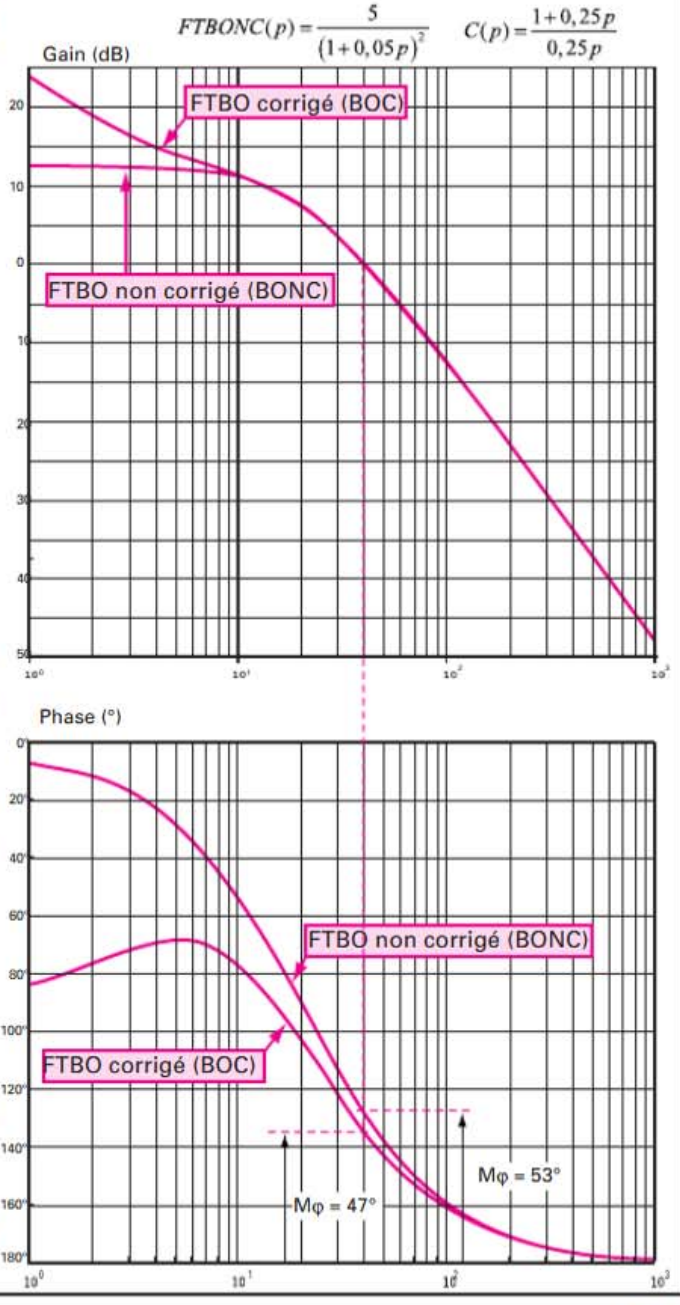
Il faut améliorer la précision du système en plaçant en cascade un correcteur intégral $C(p) = \frac{1+T_i p}{T_i p}$ pour obtenir une FTBO de classe 1 et donc ε_s = 0 et ε_v = 1/5 = 0,2.

Un **moyen très rapide** pour placer ce correcteur (calculer Ti) est de disposer sa pulsation de cassure 1/Ti **une décade avant** la pulsation de coupure à 0 dB de la FTBO non corrigée. L'amplitude à cette pulsation de la FTBO n'est quasiment pas modifiée, par contre sa phase chute d'environ –6° entraînant une marge de phase de 53-6 = 47° ce qui est amplement suffisant pour garantir la stabilité.

On fait donc : $\frac{1}{T_i} = \frac{\omega_{c(FTBONC)}}{10} = \frac{40}{10} = 4$

$$\Rightarrow \quad T_i = 0{,}25s \quad \Rightarrow \quad C(p) = \frac{1+0{,}25p}{0{,}25p}$$

Dans un cas plus général, où la FTBONC ne possède pas de marges de stabilité suffisantes, on est amené à déterminer par le calcul les deux paramètres K et Ti en fonction des performances souhaitées du système corrigé.



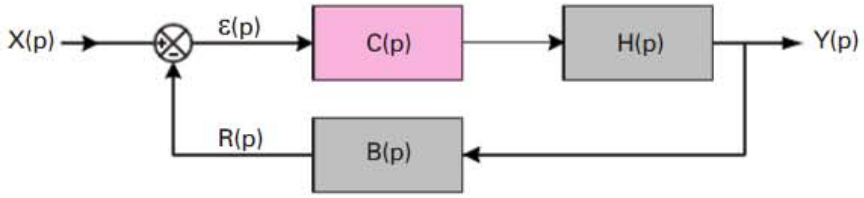
10.8.5. CORRECTION PAR AVANCE DE PHASE

• Correction par avance de phase : $C(p)=\dfrac{1+aT_a p}{1+T_a p}$ *(avec a>1)*

Il n'y a pas de méthode rigoureuse permettant de régler au mieux les paramètres de ce correcteur. Il faut faire un choix au départ et valider ce choix à la fin.
C'est un correcteur qui apporte un maximum de phase φ_M à la pulsation $\omega_a=\dfrac{1}{T_a\sqrt{a}}$ mais aussi une amplitude de 10 log(a) en dB.

Un « placement » simple de ce correcteur consiste à placer sa pulsation $\omega_a=\dfrac{1}{T_a\sqrt{a}}$ sur la pulsation où l'amplitude de la FTBONC vaut –10 log(a), la valeur de « a » étant définie par le supplément de phase que l'on souhaite apporter.

Exemple : Soit un système dynamique $H(p)=\dfrac{100}{p(1+0{,}5p)}$ à retour unitaire B(p) = 1 et C(p) = 1



L'amplitude de FTBO(jω) = H(jω) vaut 0 dB à la pulsation ω_c = 14 rad.s^{-1} et la phase de FTBO(jω) est égale à –172°, soit une marge de phase Mφ = 8°.
Le système n'est donc pas suffisamment stable avec Mφ << 45°.

Comme la FTBO est de classe 1, l'erreur statique ε_s est nulle et l'erreur ε_v vaut 1/100 (le système est capable de faire de la poursuite avec une erreur de un centième).

Il faut améliorer la stabilité du système en plaçant en cascade un correcteur à avance de phase :
$C(p)=\dfrac{1+aT_a p}{1+T_a p}$ On choisit un coefficient a = 6 car ce correcteur pourra apporter un supplément de phase de : $\arcsin\dfrac{a-1}{a+1}=\arcsin\dfrac{5}{7}=45{,}58°\approx 45°$

Par contre, il apporte aussi à la pulsation $\omega_a=\dfrac{1}{T_a\sqrt{a}}=\dfrac{1}{T_a\sqrt{6}}=\dfrac{0{,}408}{T_a}$ une amplitude de 10 log(6) = 7,78 dB.

On cherche la pulsation où la FTBONC a une amplitude de –7,78 dB soit

$$|\text{FTBONC}(j\omega)|=10^{\frac{-7{,}78}{20}}=0{,}4083=\frac{100}{\omega\sqrt{1+0{,}25\omega^2}}$$

$$10^4 = 0{,}1667\omega^2(1+0{,}25\omega^2)$$

La racine de cette équation est : ω = 22,08 rads^{-1}, ce qui donne la constante de temps du correcteur : T_a = 18,5.10^{-3} s.

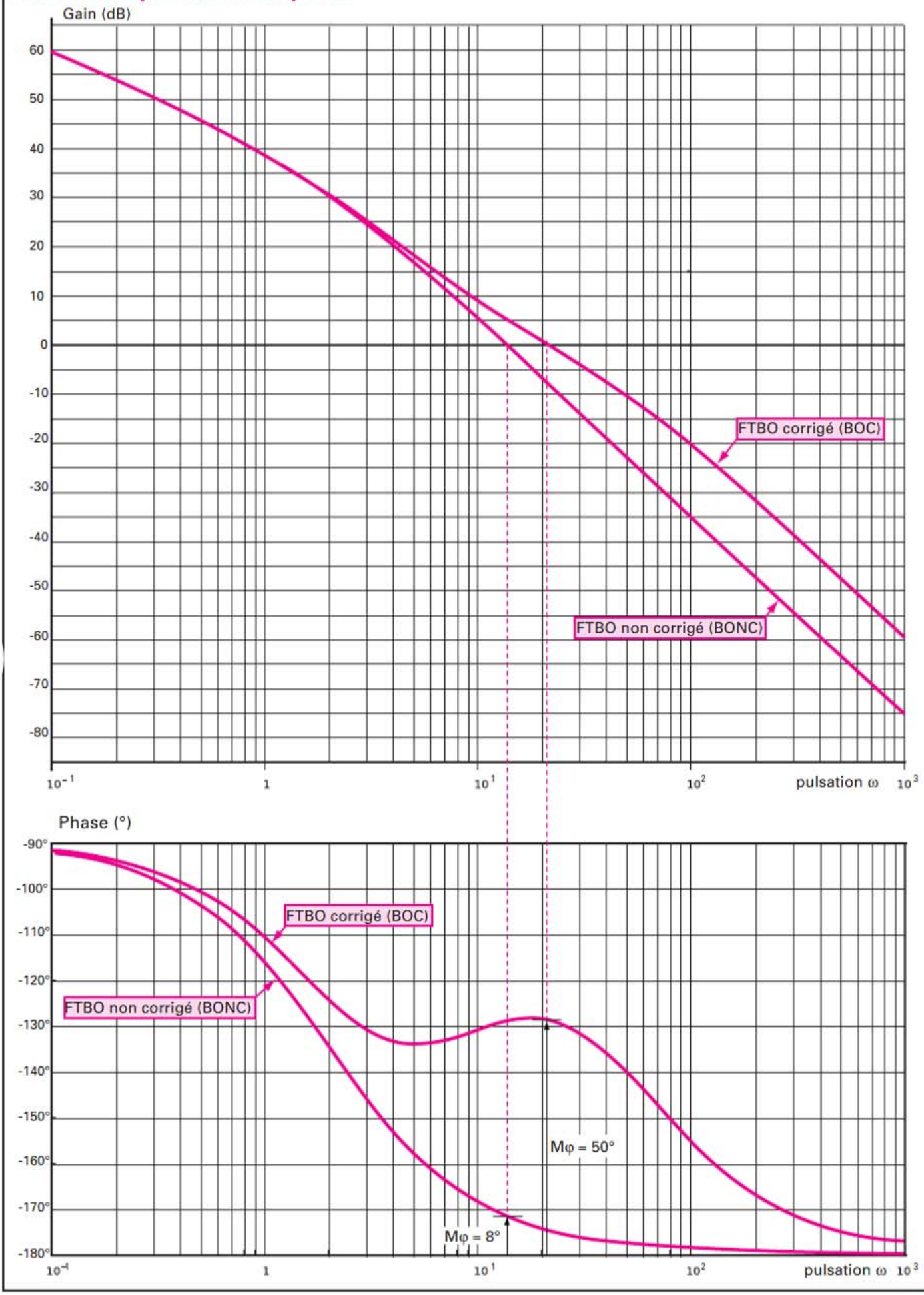
FT du correcteur est : $\boxed{C(p)=\dfrac{1+0{,}111.p}{1+0{,}0185.p}}$

