

Bernard Girard
Guy Rimars
Marc Voisin

Première & Terminale

SPÉCIALITÉ

Sciences de l'ingénieur

**NOUVEAUX
PROGRAMMES** !

COURS ET EXERCICES CORRIGÉS



ellipses

Première & Terminale

SPÉCIALITÉ

NOUVEAUX
PROGRAMMES

Sciences de l'ingénieur

COURS ET EXERCICES CORRIGÉS

Bernard Girard

Guy Rimars

Marc Voisin

Professeurs de SII (sciences industrielles de l'ingénieur)
au lycée Saint-Gabriel Saint-Michel (Saint-Laurent-sur-Sèvre, 85)



ISBN 9782340-036949
© Ellipses Édition Marketing S.A., 2020
32, rue Bargue 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), 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 les 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 » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

Ce livre a été réalisé à partir des cours de sciences de l'ingénieur de Première et Terminale de trois professeurs de SII (sciences industrielles de l'ingénieur).

Il s'adresse à des élèves qui ont du mal à repérer les fondamentaux dans le cours de sciences de l'ingénieur.

Il reprend la plupart des champs technologiques des systèmes réels supports de sujets de baccalauréat.

Chaque chapitre est décomposé en 3 parties :

- notions de cours ;
- exercices ;
- solutions.

Avec la mise en place du Bac 2021, le cours de sciences de l'ingénieur s'appuie sur une approche STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics). Il s'agit de renforcer le lien entre les 3 piliers : sciences physiques, mathématiques et technologie.

Pour cela, le cours de sciences de l'ingénieur cible 6 compétences :

Innovier	Créer des produits innovants
Analyser	Analyser les produits existants pour appréhender leur complexité
Modéliser et résoudre	Modéliser les produits pour prévoir leurs performances
Expérimenter et simuler	Valider les performances d'un produit par les expérimentations et les simulations numériques
Communiquer	S'informer, choisir, produire de l'information pour communiquer au sein d'une équipe ou avec des intervenants extérieurs

Sommaire

Chapitre 1 – Analyse et modélisation d’un système	1
1. Chaînes d’informations et de puissance ■ 2. Diagramme des inter-acteurs et diagramme FAST ■ 3. Modélisation sysML	
Chapitre 2 – Énergétique	23
1. Chaîne de puissance et bilan énergétique ■ 2. Puissance, énergie ■ 3. Rendement d’un système	
Chapitre 3 – Grandeurs physiques	37
1. Électricité ■ 2. Mécanique ■ 3. Hydraulique ■ 4. Thermique	
Chapitre 4 – Système de numération	57
1. Bases de numération ■ 2. Quelques termes utiles en binaire ■ 3. Conversion entre bases ■ 4. Quelques codes particuliers	
Chapitre 5 – Mécanique	73
1. Représentations graphiques d’un système ■ 2. Transmission d’un mouvement de rotation ■ 3. Actions mécaniques ■ 4. Cinématique ■ 5. Principe fondamental de la dynamique (PFD) ■ 6. Résistance des matériaux (RDM)	
Chapitre 6 – Électronique	117
1. Fonctions logiques ■ 2. Algèbre de Boole ■ 3. Lois générales d’électricité ■ 4. Composants passifs ■ 5. Composants actifs : semi-conducteurs	
Chapitre 7 – Acquisition	169
1. Échantillonnage ■ 2. Numérisation ■ 3. Filtrage ■ 4. Dualité temps / fréquence et décomposition en série de Fourier	
Chapitre 8 – Actionneurs	195
1. Pneumatique, hydraulique ■ 2. Moteurs électriques	
Chapitre 9 – Programmation	215
1. Algorithme ■ 2. Langage C pour cartes Arduino ■ 3. Langage Python pour cartes circuitPython	
Chapitre 10 – Asservissements	253
1. Fonction de transfert ■ 2. Boucle ouverte / boucle fermée ■ 3. Réponse à un échelon ■ 4. Correcteur PID ■ 5. Méthode d’identification de Strejc	
Chapitre 11 – Transmission de données. Bus de terrain	279
1. Définitions ■ 2. Liaison série UART ■ 3. Liaison série I ² C ■ 4. Bus CAN ■ 5. Modulations	
Chapitre 12 – Réseaux	315
1. Définitions ■ 2. Constitution physique d’un réseau ■ 3. Adresse MAC ■ 4. Adresse IPv4 ■ 5. Routage de paquets ■ 6. Les protocoles ■ 7. Couches réseau : modèle OSI et TCP/IP ■ 8. Serveurs DNS et DHCP	
Chapitre 13. Modélisation multiphysique et écarts	347
1. Modélisation multiphysique ■ 2. Écarts et erreur relative	

Chapitre 1

Analyse et modélisation d'un système

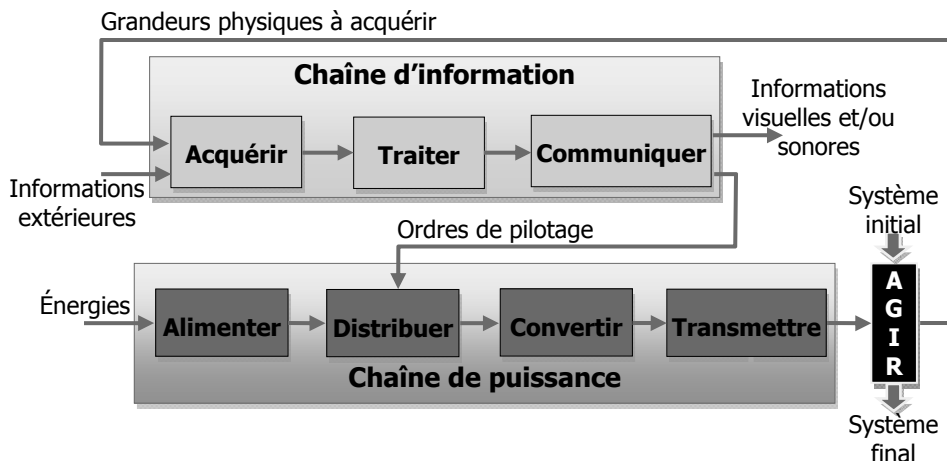
La première étape d'une étude consiste à analyser les besoins et à décrire le plus précisément possible le système étudié à l'aide de schémas ou diagrammes lisibles par tous les intervenants.

Suivant le niveau de détail nécessaire, le système peut être décrit :

- à l'aide d'outils globaux d'ingénierie système : SysML ;
- ou de graphes descriptifs des solutions envisagées : Diagramme des acteurs et/ou FAST.

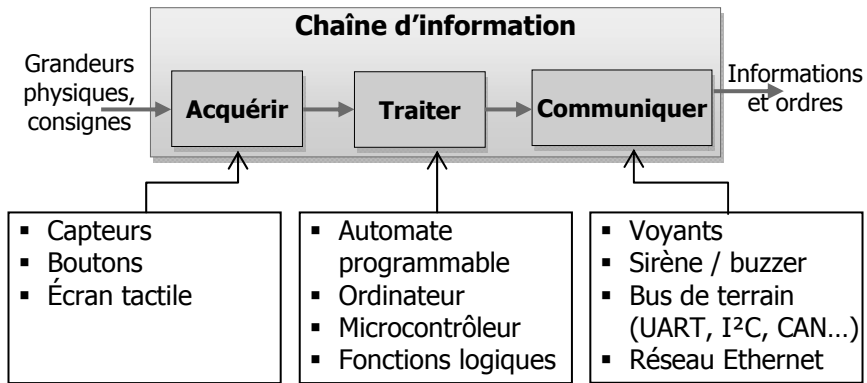
1. Chaînes d'information et de puissance

Tout système est traversé par un flux d'énergies et un flux d'informations ; la circulation des informations et de l'énergie peut être représentée par un schéma-bloc :

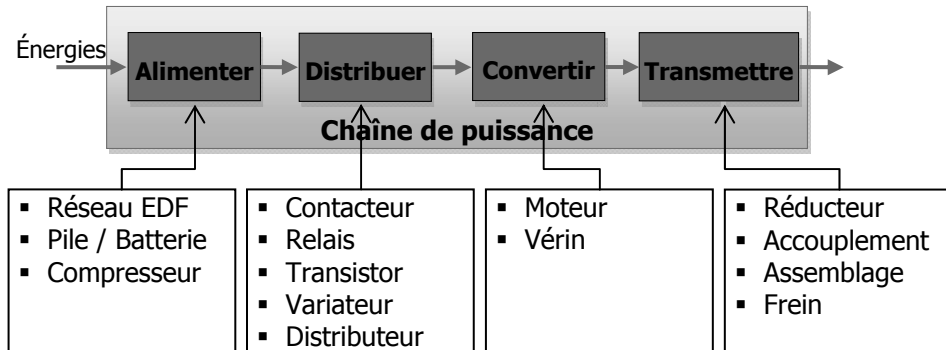


N.B. : on peut aussi remplacer le nom « chaîne de puissance » par « chaîne d'énergie » car l'énergie correspond à la puissance consommée par le système pendant un certain temps.

- Exemple de technologies associées à la chaîne d'information

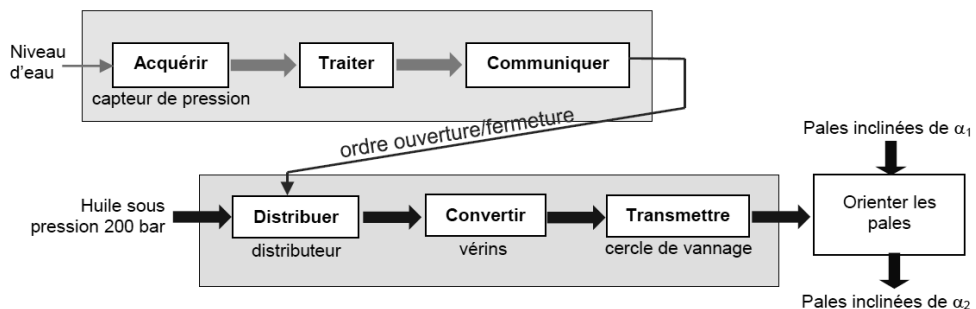


- Exemple de technologies associées à la chaîne de puissance



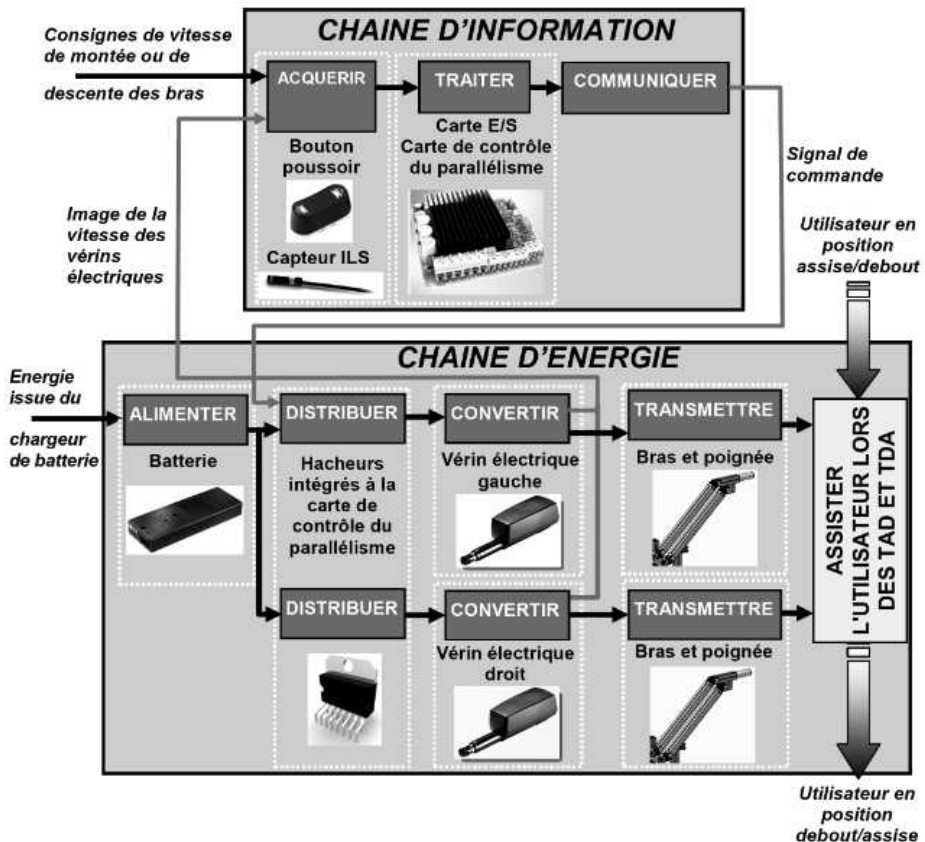
Exemple 1 : Production hydroélectrique (extrait concours général SI)

Dans une centrale hydroélectrique, le système pilote l'orientation des pales de la turbine suivant le niveau de la rivière.



Exemple 2 : Déambulateur Robuwalker (extrait Bac SI 2016)

Il est possible de dupliquer certains blocs pour bien identifier les différentes fonctions du système étudié. Dans le cas du « déambulateur Robuwalker », il y a une chaîne pour la commande de chacun des 2 vérins :



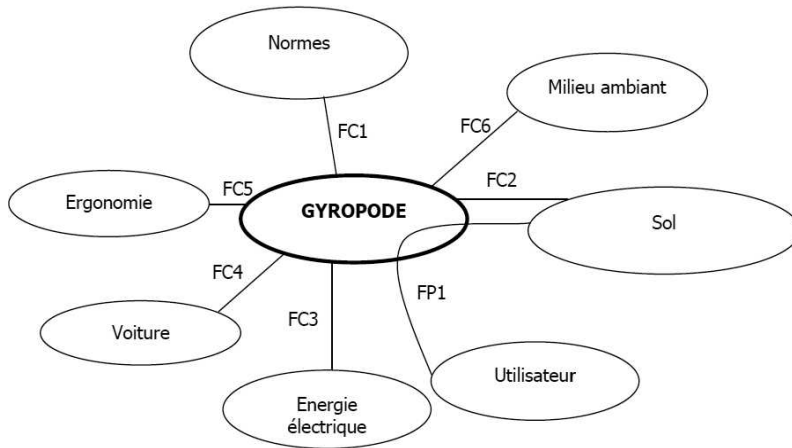
2. Diagramme des inter-acteurs et diagramme FAST

2.1. Diagramme des inter-acteurs

Le diagramme des inter-acteurs présente les éléments qui sont en relation avec le système.

Les liaisons entre ces éléments et le système représentent les « fonctions de service » :

- fonctions principales (notées FP...)
- et fonctions contraintes (notées FC...).

Exemple : Diagramme des inter-acteurs du Gyropode

Gyropode

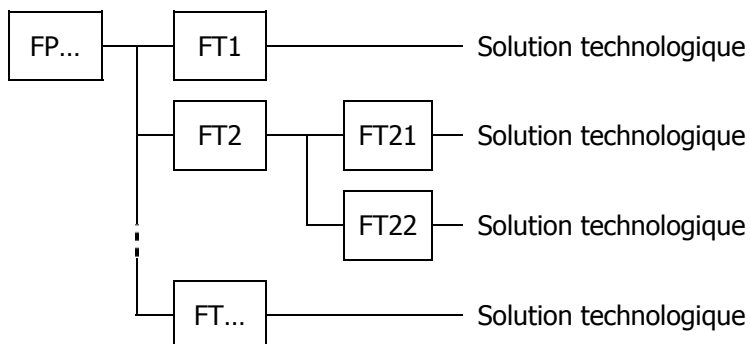
*Fonctions de services*

FP1	Permettre un déplacement de l'utilisateur par rapport au sol
FC1	Respecter les normes
FC2	Franchir, en toute sécurité, les obstacles présents sur le sol
FC3	Permettre la recharge en énergie électrique (secteur EDF)
FC4	Être transportable dans une voiture
FC5	S'adapter à la taille de l'utilisateur
FC6	Résister au milieu ambiant (poussières, humidité, ...)

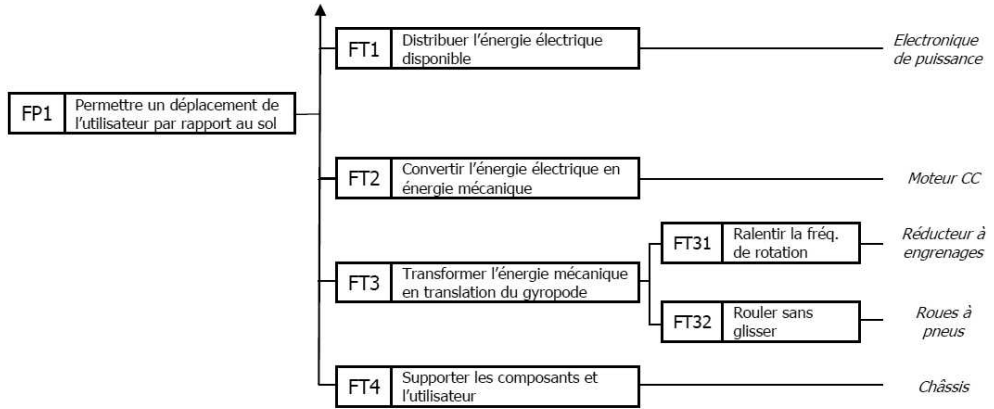
2.2. Diagramme FAST

Le diagramme FAST (Function Analysis System Technique) détaille les fonctions.

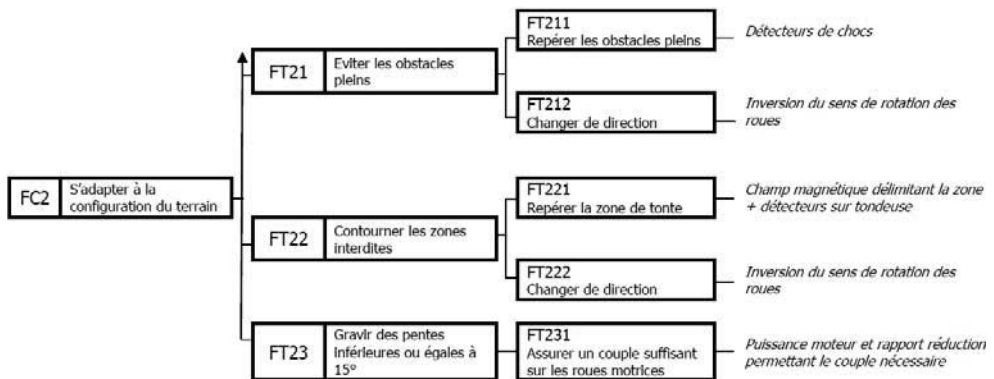
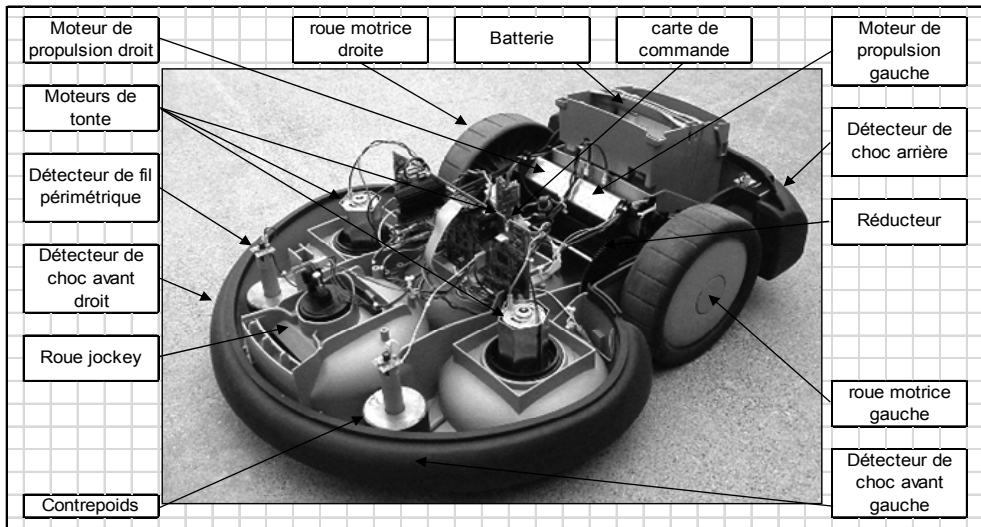
Les fonctions de service (FP... et FC...) sont décomposées en fonctions techniques (FT...). Les solutions technologiques sont données pour chaque fonction technique élémentaire.



Exemple 1 : Diagramme FAST de la fonction principale FP1 du Gyropode

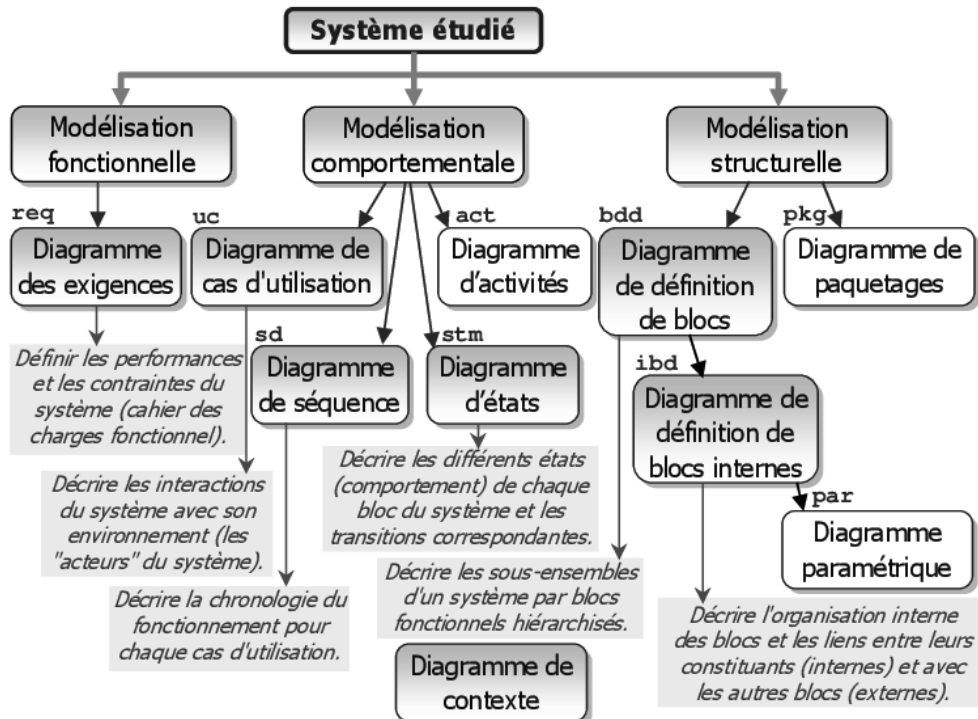


Exemple 2 : Diagramme FAST de la fonction contrainte FC2 de la tondeuse RL500



3. Modélisation sysML

SysML (Systems Modeling Language) est un outil universel normalisé, utilisé dans l'ingénierie système pour décrire un système. En fonction de ce qu'on souhaite décrire, on utilise un ou plusieurs des diagrammes répartis en 3 catégories :



Chacune des 3 catégories répond à une question :

- modélisation fonctionnelle : « *que doit faire le système ?* »
- modélisation comportementale : « *comment le système doit-il se comporter ?* »
- modélisation structurelle : « *comment le système est-il construit ?* ».

Tous les diagrammes comportent un cartouche dans lequel sont indiqués :

- le type du diagramme : uc, sd, req, bdd, ibd, stm, ... ;
- la nature de l'élément concerné : modèle, bloc, acteur, ... (entre crochets) ;
- le « contexte » : nom du diagramme (entre crochets).

uc [nature_du_contexte] contexte [nom_du_diagramme]

Dans les diagrammes, on trouve des blocs reliés entre eux. Il existe différents types de relations qui expriment les dépendances des blocs les uns avec les autres :

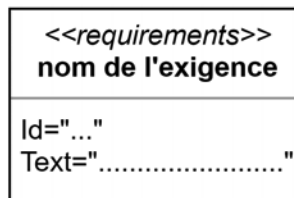
Relation	Symbole	Description	Diagrammes concernés
Association	X ———> Y	X utilise Y	uc – bdd – ibd
Dépendance	X - - - - -> Y	X dépend de Y	uc – req – bdd
Agrégation	X ———◇ Y	X entre dans la composition de Y <u>sans être indispensable</u> à son fonctionnement	req – bdd
Composition	X ———◆ Y	X entre dans la composition de Y <u>et est indispensable</u> à son fonctionnement	req – bdd
Généralisation	X ———▷ Y	X est une sorte de Y	req – bdd – ibd
Conteneur	X ———⊕ Y	Y contient X	req – bdd

3.1. Modélisation fonctionnelle

Diagramme des exigences (Requirements Diagram : req)

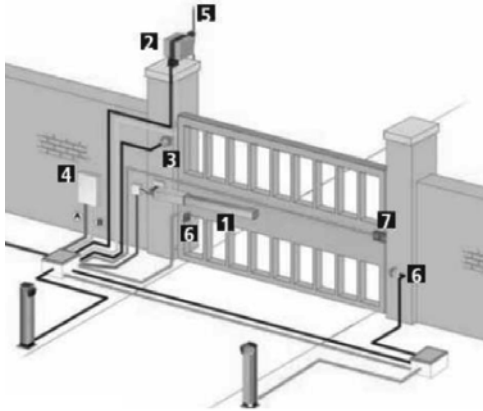
Il permet de collecter et d'organiser toutes les exigences du système (caractéristiques ou performances attendues), sous forme textuelle. Chaque exigence est identifiée par :

- un nom ;
- un identifiant (numéro de l'exigence) ;
- un texte décrivant l'exigence.



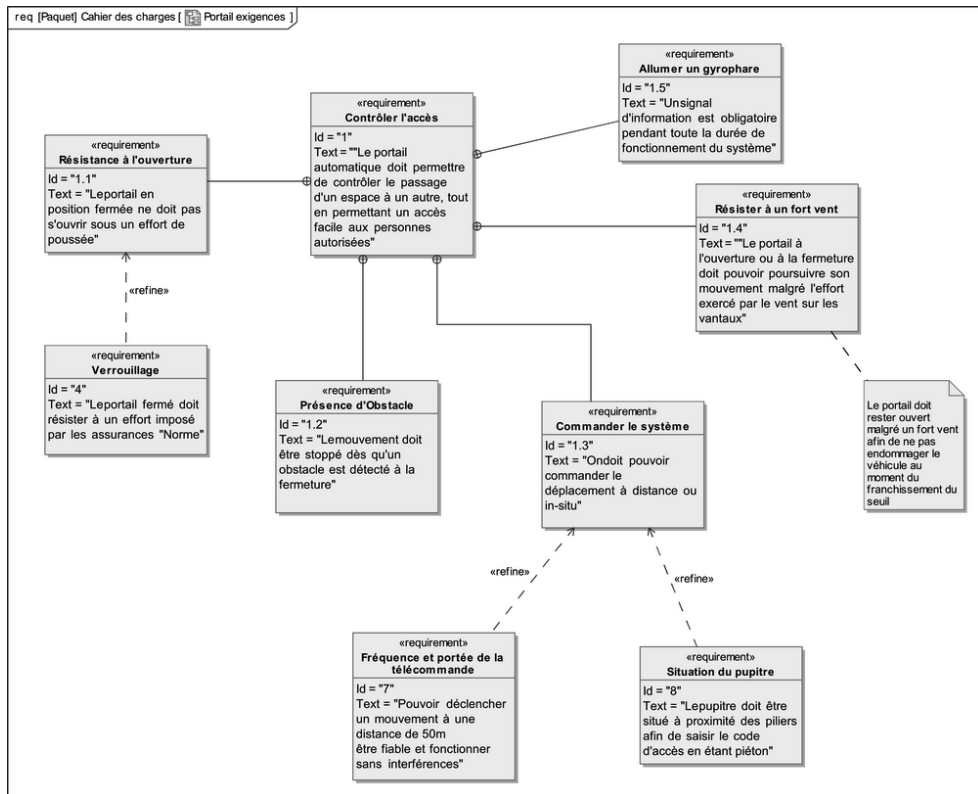
Les exigences peuvent être reliées entre elles par différents types de dépendances :

derive	une exigence source dérive d'une exigence destinataire
derivReq	relie une exigence générale à une exigence plus spécialisée (mais liée à la même contrainte)
satisfy	un ou plusieurs éléments du modèle permettent de satisfaire une exigence
verify	un ou plusieurs éléments du modèle permettent de vérifier et satisfaire une exigence
refine	ajoute des précisions à une exigence

Exemple : Ouvre-portail

Description des éléments du système :

1. actionneur FAAC 402
2. lampe clignotante
3. bouton poussoir à clé
4. armoire de commande
5. antenne HF
6. cellules photoélectriques
7. serrure électronique



3.2. Modélisation comportementale

3.2.1. Diagramme des cas d'utilisation (Use Case Diagram : uc)

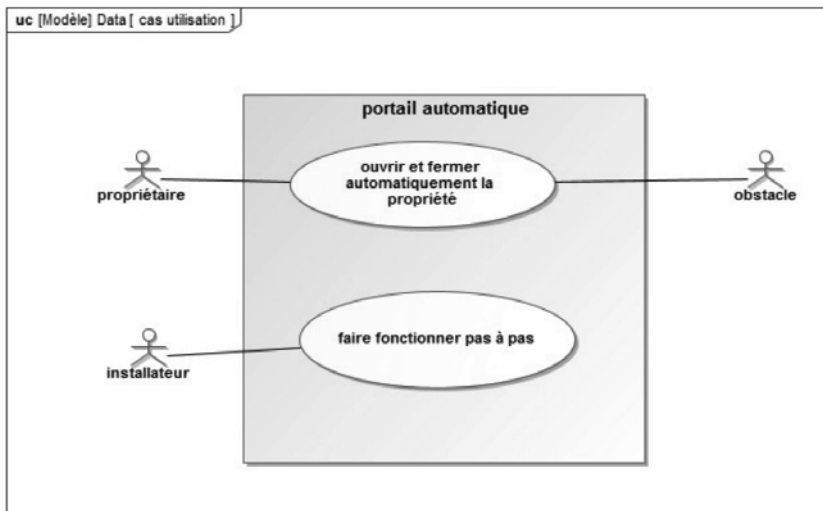
Il modélise, par des bulles, les fonctionnalités que le système doit fournir aux « acteurs ». Un cas d'utilisation est une unité fonctionnelle utilisée pour la description du système.

Description des symboles :

- Un « acteur » correspond à une personne physique ou un autre système sur lequel il agit. Les acteurs humains sont placés à gauche du diagramme et les acteurs non-humains à droite.
- Les relations entre les cas d'utilisation et avec les acteurs :

————	association directe entre acteurs et cas d'utilisation (non dirigée)
extend	le cas d'utilisation source est une extension possible du cas d'utilisation destinataire
include	le cas d'utilisation source comporte obligatoirement le cas inclus

Exemple : *Ouvre-portail*

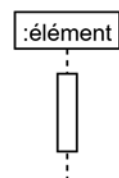


3.2.2. Diagramme de séquence (Sequence Diagram : sd)

Il décrit la chronologie des interactions entre les éléments du système ou entre le système et son environnement.

Description des symboles :

- « Ligne de vie » : trait pointillé partant de chaque élément décrivant le temps qui s'écoule.
- Un rectangle sur la « ligne de vie » précise les plages de temps pendant lesquels l'élément est actif.



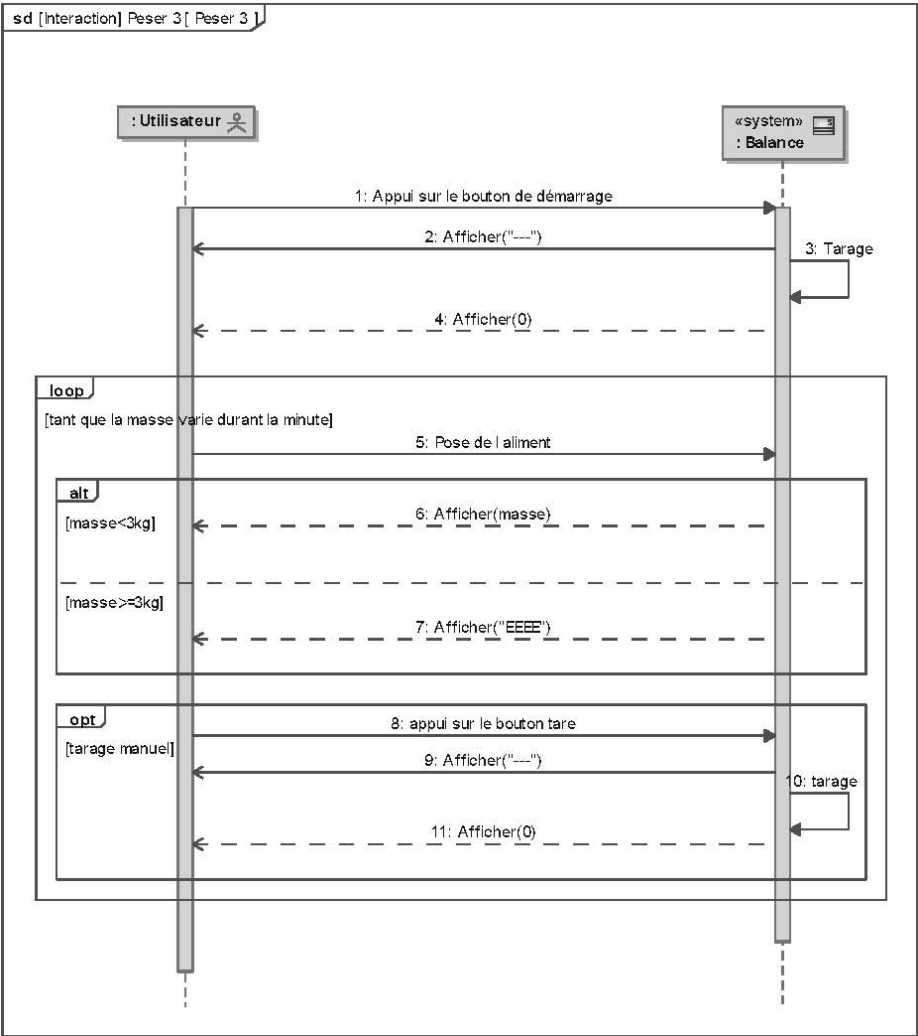
▪ Les différentes structures

<i>opt</i> [<i>condition</i>]	optionnel : actions optionnelles
<i>alt</i> [<i>condition</i>]	alternatif : permet de faire un choix
<i>par</i> [<i>actions</i>]	parallèle : actions qui s'exécuteront simultanément
<i>loop</i> [<i>condition</i>]	boucle : actions répétées tant que la condition est active

▪ Les messages entre les éléments

	synchrone : l'émetteur attend un retour du destinataire est actif
	asynchrone : l'émetteur n'attend pas de retour et il continue son activité
	retour : réponse à un message synchrone
	réflexif : action réalisée sur l'élément lui-même

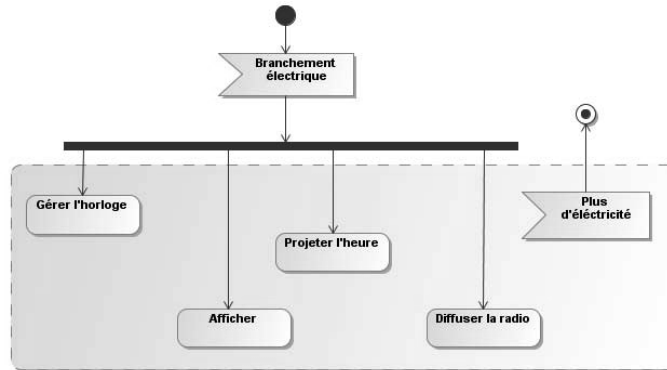
Exemple : Balance Halo (Terraillon)



3.2.3. Diagramme d'activité (Activity Diagram : act)

Il modélise les flux d'informations et les flux d'activités du système.

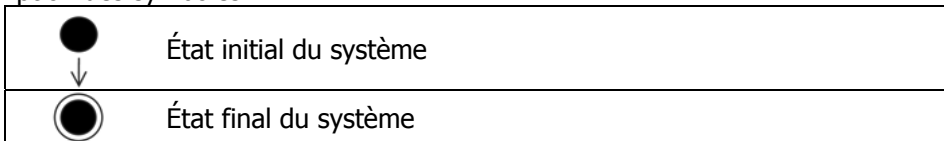
Exemple : Radio réveil



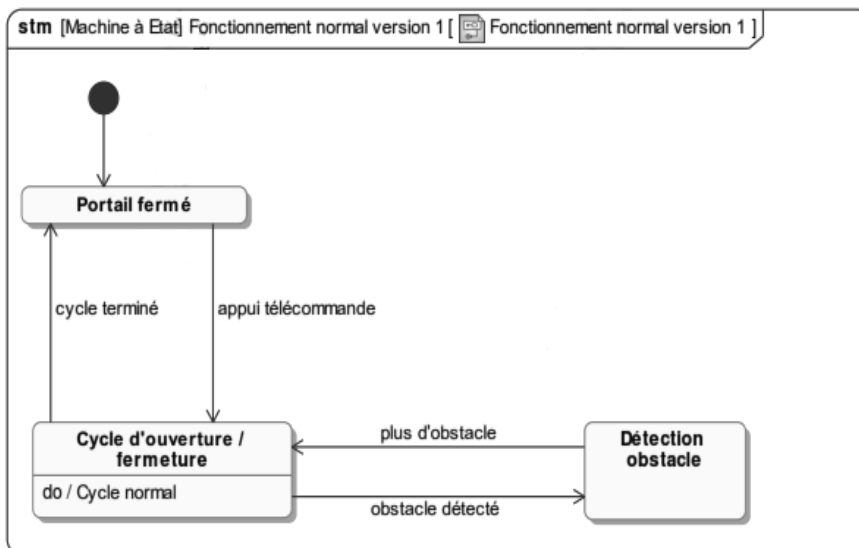
3.2.4. Diagramme d'états (State Machine Diagram : stm)

Il représente les différents états que peut prendre le système ou une partie du système ainsi que ses réactions aux événements extérieurs. Le passage d'un état à un autre, nommé transition, s'effectue lorsque la condition (événement) est active.

Description des symboles



Exemple : Ouvre-portail

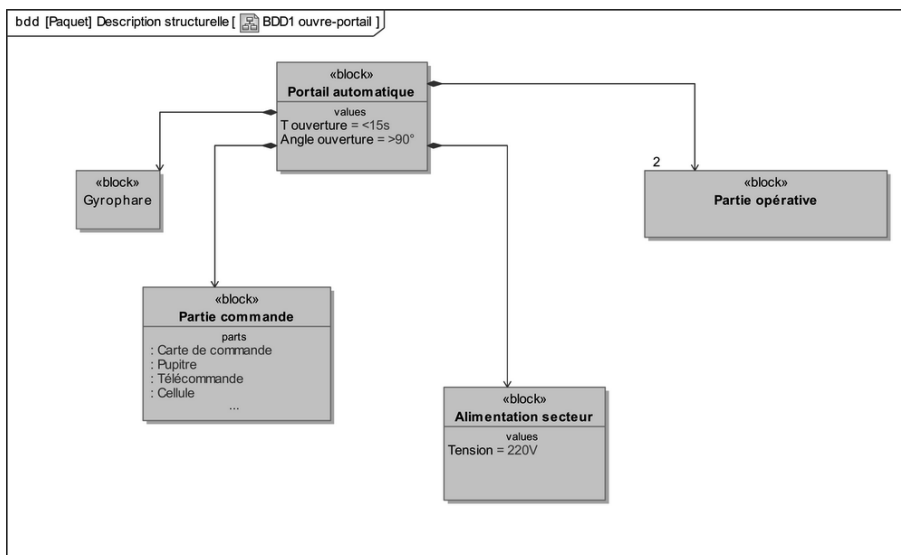


3.3. Modélisation structurelle

3.3.1. Diagramme de définition de blocs (Block Definition Diagram : bdd)

Ce diagramme donne une représentation statique des entités du système, de leurs propriétés et de leurs opérations.

Exemple : Ouvre-portail

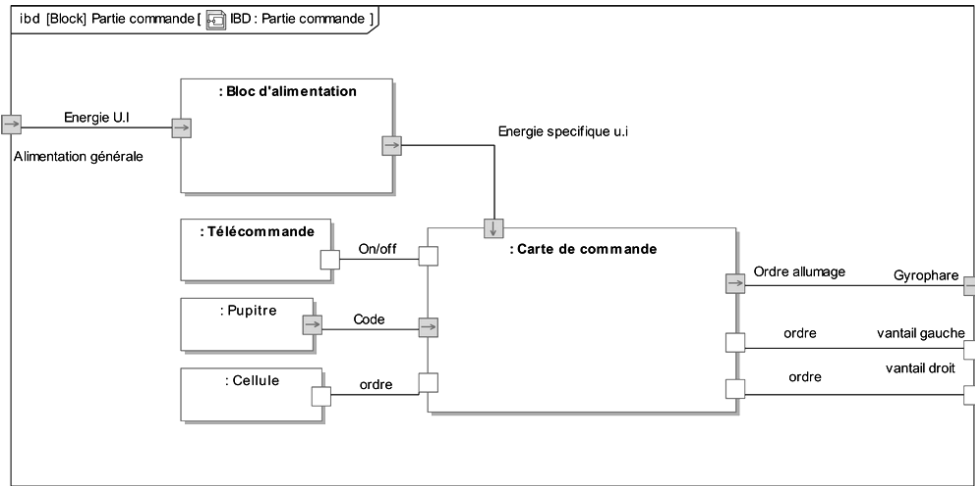
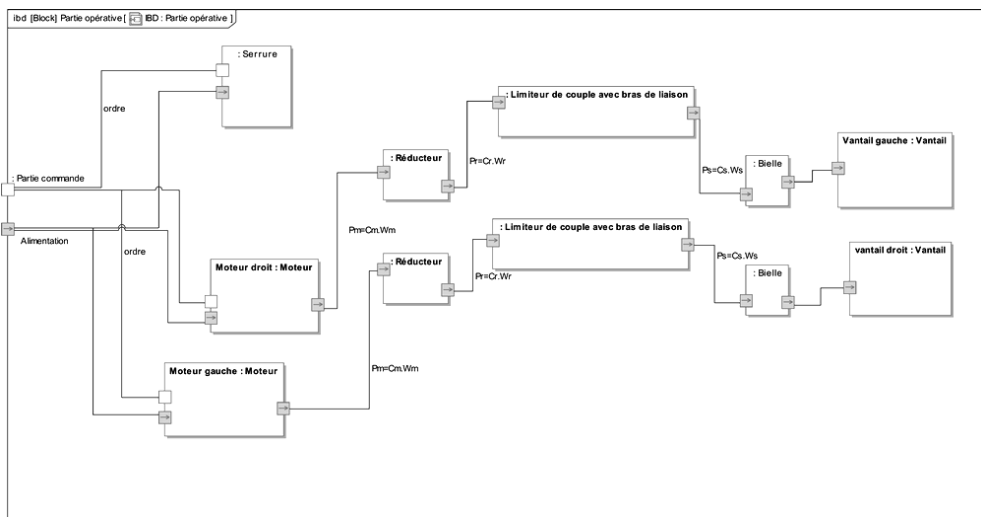


3.3.2. Diagramme de bloc interne (Internal Block Diagram : ibd)

Ce diagramme donne une représentation qui matérialise les imbrications des parties et leurs interconnexions par les ports. Il montre l'organisation interne du système.

Description des symboles

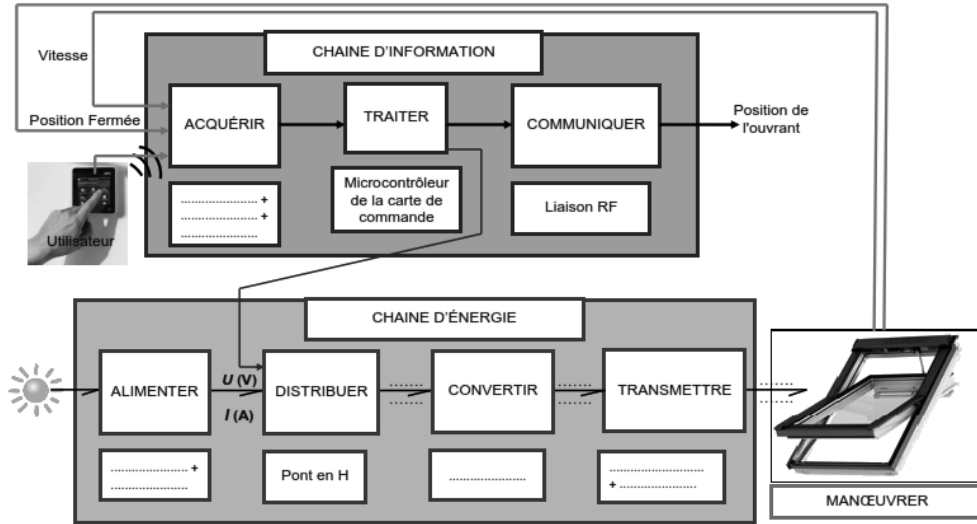
	port standard : relatif à un événement épisodique (par exemple, l'appui sur un bouton poussoir)
	port de flux : relatif à un flux physique, de données ou d'énergie

Exemple 1 : Partie commande d'un ouvre-portail**Exemple 2 : Partie opérative d'un ouvre-portail**

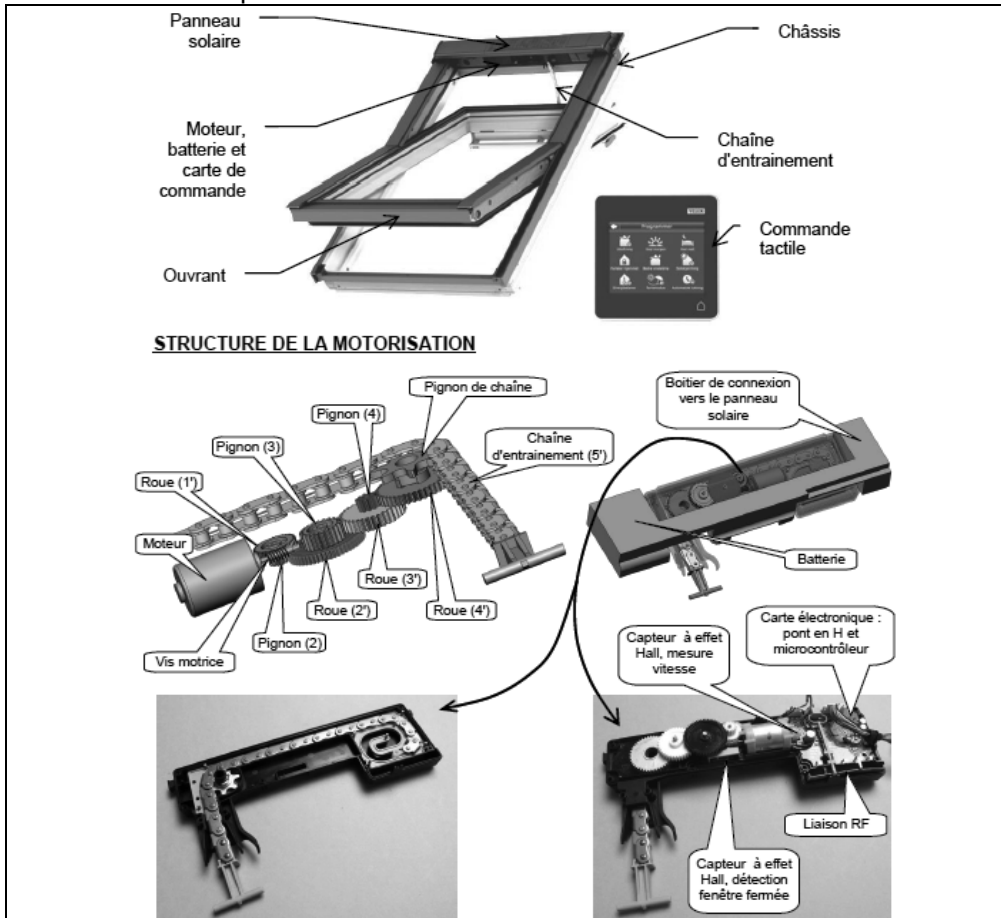
➔ Exercices

Exercice 1.1 – Fenêtre de toit VELUX®

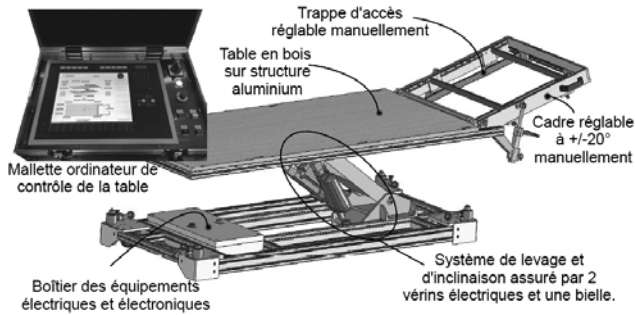
À partir des documents techniques fournis page suivante, compléter les chaînes d'information et d'énergie en donnant les solutions techniques et les grandeurs « effort » et « flux » correspondant à la puissance transmise jusqu'au niveau de la chaîne d'entraînement :



Documents techniques de la fenêtre de toit VELUX®

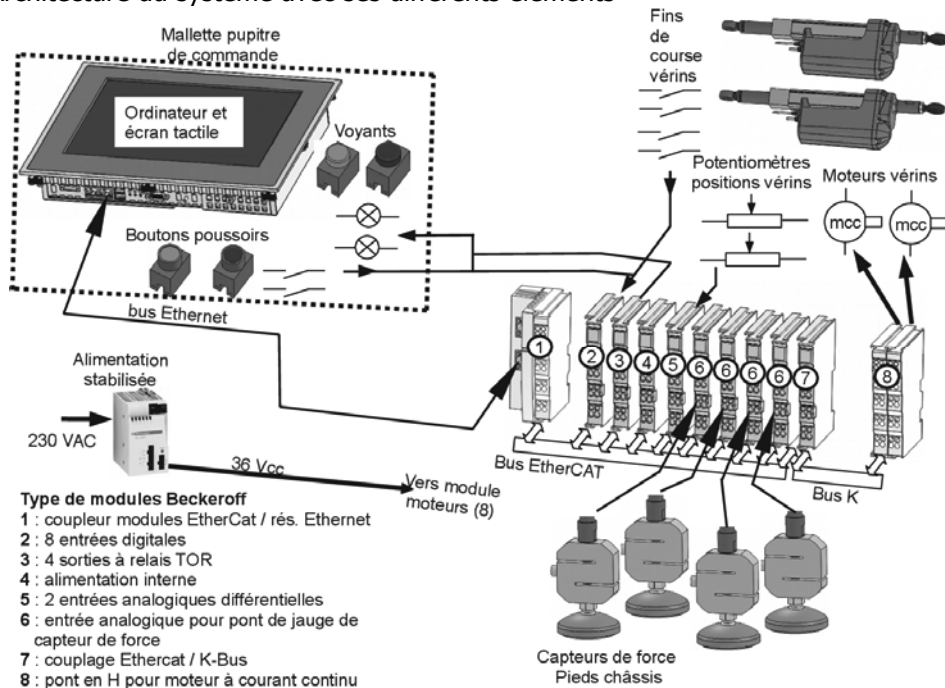


Exercice 1.2 – Système tangible déployable (Bac SI 2017)



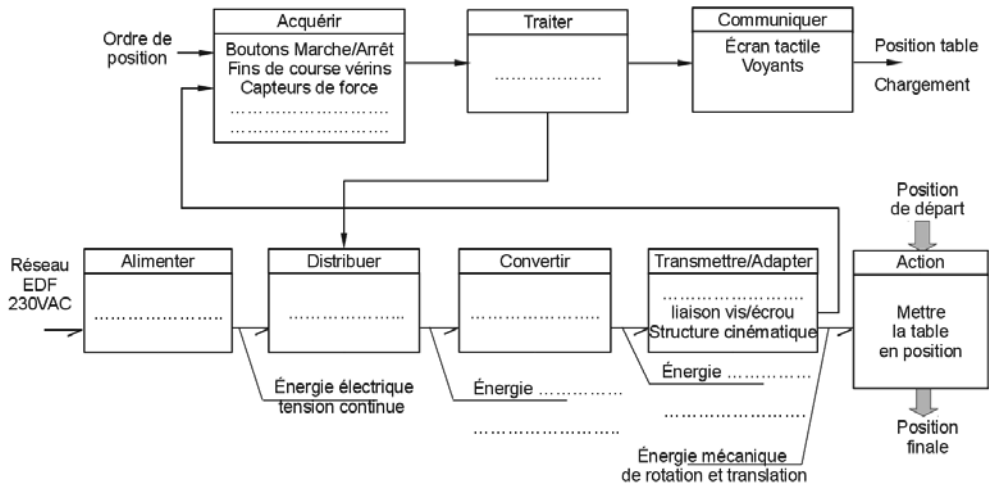
L'objectif d'Airbus est de placer, virtuellement, ses opérateurs dans un avion, en situation de montage, réglage, démontage. L'opérateur est allongé sur la table qui le place dans des postures identiques à celles qu'il aurait en situation réelle de travail.

Architecture du système avec ses différents éléments



N.B. : les vérins électriques sont composés d'un moteur à courant continu, d'un réducteur et d'une transmission vis-écrou.

1. Compléter les chaînes d'information et d'énergie du système en plaçant les composants manquants (module pont en H, alimentation stabilisée +36 Vcc, ordinateur, potentiomètres indiquant la position des vérins, moteur à courant continu et réducteur).



2. Indiquer la nature des énergies repérées dans la chaîne d'énergie (ci-dessus).

Exercice 1.3 – Prothèse de pied (extrait de concours Mines)

Les représentations ci-dessous décrivent une prothèse active transtibiale. Ce système cherche à reproduire le mouvement du pied et se rapproche du comportement d'un membre non amputé. Par rapport à une prothèse passive il limite la dissymétrie de la marche (différence de comportement entre le côté amputé et le côté non amputé).

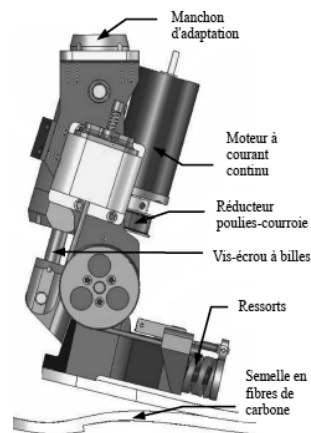
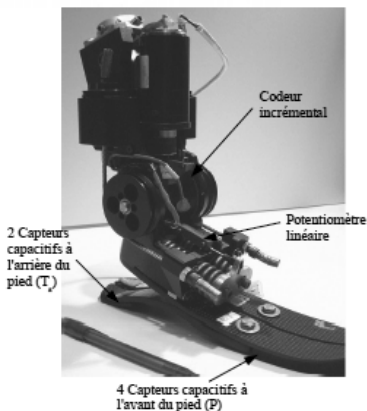


Diagramme du cas d'utilisation

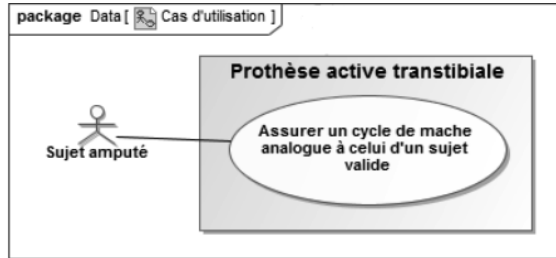


Diagramme des exigences

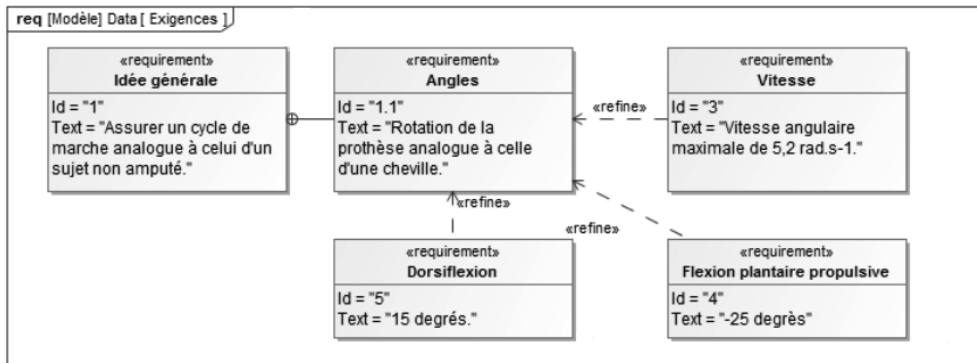
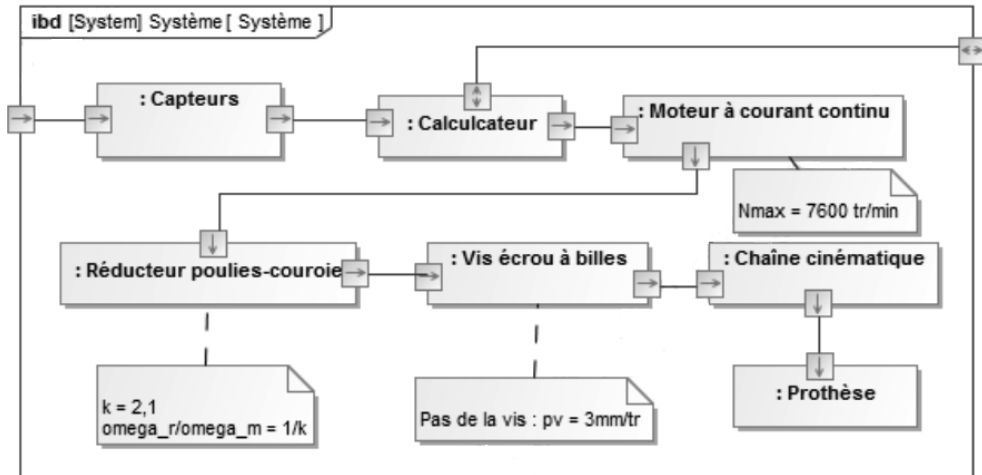
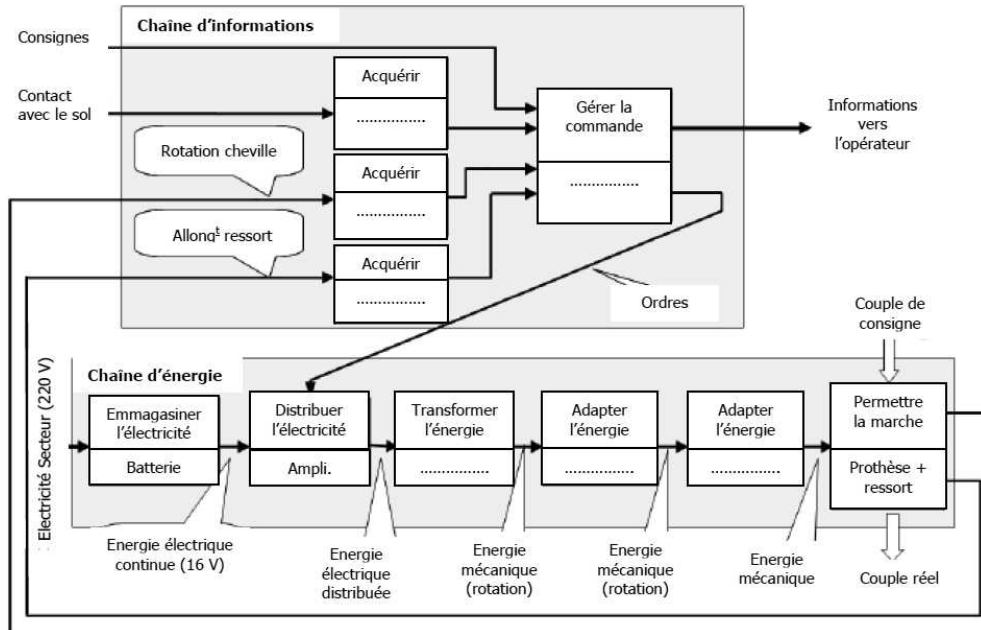


Diagramme des blocs internes

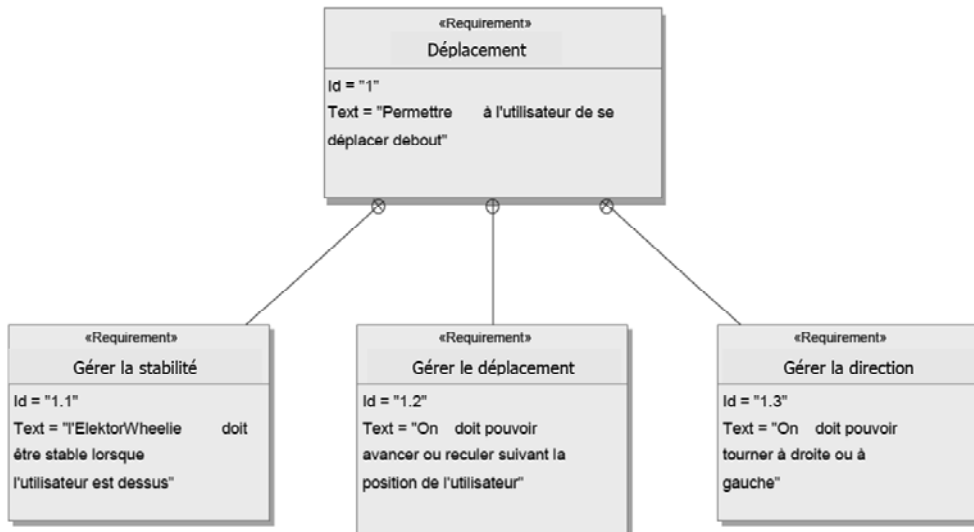


À l'aide des dessins, photos et diagrammes SysML, compléter la chaîne d'énergie et la chaîne d'information du système :

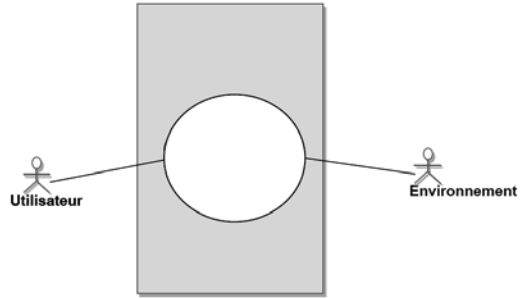


Exercice 1.4 – SEGWAY

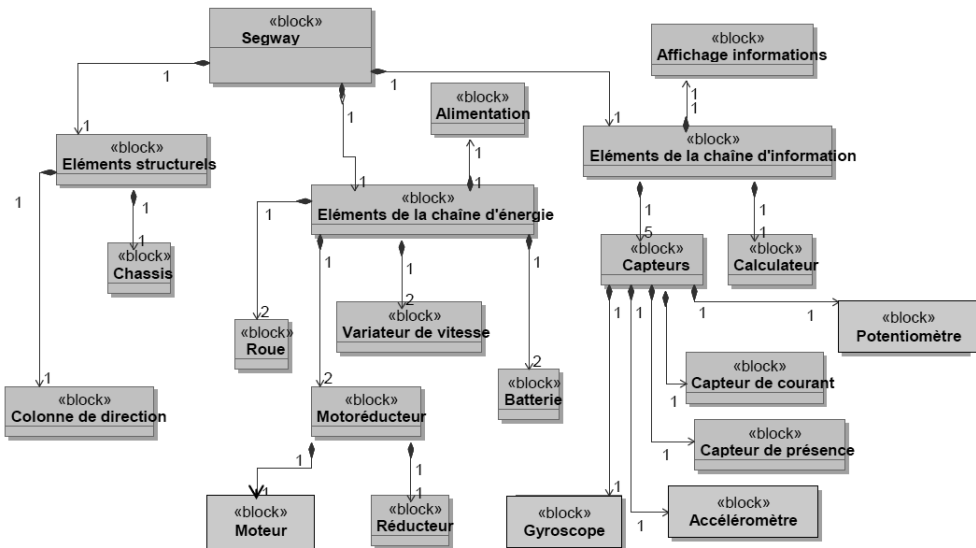
Le diagramme d'exigences ci-dessous décrit partiellement le SEGWAY. Il se limite à la définition de trois fonctions.