Quelle est la nouvelle marge de phase du système corrigé ?
Il suffit de calculer la phase de la FTBONC à la pulsation ω = 22,08 rads^{-1}

$$\varphi_{(\text{FTBONC},\omega=22{,}08)} = -90° - \arctan 0{,}5\times 22{,}08 = -174{,}8°$$

La marge de phase du système corrigé vaut : Mφ = 180 – 174,8 + 45 ≈ 50° $\boxed{M\varphi \approx 50°}$

• Correction par avance de phase



SYMBOLES DES GRANDEURS ET DES UNITÉS DE MESURE

MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES NF X 02-006

Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	Préfixe	Symbole
10^{18} ou 1 000 000 000 000 000 000	exa	E	10^{-1} ou 0,1	déci	d
10^{15} ou 1 000 000 000 000 000	peta	P	10^{-2} ou 0,01	centi	c
10^{12} ou 1 000 000 000 000	téra	T	10^{-3} ou 0,001	milli	m
10^{9} ou 1 000 000 000	giga	G	10^{-6} ou 0,000 001	micro	µ
10^{6} ou 1 000 000	méga	M	10^{-9} ou 0,000 000 001	nano	n
10^{3} ou 1 000	kilo	k	10^{-12} ou 0,000 000 000 001	pico	p
10^{2} ou 100	hecto	h	10^{-15} ou 0,000 000 000 000 001	femto	f
10^{1} ou 10	déca	da	10^{-18} ou 0,000 000 000 000 000 001	atto	a
Exemple : 1 µF = 10^{-6} F = 0,000 001 F			1 mg = 10^{-3} g = 0,001 g		

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES COURANTS NF X 02-100

Majuscules	Minuscules	Nom	Majuscules	Minuscules	Nom	Majuscules	Minuscules	Nom	Majuscules	Minuscules	Nom
A	α	alpha	Σ	σ	sigma	I	ι	iota	Z	ζ	zêta
B	β	bêta	T	τ	tau	Λ	λ	lambda	Ξ	ξ	xi
K	κ	kappa	Y	υ	upsilon	M	µ	mu	X	χ	chi
Δ	δ	delta	H	η	êta	N	ν	nu		sin	sinus
E	ε	epsilon	Θ	θ ϑ	thêta	O	o	omicron		cos	cosinus
Φ	φ ϕ	phi	Ψ	ψ	psi	Π	π ϖ	pi		tan	tangente
Γ	γ	gamma	Ω	ω	oméga	P	ρ	rhô		cot	cotangente

GRANDEURS, UNITÉS LÉGALES ET SYMBOLES. PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES ET CONNEXES NF X 02-202

Symbole	Dimension	Nom	Définition
Période T	T	Seconde s	
Constante de temps τ (T)	T	Seconde s	
Fréquence f, ν $\frac{1}{T}$	T^{-1} Hz	Hertz	Fréquence d'un phénomène périodique dont la période est 1 seconde
Fréquence de rotation n	T^{-1}	Seconde à la puissance moins un s^{-1}	
Pulsation ω	T^{-1} $2\pi f$	Pulsation rad/s	ω=2πf quand f est une fréquence
Déphasage différence de phase φ		Radian rad	Dans les fonctions : $a = a_m \sin \omega t$, $b = b_m \sin(\omega t - \varphi)$ φ est le déphasage de b par rapport à a
Longueur d'onde λ	L	Mètre m	
Niveau de puissance Lp		Décibel dB	$1\ dB = 10 \lg \frac{P}{P_0}$ avec $\frac{P}{P_0} = 10^{1/10}$
Coefficient d'amortis. δ	T^{-1}	Seconde à la puissance -1 s^{-1}	$t = \frac{1}{\delta}$ = constante de temps de l'amplitude

GRANDEURS, UNITÉS LÉGALES ET SYMBOLES. MÉCANIQUE NF X 02-203

Symbole	Dimension	Nom	Définition
Masse m	M	Kilogramme kg	Tonne t = 10^3 kg Carat métrique = 2×10^{-4} kg
Masse volumique ρ	$L^{-3}M$	Kilogramme par mètre cube : kg/m^3	1 t/m^3 = 1 000 kg/m^3 = 1 g/cm^3
Densité d			$\frac{\text{Masse volumique}}{\text{Masse volumique de référence}}$
Volume massique v	$L^3\ M^1$	Mètre cube par kilog. m^3/kg	$\frac{\text{Volume}}{\text{Masse}}$
Quantité de mouv. p	LMT^{-1}	Kilog. mètre par seconde kg·m/s	Produit de la masse par la vitesse
Moment cinétique L	$L^2\ MT^{-1}$	Kilog. mètre carré par seconde $kg \cdot m^2/s$	C'est aussi la quantité de mouvement
Moment d'inertie I, J	L^2M	Kilog. mètre carré $kg \cdot m^2$	
Force F	LMT^{-2}	Newton N	1 N = 1 $m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Constante de gravitation G(f)	$L^3M^{-1}\ T^2$	Newton mètre carré par kilog.	$N \cdot m^2/kg$
Moment d'une force M, T	$L^2\ MT^{-2}$	Newton mètre N·m	ATTENTION mN = millinewton
Pression p	$L^{-1}\ MT^{-2}$	Pascal Pa bar	1 Pa = 1 N/m^2 = 1 $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$ 1 bar = 10^5 Pa 1 Pa = 0,102 mm d'eau
Travail W (A)	$L^2\ MT^{-2}$	Joule J wattheure	1 J = 1 $m^2 kg \cdot s^{-2}$ = 1 N·m = 1 W·s 1 Wh = 3 600 J
Énergie E (W)		Électronvolt eV	1 eV = 1,602 189 2·10^{-19} J
Puissance P	$L^2\ MT^{-3}$	Watt W	1 W = 1 J/s = 1 $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Déb. masse q_m	MT^{-1}	Kilog. par seconde kg/s	
Déb. vol q_v	$L^3\ T^1$	Mètre cube par seconde m^3/s	
Rendement η	Sans		$\eta = \frac{\text{grandeur de sortie}}{\text{grandeur d'entrée}}$

GRANDEURS, UNITÉS LÉGALES ET SYMBOLES. ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME NF X 02-205

Symbole	Dimension	Nom	Définition
Courant électrique I		Ampère A	$I = \frac{Q}{t}$ (1 coulomb par seconde)
Charge électrique Q	TI	Coulomb C	1 C = 1 A·s 1 Ah = 3,60 kC Q : désigne aussi la quantité d'électricité
Charge volumique (η)	$L^{-3}TI$	Coulomb par mètre cube C/m³	$1\ C/m^3 = 1\ m^{-3}s\cdot A$
Champ électrique E (K)	$L^{-3}M^{-1}$	Volt par mètre V/m	$1\ V/m = 1\ m\cdot kg\cdot s^{-3}A^{-1}$
Potentiel électrique V (φ)		Volt V	$1\ V = 1\ W/A = 1\ m^2\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$
Différence de potentiel tension U (V)	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	Volt V	u, v, valeur instantanée
f.é.m. E		Volt V	force électromotrice
Densité linéique du Ct A (α)	$L^{-1}I$	Ampère par mètre A/m	$1\ A/m = 1\ m^{-1}\cdot A$
Champ magnétique H	$L^{-1}I$	Ampère par mètre A/m	$1\ A/m = 1\ m^{-1}\cdot A$
Force magnéto-motr. F, F_m		Ampère A	$F = \oint H_s\,ds$
Induction magnétique B	$MT^{-2}I^{-1}$	Tesla T	$1\ T = 1\ Wb/m^2 = 1\ V\cdot s/m^2 = 1\ kg\cdot s^{-2}A^{-1}$
Flux Φ	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	Weber Wb	$1\ Wb = 1\ V\cdot s = 1\ m^2\cdot kg\cdot s^{-2}A^{-1}$
Poten. vect. magnétique A	$LMT^{-2}I^{-1}$	Weber par mètre Wb/m	$1\ Wb/m = 1\ m\cdot kg\cdot s^{-2}A^{-1}$
Inductance propre L		Henry H	$1\ H = 1\ Wb/A = 1\ m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
Inductance mutuelle M, L_{12}	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	Henry H	
Perméabilité μ	$LMT^{-2}I^{-2}$	Henry par mètre H/m	$1\ H/m = 1\ Wb/(A\cdot m) = 1\ m\cdot kg\cdot s^{-2}A^{-2}$
Perméab. du vide μ_0	$\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot c_0^2}$	H/m	$\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}$ H/m
Perméab. relative μ_r	sans		$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$
Susceptibil. magnét. X	sans		$x = \mu_r - 1$
Aimantation H_pM	$L^{-1}I$	Ampère par mètre A/m	$1\ A/m = 1\ m^{-1}\cdot A$ $H_i = \frac{B}{\mu_0} - H$

Symbole	Dimension	Nom	Définition
Induction électrique déplacem. D	$L^{-2}TI$	Coulomb par mètre carré C/m^2	$1\ C/m^2 = 1\ m^{-2}\cdot s\cdot A$
Flux élect. flux de déplacem. Ψ	TI	Coulomb C	1 C = 1 A·s
Capacité C	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	Farad F	$1\ F = 1\ c/v = 1\ m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^4\cdot A^2$
Permittivité ε	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	Farad par mètre F/m	$1\ F/m = 1\ m^{-3}kg^{-1}\cdot s^4\cdot A^2$
Const. élect. permittivité du vide ε_0			$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot C_0^2} = \frac{10^7}{4\pi C_0}$ F/m $= 8{,}854\ 187\ 82 \times 10^{-12}$ F/m
Permittivité relative ε_r	Sans		$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$
Densité du courant J (S)	$L^{-2}I$	Ampère par mètre carré A/m^2	$1\ A/m^2 = 1\ m^{-2}\cdot A$
Dens. énerg. électrique W	$L^{-1}MT^{-2}$	Joule par mètre cube J/m^3	$1\ J/m^3 = 1\ m^{-1}kg\cdot s^{-2}$
Résistance en c¹c^u R	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	Ohm Ω	$1\ \Omega = 1\ V/A = 1\ m^2kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-2}$
Conductance en c^u G	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$ $G = \frac{1}{R}$	Siemens S	$1\ S = 1\ A/V = 1\ m^{-2}kg^{-1}s^3A^2$
Résistivité ρ	$L^3MT^{-3}I^{-2}$	Ohm mètre Ω·m	$1\ \Omega\cdot m = 1\ m^3kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-2}$
Conductivité γ, σ	$L^{-3}M^{-1}T^3I^{-2}$	Siemens par mètre S/m	$1\ S/m = 1\ m^{-3}kg^{-1}s^3\cdot A^2$
Réluctance R, R_m	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	Henry puiss. moins 1 H^{-1}	$1\ H^{-1} = 1\ m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^2\cdot A^2$
Perméance Λ (P)	$L^{-2}MT^{-2}I^{-2}$	Henry H	$1\ H = 1\ m^{-2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
Nb de spires N	Sans		
Nb de phases m	Sans		
Nb de paires de pôles p	Sans		
Déphasage φ	Sans	Radian rad	Lorsque $u = u_m \cos \omega t$ et $i = i_m \cos(\omega t - \varphi)$, φ est le déphasage
Impédance Z	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	Ohm Ω	$1\ \Omega = 1\ V/A = 1\ m^2\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-2}$
Réactance X		Ω	$X = L\omega - \frac{1}{C\omega}$ (partie imaginaire de l'impédance complexe)
Résistance R		Ω	Partie réelle de l'impédance (complexe)
Facteur de qualité Q	Sans		$Q = \frac{\lvert X \rvert}{R}$
Admittance Y		Siemens S	$Y = \frac{1}{Z}$
Puissance P (Pi)	L^2MT^{-3}	Watt W	$1\ W = 1\ J/s = 1\ m^2kg\cdot s^{-3}$

LEXIQUE ANGLAIS - FRANÇAIS

A

AC (ALTeRNaTING CuRReNT) : courant alternatif
ACCeSS : accès
ACCuMuLaToR : accumulateur, totalisateur
ACTuaTIoN : actionnement, modification, pilotage
ADC (ANaLoG-To-DIGITaL CoNveRTeR) : convertisseur analogique/numérique
AddeR : additionneur
ADP (AuToMaTIC DaTa PRoCeSSING) : traitement automatique des données
ADSL (ASyMeTRIC DIGITaL SubSCRIbeR LINe) : (voir xDSL)
ALGoRITHMICS : algorithmique
ALU (ARITHMeTIC LoGIC UNIC) : unité arithmétique et logique
ANaLoG : analogique
ANd : ET (intersection logique)
AND-OR-INVERT : ET-OU-NON
ARea : zone
ARITHMeTIC LoGIC uNIT : unité arithmétique et logique
ARRay : tableau de valeurs
ARRay pRoCeSSoR : processeur vectoriel
ATM (Asynchronous Transfer Mode) : technologie de transmission de l'information
AvaILabLe : disponible
AxIS : axes

B

BaCk up : de secours (sauvegarde)
BaNd wIdTH : bande passante
BASIC (Beginners All-purpose Symbolic Instruction Code) : langage de programmation
BCD (BINaRy Coded DeCIMaL) : décimal codé binaire
BINaRy : binaire
BIT (bINaRy dIGIT) : élément binaire, notation 1 ou 0 (eb)
BITMap : image en mode point
BoaRd : carte
BoRRow : retenue en soustraction
BRIGHTeNING : surbrillance
BuffeR : tampon, mémoire intermédiaire
BuG : bogue (erreur)
BuILd : compiler, construire
BuS : circuit
ByTe : groupe de positions binaires

C

CaLL (To) : appeler
CAM (CoNTeNT ACCeSS MeMoRy) : mémoire associative
CaRRy : retenue (arithmétique)
CaRRy : report, retenue en addition
CaSe : boîtier
CD-ROM : disque optique compact
CHIp : substrat de circuit intégré, pastille, microplaquette
CHIp eNabLe : validation d'un circuit
CLeaR : remise à zéro
CLIpboaRd : presse papier
CLoCk : horloge
CMOS (CoMpLeMeNTaRy MOS) : technologie à MOS complémentaire
COBOL (COmmon Business Oriented Language) : langage évolué de programmation
CoMpuTeR : calculateur, ordinateur
CoNveRSaTIoNaL Mode : mode dialogué
CouNTeR : compteur
CPU (CeNTRaL PRoCeSSING UNIT) : unité centrale de traitement
CuRReNT : courant

D

DaTa : donnée
DaTa baNk : banque de données
DaTa baSe : base de données
DBMS (Data Base Management System) : système de gestion de base de données
DC (DIReCT CuRReNT) : courant continu
DebuG (To) : déboguer
DeCoupLING : découplage
DeLay : retard, temporisation
DevICe : dispositif
DIaC (DIode ALTeRNaTING CuRReNT) : diode à seuil bidirectionnelle
DIGIT : chiffre (plusieurs digits forment un mot)
DIGITaL : numérique
DIReCT aCCeSS : accès direct
DIReCToRy : répertoire
DISpLay : affichage, afficheur, visualisation
DNS (Domain Name Server) : permet d'associer un nom logique à une adresse IP
DoubLe : nombre en virgule flottante double précision
DowN/up : décomptage/comptage
DRIveR : circuit d'attaque, circuit de commande
DTL (DIode TRaNSISToR LoGIC) : circuit logique à diodes et transistors
DuMp (To) : décharger vers...
DuTy CyCLe : rapport cyclique

E

ECL (EMITTeR CoupLed LoGIC) : circuit logique à couplage d'émetteur
EdGe : front d'un signal
EdIToR : éditeur
EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) : mémoire morte programmable électriquement et effaçable électriquement.
ENabLe : validation
ENabLe INpuT : entrée de validation
EPROM (Electrically Programmable Read Only Memory) : mémoire morte programmable électriquement et effaçable par UV.
EveN : pair
ExpaNdabLe : extensif, évolutif

F

FaLL TIMe (Tf) : temps de descente
faLSe : faux
FAN. IN : entrance
FAN. ouT : sortance
FET (FIeLd EffeCT TRaNSISToR) : transistor à effet de champ
FIeLd : zone de mémoire de carte d'instruction
FIFO (FIRST INpuT FIRST OuTput) : mémoire premier entré, premier sorti
FILe : fichier
FIRMwaRe : microprogramme
FIxed-STep : pas (durée) de simulation fixe
FLIp. FLop : bascule
FLoppy dISk : disquette
FLow : flux pneumatique ou hydraulique
FORTRAN (FORMuLa TRANSLaTIoN) : langage évolué de programmation
FRequeNCy : fréquence
FROM (FuSIbLe Read ONLy MeMoRy) : mémoire morte à fusible
FRoM TaG : étiquette venant de
FuLL addeR : additionneur complet
FuLL TexT : en texte intégral

G

GaTe : porte, gâchette
GeNeRIC : générique
GoTo TaG : étiquette aller vers
GPU (GRapHIC PRoCeSSeuR UNIT) : processeur graphique
GRavITy : gravité
GRAY : code binaire réfléchi
GRouNd : masse, terre

H

HaLf-addeR : demi-additionneur
HaLT : arrêter, interrompre
HaRd Copy : tirage, fac-similé
HaRdwaRe : matériel, machine
HeaT : chaleur
HexadeCIMaL : système de numération en base 16
HIde : cacher
HIGHLIGHTING : marquage
HoLd TIMe (THoLd) : temps de maintien
HoST-boaRd : carte hôte
HTL (HIGH THReSHoLd LoGIC) : technologie à haute immunité au bruit

I

IC (INTeGRaTed CIRCuIT) : circuit intégré
IMpLeMeNT (To) : implanter
INCReMeNT : valeur de progression, pas de progression
INHeRIT : hérité
INpuT : entrée
INpuT : entrée, introduction
INSIGNIfICaNT : non signification
INSTRuCTIoN : instruction
INTeRfaCe : liaison, jonction
INuSed INpuTS : entrée inutilisée

J

JoySTICk : manche, poignée
JuMp : branchement, saut (programmation)
KeyboaRd : clavier
KeywoRd : mot clé
KNob : bouton rotatif

L

LabeL : étiquette
LaTCH : bascule électronique
LayouT : disposition
LCD (LIquId CRySTaL DISpLay) : affichage à cristaux liquides
LED (LIGHT EMITTING DIode) : diode électroluminescente
LeveL : niveau
LIFO (LaST IN FIRST OuT) : mémoire dernier entré, premier sorti
LINeaR : linéaire
LINk : lien
LIST (To) : lister
LISTING : listage
Load : charger
Load : entrée de chargement, de programmation, charge
Load-ReSISTaNCe : résistance de charge
LoCaL ARea NeTwoRk : réseau local (LAN)
LoCk ouT : blocage
LoGGING : journal d'événements
LSI (LaRGe SCaLe INTeGRaTIoN) : intégration à grande échelle

M

MaGNeTIC dISk : disque magnétique
MaINTaIN ReGuLaTIoN : taux de régulation
MaINTaIN RIppLe : taux d'ondulation
MaSk : masque
MaSS SToRaGe : mémoire de masse
MaTLab : langage de programmation

LEXIQUE ANGLAIS - FRANÇAIS

Memory : mémoire
Metafil : image en données vectorielles et/ou en données composites
Microprocessor : microprocesseur
MOS : technologie de circuit intégré à métal et oxyde de silicium
Motion : position
Mouse : souris
MSI (Medium Scale Integration) : intégration à moyenne échelle
Multibody : représentation volumique (Simescape)
Multiplexor : multiplexeur
Multiprocessing : multitraitement
Multiprogramming : multiprogrammation

N

N MOS (N channel MOS) : MOS à canal N
NAND (Not AND) : ET NON
Negative edge triggered : déclenchement sur front descendant
Noise Immunity : immunité aux bruits
None : rien
NOR (Not OR) : OU NON
Numeric : numérique

O

Odd : impair
Odd/even parity generator : générateur de parité ou imparité
Off : hors service
Off line : autonome
Offset : tension de décalage
On : en service
On-line : en ligne
Open : ouvert
Open collector : collecteur ouvert, sans charge
Operating system : système d'exploitation (OS)
Or : OU
Output : sortie

P

P MOS (P channel MOS) : MOS à canal P
Package : boîtier, progiciel
Parity : parité
Peak forward current : courant direct de crête
Peak working voltage : tension maximale d'utilisation
Personal computer : ordinateur individuel (PC)
Pixel : pixel
Plot : tracé (de courbe ou autre)
Pointer : pointeur
POP3 (Post Office Protocol version 3) : protocole de réception de messages électroniques
Positive edge triggered : déclenchement sur front montant
Power : consommation, puissance
Power off : arrêt
Power on : marche
Power supply : alimentation
Preset : affichage ou mise en 1
Pressure : pression
Priority encoder : codeur prioritaire
Processor : unité centrale, processeur
PROM : mémoire programmable utilisée en lecture
Pull : extraire, sortir
Pulse : impulsion
Pulse width : largeur d'impulsion
Push : pousser, appuyer, enfoncer

R

Rack : châssis, tiroir
RAM (Random Access Memory) : mémoire vive
Rate : rythme, vitesse
Read : lecture
Read-relay : relais à ampoule (ILS)
Real time : temps réel
Register : registre
Register file : ensemble de registre
Repeating : répétition
REPROM : mémoire reprogrammable utilisée en lecture
Reset : remise à zéro
Restart (to) : relancer
Restore (to) : restaurer
Ripple clock : horloge à signal carré
Rise time (trise) : temps de montée
ROM (Read Only Memory) : mémoire morte utilisée en lecture
Rounding ceiling : arrondi vers la valeur entière supérieure
Rounding convergent : arrondi vers la valeur entière la plus proche.
Rounding floor : arrondi vers la valeur entière inférieure
Routine : programme, sous programme, procédure
Run : avancer, fonctionner

S

Sample time: temps d'échantillonnage
Scaling : échelle
Scope : oscilloscope
Scrolling : défilement
Select input : entrée de sélection
Selector : sélecteur ou multiplexeur
Sending : envoi
Sensor : capteur détecteur
Serial access : accès séquentiel
Set : mise en 1
Set (to) : instaurer
Set-up time (tset-up) : temps de préaffichage
Shift : décalage
Show : montrer
Signed integer (int) : nombre binaire entier signé
Simple : nombre en virgule flottante simple précision
Single : unique, mono, simple
Skew-time : décalage dans le temps
Slew rate : vitesse de balayage
SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) : protocole de messagerie Internet
Software : logiciel, programme
Software engineering : génie logiciel
Solver : paramètre de résolution
Span : envergure, durée, intervalle
Speed : vitesse
Spreadsheet : tableur
sqrt : square root (abrégé en « sqrt ») racine carrée
SSI (Small Scale Integration) : intégration à petite échelle
Stack : pile
Stack pointer : registre d'adresse de pile
Stair : escalier
Statement : instruction
Storage : mémoire
Streamer : dévideur
Strobe : validation, échantillonnage
Subroutine : sous-programme
Subtraction : soustraction
Sum : sommateur (additionneur ou soustracteur)
Switch : interrupteur, bouton