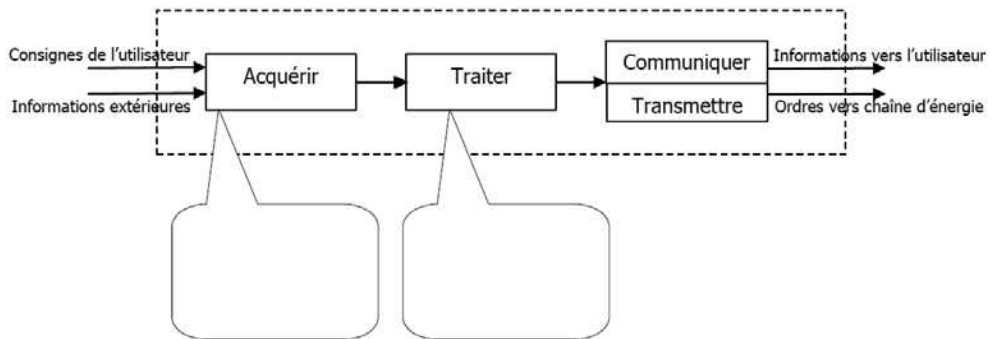
- À partir du diagramme d'exigences partiel, compléter le diagramme de cas d'utilisation :



On donne le diagramme de bloc interne du SEGWAY :

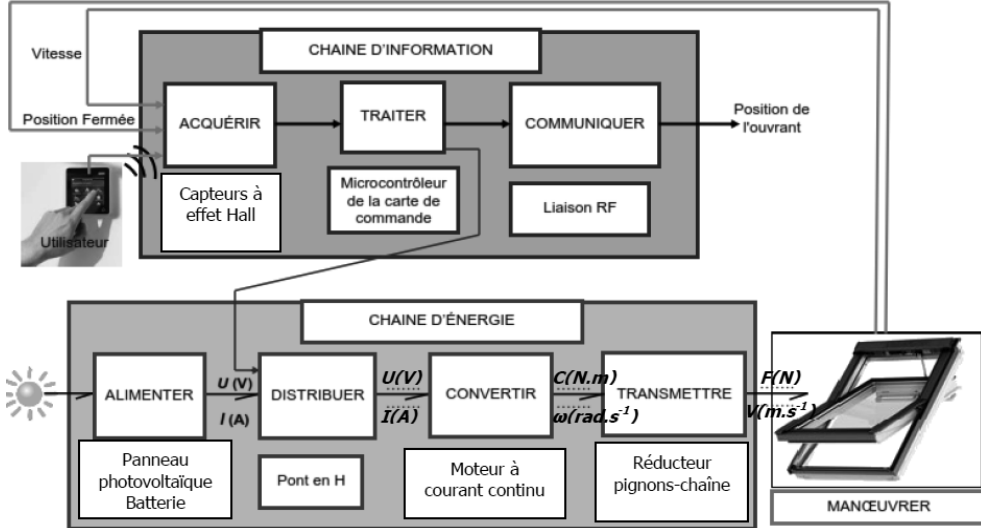


- Compléter la chaîne d'information suivante en précisant les composants réalisant les fonctions « Acquérir » et « Traiter » :

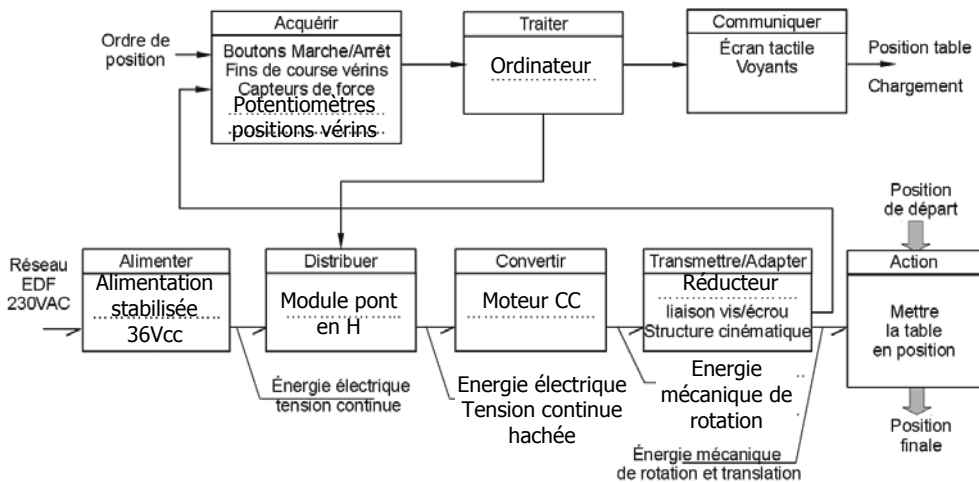


➔ Solutions

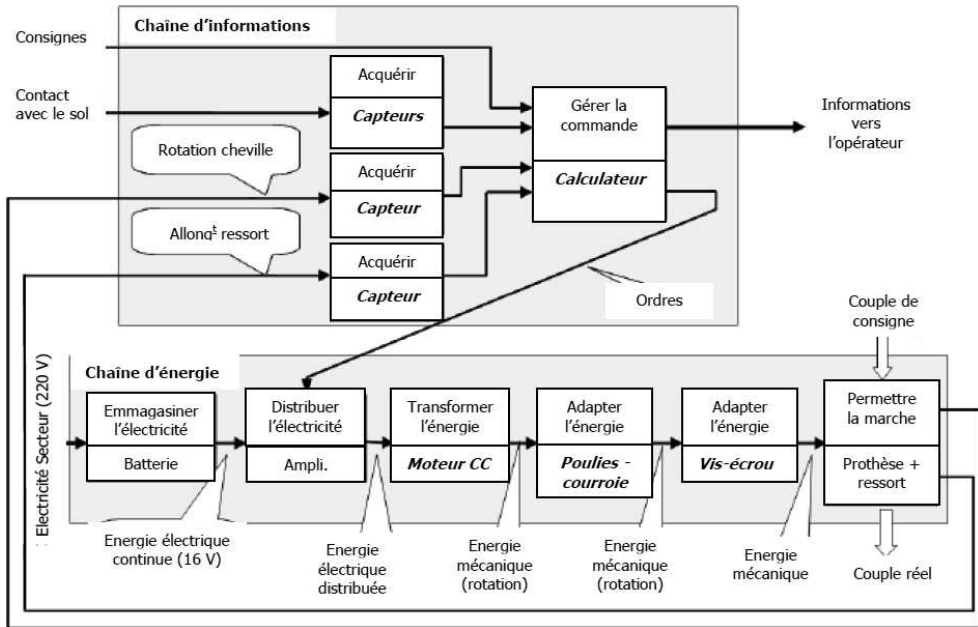
Exercice 1.1 – Fenêtre de toit VELUX®



Exercice 1.2 – Système tangible déployable

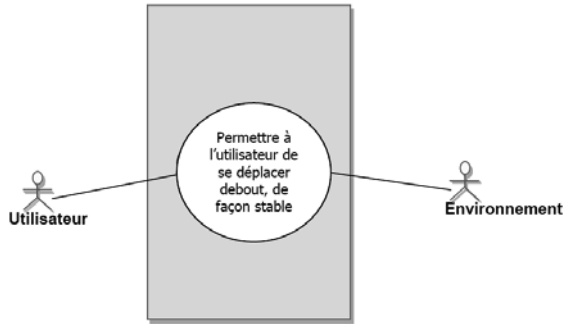


Exercice 1.3 – Prothèse de pied

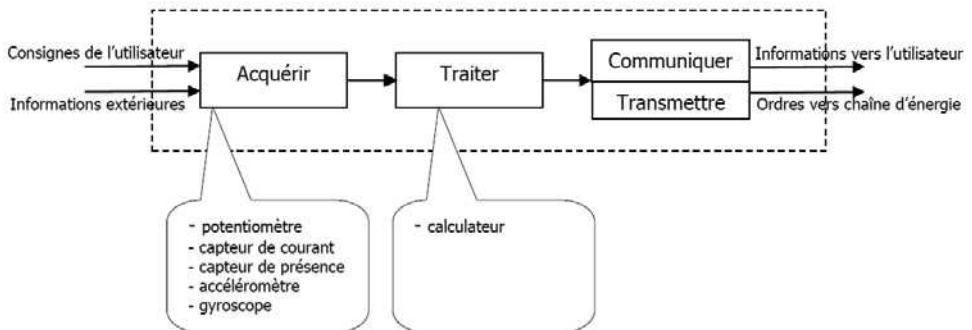


Exercice 1.4 – SEGWAY

1.



2.



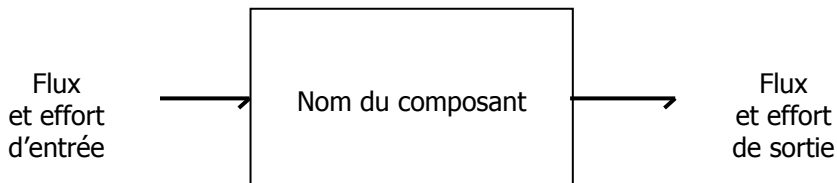
Chapitre 2

Énergétique

1. Chaîne de puissance et bilan énergétique

La chaîne de puissance (ou d'énergie) décrit le cheminement de l'énergie à travers les composants d'un système. Elle est constituée d'une suite de composants qui transmettent et/ou transforment l'énergie.

Le sens de circulation de l'énergie est indiqué par des demi-flèches (\longleftarrow).

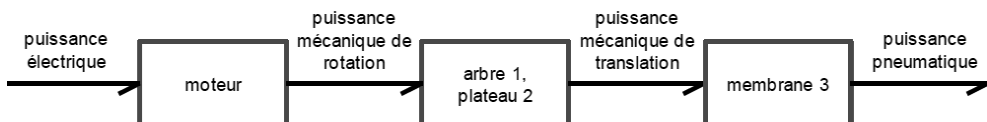


Le bilan énergétique de chaque composant est tel que la somme des énergies qui y entrent est égale à la somme des énergies qui en ressortent. Au global, pour le système, la somme des énergies qui sortent du système est égale à la somme des énergies qui y entrent :

$$\sum \text{énergies sortantes} = \sum \text{énergies entrantes}$$

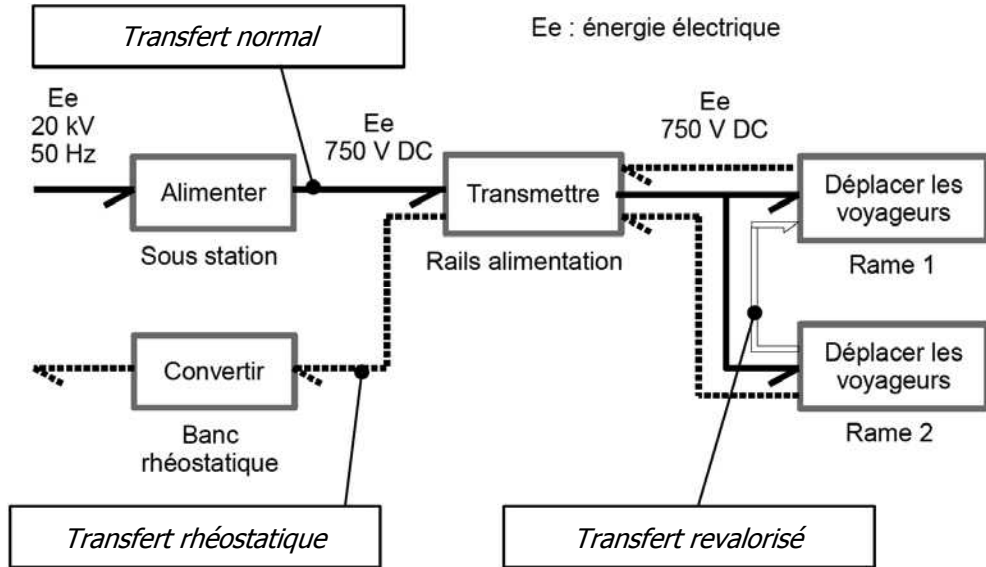
Exemple 1 : Tensiomètre (extrait Bac SI)

Le schéma bloc décrit le fonctionnement du compresseur qui mesure la tension artérielle :

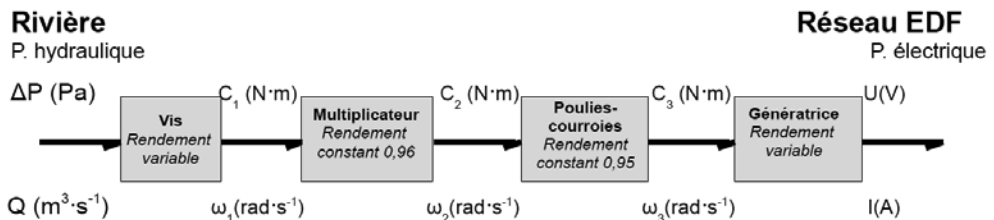


Exemple 2 : Métro de Rennes (extrait Bac SI)

Le schéma bloc (chaîne de puissance) met en évidence la fourniture d'énergie et aussi la récupération lors du freinage du métro :

**Exemple 3 : Centrale hydroélectrique (extrait Bac SI)**

La chaîne de puissance ci-dessous décrit le fonctionnement de la centrale hydroélectrique :



2. Puissance, énergie

- La puissance caractérise la performance d'un système à un instant donné.
- L'énergie caractérise la consommation de ce système pendant une durée.

2.1. Puissance

La puissance P s'exprime en watt (W). Elle est le produit d'une grandeur d'effort par une grandeur de flux :

Puissance (en watt)	Électrique	Mécanique en translation	Mécanique en rotation	Hydraulique
	$P = U \cdot I$	$P = F \cdot V$	$P = C \cdot \omega$	$P = p \cdot Q_v$
Grandeur d'effort	Tension U (V)	Force F (N)	Couple C (N.m)	Pression p (Pa)
Grandeur de flux	Courant I (A)	Vitesse linéaire V (m.s ⁻¹)	Vitesse angulaire ω (rad.s ⁻¹)	Débit volumique Q _v (m ³ .s ⁻¹)

N.B. : les grandeurs citées dans le tableau ci-dessus seront explicitées dans le chapitre « Grandeurs physiques ». La puissance thermique n'apparaît pas dans ce tableau car il existe 3 formes d'échange par flux thermique ; il faut disposer de plus de données pour résoudre ces problèmes. Les sujets d'examen sont donc documentés en fonction des questions posées. La résolution est alors facilitée.

2.2. Énergie

L'énergie E s'exprime en joule (J) et correspond au produit de la puissance P (en watt) et de la durée d'observation du transfert d'énergie Δt (en seconde) :

$$E_{(\text{en J})} = P_{(\text{en W})} \cdot \Delta t_{(\text{en s})}$$

N.B. : l'énergie peut s'exprimer en watt-heure (W.h) si le temps s'exprime en heure.

Exemple : l'énergie consommée par un radiateur de 1000 W qui fonctionne pendant 30 minutes (soit 0,5 h) est de 500 W.h.

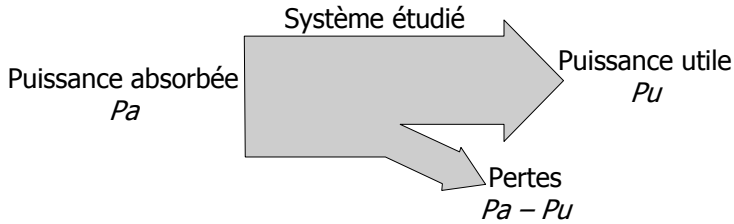
3. Rendement d'un système

À un instant donné, le rendement η exprime le rapport entre la puissance absorbée par le système (P_a) et la puissance utile restituée par ce même système (P_u) :

$$\eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance absorbée}} = \frac{P_u}{P_a}$$

La valeur du rendement est toujours inférieure à 1 (ou 100%).

Les pertes d'un système correspondent à la différence $P_a - P_u$:

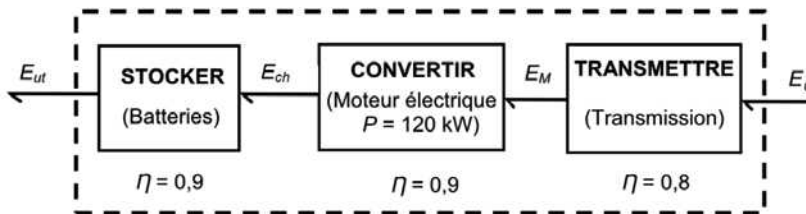


Attention : si le flux d'énergie traverse n systèmes S_1, S_2, \dots, S_n en série, de rendements respectifs $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$, le rendement global η_g est égal au produit de tous les rendements intermédiaires :

$$\eta_g = \eta_1 \times \eta_2 \times \dots \times \eta_n$$

Exemple : Tramway (extrait Bac SI)

Pendant la phase de freinage d'un tramway, l'énergie cinétique du véhicule est récupérée pour recharger les batteries. Sur cet exemple l'énergie absorbée (E_c) entre à droite sur la chaîne de puissance et l'énergie utile (E_{ut}) sort à gauche :



Le calcul du rendement global de la chaîne de récupération de l'énergie cinétique du véhicule est donné par : $\eta_g = \frac{E_{ut}}{E_c}$

$$\eta_g = \frac{E_{ut}}{E_c} \cdot \frac{E_{ch}}{E_M} \cdot \frac{E_M}{E_c} \text{ soit } \eta_g = \eta_{\text{Batteries}} \cdot \eta_{\text{moteur élec.}} \cdot \eta_{\text{Transmission}}$$

Application numérique : $\eta_g = 0,9 \times 0,9 \times 0,8 = 0,648$ soit $\eta_g = 64,8 \%$

→ Exercices

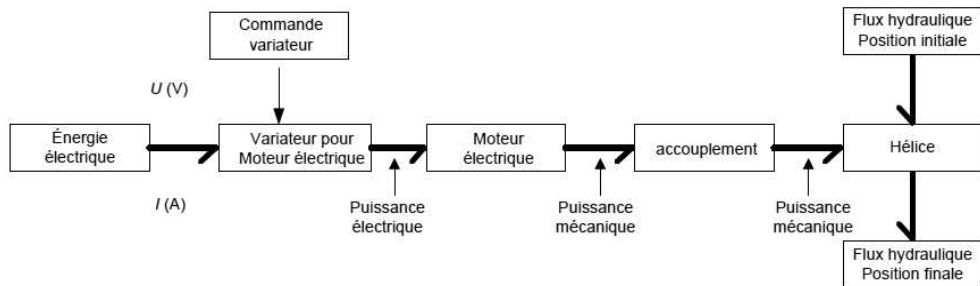
Chaîne de puissance

Exercice 2.1 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles (Bac SI)

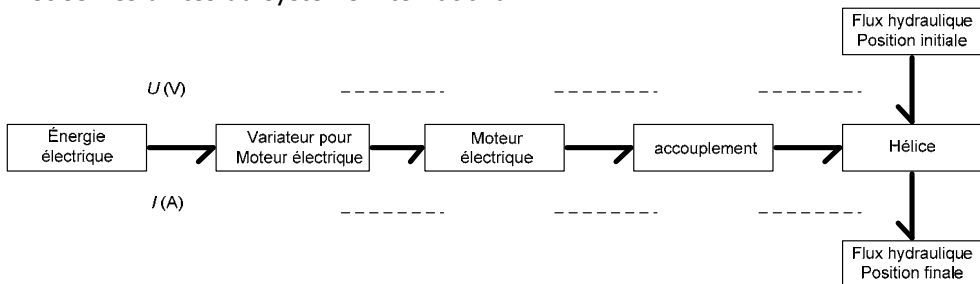


Les AUV sont des sous-marins autonomes utilisés pour des missions de surveillance sous-marine.

La fonction « propulser axialement » d'un sous-marin est représentée ci-dessous :

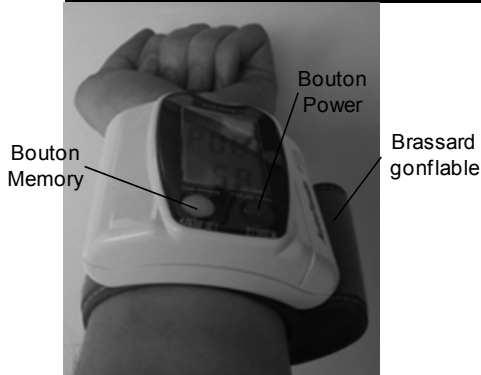


Compléter sur les pointillés du schéma ci-dessous, les grandeurs d'effort et de flux correspondant à la puissance transportée par chacun des liens de puissance. Préciser les unités du système international.



Puissance, énergie

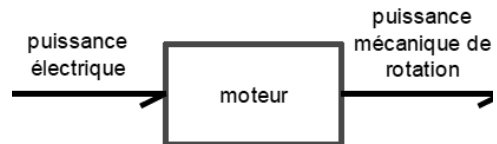
Exercice 2.2 – Tensiomètre (Bac SI)



L'Étude Nationale Nutrition Santé (ENNS) a permis d'estimer à 31 % l'hypertension artérielle dans la population des 18 à 74 ans en 2006-2007. Près de 20 % des personnes ayant une hypertension connue n'étaient pas traitées.

L'hypertension artérielle est définie comme une élévation de la pression du sang dans les artères, par rapport à une valeur dite « normale ». Elle est un facteur de risque majeur et fréquent de nombreuses maladies cardiovasculaires.

Pour entraîner le compresseur du tensiomètre, un moteur électrique doit fournir un couple C_m de $1,5 \text{ N}\cdot\text{mm}$ à une fréquence N_m de $9804 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.



1. Quelle est la puissance mécanique P_m que doit produire le moteur électrique ?
2. Quelle est la consommation d'énergie E_m , en $\text{W}\cdot\text{h}$, engendrée pour une mesure qui dure 1 min ?

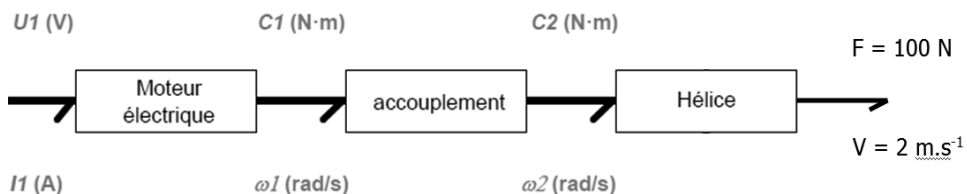
Exercice 2.3 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles (Bac SI)



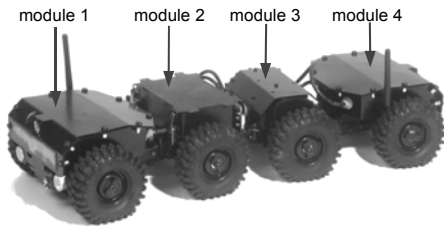
Les AUV sont des sous-marins autonomes utilisés pour des missions de surveillance sous-marine.

L'hélice du sous-marin qui transporte la caméra exerce une force F de 100 N quand il se déplace à une vitesse V de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Calculer la puissance mécanique P_m développée par le groupe propulseur du sous-marin.



Exercice 2.4 – Robot de reconnaissance tout terrain (Bac SI 2016)



La maîtrise et la qualité de l'air dans un bâtiment nécessite d'avoir un réseau aéraulique (réseau de ventilation, traitement de l'air, climatisation...) en bon état de fonctionnement.

Ce robot doit être capable d'inspecter des canalisations. Ces capacités de franchissement doivent permettre des opérations de reconnaissance et de surveillance.

Le robot est constitué de 4 modules :

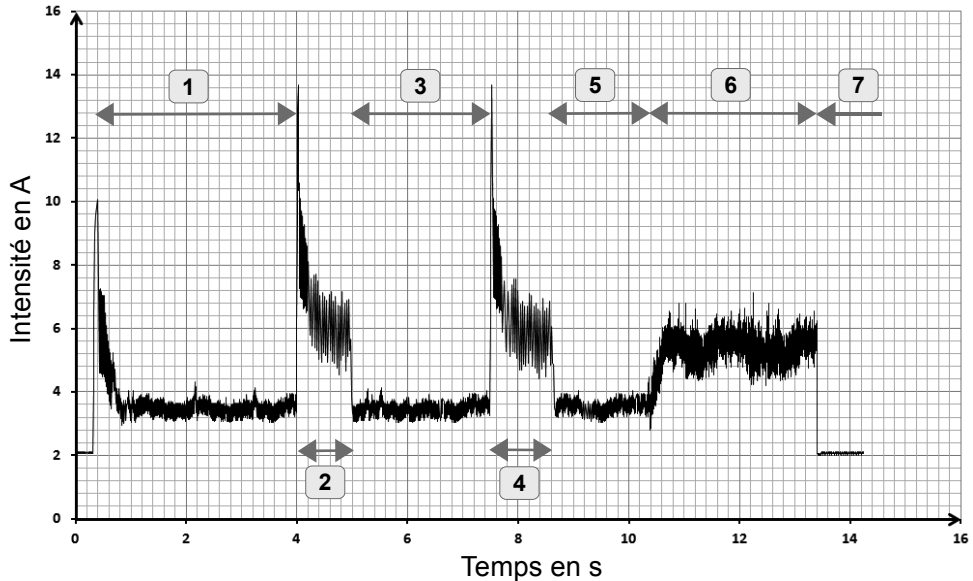
- le module 1, doté d'un moto-réducteur, permet au robot de changer de direction ;
- le module 2, équipé d'une batterie d'accumulateurs, permet de subvenir aux besoins énergétiques du robot ;
- le module 3, équipé d'un moto-réducteur, assure la propulsion du robot en délivrant, par le biais d'une transmission, une énergie mécanique de rotation aux quatre essieux ;
- le module 4, équipé d'un moto-réducteur, permet au robot de s'arquer ou de se cabrer.

La figure ci-dessous présente l'évolution de l'intensité délivrée par la batterie du robot lors d'une séquence d'observation vidéo et de déplacement à vitesse maximale. La distance totale parcourue lors de cet essai est de 5 mètres. Plusieurs phases sont à distinguer :

- phase 1, démarrage et déplacement sur un plan horizontal ;
- phase 2, avance et braquage à droite ;
- phases 3 et 5, déplacement en ligne droite sur un plan horizontal ;
- phase 4, avance et braquage à gauche ;
- phase 6, déplacement en ligne droite sur un plan incliné à 30° ;
- phase 7, le robot est en phase d'observation statique (vidéo, télémétrie...).

Soit $I_{x \text{ moy}}$ l'intensité moyenne correspondant à la phase x :

$$I_{1 \text{ moy}} = 3,7 \text{ A} ; I_{2 \text{ moy}} = 7,2 \text{ A} ; I_{3 \text{ moy}} = I_{5 \text{ moy}} = 3,5 \text{ A} ; I_{4 \text{ moy}} = 7 \text{ A} ; I_{6 \text{ moy}} = 5,3 \text{ A}$$



Durant cet essai, la valeur de la tension aux bornes de la batterie est considérée constante et égale à 15 V. La batterie est constituée de 4 cellules MP176065, branchées en série. Les principales caractéristiques électriques d'une cellule MP176065 sont :

- tension nominale 3,75 V
- tension de fin de charge $4,2 \pm 0,05$ V
- capacité nominale 6,8 A·h
- tension de coupure 2,5 V

Remarque : caractéristiques pour une décharge à courant constant de 1,4 A à 20 °C.

Le robot doit avoir une autonomie de 2 heures et être télé-opérable sur une distance de 300 m.

1. Relever sur la courbe ci-dessus la valeur du courant électrique I_0 lorsque le robot ne se déplace pas. Justifier qualitativement la valeur trouvée.

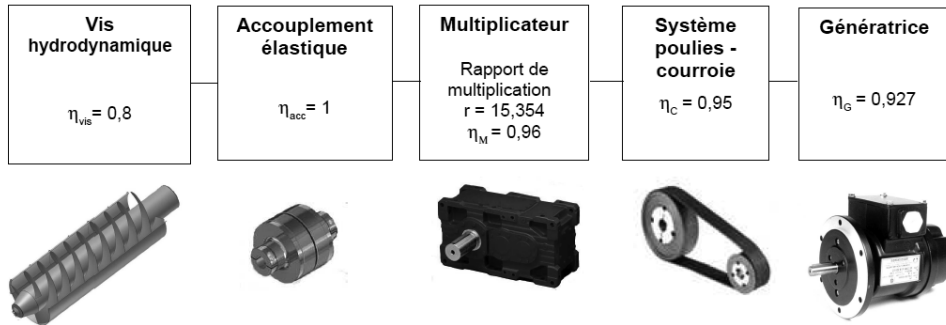
La décharge de la batterie est supposée se faire à courant constant.

2. Calculer l'énergie nominale stockée par la batterie W_{bat} (en W·h). Calculer l'énergie consommée W_{cons} lors du déplacement type décrit précédemment (phase 1 à phase 6).
3. Calculer l'autonomie du robot t_{auto} (en minutes) s'il n'effectue que des parcours types, ainsi que la distance d qu'il est possible d'effectuer.

Rendement

Exercice 2.5 – Centrale hydroélectrique (Bac SI)

On donne le schéma bloc de l'architecture de conversion de l'énergie de l'eau sur la vis hydrodynamique en énergie électrique :



La puissance hydraulique P_{hyd} qui arrive sur la vis hydrodynamique est de 39,24 kW.

1. Déterminer le rendement global de la chaîne de conversion d'énergie.
2. Quelle est la puissance électrique P_{elec} que l'on peut attendre de l'installation ?

Exercice 2.6 – Autonomie énergétique de l'île du Guesclin (Bac SI 2017)

Le fort Du Guesclin est un site isolé, sur le domaine maritime entre St Malo et Cancale en Bretagne (Ille et Vilaine). Aucun service d'énergie et d'eau n'est disponible sur cette presqu'île. Cette habitation exceptionnelle sera prochainement offerte à la location et devra fournir des prestations confortables.

Le schéma de la production d'électricité est donné page suivante.

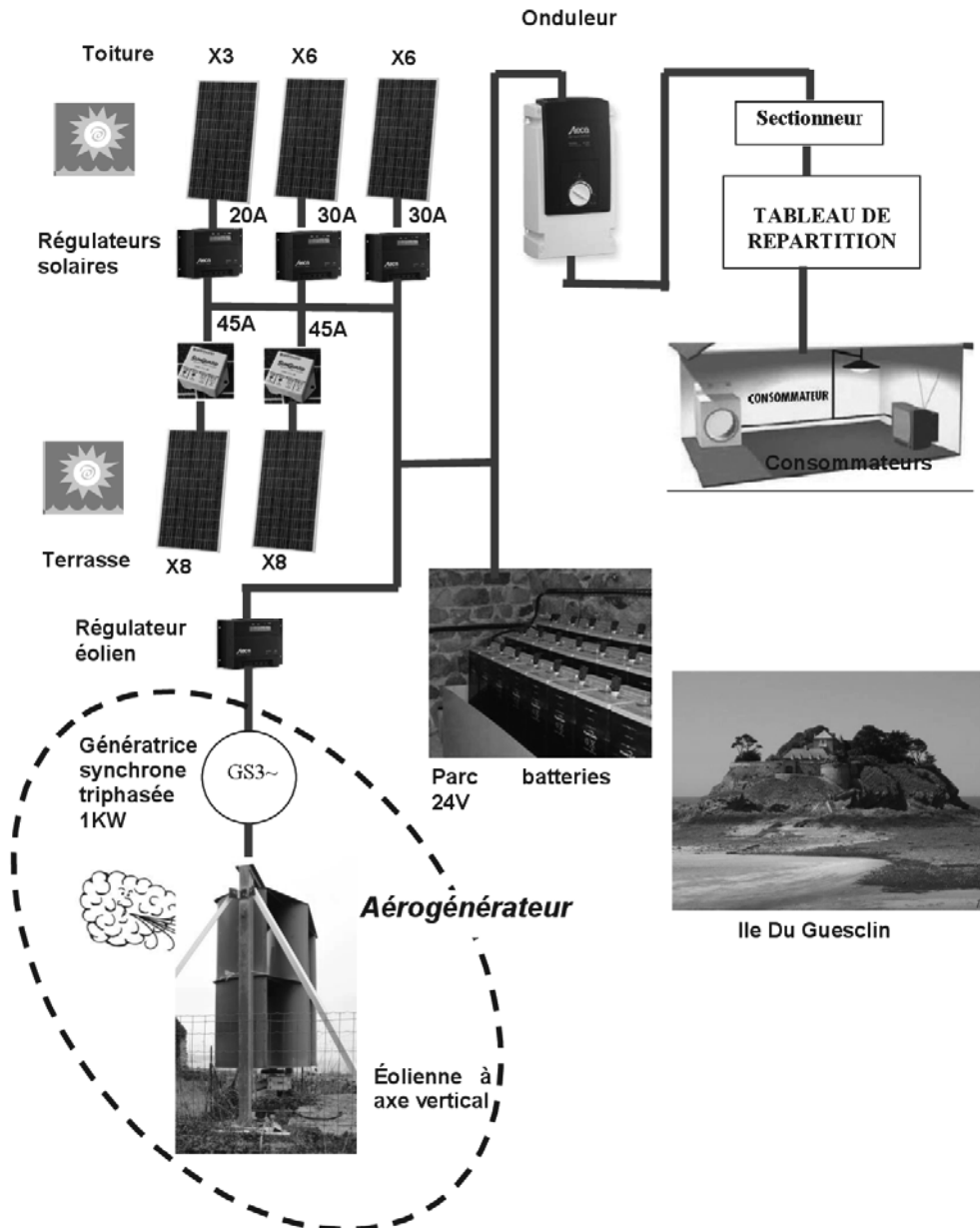
Hypothèses :

- Courant fourni par un panneau solaire : $I_p = 3,8$ A
- Tension aux bornes d'un panneau solaire : $U_p = 24$ V
- Durée d'exposition quotidienne des panneaux : $T_e = 2$ h.

1. Donner la fonction des éléments suivants et le type d'énergie présent en entrée et en sortie de chacun d'eux : panneaux solaires, éolienne, génératrice synchrone, parc batteries et onduleur.

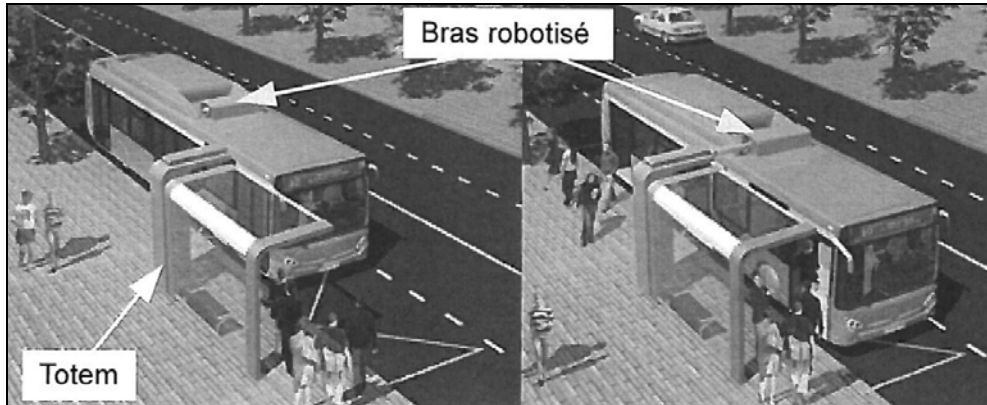
2. Rappeler la formule de l'énergie électrique puis calculer la quantité d'énergie $W_{panneaux}$ (en kW · h) produite par les panneaux solaires sur une journée.

3. Sachant que le rendement global des régulateurs associés au parc batteries est de 85 %, déterminer la quantité d'énergie minimale apportée quotidiennement par le système photovoltaïque, $W_{\text{sys_photovolt}}$ (en $\text{kW} \cdot \text{h}$).



Exercice 2.7 – Bus Watt System (Bac SI 2017)

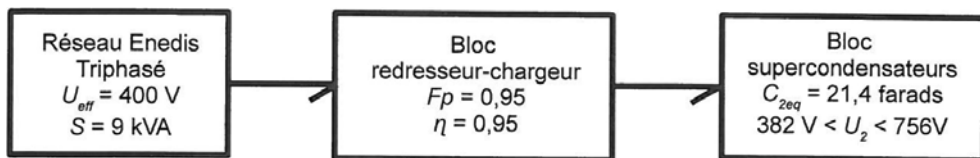
L'aéroport Nice Côte d'Azur expérimente un service de bus électrique : l'innovation majeure est le « biberonnage » du véhicule qui consiste à effectuer un transfert d'énergie à chaque station d'arrêt (Totem) pendant le transfert des passagers :



Le raccordement électrique du bus au Totem est réalisé grâce à un bras télescopique. Le stockage de l'énergie est réalisé par des supercondensateurs, côté bus et côté Totem.

Les conditions d'exploitation de la ligne de transport font apparaître une fréquence de passage sur une borne de recharge, désignée par « Totem », de 2 à 6 par heure. Le temps d'arrêt ne doit pas excéder 20 secondes pour une recharge de 1,038 kW · h .

On donne la chaîne d'énergie du redresseur-chargeur :



Le poste est alimenté en triphasé sous 400 V pour une puissance de 9 kVA. Le facteur de puissance vis-à-vis du réseau Enedis (ERDF) F_p est de 0,95. Le rendement global du bloc redresseur-chargeur η est de 95 %.

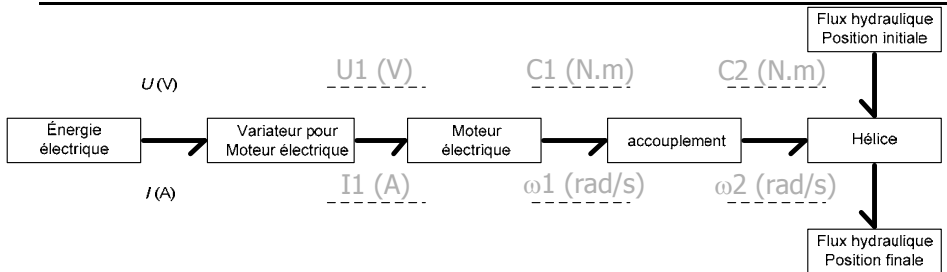
La puissance transférée aux supercondensateurs est définie par la relation suivante :

$$P_c = S \cdot F_p \cdot \eta$$

Calculer la durée nécessaire pour accumuler 1038 W·h dans les supercondensateurs du Totem à partir du réseau Enedis. Vérifier que cette durée est compatible avec les conditions d'exploitation de la ligne.

→ Solutions

Exercice 2.1 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles



Exercice 2.2 – Tensiomètre

$$1. P_m = C_m \cdot \omega_m \text{ avec } \omega_m \text{ (en rad/s)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_m \text{ (en tr/min)}}{60}$$

$$\text{Soit } P_m = C_m \cdot \frac{\pi \cdot N_m \text{ (en tr/min)}}{30}$$

$$\text{Application Numérique : } P_m = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\pi \cdot 9804}{30} = 154 \text{ W}$$

$$2. E_m = P_m \cdot \text{durée}_{\text{(en heure)}}, \text{ application numérique : } E_m = 1,54 \cdot \frac{1}{60} = 0,026 \text{ W.h}$$

Exercice 2.3 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles

$$P_m = F \cdot V, \text{ application numérique : } P_m = 100 \times 2 = 200 \text{ W}$$

Exercice 2.4 – Robot de reconnaissance tout terrain

1. $I_0 = 2 \text{ A}$. Cette valeur est la plus faible car dans ce mode de fonctionnement le robot ne consomme pas d'énergie pour alimenter les motoréducteurs de déplacement ou de cabrage. Il y a uniquement les capteurs à alimenter.

2. La batterie est composée de 4 cellules MP 176065 montées en série :

- tension aux bornes de la batterie : $U_{\text{bat}} = 4 \times 3,75 \text{ V} = 15 \text{ V}$
- capacité de la batterie : $C_{\text{bat}} = 6,8 \text{ A.h}$

L'énergie nominale stockée dans la batterie est alors égale à :

$$W_{\text{bat}} = U_{\text{bat}} \times C_{\text{bat}} = 15 \times 6,8 = 102 \text{ W.h}$$

L'énergie consommée pour un déplacement type est égal à :

$$W_{\text{cons}} = \frac{U_{\text{bat}}}{3600} \cdot (I_{1\text{moy}} \cdot t_1 + I_{2\text{moy}} \cdot t_2 + I_{3\text{moy}} \cdot t_3 + I_{4\text{moy}} \cdot t_4 + I_{5\text{moy}} \cdot t_5 + I_{6\text{moy}} \cdot t_6)$$

avec : $t_1 = 3,6 \text{ s}$; $t_2 = 1 \text{ s}$; $t_3 = 2,5 \text{ s}$; $t_4 = 1,1 \text{ s}$; $t_5 = 1,8 \text{ s}$; $t_6 = 3 \text{ s}$

soit : $W_{\text{cons}} = 0,247 \text{ W}\cdot\text{h}$

3. Nombre de parcours type réalisable : $N_{\text{parcours}} = \frac{W_{\text{bat}}}{W_{\text{cons}}} = \frac{102}{0,247} = 412$

Pour un parcours type, le robot parcourt une distance de 5 mètres en 13,6 secondes.

- Autonomie : $t_{\text{auto}} = N_{\text{parcours}} \times 13,6 = 5600 \text{ s} = 93 \text{ minutes}$
- Distance : $d = N_{\text{parcours}} \times 5 = 2 \text{ km}$

Exercice 2.5 – Centrale hydroélectrique

1. Calcul du rendement global :

$$\eta_{\text{global}} = 0,8 \times 1 \times 0,96 \times 0,95 \times 0,927 = 0,676 = 67,6 \%$$

2. On a : $\eta_{\text{global}} = \frac{P_{\text{élec}}}{P_{\text{hyd}}}$, soit : $P_{\text{élec}} = \eta_{\text{global}} \cdot P_{\text{hyd}}$

Application numérique : $P_{\text{élec}} = 0,676 \times 39,24 = 26,5 \text{ kW}$

Exercice 2.6 – Autonomie énergétique de l'île du Guesclin

1. Panneaux solaires : convertir énergie solaire en énergie électrique continue

Éolienne : convertir énergie éolienne en énergie mécanique

Génératrice synchrone triphasée : convertir énergie mécanique en énergie électrique triphasée.

Parc batteries : stocker et restituer l'énergie électrique continue.

Onduleur : convertir l'énergie électrique continue en énergie électrique alternative monophasée.

2. Énergie produite par 1 panneau solaire :

$$W_{1\text{panneau}} = U_p \cdot I_p \cdot T_e = 24 \times 3,8 \times 2 = 182,4 \text{ W}\cdot\text{h}$$

Or l'installation photovoltaïque comporte 31 panneaux solaires :

$$W_{\text{panneaux}} = 31 \cdot W_{1\text{panneau}} = 31 \times 182,4 = 5,6 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

3. $W_{\text{sys_photovolt}} = \frac{85}{100} \times 5,6 \cdot 10^3 = 4,8 \text{ kW}\cdot\text{h}$

Exercice 2.7 – Bus Watt System

La puissance maximale est de : $P_c = 9000 \times 0,95 \times 0,95 = 8122 \text{ W}$

Durée nécessaire pour accumuler $1038 \text{ W} \cdot \text{h}$:

$$\Delta t = \frac{W}{P_c} = \frac{1038}{8122} = 0,128 \text{ h} = 460 \text{ s (soit 7 min 40 s)}$$

Dans le pire des cas, il y a 6 passages par heure, cela fait donc 1 passage toutes les 10 minutes. Donc les supercondensateurs ont le temps de se recharger entre 2 passages.

Chapitre 3

Grandeurs physiques

Ce chapitre ne présente pas une liste exhaustive des grandeurs physiques. Il présente les grandeurs couramment rencontrées en sciences de l'ingénieur et les outils à connaître pour « manipuler » correctement ces grandeurs.

Elles sont présentées par domaines d'utilisation : électricité, mécanique des solides, hydraulique, thermique.

Dans une formule, il faut systématiquement associer une unité à une grandeur physique pour vérifier l'homogénéité de l'égalité.

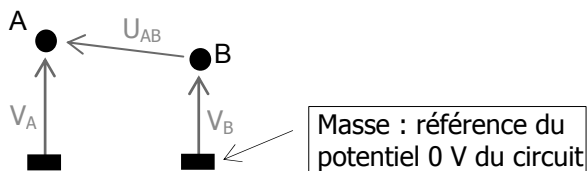
Exemple 1 : une force de 1 N s'exerce sur une surface de 1 m². Cela donne lieu à une pression de 1 Pa : $\frac{(\text{force}) 1 \text{ N}}{(\text{surface}) 1 \text{ m}^2} = (\text{pression}) 1 \text{ Pa}$

Exemple 2 : une batterie de capacité 1 A·h peut fournir une intensité de 1 A pendant 1 heure : (capacité) 1 A·h = (intensité) 1 A × (durée) 1 h

1. Électricité

1.1. Tension

Si 2 corps n'ont pas la même charge électrique, ils ne sont pas au même potentiel. La tension est représentative de cette « différence de potentiel » entre ces 2 corps.

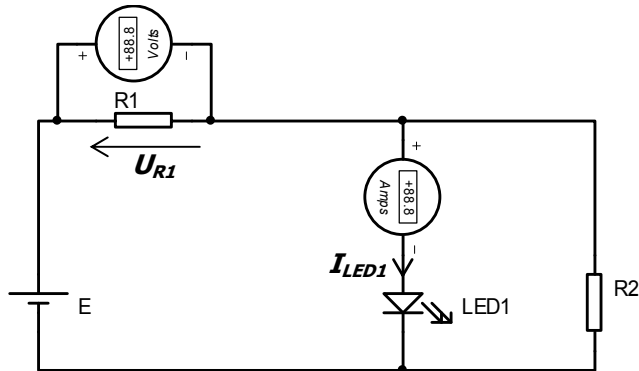


U_{AB} est la différence de potentiel (ddp) entre les corps A et B : $U_{AB} = V_A - V_B$.

Une tension se mesure toujours entre 2 points d'un circuit et s'exprime en volt (V).

La différence de potentiel se mesure à l'aide d'un voltmètre qui se monte en parallèle.

Exemple : la tension aux bornes de la résistance $R1$ est fléchée entre les 2 bornes de la résistance. Le voltmètre monté en dérivation de la résistance mesure alors la différence de potentiel entre les 2 bornes de celle-ci :



1.2. Courant

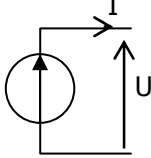
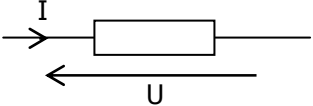
Le courant circulant dans un conducteur (fil) est représentatif de la quantité d'électricité (quantité d'électrons) circulant dans ce conducteur.

Un courant s'exprime en ampère (A). Par convention, un courant circulant du potentiel le plus élevé vers le moins élevé sera positif.

Un courant se mesure à l'aide d'un ampèremètre traversé par le courant à mesurer : ce dernier est monté en série.

Exemple : sur le schéma structurel ci-dessus, l'ampèremètre est monté en série avec la LED1, ainsi il mesure le courant circulant dans la LED1.

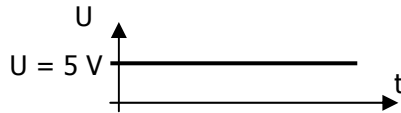
1.3. Conventions générateur et récepteur

	Convention générateur*	Convention récepteur**
Représentation	Les flèches de tension et courant sont orientées dans le même sens.	Les flèches de tension et courant sont orientées dans le sens opposé.
Exemple	Générateur de tension : 	Résistance : 

* Un générateur est un composant qui délivre de l'énergie.
 ** Un récepteur est un composant qui consomme de l'énergie.

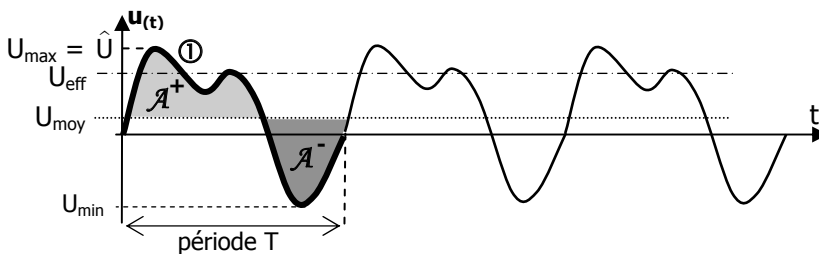
1.4. Régime continu

Un signal (courant ou tension) est dit continu lorsqu'il est invariant dans le temps. Il est caractérisé uniquement par sa valeur.



1.5. Régime périodique

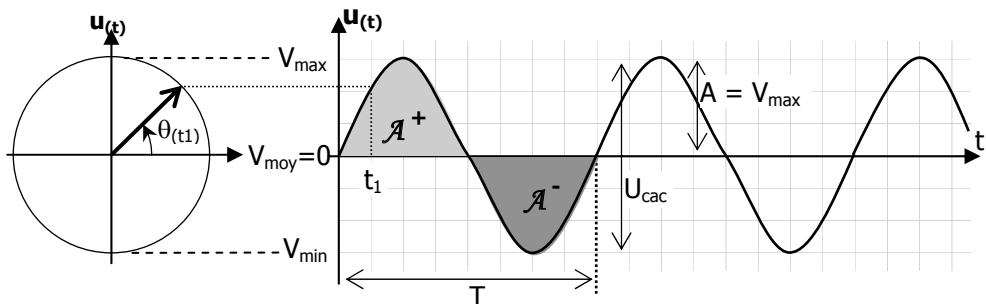
Un signal (courant ou tension) est dit périodique lorsqu'il présente un « motif élémentaire ① » qui se répète dans le temps :



Un signal périodique est caractérisé par :

Nom	Symbole	Définition
Période	T	Durée du motif élémentaire.
Fréquence	f	Nombre de motifs élémentaires (périodes) sur une durée de 1 seconde : $f = \frac{1}{T}$.
Amplitude crête-à-crête	U_{cac}	Différence entre les valeurs extrêmes du motif élémentaire : $U_{cac} = U_{max} - U_{min}$.
Valeur moyenne (ou composante continue)	U_{moy} ou $\langle U \rangle$ ou \bar{U}	Il s'agit de la moyenne mathématique du motif élémentaire : $U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{(t)} \cdot dt$ Elle se mesure avec un voltmètre ou un ampèremètre en position « DC ». Méthode graphique : trouver la valeur telle que les aires \mathcal{A}^+ et \mathcal{A}^- soient égales.
Valeur efficace	U_{eff}	Correspond à la valeur d'une tension continue qui délivrerait la même énergie que le signal périodique. Elle se calcule par : $U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{(t)}^2 \cdot dt}$ Elle se mesure avec un voltmètre ou un ampèremètre en position « AC + DC ».
Amplitude	A	Il s'agit de l'ondulation autour de la composante continue : $A = U_{max} - U_{moy} = U_{min} - U_{moy} $

1.5.1. Signal sinusoïdal



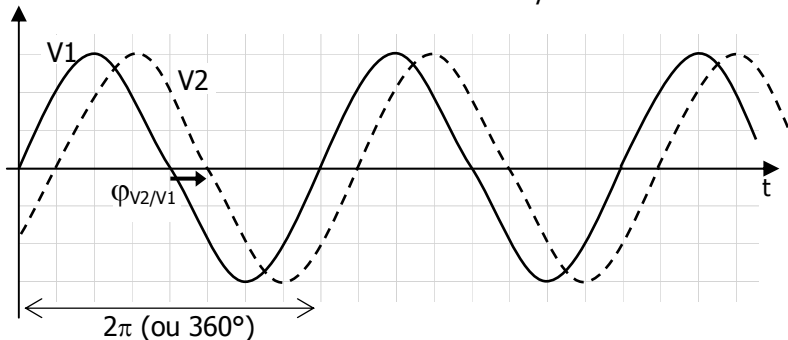
- Expressions mathématiques du signal sinusoïdal :
 - ✓ $V_{(t)} = V_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ avec $f = \frac{1}{T}$ (Hz)
 - ✓ $V_{(t)} = V_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ avec la pulsation $\omega = 2\pi \cdot f$ (rad/s)
 - ✓ $V_{(t)} = V_{\max} \cdot \sin(\theta_{(t)})$ avec l'angle $\theta_{(t)} = \omega \cdot t$ (rad)

- Valeur efficace d'un signal sinusoïdal (dans le cas où la composante continue est nulle) : $V_{\text{eff}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$

- Déphasage φ (en ° ou radian) correspondant à l'angle entre 2 signaux sinusoïdaux de même fréquence :

en radian : $\varphi = \frac{\text{décalage}}{\text{période}} \times 2\pi$	en degré : $\varphi = \frac{\text{décalage}}{\text{période}} \times 360$
--	--

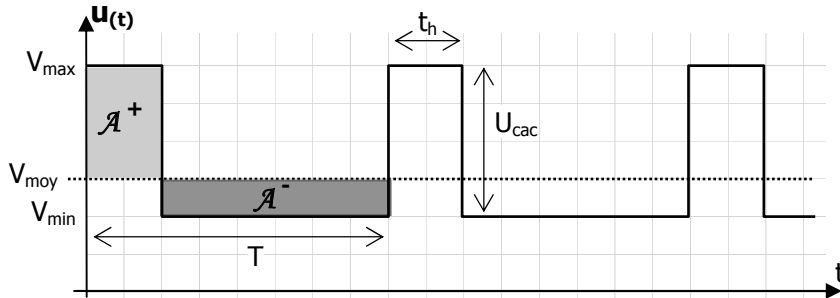
Exemple : soit 2 tensions sinusoïdales de même fréquence :



<p style="text-align: center;"><i>en radian :</i></p> $\varphi_{V2/V1} = \frac{1 \text{ carreau}}{8 \text{ carreaux}} \times 2\pi = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$	<p style="text-align: center;"><i>en degré :</i></p> $\varphi_{V2/V1} = \frac{1 \text{ carreau}}{8 \text{ carreaux}} \times 360 = 45^\circ$
--	---

On dit alors que le signal V2 est en retard par rapport au signal V1 de $\frac{\pi}{4}$ rad.

1.5.2. Signal rectangulaire



- Rapport cyclique (en %) $\alpha = \frac{t_h}{T} \times 100$: il donne le pourcentage de la durée à l'état haut t_h par rapport à la durée de la période T .

N.B. : dans le cas où le rapport cyclique est égal à 50% alors on parle de signal carré.

- Valeur moyenne V_{moy} : il faut que les aires soient égales : $\mathcal{A}^+ = \mathcal{A}^-$
 or $\mathcal{A}^+ = (V_{\max} - V_{\text{moy}}) \cdot t_h$ et $\mathcal{A}^- = (V_{\text{moy}} - V_{\min}) \cdot (T - t_h)$
 d'où : $(V_{\max} - V_{\text{moy}}) \cdot t_h = (V_{\text{moy}} - V_{\min}) \cdot (T - t_h)$
 $V_{\max} \cdot t_h - V_{\text{moy}} \cdot t_h = V_{\text{moy}} \cdot (T - t_h) - V_{\min} \cdot (T - t_h)$
 $V_{\text{moy}} \cdot (T - t_h) + V_{\text{moy}} \cdot t_h = V_{\max} \cdot t_h + V_{\min} \cdot (T - t_h)$
 $V_{\text{moy}} \cdot T = (V_{\max} - V_{\min}) \cdot t_h + V_{\min} \cdot T$
 $V_{\text{moy}} = \alpha \cdot (V_{\max} - V_{\min}) + V_{\min}$

N.B. : si $V_{\min} = 0$ alors $V_{\text{moy}} = \alpha \cdot V_{\max}$; dans ce cas, la valeur moyenne dépend uniquement du rapport cyclique.

2. Mécanique

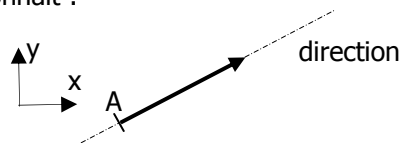
2.1. Force

2.1.1. Définitions, écritures

La force est une grandeur vectorielle notée $\vec{A}_{1 \rightarrow 2}$ qui se lit force exercée par le système 1 sur le système 2, au point A.

Une force est complètement définie si on connaît :

- le point d'application ;
- la direction (ou support) ;
- le sens ;
- la norme $\|\vec{A}_{1 \rightarrow 2}\|$.



Dans l'espace, le vecteur peut s'écrire sous deux formes :

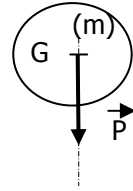
$$\vec{A}_{1 \rightarrow 2} = X_A \cdot \vec{x} + Y_A \cdot \vec{y} + Z_A \cdot \vec{z} \quad \text{ou} \quad \vec{A}_{1 \rightarrow 2} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix}$$

Très souvent pour dimensionner un composant, il faudra calculer la norme du vecteur force qui s'exprime en newton (N) ou la mesurer à l'aide d'un dynamomètre.

La norme d'une force se calcule avec la relation : $\|\vec{A}_{1 \rightarrow 2}\| = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}$.

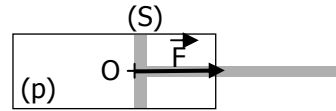
Exemple 1 : tout objet de masse (m), dans le champ de la pesanteur, subit une force \vec{P} :

- appelée poids ;
- appliquée en son centre de masse G ;
- direction verticale ;
- sens vers le centre de la Terre ;
- de norme : $P = m \times g$
avec $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, P en N et m en kg.



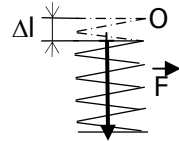
Exemple 2 : la chambre arrière d'un vérin est alimentée sous une pression (p), le piston subit une force \vec{F} :

- appliquée au centre O de la face du piston ;
- direction perpendiculaire à cette face ;
- sens vers l'intérieur du piston ;
- de norme $F = p \times S$
avec F en N si p en pascal (Pa) et S en m^2
ou F en daN si p en bar et S en cm^2 .



Exemple 3 : une force \vec{F} verticale, appliquée sur le ressort, au point O , entraîne une déformation Δl de ce ressort.

- La norme de la force \vec{F} est : $F = k \times \Delta l$
 F en N, Δl en mm
et k raideur du ressort en $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$



2.1.2. Moment d'une force par rapport à un axe ou par rapport à un point

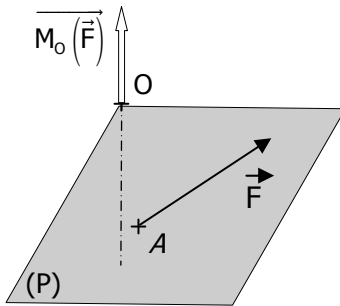
Dans l'espace (3D), on définit le moment d'une force par rapport à un axe. Dans le plan (2D), on définit le moment d'une force par rapport à un point.

N.B. : dans certains cas (exemple d'un moteur), on parle de couple ; il s'agit de la même grandeur (il s'agit de 2 forces de normes égales F écartées d'une distance d).

Le moment d'une force par rapport à un axe (ou couple), appliqué à un solide, génère, accélère ou freine la rotation de ce solide par rapport à cet axe.

Le moment combine les notions de force (newton) et de distance (mètre). L'unité d'un moment ou d'un couple est le newton·mètre (N·m).

Le moment est un vecteur qui a pour direction l'axe de la rotation.



$$\overrightarrow{M}_O(\vec{F}) = \overrightarrow{OA} \wedge \vec{F}$$

N.B. : le symbole \wedge correspond au produit vectoriel.

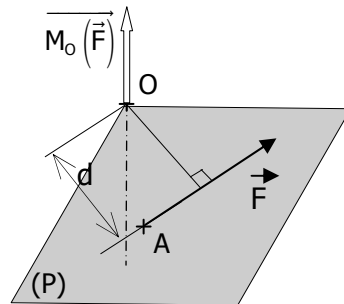
Règle de calcul du produit vectoriel :

$$\text{Si } \overrightarrow{OA} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} \text{ et } \vec{F} = \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{pmatrix},$$

$$\text{Alors } \overrightarrow{M}_O(\vec{F}) = \overrightarrow{OA} \wedge \vec{F} = \begin{pmatrix} Y_A \cdot F_Z - Z_A \cdot F_Y \\ Z_A \cdot F_X - X_A \cdot F_Z \\ X_A \cdot F_Y - Y_A \cdot F_X \end{pmatrix}$$

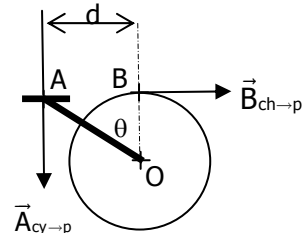
N.B. : pour la plupart des problèmes, nous raisonnerons dans le plan (P) et c'est la norme du moment qui nous intéressera :

$$\|\overrightarrow{M}_O(\vec{F})\| = \|\vec{F}\| \cdot d$$



Exemple : le dessin représente, dans le plan, un pédalier de vélo.

- En B, le brin tendu de la chaîne exerce une force horizontale $\vec{B}_{\text{ch} \rightarrow \text{p}}$ sur le pédalier.
- En A, le cycliste exerce une force verticale $\vec{A}_{\text{cy} \rightarrow \text{p}}$ sur le pédalier.
- En O, le châssis s'opposera à la somme des deux autres actions (force non représentée).



<i>Moment exercé par la chaîne sur le pédalier</i>	<i>Moment exercé par le cycliste sur le pédalier</i>
<p>Le plateau a un rayon $OB = R$.</p> <p>La chaîne exerce, sur le pédalier, un moment par rapport à O :</p> $\ \overrightarrow{M_o(\vec{B})}\ = \ \vec{B}\ \cdot R$	<p>La manivelle a une longueur $OA = L$. La manivelle fait un angle θ par rapport à la verticale.</p> <p>Le cycliste exerce, sur le pédalier, un moment par rapport à O :</p> $\ \overrightarrow{M_o(\vec{A})}\ = \ \vec{A}\ \cdot d = \ \vec{A}\ \cdot L \cdot \sin(\theta)$

2.2. Vitesse

2.2.1. Définitions

La vitesse d'un point A , appartenant à un solide S , par rapport à un solide de référence S_0 , est notée :

- $\overrightarrow{V(A \in S / S_0)}$, s'il s'agit d'une vitesse linéaire ;
- $\overrightarrow{\Omega(A \in S / S_0)}$, s'il s'agit d'une vitesse angulaire.

N.B. : la vitesse est une grandeur vectorielle.

Dans ce chapitre nous travaillerons avec la norme de la vitesse qui est un réel et qui caractérise le plus souvent une vitesse moyenne.

La vitesse quantifie un espace (longueur ou angle) parcouru pendant une durée (intervalle de temps).

N.B. : la notion de « vecteur vitesse » sera reprise dans le chapitre 5 « Mécanique » (au paragraphe « Cinématique »).

2.2.2. Vitesse linéaire

La vitesse linéaire est le rapport entre la distance d (variation d'abscisse curviligne) parcourue par un point et la durée t de ce parcours :

$$V(A \in S / S_0) = \frac{d}{t} \quad \text{Unités : } V \text{ en m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ si } d \text{ en m et } t \text{ en s.}$$

$$V \text{ en km}\cdot\text{h}^{-1} \text{ si } d \text{ en km et } t \text{ en h.}$$

2.2.3. Vitesse angulaire

La vitesse angulaire est le rapport entre le déplacement angulaire θ d'un point et la durée t de ce déplacement.

$$\omega(A \in S / S_0) = \frac{\theta}{t} \quad \text{Unités : } \omega \text{ en rad}\cdot\text{s}^{-1} \text{ si } \theta \text{ est en rad et } t \text{ en s.}$$

$$\omega \text{ en } ^\circ\text{s}^{-1} \text{ si } \theta \text{ est en } ^\circ \text{ et } t \text{ en s.}$$

On utilise la lettre minuscule ω lorsque la rotation a lieu sur un seul axe.

2.2.4. Relations à connaître

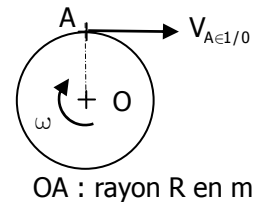
Deux relations sont à connaître pour traiter des problèmes liés à un solide en rotation :

- Relation entre une vitesse de rotation ω ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) et une fréquence de rotation N ($\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$) :

$$\omega_{(\text{en rad}\cdot\text{s}^{-1})} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_{(\text{en tr}\cdot\text{min}^{-1})}}{60}$$

- Relation entre une vitesse tangentielle (linéaire) $V_{A \in 1/0}$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et une vitesse angulaire ω ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) :

$$V_{(\text{en m}\cdot\text{s}^{-1})} = \omega_{(\text{en rad}\cdot\text{s}^{-1})} \cdot R$$



3. Hydraulique

Un liquide traverse une section S. Trois grandeurs caractérisent l'écoulement de ce liquide : la pression, le débit massique ou volumique, la vitesse.



3.1. Pression

La pression s'exprime en pascal (Pa) et correspond à une force exercée sur une surface : $p = \frac{F}{S}$.

Ainsi, une force de 1 N qui s'exerce sur une surface de 1 m^2 donne lieu à une pression de 1 Pa.

N.B. : si F est exprimée en daN et S en cm^2 , la pression s'exprime en bar donc :
 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pascal}$.

3.2. Débit volumique ou massique

Le débit indique la quantité de liquide qui traverse une section pendant une durée :

- Si on évalue le volume de liquide déplacé, on parle de débit volumique :

$$Q_V \text{ (en m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) = S \text{ (en m}^2) \cdot V \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1})$$

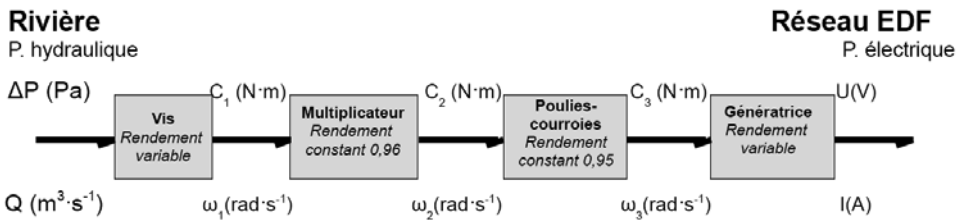
- Si on évalue la masse de liquide déplacé, on parle de débit massique :

$$Q_m \text{ (en kg} \cdot \text{s}^{-1}) = \rho \text{ (en kg} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot Q_V \text{ (en m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

ρ : masse volumique

Exemple : Centrale hydroélectrique (extrait Bac SI)

La chaîne d'énergie décrit le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique :



Pour une pression p à l'entrée de la vis de 20 000 Pa et un débit Q_V de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la puissance hydraulique reçue par la vis est :

$$P = p \cdot Q_V = 20\,000 \times 2 = 40 \text{ kW}$$

4. Thermique

4.1. Capacité thermique massique

Elle s'exprime en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (J : joule) et se note C. Elle permet de calculer l'énergie (quantité de chaleur) en joules nécessaire pour élever 1 kg de matière de 1 K.

N.B. : K correspond à l'unité de température Kelvin : $0 \text{ }^\circ\text{C} \approx 273 \text{ K}$.

Exemple : $C_{\text{eau}} = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $C_{\text{aluminium}} = 905 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

4.2. Quantité de chaleur échangée

Pour élever la température de ΔT , d'une masse m , d'un matériau de capacité thermique C , il faut une quantité Q de chaleur :

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T \quad \text{avec } Q \text{ en J, } m \text{ en kg, } C \text{ en } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ et } T \text{ en K.}$$

Exemple : calculer l'énergie nécessaire pour chauffer 1000 kg de lait de 32 °C à 36 °C, avec $C_{\text{lait}} = 4000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$$\Delta T = 36 - 32 = 4 \text{ °C} = 4 \text{ K}$$

Donc : $Q = 1000 \times 4000 \times 4 = 16 \text{ MJ}$ or $1 \text{ W.h} = 3600 \text{ J}$, d'où : $Q \approx 4,5 \text{ kW.h}$

4.3. Puissance thermique transférée (P) ou flux thermique

$$P_{(\text{en W})} = \frac{\Delta Q_{(\text{en J})}}{\Delta t_{(\text{en s})}}$$

L'échange de chaleur se fait par conduction (P_{cond}), convection (P_{conv}) ou rayonnement (P_{ray}) à travers ou au contact de la surface S .



- Conduction thermique : la chaleur se propage à travers un corps solide (S) sous l'effet d'un gradient (différence $\theta_1 - \theta_2$) de température.
- Convection : la chaleur se propage à travers un fluide sous l'effet d'un gradient (différence $\theta_1 - \theta_2$) de température.
- Rayonnement : tous les corps émettent un rayonnement. Le transfert peut se faire dans le vide.

Dans tous les cas, la puissance thermique ou flux est proportionnel à la surface d'échange et au gradient de température. Elle peut s'écrire sous la forme :

$$P = k \cdot \text{Surface} \cdot \Delta \theta$$

4.3.1. Échange par conduction

$$P_{\text{cond (en W)}} = \frac{\Delta Q_{(\text{en J})}}{\Delta t_{(\text{en s})}} = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta \theta}{e}$$

Avec : λ : coefficient de conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
 S : surface d'échange en m^2 ;
 $\Delta \theta$: différence de températures ;
 e : épaisseur de paroi en m.

4.3.2. Échange par convection

$$P_{\text{cond (en W)}} = \frac{\Delta Q_{(\text{en J})}}{\Delta t_{(\text{en s})}} = h_c \cdot S \cdot \Delta \theta$$

Avec : h_c : coefficient de convection en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;
 S : surface d'échange en m^2 ;
 $\Delta \theta$: différence de températures en Kelvin.

4.3.3. Échange par rayonnement

$$P_{\text{cond (en W)}} = \frac{\Delta Q_{(\text{en J})}}{\Delta t_{(\text{en s})}} = h_r \cdot S \cdot \left[\left(\frac{\theta_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 \right]$$

Avec : h_r : constante de rayonnement de l'émetteur en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;
 S : surface d'échange en m^2 ;
 θ_s : température du corps émetteur en Kelvin ;
 θ_1 : température du récepteur en Kelvin.

➔ Exercices

Grandeurs électriques

Exercice 3.1

1. Tracer un signal rectangulaire ayant les caractéristiques suivantes :

$$V_{\text{max}} = 10 \text{ V} ; V_{\text{min}} = 4 \text{ V} ; \alpha = 20 \% ; f = 20 \text{ kHz.}$$

2. Calculer la valeur moyenne de ce signal.

Exercice 3.2

Soit un signal sinusoïdal d'équation : $V_1(t) = 2 + 3 \cdot \sin(2000 \cdot \pi \cdot t)$

1. Donner les valeurs des grandeurs V_{moy} , A et f .

2. Quel est le déphasage de $V_{2(t)} = 2 + 3 \cdot \sin\left(2000 \cdot \pi \cdot t - \frac{\pi}{6}\right)$ par rapport au signal d'équation $V_{1(t)}$?

Exercice 3.3

Soit un signal $V_{1(t)}$ ayant les caractéristiques suivantes :

$$V_{\text{moy}} = 5 \text{ V} ; V_{\text{min}} = 2 \text{ V} ; \alpha = 60\% ; f = 1 \text{ kHz.}$$

1. Déterminer la tension maximale V_{max} du signal $V_{1(t)}$.
2. Tracer l'allure du signal $V_{1(t)}$.
3. En concordance de temps avec $V_{1(t)}$, tracer $V_{2(t)}$ ayant les caractéristiques suivantes : $V_{\text{max}} = 3 \text{ V} ; V_{\text{min}} = 0 ; \alpha = 50\% ; f = 1 \text{ kHz}$.

Exercice 3.4 – Panoramique des dômes (Bac SI)



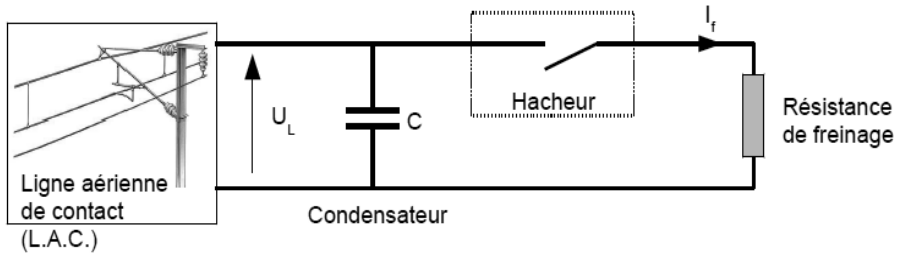
Panoramique des Dômes
(source Wikipédia)

Le site du Puy-de-Dôme a été labellisé « Grand site de France » en 2008. Afin d'assurer le transport des visiteurs, le conseil général du Puy-de-Dôme a décidé de réaliser une voie ferrée pour un train à crémaillère appelé « Panoramique des Dômes ».

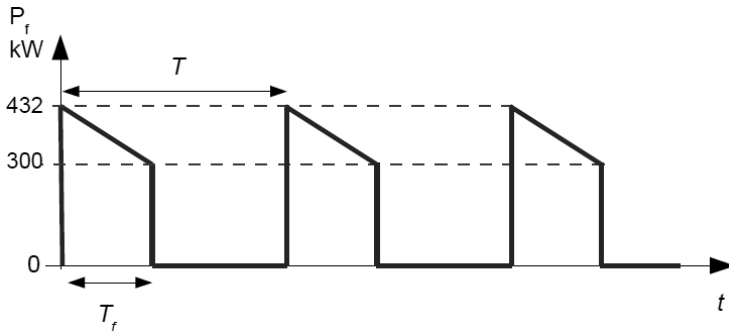
Lors de la descente, lorsque la rame atteint la balise amont avec une vitesse inférieure ou égale à 23 km/h, le freinage électrique est enclenché par le S.A.A. pour ramener la vitesse à 10 km/h.

Le moteur se comporte alors en générateur et ré-injecte l'énergie de freinage sur la ligne aérienne de contact (voir figure ci-dessous). S'il n'y a pas un second train en service pour récupérer cette énergie, celle-ci est stockée dans le condensateur C, situé en amont du convertisseur et provoque une élévation de la tension continue côté L.A.C.

Le rôle du hacheur est d'abaisser cette tension en aiguillant l'énergie récupérée vers une résistance de freinage.



La figure ci-dessous présente l'allure de l'évolution de la puissance instantanée fournie à la résistance électrique lors du freinage.

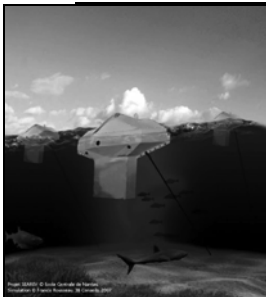


En début de freinage $T_f = 0,575 \cdot T$ et en fin de freinage $T_f = 0,25 \cdot T$.

Déterminer la valeur moyenne de la puissance électrique dissipée par cette résistance en début puis en fin de freinage.

Grandeurs mécaniques

Exercice 3.5 – Ferme houlomotrice (Bac SI)

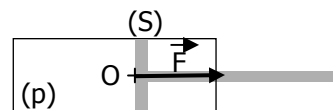


Une ferme houlomotrice sera constituée de plusieurs dizaines de modules SEAREV (Système Électrique Autonome de Récupération de l'Énergie des Vagues) ancrés par 30 à 50 m de fond, donc à 5 ou 10 km des côtes. L'électricité sera transportée à terre par un câble sous-marin.

Le SEAREV grandeur réelle (24 m sur 14 m, 1 000 tonnes dont 400 tonnes pour la roue pendulaire) devrait avoir une puissance électrique installée de 500 kW.

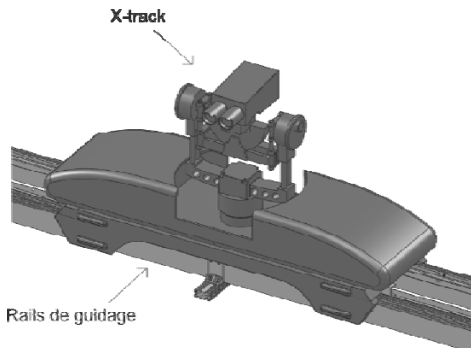
Le système est équipé de vérins hydrauliques dont le diamètre du piston est de 110 mm. Une simulation a mis en évidence une force de 139 000 N sur le piston d'un vérin.

Des mesures ont permis d'évaluer la pression maximale de 15 MPa.



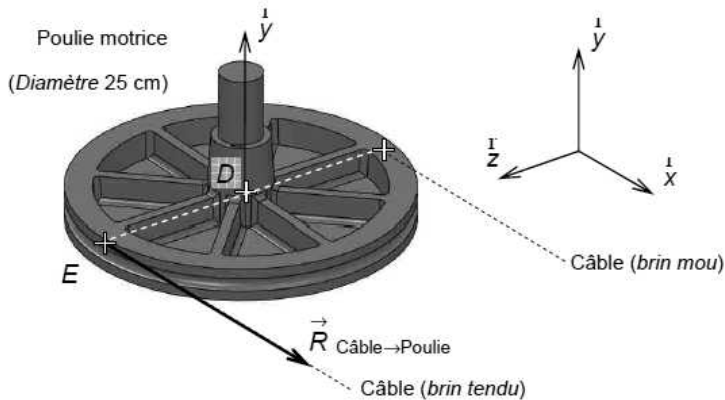
1. Calculer la pression p correspondant à la simulation.
2. Calculer l'écart en pourcentage avec p mesurée.

Exercice 3.6 – X-track (Bac SI)



Pour apporter plus de dynamisme à la retransmission télévisée de l'épreuve d'athlétisme du 100 m, la société XD-motion utilise le système X-track qui est une caméra motorisée sur rails. Cette caméra est positionnée parallèlement à la piste.

Le X-track présente les avantages de réaliser une image de l'ensemble des athlètes avant le départ, de suivre la tête de la course durant l'épreuve et d'obtenir une vue d'ensemble des concurrents de tête sur le final. Ainsi, il donne l'impression au téléspectateur de courir à côté des athlètes.



Un câble tire sur le chariot (sur lequel est placée la caméra) : cela engendre une force du câble sur la poulie $\vec{R}_{\text{câble} \rightarrow \text{poulie}}$ (de norme 360 N).

Calculer la norme, du moment par rapport à D, en N·m, créé par le câble sur la poulie.

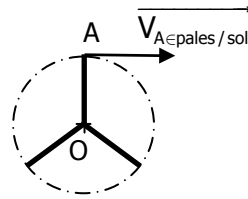
Exercice 3.7

Soit une éolienne à axe vertical FAIRWIND 10 kW. Pour un vent de 10 ms^{-1} , le rotor tourne à $70 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ autour de l'axe O.

Le rayon OA du rotor mesure 4 m.

Calculer la vitesse tangentielle du point A, à l'extrémité d'une pale.

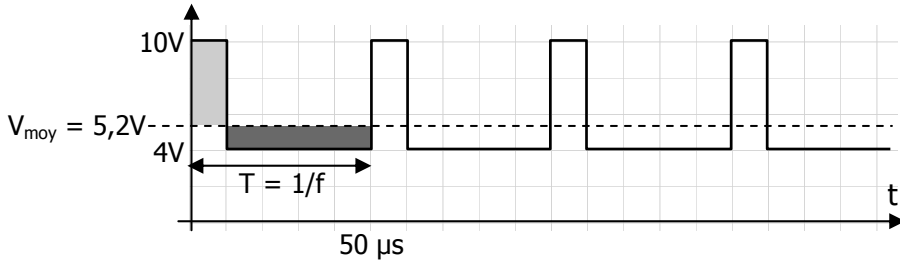
Croquis du rotor en vue de dessus



➔ **Solutions**

Exercice 3.1

1.



2. $V_{\text{moy}} = \alpha \cdot (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) + V_{\text{min}} = 5,2 \text{ V}.$

Exercice 3.2

1. $V_{\text{moy}} = 2 \text{ V} ; A = 3 \text{ V} ; 2\pi ft = 2000 \pi t$ donc $f = 1 \text{ kHz}.$

2. $\varphi_{V_2/V_1} = \frac{\pi}{6} \text{ rad}$

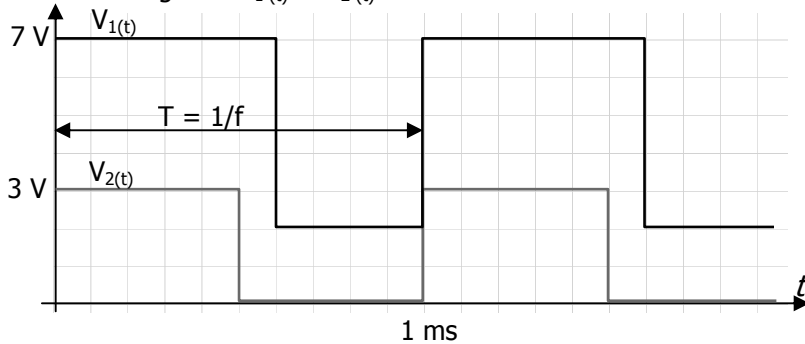
Exercice 3.3

1. Calcul de V_{max}

$$V_{\text{moy}} = \alpha \cdot (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) + V_{\text{min}}, \text{ donc : } V_{\text{max}} = \frac{V_{\text{moy}} - V_{\text{min}}}{\alpha} + V_{\text{min}}$$

Application numérique : $V_{\text{max}} = \frac{5-2}{0,6} + 2 = 7 \text{ V}$

2. et 3. Allure des signaux $V_1(t)$ et $V_2(t)$:



Exercice 3.4 – Panoramique des dômes

Valeur moyenne de la puissance en début de freinage :

$$P_{df} = \frac{432 + 300}{2} \times 0,575 = 210,45 \text{ W}$$

Valeur moyenne de la puissance en fin de freinage :

$$P_{ff} = \frac{432 + 300}{2} \times 0,25 = 91,5 \text{ W}$$

Exercice 3.5 – Ferme houlomotrice

1. D'après la définition de la pression : $p = \frac{F}{S}$ (p en Pa, F en N et S en m^2)

Or la section du piston est égale à : $S = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$

Ainsi la pression est égale à : $p = \frac{F}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}}$

Application numérique : $p = \frac{139000}{\pi \cdot \frac{(110 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 14\,633\,890 \text{ Pa} = 14,6 \text{ MPa}$

2. Écart entre la mesure et la simulation : $e = 15 - 14,63 = 0,37 \text{ MPa}$

Soit en pourcentage $\frac{0,37}{15} = 2,5 \%$

Exercice 3.6 – X-trace

La norme du moment par rapport à D créé par le câble sur la poulie est donnée par la relation :

$$\left\| \overline{M_D(\vec{R}_{\text{cable} \rightarrow \text{poulie}})} \right\| = \left\| \vec{R}_{\text{cable} \rightarrow \text{poulie}} \right\| \cdot ED$$

Application numérique : $\left\| \overline{M_D(\vec{R}_{\text{cable} \rightarrow \text{poulie}})} \right\| = 360 \times 0,125 = 45 \text{ N} \cdot \text{m}$

Exercice 3.7

À partir de la relation entre une vitesse tangentielle et une vitesse angulaire, on a :

$$V_{A \in \text{pales} / \text{sol}} = \omega \cdot R$$

De plus, à partir de la relation entre une vitesse angulaire et une fréquence de rotation, on a : $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$.

soit : $V_{A \in \text{pales} / \text{sol}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot R$

Application numérique : $V_{A \in \text{pales} / \text{sol}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 70}{60} \cdot 4 = 29,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Chapitre 4

Système de numération

1. Bases de numération

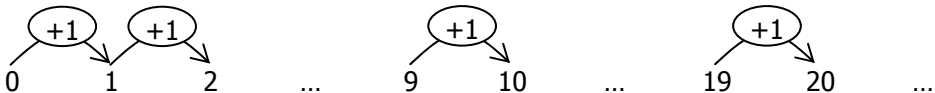
1.1. Décimal

Pour écrire un nombre décimal tel que 2597,54, nous utilisons 10 chiffres de 0 à 9. Ce nombre peut aussi se représenter sous la forme d'une somme de puissance de 10 :

	millier	centaine	dizaine	unité	,	dixième	centième
poids	10^3	10^2	10^1	10^0		10^{-1}	10^{-2}

$$\text{Soit : } 2597,54 = 2 \times 10^3 + 5 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 4 \times 10^{-2}$$

Le comptage consiste à ajouter 1 à chaque opération pour passer d'un nombre au suivant. Lorsque le chiffre des unités arrive à sa valeur maximale (c'est-à-dire 9 en décimal) alors on le repasse à 0 et on incrémente le chiffre des dizaines d'une unité :



On peut utiliser plusieurs notations, en indice, pour identifier un nombre décimal :

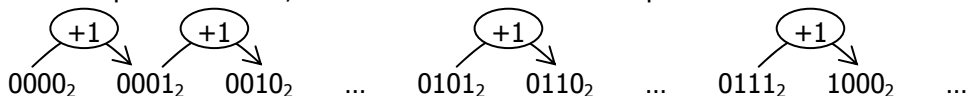
- rien : par exemple 2597,54 ;
- la lettre 'd' : par exemple 2597,54_d ;
- le nombre '10' : par exemple 2597,54₁₀.

1.2. Binaire

Pour écrire un nombre binaire tel que 10101,01, nous utilisons 2 chiffres 0 et 1. Ce nombre peut aussi se représenter sous la forme d'une somme de puissance de 2 :

$$10101,01_2 = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

Pour compter en binaire, on utilise la même méthode qu'en décimal :



On peut utiliser plusieurs notations, en indice, pour identifier un nombre binaire :

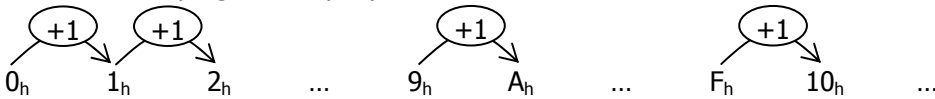
- la lettre 'b' : par exemple 10101,01_b ;
- le nombre '2' : par exemple 10101,01₂.

1.3. Hexadécimal

Pour écrire un nombre hexadécimal tel que 1CB,5A, nous utilisons 16 caractères (10 chiffres de 0 à 9 plus les 6 premières lettres de l'alphabet de A à F). Ce nombre peut aussi se représenter sous la forme d'une somme de puissance de 16 :

$$1CB,5A_h = 1 \times 16^3 + C_{(=12)} \times 16^2 + B_{(=11)} \times 16^1 + 5 \times 16^0 + A_{(=10)} \times 16^{-2}$$

Méthode de comptage identique pour la base 16 :

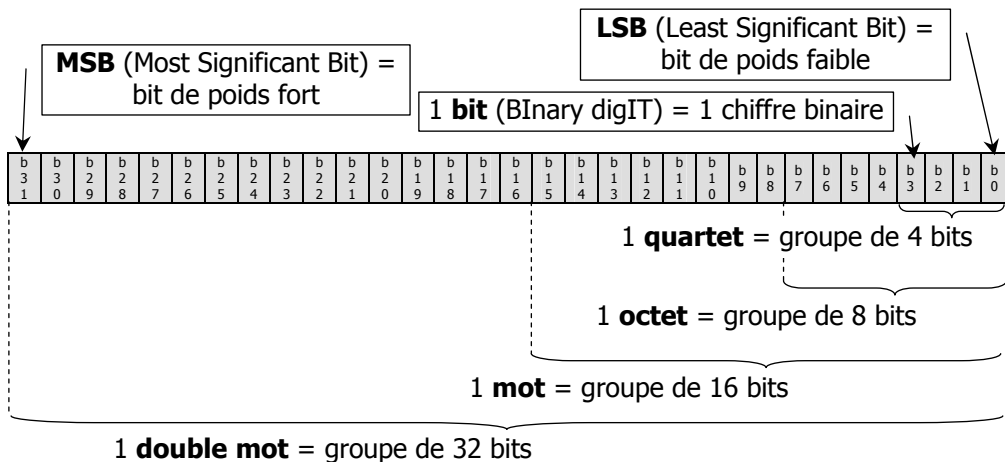


On peut utiliser plusieurs notations pour identifier un nombre binaire :

- la lettre 'h' : par exemple 1CB,5A_h ;
- le nombre '16' : par exemple 1CB,5A₁₆ ;
- précédé du symbole '\$' : par exemple \$1CB,5A ;
- précédé des caractères '0x' : par exemple 0x1CB,5A.

2. Quelques termes utiles en binaire

Soit un nombre binaire codé sur 32 bits (bits 0 à 31) :



N.B. :

- En anglais, il faut faire attention à ne pas confondre le mot « octet » qui se traduit par « byte » et le mot « bit ». Tous deux ont pour abréviation la lettre « b ».
- Le multiple « kilo » correspond à « $\times 1000$ » : or en binaire, la puissance de 2 la plus proche de 1000 est 2^{10} qui est égale à 1024. Ainsi en binaire, il coexiste 2 notations :

Multiples	Système international	Usage en informatique
Kilo	1 ko = 1 000 octets	2^{10} octets = 1024 o = 1 kio
Méga	1 Mo = 1 000 000 octets	2^{20} octets = 1024 kio = 1 Mio
Giga	1 Go = 1 000 000 000 octets	2^{30} octets = 1024 Mio = 1 Gio
Téra	1 To = 1 000 000 000 000 octets	2^{40} octets = 1024 Gio = 1 Gjo

3. Conversion entre bases

Table de correspondance des 16 premiers nombres :

Base																
Déc	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Bin	0000 ₂	0001 ₂	0010 ₂	0011 ₂	0100 ₂	0101 ₂	0110 ₂	0111 ₂	1000 ₂	1001 ₂	1010 ₂	1011 ₂	1100 ₂	1101 ₂	1110 ₂	1111 ₂
Hexa	0 ₁₆	1 ₁₆	2 ₁₆	3 ₁₆	4 ₁₆	5 ₁₆	6 ₁₆	7 ₁₆	8 ₁₆	9 ₁₆	A ₁₆	B ₁₆	C ₁₆	D ₁₆	E ₁₆	F ₁₆

3.1. Conversion vers hexadécimal

3.1.1. Décimal vers hexadécimal

Effectuer des divisions successives du nombre décimal par 16. Puis lire le résultat en prenant les restes des divisions, en partant de la dernière division.

Exemple : soit le nombre 423_d

$$\begin{array}{r|l}
 423 & 16 \\
 \hline
 7 & 26
 \end{array}
 \rightarrow
 \begin{array}{r|l}
 26 & 16 \\
 \hline
 10 & 1
 \end{array}$$

← Sens de lecture

Ainsi : $423_d = 1A7_h$

3.1.2. Binaire vers hexadécimal

Regrouper les chiffres binaires par quartet, en commençant par le LSB, puis traduire chaque quartet en hexadécimal. Lors du regroupement en quartet, s'il manque des chiffres pour le quartet de poids fort, on complète avec des zéros.

Exemple : soit le nombre $1110100110_b = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 11 & 1010 & 0110 \\ \hline \end{array}$

Ainsi : $11\ 1010\ 0110_b = 3A6_h$

3.2. Conversion vers binaire

3.2.1. Décimal vers binaire

Effectuer des divisions successives du nombre décimal par 2. Puis lire le résultat en prenant les restes des divisions, en partant de la dernière division.

Exemple : soit le nombre 26_d

$$\begin{array}{r} 26 \mid 2 \\ \hline 0 \mid 13 \end{array} \rightarrow \begin{array}{r} 13 \mid 2 \\ \hline 1 \mid 6 \end{array} \rightarrow \begin{array}{r} 6 \mid 2 \\ \hline 0 \mid 3 \end{array} \rightarrow \begin{array}{r} 3 \mid 2 \\ \hline 1 \mid 1 \end{array}$$

← Sens de lecture

Ainsi : $26_d = 11010_2$

3.2.2. Hexadécimal vers binaire

Traduire chaque chiffre du nombre hexadécimal sur un quartet.

Exemple : soit le nombre $A2B_h$:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline A & 2 & B \\ \hline \end{array}$$

$$1010_2 \quad 0010_2 \quad 1011_2$$

Ainsi : $A2B_h = 1010\ 0010\ 1011_2$

3.3. Conversion vers décimal

3.3.1. Binaire vers décimal

Exprimer le nombre binaire en puissance de 2 puis effectuer le calcul.

Exemple : soit le nombre 100110_b :

$$\begin{aligned} & 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 \\ & 1 \times 32 + 0 \times 16 + 0 \times 8 + 1 \times 4 + 1 \times 2 + 0 \times 1 \\ & 32 + 4 + 2 \\ & 38 \end{aligned}$$

Ainsi : $100110_b = 38_d$

3.3.2. Hexadécimal vers décimal

Exprimer le nombre hexadécimal en puissance de 16 puis effectuer le calcul.

Exemple : soit le nombre $A2C_h$

$$\begin{aligned} & 10 \times 16^2 + 2 \times 16^1 + 12 \times 16^0 \\ & 10 \times 256 + 2 \times 16 + 12 \times 1 \\ & 2560 + 32 + 12 \\ & 2604 \end{aligned}$$

Ainsi : $A2C_h = 2604_d$

4. Quelques codes particuliers

4.1. Le code BCD (Binary Coded Decimal)

Ce code conserve les avantages du système binaire et du système décimal. Chaque chiffre du système décimal est représenté par un « quartet ».

On compte en base 10 ce qui veut dire que le quartet le plus grand en BCD a pour valeur : $9_{10} = 1001_2$.

Exemple : soit le nombre décimal suivant :

$\begin{array}{ccc} & 3 & 9 & 7_{10} \\ & \swarrow & \downarrow & \searrow \\ & 0011 & 1001 & 0111 \end{array}$

Traduction de chaque chiffre sur un quartet : $0011 \ 1001 \ 0111$
 Ainsi, $397_{10} = 0011 \ 1001 \ 0111_{BCD}$

4.2. Le code de Gray ou code binaire réfléchi

Dans le code binaire (dit naturel), on a vu qu'on passait d'une valeur à une autre en ajoutant 1 unité.

Exemple : $000 \rightarrow 001 \rightarrow 010 \rightarrow 011 \rightarrow 100 \rightarrow 101 \rightarrow 110 \rightarrow 111$

Dans certains cas, 2 bits changent d'état pour 2 valeurs consécutives (ex. : $001 \rightarrow 010...$), dans le code « de Gray », on interdit que deux bits changent entre 2 valeurs consécutives.

Exemple : code de Gray sur 3 bits :

0	0	0
0	0	1
0	1	1
0	1	0
1	1	0
1	1	1
1	0	1
1	0	0

1 seul bit change

→ Exercices

Exercice 4.1 – Bases de numération

À quelles bases peuvent appartenir les nombres suivants ?

	Décimal	Binaire	Hexadécimal
123			
11001			
A			
789			
3B9			

Exercice 4.2 – Conversion entre bases de numération

Convertir les valeurs suivantes dans les différentes bases :

Décimal	Binaire	Hexadécimal
128_{10}		
245_{10}		
	$1010\ 0011\ 1110_2$	
		$A2C_{16}$

Exercice 4.3 – Opérations mathématiques

Exécuter les opérations suivantes :

$$\begin{array}{r}
 1011\ 1101_2 \\
 + 10\ 1111_2 \\
 \hline
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 1111\ 1111_2 \\
 + 1_2 \\
 \hline
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 3D_{16} \\
 + B_{16} \\
 \hline
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 1BF_{16} \\
 + A23_{16} \\
 \hline
 \end{array}$$

Exercice 4.4 – Microcontrôleur ATmega328P (Arduino UNO)

On donne le plan mémoire du microcontrôleur ATmega328P implanté sur une carte Arduino UNO :

32 registres internes	0x0000
	0x001F
registres internes d'entrée / sortie	0x0020
	0x005F
160 registres externes d'entrée / sortie	0x0060
	...
	0x0100
Mémoire vive	...

On donne un extrait de la documentation du microcontrôleur ATmega328P :

Device	Flash	EEPROM	RAM	Interrupt Vector Size
ATmega328P	32KBytes	1KBytes	2KBytes	2 instruction words/vector

1. Sachant que les adresses mémoires du bloc « registres internes » vont de 0x0000 à 0x001F, justifier que cela correspond à 32 octets.
2. Sachant que les adresses mémoires du bloc « registres internes d'entrée / sortie » vont de 0x0020 à 0x005F, donner la taille mémoire du bloc en octets.
3. À partir de l'extrait de la documentation du microcontrôleur ATmega328P, donner la taille de la « mémoire vive » (RAM) en octets.
4. Traduire en hexadécimal la taille de la « mémoire vive » (exprimée en octets).
5. Donner alors l'adresse maximale du bloc « mémoire vive ».
6. Sachant que le bloc « registres externes d'entrée / sortie » comporte 160 octets, donner l'adresse l'adresse maximale de ce bloc.

Exercice 4.5 – Code BCD

1. Donner les valeurs suivantes en BCD :
 - 256 = _____
 - 84 = _____
2. Donner les valeurs suivantes en décimal :
 - 0101 1001 0001_{BCD} = _____
 - 0010 0111_{BCD} = _____

Exercice 4.6 – Code de Gray

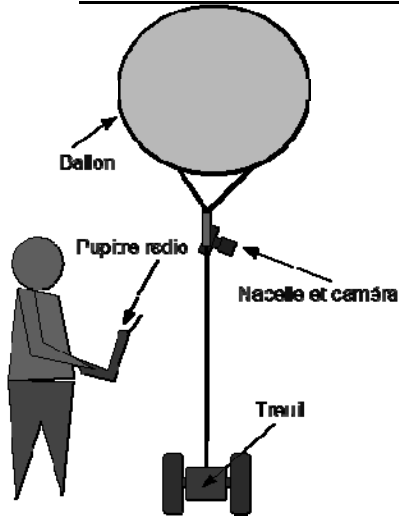
1. Établir le code de Gray sur 4 bits.
2. Établir le code de Gray sur 5 bits.

Exercice 4.7 – Afficheur 7 segments

Pour la réalisation d'un compteur, on utilise un afficheur 7 segments qui permet d'éclairer les chiffres de 0 à 9. Ainsi lors de l'appui sur le bouton BP1, le chiffre s'incrémente d'une unité.

Schéma structurel partiel	Câblage de la carte d'expérimentation																			
	<table border="1"> <tr> <td>Bouton Poussoir</td> <td>BP1</td> <td rowspan="7" style="text-align: center; vertical-align: middle;"><i>connecté à ...</i></td> <td>RA0</td> </tr> <tr> <td rowspan="7" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Afficheur 7 segments</td> <td>Seg a</td> <td>RB0</td> </tr> <tr> <td>Seg b</td> <td>RB1</td> </tr> <tr> <td>Seg c</td> <td>RB2</td> </tr> <tr> <td>Seg d</td> <td>RB3</td> </tr> <tr> <td>Seg e</td> <td>RB4</td> </tr> <tr> <td>Seg f</td> <td>RB5</td> </tr> <tr> <td>Seg g</td> <td>RB6</td> </tr> </table>	Bouton Poussoir	BP1	<i>connecté à ...</i>	RA0	Afficheur 7 segments	Seg a	RB0	Seg b	RB1	Seg c	RB2	Seg d	RB3	Seg e	RB4	Seg f	RB5	Seg g	RB6
Bouton Poussoir	BP1	<i>connecté à ...</i>	RA0																	
Afficheur 7 segments	Seg a		RB0																	
	Seg b		RB1																	
	Seg c		RB2																	
	Seg d		RB3																	
	Seg e		RB4																	
	Seg f		RB5																	
	Seg g	RB6																		
	<p>N.B. : le composant U1 de référence PIC16F84A est un microcontrôleur.</p>																			

Exercice 4.8 – Ballon captif (Bac SI)

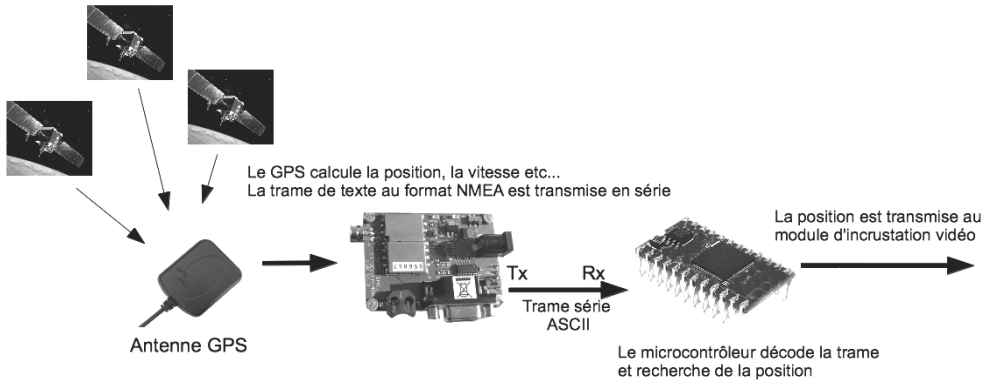


La thermographie par ballon captif (ballon relié au sol par un câble) permet de cibler plus précisément un bâtiment. Elle présente l'avantage de réduire les délais d'intervention, de simplifier les démarches administratives, et elle est sans danger pour les personnes présentes sur la zone d'intervention.

Le ballon, gonflé à l'hélium (gaz porteur plus léger que l'air) transporte une caméra thermique fixée sur une nacelle, l'ensemble est piloté depuis le sol par un système de radiocommande. Les images sont visualisées en temps réel depuis le sol sur un écran de contrôle grâce à un système de transmission vidéo sans fil.

En montagne, il est plus difficile d'identifier précisément les lieux de prises de vues que dans une ville, dans laquelle chaque rue porte un nom et chaque bâtiment un numéro. Un point GPS est donc nécessairement associé à chaque prise de vue.

La chaîne d'acquisition du GPS correspond à :



Pour recevoir la trame série codée en ASCII avec le microcontrôleur, il faut, dans un premier temps, configurer cette liaison. L'instruction OPENCOM permet d'ouvrir et de configurer le port série :

OPENCOM canal, débit, protocole, recvsz, sendszcanal :

- canal : de 0 à 3 suivant type de circuit ;
- débit (en bits/s ou Bauds) ;
- protocole (détaillé dans le tableau ci-dessous) ;
- recvsz : taille du buffer de réception ;
- sendszcanal : taille du buffer d'émission.

Voici un exemple de configuration pour le canal 1 avec un débit de 9600 bits/s, des mots de 8 bits, une parité paire, 2 bits de stop et des buffers de 20 et 50 octets :

OPENCOM 1,9600,23,20,50

Chacun des bits de l'octet protocole a la signification suivante :

- le bit de poids faible bit0 et le bit1 déterminent la taille des données ;
- le bit2 détermine le nombre de bits de stop ;
- le bit3 et le bit4 déterminent la parité.

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
			Parité		Stop Bit	Bit	# of Bits
			0	0 = Aucune	0=1 bit de Stop	0	0 = 5 bits
			0	1 = Reservé	1=2 bit de Stop	0	1 = 6 bits
			1	0 = Pair		1	0 = 7 bits
			1	1 = Impair		1	1 = 8 bits

Les données présentes en sortie du module GPS sont transmises sur le canal 1 du microcontrôleur au format de 8 bits, avec un débit de 4 800 bits/s, un bit de stop et sans contrôle de parité. Le buffer de réception (mémoire tampon) est fixé à 50 octets et celui d'émission à 0.

Déterminer l'ensemble des paramètres à passer à l'instruction OPENCOM.

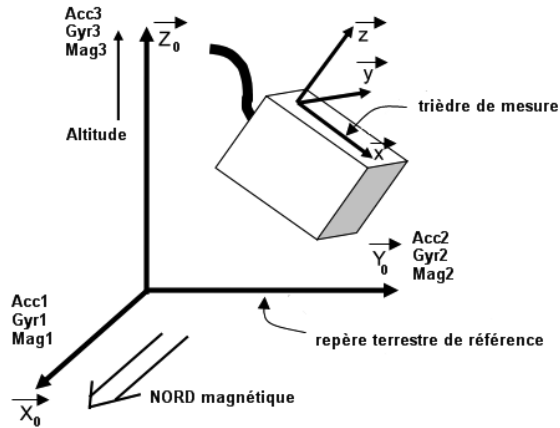
Exercice 4.9 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles (Bac SI)



Les AUV sont des sous-marins autonomes utilisés pour des missions de surveillance sous-marine.

Une trame de données, via un modem acoustique, est transmise tous les 250 mètres au bateau suiveur pour vérification de la position et du bon fonctionnement de la centrale inertielle.

Le contrôle du positionnement de l'engin est réalisé à l'aide d'une centrale inertielle de type XSENS MTx-28 A53 G25 à technologie MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) donnant des informations de position à l'aide de 9 capteurs : 3 accéléromètres (accélération linéaire), 3 gyromètres (vitesse angulaire), 3 magnétomètres (intensité du champ magnétique terrestre)) répartis sur les trois axes d'un trièdre de mesure 3D.



La sortie calibrée de type « matrice de rotation » se fait sous forme d'un tableau comportant 3 paramètres pour l'accélération, 3 paramètres pour la giration et 3 paramètres pour l'intensité du champ magnétique terrestre.

- Structure de la trame

PRE	BID	MID	LEN	DATA	CS
-----	-----	-----	-----	------	----

Champ	Taille (en octets)	Description
PRE	1	Préambule de valeur 0xFA (PREamble)
BID	1	Identificateur de bus de valeur 0xFF (Bus Identifier)
MID	1	Identification du type de message (Message Identifier)
LEN	1	Nombre d'octets des données (LENght of data)
DATA	0-254	Octets de données
CS	1	Vérification du message (CheckSum)

- Format du champ DATA des données de sortie : l'octet TS (Time Stamp) est optionnel, chaque champ est codé sur 4 octets.

Type de sortie	Valeur MID	Nb octets	Format										
Quaternion	0x32	16+(1)	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>q0</td> <td>q1</td> <td>q2</td> <td>q3</td> <td>TS</td> </tr> </table>	q0	q1	q2	q3	TS					
q0	q1	q2	q3	TS									
Euler	0x32	12+(1)	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>roll</td> <td>pitch</td> <td>yaw</td> <td>TS</td> </tr> </table>	roll	pitch	yaw	TS						
roll	pitch	yaw	TS										
Matrice rotation	0x32	36+(1)	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>a</td> <td>b</td> <td>c</td> <td>d</td> <td>e</td> <td>f</td> <td>g</td> <td>h</td> <td>i</td> <td>TS</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">accéléromètre gyromètre magnétomètre</p>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	TS
a	b	c	d	e	f	g	h	i	TS				

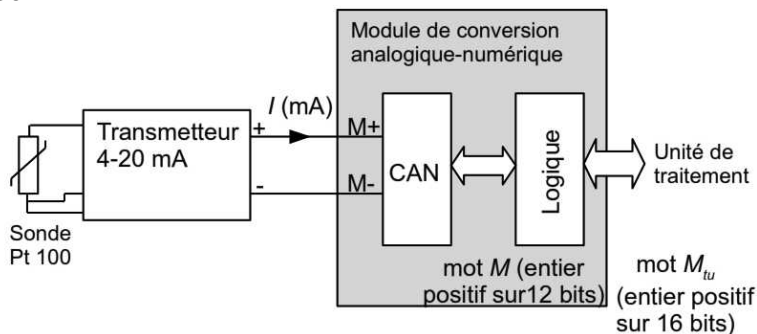
1. Donner les valeurs hexadécimales des champs PRE, BID, MID pour une sortie calibrée de type « matrice de rotation ».
2. Calculer le nombre d'octets du champ DATA correspondant à la transmission des informations des 9 capteurs et de l'octet TS.
3. À partir de la réponse à la question précédente et en considérant l'ajout de l'octet TS, donner, en hexadécimal, la valeur du champ LEN.
4. Calculer alors le nombre d'octets (byte, en anglais) N_{octets} nécessaire à la transmission de ce message.

Exercice 4.10 – Agrandissement d'une piste de ski en intérieur (Bac SI 2018)

Le snowhall est une installation qui permet la pratique des sports de glisse sur neige artificielle, en intérieur et toute l'année. La longueur de la piste était d'environ 400 m. Le bâtiment, de 35 m de large, est réfrigéré à une température inférieure à 0°C afin de maintenir une neige de qualité.



La température dans le bâtiment est contrôlée par des frigorifères qui sont des dispositifs de ventilation et de refroidissement de l'air (figure ci-dessus). Chaque frigorifère est muni d'une sonde de température ambiante Pt100 et d'un dispositif de régulation :



Le résultat de la conversion analogique numérique (CAN codé sur 12 bits) est transmis à l'unité de traitement sous forme d'un mot de 16 bits noté M_{tu} . Ainsi le résultat de la conversion, mot M (codé sur 12 bits) est placé dans les bits de poids fort. Les bits restants sont complétés avec des 0.

M_{tu}															
b15	b14	b13	b12	b11	b10	b9	b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
M												0	0	0	0

Exprimer M_{tu} en fonction de M .

➔ **Solutions**

Exercice 4.1 – Bases de numération

	Décimal	Binaire	Hexadécimal
123	Oui	Non	Oui
11001	Oui	Oui	Oui
A	Non	Non	Oui
789	Oui	Non	Oui
3B9	Non	Non	Oui

Exercice 4.2 – Conversion entre bases de numération

Décimal	Binaire	Hexadécimal
128 ₁₀	1000 0000 ₂	80 ₁₆
245 ₁₀	1111 0101 ₂	F5 ₁₆
2622 ₁₀	1010 0011 1110 ₂	A3E ₁₆
2604 ₁₀	1010 0010 1100 ₂	A2C ₁₆

Exercice 4.3 – Opérations mathématiques

$$\begin{array}{r}
 1011\ 1101_2 \\
 + 10\ 1111_2 \\
 \hline
 1110\ 1100_2
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 1111\ 1111_2 \\
 + 1_2 \\
 \hline
 1\ 0000\ 0000_2
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 3D_{16} \\
 + B_{16} \\
 \hline
 48_{16}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 1BF_{16} \\
 + A23_{16} \\
 \hline
 BE2_{16}
 \end{array}$$

Exercice 4.4 – Microcontrôleur ATmega328P (Arduino)

- 32 octets traduit en hexadécimal correspond à 20₁₆. Ainsi de 0x0000 à 0x001F, il y a bien 32 adresses différentes.
- 5F₁₆ - 20₁₆ = 3F₁₆ auquel il faut ajouter la 1^{re} adresse, cela fait donc un total de 40₁₆ octets.
- 2 kilo-octets = 2 * 2¹⁰ octets = 2048 octets.
- 2048 octets = 800₁₆ octets.
- L'adresse maximale du bloc « mémoire vive » est : 100₁₆ + 800₁₆ - 1 = 8FF₁₆

Mémoire vive	0x0100
	0x08FF

- 160 octets = A0₁₆ octets. L'adresse maximale est alors : 60₁₆ + A0₁₆ - 1 = FF₁₆

160 registres externes d'entrée / sortie	0x0060
	0x00FF

Exercice 4.5 – Code BCD

- Donner les valeurs suivantes en BCD :
 - 256 = 0010 0101 0110_{BCD}
 - 84 = 1000 0100_{BCD}
- Donner les valeurs suivantes en décimal :
 - 0101 1001 0001_{BCD} = 591_d
 - 0010 0111_{BCD} = 27_d

Exercice 4.6 – Code de Gray

Code de Gray sur 4 bits

0	0	0	0
0	0	0	1
0	0	1	1
0	0	1	0
0	1	1	0
0	1	1	1
0	1	0	1
0	1	0	0
1	1	0	0
1	1	0	1
1	1	1	1
1	1	1	0
1	0	1	0
1	0	1	1
1	0	0	1
1	0	0	0

Code de Gray sur 5 bits

0	0	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	0	1	0
0	0	1	1	0
0	0	1	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	0	0
0	1	1	0	0
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
0	1	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	0	1	1
0	1	0	0	1
0	1	0	0	0
1	1	0	0	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	0
1	1	1	1	0
1	1	1	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	0	0
1	0	1	0	0
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	0	1	1	0
1	0	0	1	0
1	0	0	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	0	0

Exercice 4.7 – Afficheur 7 segments

Chiffre éclairé	RB7 (MSB)	RB6	RB5	RB4	RB3	RB2	RB1	RB0 (LSB)	PORTB (en hexadécimal)
	0	0	1	1	1	1	1	1	3F
	0	0	0	0	0	1	1	0	06
	0	1	0	1	1	0	1	1	5B
	0	1	0	0	1	1	1	1	4F
	0	1	1	0	0	1	1	0	66
	0	1	1	0	1	1	0	1	6D
	0	1	1	1	1	1	0	0	7C
	0	0	0	0	0	1	1	1	07
	0	1	1	1	1	1	1	1	7F
	0	1	1	0	0	1	1	1	67

Exercice 4.8 – Ballon captif

Les paramètres à passer à l'instruction OPENCOM sont les suivants :

- 1 pour le canal 1 ;
- 4800 pour le débit en bits/s ;
- 3 (soit 11 en binaire), pour le format de 8 bits avec un bit de stop, sans parité ;
- 50 octets pour le buffer de réception ;
- 0 octets pour le buffer d'émission.

L'instruction complète est donc la suivante : OPENCOM 1,4800,3,50,0

Exercice 4.9 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles

1. $PRE = FA_h$, $BID = FF_h$ et $MID = 32_h$.

2. Pour une sortie calibrée de type « matrice de rotation », le champ DATA comporte :

$$9 \text{ capteurs} * 4 \text{ octets/capteur} + 1 \text{ octet TS} = 37 \text{ octets}$$

3. Le champ LEN correspond à la taille du champ DATA :

$$LEN = 37 = 25_h.$$

4. Nombre d'octets nécessaire à la transmission du message :

$$N_{\text{octets}} = PRE (1 \text{ octet}) + BID (1 \text{ octet}) + MID (1 \text{ octet}) + LEN (1 \text{ octet})$$

$$+ DATA (37 \text{ octets}) + CS (1 \text{ octet})$$

$$N_{\text{octets}} = 42 \text{ octets}$$

Exercice 4.10 – Agrandissement d'une piste de ski en intérieur (Bac SI 2018)

$$M_{tu} = M \times 2^4 = M \times 16$$

Chapitre 5

Mécanique

1. Représentations graphiques d'un système

1.1. Croquis

Un croquis est souvent utile au début d'un projet pour expliciter le calcul d'actions mécaniques, pour déterminer des volumes enveloppes.

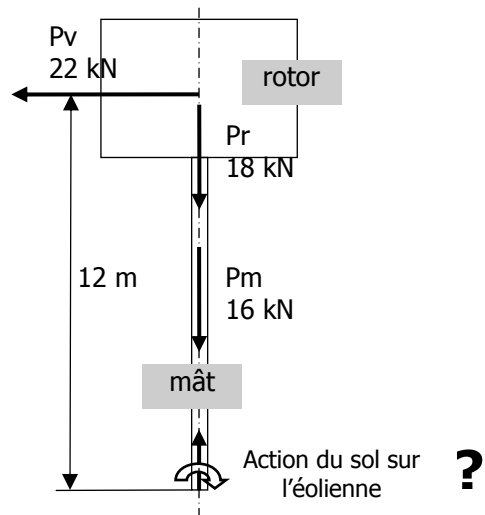
Les axes principaux sont représentés pour permettre un positionnement dans l'espace.

Les pièces ou composants du système sont représentés par des formes simples (non normalisées). Des cotes fixent les dimensions de ces formes et positionnent les actions mécaniques.

Exemple : pour dimensionner la platine au pied d'une éolienne à axe vertical, il faut déterminer l'action (force \uparrow et moment \curvearrowright) du sol sur l'éolienne.

Pour faire les calculs, il faut positionner sur un croquis très simple :

- le poids du rotor P_r ;
- le poids du mât P_m ;
- la poussée du vent P_v ;
- et l'action du sol sur l'éolienne (à calculer).



1.2. Schéma cinématique, graphe de liaisons

Le schéma cinématique d'un mécanisme (représenté dans le plan ou dans l'espace) permet de « visualiser » les mouvements relatifs (ou degrés de liberté)

entre les sous-ensembles qui constituent ce mécanisme. Il permet, avant de définir les détails de chaque pièce, d'appréhender le mécanisme dans son ensemble pour déterminer les caractéristiques cinématiques, calculer les actions mécaniques et dimensionner les liaisons.

Le tracé est simple, constitué de symboles normalisés reliés par des traits. Il est plus facile à décoder s'il respecte sommairement la géométrie de l'ensemble.

Symboles normalisés des liaisons

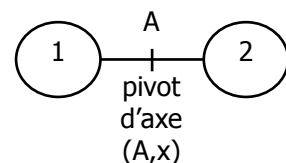
Nom et caractéristiques de la liaison (centre et axe)	Représentation dans l'espace	Représentation dans le plan
complète de centre O		 dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y})
pivot de centre O, d'axe Z		 dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y})
glissière de centre O, d'axe Z		 dans le plan (O, \vec{y}, \vec{z})
ponctuelle de centre O, de normale Y		 dans le plan (O, \vec{y}, \vec{z})

Le graphe des liaisons ne représente pas la géométrie du mécanisme. Chaque pièce est représentée par une bulle (nom ou numéro de la pièce). Un trait relie les pièces qui sont liées. Sur ce trait on indique le nom de la liaison, son centre et ses axes (voir tableau précédent).

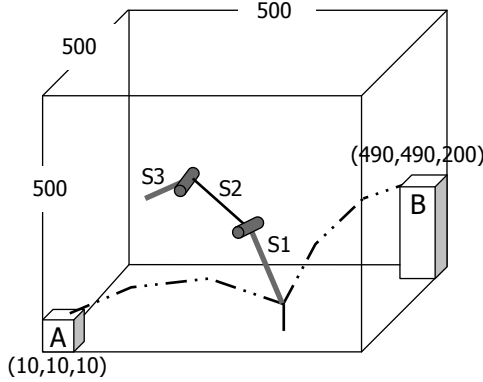
Ce graphe est un outil très utile pour faire l'inventaire des actions mécaniques transmissibles par les liaisons (voir paragraphe 3.4).

Exemple 1

Soit une liaison pivot, de centre A, et d'axe x, entre les pièces (1) et (2) :



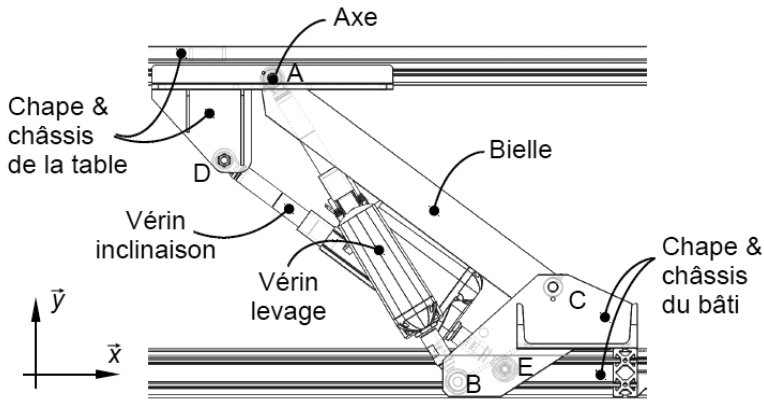
Exemple 2 : Projet de bras articulé



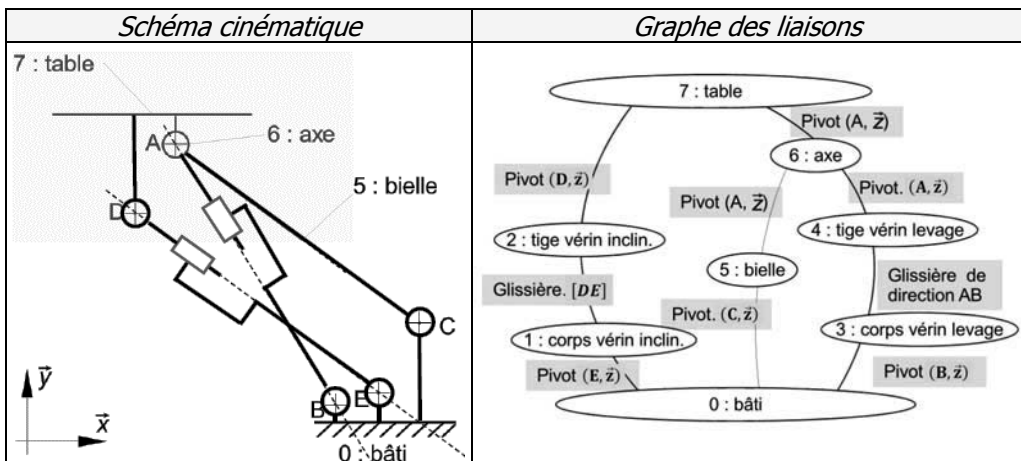
Un projet consiste à concevoir un bras articulé (3 segments S_1 , S_2 , S_3) pour déplacer un objet de 1 kg, d'un point A à un point B (coordonnées connues), en respectant un volume enveloppe (cube $500 \times 500 \times 500$).

Au début de l'étude, on se limitera à ce schéma cinématique qui récapitule les contraintes du cahier des charges. Il servira de base pour construire, avec un logiciel de simulation, un modèle à l'échelle.

Exemple 3 : Système tangible – Airbus-IRT-CNRS (extrait Bac SI 2017)



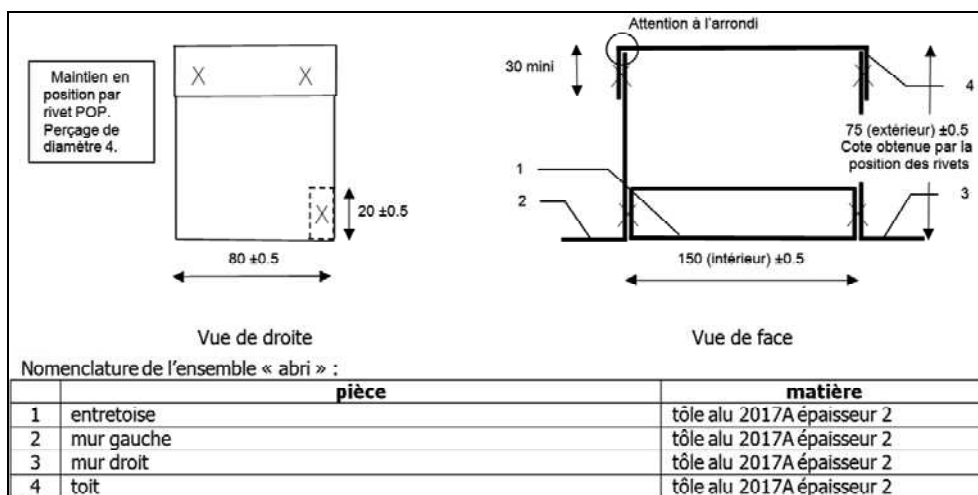
Le vérin articulé en A et en B permet de régler la table 7 en hauteur suivant y .
Le vérin articulé en D et en E permet d'incliner la table 7 autour de l'axe z .



1.3. Schéma technologique

Le schéma technologique est utile pour concevoir un assemblage. Il commence à faire apparaître certains choix technologiques.

Exemple : ce schéma fixe le cahier des charges d'un ensemble en tôle pliée et rivetée. À partir de là, différents concepteurs peuvent proposer les dessins de définition des pièces qui constitueront cet ensemble :



1.4. Représentation volumique (3D), mise en plan (2D)

Les maquettes volumiques (perspectives) et mises en plan (plusieurs vues en projection) sont utilisées pour définir les formes et les dimensions des pièces réelles. Des cotes figurent sur ces dessins.

Elles permettent par exemple de :

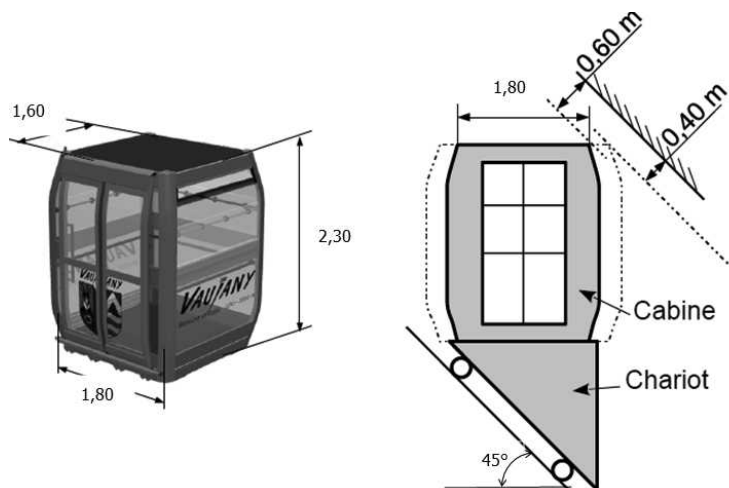
- calculer des volumes, des masses ;
- positionner les actions mécaniques ;
- faire des calculs de résistance des matériaux.

N.B. : dans beaucoup d'exercices les valeurs numériques ne sont pas données explicitement dans l'énoncé. Il faut aller les chercher sur un dessin ou un schéma.

Exemple : Ascenseurs de Vaujauny (extrait Bac SI 2017)

On tolère que la cabine de l'ascenseur passe à 0,40 m du plafond (au lieu de 0,60 m). Vérifier que la longueur L (1,80 m) peut être allongée de 28 cm de chaque côté (pointillés sur le dessin).

Calculer alors la nouvelle surface au sol de la cabine.



De chaque côté, on peut ajouter la longueur :

$$L_s = \frac{0,6 - 0,4}{\sin(45)} = 0,2 \cdot \sqrt{2} = 0,283 \text{ m}$$

D'où la nouvelle longueur de la cabine :

$$L_n = L_n + 2 \cdot L_s = 1,80 + 2 \times 0,283 = 2,37 \text{ m}$$

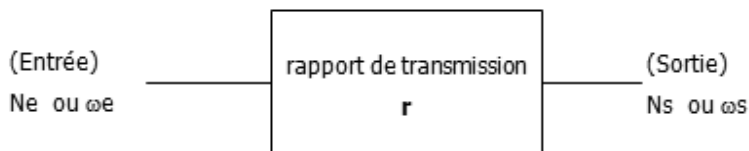
Nouvelle surface au sol : $S_n = 2,37 \times 1,60 = 3,78 \text{ m}^2$

2. Transmission d'un mouvement de rotation

2.1. Définitions

Dans une chaîne d'énergie, la puissance mécanique est fréquemment transmise sous la forme d'un mouvement de rotation.

Un composant de transmission de mouvement de rotation peut se modéliser de la façon suivante :



À l'entrée et à la sortie du système de transmission, le mouvement est caractérisé :

- par la vitesse angulaire ω en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ou par la fréquence de rotation N en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

N.B. : on rappelle la relation entre les 2 grandeurs : $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$

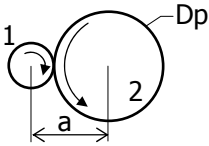
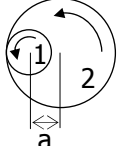
Quelle que soit la technologie utilisée pour transmettre le mouvement de rotation, le rapport de transmission s'écrit :

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_s}{N_e}$$

2.2. Calcul du rapport de transmission en fonction de la technologie

Le rapport de transmission ne dépend que des diamètres des éléments de transmission.

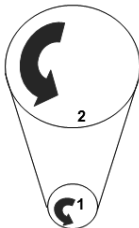
2.2.1. Engrenages

Extérieurs	Intérieurs
 $\frac{\omega_2}{\omega_1} = -1 \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) = -1 \cdot \left(\frac{Dp_1}{Dp_2} \right)$	 $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Dp_1}{Dp_2}$

Diamètre primitif : $Dp = m \cdot Z$ avec : m : module
 Z : nombre de dents de l'engrenage

Dans le cas d'engrenages extérieurs, l'entraxe est égal à : $a = \frac{Dp_1 + Dp_2}{2}$

2.2.2. Poulies-courroie et pignons-chaîne

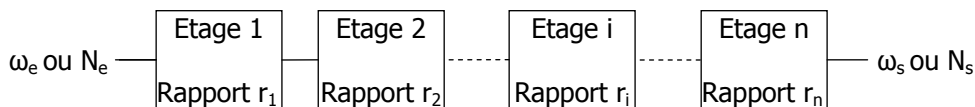


$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Z_1 et Z_2 : nombre de dents dans le cas de poulies crantées et d'une transmission pignons-chaîne.

2.3. Transmission à plusieurs étages

Si le système de transmission est composé de n étages en série, de rapports respectifs $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n$ le rapport global r_g est égal au produit de tous les rapports intermédiaires :



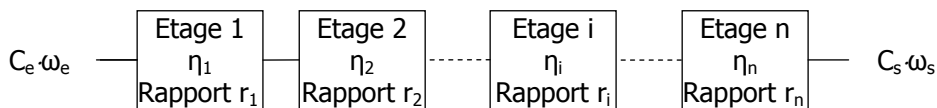
$$r_g = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_s}{N_e} = r_1 \times r_2 \times \dots \times r_i \times \dots \times r_n$$

N.B. : dans le cas d'une transmission par roues dentées (où Z est le nombre de dents des roues menantes ou menées), la formule s'écrit :

$$r_g = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_s}{N_e} = \frac{\text{produit des } Z_{\text{roues menantes}}}{\text{produit des } Z_{\text{roues menées}}}$$

2.4. Rendement d'une transmission

Dans le calcul d'un rapport de vitesses r , il ne faut pas faire intervenir le rendement η . Le rendement affecte la puissance transmise ($C \cdot \omega$), mais n'affecte pas le rapport de transmission.



Par contre, le rendement est pris en compte dans le calcul des couples à transmettre. Le rendement global de la transmission est :

$$\eta_g = \eta_1 \times \eta_2 \times \dots \times \eta_i \times \dots \times \eta_n = \frac{C_s \cdot \omega_s}{C_e \cdot \omega_e} = \frac{C_s}{C_e} \cdot \frac{\omega_s}{\omega_e} \text{ or } r_g = \frac{\omega_s}{\omega_e}$$

$$\text{Soit : } \eta_g = \frac{C_s}{C_e} \cdot r_g \text{ et } C_s = C_e \times \frac{\eta_g}{r_g}$$

3. Actions mécaniques

3.1. Torseur (force-moment)

En mécanique du solide, les degrés de libertés (mouvements possibles) d'un système sont de deux types :

- translations ;
- rotations.