T

Target hardware :cible matérielle
TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) : ensemble de protocoles de communication Internet
TDM (Time Division Multiplexing) : multiplexage temporel
Teleprocessing : télétraitement
Terminal : terminal
Text processing : traitement de texte
Thermal resistance : résistance thermique
Tick interval: Intervalle de graduation
Time : temps
Timer : rythmer, horloge
Torque : couple
Touch screen : écran tactile
Tri state : trois états
Triac (Triode Alternating Current) : thyristor bidirectionnel
Trigger : circuit avec seuil d'hystérésis, déclenchement
True : vrai
TTL (Transistor-Transistor Logic) : Logique transistor - transistor
Turn on time : temps total d'établissement

U

UJT (Uni-Jonction Transistor) : transistor à une jonction
Unit : unité
Unsigned integer (uint) : nombre binaire entier non signé
Unspecified : non spécifié
UV : ultraviolets

V

Value : valeur
Valve : distributeur, vanne
Variable-step : pas (durée) de simulation variable
Vector : vecteur
Velocity : vitesse
Version : version
VIH (Voltage Input High) : tension d'entrée niveau haut
VIL (Voltage Input Low) : tension d'entrée niveau bas
Virtual jonction temperature : température virtuelle de jonction
VLSI (Very Large Scale Integration) : intégration à très grande échelle
VOH (Voltage Output High) : tension de sortie niveau haut
VOL (Voltage Output Low) : tension de sortie niveau bas

W

Wafer : plaquette
WAN (Wide Area Network) : réseau informatique de grande dimension
Waveform : forme de signal
Way : voie
Wired OR : ou câblé, ou fantôme
With : avec
Word : mot (en général 16 bits)
Workspace : espace de travail
Write : écriture

X

xDSL (ADSL, HDSL, SDSL, VDSL...) (Digital Subscriber Line) : norme, procédé de télécommunication

Z

Zero crossing : passage à zéro

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Abrasion, usinage par 169
Absolu (codeurs incrémental et) 335
Accélération (cinématique) 254
Accéléromètre gyroscope I2C MPU6050 498
Accéléromètre I2C 3 axes MMA7455L 497
Accouplements 126
Accouplements (guide de choix) 128
Accouplements (symboles) 130
Accouplements élastiques 128
Accouplements par joints homocinétiques 130
Accouplements par manchons cannelés 127
Accouplements rigides 126
Accumulateur plomb acide (Pb) 291
Accumulateurs et piles 288
Aciers (désignation) 183
ACK I2C condition (Liaisons numériques) 513
ACK CAN condition (Liaisons numériques) 516
Acquisition (chaîne) (à l'aide d'une carte à microcontrôleur) 490
Actionneurs et préactionneurs (transformation d'énergie) 94
Actions mécaniques (modélisation-torseur) 244
Actions mécaniques (statique) 243
Addition binaire 306
Adhérence et frottement 251
Adressage 474
Adressage (les réseaux) 520
Adresse (les mémoires) 471
Adresses IP 520
Afficheurs 7 segments 322
Aimant 384
Aimants permanents (moteurs pas-à-pas) 397
Ajustements 227
Ajustements (écriture) 232
Ajustements courants (tableau) 229
Ajustements des roulements 62
Alcaline (la pile) 289
Algèbre de Boole 316
Algorigramme 484
Algorithme 484
Algorithmique 484
Alimentation électrique d'un circuit intégré 308
Alimentation pneumatique 99
Alternative (algorithmique) 486
ALU ou UAL unité arithmétique et logique 470
Aluminium et alliages (désignation) 185
Ambiance thermique 38
Amorphe (silicium) 348
Amplificateur intégré 370
Amplification (amplificateur intégré) 371
Amplitude 285
Analogique 287
Analogique (types d'informations) 439
Analyse de la valeur 29
Analyse des coûts 31
Analyse descendante ou SADT 15
Analyse fonctionnelle 8
Analyse fonctionnelle des produits industriels 18
Analyse fonctionnelle technique (AFT) 8
Angle de conduction 357
Anneaux élastiques pour alésages (circlips) 156
Anneaux élastiques pour arbres (circlips) 155
Anode (diode) 337
Anti-rebond (montage) 327
AOP, AIL (amplificateur intégré) 370
Apériodique (régime) (CPGE) 550
Appareil de mesure 299
Approximations successives (conversion CAN) 382
Arbres cannelés 153
Arbres pour douilles à billes 54
Architecture d'un système à microprocesseur 476
Architecture générale d'un système automatisé 438
Arduino (cartes) 477
Arduino Mega 482
Arduino Uno 480
Arête de poisson, diagramme cause-effet 18
Arêtes fictives 201
Articulations sphériques 58
ASCII (le code) 307
Asphyxie (protection des personnes) 427
Assemblage - Montage Fonctionnel 92
Assemblage collé 179
Assembleur 483
Asservissements (notions sur les) 434
Assurance qualité ISO 9000-2000 (F) 28
Astable 555 et 556 366
Astable (amplificateur intégré) 375
Asynchrone (compteur) 332
Asynchrone (Liaisons numériques) 511
Asynchrone (moteur électrique triphasé) 407
Asynchrone (moteur) modélisation multiphysique 413
Atmega 238 (microcontrôleur) 479, 481
ATMEL (microcontrôleur) 479
Audit qualité 28
Auto-décharge (accumulateurs) 288
Automate programmable Zelio Logic 2 460
Avance de phase (correction) (CPGE) 578
Avant-projet : recherche de solutions constructives 92
AVR (cpu) 479

B

Bagues à lèvres U 89
Bagues lisses autolubrifiantes 55
Balais (moteur DC) 390
Barrage (capteur optique) 444
Bascule D 326
Base (transistor bipolaire) 350
Basse tension (BT) 431
Batterie d'accumulateur plomb acide (Pb) 291
Baud (Liaisons numériques) 509
Bête à corne 9
Bielle-manivelle, système 133
Bilan des puissances (moteur DC) 392
Binaire 300
Binaire codé décimal (BCD) 300
Binaire réfléchi ou code Gray 300
Bipolaire (commande) (moteurs pas-à-pas) 397
Bistable RS, RSH 325
Bistables RS (synthèse d'un automatisme) 459
BLACK (diagramme de) (CPGE) 540
Bobinages d'induit (moteur DC) 390
BODE (diagramme de) (CPGE) 540
Booléen (algorithmique) 485
Booléen (boolean) (nombre) 302
Bossage (forme) 215
Bouchon (circuit) (filtrage) 378
Boucle ouverte (asservissements) 434
Boucle pour (graphe d'états) 465
Boulons 141
Boulons à œil 141
Boulons, implantation des 142
Brainstorming (remue-méninges) 19
Brasage 176
Brevet industriel (INPI) 34
Brinell, dureté 198
Brochage bascules et compteurs 334
Brochage des fonctions logiques 313
Brochages (amplificateur intégré) 370
Bruit 37
Buffer (fonction logique) 309
Bus (les réseaux) 518
Bus CAN (Liaisons numériques) 515

INDEX ALPHABÉTIQUE

Bus de données, d'adresses de commande 468
Butée à billes, à aiguilles (guide de choix) 79

C

Cages et douilles à aiguilles (guide de choix) 78
Cahier des charges fonctionnel (C.d.C.F.) 6
Calcul d'un vérin 98
Calculs vectoriels 242
Calibre à coulisse 233
Cames industrielles 134
CAN bus (Liaisons numériques) 515
Canal P ou N (transistor MOS) 354
Cannelures à flancs en développantes 154
Cannelures à flancs parallèles 153
CAO-DAO 238
Capacité d'une pile ou d'un accumulateur 289
Capteur actif 442
Capteur passif 442
Capteurs électroniques 359
Caractéristiques (moteur DC) 393
Caractéristiques couple, intensité (moteur triphasé) 412
Caractéristiques physiques des matériaux 193
Cardans ou joints homocinétiques 130
Cartouche (dessin) 200
Cathode (diode) 337
Cause-effet, diagramme cause-effet 18
Cellule mémoire 471
Cellules photovoltaïques (photopiles) 348
Centre Instantané de Rotation CIR (cinématique du solide) 258
Céramiques 190
Chaîne d'acquisition à l'aide d'une carte à microcontrôleur 490
Chaînes et pignons 119
Chambrages ou lamages pour têtes de vis 142
Champ magnétique 384
Champ tournant (moteur triphasé) 408
Charbon (moteur DC) 390
Charge d'un condensateur 362
Charge entraînante (variateur de vitesse) 421
Chargeur d'accumulateur 290
Chargeur d'accumulateur Li-Ion 294
Choix d'un accouplement élastique 128
Choix d'un coussinet autolubrifiant 56
Choix d'un détecteur TOR 440
Choix d'un élément d'étanchéité 82
Choix d'un modèle d'assurance qualité 28
Choix d'un moteur électrique 388
Choix d'un roulement 61
Choix d'un roulement à aiguilles 78
Choix d'un vérin 96
Choix d'une courroie 122
Choix d'une rondelle 147
Choix des butées à aiguilles, à billes, roulements combinés 79
Choix des fixations radiales et axiales d'un roulement 63
Choix des vues 208
Cinématique du point 254
Cinématique du solide (graphique) 257
Circlips (anneaux élastiques) 155
Circuit inductif 367
Circuit spécialisé L297, L298 (moteurs pas-à-pas) 400
Circuits analogiques 359
Circuits intégrés logiques 308
Circuits NE 555 et 556 365
Cisaillement (essais) 195
Cisaillement pur (RDM) 268
CISC Jeu d'instruction étendu 473
Classes de qualité des vis 140
Classification des installations électriques 402
Clavetage 151
Clavettes disques 152
Clavettes parallèles 151
CMOS (fonction logique) 314
Coaxial (câble) 519
Codage (algorithmique) 484
Code machine (langage) 483
Codes et bases de numération 300
Codes-barres ou codes-points 446
Codeur optique absolu 336
Codeurs incrémental et absolu 335
Collage et ses limites 179
Collage, principales colles 180
Collecteur (transistor bipolaire) 350
Collecteur ouvert (fonction logique) 314
Combinatoire (logique) 315
Commande d'un moteur asynchrone à deux sens de rotation 420
Commentaire (GRAFCET) 454
Communication série (Liaisons numériques) 510
Commutation 349
Commutation (transistor bipolaire) 351
Commutation (transistor MOS) 355
Comparateur (amplificateur intégré) 372
Comparateur à fenêtre 375
Compilation (algorithmique) 484
Complémentation d'un produit ou somme logique 317
Comportement cinématique des mécanismes (cinématique du point) 254
Comportement cinématique des mécanismes (cinématique du solide) 257
Comportement dynamique d'un solide 260
Comportement statique des mécanismes (adhérence) 251
Comportement statique des mécanismes (étude analytique) 243
Comportement statique des mécanismes (étude graphique) 249
Composite (graphe d'états) 464
Composites (matériaux) 188
Composition des vitesses (cinématique du solide) 259
Compression (essais) 195
Compteur (algorithmique) 489
Compteur (GRAFCET) 455
Compteur asynchrone 330
Compteur de programme PC (microprocesseur) 470
Compteur synchrone 332
Compteurs (logique séquentielle) 329
Condensateur 361
Conditionnelle (action) (GRAFCET) 454
Conflit (GRAFCET) 452
Consignation 432
Constante (algorithmique) 485
Constante de temps (condensateur) 362
Constante de temps (inductance) 381
Contacteur tripolaire (démarrage moteur triphasé) 419
Contacteurs électromagnétiques et relais 349
Contacts directs (protection des personnes) 426
Contacts indirects (protection des personnes) 426
Contacts utilisés pour les schémas équivalents 308
Continu (signal) 507
Contour de Hall (CPGE) 561
Contrainte (RDM) 265
Contrôle des états de surface 236
Convention générateurs récepteurs 282
Convergence, divergence (GRAFCET) 452
Conversion analogique - numérique CAN 381
Conversion binaire - décimale 303
Conversion binaire - hexadécimale 305
Conversion énergétique des actionneurs 94
Conversion hexadécimale - décimale 304
Conversion numérique - analogique CNA 379
Convertisseur de fréquence (ATV-452) 422