La notion de force ne suffit pas pour expliquer ces mouvements. Il faut utiliser la notion de moment d'une force (paragraphe 2.1.2 du chapitre 3) pour expliquer les rotations.

L'action mécanique « englobe » force et moment.

L'action mécanique d'un système 1 sur un système 2 sera modélisée, au point A, par deux vecteurs :

- un vecteur force résultante $\overrightarrow{A(1 \rightarrow 2)}$, représenté graphiquement \longrightarrow ;
- un vecteur moment résultant $\overrightarrow{M_A(1 \rightarrow 2)}$, représenté graphiquement \Longrightarrow .

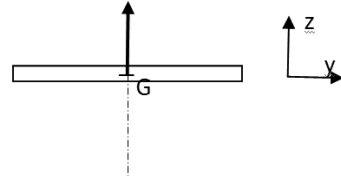
L'ensemble de ces deux vecteurs est appelé « torseur » au point A qui s'écrit dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\left\{ T(1 \rightarrow 2) \right\}_A = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{A(1 \rightarrow 2)} \\ \overrightarrow{M_A(1 \rightarrow 2)} \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} X_A & L_A \\ Y_A & M_A \\ Z_A & N_A \end{Bmatrix}_A$$

Exemple : vous tenez dans votre main (1) une barre métallique (2) dont le poids est P (en daN).

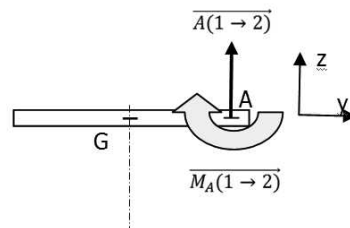
- Situation 1 : votre main (1) est située en G, point milieu de la barre (2). Vous exercez une force vers le haut. L'action, en G, de votre main (1) sur la barre (2) s'écrit :

$$\left\{ T(1 \rightarrow 2) \right\}_G = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ Z_G & 0 \end{Bmatrix}_G$$



- Situation 2 : votre main (1) est située en A, à une extrémité de la barre (2). La sensation n'est pas la même. Vous exercez une force vers le haut mais, en plus, vous devez empêcher (2) de « basculer » (soit une rotation par rapport à l'axe (A,x)). Pour cela vous devez exercer un moment, d'axe x, pour empêcher (2) de tourner autour de cet axe. L'action, en A, de votre main (1) sur la barre (2) s'écrit :

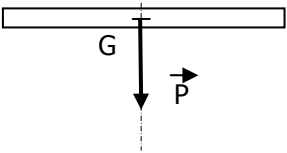
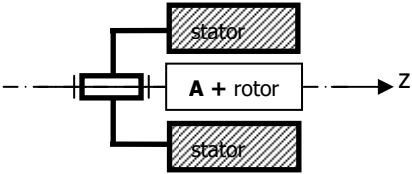
$$\left\{ T(1 \rightarrow 2) \right\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & L_A \\ 0 & 0 \\ Z_A & 0 \end{Bmatrix}_A$$



3.2. Cas particuliers de torseurs

Glisseur (moment résultant nul)	Torseur couple (résultante nulle)
$\{T(1 \rightarrow 2)\} = \underset{A}{\begin{Bmatrix} \overline{A(1 \rightarrow 2)} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}}$	$\{T(1 \rightarrow 2)\} = \underset{A}{\begin{Bmatrix} \vec{0} \\ \overline{M_A(1 \rightarrow 2)} \end{Bmatrix}}$

Exemples : actions à distance fréquemment rencontrées

Le poids d'un système (S)	L'action « magnétique » du stator d'un moteur électrique sur son rotor
 $\{T(T \rightarrow S)\} = \underset{G}{\begin{Bmatrix} \vec{P} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}}$	 $\{T(\text{stator} \rightarrow \text{rotor})\} = \underset{A}{\begin{Bmatrix} \vec{0} \\ \overline{M_A(\text{stator} \rightarrow \text{rotor})} \end{Bmatrix}}$

3.3. Changement du point de réduction (transport d'un torseur)

Quand on change le centre de réduction d'un torseur, la résultante est invariante mais il faut appliquer la relation de transport pour le moment.

N.B. : cette opération est utile lors de l'application du « principe fondamental de la dynamique » (paragraphe 5 de ce chapitre).

Exemple :

- Centre de réduction en A

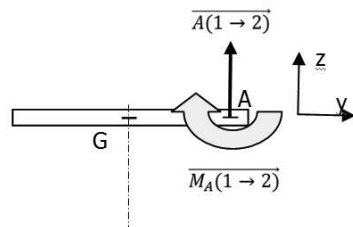
$$\{T(1 \rightarrow 2)\} = \underset{A}{\begin{Bmatrix} \overline{A(1 \rightarrow 2)} \\ \overline{M_A(1 \rightarrow 2)} \end{Bmatrix}}$$

- Centre de réduction en G

$$\{T(1 \rightarrow 2)\} = \underset{G}{\begin{Bmatrix} \overline{A(1 \rightarrow 2)} \\ \overline{M_G(1 \rightarrow 2)} \end{Bmatrix}}$$

Avec : $\overline{M_G(1 \rightarrow 2)} = \overline{M_A(1 \rightarrow 2)} + \overline{GA} \wedge \overline{A(1 \rightarrow 2)}$

(\overline{GA} : vecteur transport)



3.4. Cas du torseur d'action transmissible par une liaison

N.B. : dans ce paragraphe les liaisons sont considérées sans jeu et sans frottement.

Soit une liaison, de centre A, entre les solides (1) et (2). L'action transmissible par cette liaison est modélisée par un torseur de la forme :

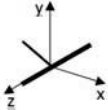
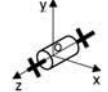
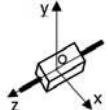
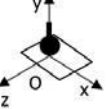


$$\{T(1 \rightarrow 2)\} = \begin{Bmatrix} \overline{A(1 \rightarrow 2)} \\ \underset{A}{M_A(1 \rightarrow 2)} \end{Bmatrix}$$

Les éléments de réduction du torseur, au centre de la liaison, se déduisent, méthodiquement du tableau des degrés de liberté.

Règles :

- à chaque degré de liberté (R_x , R_y , R_z , T_x , T_y , T_z) ou mobilité, correspond un zéro dans le torseur associé ;
- à chaque degré de liberté supprimé (-) correspond une composante dans le torseur associé.

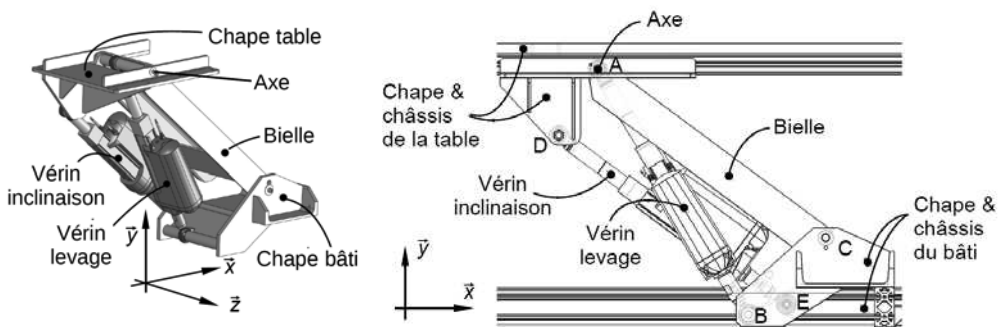
Liaison	Représentation spatiale	Tableau des degrés de liberté	Torseur de l'action transmissible par la liaison						
complète de centre O		<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td></tr> </table>	-	-	-	-	-	-	$\underset{O}{\begin{Bmatrix} X & L \\ Y & M \\ Z & N \end{Bmatrix}}$
-	-								
-	-								
-	-								
pivot de centre O, d'axe Z		<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>-</td><td>Rz</td></tr> </table>	-	-	-	-	-	Rz	$\underset{O}{\begin{Bmatrix} X & L \\ Y & M \\ Z & 0 \end{Bmatrix}}$
-	-								
-	-								
-	Rz								
glissière de centre O, d'axe Z		<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>Tz</td><td>-</td></tr> </table>	-	-	-	-	Tz	-	$\underset{O}{\begin{Bmatrix} X & L \\ Y & M \\ 0 & N \end{Bmatrix}}$
-	-								
-	-								
Tz	-								
ponctuelle de centre O, de normale Y		<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>Tx</td><td>Rx</td></tr> <tr><td>-</td><td>Ry</td></tr> <tr><td>Tz</td><td>Rz</td></tr> </table>	Tx	Rx	-	Ry	Tz	Rz	$\underset{O}{\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}}$
Tx	Rx								
-	Ry								
Tz	Rz								

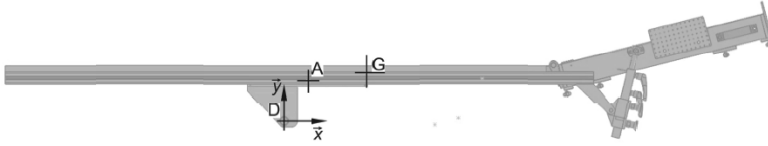
Quand le problème peut se traiter dans le plan, à chaque degré de liberté inexistant dans le plan choisi (*) correspond un zéro dans le torseur associé.

Liaison	Représentation plane	Tableau des degrés de liberté	Torseur de l'action transmissible par la liaison dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y})						
complète de centre O		<table border="1"> <tr><td>-</td><td>*</td></tr> <tr><td>-</td><td>*</td></tr> <tr><td>*</td><td>-</td></tr> </table> <p>dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y})</p>	-	*	-	*	*	-	${}_O \begin{Bmatrix} N & 0 \\ Y & 0 \\ 0 & N \end{Bmatrix}$
-	*								
-	*								
*	-								
pivot de centre O, d'axe Z		<table border="1"> <tr><td>-</td><td>*</td></tr> <tr><td>-</td><td>*</td></tr> <tr><td>*</td><td>Rz</td></tr> </table> <p>dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y})</p>	-	*	-	*	*	Rz	${}_O \begin{Bmatrix} X & 0 \\ Y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$
-	*								
-	*								
*	Rz								
glissière de centre O, d'axe Z		<table border="1"> <tr><td>*</td><td>-</td></tr> <tr><td>-</td><td>*</td></tr> <tr><td>Tz</td><td>*</td></tr> </table> <p>dans le plan (O, \vec{y}, \vec{z})</p>	*	-	-	*	Tz	*	${}_O \begin{Bmatrix} 0 & L \\ Y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$
*	-								
-	*								
Tz	*								
punctuelle de centre O, de normale Y		<table border="1"> <tr><td>*</td><td>Rx</td></tr> <tr><td>-</td><td>*</td></tr> <tr><td>Tz</td><td>*</td></tr> </table> <p>dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y})</p>	*	Rx	-	*	Tz	*	${}_O \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$
*	Rx								
-	*								
Tz	*								

Exemple : Système tangible déployable (extrait Bac SI 2017)

Pour déterminer la force sur la table, à produire par le vérin d'inclinaison, il faut faire l'inventaire des actions mécaniques sur la table en configuration horizontale.



Systeme isolé : la tableHypothèses :

- le mécanisme est assimilé à un mécanisme plan ;
- le vérin d'inclinaison est considéré horizontal.

Inventaire des actions :

- à distance :

$$\text{en } G \{ T(\text{pesanteur} \rightarrow \text{table}) \} = \begin{Bmatrix} \vec{P} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_G = \begin{Bmatrix} -mg\vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_G = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -mg & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_G$$

- de contact :

$$\text{en } D \{ T(\text{vérin inclinaison} \rightarrow \text{table}) \} = \begin{Bmatrix} D_x\vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_D = \begin{Bmatrix} D_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_D$$

$$\text{en } A \{ T(\text{axe} \rightarrow \text{table}) \} = \begin{Bmatrix} A_x\vec{x} + A_y\vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} A_x & 0 \\ A_y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_A$$

3.5. Cas de problèmes avec frottement

Voir les exercices 5.11 (piste de ski) et 5.12 (métro rennais).

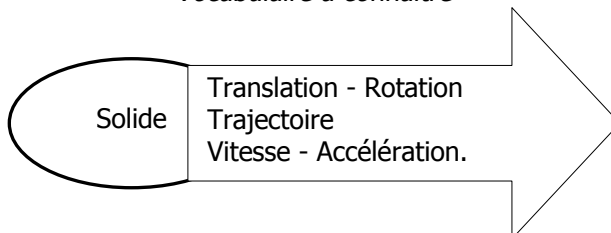
4. Cinématique

La cinématique est l'étude du mouvement d'un solide sans se soucier des causes de ce mouvement.

Tout mouvement est la combinaison de deux mouvements de base :

- translation ;
- et rotation.

Vocabulaire à connaître



4.1. Trajectoire et vitesse

Le vecteur vitesse est toujours tangent à la trajectoire.

- $T(A \in S/S_0)$ est la trajectoire du point A, d'un solide S. C'est l'ensemble des positions de ce point pendant le mouvement du solide S par rapport à un solide de référence S_0 .
- $\overline{V(A \in S/S_0)}$ est la vitesse d'un point A, appartenant à un solide S, par rapport à un solide de référence S_0 .

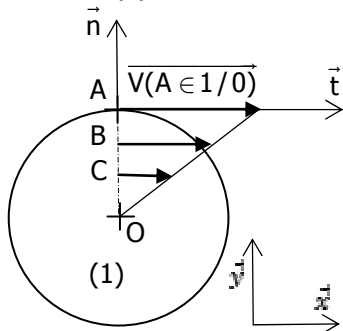
Exemple (extrait Bac SI)

Les figures ci-dessous représentent un robot laveur, en vue de dessus, dans deux cas de figure : translation vers la droite et virage à gauche sans avancer.

<p><u>Cas n°1</u> : Le robot laveur a un mouvement de translation (vers la droite) suivant x_1. Les trajectoires des points J et K sont des droites — . — . — . La direction de la vitesse est confondue avec la trajectoire.</p>	
<p><u>Cas n°2</u> : Le robot laveur a un mouvement de rotation (virage à gauche sans avancer) autour de (H, z_1). Le cercle représente les trajectoires des points J et K. La direction de la vitesse est tangente à la trajectoire.</p>	

4.2. Vitesse et accélération

Un solide (1) tourne autour de O à une vitesse angulaire ω (en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) :



- Vecteur position : \overline{OA}
- Vecteur vitesse : c'est la dérivée, par rapport au temps, du vecteur position (tangent à la trajectoire soit perpendiculaire au rayon OA).
 $\overline{V(A \in 1/0)} = \omega \vec{t}$
- Vecteur accélération : c'est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps.
 $\overline{\Gamma(A \in 1/0)} = \gamma_t \vec{t} + \gamma_n \vec{n}$

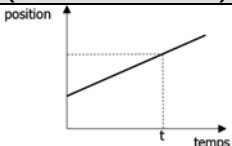
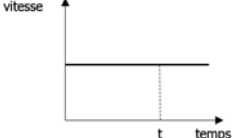
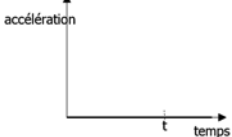
4.3. Équations de mouvement et représentations graphiques

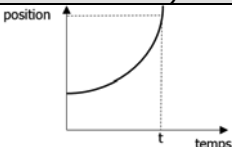
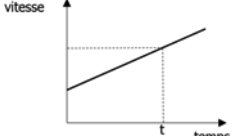
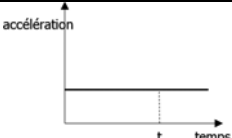
Ce chapitre ne traite que des mouvements de translation rectiligne et de rotation autour d'un axe fixe, uniformes ou uniformément variés.

Les équations ci-dessous permettent de calculer la position, la vitesse ou l'accélération d'un solide en fonction du temps.

Pour passer d'un graphe à l'autre, il faut dériver : la vitesse est égale à la dérivée de la position ; l'accélération est égale à la dérivée de la vitesse.

À un instant t , on peut lire sur les graphes les valeurs de la position, de la vitesse et de l'accélération.

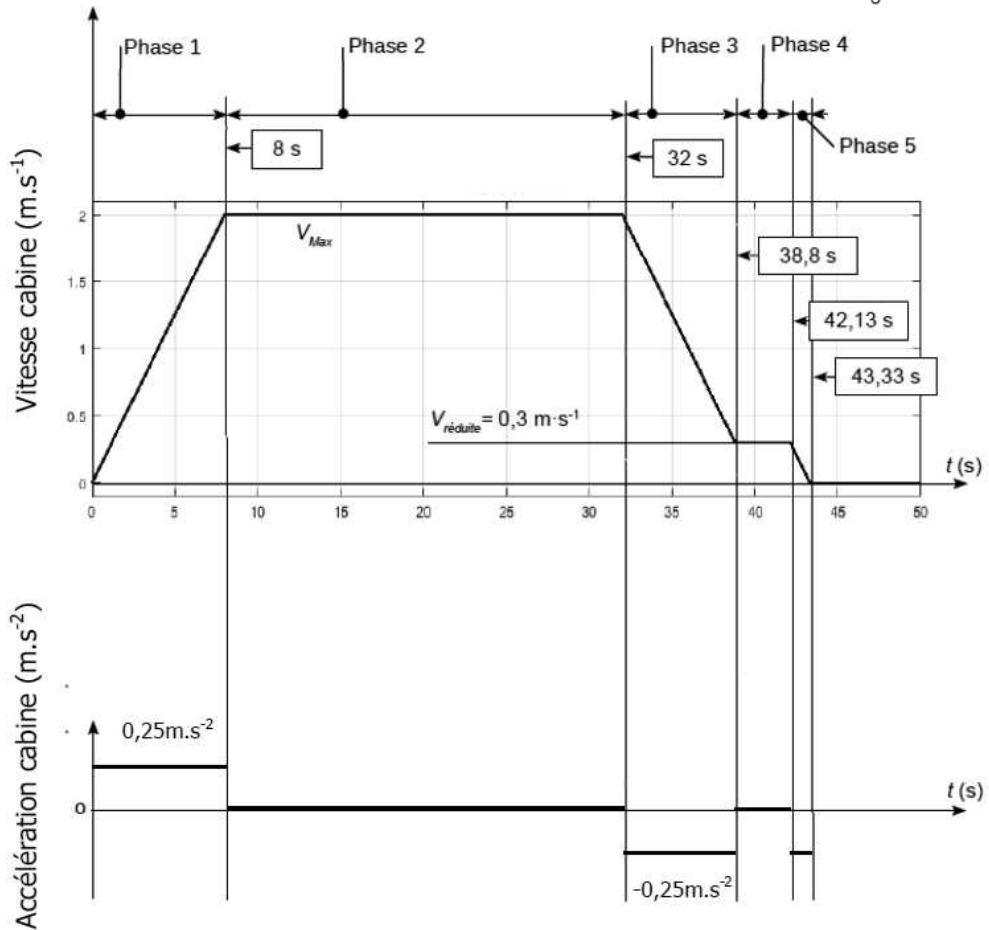
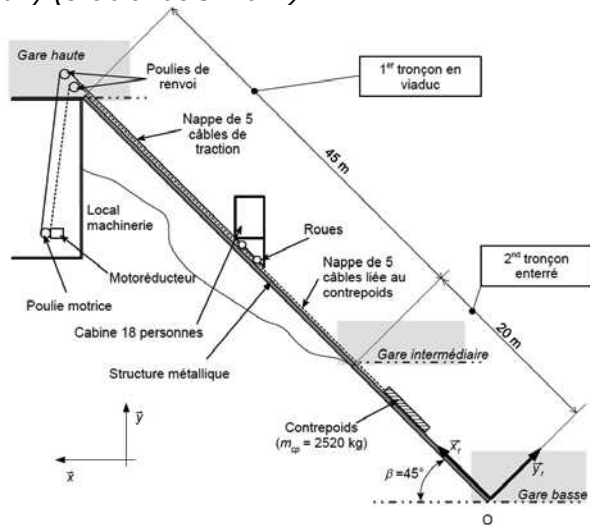
Mouvement uniforme (vitesse constante)	Rotation	Translation
	Position angulaire (en rad) : $\theta_{(t)} = \theta'_0 \cdot t + \theta_0$	Abscisse (en m) : $x_{(t)} = v_0 \cdot t + x_0$
	Vitesse angulaire (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) : $\theta'_{(t)} = \theta'_0 = \text{constante}$	Vitesse (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) : $v_{(t)} = v_0 = \text{constante}$
	Accélération angulaire (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$) : $\theta''_{(t)} = 0$	Accélération (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) : $a_{(t)} = 0$

Mouvement uniformément varié (accélération constante)	Rotation	Translation
	Position angulaire (en rad) : $\theta_{(t)} = \frac{1}{2} \cdot \theta''_0 \cdot t^2 + \theta'_0 \cdot t + \theta_0$	Abscisse (en m) : $x_{(t)} = \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2 + v_0 \cdot t + x_0$
	Vitesse angulaire (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) : $\theta'_{(t)} = \theta''_0 \cdot t + \theta'_0$	Vitesse (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) : $v_{(t)} = a_0 \cdot t + v_0$
	Accélération angulaire (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$) : $\theta''_{(t)} = \theta''_0 = \text{constante}$	Accélération (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) : $a_{(t)} = a_0 = \text{constante}$

Exemple : Ascenseurs de Vaujauny (extrait Bac SI 2017)

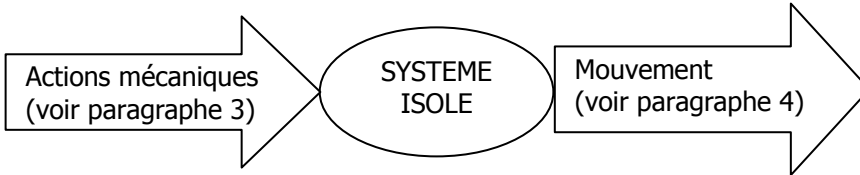
Les chronogrammes suivants décrivent la vitesse et l'accélération de la cabine d'ascenseur par rapport à la rampe :

- Phases 1, 3 et 5 : mouvement de translation rectiligne uniformément varié.
- Phases 2 et 4 : mouvement de translation rectiligne uniforme.



5. Principe fondamental de la dynamique (PFD)

Un système soumis à des actions mécaniques extérieures voit son mouvement conservé ou modifié.



5.1. Isoler un système

La condition obligatoire pour aboutir au bon système d'équations qui permettra de résoudre un problème est d'isoler le bon système. Le système à isoler dépend de la question posée.

Exemple : deux problèmes autour d'une éolienne

Air point	de	Torseur
Gr	terre	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ G_r & Z_{Gr} & 0 \end{pmatrix}$
A	vent	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ Y_A & M_A \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
B	nacelle (par rapport à l'axe de la nacelle)	$\begin{pmatrix} X_B & L_B \\ Y_B & 0 \\ 0 & 0 \\ Z_B & N_B \end{pmatrix}$
C	nacelle (par rapport à l'axe de la nacelle)	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & M_C \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

Cas n°1 : afin de connaître le temps nécessaire pour que le rotor atteigne la fréquence de rotation de 15 tour.min⁻¹, si le vent souffle à 20 km.h⁻¹, il faut prendre en compte les actions qui s'exercent sur le rotor.

Système à isoler : le rotor.

Air point	de	Torseur
G	terre	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ G & Z_G & 0 \end{pmatrix}$
A	vent	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ Y_A & M_A \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
E	Sol	$\begin{pmatrix} X_E & L_E \\ Y_E & M_E \\ 0 & 0 \\ Z_E & N_E \end{pmatrix}$

Cas n°2 : pour dimensionner les fondations, il faut déterminer l'action de l'éolienne sur le sol en fonction de la vitesse du vent.

Système à isoler : l'ensemble de l'éolienne.

5.2. PFD : système en translation

Si un solide (S) est en translation par rapport à un repère R, alors :

- Théorème de la résultante dynamique
- Théorème du moment dynamique.

$$\begin{cases} (1) \sum \overline{R(\text{ext} \rightarrow S)} = m \cdot \overline{\alpha_{G/R}} \\ (2) \sum \overline{M_G(\text{ext} \rightarrow S)} = \vec{0} \end{cases}$$

- Avec :
- $\sum \overline{R(\text{ext} \rightarrow S)}$ (en N) : somme des résultantes des actions extérieures sur S ;
 - $\sum \overline{M_G(\text{ext} \rightarrow S)}$ (en N·m) : somme des moments résultants en G, des actions extérieures sur S ;
 - m (en kg) : masse de S ;
 - $\overline{\alpha_{G/R}}$ (en m·s⁻²) : vecteur accélération de G dans le repère R.

5.3. PFD : système en rotation

Si un solide (S) est en rotation autour de son axe de symétrie (O, \vec{z}), par rapport à un repère R, alors :

$$\begin{cases} \sum \overline{R(\text{ext} \rightarrow S)} = \vec{0} \\ \sum \overline{M_G(\text{ext} \rightarrow S)} = J_{Oz} \cdot \theta'' \cdot \vec{z} \end{cases}$$

- Avec :
- $\sum \overline{R(\text{ext} \rightarrow S)}$ (en N) : somme des résultantes des actions extérieures sur S ;
 - $\sum \overline{M_G(\text{ext} \rightarrow S)}$ (en N·m) : somme des moments résultants en G, des actions extérieures sur S ;
 - J_{Oz} (en kg·m²) : moment d'inertie de S par rapport à l'axe (O, \vec{z}) ;
 - θ'' (en rad·s⁻²) : accélération angulaire de S.

5.4. Cas particulier d'un système au repos (problèmes de STATIQUE)

5.4.1. Problème en 3D : utilisation d'un logiciel

Dans certains cas, le système matériel S soumis à n actions mécaniques extérieures est en équilibre (au repos) sous l'effet de ces actions. Il n'a pas de mouvement (ni translation, ni rotation par rapport à un repère R₀).

L'addition des n actions mécaniques extérieures conduit à deux équations vectorielles :

$$\begin{cases} \text{Théorème de la résultante statique} \sum \overline{R(\text{ext} \rightarrow S)} = \vec{0} \\ \text{Théorème du moment statique} \sum \overline{M_G(\text{ext} \rightarrow S)} = \vec{0} \end{cases}$$

On parle alors du « principe fondamental de la statique » (PFS).

Chacune de ces deux équations vectorielles donne trois équations. On dispose donc de six équations pour déterminer les composantes inconnues des actions mécaniques extérieures exercées sur un système matériel isolé.

Ce type de problème sera résolu à l'aide d'un logiciel.

5.4.2. Problème plan (2D)

Dans le cas d'un problème plan, on peut écrire :

- 2 équations pour les forces ;
- et 1 équation pour le moment.

On obtient donc trois équations au total.

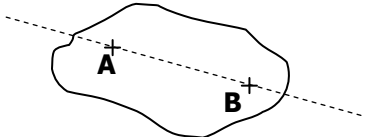
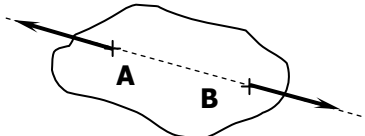
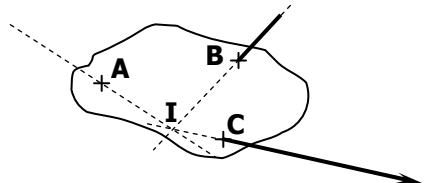

Exemple : dans le plan (O, x, y)

- la somme des composantes des actions mécaniques sur l'axe x est nulle ;
- la somme des composantes des actions mécaniques sur l'axe y est nulle ;
- la somme des moments sur l'axe z , en un point, est nulle.

$$\text{Soit : } \left\{ \begin{array}{l} \sum X(\text{ext} \rightarrow S) = 0 \\ \sum Y(\text{ext} \rightarrow S) = 0 \\ \sum N(\text{ext} \rightarrow S) = 0 \end{array} \right.$$

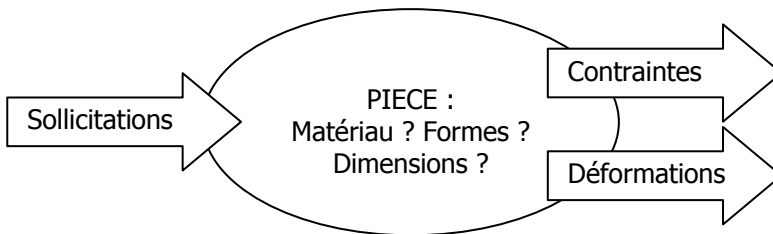
On sera amené à faire ce type de calcul dans le cas où le système sera en équilibre sous l'effet de forces parallèles.

Dans le cas où le solide est soumis à de 2 forces ou 3 forces concourantes coplanaires, une étude graphique peut convenir (problèmes de STATIQUE plane) :

Solide soumis à 2 forces extérieures coplanaires	Solide soumis à 3 forces extérieures coplanaires
<p>❶ identifier les 2 points d'application ; ❷ tracer la direction des 2 forces qui passe par ces 2 points :</p>  <p>❸ les 2 forces sont de sens opposés ; ❹ les normes des 2 forces sont égales ; ❺ si on connaît une norme, on trouve la deuxième norme :</p> 	<p>❶ identifier les 3 points d'application ; ❷ identifier 2 directions de deux forces connues ; ❸ tracer la troisième direction : elle passe par le point d'application et le point d'intersection I des 2 directions connues :</p>  <p>❹ si on connaît une norme, on trouve les normes inconnues grâce au dynamique des résultantes : il est fermé (triangle) :</p> 

6. Résistance des matériaux (RDM)

Dans ce paragraphe, les calculs concernent « l'intérieur d'une pièce ». Il faut d'abord évaluer les sollicitations (actions mécaniques) subies par la pièce pour en déduire les contraintes et les déformations :



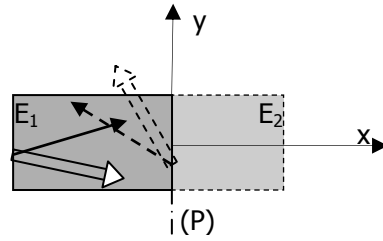
Les caractéristiques du matériau fixent la limite pour les contraintes.
Le cahier des charges fixe la limite pour les déformations.

6.1. Sollicitations, tenseur de cohésion

À partir des actions mécaniques extérieures qui sollicitent la pièce, on calcule le tenseur de cohésion : modèle des actions intérieures à la pièce.

Il faut imaginer la pièce coupée par un plan (P), en deux tronçons, E₁ et E₂.

Au niveau de la coupure, la section de la pièce est S.



On isole le tronçon E₁. Il est en équilibre sous l'effet des actions extérieures et du torseur de cohésion (action du tronçon E₂ sur E₁).

On applique à E₁ le principe fondamental de la dynamique : on trouve le torseur de cohésion :

$$\{T(E_2 \rightarrow E_1)\} = \begin{matrix} N & M_t \\ T_y & M_{fy} \\ T_z & M_{fz} \end{matrix}$$

avec : $\left| \begin{array}{l} N : \text{effort normal} \\ T_y : \text{effort tranchant suivant } y \\ T_z : \text{effort tranchant suivant } z \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} M_t : \text{moment de torsion} \\ M_{fy} : \text{moment fléchissant suivant } y \\ M_{fz} : \text{moment fléchissant suivant } z \end{array} \right.$

Exemple : sollicitations et torseurs de cohésion associés

	<p>Traction (N positif) ou Compression (N négatif)</p>	$\{T(E_2 \rightarrow E_1)\} = \begin{matrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix}$
	<p>Torsion</p>	$\{T(E_2 \rightarrow E_1)\} = \begin{matrix} 0 & M_t \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix}$
	<p>Flexion simple</p>	$\{T(E_2 \rightarrow E_1)\} = \begin{matrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ 0 & M_{fz} \end{matrix}$

6.2. Contraintes, déformations

L'effort de cohésion dans la section S de la coupure entraîne des contraintes et des déformations.

La contrainte est un rapport entre l'effort et la surface sollicitée :

- Contrainte normale : $\sigma = \frac{N}{S}$
 - Contrainte tangentielle : $\tau = \frac{T}{S}$
- Unités :
N et T en (N)
S en (m²)
la contrainte s'exprime en pascal (Pa)

N.B. : si la section S est exprimée en mm², alors la contrainte s'exprime en mégapascal (MPa).

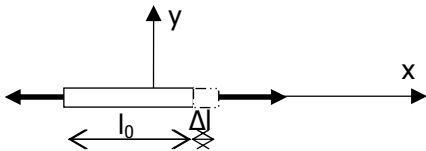
6.3. Traction, compression

Dans le cas d'une pièce soumise à de la traction, chaque section est soumise à une contrainte normale et cette contrainte est constante tout au long de la pièce et dans toute la section.

La déformation est un allongement Δl .

N.B. : idem pour la compression avec une inversion des signes.

6.3.1. Contrainte normale et déformation

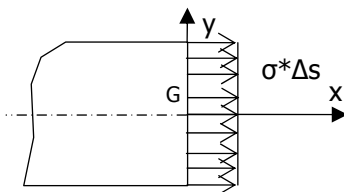


$$\text{Allongement relatif : } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

ε : allongement relatif

Δl : variation de longueur

l_0 : longueur initiale (avant sollicitation)



Contrainte normale : C'est la contrainte σ qui s'exerce sur chaque élément de surface Δs dans une section. Pour l'ensemble de la section S :

$$\sigma = \frac{N}{S}$$

σ : contrainte normale

N : effort normal

S : surface sollicitée

Un essai de traction permet d'établir, dans le domaine élastique des matériaux, une relation appelée loi de Hooke, entre la contrainte subie par l'éprouvette et l'allongement relatif qui en résulte :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

E : module d'Young ou d'élasticité longitudinale (MPa)

Quelques ordres de grandeur pour E :

$$E_{\text{acier}} = 210\,000 \text{ MPa} ; E_{\text{alliage alu}} = 122\,000 \text{ MPa} ; E_{\text{PVC}} = 2\,500 \text{ MPa}$$

6.3.2. Condition de résistance

C'est la condition à vérifier pour que la pièce reste dans le domaine élastique :

$$\sigma_{\text{maxi}} < R_e$$

σ_{maxi} : contrainte normale maxi imposée à la pièce.

R_e : limite élastique du matériau (ou résistance à l'extension) donnée par le fournisseur.

N.B. :

- Dans certains cas il faut majorer σ_{maxi} en utilisant le coefficient de concentration de contraintes K_t (donné par des abaques) si des accidents de forme (perçage, épaulement, filetage...) entraînent des concentrations de contraintes.
- Pour intégrer une sécurité il faut minorer R_e théorique du matériau et calculer une résistance pratique R_{pe} . Le coefficient de sécurité s est lié à l'usage de la pièce. Il est normalisé et peut aller de 1,5 à 15 (en fonction de la connaissance des charges et du domaine d'utilisation).

$$\frac{R_e}{s} = R_{pe} : \text{résistance pratique à l'extension.}$$

La condition de résistance devient alors : $K_t \cdot \sigma_{\text{maxi}} < \frac{R_e}{s}$.

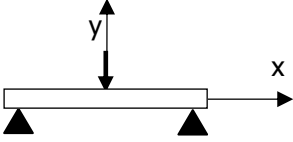
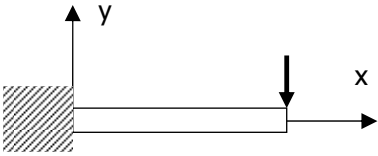
6.3.3. Condition de déformation

Le cahier des charges fixe un Δl ou un ϵ à ne pas dépasser.

6.4. Flexion simple

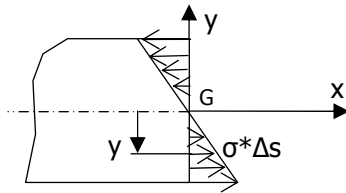
Dans le cas d'une pièce soumise à de la flexion simple, chaque section est soumise à une contrainte normale et à une contrainte tangentielle. Mais dans la plupart des cas que nous aurons à traiter, la contrainte normale est très supérieure à la contrainte tangentielle et on négligera donc la contrainte tangentielle.

Exemple : montages correspondant à une sollicitation de flexion simple

 <p><u>Cas n°1</u> : poutre sur 2 appuis simples avec une charge concentrée au centre.</p>	 <p><u>Cas n°2</u> : poutre encastree à une extrémité avec une charge concentrée à l'autre extrémité</p>
---	--

6.4.1. Contrainte normale

Contrairement au cas de la traction, la contrainte σ sur un élément de surface Δs dans une section varie en fonction de x et en fonction de y :



$$\sigma(y) = -\frac{M_{fz}}{I_{Gz}} \cdot y$$

- $\sigma(y)$: contrainte normale à une ordonnée y dans une section (en MPa) ;
- M_{fz} : moment fléchissant (en N·mm) ;
- I_{Gz} : moment quadratique de la section par rapport à Gz (en mm^4), fonction de la forme de la section.

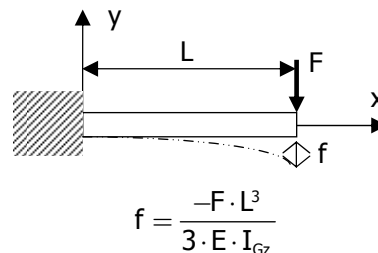
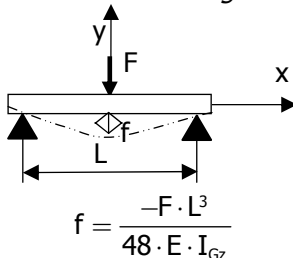
Le tableau suivant donne I_{Gz} et y maxi pour 3 exemples :

	Poutre cylindrique pleine	Poutre cylindrique creuse	Poutre rectangulaire pleine
Section			
I_{Gz}	$\frac{\pi \cdot D^4}{64}$	$\frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{b \cdot h^3}{12}$
y maxi	$\frac{D}{2}$	$\frac{D}{2}$	$\frac{h}{2}$

6.4.2. Déformation

La déformation est appelée flèche f : elle varie avec le montage de la pièce et la répartition des charges.

Exemple : deux cas de figures



6.4.3. Condition de résistance

Elle s'écrit comme dans le cas de la traction-compression, c'est-à-dire :

$$Kt \cdot \sigma_{\text{maxi}} < \frac{R_e}{s}$$

6.4.4. Condition de déformation

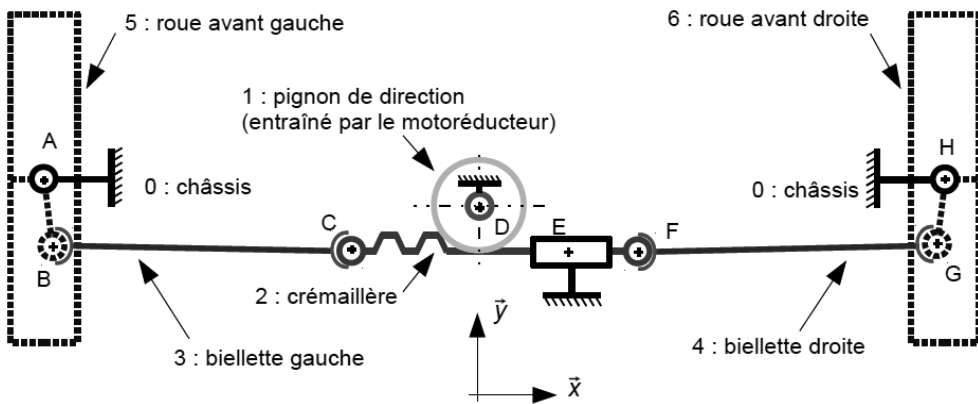
Le cahier des charges fixe une flèche f à ne pas dépasser.

➔ **Exercices**

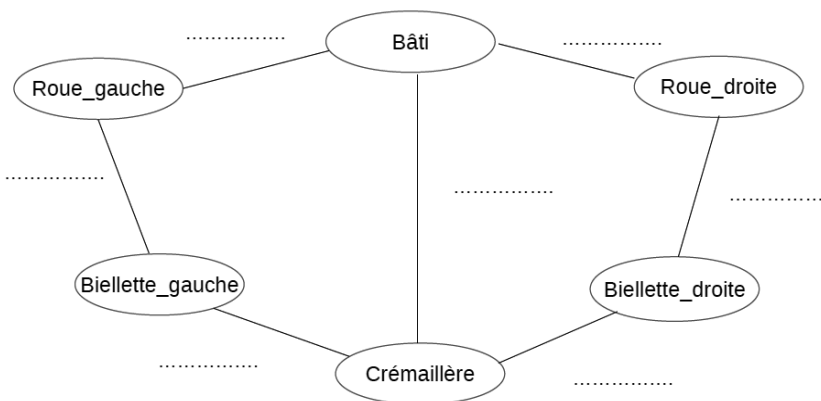
Représentations graphiques d'un système

Exercice 5.1 – Navette autonome NAVYA ARMA (Bac SI 2018)

Le schéma suivant décrit la direction de la navette NAVYA ARMA construite autour d'un mécanisme à crémaillère et biellettes piloté par un motoréducteur.

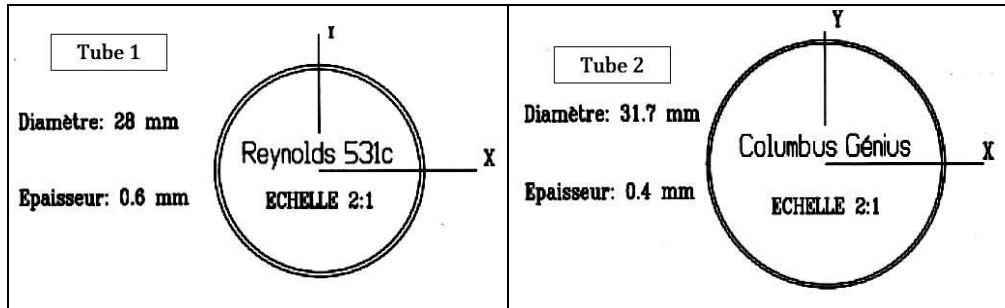


Compléter le graphe des liaisons. Préciser les caractéristiques des liaisons (centres, axes, directions, normales).



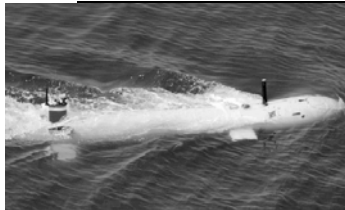
Exercice 5.2 – Moments quadratiques de tubes de cadre de vélo

Les dessins ci-contre représentent la section des tubes 1 et 2, en acier qui serviront à la confection de cadres de vélo :



Calculer le moment quadratique de leur section.

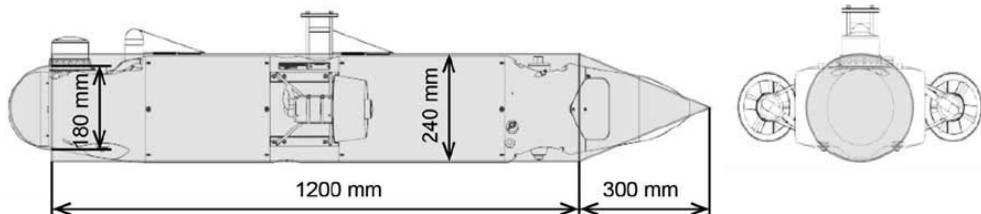
Exercice 5.3 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles (Bac SI)



Les AUV sont des sous-marins autonomes utilisés pour des missions de surveillance sous-marine.

Calculer le volume du sous-marin à l'aide de la mise en plan (en 2 vues). La vue de face est cotée.

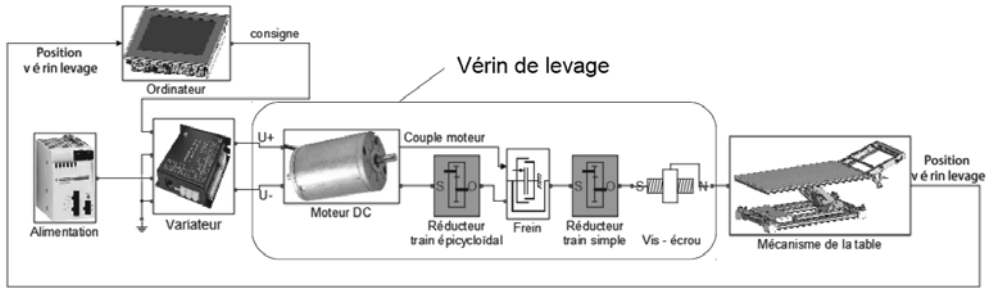
N.B. : on considère que l'AUV est constitué d' $1/2$ sphère, d'un cylindre et d'un cône. Il faudra ajouter le volume des deux propulseurs soit $9\,160\text{ cm}^3$.



Transmission d'un mouvement de rotation

Exercice 5.4 – Système tangible (Bac SI 2017)

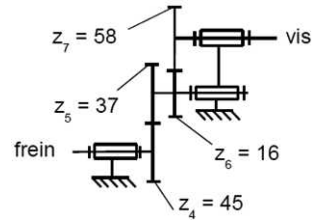
Le modèle multi-physique suivant est élaboré pour simuler le mouvement vertical de la table :



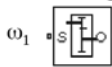
Le schéma ci-contre décrit la transmission (réducteur train simple) entre le frein et le système vis-écrou.

Z_4, Z_5, Z_6, Z_7 : nombre de dents des roues dentées.

La modélisation de cette transmission se présente ainsi :



Paramétrage du réducteur 2 :



$$\omega_1 = \omega_2 \quad \omega_1 = K \cdot \omega_2$$

ω_1 : vitesse d'entrée

ω_2 : vitesse de sortie

K : rapport de transmission (Gear ratio)

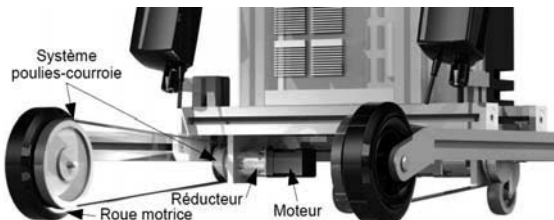
Parameters

Gear ratio:

Déterminer la valeur de K (Gear ratio) à saisir dans le modèle multi-physique.

Exercice 5.5 – Déambulateur Robuwalker (Bac SI 2016)

V_{robot} est la vitesse du déambulateur par rapport au sol. Le dessin suivant décrit la transmission de mouvement du moteur à la roue. La grande poulie est complètement liée à la roue motrice.



$$r = \frac{\omega_{poulie\ roue\ motrice}}{\omega_{moteur}} = \frac{1}{38,59}$$

$$D_{roue} = 150 \text{ mm}$$

$$V_{robot-mini} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

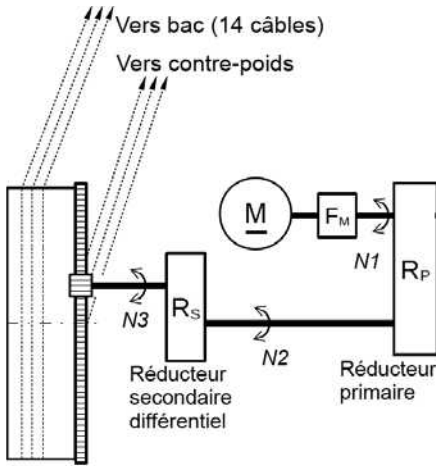
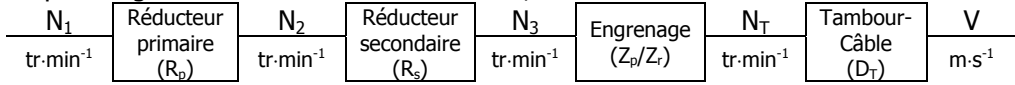
$$V_{robot-Maxi} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Calculer les vitesses de rotation de l'arbre moteur $N_{moteur-mini}$ et $N_{moteur-Maxi}$ ($\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$) correspondant à $V_{robot-mini}$ et $V_{robot-Maxi}$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Exercice 5.6 – Ascenseur de bateaux (Bac SI 2018)

L'ascenseur est entraîné par des câbles qui s'enroulent sur un tambour T. L'arbre du moteur M (équipé d'un frein F_M) tourne à la fréquence N_1 . À la sortie du réducteur secondaire R_S l'arbre tourne à N_3 . Cet arbre est complètement lié à un pignon (Z_p dents) qui entraîne la roue dentée (Z_r dents) complètement liée au tambour T.

À plein régime la vitesse du câble est $V = 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Rapport de réduction du réducteur primaire, $R_p = 0,18$

Rapport de réduction du réducteur secondaire, $R_s = 0,15$

Nombre de dents du pignon, $Z_p = 14$ dents

Nombre de dents de la roue liée au tambour, $Z_r = 182$ dents

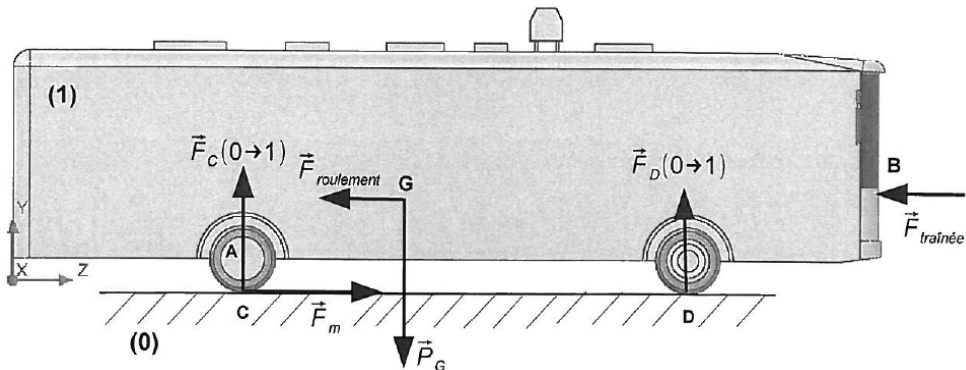
Diamètre d'enroulement des câbles, $D_T = 3,62 \text{ m}$

Calculer la fréquence de rotation du moteur, N_1 en tr.min⁻¹, correspondant à la vitesse maxi du câble.

Actions mécaniques

Exercice 5.7 – Bus Watt (Bac SI 2017)

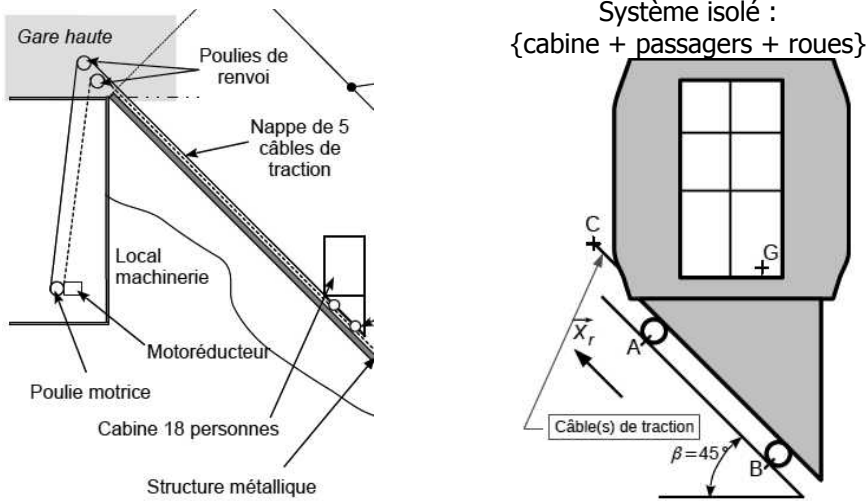
Modélisation des actions mécaniques sur le bus, en phase d'accélération :



En C, action du sol sur la roue arrière et force motrice.
 En G, pesanteur et résistance au roulement.
 En D, action du sol sur la roue avant.
 En B, action de l'air sur le bus (traînée aérodynamique).
 Écrire les actions mécaniques qui s'exercent sur le bus sous la forme de torseurs.

Exercice 5.8 – Ascenseurs de Vaujauny (Bac SI 2017)

La cabine est tractée par des câbles. La résistance au déplacement (frottement, roulement) est négligée devant les autres actions mécaniques mises en jeu. La masse totale maxi est de 4 088 kg.

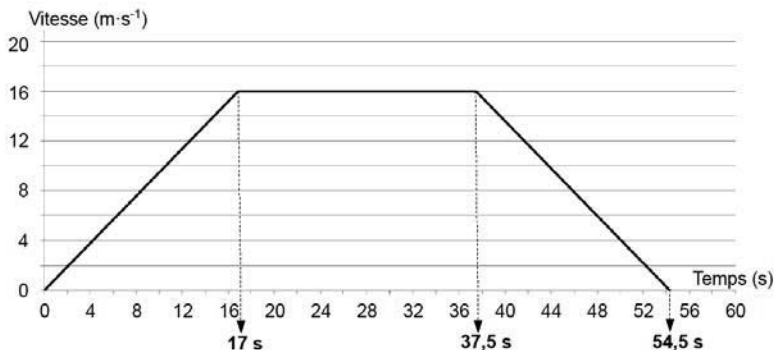


Placer toutes les actions mécaniques qui s'exercent sur le système isolé.

Cinématique

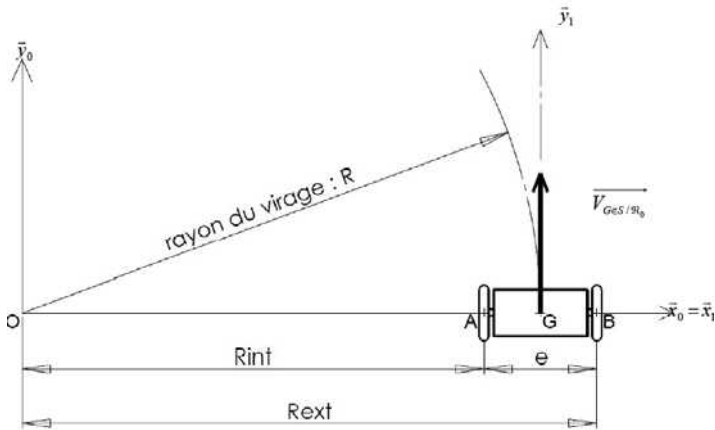
Exercice 5.9 – Métro rennais (Bac SI 2018)

La figure suivante représente la loi de vitesse d'une rame en fonction du temps :



Calculer la distance parcourue par la rame entre les instants 0 s et 54,5 s (temps écoulé entre deux stations).

Exercice 5.10 – Gyropode



- $R_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est un repère fixe lié au sol ;
- $R_1 = (G, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ est un repère lié au véhicule S, avec $\vec{z}_0 = \vec{z}_1$.

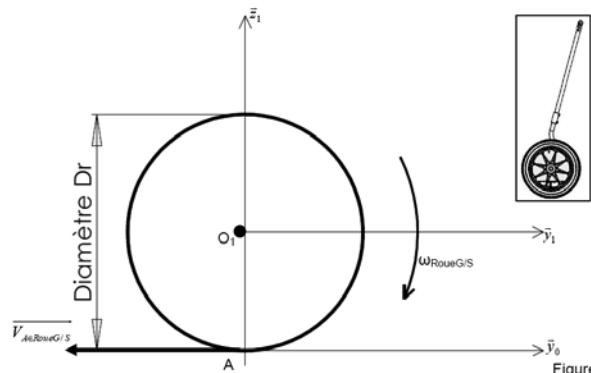
L'étude porte sur la phase où le mouvement de S par rapport à R_0 est un mouvement de rotation d'axe (O, \vec{z}_0) .

La trajectoire de G, centre de gravité de S, dans son mouvement par rapport à R_0 , est un cercle de centre O et de rayon R.

Pour prendre le virage sans déraper (roulement sans glissement en A et B), la roue extérieure et la roue intérieure du véhicule doivent tourner à des vitesses différentes. Pour cela les fréquences de rotation des moteurs Gauche et Droite

doivent répondre à la relation suivante : (1) $\frac{N_{\text{moteur G}}}{N_{\text{moteur D}}} = \frac{2R - e}{2R + e}$

1. Exprimer $\|\vec{V}_{AeS/R_0}\| = V_{AeS/R_0}$ en fonction de $\|\vec{V}_{GeS/R_0}\|$, notée V, de Rint et de R.

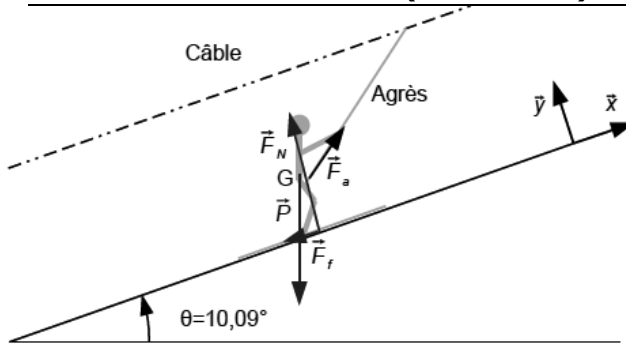


2. Déterminer l'expression littérale de la vitesse angulaire de la roue gauche, $\omega_{\text{roueG/S}}$ en fonction de V, de Dr, de Rint et de R.

Hypothèse de non glissement : $V_{AeS/R_0} = V_{AeRoueG/\text{sol}} = V$.

Principe fondamental de la dynamique

Exercice 5.11 – Piste de ski (Bac SI 2018)

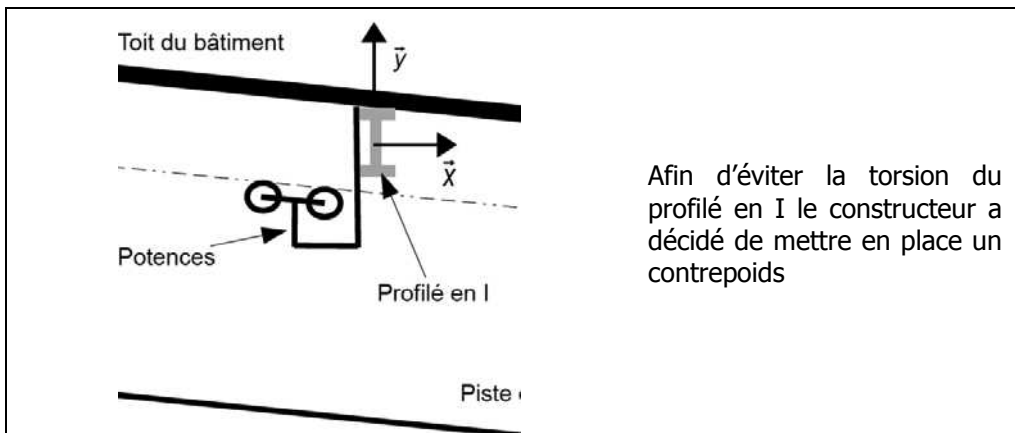


Modélisation des actions mécaniques sur l'ensemble {skieur-skis}
Masse $M : 84 \text{ kg}$

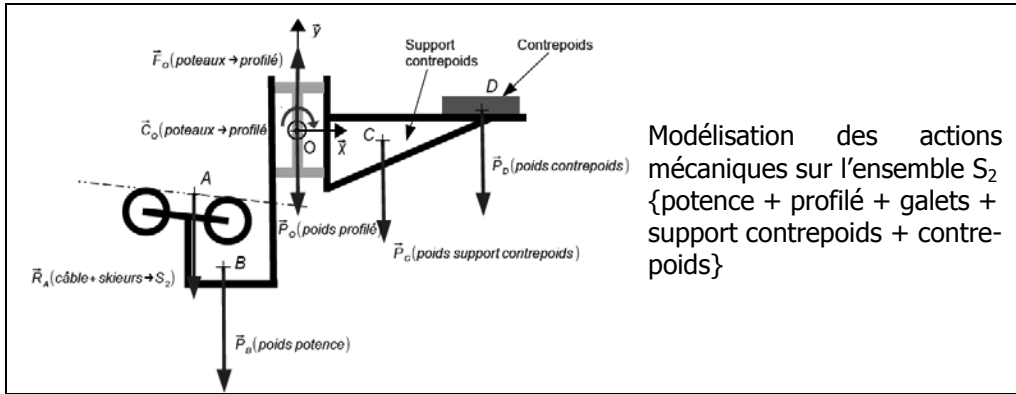
- \vec{P} poids de l'ensemble isolé ;
- \vec{F}_f force de frottement de la piste sur les skis ;
- \vec{F}_N force normale de la piste sur les skis ;
- \vec{F}_a force de l'agrès sur le skieur ; $F_{ax}=184 \text{ N}$ et $F_{ay}=154 \text{ N}$ (mesurées).

Les frottements sont modélisés par la loi de Coulomb : $f_c = \tan \alpha = \frac{F_f}{F_N}$ avec $f_c = 0,06$, le coefficient de frottement ski/neige.

1. À partir de la mesure de F_{ax} , calculer l'intensité de la force de frottement F_f .
2. En déduire l'intensité de la force normale de la piste sur les skis F_N .



Afin d'éviter la torsion du profilé en I le constructeur a décidé de mettre en place un contrepoids



Actions mécaniques qui s'exercent sur S_2 quand la remontée mécanique est à pleine charge :

- En A, action de l'ensemble {câble + skieur}, $R_A = 3\,254\text{ N}$
- En B, poids de la potence, $P_B = 4\,400\text{ N}$
- En C, poids du support de contrepoids, $P_C = 1\,471\text{ N}$
- En D, poids du contrepoids de masse M , P_D
- En O, poids du profilé ramené au point O, P_O
- En O, résultante des efforts exercés par les poteaux sur le profilé ramené au point O, F_O
- En O, couple exercé par les poteaux sur le profilé, C_O .

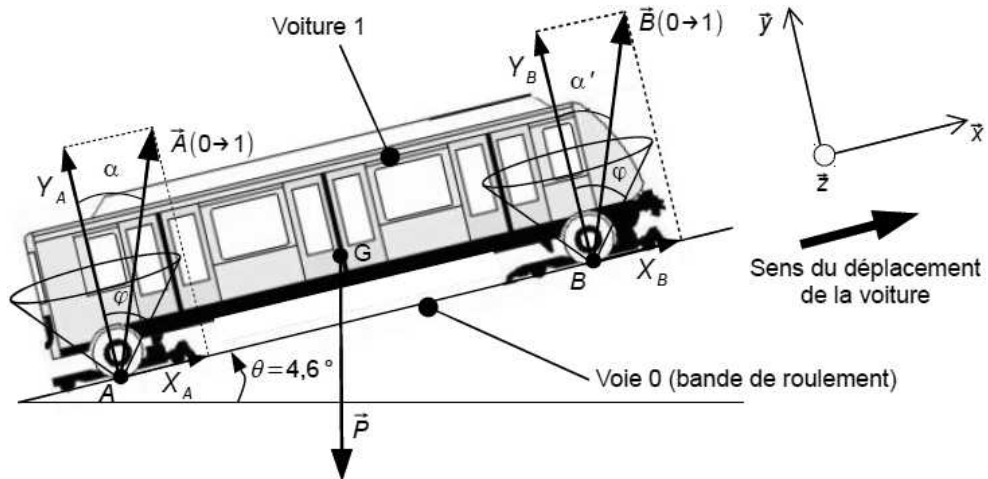
Les coordonnées des points sont (longueurs en mm) :

$$\begin{aligned} \vec{OA} &= -714\vec{x} - 450\vec{y} & \vec{OB} &= -457\vec{x} - 841\vec{y} \\ \vec{OC} &= 595\vec{x} - 146\vec{y} & \vec{OD} &= -1280\vec{x} + 128\vec{y} \end{aligned}$$

3. Appliquer le principe fondamental de la dynamique, en O, à S_2 . Calculer, en ce point, le couple exercé par les poteaux sur le profilé, noté $\vec{C}_0 = C_0\vec{z}$.
4. En déduire la masse M à mettre en place sur le contrepoids afin d'annuler ce couple.

Exercice 5.12 – Métro rennais (Bac SI 2018)

Représentation des actions mécaniques appliquées à la voiture (1) isolée :

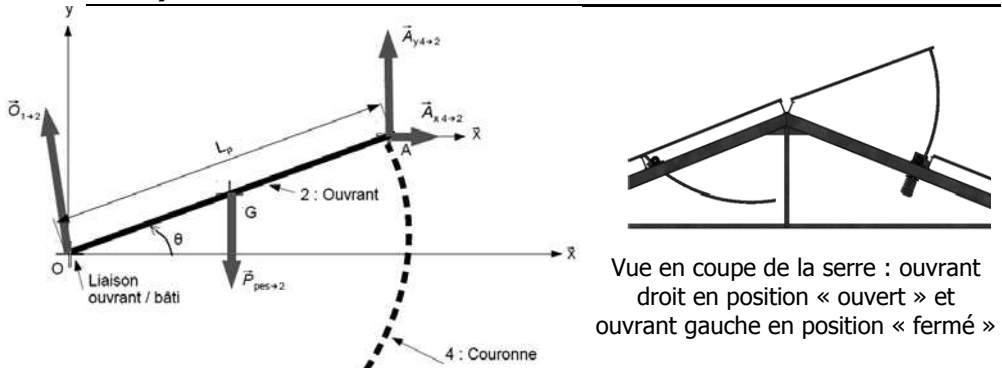


Données et hypothèses :

- masse d'une voiture, $m_V = 14\,000\text{ kg}$;
- masse des passagers, $m_P = 7\,500\text{ kg}$;
- accélération de la rame limitée à $a_G = 1,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- accélération de la pesanteur, $g = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- action de l'air sur la voiture et résistance au roulement négligées.

1. Lors de la phase d'accélération, utiliser le théorème de la résultante dynamique appliquée à la voiture (1), en projection sur \vec{x} , pour établir l'expression de $X_A + X_B$ en fonction de a_G , m_V , m_P , θ et g .
2. Les efforts tangentiels X_A et X_B sont considérés égaux. Calculer X_A .
3. Les efforts normaux aux contacts de la voie ont été déterminés.
 $Y_A = 110\text{ kN}$ et $Y_B = 100\text{ kN}$.
 Le coefficient de frottement entre le rail et les pneus est égal à $f = \tan \varphi = 0,3$.
 Écrire la condition de non glissement des roues aux points A et B. Effectuer l'application numérique et conclure.

Exercice 5.13 – Serre d'élevage de graines de cyclamen (Bac SI 2017)



Vue en coupe de la serre : ouvrant droit en position « ouvert » et ouvrant gauche en position « fermé »

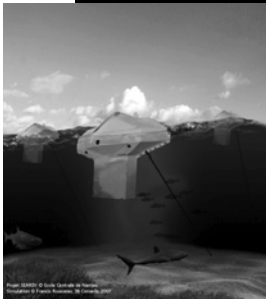
Actions mécaniques appliquées à l'ouvrant (2, isolé) de la serre :

- en O (liaison pivot), action du bâti sur (2) ;
- en G, pesanteur. $OG = \frac{L_p}{2}$
- en A, contact ponctuel entre la couronne (4) et (2).

Le moment d'inertie de l'ouvrant, par rapport à (O, \vec{z}) , est noté J_{Oz} .

Appliquer, à l'ouvrant (2), le théorème du moment dynamique en O et écrire la projection sur \vec{z} pour établir une relation entre $\overline{A_{x4 \rightarrow 2}}$, $\overline{A_{y4 \rightarrow 2}}$ les paramètres géométriques, le moment d'inertie J_{Oz} et P

Exercice 5.14 – Ferme houlomotrice (Bac SI)

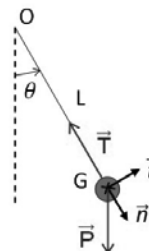
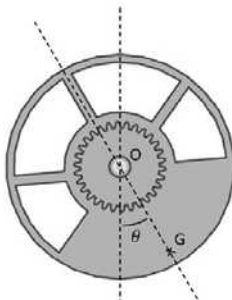


Une ferme houlomotrice sera constituée de plusieurs dizaines de modules SEAREV (Système Électrique Autonome de Récupération de l'Énergie des Vagues) ancrés par 30 à 50 m de fond, donc à 5 ou 10 km des côtes. L'électricité sera transportée à terre par un câble sous-marin.

Le SEAREV grandeur réelle (24 m sur 14 m, 1 000 tonnes dont 400 tonnes pour la roue pendulaire) devrait avoir une puissance électrique installée de 500 kW.

Une roue de masse m oscille autour du point O.

Elle est modélisée sous la forme d'un pendule simple.



Hypothèse : les actions mécaniques de frottement dans l'air sont négligeables devant le poids \vec{P} et la tension du fil \vec{T} .

Rappels : ▪ Le vecteur vitesse $\vec{V}(G, \text{roue} / \text{bati})$ est tel que :

$$\vec{V}(G, \text{roue} / \text{bati}) = v \cdot \vec{t} = L \cdot \omega_{(\text{roue} / \text{bati})} \cdot \vec{t} = L \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \vec{t}$$

▪ Le vecteur accélération $\vec{a}(G, \text{roue} / \text{bati})$ de la bille est tel que :

$$\vec{a}(G, \text{roue} / \text{bati}) = \vec{a}_t + \vec{a}_n$$

avec :

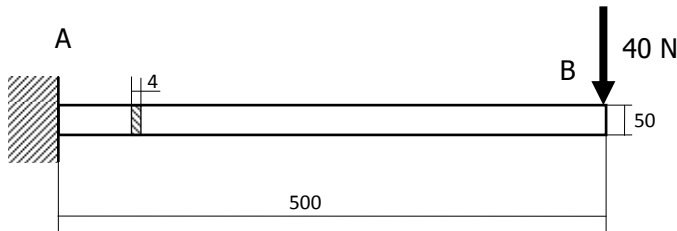
- $\vec{a}_t = a_t \cdot \vec{t} = \frac{dv}{dt} \cdot \vec{t}$ (accélération tangentielle) ;
- $\vec{a}_n = a_n \cdot \vec{n} = \frac{-v^2}{L} \cdot \vec{n}$ (accélération normale).

En appliquant le principe fondamental de la dynamique à la bille de masse m , en projection sur (G, \vec{t}) , déterminer l'équation de mouvement du pendule.

Résistance des matériaux

Exercice 5.15 – Dimensionnement d'une pièce (résistance, déformation)

Sur un véhicule de sport, une pièce en acier est soumise à une sollicitation de flexion. L'analyse de ses liaisons avec les autres pièces permet de modéliser le montage comme sur le schéma suivant :



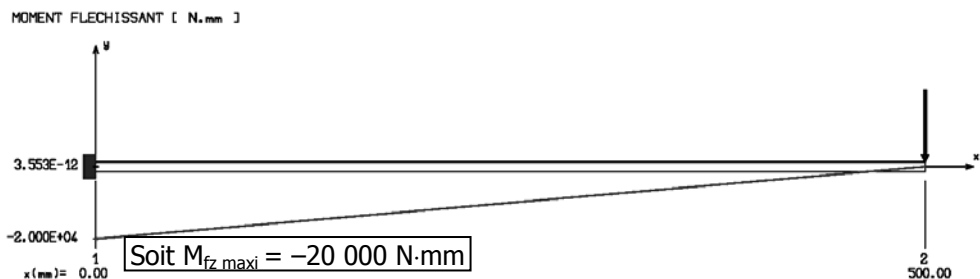
Cahier des charges :

- le poids de cette pièce doit être compris entre 8 et 10 N (à 10 % près) ;
- la flèche au point B ne doit pas dépasser 0,1 mm (à 10 % près).

Données :

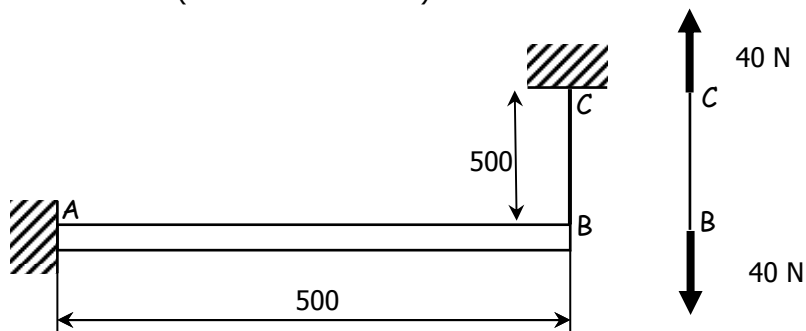
- Section de la poutre : 50 x 4
- Caractéristiques de l'acier : $R_e = 250 \text{ MPa}$; $E = 210\,000 \text{ MPa}$ et masse volumique $\rho = 8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$.

Une simulation avec le logiciel « RdM-le Mans » a donné les résultats suivants :



1. Vérifier que le poids de la pièce testée est compatible avec le cahier des charges.
2. Vérifier que la contrainte σ_{maxi} est compatible avec le cahier des charges (pas de concentration de contraintes, pas de coefficient de sécurité).
3. Calculer la flèche maxi f_{max} à l'extrémité de la poutre. Le cahier des charges est-il validé pour la flèche ?

Pour limiter la flèche, on ajoute un câble BC à l'extrémité de la poutre. Ce câble travaille en traction (voir schéma suivant) :



Le câble BC est réalisé dans le même acier que la poutre.

4. Calculer le diamètre minimum du câble pour respecter la condition de résistance (pas de concentration de contraintes, pas de coefficient de sécurité $s = 1$).
5. On choisit finalement un câble de diamètre 2 mm. Calculer σ dans une section du câble. La condition de résistance est-elle toujours vérifiée pour un coefficient de sécurité $s = 2$?
6. En déduire l'allongement relatif.
7. Calculer la variation de longueur. Est-ce que cet allongement est compatible avec le cahier des charges ?

Exercice 5.16 – Validation d’une bielle

Vous allez valider les dimensions d’une bielle de section rectangulaire (30 x 5) fabriquée en acier S185.

Matériau	Limite élastique R_e	Résistance à la rupture R_r
Acier S185	185 MPa	290 MPa

L’effort normal dans la section est donné en newton dans le torseur de cohésion :



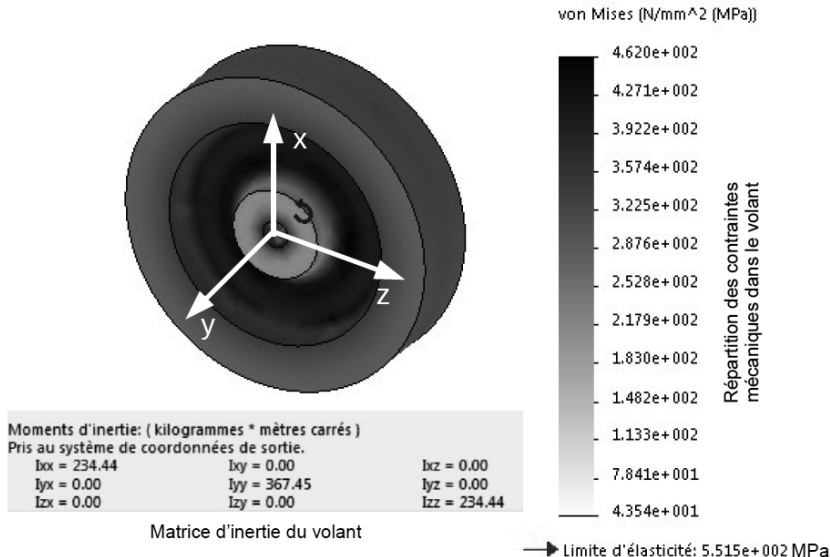
$$\{T(E_2 \rightarrow E_1)\} = \begin{Bmatrix} 1400 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

Les calculs seront faits pour les sections où il n’y a pas de concentration de contraintes (pas d’alésage).

1. Calculer la contrainte dans une section pleine de la bielle.
2. Est-ce que la pièce reste dans le domaine élastique ? Écrire la relation qui le prouve.
3. Quel est le coefficient de sécurité dans cette zone ?

Exercice 5.17 – Métro rennais (Bac SI 2018)

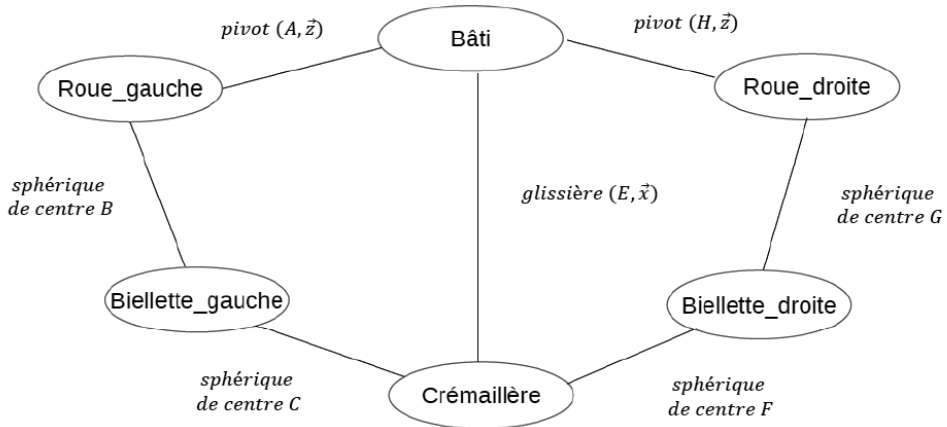
Ce métro est équipé d’un volant d’inertie pour stocker l’énergie de freinage. Le modèle volumique de ce volant d’inertie a permis d’obtenir la contrainte mécanique équivalente de Von Mises lors d’une mise en rotation à la vitesse maximale. Le coefficient de sécurité exigé est $s \geq 2$.



À partir du modèle volumique calculer le coefficient de sécurité et conclure quant à la capacité du volant à supporter la vitesse maxi.

➔ Solutions

Exercice 5.1 – Navette autonome NAVYA ARMA



Exercice 5.2 – Moments quadratiques de tubes de cadre de vélo

Formule littérale du moment quadratique :

$$I_{Gz} = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} \text{ avec } D \text{ diamètre extérieur et } d \text{ diamètre intérieur du tube.}$$

$$d_{\text{int tube}} = D_{\text{ext tube}} - 2 \times \text{épaisseur}$$

$$d_1 = 28 - (2 \times 0,6)$$

$$d_1 = 26,8 \text{ mm} \quad I_{1Gz} = \frac{\pi \cdot (28^4 - 26,8^4)}{64} = 4847 \text{ mm}^4$$

$$d_2 = 31,7 - (2 \times 0,4)$$

$$d_2 = 30,9 \text{ mm} \quad I_{2Gz} = \frac{\pi \cdot (31,7^4 - 30,9^4)}{64} = 4815 \text{ mm}^4$$

$I_{2Gz} \approx I_{1Gz}$: les 2 tubes auront à peu près la même déformation à la flexion, mais le tube 2 est plus léger.

Exercice 5.3 – AUV, Autonomous Underwater Vehicles

$$\text{Volume du cylindre : } V_{\text{cylindre}} = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 12^2 \cdot 120 = 54\,260 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume du cône : } V_{\text{cône}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot 12^2 \cdot 30 = 4\,522 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume de la } \frac{1}{2} \text{ sphère : } V_{\frac{1}{2}\text{sphère}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot 9^3 = 1\,526 \text{ cm}^3$$

$$\text{Soit au total } 54\,260 + 4\,522 + 1\,526 + 9\,160 = 69\,468 \text{ cm}^3$$

Exercice 5.4 – Système tangible

Attention : le rapport K du modèle multi-physique est l'inverse du rapport r du cours.

Z_4, Z_6 sont menantes et Z_5, Z_7 sont menées, donc :

$$K = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_5 \times Z_7}{Z_4 \times Z_6} = \frac{37 \times 58}{45 \times 16} = 2,98$$

Exercice 5.5 – Déambulateur Robuwalker

$$V_{\text{robot}} = \omega_{\text{poulie roue motrice}} \times \frac{D_{\text{roue}}}{2}$$

$$V_{\text{robot}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_{\text{roue}}}{60} \times \frac{D_{\text{roue}}}{2}$$

$$r = \frac{\omega_{\text{poulie roue motrice}}}{\omega_{\text{moteur}}} = \frac{N_{\text{roue}}}{N_{\text{moteur}}}$$

$$\text{donc : } N_{\text{moteur}} = \frac{60 \cdot V_{\text{robot}}}{r \cdot \pi \cdot D_{\text{roue}}}$$

Application numérique :

- avec $V_{\text{robot-mini}} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: $N_{\text{moteur}} = \frac{60 \cdot 0,5 \times 38,59}{\pi \times 0,15} = 2458 \text{ tr/min}$
- avec $V_{\text{robot-Maxi}} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: $N_{\text{moteur}} = 4916 \text{ tr/min}$

Exercice 5.6 – Ascenseur de bateaux

Calcul de la fréquence de rotation du tambour en fonction de la vitesse du câble :

$$V = \omega_T \times \frac{D_T}{2} = \frac{\pi \cdot N_T}{30} \times \frac{D_T}{2} \text{ donc } N_T = \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D_T}$$

Prise en compte de la série de réductions :

$$\frac{N_T}{N_1} = \frac{N_T}{N_3} \times \frac{N_3}{N_2} \times \frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_p}{Z_r} \times R_s \times R_p \text{ donc } N_1 = N_T \times \frac{Z_r}{Z_p} \times \frac{1}{R_s} \times \frac{1}{R_p}$$

$$\text{Soit : } N_1 = \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D_T} \times \frac{Z_r}{Z_p} \times \frac{1}{R_s} \times \frac{1}{R_p}$$

Application numérique :

$$N_1 = \frac{60 \times 0,6}{\pi \times 3,62} \times \frac{182}{14} \times \frac{1}{0,15} \times \frac{1}{0,18} = 1525 \text{ tr} \cdot \text{mn}^{-1}$$

Solution b

La vitesse est la dérivée de la position donc $x(t) = \int v(t) \cdot dt$ (intégrale).

Graphiquement la surface située sous la courbe $v(t)$ représente la distance

$$\text{parcourue : } x = \frac{17 \times 16}{2} + (37,5 - 17) \times 16 + \frac{(54,5 - 37,5) \times 16}{2} = 600 \text{ m.}$$

Exercice 5.10 – Gyropode

1. Expression de $V_{A \in S/R_0}$ en fonction de V , R_{int} et R :

$$\frac{V_{A \in S/R_0}}{OA} = \frac{V_{G \in S/R_0}}{OG} = \frac{V}{OG}$$

avec $OA = R_{\text{int}}$ et $OG = R$ donc : $V_{A \in S/R_0} = V \frac{R_{\text{int}}}{R}$

2. Expression littérale de la vitesse angulaire de la roue gauche, $\omega_{\text{roueG/S}}$ en fonction de V , D_r , R_{int} et R .

Hypothèse de non glissement : $V_{A \in S/R_0} = V_{A \in \text{roueG/sol}} = V$

$$\omega_{\text{roueG/S}} = \frac{V_{A \in S/R_0}}{D_r/2} = \frac{2 \cdot V \cdot R_{\text{int}}}{r \cdot D_r}$$

Complément : On peut démontrer de la même façon : $\omega_{\text{roueD/S}} = \frac{2 \cdot V \cdot R_{\text{ext}}}{R \cdot D_r}$

Comme $R_{\text{int}} = R - e/2$ et $R_{\text{ext}} = R + e/2$:

$$\frac{\omega_{\text{roueG/S}}}{\omega_{\text{roueD/S}}} = \frac{R - e/2}{R + e/2} = \frac{2 \cdot R - e}{2 \cdot R + e}$$

La chaîne de transmission étant la même à gauche et à droite on retrouve la relation (1) donnée dans l'énoncé de l'exercice.

Exercice 5.11 – Piste de ski

1. On applique le principe fondamental de la dynamique au système isolé {skieur+skis} et on écrit le théorème de la résultante en projection sur \vec{x} :

$$-F_f - M \cdot g \cdot \sin \theta + F_{\text{ax}} = 0 \text{ soit } F_f = F_{\text{ax}} - M \cdot g \cdot \sin \theta$$

$$\text{A.N. : } F_f = 184 - 84 \times 9,81 \times \sin(10,09) = 39,6 \text{ N.}$$

2. La loi de Coulomb nous permet d'écrire :

$$\frac{F_f}{F_N} = 0,06 \text{ soit } F_N = \frac{F_f}{0,06} = \frac{39,6}{0,06} = 660 \text{ N}$$

3. Théorème du moment dynamique appliqué, en O, à S_2 :

$$C_0 + 0,714 \times R_A + 0,457 \times P_B - 0,595 \times P_C - 1,28 \times P_D = 0$$

Soit : $C_0 = -0,714 \times R_A - 0,457 \times P_B + 0,595 \times P_C + 1,28 \times M \times g$.

4. Si ce couple s'annule : $-0,714 \times R_A - 0,457 \times P_B + 0,595 \times P_C + 1,28 \times M \times g = 0$

$$\text{Donc : } M = \frac{0,714 \times R_A + 0,457 \times P_B - 0,595 \times P_C}{1,28 \times g}$$

$$\text{A.N. : } M = \frac{0,714 \times 3254 + 0,457 \times 4400 - 0,595 \times 1471}{1,28 \times g} = 275,5 \text{ kg}$$

Exercice 5.12 – Métro rennais

1. Théorème de la résultante dynamique appliquée à la voiture (1) :

$$\vec{A}_{0 \rightarrow 1} + \vec{B}_{0 \rightarrow 1} + \vec{P} = (m_V + m_P) \cdot \vec{a}_G$$

En projection sur \vec{x} : $X_A + X_B - (m_V + m_P) \cdot g \cdot \sin \theta = (m_V + m_P) \cdot a_G$

Soit : $X_A + X_B = (m_V + m_P) \cdot (g \cdot \sin \theta + a_G)$

2. Les efforts tangentiels X_A et X_B sont considérés égaux donc :

$$X_A = X_B = \frac{(m_V + m_P) \cdot (g \cdot \sin \theta + a_G)}{2}$$

$$\text{A.N. : } X_A = X_B = \frac{(14\,000 + 7\,500) \cdot (9,81 \cdot \sin(4,6) + 1,3)}{2} = 22\,433 \text{ N}$$

3. Les angles α et α' doivent être inférieurs à φ (contenus dans les cônes de frottement). Les conditions de non glissement sont donc :

$$\alpha \leq \varphi \text{ et } \alpha' \leq \varphi \quad \text{ou} \quad \tan \alpha \leq \tan \varphi \text{ et } \tan \alpha' \leq \tan \varphi$$

$$\text{Or } \tan \alpha = \frac{X_A}{Y_A} = \frac{22,4}{110} = 0,203 \quad \text{et} \quad \tan \alpha' = \frac{X_B}{Y_B} = \frac{22,4}{100} = 0,224$$

Il y a donc adhérence des roues sur le sol.

Exercice 5.13 – Serre d'élevage de graines de cyclamen

Théorème du moment dynamique, en O, appliqué à l'ouvrant (2) :

$$M_O(\vec{P}) + M_O(\vec{A}_{4 \rightarrow 2}) = M_O(\vec{P}) + M_O(\vec{A}_{x4 \rightarrow 2}) + M_O(\vec{A}_{y4 \rightarrow 2}) = J \cdot \ddot{\theta} \cdot \vec{z}$$

Projection sur \vec{z} :

$$\left[A_{y4 \rightarrow 2} \times (L_p \times \cos \theta) \right] - \left[A_{x4 \rightarrow 2} \times (L_p \times \sin \theta) \right] - \left[P \times \left(\frac{L_p}{2} \times \cos \theta \right) \right] = J \times \ddot{\theta}$$

Exercice 5.14 – Ferme houlomotrice

Le système isolé est : la bille.

Inventaire des actions mécaniques sur le système :

- action de la pesanteur, en G, glisseur \vec{P} ;
- action du fil sur la bille, glisseur \vec{T} .

Théorème de la résultante dynamique : $m \cdot \vec{a}(G, \text{roue} / \text{bâti}) = \vec{P} + \vec{T}$

En projection sur (G, \vec{t}) : $m \cdot a_t = -m \cdot g \cdot \sin \theta + 0$

$$\text{Soit : } m \cdot \frac{dv}{dt} = -m \cdot g \cdot \sin \theta$$

$$\frac{dv}{dt} + m \cdot g \cdot \sin \theta = 0 \quad \text{avec } v = L \cdot \omega = L \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

D'où l'équation du mouvement : $L \frac{d^2\theta}{dt^2} + g \times \sin \theta = 0$

Exercice 5.15 – Dimensionnement d'une pièce (résistance, déformation)

→ Flexion

1. Poids de la pièce :

$$P = \text{masse} \cdot g = \rho \cdot \text{volume} \cdot g = 8000 \cdot (4,50 \cdot 500 \cdot 10^{-9}) \cdot 9,81 = 7,85 \text{ N}$$

On vérifie donc que le poids est compris entre 7,2 et 11 N.

2. Calcul de la contrainte maximale σ_{maxi} : $\sigma_{\text{maxi}} = -\frac{Mfz}{I_{Gz}} \cdot \frac{h}{2}$

$$\text{avec } I_{Gz} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{4 \cdot 50^3}{12} = 41667 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{\text{maxi}} = -\frac{20000}{41667} \cdot \frac{50}{2} = 12 \text{ MPa}$$

On vérifie que cette valeur est très largement inférieure à $Re = 250 \text{ MPa}$

3. Calcul de la flèche maxi f_{maxi} : $f = -\frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_{Gz}}$

$$f = -\frac{40 \cdot 500^3}{3 \cdot 210000 \cdot 41667} = 0,19 \text{ mm}$$

Le cahier des charges n'est pas validé car cette flèche est supérieure au 0,11 mm admis par le cahier des charges.

→ **Traction**

4. Calcul du diamètre minimum du câble pour respecter la condition de résistance :

$$\sigma = \frac{N}{S} \text{ avec } S = \frac{\pi D^2}{4} \text{ donc } D = 2 \sqrt{\frac{N}{\pi \cdot \sigma}}$$

Application numérique : $D = 2 \sqrt{\frac{40}{\pi \cdot 250}} = 0,45 \text{ mm}$

5. Calcul de σ avec un câble de diamètre 2 mm :

$$\sigma = \frac{N}{S} = \frac{N \cdot 4}{\pi \cdot D^2} = \frac{40 \cdot 4}{\pi \cdot 2^2} = 12,8 \text{ MPa}$$

Calcul du coefficient de sécurité : $s = \frac{250}{12,8} = 19,5$

On vérifie que le coefficient de sécurité est nettement supérieur à $s = 2$ imposé par le cahier des charges.

6. Calcul de l'allongement relatif : $\sigma = E \cdot \varepsilon$ donc $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

Application numérique : $\varepsilon = \frac{12,8}{210000} = 6,1 \cdot 10^{-5}$

7. Calcul de la variation de longueur :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ donc } \Delta l = l_0 \cdot \varepsilon = 500 \cdot 6,1 \cdot 10^{-5} = 0,03 \text{ mm}$$

On vérifie alors que l'allongement est inférieur à 0,11 mm admis par le cahier des charges.

Exercice 5.16 – Validation d'une bielle

1. Calcul de la contrainte : $\sigma = \frac{N}{S}$ avec $S = \text{largeur} \cdot \text{hauteur}$

Application numérique : $\sigma = \frac{1400}{30 \cdot 5} = 9,3 \text{ MPa}$

2. Cette contrainte est nettement inférieure à R_e : $9,3 \text{ MPa} < R_e (= 185 \text{ MPa})$.
La pièce reste dans le domaine élastique.

3. Coefficient de sécurité : $s = \frac{185}{9,4} = 19,6$

Exercice 5.17 – Métro rennais (Bac SI 2018)

Relevé sur le modèle volumique : $\sigma_{\max i} = 462 \text{ MPa}$ et $R_e = 515,5 \text{ MPa}$

$$\text{Coefficient de sécurité : } s = \frac{R_e}{\sigma_{\max i}} = \frac{551,5}{452} = 1,2 .$$

Le niveau de sécurité exigé par le cahier des charges n'est pas atteint.

Électronique

1. Fonctions logiques

1.1. Table de vérité, équation logique et chronogramme

1.1.1. Variables binaires

Une variable « binaire » ou « logique » ou « booléenne » est une variable qui ne peut prendre que 2 états différents :

- niveau logique 0 (NL0) ou 'L' (*Low*, en anglais = bas)
- niveau logique 1 (NL1) ou 'H' (*High*, en anglais = haut)

Exemple : un interrupteur peut être assimilé à une variable binaire, car il n'a que 2 états possibles : on pourra par exemple associer le niveau logique 0 à la position 'ouvert' et le niveau logique 1 à la position 'fermé'.

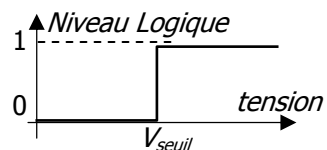
1.1.2. Tensions et niveaux logiques

Le niveau logique 0 correspond à une tension inférieure à un seuil (défini par le constructeur du composant).

Le niveau logique 1 correspond à une tension supérieure à un seuil.

Exemple : pour un circuit logique de la famille 'CMOS 4000', la tension de seuil est égale à tension alimentation

2

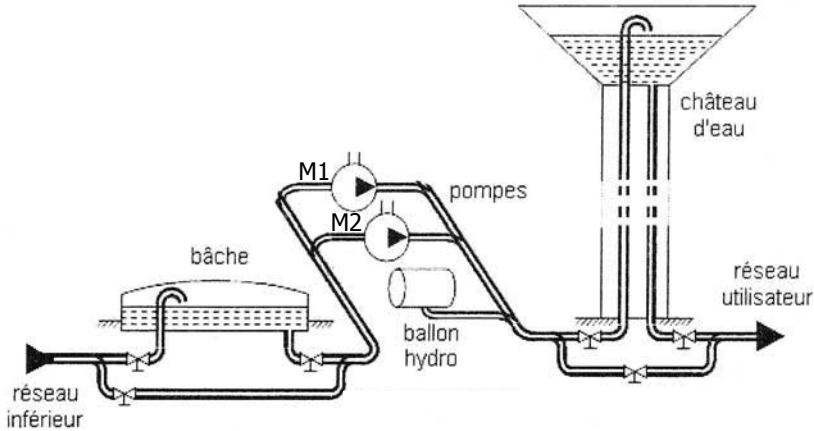


1.1.3. Table de vérité

Elle a pour fonction de donner l'état de la (ou des) sortie(s) d'un système en fonction de l'état de toutes les entrées.

Remarque : pour un système comportant N variables d'entrée, la table de vérité doit comporter 2^N lignes afin de décrire toutes les combinaisons possibles.

Exemple : table de vérité d'un système de remplissage d'un château d'eau



KM1 et KM2 correspondent aux contacteurs de pilotage des 2 pompes de remplissage M1 et M2.

CMD_V1, CMD_V2 et CMD_V3 correspondent aux signaux de commande des voyants du pupitre utilisateur.

Dans cet exemple, il y a 2 variables d'entrée KM1 et KM2, donc la table de vérité comporte $2^2 = 4$ lignes :

KM1	KM2	CMD_V1	CMD_V2	CMD_V3
0	0	1	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1

1.1.4. Équation logique

Équation mathématique exprimant l'état d'une sortie en fonction des différentes entrées du système.

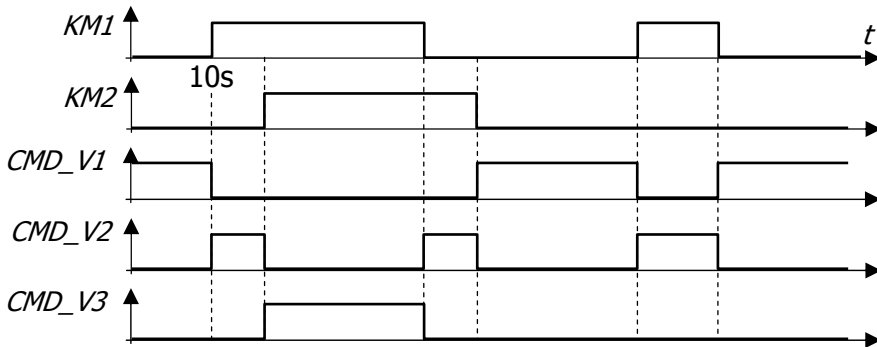
Exemple : à partir de la table de vérité ci-dessus, on cherche à donner l'équation de chacune des sorties en fonction des 2 variables d'entrée :

- La variable *CMD_V1* est au niveau logique 1, si *KM1* est au niveau logique 0 et si *KM2* est au niveau logique 0, on écrira alors $CMD_V1 = \overline{KM1} \cdot \overline{KM2}$
- La variable *CMD_V2* est au niveau logique 1, si *KM1* est au niveau logique 0 et si *KM2* est au niveau logique 1 ou si *KM1* est au niveau logique 1 et si *KM2* est au niveau logique 0, on écrira alors : $CMD_V2 = \overline{KM1} \cdot KM2 + KM1 \cdot \overline{KM2}$
- La variable *CMD_V3* est au niveau logique 1, si *KM1* est au niveau logique 1 et si *KM2* est au niveau logique 1, on écrira alors : $CMD_V3 = KM1 \cdot KM2$

1.1.5. Chronogrammes

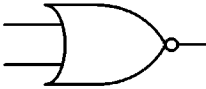
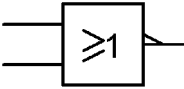

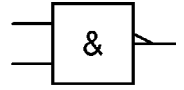

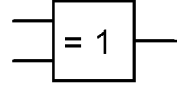
Représentation graphique de l'état des variables d'un système en fonction du temps.

Exemple : à partir de la table de vérité de la page précédente



1.2. Liste des fonctions logiques

NOM	Table de vérité	Symbole américain (ANSI)	Symbole européen (IEEE)	Équation logique															
Amplificateur <i>BUFFER</i>	<table border="1"> <tr><td>a</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	a	S	0	0	1	1			$s = a$									
a	S																		
0	0																		
1	1																		
Inverseur <i>NO</i>	<table border="1"> <tr><td>a</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	a	S	0	1	1	0			$s = \bar{a}$									
a	S																		
0	1																		
1	0																		
OU <i>OR</i>	<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1			$s = a + b$
a	b	S																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	1																	
ET <i>AND</i>	<table border="1"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>S</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	a	b	S	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1			$s = a \cdot b$
a	b	S																	
0	0	0																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	

NON-OU <i>NOR</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	a	b	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0			$s = \overline{a + b}$ ou $s = \overline{a} \cdot \overline{b}$
a	b	S																	
0	0	1																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	0																	
NON-ET <i>NAND</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	a	b	S	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0			$s = \overline{a \cdot b}$ ou $s = \overline{a} + \overline{b}$
a	b	S																	
0	0	1																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
OU-Exclusif <i>XOR</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	a	b	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0			$s = a \oplus b$ ou $s = \overline{a} \cdot b + a \cdot \overline{b}$
a	b	S																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	

2. Algèbre de Boole

2.1. Opérateurs logiques

L'algèbre de Boole (mathématicien 1815-1864) est aussi appelée algèbre binaire :

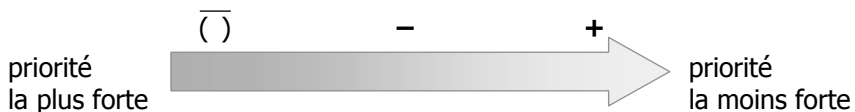
- C'est une méthode mathématique de calcul portant sur des variables binaires.
- Elle utilise les 3 opérateurs élémentaires :

NON :	$\overline{\quad}$
OU :	$+$
ET :	\cdot
- Toute variable a un « inverse » (fonction NON) appelé « complément », représenté par le même symbole surélevé d'une barre horizontale (\overline{a} est le complément de a : si $a = 1$ alors cela signifie que $\overline{a} = 0$).

Exemple : $L = a \cdot \overline{b} + c$ signifie que L sera au niveau logique 1 si :
 $a = 1$ ET $b = 0$ OU $c = 1$

2.2. Propriétés

2.2.1. Priorités



Exemple : priorités sur une équation

$$S = a + (b \cdot (c + \bar{d}))$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Priorité ④}}$
 $\underbrace{\hspace{5em}}_{\text{Priorité ③}}$
 $\underbrace{\hspace{2em}}_{\text{Priorité ②}}$
 $\underbrace{\hspace{1em}}_{\text{Priorité ①}}$

2.2.2. Théorèmes sur une variable

	$a + 0 = a$	$a \cdot 0 = 0$
=	$a + 1 = 1$	$a \cdot 1 = a$
$\bar{a} = a$	$a + a = a$	$a \cdot a = a$
	$a + \bar{a} = 1$	$a \cdot \bar{a} = 0$

2.2.3. Théorèmes sur plusieurs variables

Commutativité	$a \cdot b = b \cdot a$ $a + b = b + a$	
Associativité	$a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ $a + (b + c) = (a + b) + c$	
Distributivité	$a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$ $a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$	<i>Démonstration des résultats de l'absorption :</i>
Absorption	$a + a \cdot b = a$ $a + \bar{a} \cdot b = a + b$ $a \cdot (a + b) = a$ $a \cdot b + a \cdot \bar{b} = a$	$\rightarrow a \cdot 1 + a \cdot b = a \cdot (1 + b) = a \cdot 1 = a$ $\rightarrow (a + \bar{a}) \cdot (a + b) = 1 \cdot (a + b) = a + b$ $\rightarrow a \cdot a + a \cdot b = a + a \cdot b$ (1 ^{ère} ligne) = a $\rightarrow a \cdot (b + \bar{b}) = a \cdot 1 = a$

2.2.4. Théorème de DE MORGAN

- Le complément d'une somme est égal au produit des compléments :

$$\overline{a + b + c} = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$$

- Le complément d'un produit est égal à la somme des compléments :

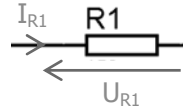
$$\overline{a \cdot b \cdot c} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}$$

3. Lois générales d'électricité

3.1. Loi d'Ohm

Lorsqu'une résistance R_1 est parcourue par un courant I_{R_1} , la tension U_{R_1} à ses bornes est égale à :

$$U_{R_1} = R_1 \cdot I_{R_1}$$



(les flèches de tension et courant respectent la convention récepteur)

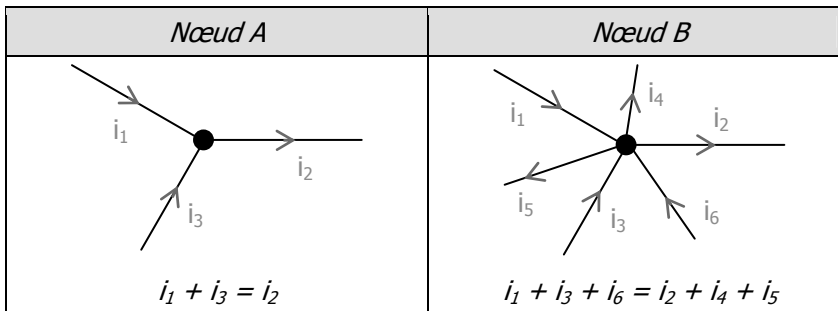
3.2. Lois de Kirchhoff

3.2.1. Loi des nœuds

La somme des courants qui "entrent" dans un nœud électrique est égale à la somme des courants qui "sortent" de ce même nœud électrique :

$$\sum I_{\text{entrant}} = \sum I_{\text{sortant}}$$

Exemples



3.2.2. Loi des mailles

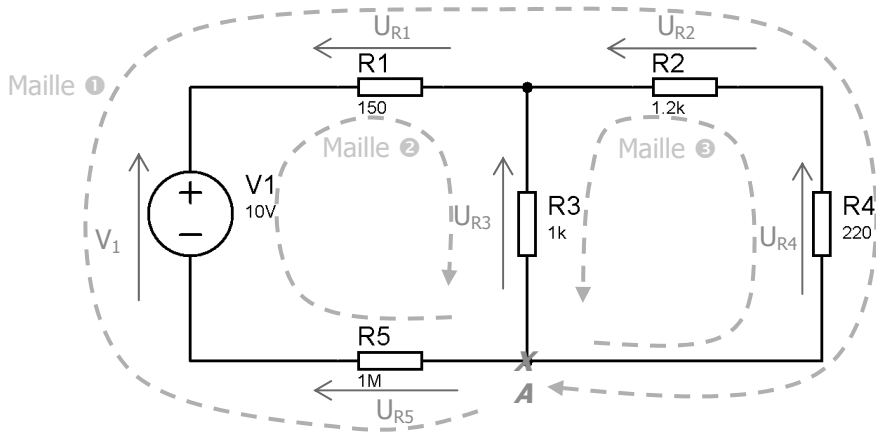
Sur une maille (boucle), la somme algébrique des tensions est nulle.

Méthode d'utilisation de la loi des mailles :

- ① prendre un point de départ quelconque (par exemple, point A ci-dessous)
- ② tracer une maille (boucle) qui part au point A et y revient : flécher le sens de parcours de cette maille
- ③ flécher toutes les tensions de la maille
- ④ la somme algébrique des tensions formant cette maille est égale à zéro.

Remarque : dans cette somme, les tensions fléchées dans le même sens de parcours que la maille, sont comptées positivement et les autres négativement.

Exemple : sur le schéma électrique suivant, on peut identifier 3 mailles partant du point A



D'après la loi des mailles, on a :

- Maille ① : $U_{R5} + V_1 - U_{R1} - U_{R2} - U_{R4} = 0$
- Maille ② : $U_{R5} + V_1 - U_{R1} - U_{R3} = 0$
- Maille ③ : $U_{R4} + U_{R2} - U_{R3} = 0$

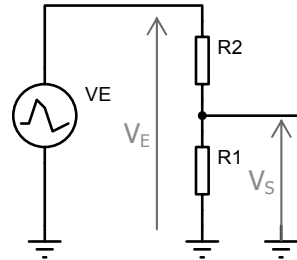
3.3. Diviseur de tension

Lorsqu'on souhaite connaître la tension aux bornes d'une résistance en série avec d'autres résistances :

$$U_R = \frac{R}{\sum \text{Résistances}} \cdot U_{\text{globale}}$$

Exemple : équation de la tension V_S à partir du schéma ci-contre

$$V_S = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_E$$



3.4. Théorème de Millman

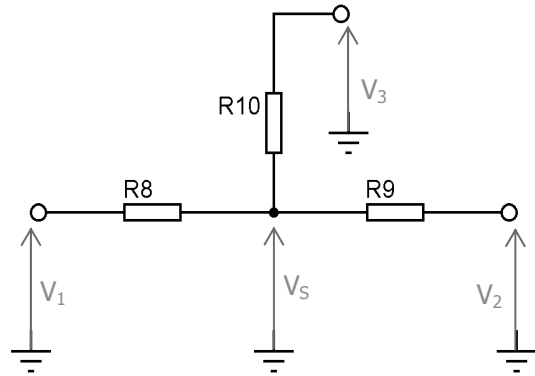
Lorsqu'on a un montage électrique possédant plusieurs branches et qu'on souhaite connaître le potentiel du nœud central, on applique la relation :

$$V_{\text{nœudcentral}} = \frac{\sum \frac{\text{potentiel}}{\text{résistance}}}{\sum \frac{1}{\text{résistance}}}$$

Remarque : le théorème du « diviseur de tension » (paragraphe précédent) est un cas particulier du théorème de Millman.

Exemple : application au montage ci-contre


$$V_S = \frac{\frac{V_1}{R_8} + \frac{V_2}{R_9} + \frac{V_3}{R_{10}}}{\frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}}}$$



4. Composants passifs

4.1. Résistance


La résistance électrique d'un composant conducteur est sa propriété à s'opposer au passage du courant.

- Symbole : 
- La résistance (ou impédance) s'exprime en ohm (Ω).
- Relation entre courant et tension : loi d'Ohm ($U = R \cdot I$).
- La résistance d'un conducteur se détermine avec la relation :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad \text{avec :} \quad \left\{ \begin{array}{l} R : \text{résistance } (\Omega) \\ \rho : \text{résistivité du conducteur } (\Omega \cdot \text{m}) \\ l : \text{longueur du conducteur (m)} \\ S : \text{section du conducteur (m}^2\text{)} \end{array} \right.$$

4.2. Condensateur

Un condensateur sert généralement à emmagasiner de l'énergie. Il est constitué de deux conducteurs séparés par un isolant.

- Symbole : 
- La capacité d'un condensateur s'exprime en Farad (F).
- Relation entre courant et tension :

en régime sinusoïdal	en régime non-sinusoïdal
loi d'Ohm : $U = Z_C \cdot I$ Z_C correspond à l'impédance complexe du condensateur : $Z_C = \frac{1}{j \cdot C \cdot \omega} \text{ soit } Z_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$ <p>N.B. :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ j : opérateur des nombres complexes (noté i en math). ▪ ω : pulsation (en rad/s) correspondant à $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. 	$I = C \cdot \frac{dU}{dt}$ <p>N.B. : $\frac{dU}{dt}$ correspond à la dérivée de la tension U par rapport au temps, généralement notée U' en math.</p>

Exemple : comportement d'un condensateur pour des fréquences extrêmes (en régime sinusoïdal)

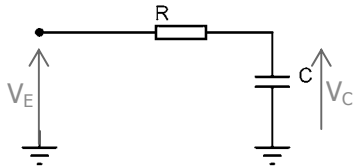
✓ pour $f \rightarrow 0$: $|Z_C| \rightarrow +\infty$, donc le condensateur est équivalent à un interrupteur ouvert (—/—);

✓ pour $f \rightarrow +\infty$: $|Z_C| \rightarrow 0$, donc le condensateur est équivalent à un interrupteur fermé (—/—).

- Énergie emmagasinée par un condensateur

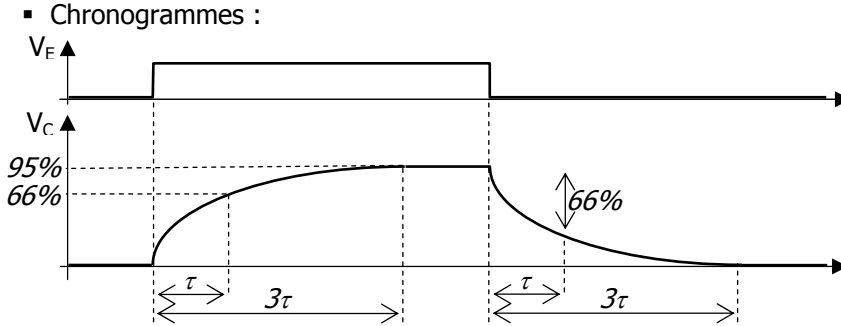
$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad \text{avec : } \begin{cases} W : \text{énergie (joule : J)} \\ C : \text{capacité du condensateur (F)} \\ U : \text{tension aux bornes du condensateur (V)} \end{cases}$$

- Charge et décharge d'un condensateur à travers une résistance



- constante de temps : $\tau = R \cdot C$
- le condensateur est considéré chargé ou déchargé au bout d'une durée de $3 \cdot \tau$
- équations mathématiques :

charge du condensateur : $V_{C(t)} = V_E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$	décharge du condensateur : $V_{C(t)} = V_E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
---	--



4.3. Inductance (ou bobine ou solénoïde)

Une inductance est constituée d'un fil électrique bobiné dans l'air ou autour d'un noyau. Cette inductance a la particularité de produire un champ magnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant (ou réciproquement).

- Symbole :
- La valeur d'une inductance s'exprime en Henry (H).
- Relation entre courant et tension :

en régime sinusoïdal	en régime non-sinusoïdal
<p>loi d'Ohm : $U = Z_L \cdot I$</p> <p>Z_L étant l'impédance de l'inductance :</p> <p>$Z_L = j \cdot L \cdot \omega$ soit $Z_L = L \cdot \omega$</p>	$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$
<p>N.B. :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ j : opérateur des nombres complexes (noté i en math). ▪ ω : pulsation (en rad/s) correspondant à $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. 	<p>N.B. : $\frac{dI}{dt}$ correspond à la dérivée du courant I par rapport au temps, généralement notée I' en math.</p>

Exemple : comportement d'une inductance pour des fréquences extrêmes (en régime sinusoïdal)

- ✓ pour $f \rightarrow 0$: $|Z_L| \rightarrow 0$, donc l'inductance est équivalent à un interrupteur fermé (
- ✓ pour $f \rightarrow +\infty$: $|Z_L| \rightarrow +\infty$, donc l'inductance est équivalent à un interrupteur ouvert (

- Énergie emmagasinée par une inductance :

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad \text{avec : } \begin{cases} W : \text{énergie (joule : J)} \\ L : \text{inductance (H)} \\ I : \text{courant circulant dans l'inductance (A)} \end{cases}$$

- Flux magnétique φ :

- Le flux magnétique dans une spire de la bobine est proportionnel au courant circulant dans cette spire : $\varphi = L \cdot I$

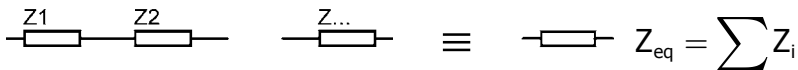
- La tension aux bornes d'une spire de la bobine suit les variations de flux :

$$U = \frac{d\varphi}{dt}$$

4.4. Associations de composants

4.4.1. Association série

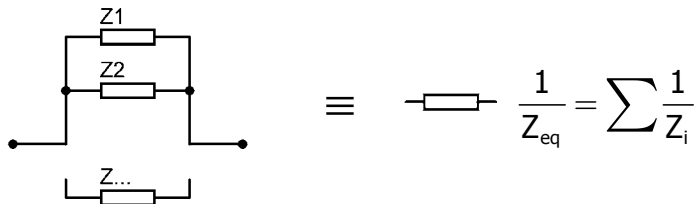
L'impédance équivalente Z_{eq} à plusieurs impédances en série est égale à la somme de ces impédances :



Composant	Impédance	Impédance équivalente série
Résistance	R	$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_i$
Condensateur	$ Z_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$	$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_i}$
Inductance	$ Z_L = L \cdot \omega$	$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_i$

4.4.2. Association parallèle

L'inverse de l'impédance équivalente Z_{eq} à plusieurs impédances en parallèle est égal à la somme des inverses de ces impédances :



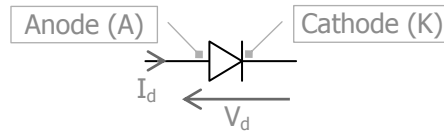
Composant	Impédance	Impédance équivalente parallèle
Résistance	R	$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i}$
Condensateur	$ Z_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$	$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_i$
Inductance	$ Z_L = L \cdot \omega$	$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_i}$

5. Composants actifs : semi-conducteurs

5.1. Diode

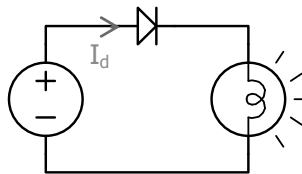
5.1.1. Diode de redressement ou de signal

Une diode est un composant ayant la propriété de laisser passer le courant dans un sens et de le bloquer dans l'autre sens. Elle possède 2 broches, l'anode et la cathode :

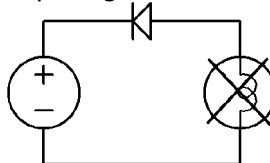


La diode possède 2 états :

- Passant : la diode est passante (sens direct) si la tension à ses bornes est positive. Elle laisse passer le courant de l'anode vers la cathode :



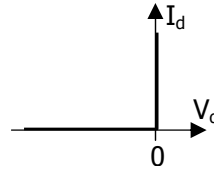
- Bloqué : la diode est bloquée (sens inverse) si la tension à ses bornes est négative. Elle empêche le passage du courant de la cathode vers l'anode :



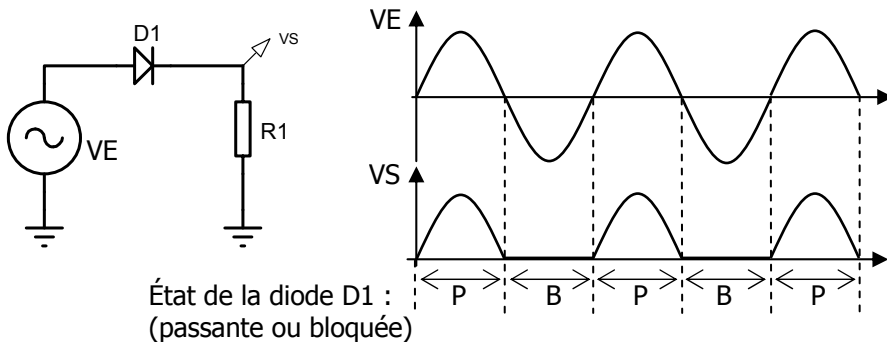
En première approximation, la diode peut être idéalisée en assimilant son fonctionnement à celui d'un interrupteur :

Modèle idéalisé de la diode :	
diode bloquée	diode passante
<p>$I_d = 0$ $V_d < 0$</p>	<p>$I_d > 0$ $V_d = 0$</p>

On obtient alors la caractéristique de transfert :

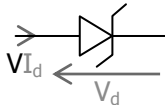


Exemple : montage redresseur simple-alternance



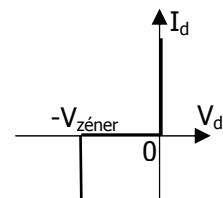
5.1.2. Diode zéner

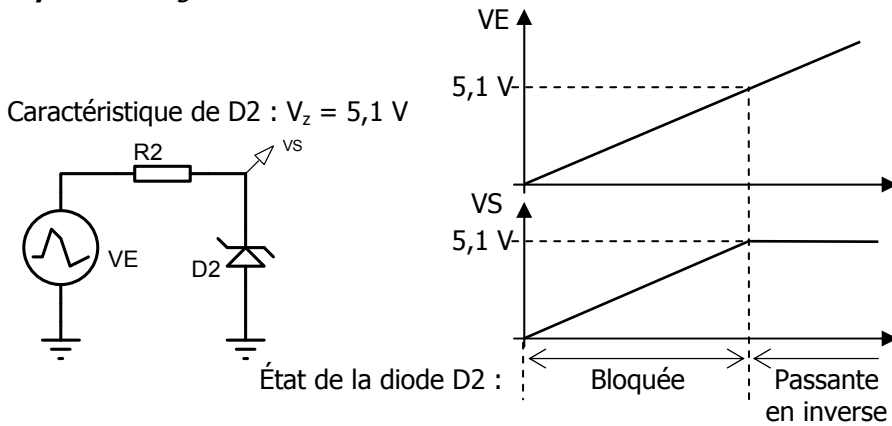
Symbole :



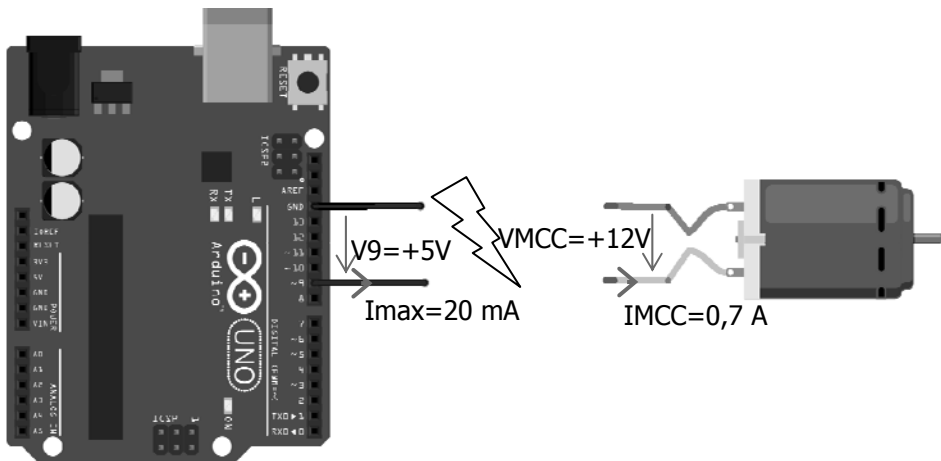
Fonctionnement :

- Sens direct : comme la diode de signal ou de redressement, la diode zéner laisse passer le courant de l'anode vers la cathode.
- Sens inverse :
 - bloquée, si la tension est comprise entre 0 V et la tension zéner ;
 - passante en inverse, si la tension est égale à la tension zéner ; dans ce cas, la diode laisse passer le courant de la cathode vers l'anode et la tension aux bornes de la diode est égale à la tension zéner.



Exemple : montage écrêteur**5.2. Transistor à effet de champ MOS (à enrichissement)**

Les transistors sont des composants généralement utilisés pour réaliser des montages d'interfaces de puissance (adaptation des tensions et courants entre 2 composants ayant des caractéristiques différentes).

Exemple : pilotage d'un moteur à courant continu à partir d'une carte Arduino

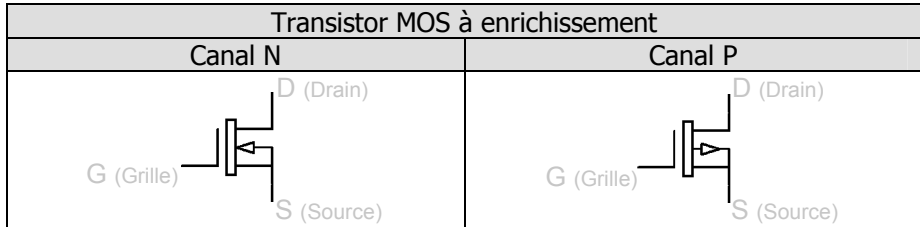
fritzing

Pour fonctionner, le moteur à courant continu nécessite une tension de 12 V et un courant de 0,7 A, alors que le microcontrôleur Arduino délivre une tension de 5 V et un courant maximal de 20 mA.

Il faut donc ajouter un bloc « interface de puissance » entre le microcontrôleur et le moteur afin d'adapter les niveaux de tension et les courants.

Constitution d'un transistor MOS (Metal Oxide Semiconductor) :

- comporte 3 broches : **D** – Drain, **S** – Source et **G** – Grille :



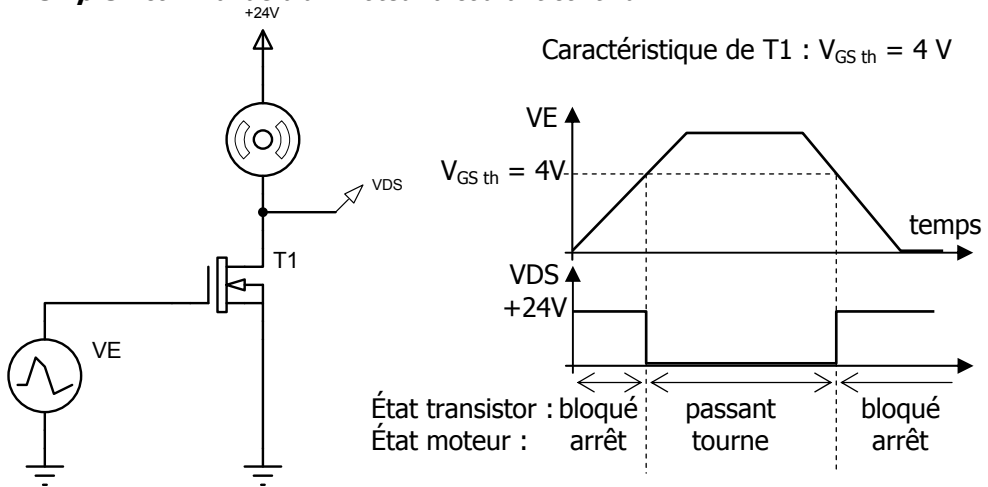
- se décline en 4 types : Canal N à enrichissement, Canal N à appauvrissement, Canal P à enrichissement et Canal P à appauvrissement ;
- se comporte comme un « interrupteur commandé (jonction entre drain et source) » par la tension entre la grille et la source V_{GS} .

Principe de fonctionnement simplifié :

Transistor MOS à enrichissement	
Canal N	Canal P
<ul style="list-style-type: none"> Si $V_{GS} > V_{GS\ th}^1$ alors le transistor est Passant : la jonction D-S est équivalente à un interrupteur fermé ($V_{DS} = 0\ V$). Si $V_{GS} < V_{GS\ th}$ alors le transistor est Bloqué : la jonction D-S est équivalente à un interrupteur ouvert. 	<ul style="list-style-type: none"> Si $V_{GS} > V_{GS\ th}$ alors le transistor est Bloqué : la jonction D-S est équivalente à un interrupteur ouvert. Si $V_{GS} < V_{GS\ th}$ alors le transistor est Passant : la jonction D-S est équivalente à un interrupteur fermé ($V_{DS} = 0\ V$).

¹ $V_{GS\ th}$ correspond à la tension de seuil qui est donnée dans la documentation constructeur du transistor.

Exemple : commande d'un moteur à courant continu



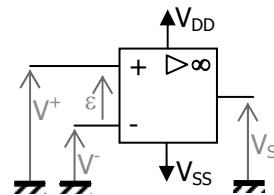
5.3. Amplificateur linéaire intégré (ALI)

L'amplificateur linéaire intégré (ALI), anciennement appelé amplificateur opérationnel (AOp), est largement employé en électronique analogique pour assurer des fonctions telles que :

- comparaison de 2 tensions ;
- amplification d'une tension ;
- filtrage d'un signal ;
- opérations arithmétiques (addition, soustraction)...

L'ALI comporte :

- 2 entrées : + (non-inverseuse) et - (inverseuse) ;
- 1 sortie ;
- 2 broches d'alimentation électrique : l'une positive (VDD) et l'autre négative ou nulle (VSS).



N.B. : comme pour tous les circuits intégrés, on considère que les courants entrant dans les entrées « + » et « - » sont nuls.

L'amplificateur linéaire intégré peut aussi être appelé amplificateur différentiel intégré (ADI) puisqu'il permet d'amplifier la différence entre les 2 entrées « + » et « - ». Ainsi les 2 modes (régimes) de fonctionnement sont :

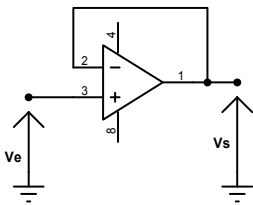
- régime linéaire (amplificateur) ;
- régime non-linéaire (comparateur).

5.3.1. Détermination du mode de fonctionnement de l'ALI

<p>Si la sortie V_S est rebouclée sur l'entrée inverseuse « - », alors l'ALI fonctionne en « Linéaire ».</p>	<p>sinon l'ALI fonctionne en « Comparateur ».</p>
↓	↓
<p>On en déduit que :</p> $\varepsilon = 0$ <p>soit $V^+ = V^-$</p>	<p>Alors on a le fonctionnement suivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ si $V^+ > V^-$ (soit $\varepsilon > 0$), alors $V_S = V_{DD}$ (V_{DD} tension d'alimentation positive) ▪ si $V^+ < V^-$ (soit $\varepsilon < 0$), alors $V_S = V_{SS}$ (V_{SS} tension d'alimentation négative)

5.3.2. Structures de bases en mode linéaire

Montage suiveur



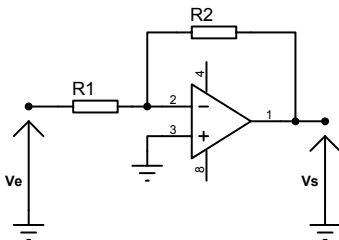
La sortie de l'ALI est rebouclée sur l'entrée « - » : alors l'ALI fonctionne en linéaire.

$$\text{Donc } V^+ = V^-$$

$$\text{Or } V^+ = V_e \text{ et } V^- = V_s$$

$$\text{On obtient alors : } V_s = V_e$$

Amplificateur inverseur



La sortie de l'ALI est rebouclée sur l'entrée « - » : alors l'ALI fonctionne en linéaire.

$$\text{Donc } V^+ = V^-$$

$$\text{Or } V^+ = 0$$

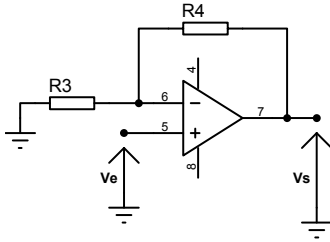
et d'après le théorème de Millman :

$$V^- = \frac{\frac{V_e}{R1} + \frac{V_s}{R2}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}}$$

$$\text{On obtient alors : } 0 = \frac{\frac{V_e}{R1} + \frac{V_s}{R2}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}}$$

$$\text{Soit } V_s = \frac{-R2}{R1} \cdot V_e$$

Amplificateur non-inverseur



La sortie de l'ALI est rebouclée sur l'entrée « - » : alors l'ALI fonctionne en linéaire.

Donc $V^+ = V^-$

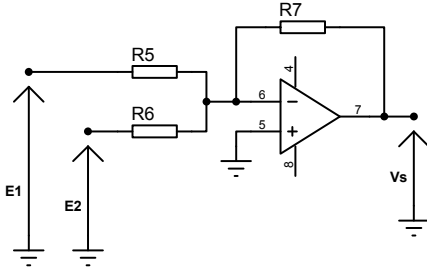
Or $V^+ = V_e$ et d'après le théorème de

Millman : $V^- = \frac{0 + \frac{V_s}{R_4}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$

On obtient alors : $V_e = \frac{\frac{V_s}{R_4}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$

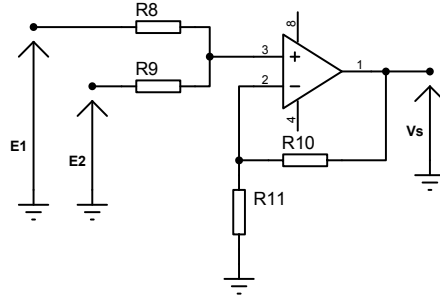
Soit $V_s = \frac{R_3 + R_4}{R_3} \cdot V_e$

Sommeur inverseur



$V_s = -R_7 \cdot \left(\frac{E_1}{R_5} + \frac{E_2}{R_6} \right)$

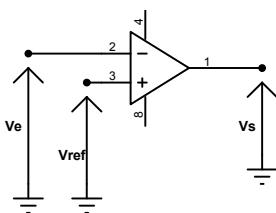
Sommeur non-inverseur



$V_s = \frac{R_{10} + R_{11}}{R_{11} \cdot (R_8 + R_9)} \cdot (R_9 \cdot E_1 + R_8 \cdot E_2)$

5.3.3. Structures de bases en mode non linéaire

Comparateur inverseur simple seuil

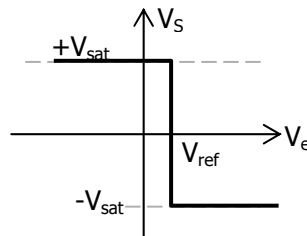


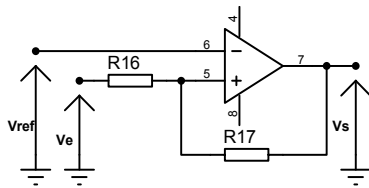
La sortie de l'ALI n'est pas rebouclée sur l'entrée « - » : alors l'ALI fonctionne en comparateur.