INDEX ALPHABÉTIQUE

Convertisseur de fréquence (structure interne) 424
Correction dérivée (CPGE) 573
Correction des systèmes asservis (CPGE) 571
Correction intégrale (CPGE) 575
Correction par avance de phase (CPGE) 578
Correction proportionnelle (CPGE) 572
Correspondances entre vues (dessin) 207
Cotation 223
Cotation des soudures 178
Couche (modèle OSI) 522
Coupe brisée à plans parallèles 211
Coupe brisée à plans sécants 212
Coupe, demi-coupe 211
Coupe-bande (le filtrage) 376
Coupes (dessin) 210
Coupes partielles 212
Coupes, pièces non coupées 212
Couplages (transformateur électrique triphasé) 386
Couplages en triangle étoile (moteur triphasé) 409
Couple - fréquence (caractéristique) (moteurs pas-à-pas) 401
Couple constant (variateur de vitesse) 421
Couplemètre 237
Courant continu 279
Courbe universelle 364
Courrier électronique SMTP 525
Courroies (guide de choix) 122
Courroies et poulies 121
Coussinet en tôle roulée 57
Coussinets ou bagues lisses autolubrifiants 55
Coût de la non-qualité 32
Coût et valeur d'une fonction 33
Coûts (production, produit) 31
CPGE 527
Crispations musculaires (protection des personnes) 427
Critère de Routh (CPGE) 560
Critère graphique de stabilité, critère de Nyquist (CPGE) 563
Critères de choix d'un roulement 61
CTN (capteurs électroniques) 360
Cuivre et alliages (désignation) 186
Cyclabilité (accumulateur) 288
Cycle de vie d'un produit 27
Cycle de vie d'un système automatisé 447

D

DAO-CAO 238
dB (filtrage) 377
De Morgan (théorème de) 317
Décharge d'un condensateur 362
Déchets, tri et traitement 36
Décodage d'une instruction (microprocesseur) 470
Décodeur BCD pour afficheur 7 segments 322
Décomposition fonctionnelle 8
Décompteur asynchrone 330
Décrémentation et incrémentation (opérations) 475
Définition d'un produit (représentations) 202
DEL (diodes électroluminescentes) 346
Démarche de conception 17
Démarche qualité 27
Démarrage direct (moteur triphasé) 418
Démarrage du moteur synchrone 418
Demi-pas (moteurs pas-à-pas) 399
Démultiplexage (les fonctions logiques) 321
Densité d'énergie massique 288
Densité de puissance massique 288
Denture d'un engrenage 103
Dérivée (correction) (CPGE) 573
Descente (temps de) 328
Dessin à main levée 202
Dessin assisté par ordinateur 238
Dessin d'ensemble 204
Dessin de définition 203
Dessin d'ensemble 43
Détermination d'un vérin 98
Détermination d'un roulement à billes 70
Deuxième ordre (système)(CPGE) 548
Développement durable 35
DIAC (thyristor et triac) 357
Diagramme bête à corne 9
Diagramme cause-effet ou Ishikawa ou arête de poisson 18
Diagramme de BODE (CPGE) 540
Diagramme de Pareto 19
Diagramme FAST 10
Diagramme histogramme 18
Diagramme ou réseau PERT 20
Diagramme pieuvre 9
Diagramme SADT 15
Différence de potentiel 279
Différentiel (disjoncteur) (DD) 430
Différentielle (Liaisons numériques) 514
Diffusion (les réseaux) 518
Dimensions des roulements 73
Diode à jonction 337
Diode de roue libre 368
Diode Zener 343
Diodes électroluminescentes (DEL) 346
Discret (signal) 507
Disjoncteur différentiel (DD) 430
Distance (HC-SR04, capteur télémètre ultrason) 501
Distances limites des zones d'environnement 432
Distributeur (exemple) 99
Distributeurs (mise en situation) 100
Distribution électrique 405
Divergence, convergence (GRAFCET) 452
Diviseur élémentaire par deux 329
Diviseur potentiométrique 282
Dominant (Liaisons numériques) 515
Double alternance (redressement) 340
Double précision (nombre) 302
Double rampe (conversion CAN) 381
Douilles à billes 53
Douilles à billes, arbres pour 54
Douilles et cages à aiguilles (guide de choix) 78
DPI, DPC (capteur) 443
Drain (transistor MOS) 354
DS18b20, capteur de température 500
Durée de vie d'un roulement à billes (calcul) 70
Dureté d'un matériau 198
Dynamique du solide 260
Dynamique, funiculaire (statique) 249
Dynamiques (les mémoires) 472
Dynamomètre 237

E

Écarts (cotation) 227
Écarts (valeurs des principaux écarts) 230
Écarts modèle simulé (moteur asynchrone) 415
Écarts, caractériser des 295
Échelle logarithmique 377
Échelon (signaux tests) (CPGE) 531
Éclairages LED 346
Éclatée, vue éclatée 203
Écorché, vue en écorché 202
Écriture d'une grandeur électrique 284
Écrou (KM) et rondelle à encoche (MB) 146
Écrou à embase, borgne, carré Q 143
Écrou à sertir pour tôle 145
Écrou-contre-écrou 144
Écrous à créneaux (HK), PAL, autofreinés 143
Écrous freins 144

INDEX ALPHABÉTIQUE

Écrous hexagonaux (H, HM, HH) 143
EEPROM (Electrically EPROM) 472
Effort (capteurs électroniques) 359
Électrisation (protection des personnes) 426
Électrocution (protection des personnes) 426
Électroérosion, usinage par électroérosion 174
Électroluminescentes (diodes DEL) 346
Éléments standard de construction (visserie) 136
Embrayages à friction 116
Émetteur (transistor bipolaire) 350
Encapsulation (GRAFCET) 456
Engrenages (denture) 103
Engrenages (schématisation) 111
Engrenages à roue et vis sans fin 109
Engrenages coniques à denture droite à axes concourants 108
Engrenages cylindriques à denture droite 104
Engrenages cylindriques à denture hélicoïdale 106
Engrènement 104
Énoncé fonctionnel du besoin, analyse du besoin 6
Entier (algorithmique) 485
Éoliennes 403
Épaulement (forme) 216
Équations différentielles (CPGE) 533
Equiprojectivité 258
Erreur de traînage (CPGE) 553
Erreur en régime permanent (CPGE) 565
Esclave maître (Liaisons numériques) 512
Essai de compression 195
Essai de dureté Brinell 198
Essai de dureté Rockwell 198
Essai de dureté Vickers 198
Essai de fatigue 197
Essai de flexion 196
Essai de tenue aux chocs (résilience) 195
Essai de traction 194
Essais de cisaillement 195
Essais mécaniques des matériaux 194
Estampage et matriçage 168
ET (fonction logique) 310
ET NON (fonction logique) 312
Étanchéité et protection des liaisons, guide de choix 82
Étanchéité et protection des roulements 69
Étape initiale (GRAFCET) 450
Étape source, étape puits (GRAFCET) 456
Étapes actives (GRAFCET) 451
État de surface (contrôle) 236
États (graphe d') 462
Ethernet 523
Étoile (couplages) (moteur triphasé) 409
Évidement (forme) 218
Évolution de la production d'électricité 402
Excitation séparée (moteur DC) 391
Exemples de montages des roulements 67

F

Fabrication additive 170
Fabrication d'un moteur de forte puissance 411
Farad (condensateur) 361
FAST, diagramme 10
Fatigue (essais) 197
FET (transistor MOS) 354
Fibre optique 519
Fibrillation ventriculaire (protection des personnes) 426
Filetages 219
Filetages (représentation d'éléments filetés) 222
Filetages gaz 221
Filetages métriques, profil ISO 219
Filetages trapézoïdaux 220
Filtrage 376
Fixations radiales et axiales des roulements 63
Flash (conversion CAN) 382
Flexion (essais) 196
Flexion (RDM) 272
Flux (diagrammes de) (graphe d'états) 465
Fonction (algorithmique) 486
Fonction de transfert (CPGE) 536
Fonction de transfert complexe (CPGE) 539
Fonction mémoire (logique séquentielle) 323
Fonction transfert (fonction logique) 314
Fonctions de base (fonctions logiques) 309
Fonctions logiques 308
Fontes (désignation) 182
Force électromagnétique 384
Forces (statique) 243
Formats usuels de dessin (indications) 199
Formes géométriques usuelles 215
Fourche (capteur optique) 444
Fraisage 169
Franchissement d'une transition (GRAFCET) 450
Freinage d'arrêt (variateur de vitesse) 421
Freins à disques 117
Freins à tambour 118
Fréquence 284
Fréquence, mesure de (capteur TSL235) 496
Fréquencemètre (algorithmique) 489
Fréquences remarquables (CPGE) 558
Frittage 168
Frittage laser de poudre (Impression 3D) 173
Front montant, front descendant (GRAFCET) 454
Frottement et adhérence 251

G

Gain (filtrage) 377
Gain (transistor bipolaire) 350
Générateur 279
Gestion de la qualité 30
Glissement (moteur triphasé) 408
Gorge (forme) 218
Goujons 141
Goujons (implantation) 142
Goupilles cannelées 158
Goupilles cylindriques 157
Goupilles élastiques (Mécanindus) 159
Goupilles fendues 157
Graetz (redressement) 340
GRAFCET 447
Graissage des roulements 80
Graphe d'états 462
Graphes du mouvement (cinématique) 255
Gray (binaire réfléchi ou code Gray) 300
Grille (transistor MOS) 354
Groupement de résistances 281
Guidage en rotation, coussinets ou bagues lisses 55
Guidage par articulations sphériques 58
Guidage par roulements à billes ou à rouleaux 59
Guidages en translation 47
Guidages linéaires à billes sur rails 52
Guidages linéaires sur arbres et douilles à billes 53
Guidages linéaires sur rails et rouleaux 49
Gyroscope (MPU5060, accéléromètre gyroscope) 498

H

Habilitation 431
Hachage (limitation de courant par) 369
Hachures 210
Hall (contour de) (CPGE) 561
Harmonique (réponse) (CPGE) 554
Haute tension (HT) 431
HC-SR04, capteur télémètre ultrason 501
Henry (inductance) 367
Hexadécimale 300