On en déduit donc que :

- Si $V_e < V_{ref}$ alors $V_s = +V_{sat}$
- Si $V_e > V_{ref}$ alors $V_s = -V_{sat}$

D'où la caractéristique :



Comparateur non-inverseur à double seuil (hystérésis)

La sortie de l'ALI n'est pas rebouclée sur l'entrée « - » : alors l'ALI fonctionne en comparateur.

On en déduit donc que :

- Si $V^- < V^+$ alors $V_S = +V_{\text{sat}}$
- Si $V^- > V^+$ alors $V_S = -V_{\text{sat}}$

On a : $V^- = V_{\text{ref}}$ et d'après le théorème de Millman, $V^+ = \frac{\frac{V_e}{R1} + \frac{V_S}{R2}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}}$

Or la sortie V_S bascule lorsque V^+ devient égal à V^- , soit :

$$V_{\text{ref}} = \frac{\frac{V_e}{R1} + \frac{V_S}{R2}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} \rightarrow V_e = \frac{(R1 + R2) \cdot V_{\text{ref}} - R1 \cdot V_S}{R2}$$

Étant donné que la tension de sortie V_S peut prendre 2 valeurs $+V_{\text{sat}}$ et $-V_{\text{sat}}$, il y a donc 2 valeurs de V_e qui provoquent le basculement de la sortie :

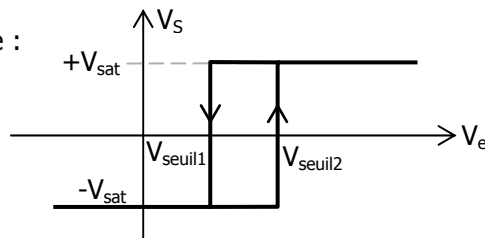
- 1^{er} seuil de basculement, lorsque $V_S = +V_{\text{sat}}$:

$$V_{\text{seuil1}} = \frac{(R1 + R2) \cdot V_{\text{ref}} - R1 \cdot (+V_{\text{sat}})}{R2}$$

- 2^e seuil de basculement, lorsque $V_S = -V_{\text{sat}}$:

$$V_{\text{seuil2}} = \frac{(R1 + R2) \cdot V_{\text{ref}} - R1 \cdot (-V_{\text{sat}})}{R2}$$

D'où la caractéristique :



→ Exercices

Fonctions logiques

Exercice 6.1 – Identification de fonctions

Pour chacune des tables de vérité suivantes, donner le nom de la fonction :

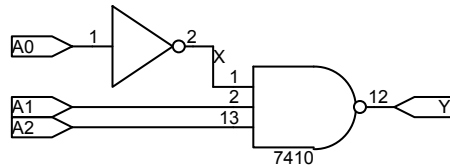
A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

A	B	C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

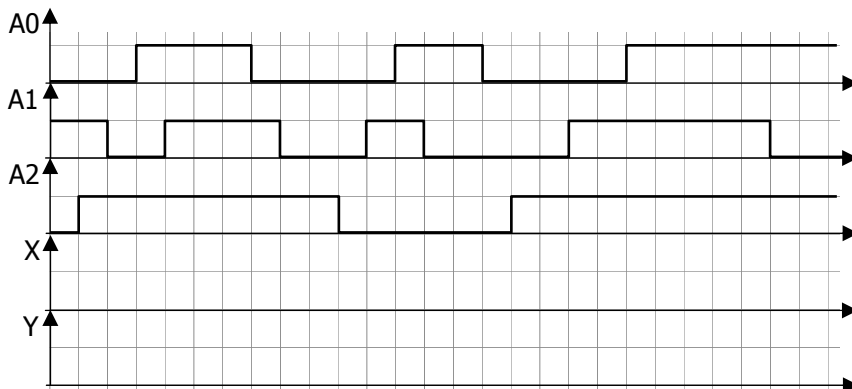
A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

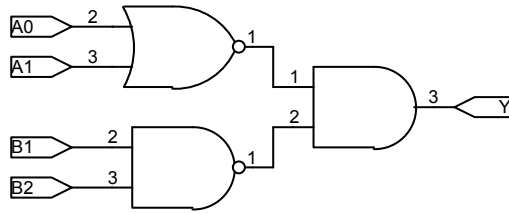
A	B	C	D
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

Exercice 6.2

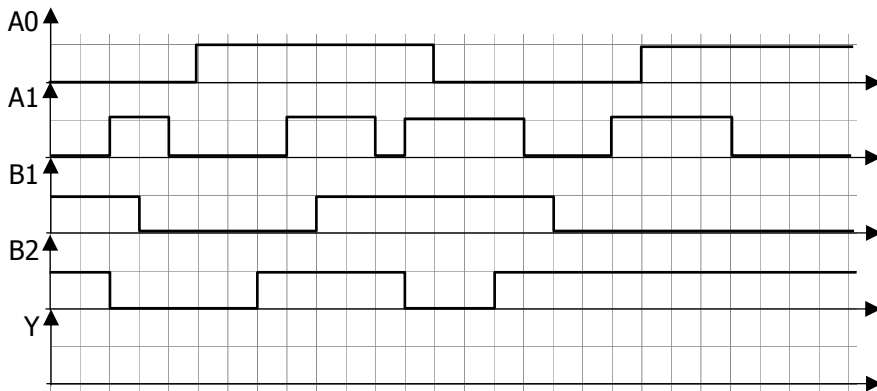


1. Identifier les noms des fonctions logiques utilisées.
2. Tracer la table de vérité de la fonction logique portant la référence 7410.
3. Tracer la table de vérité de la sortie Y en fonction des variables A0, A1 et A2.
4. Compléter le chronogramme suivant :



Exercice 6.3

1. Identifier les noms des fonctions logiques utilisées.
2. Identifier les variables binaires d'entrée et de sortie puis déterminer le nombre de ligne de la table de vérité.
3. Tracer la table de vérité du montage.
4. Compléter le chronogramme suivant :

**Algèbre de Boole****Exercice 6.4 – Simplification d'équations**

À partir des théorèmes de l'algèbre de Boole, simplifier les équations suivantes :

- $S_1 = a \cdot (\bar{a} + a \cdot b)$
- $S_2 = a \cdot (a + b) \cdot c + c$
- $S_3 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot c + a \cdot \bar{b} \cdot c$
- $S_4 = \overline{a + b + c} + \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c + \overline{a + c} \cdot b + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot c$

Exercice 6.5 – Équation logique d’une table de vérité

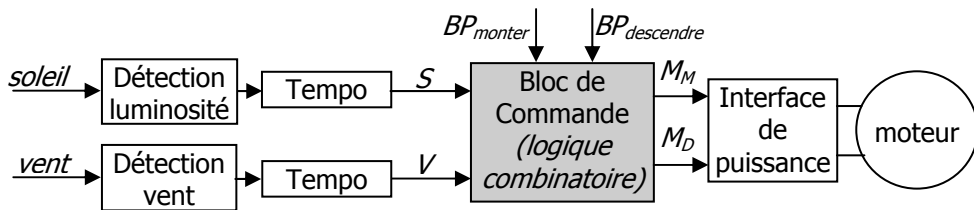
Déterminer l’équation de la sortie de chacune des 2 tables de vérité et tracer son logigramme.

a	b	c	S ₈
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

a	b	c	S ₉
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Exercice 6.6 – Store automatique

Soit le schéma fonctionnel d’un store automatique :

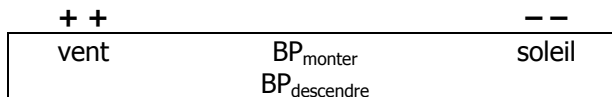


N.B. : les capteurs de fin de course pour la montée et pour la descente sont intégrés au bloc 'interface de puissance'.

Description du fonctionnement :

- Lorsque l’automatisme détecte un seuil de luminosité supérieur à celui pré-réglé, il donne un ordre de descente du store (commande de la sortie M_D).
- S’il y a disparition du soleil ou apparition du vent, l’automatisme donne l’ordre de monter le store (commande de la sortie M_M).
- En parallèle de l’automatisme, il y a un fonctionnement semi-manuel pour lequel la descente et la montée du store se font par l’appui sur les boutons poussoirs BP_{monter} et BP_{descendre}. L’appui simultané sur les 2 boutons poussoirs n’active aucune sortie.

Ordre des priorités :



N.B. : pour la suite, on étudie uniquement le « bloc de commande ».

1. Déterminer les variables d’entrée et de sortie du « bloc de commande ».

2. Tracer la table de vérité répondant au cahier des charges.
3. Déterminer les équations logiques des sorties M_M et M_D . Prendre le temps de les simplifier à partir des théorèmes de l'algèbre de Boole.
4. Dessiner les logigrammes des sorties M_M et M_D .

Exercice 6.7 – Scooba (Bac SI)



Le robot domestique nettoyeur de sol Scooba doit remplir les fonctions de service :

- FS1 : nettoyer le sol de façon autonome.
- FS2 : éliminer les saletés et les tâches.
- FS3 : laver avec une solution nettoyante.
- FS4 : être autonome en énergie.
- FS5 : se déplacer en tenant compte des obstacles.

Afin de répondre à la fonction de service FS5 du robot Scooba, 2 capteurs de contact ont été placés au niveau du pare-chocs avant du robot. Ces capteurs informent la carte électronique que le robot a rencontré un obstacle (meuble, mur, etc.) et précisent la localisation du choc (droite, gauche ou de face). L'état des capteurs de contact du pare-chocs (0 = pas de choc, 1 = choc) et des ILS (interrupteur à lame souple) de roues (0 = roue au sol, 1 = roue soulevée) est renseigné sur quatre bits. Tableau descriptif de l'octet ID7 :

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valeur	Réservés				ILS roue gauche ?	ILS roue droite ?	Contact gauche ?	Contact droit ?

1. Pour chacune des lignes du tableau de valeurs de l'octet ID7 ci-dessous, déterminer l'état des capteurs ILS des roues ainsi que l'état des capteurs de contact du pare-chocs.

Octet reçu ID7		Roue gauche	Roue droite	Contact gauche	Contact droit
en Hexa	converti en Binaire	<i>Soulevée / Non soulevée</i>	<i>Soulevée / Non soulevée</i>	<i>Activé / Non activé</i>	<i>Activé / Non activé</i>
0x00					
0x0C					
0x0B					
0x04					

2. Proposer deux masques binaires permettant, à partir du contenu de l'octet ID7, d'isoler l'information « état des ILS de roues » dans une variable nommée « Wheel » et, d'autre part, l'information « état des contacts du pare-chocs » dans une variable nommée « Bump ». En utilisant un opérateur logique simple

(ET, OU ou NON), écrire les deux équations logiques qui permettront, d'isoler les informations relatives à l'état des ILS et des capteurs de contact.

3. Dresser un tableau récapitulatif des quatre situations possibles concernant le contenu de la variable « Bump » en indiquant, pour chaque cas, l'existence ou la localisation du choc. Conclure sur l'intérêt du choix du nombre de capteurs de contact.

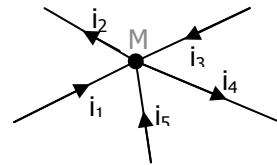
Lois générales d'électricité

Exercice 6.8 – Loi des nœuds

1. Pour le nœud M, on donne :

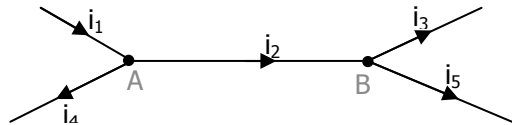
$$i_1 = -6 \text{ mA} ; i_2 = 3 \text{ mA} ; i_3 = 5 \text{ mA} \text{ et } i_4 = -3 \text{ mA}.$$

Quelle est l'intensité du courant i_5 ?



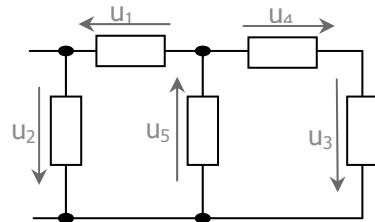
2. Pour la portion de circuit suivante, on donne : $i_1 = 10 \text{ mA}$, $i_3 = 3 \text{ mA}$ et $i_4 = -2 \text{ mA}$.

Quelle est la valeur du courant i_5 ?

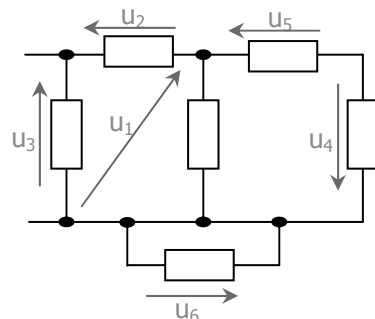


Exercice 6.9 – Loi des mailles

1. Dans la portion de montage suivant, on mesure : $u_1 = 20 \text{ V}$, $u_2 = -5 \text{ V}$ et $u_3 = 5 \text{ V}$.
Quelle est la valeur de la tension u_4 ?

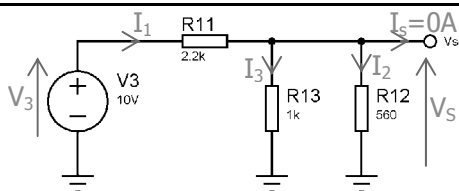


2. Dans le montage suivant, on donne : $u_1 = 20 \text{ V}$, $u_2 = 5 \text{ V}$ et $u_4 = -8 \text{ V}$.
Calculer toutes les autres tensions.



Exercice 6.10

Soit le schéma suivant :



On donne : $I_3 = 1,4 \text{ mA}$

1. Flécher les tensions U_{R11} , U_{R12} et U_{R13} aux bornes des résistances R11, R12 et R13.
2. À partir de la loi d'Ohm, calculer la tension U_{R13} aux bornes de la résistance R13.
3. À partir de la loi des mailles, déterminer la valeur de la tension U_{R12} .
4. Calculer la valeur du courant I_2 .
5. À partir de la loi des nœuds, calculer la valeur du courant I_1 .
6. Calculer la valeur de la tension U_{R11} avec les 2 méthodes :
 - loi d'Ohm ;
 - loi des mailles.
7. À partir du théorème de Millman, calculer la valeur de la tension V_S .

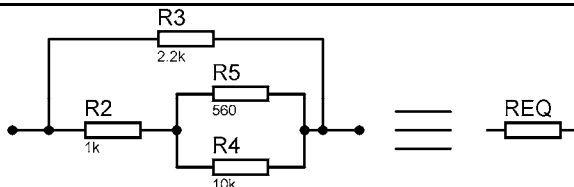
Composants passifs**Exercice 6.11 – Résistance d'un fil de cuivre**

Donner la résistance d'un fil de cuivre ayant les caractéristiques suivantes :

- longueur 200 m ;
- section $2,5 \text{ mm}^2$;
- résistivité $\rho_{\text{cuivre}} = 18 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$.

Exercice 6.12 – Association de résistances

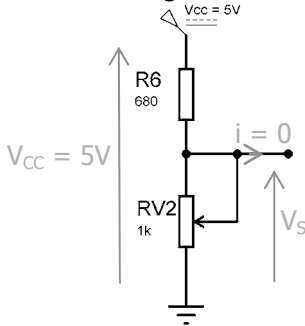
Soit l'association de résistances suivante :



1. Déterminer la valeur de la résistance équivalente à l'ensemble R4-R5.
2. Déterminer la valeur de la résistance équivalente REQ .

Exercice 6.13 – Montage potentiométrique

Soit le montage suivant :



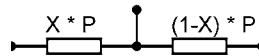
1. À partir du théorème de Millman ou du pont diviseur, montrer que l'équation de V_S peut s'écrire :

$$V_S = \frac{RV2}{R6 + RV2} \cdot V_{CC}$$

2. Pour les positions maximale et minimale du potentiomètre RV2, calculer la plage de variation de la tension V_S .

N.B. : un potentiomètre P (ou une résistance ajustable) est une résistance dont on peut faire varier la résistance :

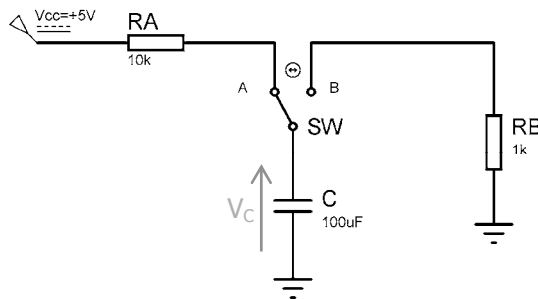
En se déplaçant, le curseur "coupe" la résistance en 2 parties ; la résistance ajustable est donc équivalente à 2 résistances dont la somme est égale à P :



(Le coefficient X correspond à un pourcentage compris entre 0 % et 100 % en fonction de la position du curseur.)

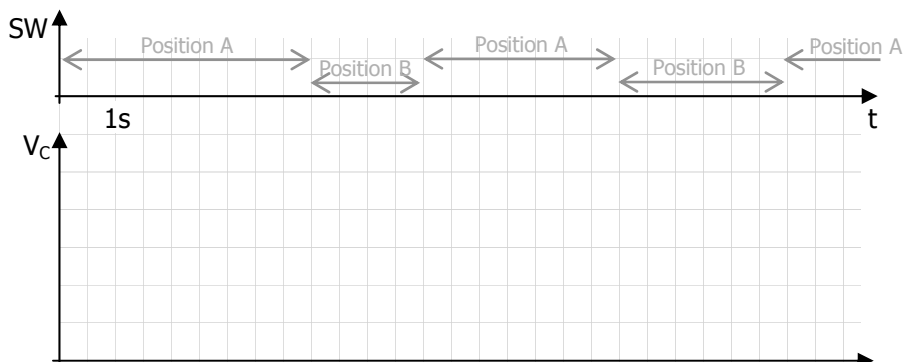
Exercice 6.14 – Charge et décharge d'un condensateur

Soit le montage suivant :



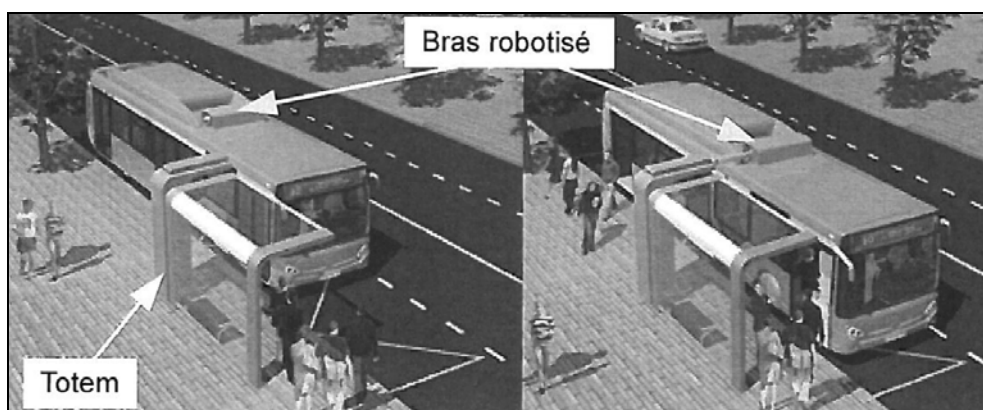
1. Flécher en rouge le sens de parcours du courant de charge du condensateur C (commutateur SW en position A).
2. En déduire la valeur de la constante de temps de charge de C : τ_{charge} .
3. Flécher en vert le sens de parcours du courant de décharge du condensateur C (commutateur SW en position B).
4. En déduire la valeur de la constante de temps de décharge de C : $\tau_{\text{décharge}}$.

5. Compléter alors le chronogramme suivant :



Exercice 6.15 – Bus Watt System (Bac SI 2017)

L'aéroport Nice Côte d'Azur expérimente un service de bus électrique : l'innovation majeure est le « biberonnage » du véhicule qui consiste à effectuer un transfert d'énergie à chaque station d'arrêt (Totem) pendant le transfert des passagers :

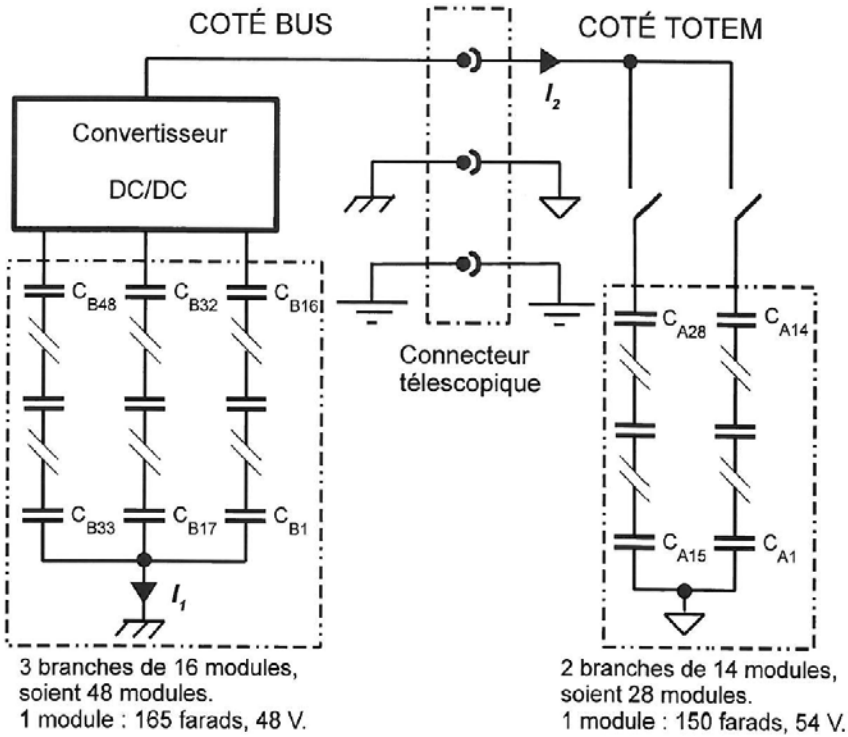


Le raccordement électrique du bus au Totem est réalisé grâce à un bras télescopique. Le temps nécessaire pour le déploiement du bras est de 6 secondes, le temps de repliement du bras est de 4 secondes maximum.

Le temps d'arrêt, déplacement du bras télescopique compris (aller et retour), ne doit pas excéder 20 secondes pour une recharge de 1,038 kW · h.

Le stockage de l'énergie est réalisé :

- côté bus, par association en dérivation de 3 branches constituées chacune de 16 modules de supercondensateurs raccordés en série ;
- côté Totem, par une association en dérivation de 2 branches constituées chacune de 14 modules de supercondensateurs raccordés en série.



1. Déterminer le temps maximal disponible pour effectuer le transfert d'énergie du côté Totem vers le côté bus.

L'énergie W stockée sous forme électrostatique dans un condensateur de capacité C et de tension à ses bornes notée U , s'écrit : $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$.

La circulation du courant dans les supercondensateurs provoque des pertes par effet Joule.

Les caractéristiques unitaires pour un module supercondensateurs sont :

- capacité nominale de 165 farads ;
- tension nominale de 48 V.

2. Calculer la variation ($W_{\max} - W_{\min}$) de l'énergie stockée dans un module de 165 farads lorsque la tension à ses bornes varie de 50 % à 100 % de sa tension nominale. Calculer l'énergie totale W_{TB} correspondant aux 48 modules embarqués dans le bus. Exprimer le résultat en joules et en $\text{kW} \cdot \text{h}$.

Afin de vérifier la capacité du système à effectuer une recharge suffisante pendant l'arrêt du bus dans la station, un modèle a été établi. Les paramètres de ce modèle sont :

- les valeurs de capacité de l'ensemble des supercondensateurs, $C_{1\text{eq}}$ côté bus et $C_{2\text{eq}}$ côté Totem ;

- les tensions initiales aux bornes de C_{1eq} et de C_{2eq} ;
- le courant I_2 parcourant le groupement C_{2eq} est maintenu à une valeur constante par l'intermédiaire du convertisseur DC/DC ;
- les résistances (non représentées sur la figure ci-dessus) côté bus et côté Totem, représentant les pertes par effet Joule dans les supercondensateurs (P_{Joule}).

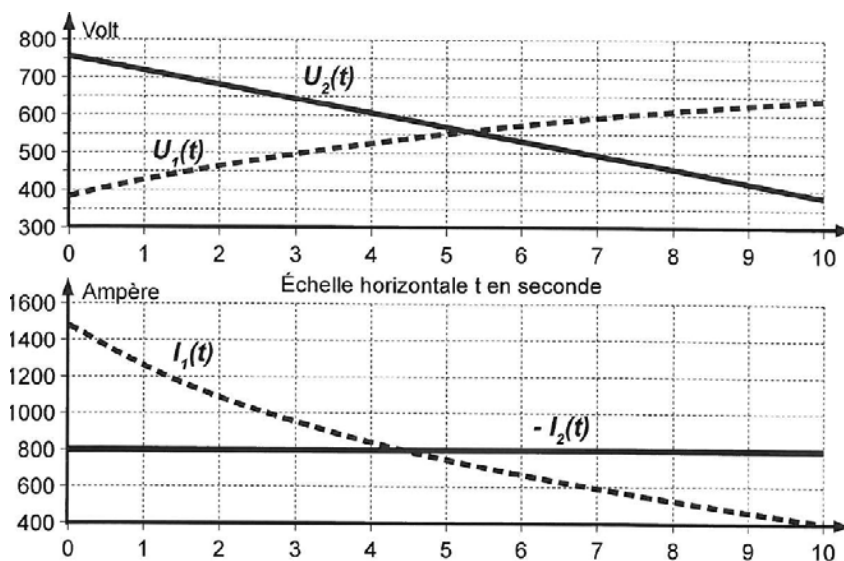
Le modèle utilise les équations présentées dans le tableau :

Grandeurs côté bus	Grandeurs côté Totem	P_{Joule} : côté Bus et côté Totem
$U_{1(t)} = \frac{1}{C_{1eq}} \cdot \int I_{1(t)} \cdot dt$	$U_{2(t)} = \frac{1}{C_{2eq}} \cdot \int I_{2(t)} \cdot dt$	$U_{1(t)} \cdot I_{1(t)} + U_{2(t)} \cdot I_{2(t)} + P_{Joule} = 0$

Les valeurs algébriques des grandeurs U_1 , I_1 , U_2 , I_2 respectent la convention récepteur.

3. Calculer les capacités C_{1eq} et C_{2eq} à partir du schéma ci-dessus.

Le résultat de la simulation sur une durée de 10 secondes est représenté :



Lors du transfert d'énergie, la tension U_2 aux bornes de C_{2eq} évolue de 756 V à 382 V, les pertes par effet Joule déterminées par la simulation atteignent 49,4 W · h côté bus et 80,7 W · h côté Totem.

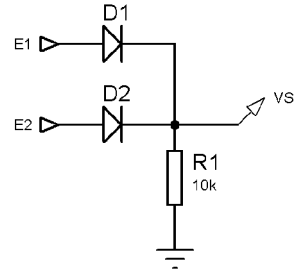
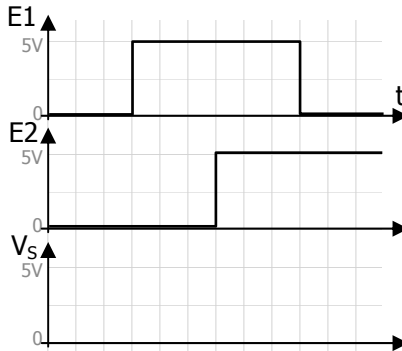
4. À partir des résultats de la simulation, calculer la variation ($W_{max} - W_{min}$) de l'énergie stockée dans le condensateur C_{2eq} au bout de 10 secondes. Calculer l'énergie W_T transférée du Totem vers le bus en prenant en compte les pertes par

effet Joule côté bus et côté Totem. Conclure sur la capacité du système à effectuer une recharge pendant l'arrêt du bus dans une station.

Composants actifs

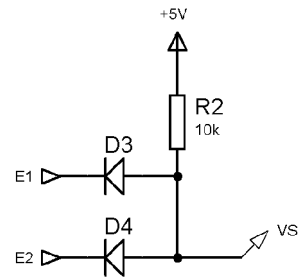
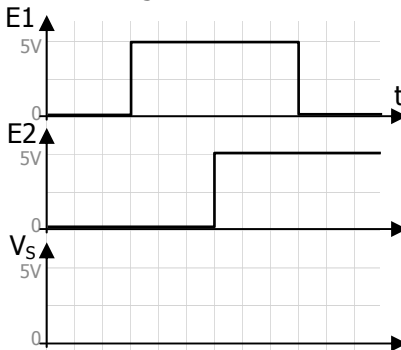
Exercice 6.16 – Fonctions logiques à diodes

1. Tracer l'allure du signal V_S .



2. En déduire la fonction logique réalisée.

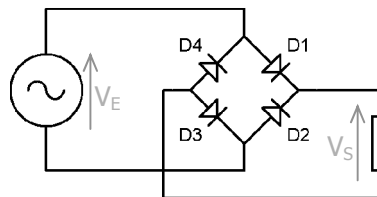
3. Tracer l'allure du signal V_S .



4. En déduire la fonction logique réalisée.

Exercice 6.17 – Redressement double alternance

Soit le montage suivant :

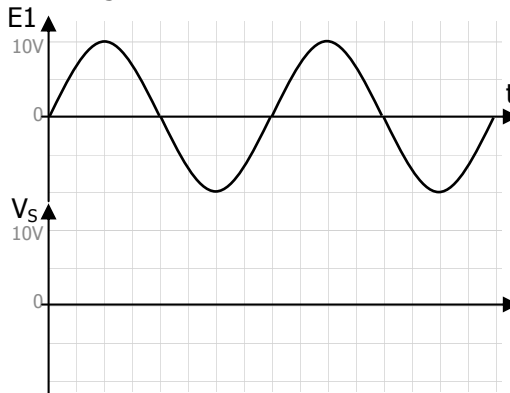


Pour $t \in \left[0; \frac{T}{2}\right]$, la tension V_E est positive :

1. Flécher le sens de circulation du courant fourni par le générateur V_E . Quelles sont les diodes passantes ?
2. D'après la loi des mailles, écrire l'équation de V_S en fonction de V_E .

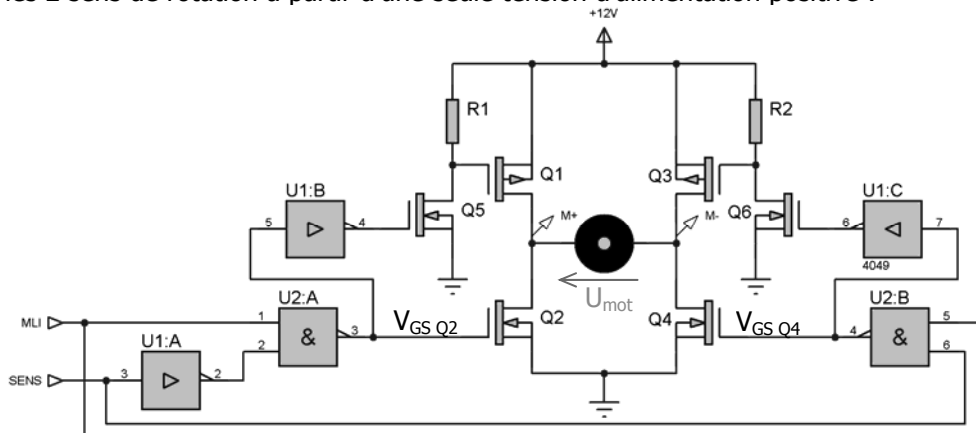
Pour $t \in \left[\frac{T}{2}; T\right]$, la tension V_E est négative :

3. Flécher le sens de circulation du courant fourni par le générateur V_E . Quelles sont les diodes passantes ?
4. D'après la loi des mailles, écrire l'équation de V_S en fonction de V_E .
5. Compléter alors le chronogramme suivant :



Exercice 6.18 – Pont en H

Une structure « pont en H » permet de piloter un moteur à courant continu dans les 2 sens de rotation à partir d'une seule tension d'alimentation positive :



1. Donner les équations logiques des signaux $V_{GS\ Q2}$ et $V_{GS\ Q4}$ en fonction de MLI et SENS.

2. Compléter les cases vierges de la table de vérité du « pont en H » :

SENS	MLI	Niveau logique 0 ou 1		État des transistors : B (bloqué) ou P (passant)						U_{mot}
		$V_{GS\ Q2}$	$V_{GS\ Q4}$	Q5	Q6	Q1	Q2	Q3	Q4	
0	1									+12 V
X	0			B	B	B	P	B	P	
1	1									

N.B. : 'X' signifie état indéterminé (la variable peut prendre indifféremment la valeur 0 ou 1).

Exercice 6.19 – Pré-ampli audio

Un pré-amplificateur audio a pour fonction d'amplifier un signal électrique audiophonique avec réglage d'amplitude.

Face avant de l'amplificateur :

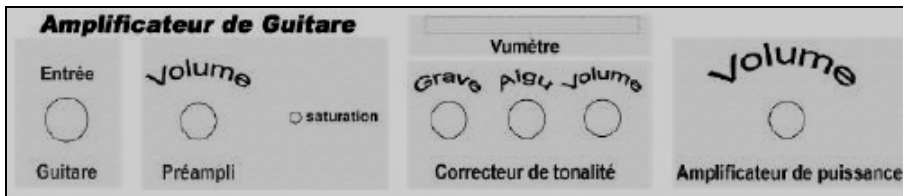
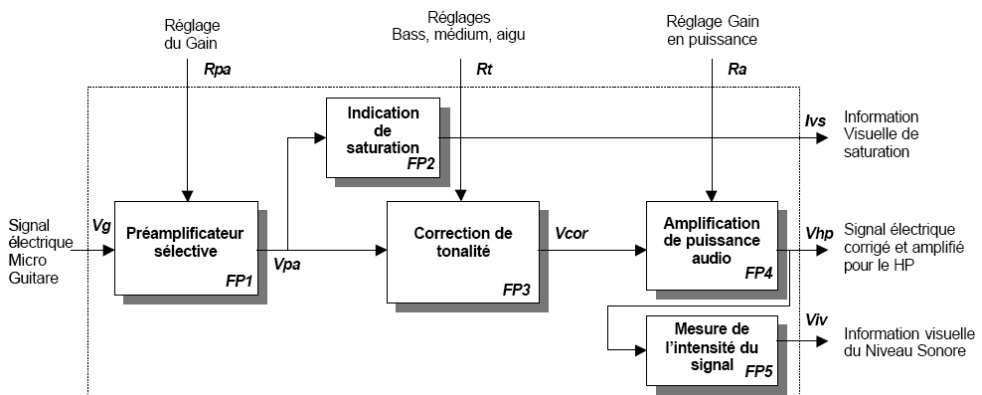
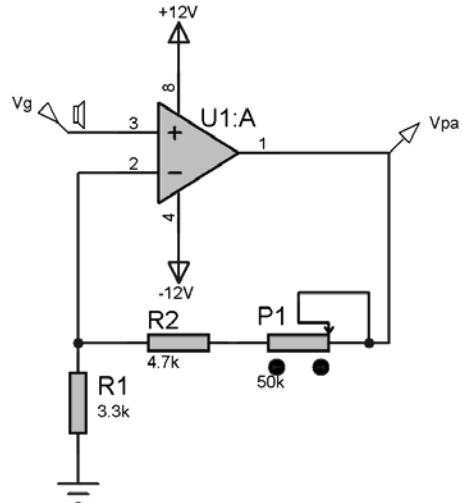


Schéma fonctionnel de 1^{er} degré :



Étude de « FP1 – préamplificateur sélectif »

Le rôle du pré-amplificateur est d'amplifier le plus « proprement possible » le signal audio (micro, guitare...) avant « d'attaquer » l'amplificateur de puissance (qui est connecté aux enceintes).



N.B. : il s'agit d'un montage simplifié.

1. Donner le mode de fonctionnement de l'Amplificateur Linéaire Intégré U1:A.
2. D'après le théorème de Millmann, déterminer l'équation de V en fonction de V_{pa} , R_1 , R_2 et P_1 .
3. Déterminer l'équation de V_{pa} en fonction de V_g , R_1 , R_2 et P_1 . Puis la mettre sous la forme :

$$V_{pa} = \frac{R_1 + R_2 + P_1}{R_1} \cdot V_g$$

4. Suivant le réglage du potentiomètre P_1 , donner les valeurs extrêmes du coefficient d'amplification $\beta = \frac{R_1 + R_2 + P_1}{R_1}$.
5. À partir des 2 résultats de simulation ci-dessous, déterminer les amplitudes des signaux V_g et V_{pa} , puis en déduire les valeurs du coefficient d'amplification β .

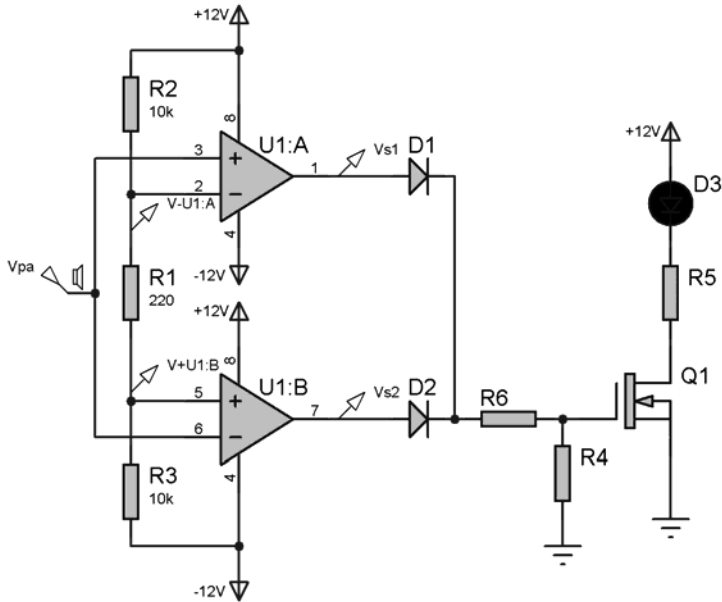
P1 au maximum	P1 au Minimum
Amplitude $V_g =$	Amplitude $V_g =$
Amplitude $V_{pa} =$	Amplitude $V_{pa} =$
Amplification $\beta =$	Amplification $\beta =$

6. Conclure quant au rôle du potentiomètre P_1 dans le cadre du pré-amplificateur.

Étude de « FP2 – indication de saturation »

Le rôle de FP2 est de détecter toute saturation du signal amplifié par la fonction FP1 issu de la source (micro, guitare...) et en informe l'utilisateur (LED D3).

Une saturation du signal entraînerait une distorsion du son sur les enceintes.



On donne : $V_{U1:A}^- = 0,13 \text{ V}$ et $V_{U1:B}^+ = -0,13 \text{ V}$

7. Justifier que les ALI U1:A et U1:B fonctionnent en comparateur. Puis compléter les 2 conditions :

Fonctionnement de U1:A	Fonctionnement de U1:B
Si ... Alors $V_{S1} = +12 \text{ V}$ Sinon $V_{S1} = -12 \text{ V}$	Si ... Alors $V_{S2} = +12 \text{ V}$ Sinon $V_{S2} = -12 \text{ V}$

8. En utilisant le théorème de Millman, donner l'équation de $V_{U1:A}^-$ en fonction de +12 V, -12 V, R1, R2 et R3. Puis calculer sa valeur.

9. Donner l'équation de $V_{U1:B}^+$ en fonction de +12 V, -12 V, R1, R2 et R3. Puis calculer sa valeur.

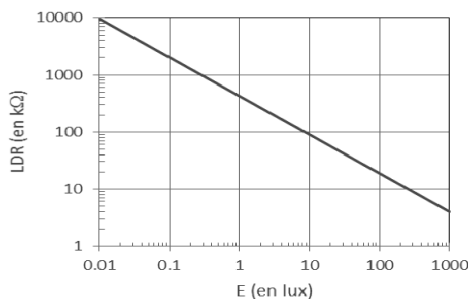
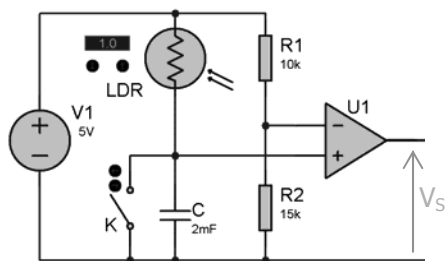
10. En déduire la plage de validité du signal Vpa.

Exercice 6.20 – Mesure de temps d'exposition d'une photo

Une LDR (Light Dependent Resistor) est un composant dont la valeur de sa résistance varie en fonction de l'éclairement reçu E (en lux).

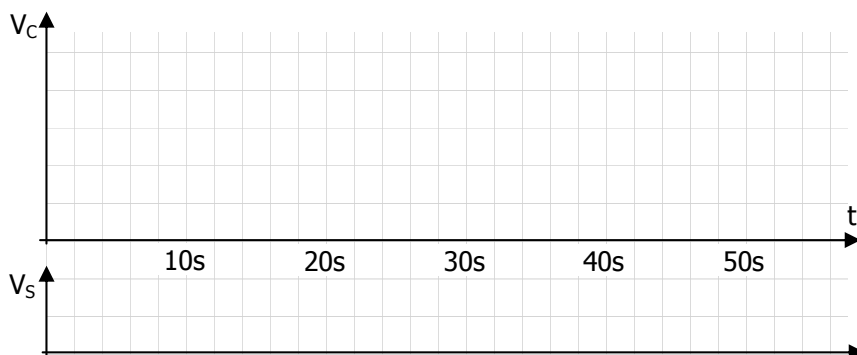
Pour la LDR utilisée, on a la fonction de transfert suivante : $R_{(\text{en k}\Omega)} = 426 \cdot E^{-0,676}$

On donne le montage dans lequel est inséré la LDR ainsi que sa caractéristique :



L'ALI U1 est alimenté entre 0 V et +5 V. L'interrupteur K est fermé pour $t < 0$.

1. Calculer les valeurs de la résistance de la LDR pour des éclairements de 300 et 1000 lux.
2. À l'instant $t = 0$, on ouvre l'interrupteur K : quelle est la valeur de la tension aux bornes du condensateur $V_{C(0)}$ à cet instant ?
3. Donner la constante de temps τ_{charge} pour la charge du condensateur C pour les deux valeurs d'éclairements de 300 et 1000 lux.
4. Tracer l'allure de la tension V_C pour les deux éclairements de 300 et 1000 lux.



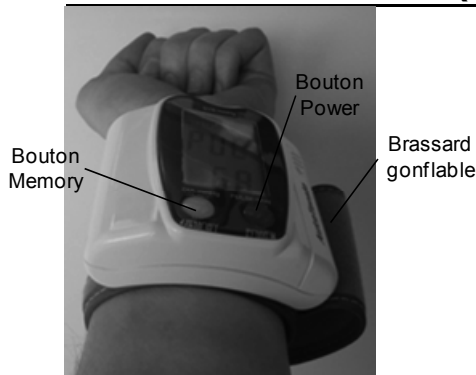
5. Donner le mode de fonctionnement de l'ALI U1.

6. À partir du théorème de Millman, calculer la valeur de la tension présente sur l'entrée – de l'ALI U1.
7. Sur le chronogramme ci-dessus, tracer l'allure du signal V_S pour les éclaircissements de 300 et 1000 lux.

On définit le temps d'exposition t_{expo} comme étant la durée entre le moment où l'interrupteur K s'ouvre et le moment où le signal V_S passe au niveau logique haut.

8. Sur le chronogramme ci-dessus, déterminer les temps d'exposition pour les éclaircissements de 300 et 1000 lux.

Exercice 6.21 – Tensiomètre (Bac SI)



L'Étude Nationale Nutrition Santé (ENNS) a permis d'estimer à 31 % l'hypertension artérielle dans la population des 18 à 74 ans en 2006-2007. Près de 20 % des personnes ayant une hypertension connue n'étaient pas traitées.

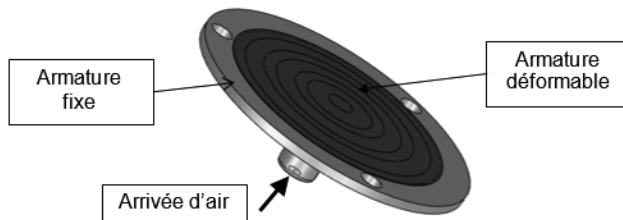
L'hypertension artérielle est définie comme une élévation de la pression du sang dans les artères, par rapport à une valeur dite « normale ».

Elle est un facteur de risque majeur et fréquent de nombreuses maladies cardiovasculaires. Il est donc essentiel de détecter, traiter et contrôler l'hypertension artérielle.

Mesure de la pression dans le brassard

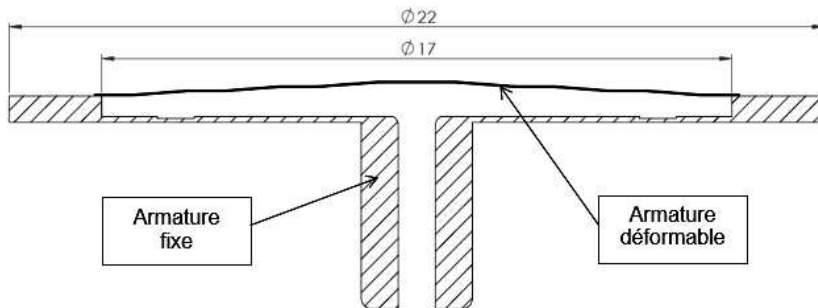
La pression dans la poche du brassard, grandeur essentielle du système, est mesurée par un capteur de pression capacitif constitué de deux parties :

- une armature fixe métallique ;
- une armature déformable en silicium appelée membrane.



Principe de fonctionnement : le principe du capteur de pression capacitif repose sur la variation de sa capacité en fonction de la pression appliquée. La différence

de pression entraîne la variation de l'épaisseur de la couche d'air entre les armatures, d'où une variation de la capacité de la cellule. Inséré dans une chaîne d'acquisition, il permet d'obtenir une information électrique, image des déformations élastiques de la membrane, et donc de la pression.



En l'absence de pression appliquée, la capacité intrinsèque de la cellule est celle d'un condensateur plan. Elle est donc définie par :

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

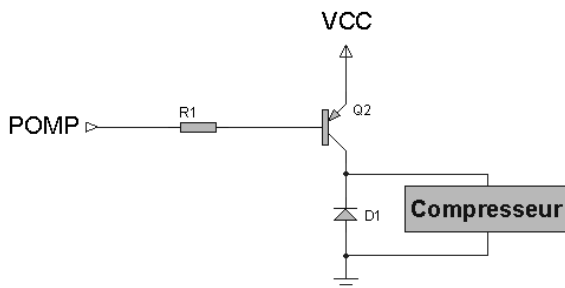
avec :

- ϵ_0 , permittivité électrique absolue du vide, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$;
- $\epsilon_r = 1$, permittivité relative de l'isolant (ici l'air), sans unité ;
- A, aire plane, en m^2 , sous la surface de l'armature déformable ;
- d, distance moyenne en m entre l'armature mobile et l'armature fixe, soit $d = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

1. Calculer la valeur de la capacité lorsqu'aucune pression ne s'exerce sur la membrane déformable.
2. Indiquer pourquoi la capacité diminue quand la pression augmente.

Commande du compresseur

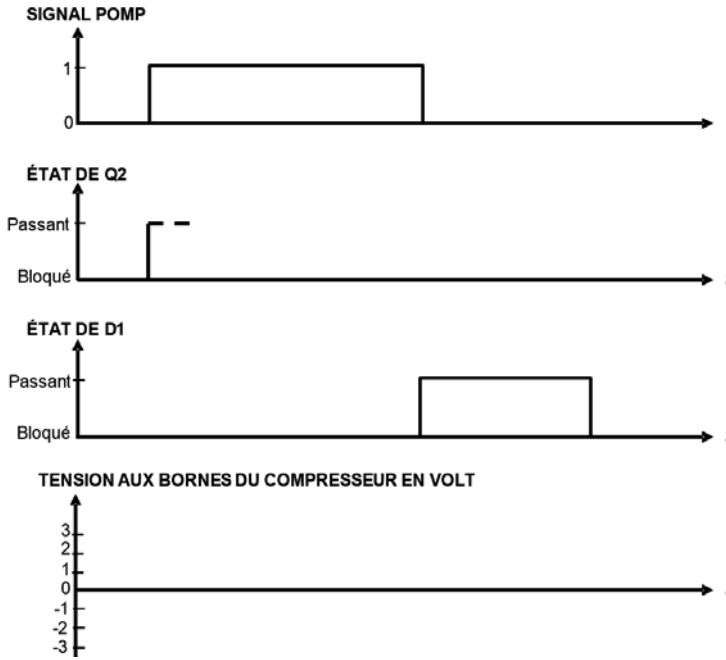
Le compresseur, alimenté à l'aide de deux piles de 1,5 V en série soit $V_{CC} = 3 \text{ V}$, est commandé par le montage ci-dessous. Le signal POMP issu du microcontrôleur attaque la base du transistor nommé Q2 :



3. Expliquer la fonction de ce montage.

La diode D1 est une diode de roue libre. Sa tension de seuil est de 0,6 V.

4. Analyser puis compléter les deux signaux (état de Q2 et tension aux bornes du compresseur) illustrant la commande du compresseur :



➔ Solutions

Exercice 6.1 – Identification de fonctions

A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ET

A	B	C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

NON-OU

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

OU

A	B	C	D
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

NON-ET

Exercice 6.2

1. Liste des fonctions logiques utilisées :

- une fonction « NON » ;
- et une fonction « NON-ET ».

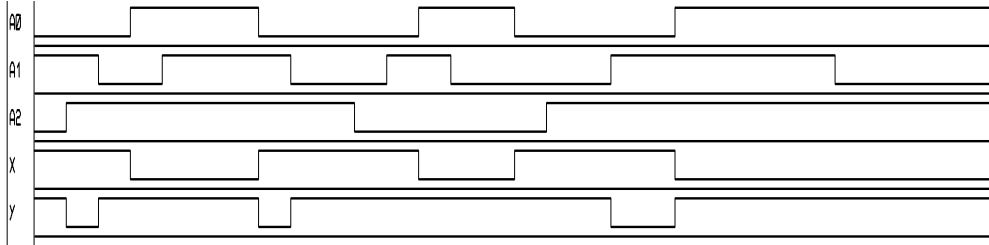
2.

X	A1	A2	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

3.

A0	A1	A2	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

4.

**Exercice 6.3**

1. Liste des noms des fonctions logiques utilisées :

- une fonction « NON-OU » ;
- une fonction « NON-ET » ;
- et une fonction « ET ».

2. Variables d'entrée : A0, A1, B1 et B2

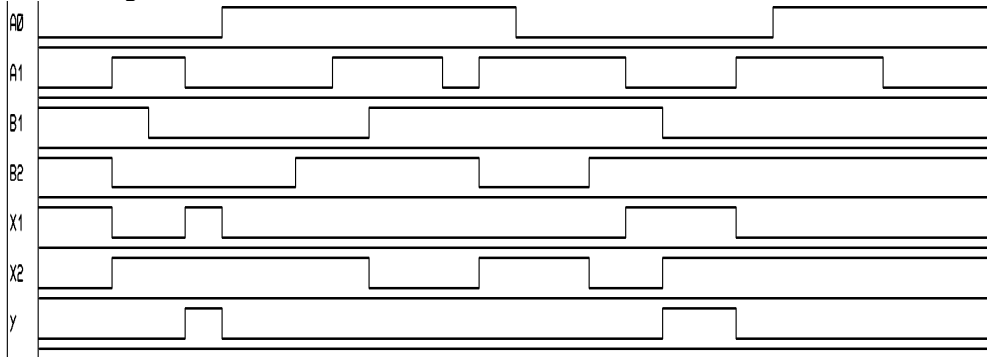
La table de vérité comportera donc $2^4 = 16$ lignes.

Variables de sortie : Y

3. Table de vérité :

A0	A1	B1	B2	Y
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

4. Chronogramme :

**Exercice 6.4 – Simplification d'équations**

$$S_1 = a \cdot \bar{a} + a \cdot a \cdot b$$

$$S_1 = 0 + a \cdot b$$

$$S_1 = a \cdot b$$

$$S_2 = a \cdot (a + b) \cdot c + c \cdot 1$$

$$S_2 = c \cdot [a \cdot (a + b) + 1]$$

$$S_2 = c \cdot [1]$$

$$S_2 = c$$

$$S_3 = \bar{a} \cdot c \cdot (\bar{b} + b) + a \cdot c \cdot (b + \bar{b})$$

$$S_3 = \bar{a} \cdot c \cdot (1) + a \cdot c \cdot (1)$$

$$S_3 = \bar{a} \cdot c + a \cdot c$$

$$S_3 = c \cdot (\bar{a} + a)$$

$$S_3 = c \cdot (1)$$

$$S_3 = c$$

$$S_4 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c + \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot c$$

$$S_4 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot (\bar{c} + c) + \bar{a} \cdot b \cdot (\bar{c} + c) + a \cdot b \cdot c$$

$$S_4 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot (1) + \bar{a} \cdot b \cdot (1) + a \cdot b \cdot c$$

$$S_4 = \bar{a} \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot b + a \cdot b \cdot c$$

$$S_4 = \bar{a} \cdot (\bar{b} + b) + a \cdot b \cdot c$$

$$S_4 = \bar{a} \cdot (1) + a \cdot b \cdot c$$

$$S_4 = \bar{a} + a \cdot b \cdot c$$

À partir du théorème de l'absorption : $S_4 = \bar{a} + b \cdot c$

Exercice 6.5 – Équation logique d'une table de vérité

$$S_8 = \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot b \cdot \bar{c} + a \cdot b \cdot c$$

$$S_8 = \bar{a} \cdot b \cdot (\bar{c} + c) + a \cdot b \cdot (\bar{c} + c)$$

$$S_8 = \bar{a} \cdot b \cdot (1) + a \cdot b \cdot (1)$$

$$S_8 = \bar{a} \cdot b + a \cdot b$$

$$S_8 = b \cdot (\bar{a} + a)$$

$$S_8 = b \cdot (1)$$

$$S_8 = b$$

$$S_9 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c + \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b \cdot c + a \cdot \bar{b} \cdot c + a \cdot b \cdot c$$

$$S_9 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c + \bar{a} \cdot b \cdot (\bar{c} + c) + a \cdot c \cdot (\bar{b} + b)$$

$$S_9 = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c + \bar{a} \cdot b + a \cdot c$$

$$S_9 = \bar{a} \cdot (\bar{b} \cdot c + b) + c \cdot (\bar{a} \cdot \bar{b} + a)$$

$$S_9 = \bar{a} \cdot (c + b) + c \cdot (\bar{b} + a)$$

$$S_9 = \bar{a} \cdot c + \bar{a} \cdot b + c \cdot a + c \cdot \bar{b}$$

Exercice 6.6 – Store automatique

1. Variables d'entrée : S, V, BP_{monter} et BP_{descendre}

Sortie : M_M et M_D

2. Table de vérité :

V	S	BP _{monter}	BP _{descendre}	M _M	M _D
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	1	0
1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	0

3. Équations logiques des sorties M_M et M_D :

$$M_M = \bar{V} \cdot \bar{S} \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot \overline{BP_{descendre}} + \bar{V} \cdot S \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot \overline{BP_{descendre}} + V$$

$$M_M = \bar{V} \cdot \overline{BP_{descendre}} \cdot BP_{monter} \cdot (\bar{S} + S) + V \text{ or } \bar{a} + a = 1$$

$$M_M = \bar{V} \cdot \overline{BP_{descendre}} \cdot BP_{monter} \cdot 1 + V \text{ or } a \cdot 1 = a$$

$$M_M = \bar{V} \cdot \overline{BP_{descendre}} \cdot BP_{monter} + V$$

D'après les lois d'absorption : $a + \bar{a} \cdot b = a + b$ donc : $M_M = \overline{BP_{descendre}} \cdot BP_{monter} + V$

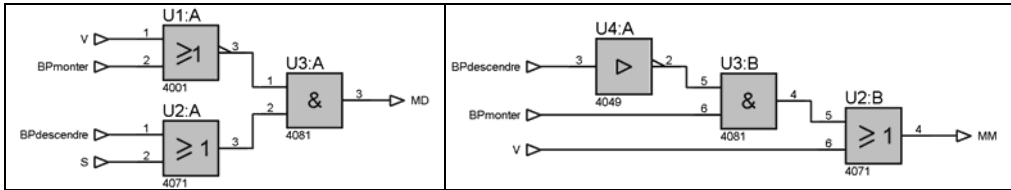
$$M_D = \bar{V} \cdot \bar{S} \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot BP_{descendre} + \bar{V} \cdot S \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot \overline{BP_{descendre}} + \bar{V} \cdot S \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot BP_{descendre}$$

$$M_D = \bar{V} \cdot \bar{S} \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot BP_{descendre} + \bar{V} \cdot S \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot (\overline{BP_{descendre}} + BP_{descendre})$$

$$M_D = \bar{V} \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot (\bar{S} \cdot BP_{descendre} + S)$$

$$M_D = \bar{V} \cdot \overline{BP_{monter}} \cdot (BP_{descendre} + S)$$

$$M_D = \bar{V} + BP_{monter} \cdot (BP_{descendre} + S)$$

4. Logigrammes des sorties M_M et M_D :

Exercice 6.7 – Scooba (Bac SI)

1.

Octet reçu ID7		Roue gauche <i>Soulevée / Non soulevée</i>	Roue droite <i>Soulevée / Non soulevée</i>	Contact gauche <i>Activé / Non activé</i>	Contact droit <i>Activé / Non activé</i>
Hexa	Binaire				
0x00	00000000	Non soulevée	Non soulevée	Non activé	Non activé
0x0C	00001100	Soulevée	Soulevée	Non activé	Non activé
0x0B	00001011	Soulevée	Non soulevé	Activé	Activé
0x04	00000100	Non soulevée	Soulevée	Non activé	Non activé

2. Pour isoler les 2 bits correspondant aux ILS, le masque binaire sera 0000 1100. Pour isoler les 2 bits correspondant aux contacts du pare-chocs, le masque binaire sera 0000 0011.

Pour effectuer un masquage de bit en isolant seulement les 2 bits souhaités, il suffit d'effectuer un ET logique entre le contenu de la variable ID7 et un des deux masques définis ci-dessus. Donc :

- Wheel = ID7 ET 00001100_b = ID7 ET 0C_h
- Bump = ID7 ET 00000011_b = ID7 ET 03_h

3.

Situation	Variable Bump (en hexadécimal)	Localisation du choc
N°1	0x00	Pas de choc
N°2	0x03	Choc avant
N°3	0x01	Choc droit
N°4	0x02	Choc gauche

Avec 2 capteurs et l'utilisation d'un masquage de bit, il est possible de déterminer 4 situations. Ce procédé permet ainsi d'économiser un capteur de choc au centre du nettoyeur Scooba pour déterminer les chocs avant.

Exercice 6.8 – Loi des nœuds

1. Loi des nœuds au point M : $i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4 \rightarrow i_5 = i_2 + i_4 - i_1 - i_3$

Application numérique : $i_5 = 3 \cdot 10^{-3} + (-3 \cdot 10^{-3}) - (-6 \cdot 10^{-3}) - 5 \cdot 10^{-3}$
 $i_5 = 1 \text{ mA}$

2. Loi des nœuds au point A : $i_1 = i_2 + i_4 \rightarrow i_2 = i_1 - i_4$

Application numérique : $i_2 = 10 \cdot 10^{-3} - (-2 \cdot 10^{-3}) \rightarrow i_2 = 12 \text{ mA}$

Loi des nœuds au point B : $i_2 = i_3 + i_5 \rightarrow i_5 = i_2 - i_3$

Application numérique : $i_5 = 12 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3} \rightarrow i_5 = 9 \text{ mA}$

Exercice 6.9 – Loi des mailles

1. D'après la loi des mailles, on a : $u_1 + u_2 - u_3 - u_4 = 0$

Soit : $u_4 = u_1 + u_2 - u_3$

Application numérique : $u_4 = 20 + (-5) - 5 \rightarrow u_4 = 10 \text{ V}$

2. Calcul de u_3 : d'après la loi des mailles, $u_1 + u_2 - u_3 = 0$

$$u_3 = u_1 + u_2 = 20 + 5 = 25 \text{ V}$$

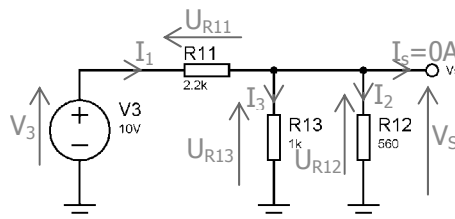
Calcul de u_5 : d'après la loi des mailles, $u_1 - u_5 + u_4 = 0$

$$u_5 = u_1 + u_4 = 20 + (-8) = 12 \text{ V}$$

Calcul de u_6 : d'après la loi des mailles, $u_6 = 0$

Exercice 6.10

1. Fléchages des tensions U_{R11} , U_{R12} et U_{R13} :



2. $U_{R13} = R13 \cdot I_3 \rightarrow U_{R13} = 1000 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} \rightarrow U_{R13} = 1,4 \text{ V}$

3. $U_{R13} - U_{R12} = 0 \rightarrow U_{R12} = U_{R13}$

$$4. U_{R12} = R12 \cdot I_2 \rightarrow I_2 = \frac{U_{R12}}{R12} \rightarrow I_2 = \frac{1,4}{560} \rightarrow I_2 = 2,5 \text{ mA}$$

$$5. I_1 - I_2 - I_3 - I_5 = 0 \rightarrow I_1 = I_2 + I_3 + I_5 \\ I_1 = 2,5 \cdot 10^{-3} + 1,4 \cdot 10^{-3} + 0 \rightarrow I_1 = 3,9 \text{ mA}$$

6. Calcul de la tension U_{R11} avec 2 méthodes :

Loi d'Ohm	Loi des mailles
$U_{R11} = R11 \cdot I_1$ $U_{R11} = 2,2 \cdot 10^3 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}$ $U_{R11} = 8,6 \text{ V}$	$V_3 - U_{R11} - U_{R13} = 0$ $U_{R11} = V_3 - U_{R13}$ $U_{R11} = 10 - 1,4$ $U_{R11} = 8,6 \text{ V}$

$$7. V_s = \frac{\frac{V_3}{R11} + \frac{0}{R12} + \frac{0}{R13}}{\frac{1}{R11} + \frac{1}{R12} + \frac{1}{R13}} \rightarrow V_s = \frac{\frac{10}{2200}}{\frac{1}{2200} + \frac{1}{560} + \frac{1}{1000}} \rightarrow V_s = 1,4 \text{ V}$$

Exercice 6.11 – Résistance d'un fil de cuivre

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \rightarrow R = 18 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{200}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 1,4 \Omega$$

Exercice 6.12 – Association de résistances

$$1. R_4 \text{ et } R_5 \text{ sont en parallèle : } \frac{1}{R_{4-5}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \rightarrow R_{4-5} = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}}$$

$$\text{Application numérique : } R_{4-5} = \frac{1}{\frac{1}{10 \cdot 10^3} + \frac{1}{560}} = 530,3 \Omega$$

2.