INDEX ALPHABÉTIQUE

Histogramme 18
HTTP 525
Hybride (moteurs pas-à-pas) 398

I

I2C (Accéléromètre 3 axes MMA7455L) 497
I2C (capteur de lumière TSL2561) 493
I2C (Liaisons numériques) 512
I2C (MPU5060, accéléromètre gyroscope) 498
ILS (relais et contacteurs électromagnétiques) 349
Immunité (Liaisons numériques) 514
Implantation des vis, boulons et goujons 142
Implicite (adressage) 474
Impression 3D 170
Impression 3D (dépôt de filament fondu) 173
Impression 3D (frittage laser de poudre) 173
Impression 3D (procédé LOM) 171
Impression 3D (Stéréolithographie) 171
Impulsion (signaux tests) (CPGE) 530
Impulsion négative 283
Impulsion positive 283
Incendie 40
Incertitude de mesure d'un appareil de mesure 299
Incrémental (codeurs) 335
Incrémentation et décrémentation (opérations) 475
Indexé (adressage) 474
Indicateur de charge d'une batterie 294
Indications portées sur les formats de dessins 199
Indices de protection IP et IK 425
Inductance 367
Induit (moteur DC) 389
Influence des perturbations (CPGE) 567
Ingénierie Système 21
Innovation 34
Inscription des cotes 223
Inserts 145
Instabilité (causes) (CPGE) 563
Instructions (microprocesseur) 473
int8, int16, int32 (nombre) 302
Intégrale (correction) (CPGE) 575
Interface parallèle (Liaisons numériques) 507
Inversion du sens de marche (variateur de vitesse) 421
Inversion du sens de rotation d'un moteur universel 395
IP (adresses) 520
Ishikawa, diagramme 18
ISO 9000-2000 (F) 28
ISO 9004-1 27
Isolants (matériaux, caractéristiques) 191
Itérations (algorithmique) 487

J

Jauge de contrainte (capteurs électroniques) 359
Jeu (ajustements) 227
Jeu, rattrapage de (liaison glissière) 48
Joint (circulaire, métalloplastique, U-séal) 84
Joint à lèvres radial 88
Joint à lèvres U pour arbres coulissants 89
Joint d'étanchéité (guide de choix) 82
Joint quatre lobes 87
Joint torique 86
Joint V-ring 85
Joints (représentation simplifiée) 89
Joints homocinétiques ou cardans 130
Joints toriques plus bague PTFE 89
Jonction (diode) 337
Jonction (graphe d'états) 465
Joule par seconde 280

K

Karnaugh (simplification par la méthode de) 319
Kennelly (théorème de) 287

L

L297, L298 circuit spécialisé (moteurs pas à pas) 400
Lamages ou chambrages pour têtes de vis 142
LAN 518
Langage SysML 21
Langages de programmation 483
Laser, usinage par rayon 174
LDR (capteurs électroniques) 360
Le courant continu 279
LED (diodes électroluminescentes) 346
Lenz (loi de) (moteur triphasé) 408
Les capteurs 439
Les mémoires RAM ROM 471
Les mouvements (cinématique du solide) 257
Les réseaux 518
Liaison cinématique, Simulink 46
Liaisons cinématiques, schémas 44/252
Liaisons entre pièces mécaniques 44
Liaisons glissières (par glissement) 47
Liaisons glissières par éléments roulants 49
Liaisons numériques 507
Liaisons sans fil 519
Limitation de courant par hachage 369
Linéaire (régime) (amplificateur intégré) 371
Lithium ion, lithium polymère (accumulateur) 293
Logiciel de DAO 238
Logigramme 315
Logique (types d'informations) 439
Logique combinatoire 315
Logique séquentielle 323
Loi de Lenz (moteur triphasé) 408
Loi des mailles 282
Loi des noeuds 279
Loi d'Ohm 281
LOM (encollage papier-Impression 3D) 171
Longueurs normalisées des vis 138
Lubrification des roulements 80
Lumière (capteur de) 347
Lumière (capteur TSL235) 495
Lumière (capteur TSL2561) 493

M

Machine (langage machine (bas niveau)) 483
Machine à mesurer 235
Macro-étape (GRAFCET) 456
Maître esclave (Liaisons numériques) 512
MAN 518
Manchons cannelés, accouplement par 127
Manomètre 237
Marge de gain, de phase, de sécurité, de stabilité (CPGE) 561
Masse à la terre 429
Matériaux isolants 191
Matériaux symboles, caractéristiques physiques 193
Matières plastiques thermodurcissables 187
Matières plastiques thermoplastiques 187
Matlab (modélisation multiphysique) 503
Matriçage et estampage 168
Matrice de décision 19
Mega (arduino) 482
Mémoires mortes ROM 472
Mémoires vives RAM 472
Mémorisée (action) (GRAFCET) 452
Méplat, représentation d'un méplat 216
Mesure de l'intensité d'un courant 279
Mesure d'une différence de potentiel 280
Mesure d'une tension (Chaîne d'acquisition) 490
Mesure électronique 235
Mesure et contrôle 233
Mesure laser 236

INDEX ALPHABÉTIQUE

Microcontrôleur 468
Microfarad (condensateur) 361
Micromètre ou palmer 234
Microprocesseur 469
Millman théorème de 287
MLI sinus (moteur synchrone autopiloté) 417
MLI Variation de vitesse par Modulation de Largeur d'Impulsion 396
MMA7555L, accéléromètre I2C 3 axes 497
Mnémoniques 483
Modèle équivalent (moteur DC) 392
Modèle OSI 522
Modèle OSI bus CAN (Liaisons numériques) 517
Modélisation des actions mécaniques 244
Modélisation multiphysique (moteur asynchrone) 413
Modes de fonctionnement (moteur DC) 391
Modes de sortie (GRAFCET) 449
Modulation de la puissance (modification angle de conduction) 357
Modulation de largeur d'impulsion MLI (variateur de vitesse) 422
Modulo (compteur) 331
Moment d'une force 244
Moment d'inertie 260
Moments quadratiques 274
Mono-alternance (redressement) 340
Monocristallin (silicium) 348
Monophasé (tensions simples) 404
Monostable (action) (GRAFCET) 452
Monostable 555 et 556 366
Montages de base en linéaire 373
Montages des roulements, exemples 67
Montages des vérins (schémas) 100
Montages en commutation de base d'un comparateur 374
Montée (temps de) 328
MOS (transistor) 354
Moteur à courant continu (moteur DC) 389
Moteur à courant continu modèle de simulation 395
Moteur asynchrone modélisation multiphysique 413
Moteur électrique triphasé asynchrone 407
Moteur synchrone 416
Moteur synchrone autopiloté 417
Moteur universel 394
Moteurs pas-à-pas 397
Moulage (matières plastiques, en coquille) 166
Moulage (règles de tracé) 167
Moulage en sable 165
Mouvement de rotation (cinématique-équations) 256
Mouvement de translation (cinématique-équations) 255
Moyens de mesurage et de contrôle 233
MPU5060, accéléromètre gyroscope I2C 498
Multiphysique (modélisation multiphysique) 503
Multiplexage (les fonctions logiques) 321

N

Nervure (forme) 217
Neutre (conducteur) (réseau triphasé) 404
Neutre à la terre (schéma TT) 429
NewMat (modélisation multiphysique) 503
Nickel Métal Hydrure (accumulateur) 292
Nickel-cadmium (accumulateur) 292
Nomenclature 43/200
Nommage (les réseaux) 524
NON (fonction logique) 310
Non linéarités (CPGE) 532
Notions sur les asservissements 434
NPN (capteur actif) 442
NPN (transistor bipolaire) 350
Numération (codes et bases) 300
Numérique 287
Numérique (types d'informations) 439
NYQUIST (diagramme de) (CPGE) 540

O

Octet (les mémoires) 471
Opération sur des nombres binaires 306
Opérations sur les registres 474
Optoélectronique 346
Ordre d'un filtre 377
Oscillatoire (régime) (CPGE) 549
Oscilloscope (Chaine d'acquisition avec Arduino) 492
OSI (modèle) 522
OSI modèle bus CAN (Liaisons numériques) 517
OU (fonction logique) 311
OU Exclusif (fonction logique) 312
OU NON (fonction logique) 311
OUI (fonction logique) 309
Outils d'analyse des systèmes dans une démarche de conception 17

P

Paire de pôles (moteur triphasé) 408
Paire torsadée 519
Paliers lisses 55
Palmer ou micromètre 234
Panneaux solaires (photovoltaïque) 403
Parallèle (Liaisons numériques) 507
Parallèle groupement de résistances 281
Paramètres dynamiques de commutation 328
Pareto, diagramme 19
Parité (Liaisons numériques) 510
Partie commande (système automatisé) 438
Partie opérative (système automatisé) 438
Pas à pas (moteur) 397
Pas entier (moteurs pas-à-pas) 399
Passe-bas, passe-haut, passe-bande (le filtrage) 376
Perçage (usinage) 169
Période 284
Perspectives (cavalière, isométrique) 214
PERT, diagramme de Pert 20
Pertes constantes (moteur DC) 392
Pertes en ligne (distribution électrique) 406
Pertes Joule (moteur DC) 392
Perturbations (influence des) (CPGE) 567
Perturbations (Liaisons numériques) 514
Phases (conducteur) (réseau triphasé) 404
Photo, représentations 202
Photodiodes, phototransistor 347
Photovoltaïque (panneaux solaires) 403
Photovoltaïques (photopiles) 348
Pièces non coupées, représentation 212
Pied à coulisse 233
Pieuvre, diagramme 9
Pignons et chaînes 119
Pignons pour chaînes 120
Piles et accumulateurs 288
Pilotage des vérins 100
Plaque signalétique (moteur DC) 393
Plaque signalétique (moteur triphasé) 410
Plaquettes arrêtoir 150
Plastiques (désignation) 187
Pleine échelle FS (Full Scale) (conversion CNA) 380
Pneumatique (modélisation multiphysique) 504
Pneumatique, alimentation 99
PNP (capteur actif) 442
PNP (transistor bipolaire) 350
Point à point (les réseaux) 518
Point de vue opérative, commande (GRAFCET) 458
Point de vue système (GRAFCET) 457
Pôles (paire de) (moteur triphasé) 408
Pôles dominants (CPGE) 559
Polycristallin (silicium) 348

INDEX ALPHABÉTIQUE

Pont de Graetz (redressement) 340
Pont en H (moteurs pas-à-pas) 400
Port parallèle (Liaisons numériques) 508
Position (cinématique) 254
Position des vues 205
Positionnement axial des roulements 63/65
Potentiomètre 282
Poulies et courroies 121
Poulies et courroies synchrones 124
Poulies et courroies trapézoïdales 123
Préactionneurs (système automatisé) 438
Préactionneurs et actionneurs 94
Précision (notions sur les asservissements) 436
Précision et rapidité d'un système asservi (CPGE) 565
Préhenseur pneumatique par le vide 100
Premier ordre classique (système) (CPGE) 541
Premier ordre et second ordre (notions sur les asservissements) 437
Principe fondamental de la dynamique 260
Principe fondamental de la statique (PFS) 245
Procédés d'usinage 169
Procédés de mise en forme, matériaux associés 165
Procédure (algorithmique) 487
Production d'électricité 402
Produits industriels, compétitivité des 27
Programmation (carte Arduino) 477
Programmation «claire» et «sombre» (capteur) 445
Projection orthogonale 205, 207
Propagation (temps de) 328
Proportionnelle (correction) (CPGE) 572
Protection contre les contacts directs 428
Protection contre les contacts indirects 428
Protection des personnes 426
Protection des roulements 69
Protection industrielle (brevet) 34
Protocole (Liaisons numériques) 510
Protocole TCP-IP 523
Prototypage rapide 170
Proximité capacitif (capteur) 443
Proximité inductif (capteur) 443
Proximité optique (capteur) 444
Puissance électrique 280
Puissance en triphasé 404
Puissance et travail 262
Pulsation 284
Pulsation propre non amortie (CPGE) 551
PWM Variation de vitesse par Modulation de Largeur d'Impulsion 396