- R_2 et R_{4-5} sont en série : $R_{2-4-5} = R_2 + R_{4-5} = 1000 + 530,3 = 1530,3 \Omega$

- R_3 et R_{2-4-5} sont en parallèle : $\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{2-4-5}}$

$$\text{Soit : } R_{EQ} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{2-4-5}}}$$

$$\text{Application numérique : } R_{EQ} = \frac{1}{\frac{1}{2,2 \cdot 10^3} + \frac{1}{1530,3}} = 902,5 \Omega$$

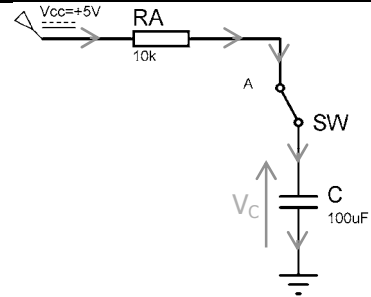
Exercice 6.13 – Montage potentiométrique

$$1. \text{ À partir du théorème de Millman : } V_S = \frac{\frac{V_{CC}}{R6} + \frac{0}{RV2}}{\frac{1}{R6} + \frac{1}{RV2}} = \frac{\frac{V_{CC} \cdot RV2}{R6 \cdot RV2}}{\frac{RV2 + R6}{R6 \cdot RV2}} = \frac{V_{CC} \cdot RV2}{RV2 + R6}$$

2. Si RV2 est au minimum : $RV2 = 0 \Omega \rightarrow V_S = 0 V$
 Si RV2 est au maximum : $RV2 = 1000 \Omega \rightarrow V_S = 2,97 V$

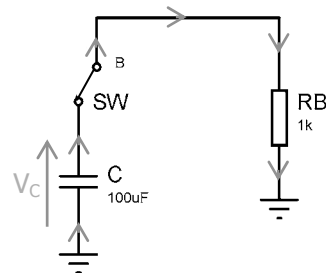
Exercice 6.14 – Charge et décharge d'un condensateur

1. Parcours du courant de charge du condensateur C (commutateur SW en position A) :



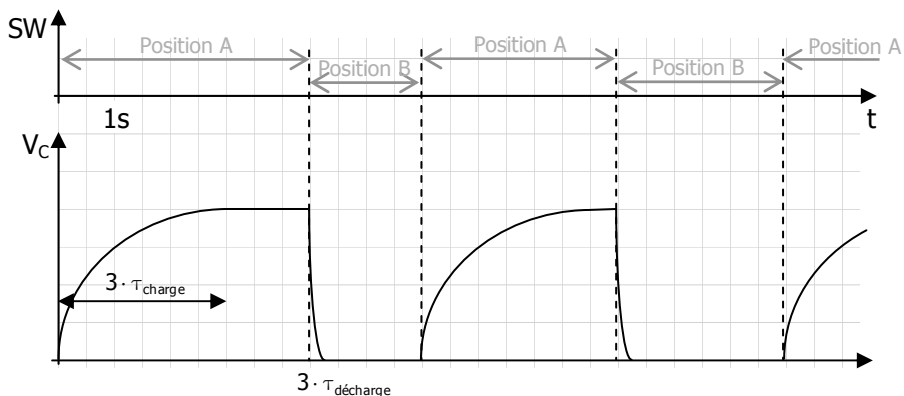
2. $\tau_{\text{charge}} = RA \cdot C = 10 \cdot 10^3 \times 100 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ s}$

3. Parcours du courant de décharge du condensateur C (commutateur SW en position B) :



4. $\tau_{\text{décharge}} = RB \cdot C = 1 \cdot 10^3 \times 100 \cdot 10^{-6} = 0,1 \text{ s}$

5. Chronogramme :



Exercice 6.15 – Bus Watt System (Bac SI 2017)

1. Le temps maximum disponible pour une durée de recharge inférieure à 20 secondes, est de :

$$t_{\max} = t_{\text{arrêt max}} - t_{\text{déploiement bras}} - t_{\text{repliement bras}} = 20 - 6 - 4 = 10 \text{ secondes}$$

2. La variation d'énergie stockée dans un module de 165 farads pour une variation de la tension nominale de 50 % à 100 % vaut :

$$W_{\max} - W_{\min} = \frac{1}{2} \cdot C_{165F} \cdot \left(\frac{100}{100} \cdot U_{\text{nominale}} \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot C_{165F} \cdot \left(\frac{50}{100} \cdot U_{\text{nominale}} \right)^2$$

$$W_{\max} - W_{\min} = \frac{1}{2} \times 165 \times 48^2 - \frac{1}{2} \times 165 \times 24^2 = 190\,080 - 47\,520$$

$$W_{\max} - W_{\min} = 142\,560 \text{ Joules}$$

Pour l'ensemble des 48 modules, l'énergie est de :

$$W_{\text{TB}} = 48 \cdot (W_{\max} - W_{\min}) = 6\,842\,880 \text{ Joules}$$

$$\text{Soit, } W_{\text{TB}} = \frac{6\,842\,880 \text{ Joules}}{3600} = 1,9 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

3. Côté bus $C_{1\text{eq}}$: association en dérivation de 3 branches constituées chacune de 16 modules de supercondensateurs raccordés en série.

Pour une branche : $\frac{1}{C_{1\text{brancheB}}} = \frac{1}{C_{B1}} + \frac{1}{C_{B2}} + \dots + \frac{1}{C_{B16}}$, or $C_{B1} = C_{B2} = \dots = C_{B16} = C_B$

$$\text{d'où : } \frac{1}{C_{1\text{brancheB}}} = \frac{16}{C_B}, \text{ soit : } C_{1\text{brancheB}} = \frac{C_B}{16}$$

étant donné qu'il y a 3 branches, alors : $C_{1\text{eq}} = 3 \times \frac{C_B}{16} = 3 \times \frac{165}{16} = 30,94 \text{ F}$

Côté Totem $C_{2\text{eq}}$: association en dérivation de 2 branches constituées chacune de 14 modules de supercondensateurs raccordés en série.

Pour une branche : $\frac{1}{C_{1\text{brancheA}}} = \frac{1}{C_{A1}} + \frac{1}{C_{A2}} + \dots + \frac{1}{C_{A14}}$, or $C_{A1} = C_{A2} = \dots = C_{A14} = C_A$

$$\text{d'où : } \frac{1}{C_{1\text{brancheA}}} = \frac{14}{C_A}, \text{ soit : } C_{1\text{brancheA}} = \frac{C_A}{14}$$

étant donné qu'il y a 2 branches, alors : $C_{2\text{eq}} = 2 \times \frac{C_A}{14} = 2 \times \frac{150}{14} = 21,43 \text{ F}$

4. Pour une variation de la tension U_1 de 756 V à 382 V, la variation d'énergie vaut :

$$W_{\max} - W_{\min} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_{1\text{max}}^2 - \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_{1\text{min}}^2 = \frac{1}{2} \times 21,4 \times 756^2 - \frac{1}{2} \times 21,4 \times 382^2$$

$$W_{\max} - W_{\min} = 4\,554\,048 \text{ J} = 1265 \text{ W} \cdot \text{h}$$

Les pertes Joules, lors de cet échange d'une durée de 10 secondes, sont égales à :

$$W_{\text{Joule}10s} = 49,4 + 80,7 = 130,1 \text{ W} \cdot \text{h}$$

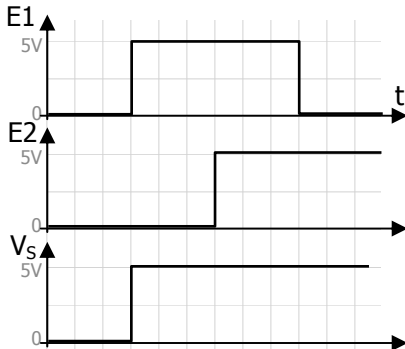
L'énergie transférée est donc de :

$$W_{\text{transfere}} = (W_{\text{max}} - W_{\text{min}}) - W_{\text{Joule}10s} = 1265 - 130,1 = 1134,9 \text{ W} \cdot \text{h}$$

Le système est donc bien capable d'assurer la recharge de 1038 W · h requise.

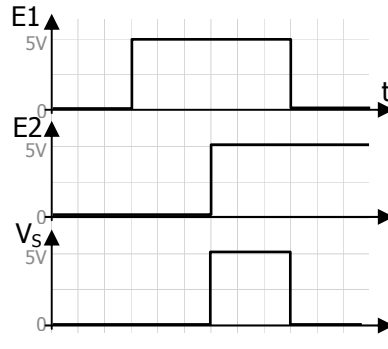
Exercice 6.16 – Fonctions logiques à diodes

1.



2. Fonction logique OU.

3.



4. Fonction logique ET.

Exercice 6.17 – Redressement double alternance

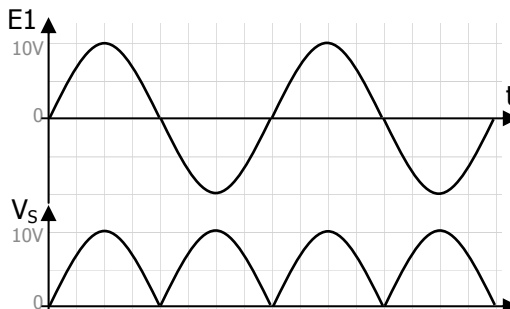
1. Diodes passantes sur l'alternance positive de V_E : D1 et D3.

2. Les diodes D1 et D3 sont équivalentes à des interrupteurs fermés et les diodes D2 et D4 à des interrupteurs ouverts, ainsi on a : $V_S = V_E$.

3. Diodes passantes sur l'alternance négative de V_E : D2 et D4.

4. Les diodes D2 et D4 sont équivalentes à des interrupteurs fermés et les diodes D1 et D3 à des interrupteurs ouverts, ainsi on a : $V_S = -V_E$.

5. Chronogramme :



Exercice 6.18 – Pont en H

1. $V_{GS Q2} = MLI \cdot SENS = \overline{MLI} + \overline{SENS}$ et $V_{GS Q4} = \overline{MLI} \cdot \overline{SENS} = \overline{MLI} + \overline{SENS}$

2. Table de vérité du « pont en H » :

SENS	MLI	Niveau logique 0 ou 1		État des transistors : B (bloqué) ou P (passant)						U _{mot}
		V _{GS Q2}	V _{GS Q4}	Q5	Q6	Q1	Q2	Q3	Q4	
0	1	0	1	P	B	P	B	B	P	+12 V
X	0	1	1	B	B	B	P	B	P	0 V
1	1	1	0	B	P	B	P	P	B	-12 V

Exercice 6.19 – Pré-ampli audio

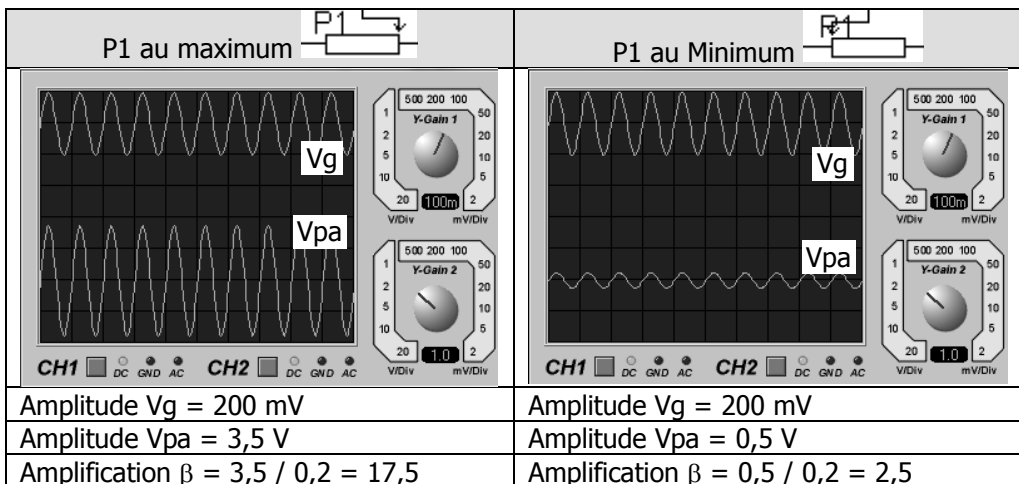
1. La sortie est rebouclée sur l'entrée « - », donc l'ALI fonctionne en linéaire.
Soit $V^+ = V^-$

2.
$$V^- = \frac{0}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2 + P1}} + \frac{V_{pa}}{\frac{1}{R2 + P1}} = \frac{R1}{R1 + R2 + P1} \cdot V_{pa}$$

3. On sait que $V^+ = V^-$, or $V^+ = V_g$: donc : $V_g = \frac{R1}{R1 + R2 + P1} \cdot V_{pa}$
Soit : $V_{pa} = \frac{R1 + R2 + P1}{R1} \cdot V_g$

4. Lorsque $P1 = 0 \Omega$, alors $\beta = \frac{R1 + R2}{R1} = 2,42$
Lorsque $P1 = 50 k\Omega$, alors $\beta = \frac{R1 + R2 + P1}{R1} = 17,6$

5. Simulations :



6. On déduit de la simulation précédente, que le potentiomètre P1 permet de régler l'amplitude du son. Il agit donc sur le volume sonore.

7. Il n'y a pas de rebouclage de la sortie sur l'entrée « - », donc les ALI fonctionnent en comparateur.

Fonctionnement de U1:A	Fonctionnement de U1:B
Si $V_{pa} > V^- (0,13 \text{ V})$	Si $V_{pa} < V^+ (-0,13 \text{ V})$
Alors $V_{S1} = +12 \text{ V}$	Alors $V_{S2} = +12 \text{ V}$
Sinon $V_{S1} = -12 \text{ V}$	Sinon $V_{S2} = -12 \text{ V}$

$$8. V_{U1:A}^- = \frac{\frac{+12}{R2} + \frac{-12}{R1+R3}}{\frac{1}{R2} + \frac{1}{R1+R3}} = 0,13 \text{ V}$$

$$9. V_{U1:B}^+ = \frac{\frac{+12}{R1+R2} + \frac{-12}{R3}}{\frac{1}{R1+R2} + \frac{1}{R3}} = -0,13 \text{ V}$$

10. La LED sera éteinte tant que le signal V_{pa} sera compris entre $-0,13 \text{ V}$ et $+0,13 \text{ V}$.

Exercice 6.20 – Mesure de temps d'exposition d'une photo

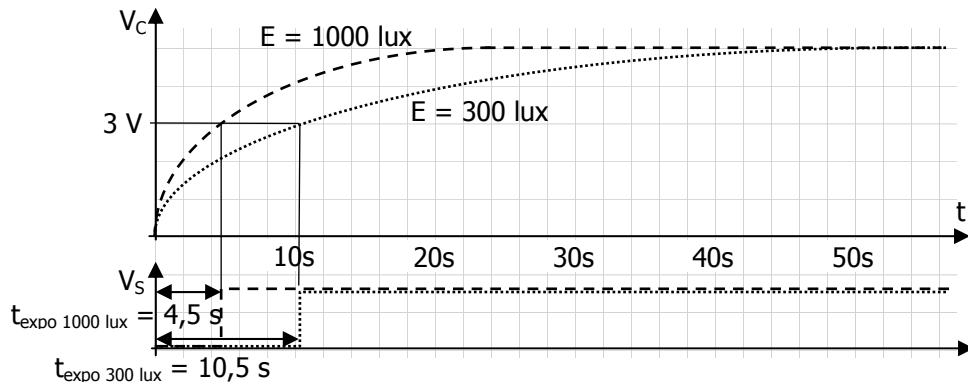
1. $LDR_{(300 \text{ lux})} = 9 \text{ k}\Omega$
 $LDR_{(1000 \text{ lux})} = 4 \text{ k}\Omega$

2. À l'instant $t = 0$, le condensateur n'a pas le temps de se charger et donc $V_{C(0)} = 0 \text{ V}$.

3. $\tau_{\text{charge}} = LDR \cdot C$:

- Pour $E = 300 \text{ lux}$: $\tau_{\text{charge}} = 9 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 18 \text{ s}$
- Pour $E = 1000 \text{ lux}$: $\tau_{\text{charge}} = 4 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ s}$

4. Allure de la tension V_C pour les deux éclairagements de 300 et 1000 lux.



5. Il n'y a pas de rebouclage de la sortie V_S sur l'entrée $-$, donc l'ALI U1 fonctionne en comparateur.

- Si $V_C < V^-$ alors $V_S = 0$
- Si $V_C > V^-$ alors $V_S = 5 \text{ V}$

$$6. V^- = \frac{\frac{5}{R_1} + \frac{0}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \text{ soit } V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 5 \rightarrow V^- = 3 \text{ V}$$

7. Voir le chronogramme du signal V_S ci-dessus.

8. Pour $E = 300 \text{ lux}$: $t_{\text{expo}} = 10,5 \text{ s}$
 Pour $E = 1000 \text{ lux}$: $t_{\text{expo}} = 4,5 \text{ s}$

Exercice 6.21 – Tensiomètre (Bac SI 2013)

1. À partir des valeurs numériques fournies, il vient :

$$C_0 = 1,8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\pi \cdot (8,5 \cdot 10^{-3})^2}{0,4 \cdot 10^{-3}} = 5,02 \text{ pF}$$

2. En présence de pression, la membrane se déforme et la distance d entre les armatures augmente, provoquant ainsi une diminution de la capacité.

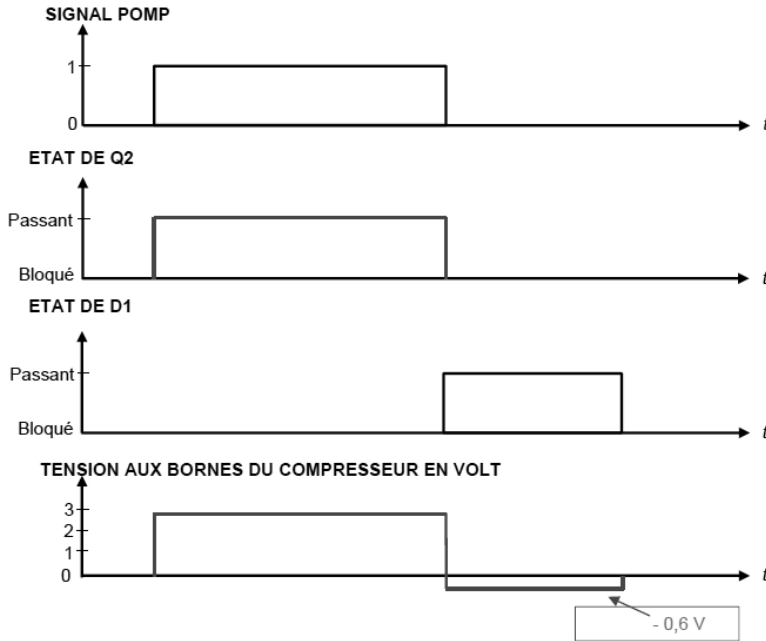
3. Ce montage réalise la fonction commuter et permet l'alimentation électrique ou non du compresseur en fonction de l'état du signal POMP.

4. Lorsque le signal POMP est à l'état haut (1), le transistor est passant. La tension aux bornes du compresseur est alors $V_{CC} = 3 \text{ V}$.

Lorsque le signal POMP est à l'état bas (0), le transistor est bloqué. La tension aux bornes du compresseur est la tension de seuil (ici $-0,6\text{ V}$ vu le sens de montage de la diode).

La diode de roue libre sert à éviter les surtensions aux bornes du compresseur lorsque le transistor devient bloqué.

On en déduit le chronogramme :



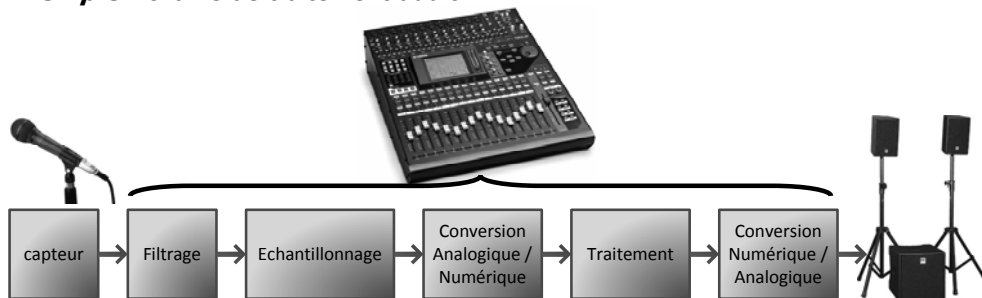
Chapitre 7

Acquisition

Le traitement numérique de l'information se décompose en plusieurs fonctions :

- acquisition des grandeurs physiques via des capteurs (pression, température, position...);
- filtrage ;
- échantillonnage et conversion des données du domaine analogique vers le domaine numérique ;
- traitement informatique des données ;
- restitution des données (conversion numérique vers analogique).

Exemple : chaîne de traitement audio



1. Échantillonnage

1.1. Définitions

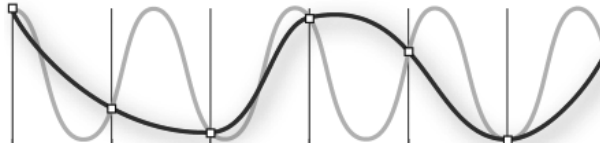
L'échantillonnage consiste à transmettre un signal en captant des valeurs à intervalles réguliers.

La cadence à laquelle les valeurs sont captées, s'appelle fréquence d'échantillonnage ou taux d'échantillonnage (unité : échantillons/seconde).

N.B. : le taux d'échantillonnage correspond au nombre d'échantillons numériques pris par seconde.

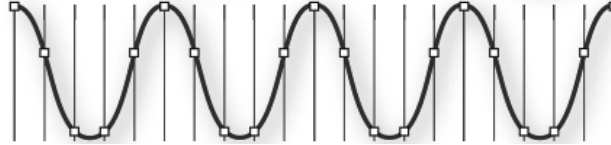
Exemple : on échantillonne un signal (gris clair) avec deux fréquences différentes A et B

▪ fréquence A :



(Les carrés correspondent aux valeurs échantillonnées à chaque période.)

▪ fréquence B :



La fréquence A est trop faible puisque les points captés (courbe en gris foncé) ne permettent pas de recréer le signal original. La fréquence B est mieux adaptée.

1.2. Théorème de Shannon

Pour reproduire un signal donné, le théorème de Shannon dit que la fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale du signal analogique (à numériser) :

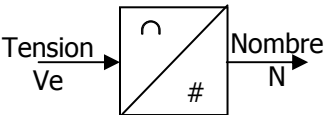
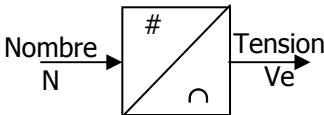
$$f_{\text{échantillonnage}} \geq 2 \cdot f_{\text{max signal analogique}}$$

Exemple : les CD utilisent un taux d'échantillonnage de 44 100 échantillons par seconde. Or l'oreille humaine entend les sons de fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. On vérifie alors le théorème de Shannon :

$$f_{\text{échantillonnage}} (44,1 \text{ kHz}) \geq 2 \cdot f_{\text{max signal analogique}} (20 \text{ kHz})$$

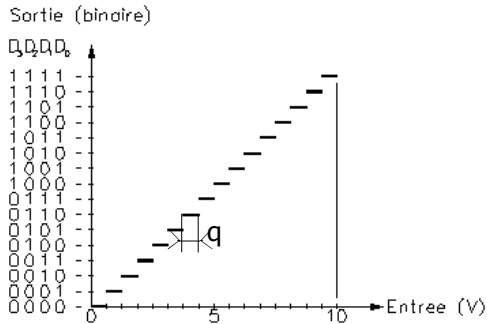
2. Numérisation

2.1. Conversion analogique ↔ numérique

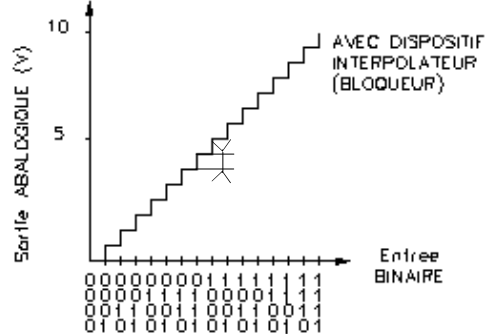
Convertisseur analogique / numérique (CAN)	Convertisseur numérique / analogique (CNA)
<p>Montage électronique permettant de convertir une tension électrique V_e en un nombre binaire N codé sur n bits.</p> 	<p>Montage électronique permettant de convertir un nombre binaire N codé sur n bits en une tension électrique V_e.</p> 

Exemple

convertisseur +10 V – 4 bits :

**Exemple**

convertisseur +10 V – 4 bits :



2.2. Résolution, tension pleine échelle et quantum

- Tension pleine échelle (PE) : amplitude maximale de la tension analogique.
- Résolution (n) : nombre de bits du convertisseur (généralement : 8, 10, 12...)
- Quantum (q) : plus petite plage de tension pour laquelle la conversion analogique / numérique ne varie pas :

$$q = \frac{PE}{2^n - 1}$$

- Fonctions de transfert :

Convertisseur analogique / numérique (CAN)	Convertisseur numérique / analogique (CNA)
$D = \frac{V_E}{q}$ <p>V_E : tension d'entrée du CAN. D : nombre décimal en sortie du convertisseur.</p> <p>Soit : $D = \frac{2^n - 1}{PE} \cdot V_E$</p>	$V_S = q \cdot D$ <p>D : nombre décimal en entrée du convertisseur. V_S : tension de sortie du CNA.</p> <p>Soit : $V_S = \frac{PE}{2^n - 1} \cdot D$</p>

Exemple : pour un convertisseur 10V sur 4 bits, on a

- tension pleine échelle : $PE = 10 \text{ V}$;
- résolution : 4 bits ;
- quantum : $q = \frac{10}{2^4 - 1} = 0,67 \text{ V}$;

- exemples de valeurs en sortie du convertisseur pour quelques valeurs d'entrée :

Convertisseur analogique / numérique (CAN)	Convertisseur numérique / analogique (CNA)
Pour $0 \leq VE < 0,67 V, D = 0000$	Pour $D = 0000, VS = 0,67 V$
Pour $0,67 V \leq VE < 1,33 V, D = 0001$	Pour $D = 0011, VS = 2 V$
Pour $2,67 V \leq VE < 3,33 V, D = 0100$	Pour $D = 1000, VS = 5,33 V$

3. Filtrage

Un filtre est un montage électronique permettant de laisser passer certaines fréquences et de couper (supprimer) les autres.

Il existe :

- 2 familles de filtres :
 - Filtre passif :
 - ✓ utilisation de composants passifs (R, L et C)
 - ✓ pas d'amplification de puissance
 - Filtre actif :
 - ✓ utilisation de composants passifs et actifs (ALI, transistor)
 - ✓ apporte une amplification de puissance
- 4 types de filtres :

Type	Passe-bas	Passe-haut
Réponse fréquentielle (diagramme de Bode)		
Fonction de transfert (filtre du 1 ^{er} ordre)	$\underline{T}_{(j\omega)} = \frac{T_0}{1 + j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}$	$\underline{T}_{(j\omega)} = T_0 \cdot \frac{j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}$
Type	Passe-bande	Réjecteur de bande
Réponse fréquentielle (diagramme de Bode)		
Fonction de transfert (filtre du 2 ^e ordre)	$\underline{T}_{(j\omega)} = T_0 \cdot \frac{j \cdot 2 \cdot m \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \cdot 2 \cdot m \cdot \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$	$\underline{T}_{(j\omega)} = T_0 \cdot \frac{1 + \left(j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 + j \cdot 2 \cdot m \cdot \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$

- N.B. :** ✓ « j » correspond à l'opérateur des nombres complexes (habituellement noté « i » en mathématiques) ;
 ✓ pulsation : ω (en rad/s) = $2\pi \cdot f$ (en Hz) ;
 ✓ ω_0 = pulsation de coupure $\rightarrow f_0$ = fréquence de coupure.

3.1. Fonction de transfert, gain, bande passante, déphasage

- Fonction de transfert (T) : équation exprimant l'amplification du signal de sortie par rapport au signal d'entrée :

$$\underline{T}_{(j,\omega)} = \frac{V_S}{V_E}$$

- Gain (G) en décibel (dB) : la fonction de transfert d'un filtre peut varier dans de très grandes proportions (par exemple dans un rapport de 1 à 1000) or on doit pouvoir visualiser correctement toutes les valeurs sur un graphique. Nous définissons alors une grandeur logarithmique : le gain.

$$G_{(f)} = 20 \cdot \log(|\underline{T}_{(j,\omega)}|)$$

Avec $|\underline{T}_{(j,\omega)}|$ = module de la fonction de transfert.

N.B. : quelques valeurs remarquables de la fonction logarithmique :

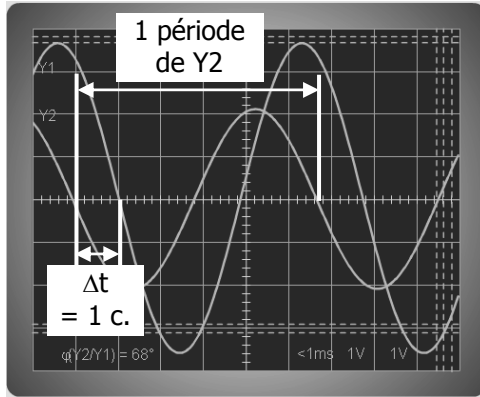
- $20 \cdot \log(1) = 0$ dB
 - $20 \cdot \log(10) = 20$ dB
 - $20 \cdot \log(100) = 20 \cdot \log(10^2) = 20 \cdot 2 \cdot \log(10) = 40$ dB
 - $20 \cdot \log(1000) = 20 \cdot \log(10^3) = 20 \cdot 3 \cdot \log(10) = 60$ dB
 - $20 \cdot \log(0,1) = 20 \cdot \log(1/10) = 20 \cdot \log(1) - 20 \cdot \log(10) = -20$ dB
 - $20 \cdot \log(0,01) = 20 \cdot \log(1/100) = 20 \cdot \log(1) - 20 \cdot \log(100) = -40$ dB
 - ...
- Bande passante à -3dB (BP) : intervalle de fréquences pour lequel on a un gain tel que : $G_{(f)} \geq G_{\text{MAX}} - 3\text{dB}$.

N.B. : la bande passante peut aussi être définie à partir de la fonction de transfert

par : $|\underline{T}_{(j,\omega)}| \geq \frac{T_{\text{MAX}}}{\sqrt{2}}$.

- Déphasage (φ) : correspond au décalage dans le temps, entre 2 sinusoïdes (de même fréquence). Le déphasage se mesure en radian (rad) ou en degré (°).

Exemple : calcul du déphasage φ entre les signaux Y1 et Y2



❶ Une période de la sinusoïde Y1 ou Y2 (5,6 carreaux sur l'oscillogramme) correspond à un angle de 360° (ou 2π rad).

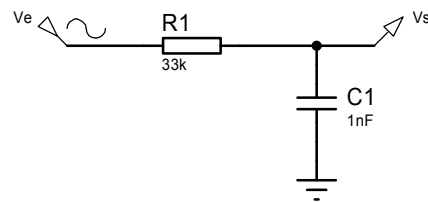
❷ La différence de temps entre les 2 signaux Δt mesure 1 carreau.

❸ Avec un produit en croix, on en déduit :

$$\varphi = \frac{\Delta t \times 360}{5,6} = \frac{1 \times 360}{5,6} = 64^\circ$$

3.2. Application sur un exemple : le filtre R-C

Soit le montage suivant :



On rappelle que l'impédance d'un condensateur vaut : $Z_C = \frac{1}{j \cdot C \cdot \omega}$.

❶ **Fonction de transfert :** d'après le théorème de Millman, on a :

$$V_s = \frac{\frac{V_E}{R1} + \frac{0}{Z_{C1}}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{Z_{C1}}} \rightarrow V_s = \frac{\frac{V_E}{R1}}{\frac{Z_{C1}}{R1 \cdot Z_{C1}} + \frac{R1}{R1 \cdot Z_{C1}}} \rightarrow \text{soit : } T = \frac{V_s}{V_E} = \frac{1}{1 + j \cdot R1 \cdot C1 \cdot \omega}$$

❷ **Étude aux bornes :**

f	ω	Dénominateur	T
$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 1$	1
$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0

Donc, on en déduit qu'il s'agit d'un filtre de type passe-bas.

❸ **Fréquence de coupure :** la fonction de transfert d'un filtre passe-bas est du

type : $T_{(j\omega)} = \frac{T_0}{1 + j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}$.

On a donc : $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 = \frac{1}{R1 \cdot C1} \rightarrow \text{soit : } f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C1} = 4,8 \text{ kHz}$

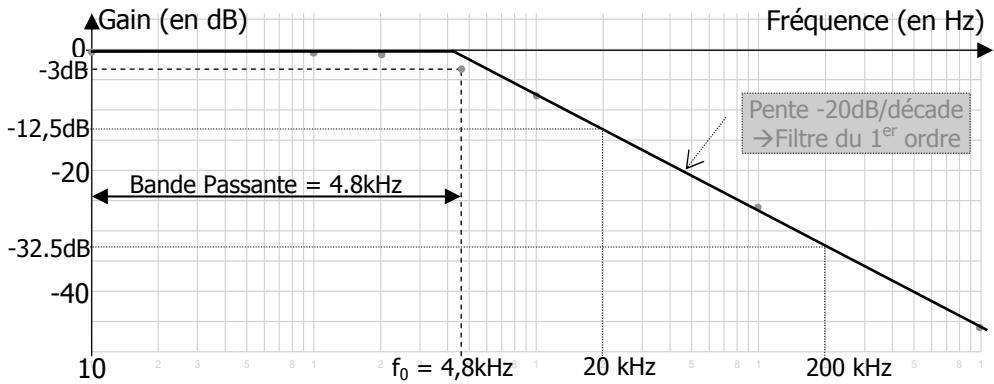
④ **Gain** : $G_{(f)} = 20 \cdot \log(|T_{(j,\omega)}|)$ avec $|T_{(j,\omega)}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (R1 \cdot C1 \cdot \omega)^2}}$

D'où : $G_{(f)} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{\sqrt{1 + (R1 \cdot C1 \cdot \omega)^2}}\right)$ ou $G_{(f)} = -20 \cdot \log\left(\sqrt{1 + (R1 \cdot C1 \cdot \omega)^2}\right)$

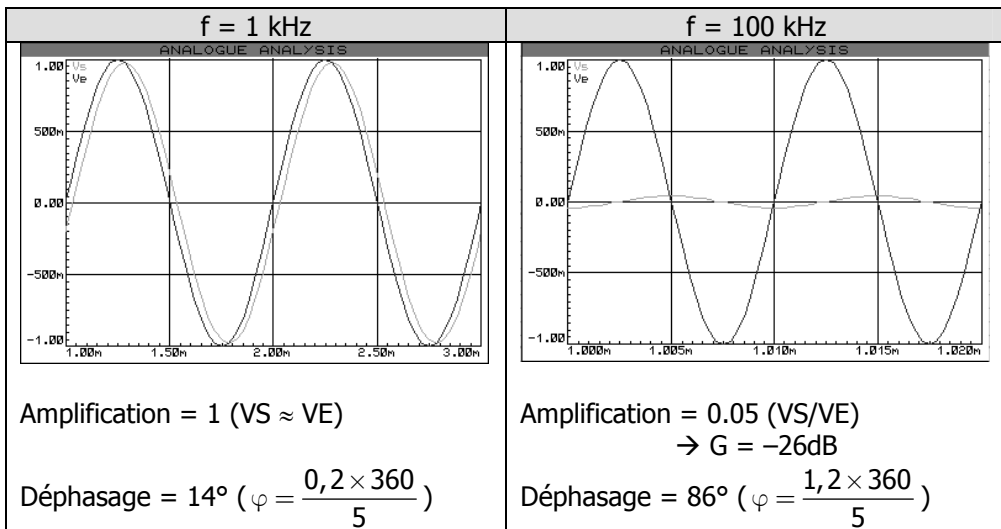
On obtient alors : $G_{(f)} = -10 \cdot \log\left(1 + (R1 \cdot C1 \cdot \omega)^2\right)$

⑤ **Réponse fréquentielle : « diagramme de Bode »**

Fréquence (en Hz)	100	1k	2k	5k	10k	100k	1M
$ T_{(j,\omega)} $ (en Ω)	0,99	0,98	0,92	0,69	0,43	0,04	$4,8 \cdot 10^{-3}$
G (en dB)	$-1,8 \cdot 10^{-3}$	-0,18	-0,69	-3,17	-7,2	-26,3	-46,3



⑥ **Réponse temporelle : simulation pour 2 fréquences du signal V_E**



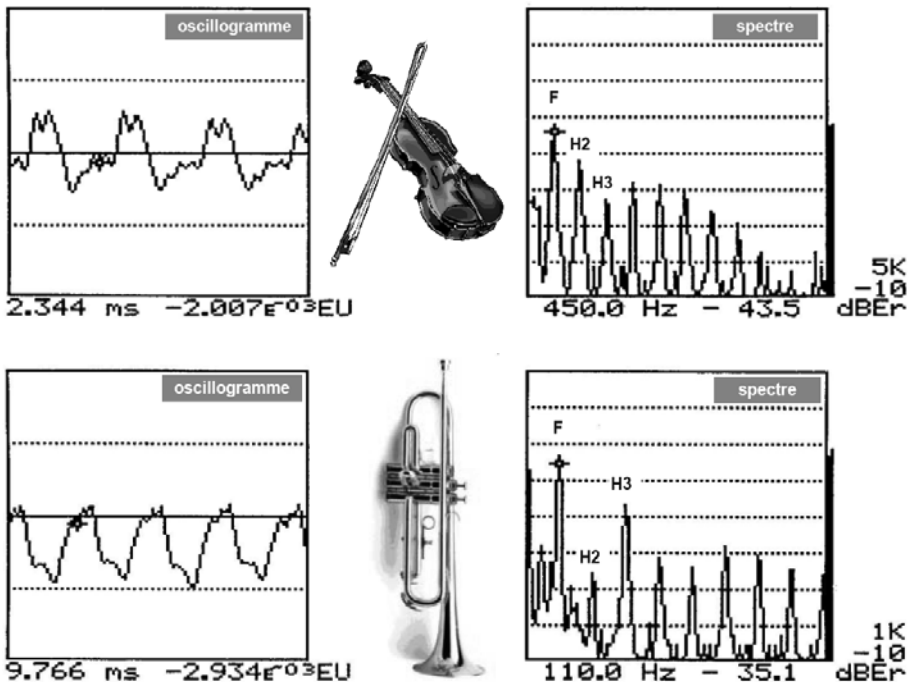
4. Dualité temps / fréquence et décomposition en série de Fourier

4.1. Dualité temps / fréquence

Il existe 2 manières de représenter un signal :

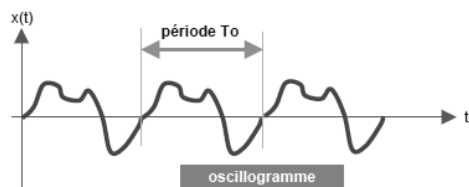
Représentation temporelle	Représentation spectrale (fréquentielle)
Amplitude du signal en fonction du temps.	Amplitude du signal en fonction de la fréquence, sous forme de « raies ». Chaque raie de la représentation spectrale correspond à l'amplitude et à la fréquence d'une sinusoïde.

Exemples : représentation temporelle et fréquentielle pour 2 instruments



4.2. Décomposition en série de Fourier

Tout signal périodique peut se décomposer en une somme de termes sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence de base du signal (f_0), appelée « fondamental » :

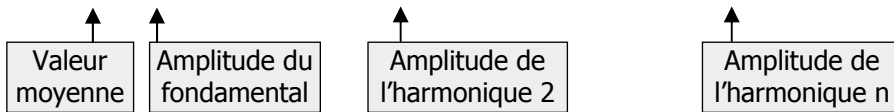


N.B. : on rappelle les expressions

$$\text{fréquence} : f_0 = \frac{1}{T_0} \text{ et pulsation} : \omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$$

On donne l'équation mathématique de la décomposition en série de Fourier :

$$x_{(t)} = X_0 + X_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_1) + X_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_2) + \dots + X_n \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_n)$$



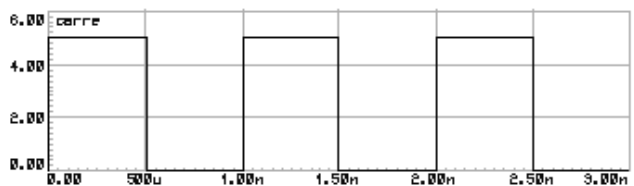
Les harmoniques correspondent à des fréquences multiples du fondamental. Par exemple, l'harmonique 2 a une fréquence $f_2 = 2 \cdot f_0$, l'harmonique 3 a une fréquence $f_3 = 3 \cdot f_0$... l'harmonique n a une fréquence $f_n = n \cdot f_0$.

Équations permettant de calculer les coefficients de la décomposition :

Valeur moyenne	Coefficients
$X_0 = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} x_{(t)} \cdot dt$	$X_n = 2 \cdot c_n $ <p>avec $c_n = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} x_{(t)} \cdot e^{-j \cdot n \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot t} \cdot dt$</p>

Exemple : décomposition en série de Fourier d'un signal carré

Soit la représentation temporelle d'un signal carré d'amplitude 5 V, de fréquence 1 kHz et de rapport cyclique 50 % :



Et sa représentation spectrale (fréquentielle) :

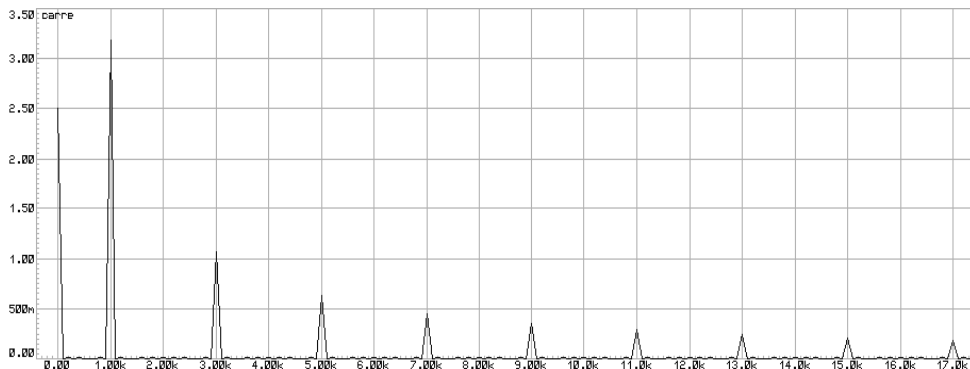
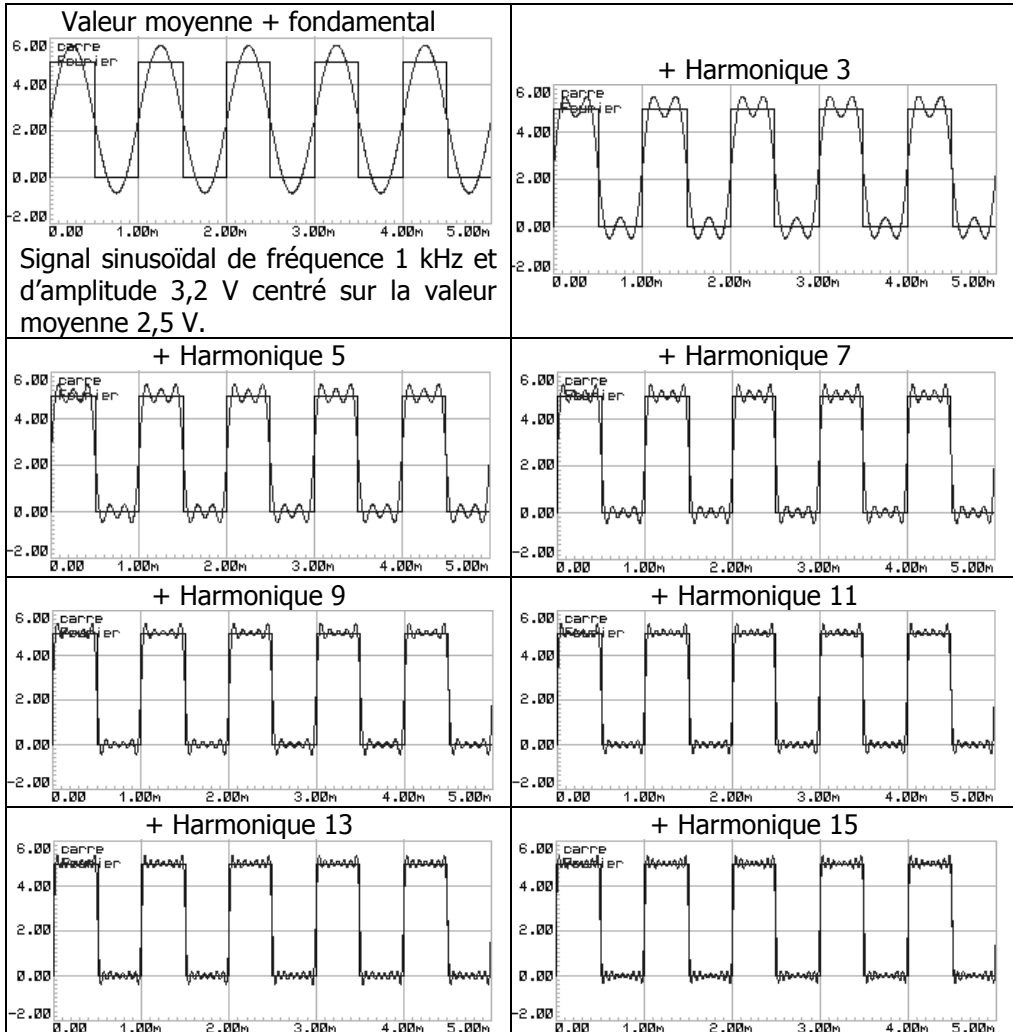


Tableau des coefficients de la décomposition en série de Fourier (à partir de la représentation spectrale) :

n	0 Valeur moy	1 fond ^{el}	2 Harm. 2	3 Harm. 3	5 Harm. 5	7 Harm. 7	9 Harm. 9	11 Harm. 11	13 Harm. 13	15 Harm. 15
Fréquence f_n (en Hz)		1 k	2 k	3 k	5 k	7 k	9 k	11 k	13 k	15 k
Amplitude X_n (en V)	2,5	3,2	0	1,06	0,64	0,45	0,3	0,25	0,24	0,21

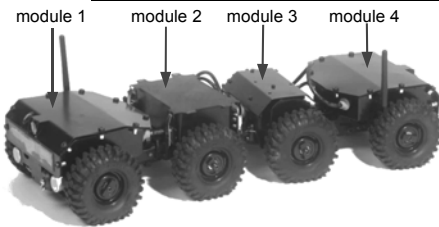
Ci-dessous les résultats de simulation permettent de mettre en évidence que l'ajout de sinusoïdes de fréquences multiples du fondamental permettent d'obtenir un signal carré :



→ Exercices

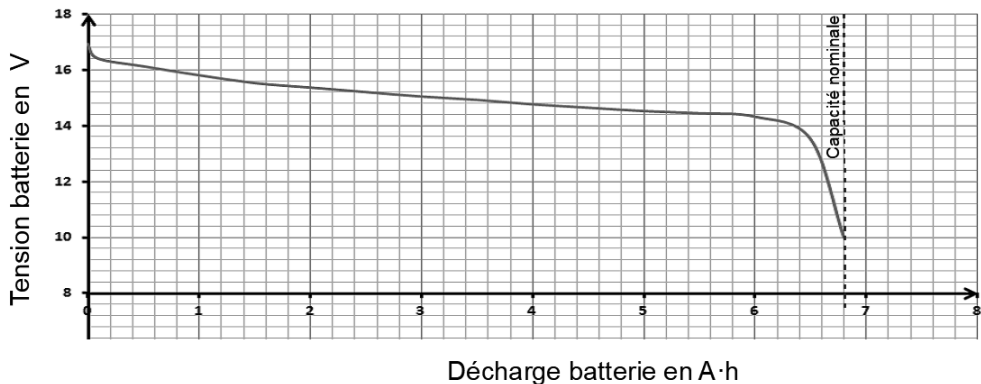
Numérisation

Exercice 7.1 – Robot de reconnaissance tout terrain (Bac SI 2016)

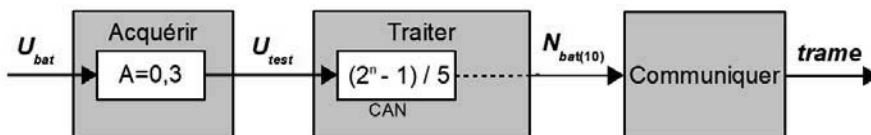


La maîtrise et la qualité de l'air dans un bâtiment nécessite d'avoir un réseau aéraulique (réseau de ventilation, traitement de l'air, climatisation, ...) en bon état de fonctionnement. Ce robot doit être capable d'inspecter des canalisations. Ses capacités de franchissement doivent permettre des opérations de reconnaissance et de surveillance.

Pour anticiper le pilotage de l'engin, l'utilisateur est informé, du niveau de charge de la batterie sur l'écran de l'ordinateur de contrôle par une alarme visuelle et sonore. Le seuil d'alerte correspond à une décharge de la batterie de 80 % de sa capacité nominale :

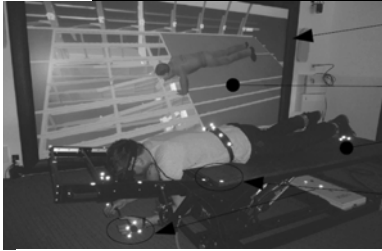


Dans la zone d'alerte, la tension aux bornes de la batterie évolue très lentement, il est donc nécessaire de traiter cette tension avec une certaine précision. La chaîne d'acquisition de la tension batterie U_{bat} est présentée ci-dessous. Le convertisseur analogique numérique (CAN) utilisé par la fonction « traiter » fonctionne avec une tension pleine échelle de 5 V.



Déterminer la résolution du convertisseur permettant d'atteindre une précision de 0,2 % de la tension nominale de la batterie.

Exercice 7.2 – Système tangible déployable (Bac SI 2017)



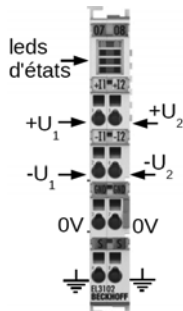
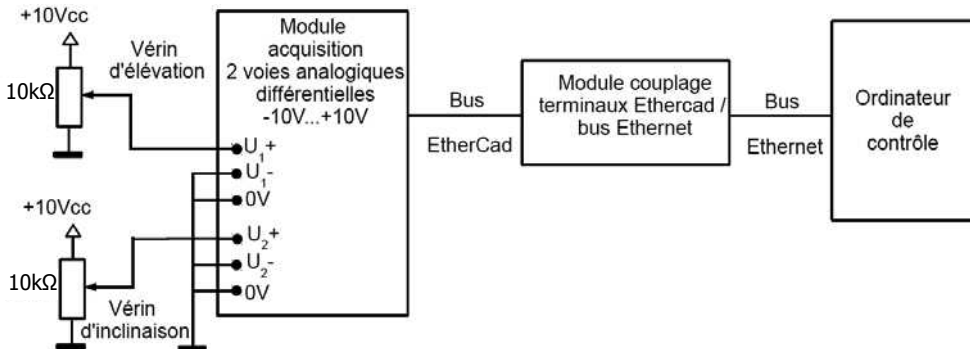
Écran de contrôle
Plancher avion
Table
Marqueurs réfléchissants

L'objectif d'Airbus est de placer virtuellement ses opérateurs dans un avion en situation de montage, réglage, démontage, dans des postures et des conditions d'immersion reproduisant des situations réelles.

La table sert à mettre l'opérateur dans une position identique à celle qu'il aurait en situation de travail. L'opérateur est équipé d'un masque qui lui permet de visualiser la scène virtuelle dans laquelle il est immergé.

Une bielle et deux vérins électriques permettent de déplacer la table en hauteur et de l'incliner.

La chaîne d'acquisition de la position des deux vérins est définie ci-dessous. Les vérins sont équipés de potentiomètres de 10 k Ω alimentés en 10 V. La course totale de 150 mm des vérins correspond à la pleine échelle de cette tension. La tension analogique renvoyée par le potentiomètre est numérisée par le module d'acquisition puis transmise à l'ordinateur de contrôle via les différents bus de transmission de données :



Caractéristiques du module d'acquisition analogique :

- Entrées : 2 voies analogiques, -10 V...+10 V, différentielles
- Bus de communication : EtherCAT
- Filtrage limite d'entrée : 5 kHz
- Résistance interne : 200 k Ω
- Temps de conversion : 60 μ s
- Résolution : 15 bits de données et 1 bit de signe
- Erreur de mesure : 0,3 %

Déterminer le plus petit déplacement des vérins mesurable par cette chaîne d'acquisition.

Exercice 7.3 – Serre d'élevage de graines de cyclamen (Bac SI 2017)

L'étude est menée sur une serre dans laquelle sont élevées des graines en phase de germination. Après la germination les plans sont transférés dans une autre serre.

Afin de germer dans des conditions optimales, les graines de cyclamen doivent être plantées dans un substrat (mélange de terreau et de petits graviers) dont le taux d'humidité est contrôlé.



Une référence, composée d'une caissette remplie de substrat, est placée sur une balance afin de suivre l'évolution de sa masse tout au long de l'élevage. L'arrosage de l'ensemble de la serre est déclenché en fonction de la masse de cette référence.

Hypothèse : la masse de la graine (puis du plant) est négligeable par rapport aux masses mises en jeu.

Données :

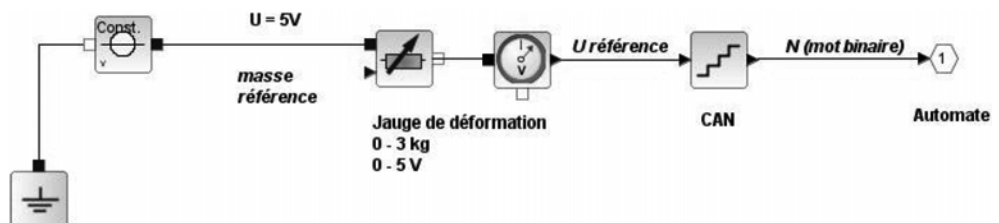
- masse de la caissette vide $m_c = 44 \text{ g}$;
- volume du substrat $V_s = 1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$;
- masse volumique du substrat saturé en eau $\rho_{\text{eau}} = 1\,110 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- masse volumique du substrat sec $\rho_{\text{sec}} = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Le cahier des charges est rappelé ci-dessous :

- la masse du substrat doit être inférieure de 2 % à sa masse saturée en eau afin d'éviter le développement de champignons ;
- la masse du substrat doit être supérieure de 20 % à sa masse à sec afin d'assurer l'alimentation en eau de la graine.

1. Calculer la masse de démarrage m_{dem} et la masse d'arrêt $m_{\text{arrêt}}$ de la caissette de référence qui conditionnent la mise en route et l'arrêt du système de goutte à goutte.

On donne la chaîne d'acquisition de la masse de la caissette de référence :



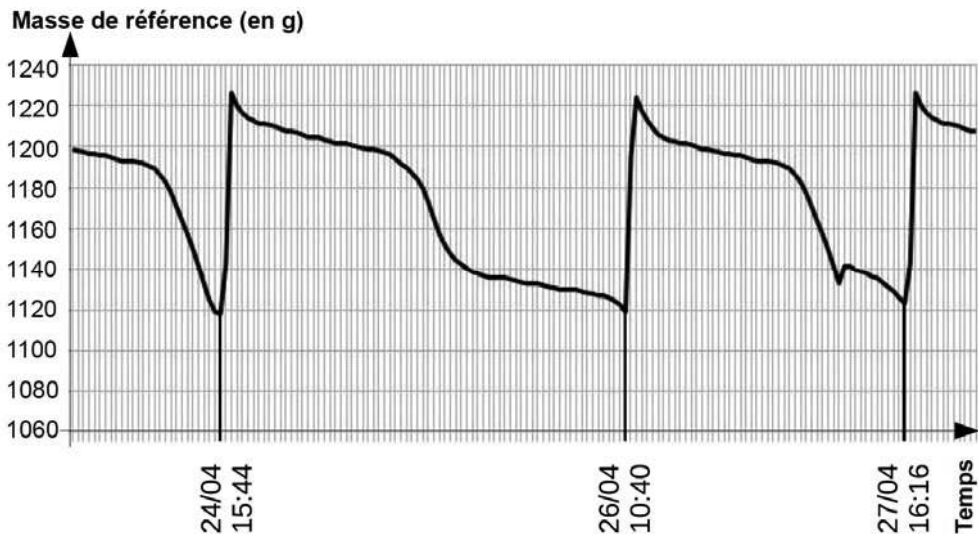
La technologie de la balance met en œuvre un capteur à jauge de déformation. La tension fournie par la balance est proportionnelle à la déformation de la jauge.

Un convertisseur analogique-numérique (CAN) convertit l'information pour la transmettre à l'automate.

Afin de mesurer précisément la masse de la référence posée sur la balance, la valeur du mot binaire fournie par le convertisseur analogique-numérique (CAN) doit être précise à 15 grammes près.

- Déterminer le nombre de bits du convertisseur analogique-numérique permettant d'écrire le mot binaire N . En déduire les valeurs N_{dem} et $N_{\text{arrêt}}$ des mots binaires à envoyer à l'automate.

La figure ci-dessous représente l'évolution de la masse de la caissette de référence à partir de mesures effectuées en continu sur la balance pendant 4 jours :



- Conclure quant au respect du cahier des charges et quant à l'optimisation des arrosages.

Exercice 7.4 – Bus Watt System (Bac SI 2017)

L'aéroport Nice Côte d'Azur expérimente un service de bus électrique : l'innovation majeure est le « biberonnage » du véhicule qui consiste à effectuer un transfert d'énergie à chaque station d'arrêt (Totem) pendant le transfert des passagers : voir illustration page suivante.

Le raccordement électrique du bus au Totem est réalisé grâce à un bras télescopique. Le temps d'arrêt, déplacement du bras télescopique compris (aller et retour), ne doit pas excéder 20 secondes pour une recharge de 1,038 kW · h.

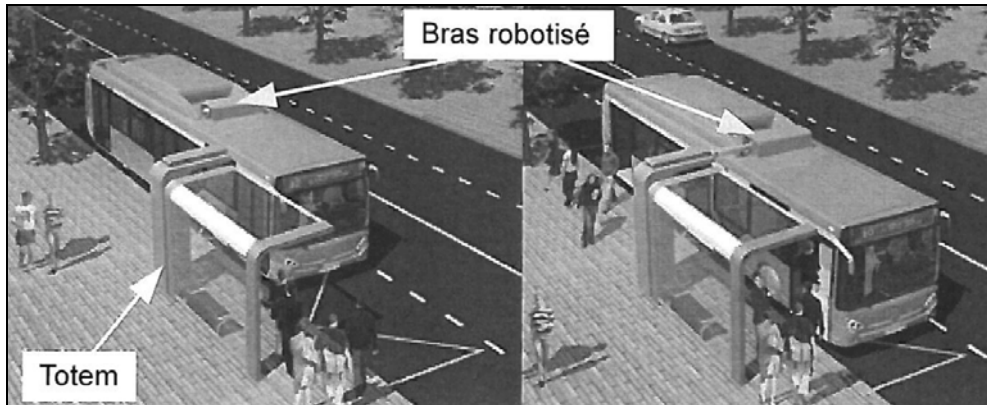
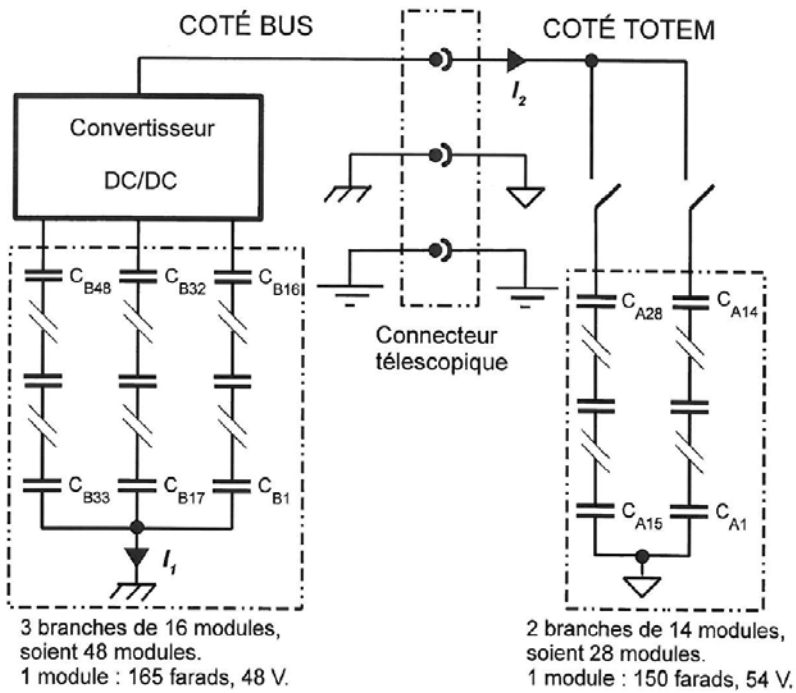


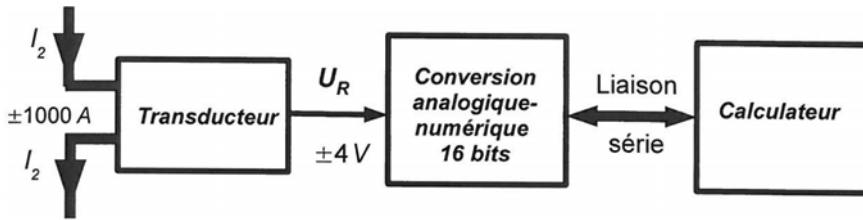
Schéma électrique du stockage :



Le transfert de charges entre les 2 groupements de supercondensateurs C_{Axx} et C_{Bxx} (du côté Totem vers le côté bus) est réalisé en maintenant le courant $I_{2(t)}$ constant.

Le courant I_2 est mesuré par un transducteur dont la caractéristique est parfaitement linéaire. Il délivre une différence de potentiel de ± 4 volts lorsque le courant évolue de ± 1000 ampères.

Le signal U_R obtenu en sortie du transducteur est numérisé par un convertisseur analogique-numérique 16 bits :



La caractéristique $N = f(U_R)$ du convertisseur analogique-numérique est considérée comme parfaitement linéaire. Quelques valeurs particulières de cette caractéristique sont indiquées dans le tableau :

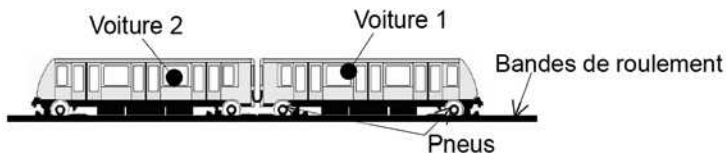
Tension d'entrée	N	Tension d'entrée	N	Tension d'entrée	N
$\geq +4,096\text{ V}$	65535	...		$-2,048\text{ V}$	16384
...		0 V	32768	...	
$+2,048\text{ V}$	49152	...		$\leq -4,096\text{ V}$	0

1. Exprimer U_R en fonction de I_2 , N en fonction de U_R , N en fonction du courant I_2 .
2. Exprimer l'équation de la variable « mesure » (image du courant I_2) en fonction du nombre N (telle que : mesure = $a \cdot N + b$).

Exercice 7.5 – Métro rennais (Bac SI 2018)

Le métro de Rennes (de type VAL : Véhicule Automatique Léger) est un système de transport en commun entièrement automatique. Ce métro, alimenté en énergie électrique, est équipé de pneus.

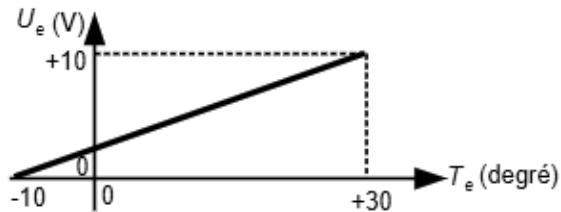
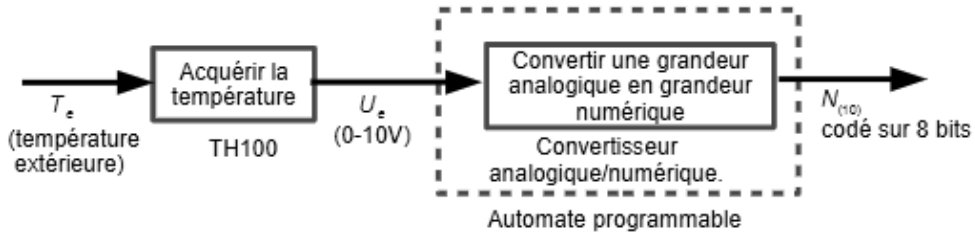
Les deux postes importants de consommation d'énergie sont l'alimentation des rames (une rame est constituée de deux voitures) et le chauffage des voies (bandes de roulement des pneus) :



Le chauffage des voies est mis en action lorsque la température extérieure T_e devient inférieure ou égale à 4 °C et que le taux d'hygrométrie H_r est supérieur ou égal à 80% .