Q

Qualité (ISO 9004-1) 27
Qualité des vis 140
Qualité, coût de la non-qualité 32
Qualité, démarche 28
Qualité, gestion de la qualité 30
Qualité, ISO 9000-2000 (F) 28

R

Radar (HC-SR04, capteur télémètre ultrason) 502
Rails de guidage sur éléments roulants 49
Rainure (forme) 217
RAM, ROM (les mémoires) 472
Rampe (signaux tests) (CPGE) 531
Rapidité (notions sur les asservissements) 436
Rapidité et précision d'un système asservi (CPGE) 565
Rapport cyclique 286
Rapport de transformation 385
Rattrapage de jeu (liaison glissière) 48
Rayon laser, usinage par rayon laser 174
RDM 263
Réceptivité (GRAFCET) 450
Récessif (Liaisons numériques) 515
Rechargeables accumulateurs 288
Recherche de solutions constructives 92
Rectification, usinage par abrasion 169
Redressement 340
Réducteurs à trains épicycloïdaux 114
Réducteurs de vitesse à engrenages 112
Réducteurs étagés 112
Réel (algorithmique) 485
Réfléchi (binaire réfléchi ou code Gray) 300
Reflex (capteur optique) 444
Régime apériodique (CPGE) 550
Régime oscillatoire (CPGE) 549
Registre indicateur d'état 470
Registre ou inhérent (adressage) 474
Règles d'évolution (GRAFCET) 449
Règles en électricité 279
Règles et méthodes d'élaboration des dessins de définition 199
Régleur de vitesse (vérins) 100
Régulateurs de tension 341
Régulation (CPGE) 529
Régulation (notions sur les asservissements) 435
Relais et contacteurs électromagnétiques 349
Relais thermique (démarrage moteur triphasé) 419
Règle de la main droite (force électromagnétique) 384
Réluctance variable (moteurs pas-à-pas) 397
Rendement 280
Rendement (transformateur électrique monophasé) 385
Répétition (algorithmique) 487
Réponse harmonique (CPGE) 554
Réponse indicielle (notions sur les asservissements) 437
Représentation des éléments filetés 222
Représentation des engrenages 111
Représentation et symboles élémentaires des soudures 177
Représentation Signé d'un nombre binaire 306
Reprise de séquence (GRAFCET) 453
Réseau National (production d'électricité) 402
Réseau ou diagramme PERT 20
Réseau R-2R (conversion CNA) 379
Réseau triphasé 404
Résilience (essais) 195
Résistance des matériaux 263
Résistance interne (pile ou accumulateur) 289
Résistance variable 282
Résistivité 281
Résolution (conversion CNA) 380
Résolution analytique d'un Pb de statique (Pb résolu) 246
Ressort de traction, compression 161
Ressorts (de torsion, symboles) 160
Ressorts cylindriques 160
Rigidité des éléments déformables (cisaillement) 268
Rigidité des éléments déformables (flexion) 272
Rigidité des éléments déformables (torsion) 270
Rigidité des éléments déformables (traction) 266
RISC Jeu d'instruction réduit 473
Risques chimiques 39
RMS (Root Mean Square) (valeur efficace) 285
Rockwell, essais de dureté 198
Rondelle à encoche (MB) et écrou (KM) 146
Rondelle grower W 149
Rondelles (Guide de choix) 147
Rondelles à dents chevauchantes (éventail) 149
Rondelles à portée sphérique (concave, convexe) 150
Rondelles cuvettes 148
Rondelles frein 149
Rondelles ondulées 149
Rondelles plates (d'appui) 148
Rondelles ressorts (Belleville) 162
Rotor (moteur DC) 389
Rotor et Stator (moteurs pas-à-pas) 398

INDEX ALPHABÉTIQUE

Rotules 58
Roue codeuse 336
Roue et vis sans fin 109
Roues libres 90
Roulement (lubrification) 80
Roulements (choix des ajustements) 62
Roulements (différents types de roulements) 60
Roulements (étanchéité) 69
Roulements (exemples de montages) 67
Roulements (fixations radiales et axiales) 63
Roulements (positionnement axial et montages) 65
Roulements à billes ou à rouleaux 59
Roulements à deux rangées de billes à contact oblique 76
Roulements à deux rangées de billes à contact radial 76
Roulements à rotule à deux rangées de billes 76
Roulements à rotule à deux rangées de rouleaux coniques 77
Roulements à une rangée de billes à contact sphérique (caractéristiques) 75
Roulements à une rangée de billes à contact radial (caractéristiques) 73
Roulements à une rangée de rouleaux coniques 77
Roulements à une rangée de rouleaux cylindriques 77
Routage 521
Routh (critère de) (CPGE) 560
RS232 (Liaisons numériques) 509

S

SADT (analyse descendante) 15
Saturation (régime de) (amplificateur intégré) 371
Saut d'étapes (GRAFCET) 453
Schéma à contacts (synthèse d'un automatisme) 459
Schéma blocs (CPGE) 537
Schéma cinématique, liaison cinématique 44/252
Schémas structurels 278
Schématisation cinématique 42
Schématisation des engrenages 111
SCL, SDA (Liaisons numériques) 512
Sectionneur (démarrage moteur triphasé) 419
Sections rabattues 213
Sections sorties 213
Semi-conducteurs 337
Sensibilités des disjoncteurs différentiels 430
Séquentielle (logique) 323
Série (Liaisons numériques) 509
Série Groupement de résistances 281
Séries normalisées E3, E6, E12 et E24 278
Si alors sinon (graphe d'états) 465
Signal en dent de scie 283
Signal quelconque 283
Signal rectangulaire 283
Signal sinusoïdal 283, 284
Signal triangulaire 283
Signé (représentation Signé d'un nombre binaire) 306
Silicium amorphe 348
Simple précision (nombre) 302
Simple rampe (conversion CAN) 381
Simplification d'une expression algébrique 316
Simplification par la méthode de Karnaugh 319
Simulation (modélisation multiphysique) 503
Simulation mesure de tension (Chaîne d'acquisition) 491
Simulink (modélisation multiphysique) 503
Sinusoïde (signaux tests) (CPGE) 531
SMTP (courrier électronique) 525
Sollicitations (RDM) 265
Soudage (représentation et symboles élémentaires) 177
Soudage autogène (chalumeau, arc électrique…) 175
Soudage multiplasma, par résistance 176
Soudage par ultrason 175
Soudo-brasage 176
Soudures (cotation et indications) 178
Source (transistor MOS) 354
Sources de tension constante (diode Zener) 343
Soustraction binaire 306
Stabilisatrice de tension (diode Zener) 344
Stabilité (notions sur les asservissements) 436
Stabilité d'un système asservi (CPGE) 559
START I2C condition (Liaisons numériques) 513
StateFlow 462
StateFlow (TSL2561 capteur de lumière) 494
Statique (mécanique) 243
Statique analytique (problème résolu) 246
Statique graphique (2,3,4 forces) 249
Statiques (les mémoires) 472
Stator (moteur DC) 389
Stator et Rotor (moteurs pas-à-pas) 398
Stéréolithographie (Impression 3D) 171
STM (Graphe d'états) 462
STOP I2C condition (Liaisons numériques) 513
Stratoconception 172
Structure en tâche (GRAFCET) 456
Super-états (graphe d'états) 464
Surfaces fonctionnelles 164
Symboles des accouplements 130
Symboles des grandeurs et des unités de mesure 580
Symboles des matériaux, caractéristiques physiques 193
Symboles des ressorts 160
Symboles des soudures 177
Symboles des vérins et accessoires 96
Symboles électriques et électroniques 276
Symboles élémentaires en soudage 177
Symboles pneumatiques et hydrauliques 101
Synchrone (compteur) 332
Synchrones (Liaisons numériques) 511
Synchronisation (GRAFCET) 455
Synthèse d'un automatisme 459
Synthèse d'un automatisme (automate programmable) 461
SysML, langage 21
Système asservi (CPGE) 528
Système asservi (notions sur les asservissements) 434
Système automatisé (architecture générale) 438
Système bielle-manivelle 133
Système du deuxième ordre (CPGE) 548
Système du premier ordre classique (CPGE) 541
Système du premier ordre généralisé (CPGE) 544
Système du premier ordre généralisé (CPGE) 544
Système dynamique (notions sur les asservissements) 435
Système informatique minimal 468
Système invariant (CPGE) 532
Système simulé (Écarts) 295
Système souhaité (Écarts) 295
Système vis-écrou 131
Système vis-écrou à billes 131
Systèmes automatisés (CPGE) 528
Systèmes linéaires (CPGE) 532

T

Table de vérité 315
TCP IP (protocole) 523
Télémètre (HC-SR04, capteur télémètre ultrason) 501
Température (capteurs électroniques) 360
Température (DS18b20, capteur de température) 500
Temporisée (action) (GRAFCET) 454
Temps d'accès (les mémoires) 471
Temps de montée et temps de descente 328
Tension de décalage 285
Tensions composées (triphasé) 404
Tensions et courants variables 283
Tensions simples (monophasé) 404
Terre (conducteur) (réseau triphasé) 404
Théorème de De Morgan 317
Théorème du retard (CPGE) 535

INDEX ALPHABÉTIQUE

Théorèmes aux limites (CPGE) 535
Thyristor et triac 356
Tolérances (qualité) 228
Tolérances dimensionnelles 227
Torseur de cohésion (RDM) 263
Torseurs des actions mécaniques 244
Torseurs des actions mécaniques transmissibles par une liaison 245
Torseurs des actions mécaniques transmissibles par une liaison (tableaux) 252
Torsion simple (RDM) 270
Tournage 169
Traction (essais) 194
Traction (RDM) 266
Trains épicycloïdaux (réducteur de vitesse) 114
Traitements thermiques et de surface 181
Traits (types) 201
Trame, bus CAN (Liaisons numériques) 516
Trames 523
Transcodeur BCD 7 segments 322
Transformateur basse tension et de sécurité 387
Transformateur électrique monophasé 385
Transformateur électrique triphasé 386
Transformation de l'énergie 94
Transformée de Laplace (CPGE) 533
Transformées des signaux test (CPGE) 534
Transformées usuelles et propriétés (CPGE) 535
Transistor bipolaire 350
Transistor MOS 354
Transition (GRAFCET) 450
Transition (graphe d'états) 463
Transmission de puissance avec transformation de mouvement 131
Transmission de puissance par poulies et courroies 121
Transmission de puissance sans transformation de mouvement 103
Transmission par pignons-chaîne 119
Transmission série (Liaisons numériques) 509
Travail et puissance 262
Travaux d'ordre électrique 431
Très basse tension (TBT) 431
Triac et thyristor 356
Triangle (couplages) (moteur triphasé) 409
Trigger (fonction logique) 314
Triz, méthode 34
Trous de passage pour vis 142
TSL235 capteur de lumière (Chaîne d'acquisition) 495
TSL2561 capteur de lumière (Chaîne d'acquisition) 493
TTL (fonction logique) 314
TTL (Liaisons numériques) 514
Types d'informations 439
Types de roulements 60
Typologie des principaux capteurs 441

U

uint8, uint16,uint32 (nombre) 302
Ultrason (HC-SR04, capteur télémètre ultrason) 501
Unipolaire (commande) (moteurs pas-à-pas) 397
Unité centrale 469
Unités de mesure (symboles des grandeurs et des) 580
Uno (arduino) 480
Usinage par électroérosion 174
Usinage par rayon laser 174
Utilisation d'un logiciel de DAO 238

V

Valeur efficace RMS 285
Valeur et coût d'une fonction 33
Valeur instantanée 285
Valeur moyenne 285
Validation du modèle simulé (Écarts) 298
Variable (algorithmique) 485
Variateur de puissance (thyristor et triac) 357
Variateur de vitesse d'un moteur triphasé 421
Variateurs de vitesse à courroies 125
Variation de vitesse par MLI 396
Vecteur champ magnétique 384
Vecteurs 242
Vérin (détermination) 98
Vérin (modélisation multiphysique) 504
Vérins (composants et fixations) 95
Vérins (guide de choix et symboles) 96
Vérins (pilotage, distributeurs) 100
Vickers, essais de dureté 198
Virgule flottante (nombre) 302
Vis (classe de qualité) 140
Vis (implantation) 142
Vis (longueurs normalisées) 138
Vis cylindrique large fendue (CLS) 137
Vis d'assemblage (dimensions) 137
Vis d'assemblage (guide de choix) 136
Vis de pression (exemple de montage) 140
Vis de pression (vis sans tête) 139
Vis fraisée à 6 pans creux (FHC) 138
Vis fraisée bombée fendue (FBS) 138
Vis fraisée fendue plate (FS) 138
Vis hexagonale (H), cylindrique à 6 pans creux (CHC) 137
Vis poelier fendue (RLS) 137
Vis-écrou à billes 131
Vis-écrou, système vis-écrou 131
Vitesse (cinématique) 254
Vitesse de coupe 169
Vitesse de synchronisme (moteur triphasé) 408
Vue (position des vues) 205
Vue éclatée 203
Vue en écorché 202
Vues (correspondance entre les vues) 207
Vues particulières, locales, partielles 208

W

WAN 518
World Wide Web: http:// 525

Z

Zelio Logic 2 (automate programmable) 460
Zener Diode 343
Zone des travaux sous tension 432

Achevé d'imprimer en avril 2017
par .....
Editions Delagrave, N° d'éditeur : xxxx-xxxx
Dépôt légal mai 2017

INDEX ALPHABÉTIQUE

Théorèmes aux limites (CPGE) 535
Thyristor et triac 356
Tolérances (qualité) 228
Tolérances dimensionnelles 227
Torseur de cohésion (RDM) 263
Torseurs des actions mécaniques 244
Torseurs des actions mécaniques transmissibles par une liaison 245
Torseurs des actions mécaniques transmissibles par une liaison (tableaux) 252
Torsion simple (RDM) 270
Tournage 169
Traction (essais) 194
Traction (RDM) 266
Trains épicycloïdaux (réducteur de vitesse) 114
Traitements thermiques et de surface 181
Traits (types) 201
Trame, bus CAN (Liaisons numériques) 516
Trames 523
Transcodeur BCD 7 segments 322
Transformateur basse tension et de sécurité 387
Transformateur électrique monophasé 385
Transformateur électrique triphasé 386
Transformation de l'énergie 94
Transformée de Laplace (CPGE) 533
Transformées des signaux test (CPGE) 534
Transformées usuelles et propriétés (CPGE) 535
Transistor bipolaire 350
Transistor MOS 354
Transition (GRAFCET) 450
Transition (graphe d'états) 463
Transmission de puissance avec transformation de mouvement 131
Transmission de puissance par poulies et courroies 121
Transmission de puissance sans transformation de mouvement 103
Transmission par pignons-chaîne 119
Transmission série (Liaisons numériques) 509
Travail et puissance 262
Travaux d'ordre électrique 431
Très basse tension (TBT) 431
Triac et thyristor 356
Triangle (couplages) (moteur triphasé) 409
Trigger (fonction logique) 314
Triz, méthode 34
Trous de passage pour vis 142
TSL235 capteur de lumière (Chaîne d'acquisition) 495
TSL2561 capteur de lumière (Chaîne d'acquisition) 493
TTL (fonction logique) 314
TTL (Liaisons numériques) 514
Types d'informations 439
Types de roulements 60
Typologie des principaux capteurs 441

U

uint8, uint16,uint32 (nombre) 302
Ultrason (HC-SR04, capteur télémètre ultrason) 501
Unipolaire (commande) (moteurs pas-à-pas) 397
Unité centrale 469
Unités de mesure (symboles des grandeurs et des) 580
Uno (arduino) 480
Usinage par électroérosion 174
Usinage par rayon laser 174
Utilisation d'un logiciel de DAO 238

V

Valeur efficace RMS 285
Valeur et coût d'une fonction 33
Valeur instantanée 285
Valeur moyenne 285
Validation du modèle simulé (Écarts) 298
Variable (algorithmique) 485
Variateur de puissance (thyristor et triac) 357
Variateur de vitesse d'un moteur triphasé 421
Variateurs de vitesse à courroies 125
Variation de vitesse par MLI 396
Vecteur champ magnétique 384
Vecteurs 242
Vérin (détermination) 98
Vérin (modélisation multiphysique) 504
Vérins (composants et fixations) 95
Vérins (guide de choix et symboles) 96
Vérins (pilotage, distributeurs) 100
Vickers, essais de dureté 198
Virgule flottante (nombre) 302
Vis (classe de qualité) 140
Vis (implantation) 142
Vis (longueurs normalisées) 138
Vis cylindrique large fendue (CLS) 137
Vis d'assemblage (dimensions) 137
Vis d'assemblage (guide de choix) 136
Vis de pression (exemple de montage) 140
Vis de pression (vis sans tête) 139
Vis fraisée à 6 pans creux (FHC) 138
Vis fraisée bombée fendue (FBS) 138
Vis fraisée fendue plate (FS) 138
Vis hexagonale (H), cylindrique à 6 pans creux (CHC) 137
Vis poelier fendue (RLS) 137
Vis-écrou à billes 131
Vis-écrou, système vis-écrou 131
Vitesse (cinématique) 254
Vitesse de coupe 169
Vitesse de synchronisme (moteur triphasé) 408
Vue (position des vues) 205
Vue éclatée 203
Vue en écorché 202
Vues (correspondance entre les vues) 207
Vues particulières, locales, partielles 208

W

WAN 518
World Wide Web: http:// 525

Z

Zelio Logic 2 (automate programmable) 460
Zener Diode 343
Zone des travaux sous tension 432

Achevé d'imprimer en avril 2017
par . . . . . .
Editions Delagrave, N° d'éditeur : xxxx-xxxx
Dépôt légal mai 2017

INDEX ALPHABÉTIQUE

Théorèmes aux limites (CPGE) 535
Thyristor et triac 356
Tolérances (qualité) 228
Tolérances dimensionnelles 227
Torseur de cohésion (RDM) 263
Torseurs des actions mécaniques 244
Torseurs des actions mécaniques transmissibles par une liaison 245
Torseurs des actions mécaniques transmissibles par une liaison (tableaux) 252
Torsion simple (RDM) 270
Tournage 169
Traction (essais) 194
Traction (RDM) 266
Trains épicycloïdaux (réducteur de vitesse) 114
Traitements thermiques et de surface 181
Traits (types) 201
Trame, bus CAN (Liaisons numériques) 516
Trames 523
Transcodeur BCD 7 segments 322
Transformateur basse tension et de sécurité 387
Transformateur électrique monophasé 385
Transformateur électrique triphasé 386
Transformation de l'énergie 94
Transformée de Laplace (CPGE) 533
Transformées des signaux test (CPGE) 534
Transformées usuelles et propriétés (CPGE) 535
Transistor bipolaire 350
Transistor MOS 354
Transition (GRAFCET) 450
Transition (graphe d'états) 463
Transmission de puissance avec transformation de mouvement 131
Transmission de puissance par poulies et courroies 121
Transmission de puissance sans transformation de mouvement 103
Transmission par pignons-chaîne 119
Transmission série (Liaisons numériques) 509
Travail et puissance 262
Travaux d'ordre électrique 431
Très basse tension (TBT) 431
Triac et thyristor 356
Triangle (couplages) (moteur triphasé) 409
Trigger (fonction logique) 314
Triz, méthode 34
Trous de passage pour vis 142
TSL235 capteur de lumière (Chaîne d'acquisition) 495
TSL2561 capteur de lumière (Chaîne d'acquisition) 493
TTL (fonction logique) 314
TTL (Liaisons numériques) 514
Types d'informations 439
Types de roulements 60
Typologie des principaux capteurs 441

U

uint8, uint16,uint32 (nombre) 302
Ultrason (HC-SR04, capteur télémètre ultrason) 501
Unipolaire (commande) (moteurs pas-à-pas) 397
Unité centrale 469
Unités de mesure (symboles des grandeurs et des) 580
Uno (arduino) 480
Usinage par électroérosion 174
Usinage par rayon laser 174
Utilisation d'un logiciel de DAO 238

V

Valeur efficace RMS 285
Valeur et coût d'une fonction 33
Valeur instantanée 285
Valeur moyenne 285
Validation du modèle simulé (Écarts) 298
Variable (algorithmique) 485
Variateur de puissance (thyristor et triac) 357
Variateur de vitesse d'un moteur triphasé 421
Variateurs de vitesse à courroies 125
Variation de vitesse par MLI 396
Vecteur champ magnétique 384
Vecteurs 242
Vérin (détermination) 98
Vérin (modélisation multiphysique) 504
Vérins (composants et fixations) 95
Vérins (guide de choix et symboles) 96
Vérins (pilotage, distributeurs) 100
Vickers, essais de dureté 198
Virgule flottante (nombre) 302
Vis (classe de qualité) 140
Vis (implantation) 142
Vis (longueurs normalisées) 138
Vis cylindrique large fendue (CLS) 137
Vis d'assemblage (dimensions) 137
Vis d'assemblage (guide de choix) 136
Vis de pression (exemple de montage) 140
Vis de pression (vis sans tête) 139
Vis fraisée à 6 pans creux (FHC) 138
Vis fraisée bombée fendue (FBS) 138
Vis fraisée fendue plate (FS) 138
Vis hexagonale (H), cylindrique à 6 pans creux (CHC) 137
Vis poelier fendue (RLS) 137
Vis-écrou à billes 131
Vis-écrou, système vis-écrou 131
Vitesse (cinématique) 254
Vitesse de coupe 169
Vitesse de synchronisme (moteur triphasé) 408
Vue (position des vues) 205
Vue éclatée 203
Vue en écorché 202
Vues (correspondance entre les vues) 207
Vues particulières, locales, partielles 208

W

WAN 518
World Wide Web: http:// 525

Z

Zelio Logic 2 (automate programmable) 460
Zener Diode 343
Zone des travaux sous tension 432

Achevé d'imprimer en avril 2017
par . . . . . .
Editions Delagrave, N° d'éditeur : xxxx-xxxx
Dépôt légal mai 2017