Le capteur de température fournit une tension variable entre 0 V et 10 V pour une température évoluant entre -10 °C et 30 °C (soit une pleine échelle de 40 °C).

Cette information est numérisée par un convertisseur analogique-numérique 8 bits (CAN).



La loi entrée-sortie du capteur de température est de la forme $U_e = a \cdot T_e + b$.

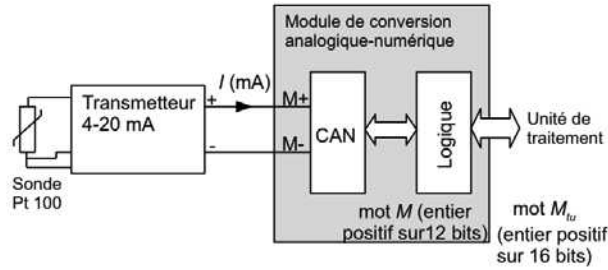
1. Déterminer la tension U_e pour une température $T_e = 4 \text{ }^\circ\text{C}$.
2. Calculer la résolution analogique q (ou quantum) du convertisseur analogique-numérique, sachant que sa plage d'entrée est 0-10 V, et spécifier son unité. Déterminer la valeur décimale $N_{4^\circ\text{C}}$ (en décimal) représentant la valeur en sortie du CAN lorsque la température extérieure est de $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Exercice 7.6 – Agrandissement d'une piste de ski en intérieur (Bac SI 2018)

Le snowhall est une installation qui permet la pratique des sports de glisse sur neige artificielle, en intérieur et toute l'année. La longueur de la piste était d'environ 400 m. Le bâtiment, de 35 m de large, est réfrigéré à une température inférieure à $0 \text{ }^\circ\text{C}$ afin de maintenir une neige de qualité.

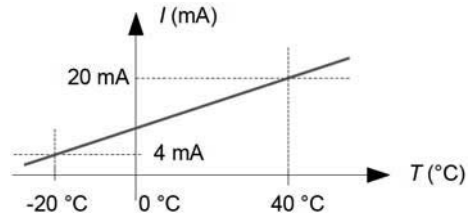


La température dans le bâtiment est contrôlée par des frigorifères qui sont des dispositifs de ventilation et de refroidissement de l'air (figure ci-dessus). Chaque frigorifère est muni d'une sonde de température ambiante Pt100 et d'un dispositif de régulation :



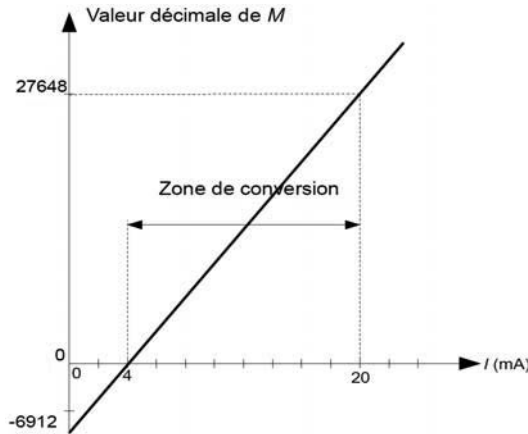
La sonde Pt100 utilise comme principe physique la variation de la résistance électrique des matériaux en fonction de la température. La résistance est de 100Ω à 0°C .

La caractéristique proposée ci-dessous donne la valeur du courant I (mA) en fonction de la température ambiante, courbe du type $I = S \times T + I_0$:



1. Calculer la sensibilité S et l'offset I_0 de l'ensemble sonde et transmetteur. Préciser les unités.

La résolution (en bits) du module qui assure la conversion analogique numérique est de 12 bits. Le résultat de la conversion analogique-numérique est disponible dans le mot M :

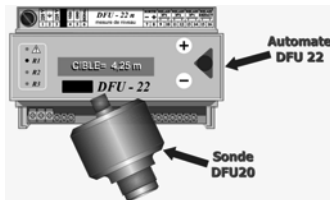


2. Donner la relation qui permet de calculer la valeur du mot M à partir de la valeur du courant I (en mA).
3. Compléter le tableau en précisant la valeur I du courant en mA ainsi que la valeur du mot M exprimée en décimal.

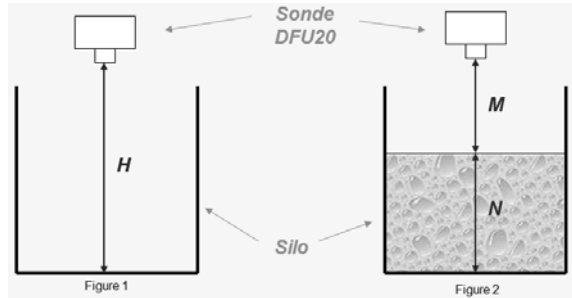
Température (en $^\circ\text{C}$)	I (en mA)	Mot M (en décimal)
0		
-3		
-8		

Filtrage

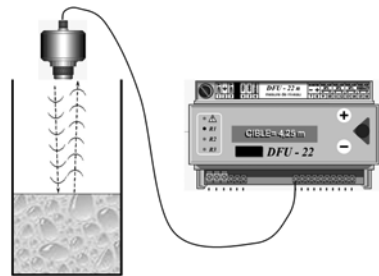
Exercice 7.7 – Sonde de niveau DFU



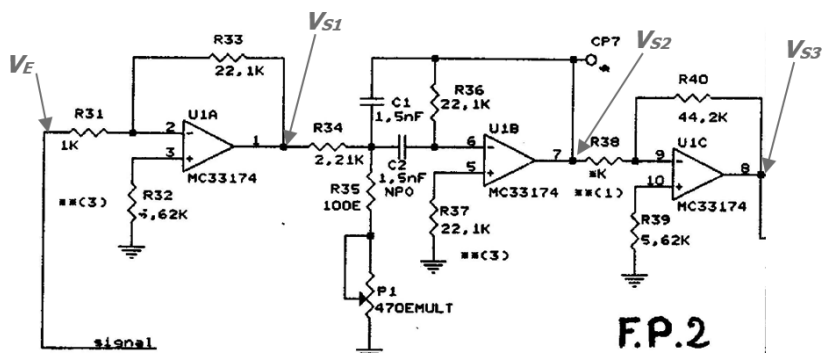
La sonde de niveau à ultra-son DFU permet de mesurer une hauteur d'eau ou de grain dans un silo agricole :



Il s'agit de mesurer le temps mis par les ondes ultrasonores de fréquence 40 kHz, pour parcourir l'aller-retour entre la sonde DFU20 et la surface de la matière dans le silo (liquide ou grain). Ensuite sachant que le son dans l'air se propage à la vitesse de 340 m/s, l'automate DFU22 calcule la hauteur du liquide ou du grain dans le silo (la hauteur totale du silo vide H étant paramétrée dans l'automate DFU22).



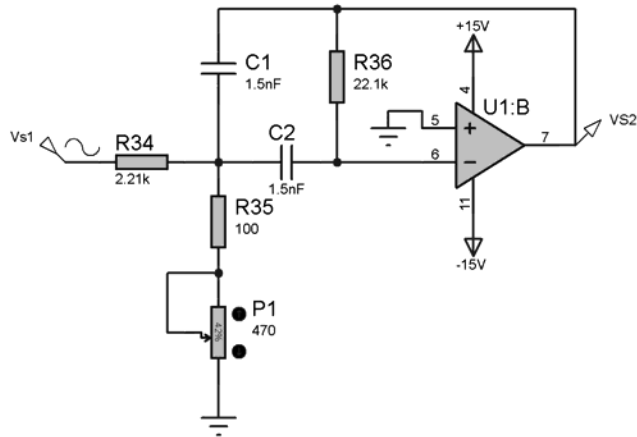
Le signal électrique correspondant à l'écho (retour) des ultrasons a une amplitude de 10 mV ce qui est trop faible pour être traité par le microprocesseur du système DFU : d'où le rôle de la fonction « FP2 – Amplification / filtrage ».



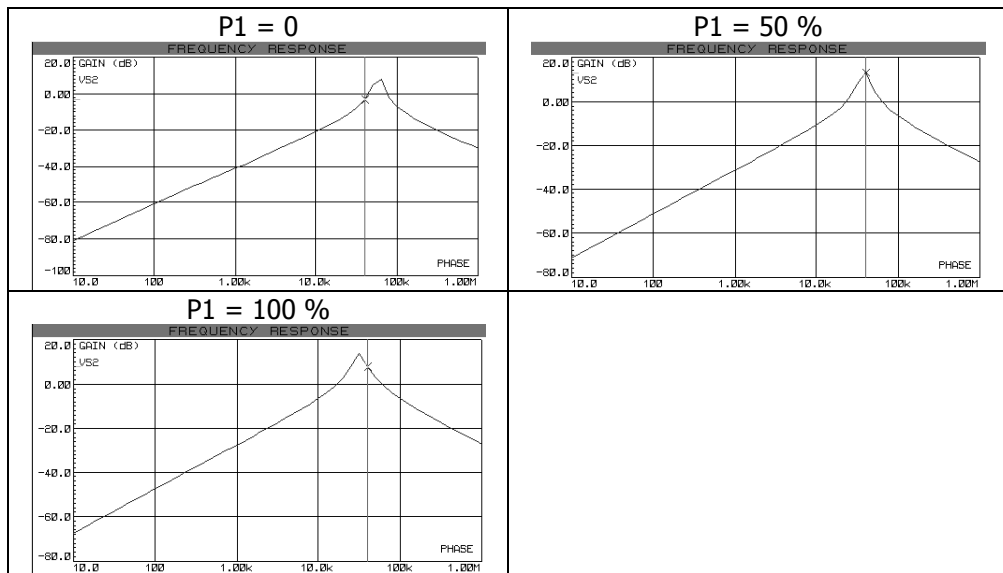
N.B. :

- V_E correspond au signal électrique reçu par le capteur ultrason.
- On suppose que les résistances R_{32} , R_{37} et R_{39} sont nulles (remplacées par des fils).

1. Donner le mode de fonctionnement de l'ALI U1B :



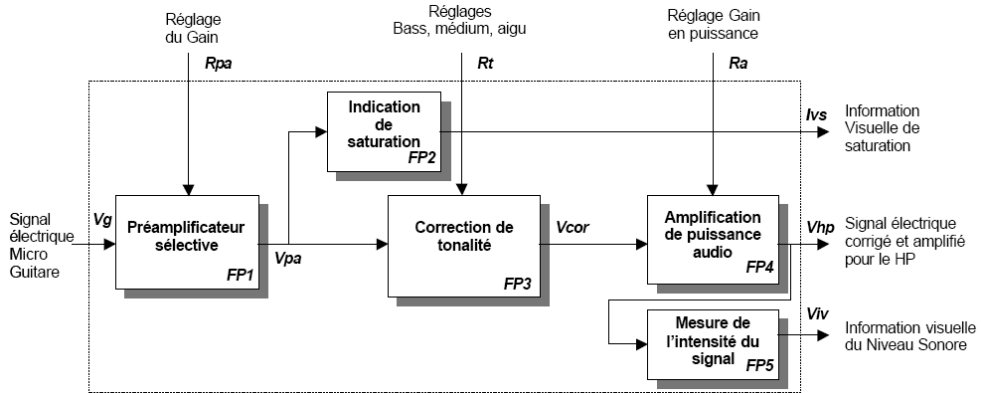
2. Pour 3 positions (0%, 50% et 100%) de la résistance ajustable P1, on a simulé le comportement du montage. Donner le rôle de P1.



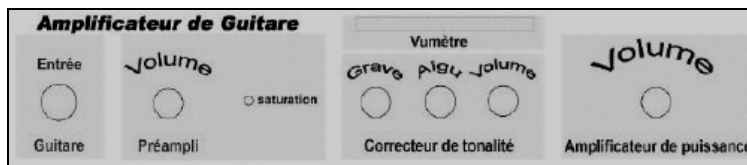
- Donner alors la valeur de la position idéale de P1 pour recevoir correctement le signal ultra-son.
- Donner la valeur du gain G_{U1B} (en dB = déciBel) et en déduire l'amplification (notée A_{U1B}).
- Cocher les termes qui correspondent au montage étudié :
 - Comparateur
 - Amplificateur
 - Filtre
 - Sommateur
- Spécifier le type du filtre (passe-bas, passe-haut, passe-bande ou réjecteur de bande).

Exercice 7.8 – Pré-ampli audio

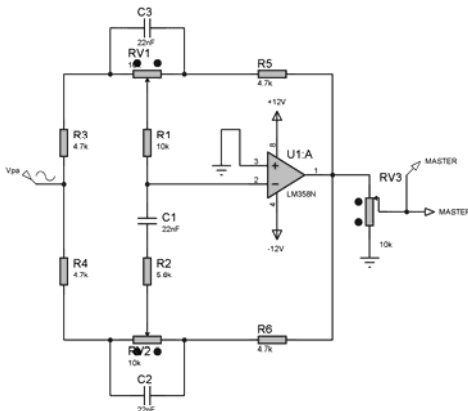
Un pré-amplificateur audio a pour fonction d'amplifier un signal électrique audio-phonique avec réglage d'amplitude. On donne le schéma fonctionnel :



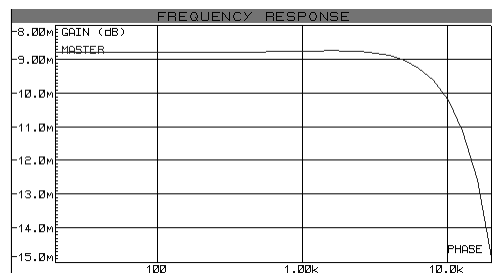
Face avant de l'amplificateur



Étude de « FP3 – correcteur de tonalité »

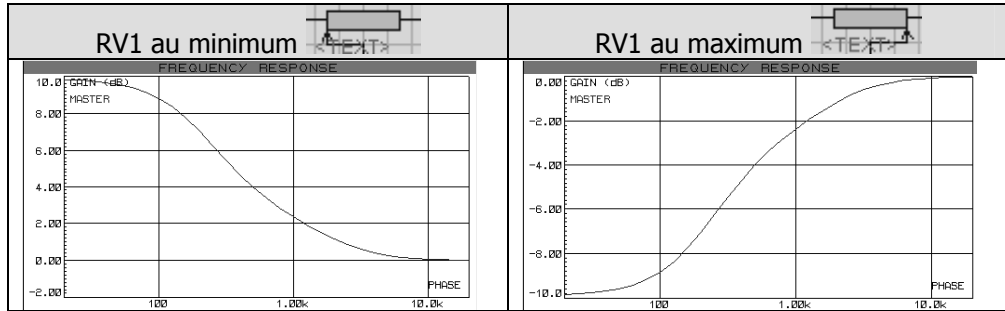


Simulation fréquentielle :
(les 2 potentiomètres RV1 et RV2 sont en position médiane)

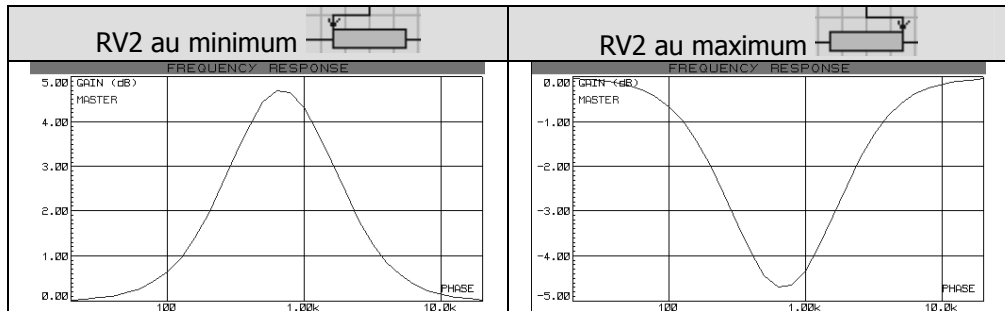


La fonction FP3 a pour rôle d'atténuer de façon sélective certaines fréquences du signal de façon à accentuer les fréquences basses et/ou médiums et/ou aigus du son de la source (micro, guitare, ...).

1. À partir des 2 simulations ci-dessous, donner le rôle du potentiomètre RV1.



2. À partir des 2 simulations ci-dessous, donner le rôle du potentiomètre RV2.



→ Solutions

Exercice 7.1 – Robot de reconnaissance tout terrain

La relation liant la résolution et la précision (quantum) d'un convertisseur analogique-numérique est :

$$q = \frac{\text{tension pleine échelle}}{2^n - 1} \quad (n : \text{résolution})$$

Détermination du quantum nécessaire :

$$q = (0,2\% \cdot U_{\text{bat}}) \times 0,3 = \left(\frac{0,2}{100} \cdot 15 \right) \times 0,3 = 9 \text{ mV} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

$$\text{Donc : } 9 \cdot 10^{-3} = \frac{5}{2^n - 1} \text{ soit } 2^n = \frac{5}{9 \cdot 10^{-3}} + 1 = 556,5$$

Il faut donc un convertisseur de résolution supérieure ou égale à 10 bits ($2^{10} = 1024$).

Exercice 7.2 – Système tangible déployable

▪ Solution 1

Les potentiomètres sont alimentés en 0 V-10 V et échantillonnés sur 15 bits pour un déplacement de 150 mm. Donc le plus petit déplacement mesurable est donné

$$\text{par : } e_d = \frac{150}{2^{15} - 1} = 0,0046 \text{ mm}$$

▪ Solution 2

Le module échantillonne 2^{16} valeurs signées (de -32768 à $+32767$) pour une tension de (-10 V à $+10$ V) donc le quantum est de : $e_u = \frac{20}{2^{16} - 1} = 0,305 \text{ mV}$, cela correspond à un déplacement minimal de :

$$e_d = 150 \cdot \frac{0,305 \cdot 10^{-3}}{10} = 0,0046 \text{ mm}$$

Exercice 7.3 – Serre d'élevage de graines de cyclamen

$$1. m_{\text{dem}} = \rho_{\text{sec}} \times V_s \times \left(1 + \frac{20}{100}\right) + m_c$$

$$\text{Soit : } m_{\text{dem}} = 800 \cdot 10^3 \times 1,1 \cdot 10^{-3} \times \left(1 + \frac{20}{100}\right) + 44 = 1100 \text{ g}$$

$$m_{\text{arret}} = \rho_{\text{eau}} \times V_s \times \left(1 - \frac{2}{100}\right) + m_c$$

$$\text{Soit : } m_{\text{arret}} = 1110 \cdot 10^3 \times 1,1 \cdot 10^{-3} \times \left(1 - \frac{2}{100}\right) + 44 = 1240 \text{ g}$$

2. Pour un convertisseur analogique-numérique, on sait que le quantum se calcule

$$\text{avec } q = \frac{PE}{2^n - 1}$$

- PE = pleine échelle du convertisseur
- n = résolution (nombre de bits) du convertisseur.

Dans notre cas :

- PE = 3000 kg
- $q < 15 \text{ g}$

$$\text{On obtient : } 15 > \frac{3000}{2^n - 1}, \text{ soit : } 2^n > \frac{3000}{15} + 1. \text{ D'où : } 2^n > 201$$

Sachant que $2^7 = 128$ et que $2^8 = 256$, on en déduit qu'il nous faut un convertisseur analogique-numérique de résolution 8 bits.

La fonction de transfert d'un convertisseur analogique-numérique est $N = \frac{\text{entrée}}{q}$;

alors :

$$\begin{aligned} \blacksquare N_{\text{dem}} &= \frac{1100}{\frac{3000}{2^8 - 1}} = 94 \\ \blacksquare N_{\text{arret}} &= \frac{1240}{\frac{3000}{2^8 - 1}} = 106 \end{aligned}$$

3. La valeur de la masse déclenchant le démarrage de l'arrosage vaut environ 1120 g et la valeur de la masse arrêtant l'arrosage vaut environ 1230 g : donc le cahier des charges est respecté.

On remarque sur le relevé qu'il n'y a pas eu d'arrosage le 25 mai, et que les arrosages ne sont pas à heure fixe. L'apport en eau est bien fonction des besoins des plants, et non effectué de façon systématique ce qui entraînerait une pourriture des cyclamens et un gaspillage en eau.

Exercice 7.4 – Bus Watt System

1.

- U_R est proportionnel au courant I_2 : $U_R = \frac{4}{1000} \cdot I_2$
- La caractéristique du convertisseur analogique-numérique est linéaire, donc de la forme : $N = \alpha \cdot U_R + \beta$. Avec 2 points de la caractéristique, on a le système d'équations :
$$\begin{cases} (1) & 49152 = \alpha \cdot 2,048 + \beta \\ (2) & 16384 = \alpha \cdot (-2,048) + \beta \end{cases}$$

$$\text{On calcule (1) - (2) : } 49152 - 16384 = \alpha \cdot 2,048 - (\alpha \cdot (-2,048))$$

$$\text{D'où : } \alpha = \frac{16384}{2,048} \text{ et } \beta = 32768$$

$$\text{Ainsi : } N = \frac{16384}{2,048} \cdot U_R + 32768$$

- On en déduit alors la relation N en fonction de I_2 :

$$N = \frac{16384}{2,048} \cdot \frac{4}{1000} \cdot I_2 + 32768$$

$$\text{Soit : } N = 32 \cdot I_2 + 32768$$

2. À partir de la réponse à la question précédente, on a : mesure = $\frac{N - 32768}{32}$.

Exercice 7.5 – Métro rennais

1. L'équation est de la forme $U_e = a \cdot T_e + b$.

En prenant 2 points, on obtient de système d'équations :
$$\begin{cases} (1) & 0 = a \cdot (-10) + b \\ (2) & 10 = a \cdot 30 + b \end{cases}$$

On calcule (1) – (2) : $-10 = -40 \cdot a \rightarrow$ soit $a = \frac{10}{40} = 0,25$

Avec (1), on a : $b = -10 \cdot a = -2,5$

L'équation du capteur de température est donc : $U_e = 0,25 \cdot T_e - 2,5$

Pour $T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, on a : $U_{e(4^\circ\text{C})} = 0,25 \cdot 4 - 2,5 = 3,5 \text{ V}$

2.

- Le quantum se calcule avec l'équation : $q = \frac{PE}{2^n - 1}$

Les caractéristiques du convertisseur sont :

- ✓ tension pleine échelle : $PE = 10 \text{ V}$
- ✓ résolution : 8 bits

donc : $q = \frac{10}{2^8 - 1} = \frac{10}{256 - 1} = 39,2 \text{ mV}$

- La fonction de transfert du convertisseur est : $N = \frac{U_e}{q}$

Pour une température de $4 \text{ }^\circ\text{C}$, on a : $U_{e(4^\circ\text{C})} = 3,5 \text{ V}$

Donc : $N_{4^\circ\text{C}(\text{endécimal})} = \frac{U_{e(4^\circ\text{C})}}{q} = \frac{3,5}{39,2 \cdot 10^{-3}} = 89$

Exercice 7.6 – Agrandissement d'une piste de ski en intérieur

1. Pente de la droite : $S = \frac{20 - 4}{40 - (-20)} = 0,266 \text{ mA} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Pour $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$, on a $I = 4 = S \times (-20) + I_0$. D'où : $I_0 = 4 + 20 \times S = 9,33 \text{ mA}$

2. Courbe de la forme : $M = a \cdot I + b$

Pente de la courbe : $a = \frac{\Delta M}{\Delta I} = \frac{27648 - (-6912)}{20 - 0} = 1728 \text{ mA}^{-1}$

Ordonnée à l'origine : $b = -6912$

D'où : $M = 1728 \cdot I - 6912$, M étant le résultat d'un convertisseur analogique-numérique, on prendra uniquement la partie entière du résultat de l'équation.

3.

Température (en $^\circ\text{C}$)	I (en mA)	Mot M (en décimal)
0	9,33	9210
-3	8,53	7827
-8	7,20	5529

Exercice 7.7 – Sonde de niveau DFU

1. Il y a un rebouclage de la sortie sur l'entrée « - » de l'ALI U1:B, donc il fonctionne en linéaire.

2. P1 = réglage de la fréquence centrale du filtre.

3. La fréquence des ultra-sons étant de 40 kHz, il faut que la fréquence centrale du filtre soit la plus proche de cette valeur.

La position idéale de P1 est un peu en dessous de 50 % (valeur idéale = 42 %).

4. On mesure : $G_{U1:B} = 14 \text{ dB} = 20 \cdot \log(A_{U1:B})$

Alors on en déduit que : $A_{U1:B} = 10^{\frac{G_{U1:B}}{20}} = 5$

5. Termes correspondant au montage étudié :

- Comparateur
- Amplificateur
- Filtre
- Sommateur

6. Filtre passe-bande (bande passante très sélective : uniquement centrée sur la fréquence des ultrasons 40 kHz).

Exercice 7.8 – Pré-ampli audio

1. Le potentiomètre RV1 permet le réglage des fréquences graves et des fréquences aigues :

- entre 0 et 50 % : amplification des graves par rapport au aigus ;
- entre 50 % et 100 % : amplification des aigus par rapport au graves.

2. Le potentiomètre RV1 permet le réglage des fréquences médiums par rapport aux fréquences graves et aiguës.

Chapitre 8

Actionneurs

1. Pneumatique, hydraulique

1.1. Vérin

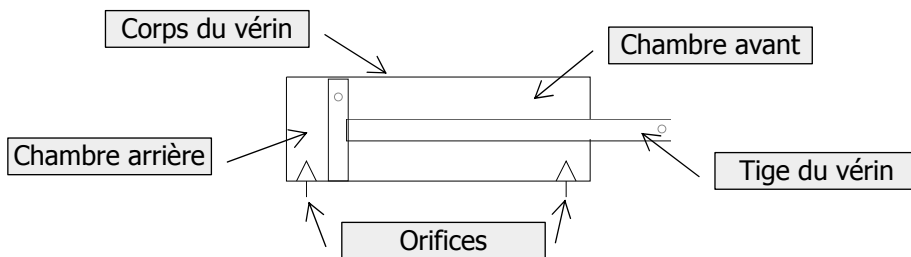
Un vérin transforme l'énergie d'un fluide sous pression en énergie mécanique (mouvement avec force) :

Type de vérin	Fluide utilisé	Plage de pression
Vérin pneumatique	Air comprimé	2-10 bars
Vérin hydraulique	Huile	Jusqu'à 350 bars

N.B. : un vérin à déplacement rectiligne peut travailler en poussant ou en tirant.

1.1.1. Description

Un vérin est constitué de 2 parties, le corps et la tige :



1.1.2. Vérin à simple ou à double effet

Vérins simple effet : 1 commande, retour à la position initiale par...		Vérins double effet : 2 commandes, 1 pour sortir et 1 pour rentrer	
<p>Un vérin simple effet où la tige est maintenue en position initiale par un poids suspendu à son extrémité.</p>	<p>Un vérin simple effet où la tige est maintenue en position initiale par un ressort hélicoïdal.</p>	<p>Un vérin double effet à simple tige, capable de pousser et tirer.</p>	<p>Un vérin double effet à double tige, capable de pousser et tirer.</p>
Rappel par gravité	Rappel par ressort	Simple tige	Double tige

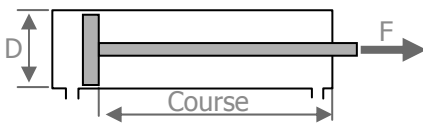
1.1.3. Critères de choix d'un vérin

Lors du choix d'un vérin, il faut définir les 3 paramètres :

- le type : simple ou double effet ;
- la course : longueur du déplacement souhaité ;
- le diamètre.

Pour déterminer le diamètre, il existe 2 méthodes :

- graphique : à partir d'abaques fournies par le constructeur ;
- théorique : étude mécanique à partir de la relation : $F = P \cdot S$



F : force que doit développer le vérin, en newton (N) ;
 D : diamètre de l'alésage (m) ;
 S : surface soumise à la pression (m²) ;
 P : pression appliquée, en pascal (Pa).

N.B. : 1 bar = 10⁵ pascal.

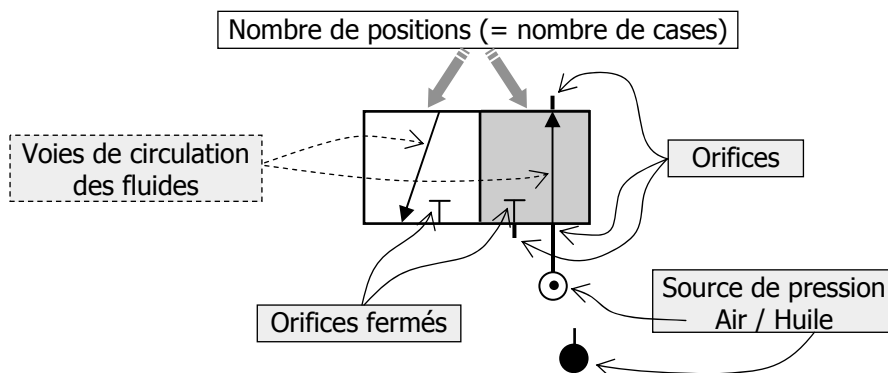
La force théorique ne tient pas compte des forces de frottements entre piston et cylindre. Par conséquent, il est recommandé de définir un vérin tel que le taux de charge soit inférieur ou égal à 75 %.

1.2. Distributeur (pré-actionneur)

Il sert d'interface entre la partie commande (généralement électrique) et la circulation des fluides dans le vérin.

1.2.1. Description

Symbole d'un distributeur, à partir de l'exemple d'un distributeur 3/2 :

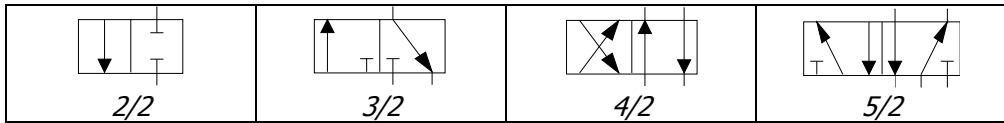


Les chiffres indiquent : le nombre d'orifices / le nombre de positions.

N.B. : la position initiale (position de repos) correspond :

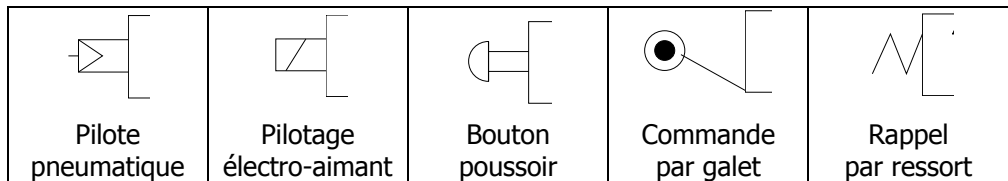
- à la case de droite dans le cas d'un distributeur à 2 positions.
- à la case du milieu dans le cas d'un distributeur à 3 positions.

Exemple : différents types de distributeurs



1.2.2. Types de pilotage

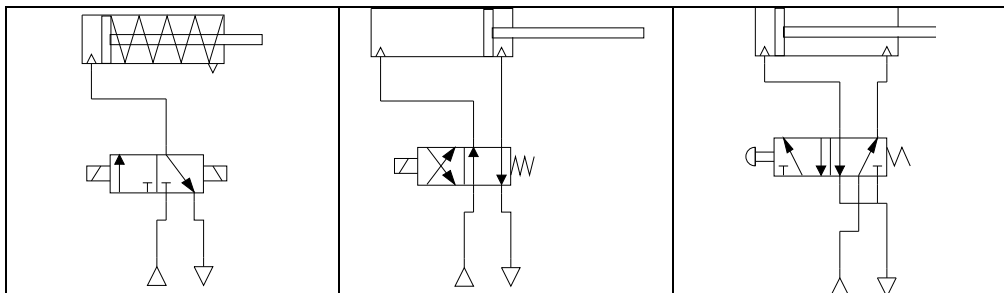
Le pilotage du distributeur correspond à la manière de passer d'une position à l'autre. Il peut être assuré de différentes façons :



1.2.3. Distributeur monostable et bistable

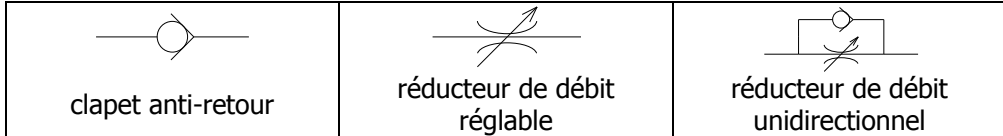
- Un distributeur est dit monostable lorsqu'il ne possède qu'une seule position stable. Un ressort de rappel ramène systématiquement le dispositif dans sa position de repos, dès que le signal de commande est interrompu.
- Un distributeur bistable possède deux positions stables. Il suffit d'une impulsion de commande pour passer d'une position à l'autre.

Exemple : différentes commandes de vérins



1.3. Les auxiliaires de commande

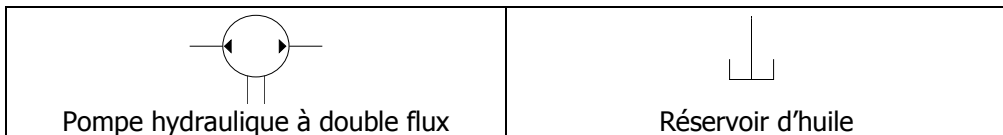
En plus du distributeur, il est aussi parfois nécessaire d'ajouter des éléments permettant de laisser circuler le fluide dans un seul sens ou bien de régler le débit du fluide :



1.4. Pompe hydraulique et traitement de l'air

1.4.1. Pompe hydraulique

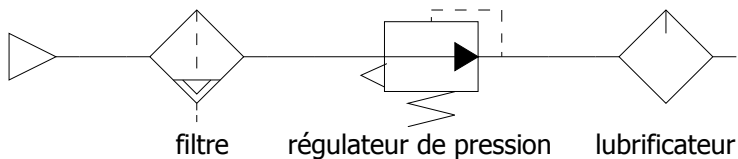
Pour mettre le fluide sous pression, on utilise une pompe qui aspire l'huile dans un réservoir pour la diriger vers les canalisations :



1.4.2. Traitement de l'air

L'air venant des compresseurs est chargé de particules en suspens (oxydation des canalisations...) qu'il faut éliminer avant qu'elles ne pénètrent dans les organes mécaniques : distributeurs, vérins, ...

Pour cela, on utilise à chaque poste de travail une unité de traitement de l'air :

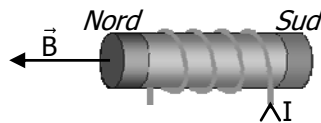


2. Moteurs électriques

2.1. Électromagnétisme et force de Laplace

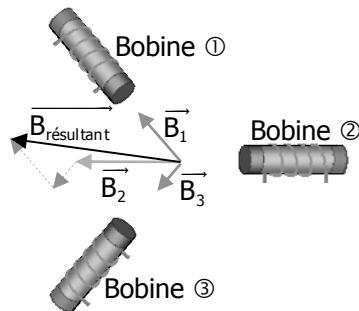
2.1.1. Champ magnétique

Lorsqu'on fait circuler un courant électrique dans une bobine, il se crée un champ magnétique \vec{B} de telle sorte que la bobine se comporte comme un aimant (avec un pôle nord et un pôle sud) :



N.B. : lorsqu'on inverse le sens du courant, le champ magnétique s'inverse et donc les pôles nord et sud aussi.

Dans le cas où il y aurait plusieurs bobines créant chacune un champ magnétique, le champ magnétique résultant correspond à la somme vectorielle :



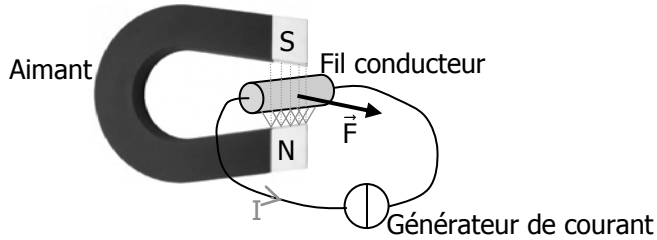
2.1.2. Courant induit

D'après la loi de Lenz, lorsqu'un conducteur (fermé) est soumis à une variation de flux magnétique, il se crée un courant induit de sens tel que le flux magnétique qu'il crée s'oppose à celui qui lui a donné naissance.



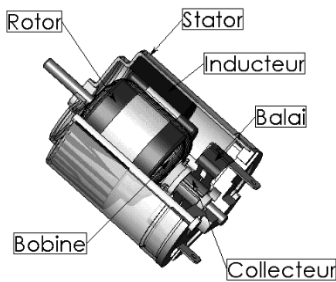
2.1.3. Force de Laplace

La force de Laplace correspond à la force qu'exerce un champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant :



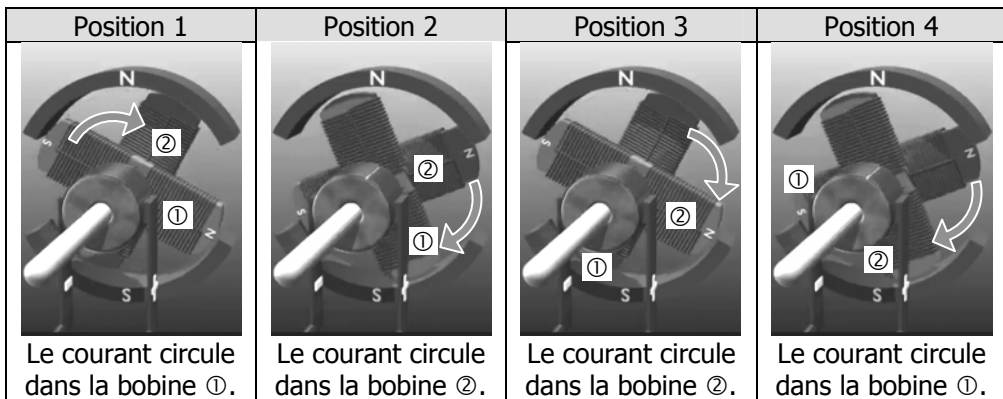
2.2. Moteur à courant continu à aimant permanent

Constitution d'un moteur à courant continu à aimant permanent :



Dans le cas du moteur à aimant permanent, l'inducteur (stator) est constitué d'un aimant.

La partie mobile (rotor) est réalisée par un ensemble de bobines. À un instant donné, le courant circule dans une seule bobine et est apporté par l'ensemble collecteur-balai.



À partir de http://www.dailymotion.com/video/xmezeb_fonctionnement-d-un-moteur-a-courant-continu_tech

Dans la position 4, le courant circule dans le sens inverse de la position 1 : les pôles nord et sud de la bobine ① sont inversés. Ainsi le rotor continue de tourner dans le même sens.

En première approximation, on peut considérer que :

- La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à la tension appliquée aux bornes du moteur : $E = k_e \cdot \omega$.

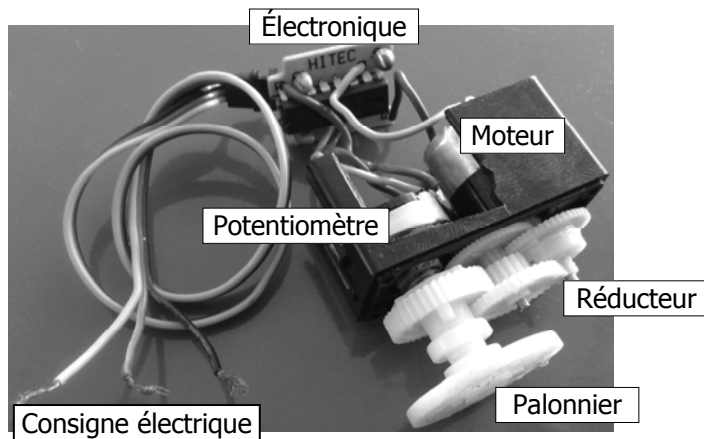
k_e (en V/rad/s) est appelée constante de force électromotrice et sa valeur est fournie dans la documentation constructeur du moteur.

- Le couple moteur disponible sur l'arbre moteur est proportionnel au courant consommé par le moteur : $C = k_c \cdot I$.
 k_c (en N·m/A) est appelée constante de couple mécanique et sa valeur est fournie dans la documentation constructeur du moteur.

N.B. : dans le cas d'un moteur à courant continu à aimant permanent, les constantes k_e et k_c sont égales.

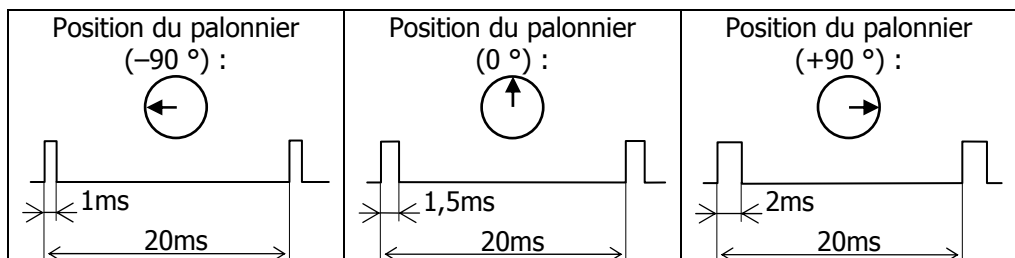
2.3. Servomoteur

Un servomoteur est un moteur piloté en position angulaire et non en vitesse :



Le potentiomètre mesure la position angulaire réelle du palonnier en fournissant une tension proportionnelle à l'angle du palonnier. Ainsi la carte électronique peut corriger la position de ce dernier de telle sorte que la position angulaire soit correcte par rapport à la consigne envoyée au servomoteur. Il est capable de maintenir une position angulaire en fonction d'une consigne : il s'agit donc d'un système asservi.

Généralement, la position angulaire du palonnier du servomoteur est commandée par le rapport cyclique α du signal de consigne dont la durée à l'état haut varie entre 1 ms et 2 ms avec une période de 20 ms :

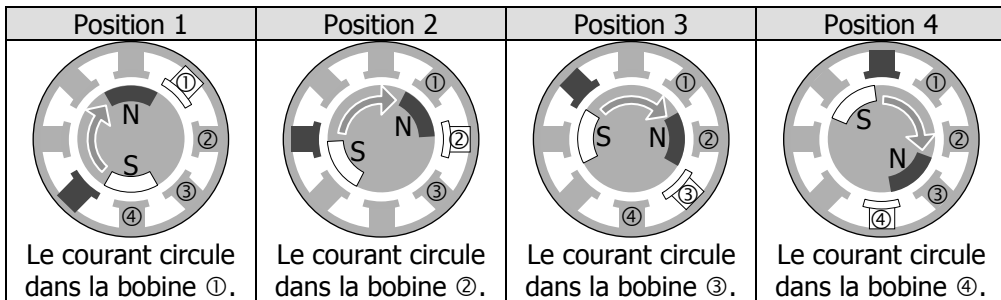
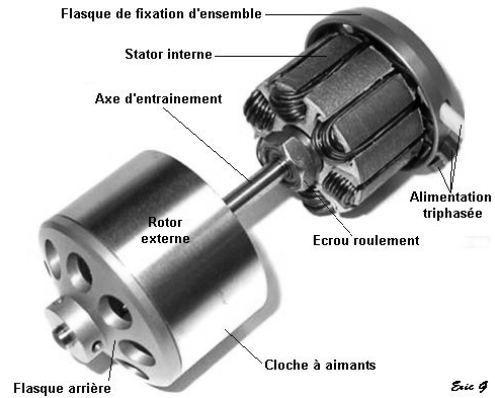


2.4. Moteur brushless

Un moteur brushless (littéralement « moteur sans balais ») est une machine électrique de la catégorie des moteurs synchrones dont :

- ✓ les bobines sont sur le stator ;
- ✓ le rotor est constitué d'aimants.

Un système électronique doit assurer la commutation successive du courant dans les bobines du stator :



Pour continuer le tour, il faut alimenter successivement les bobines ① à ④ en inversant le sens du courant par rapport au tableau ci-dessus ; ainsi les pôles des bobines seront inversés et le rotor continuera de tourner dans le même sens.

La commande d'un moteur brushless se fait via un contrôleur spécifique généralement commandé par un signal MLI (modulation par largeur d'impulsion) : plus le rapport cyclique α sera grand, plus le circuit commutera rapidement le courant dans les bobines du stator, ce qui aura pour effet de faire tourner le moteur plus vite.

Le principal avantage du moteur brushless est d'avoir un meilleur rendement qu'un moteur à courant continu puisqu'il n'y a pas de pertes mécanique et électrique dues à l'ensemble collecteur-balais.

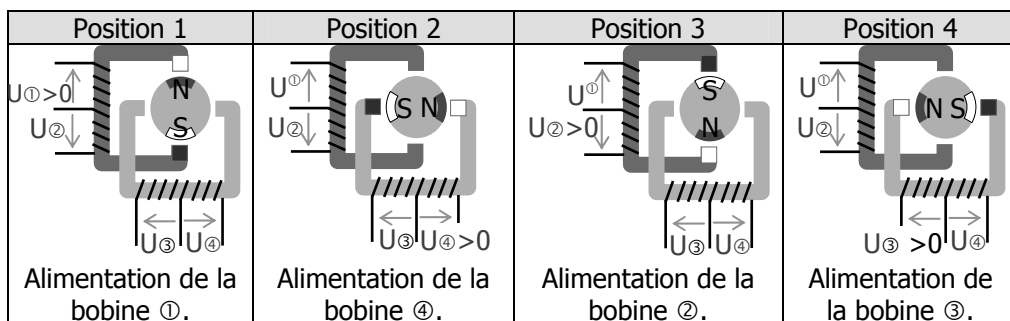
2.5. Moteur pas-à-pas

Un moteur pas-à-pas est constitué d'un rotor à aimants permanents et d'un stator composé de bobinages en quadrature. Il est généralement utilisé dans des applications pour lesquelles on a besoin de maîtriser le déplacement angulaire : imprimante, scanner, pompe à perfusion, robotique, imprimante 3D.

Un déplacement angulaire élémentaire (noté « pas ») est effectué à chaque impulsion de commande. Ainsi une des caractéristiques d'un moteur pas-à-pas est le nombre de pas par tour : on parle alors de la résolution du moteur pas-à-pas.

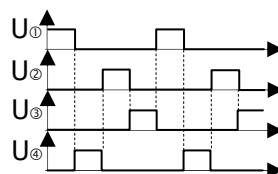
2.5.1. Moteur pas-à-pas unipolaire

Exemple de la commande dans le sens horaire en mode pas entier :



Allure des signaux de commande des bobines du moteur pour tourner dans le sens horaire :

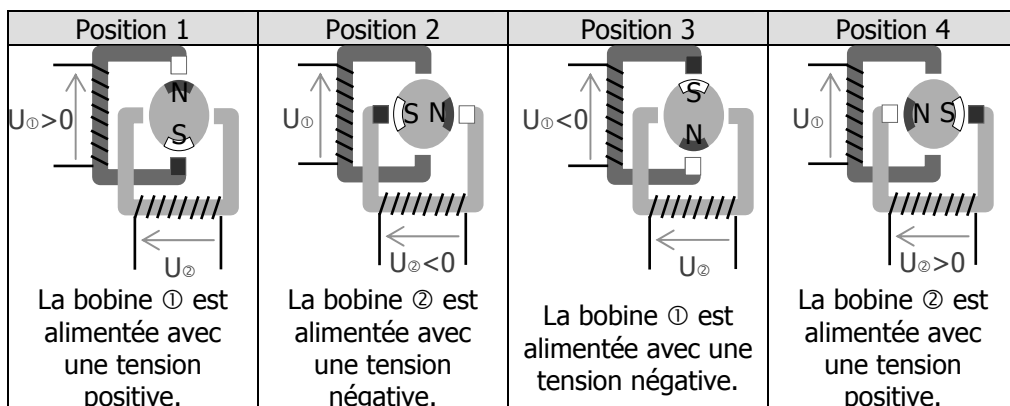
N.B. : pour tourner dans le sens trigonométrique, il suffit d'inverser la succession de commandes des bobines : ①, ②, ③ puis ④.



Les bobines d'un moteur pas-à-pas unipolaire se pilotent uniquement avec des tensions positives et le moteur comporte 6 fils (ou 8 s'il n'y a pas de point commun sur les enroulements ①-② et ③-④).

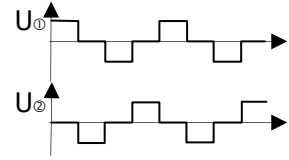
2.5.2. Moteur pas-à-pas bipolaire

Exemple de la commande dans le sens horaire en mode pas entier :



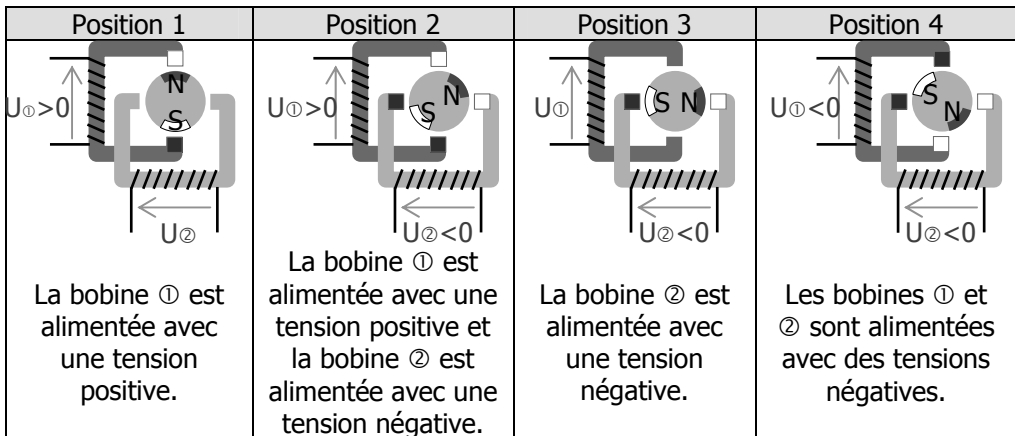
Allure des signaux de commande des bobines du moteur pour tourner dans le sens horaire :

Le moteur pas-à-pas bipolaire comporte 4 fils.



2.5.3. Mode pas entier et demi-pas

- Dans le mode « pas entier » (comme ci-dessus), les bobines sont commandées les unes après les autres. Le rotor se place donc successivement en face chaque bobine.
- Dans le mode « demi-pas », on ajoute une position intermédiaire entre la commande de 2 bobines, en commandant simultanément ces 2 bobines. Ce mode permet d'avoir 2 fois plus de positions et donc d'avoir des déplacements angulaires plus précis :



2.6. Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est un moteur à courant alternatif dont le stator est composé de 3 bobinages orientés à 120° (voir illustration §2.1.1.), alimentés en courant triphasé. Ces bobines créent un champ magnétique tournant dont sa vitesse de rotation est appelée vitesse de synchronisme :

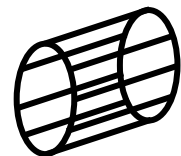
$$\Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}$$

Ω_s : vitesse de synchronisme (en rad/s) ;

f : fréquence d'alimentation des bobinages du stator (en Hz) ;

p : nombre de paires de pôles.

Le rotor est constitué d'une cage de Faraday (ou cage d'écu-reuil) : des barres conductrices sont reliées entre elles par 2 couronnes conductrices à chaque extrémité :



Lorsque le rotor est soumis à une variation du champ magnétique, les conducteurs sont alors traversés par des courants induits. De ces courants, il en résulte les forces de Laplace : le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme.

Cette différence de vitesse entre la vitesse de synchronisme Ω_s et la vitesse réelle Ω du rotor est appelée glissement (nombre sans unité) :

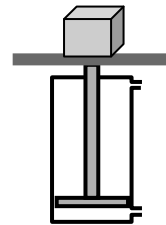
$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

➔ Exercices

Pneumatique, hydraulique

Exercice 8.1 – Dimensionnement d'un vérin

À la sortie d'une chaîne de fabrication, des paquets de café sont stockés sur un plateau dont le déplacement vertical est assuré par un vérin :



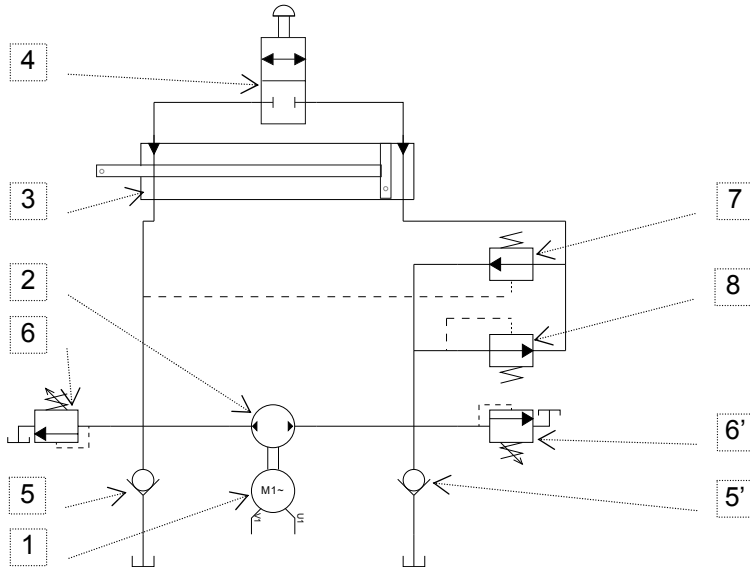
En vue de dimensionner le diamètre du vérin, on donne les caractéristiques du système :

- Poids du plateau : 7 kg
- Poids de la charge : 100 paquets (250 g/paquet)
- Longueur du déplacement : 100 mm
- Pression d'alimentation : 5 bars

1. Isoler l'ensemble {paquets de café + plateau} et déterminer la force utile, F_{utile} , engendrée par cet ensemble.
2. On isole la tige du vérin. Justifier que la norme de la force exercée par l'air de la chambre arrière du vérin est égale à la norme de F_{utile} trouvée à la question précédente.
3. Déterminer $F_{\text{nécessaire}}$, force exercée par l'air de la chambre arrière, nécessaire pour respecter un taux de charge de 75 %.
4. À partir de la pression d'alimentation et de la force nécessaire, calculer la surface minimum soumise à la pression (en m^2).
5. En déduire le diamètre minimum du piston du vérin (en mm).

Exercice 8.2 – Ouvre-portail

On donne le schéma hydraulique d'un ouvre-portail dont la manœuvre du vantail est faite par un vérin :



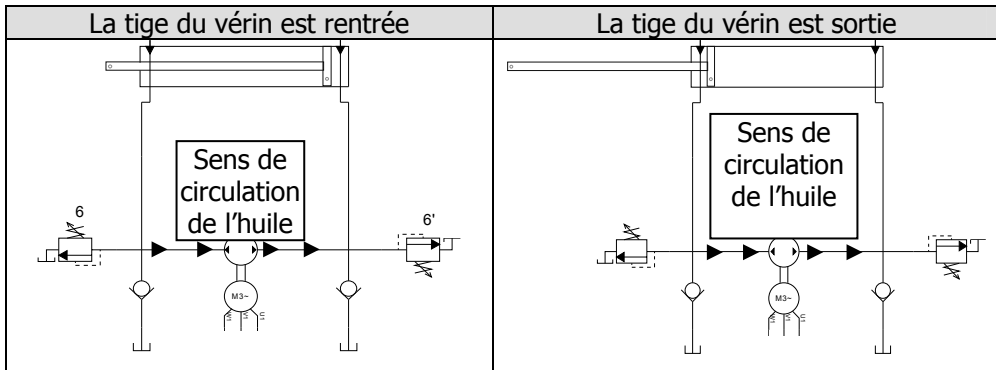
1. Compléter la nomenclature du schéma hydraulique :

Repère	Désignation
1	Moteur électrique
2	
3	
4	Distributeur 2/2 de déverrouillage pour commande manuelle
5 et 5'	
6 et 6'	
7 et 8	

2. Sur le schéma hydraulique, flécher le sens de parcours du fluide (huile) dans le circuit :

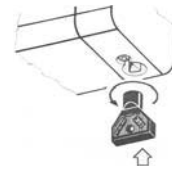
- en rouge, lors de la fermeture du vantail ;
- en vert, lors de l'ouverture du vantail.

3. Flécher le sens de parcours du fluide (huile) pour les 2 cas :

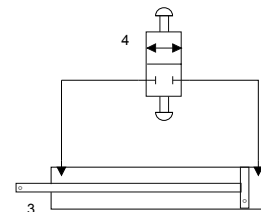


4. Donner alors le rôle des composants réglables 6 et 6'.

En cas de coupure de courant ou de défaillance éventuelle, le portail peut être débloqué en introduisant une clé dans le support triangulaire du dispositif de déverrouillage et en la tournant dans le sens contraire aux aiguilles d'une montre. Il est ainsi possible d'ouvrir le portail à la main.



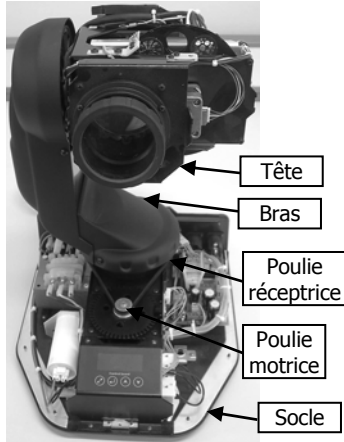
5. À partir du schéma ci-contre, expliquer pourquoi il est 'impossible' de sortir la tige du vérin ?



6. Que faut-il faire afin de pouvoir actionner manuellement la tige du vérin ? Tracer alors la circulation du fluide (huile) dans le circuit.

Moteurs électriques

Exercice 8.3 – Projecteur asservi de spectacle



Un projecteur asservi de spectacle est un système permettant d'orienter le faisceau lumineux en fonction d'une consigne émise par un pupitre de commande.

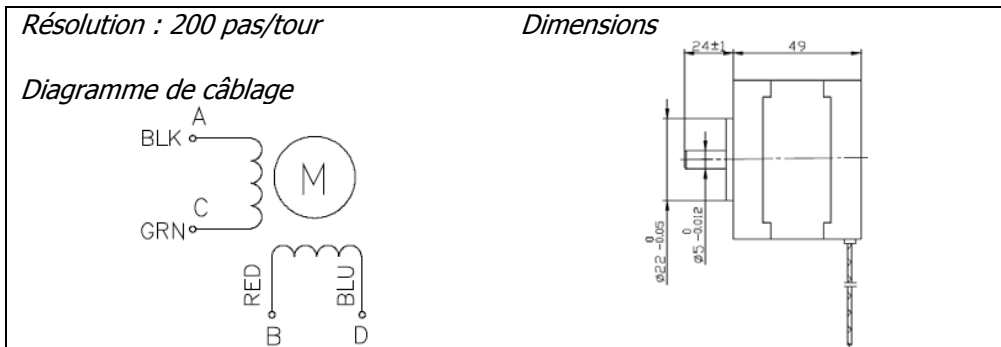
Le projecteur possède 2 mouvements de rotation pan et tilt :

- rotation d'axe vertical (pan) : entre le socle et le bras ;
- rotation d'axe horizontal (tilt) : entre le bras et la tête.

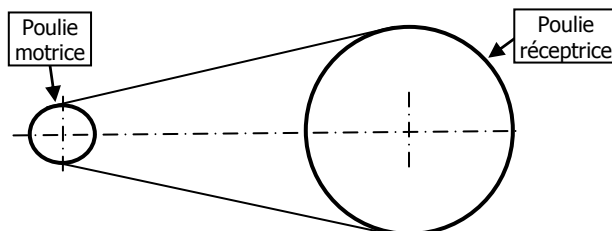
Caractéristiques des poulies d'entraînement du mouvement de rotation d'axe vertical :

- poulie motrice (montée directement sur l'axe du moteur) : $\varnothing 25$ mm ;
- poulie réceptrice : $\varnothing 115,6$ mm.

Extrait de la documentation du moteur pas-à-pas entraînant la poulie motrice

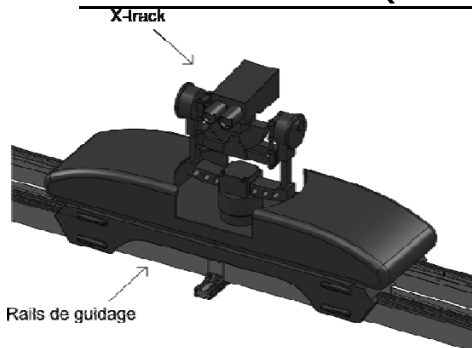


1. À partir du diagramme de câblage du moteur pas-à-pas, le projecteur utilise-t-il un moteur unipolaire ou bipolaire ?
2. Déterminer le nombre de pas que le moteur fait pour un tour complet de la poulie motrice.
3. En déduire l'angle α_{pas} (en degré) effectué par le moteur pour 1 pas.
Soit le schéma de la transmission (vue de dessus) :



4. Calculer le rapport de transmission R .
5. À partir du rapport de transmission R , déterminer l'angle β parcouru par le bras du projecteur lorsque le moteur tourne d'un pas.
6. D'après la documentation technique du projecteur, le bras peut effectuer une rotation de 530° , combien de pas le moteur doit-il faire pour que le bras effectue une rotation complète ?

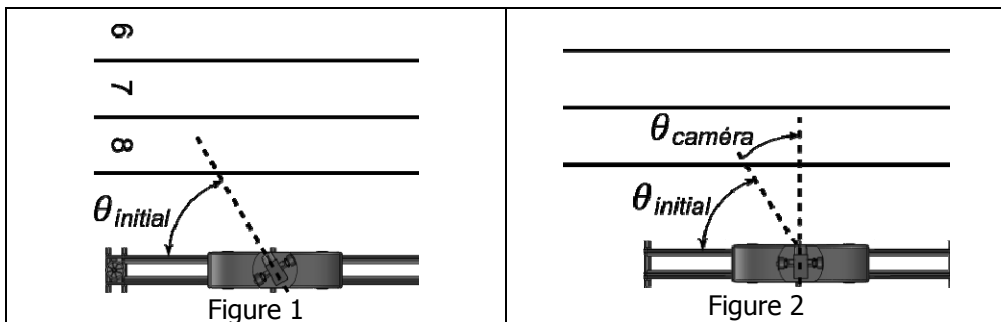
Exercice 8.4 – X-track (Bac SI)



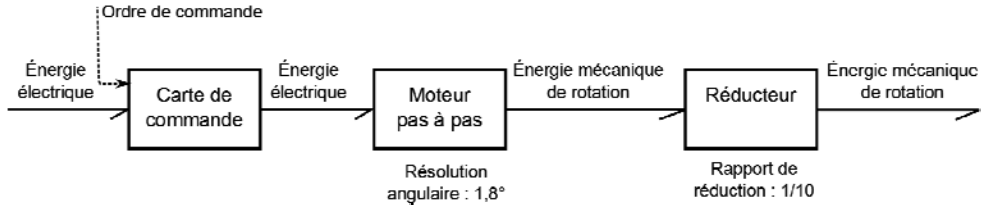
Pour apporter plus de dynamisme à la retransmission télévisée de l'épreuve d'athlétisme du 100 m, la société XD-motion utilise le système X-track qui est une caméra motorisée sur rails. Cette caméra est positionnée parallèlement à la piste.

Le X-track présente les avantages de réaliser une image de l'ensemble des athlètes avant le départ, de suivre la tête de la course durant l'épreuve et d'obtenir une vue d'ensemble des concurrents de tête sur le final.

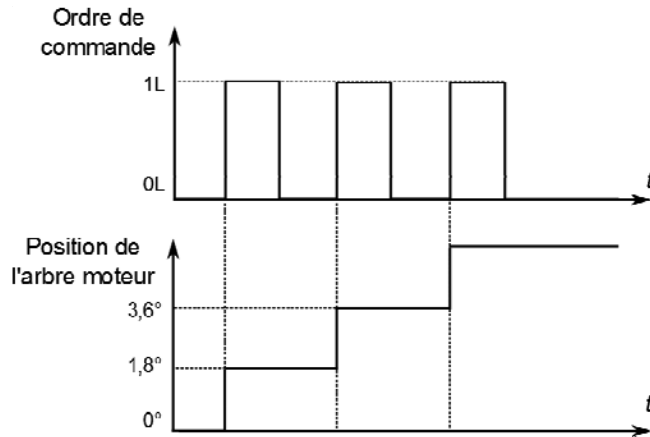
Pour permettre de voir l'ensemble des athlètes au départ (figure 1), puis suivre la course de côté (figure 2), la caméra doit pouvoir pivoter :



Le choix de la solution technique permettant ce mouvement est un moteur pas à pas McLennan 23 HSX-306, en raison de son faible coût et de sa facilité de mise en œuvre. Ce moteur est implanté dans une chaîne d'énergie dont la structure est illustrée ci-dessous :



La carte de commande permet de traduire l'ordre de commande en une position angulaire en sortie du moteur (figure ci-dessous). Chaque impulsion de l'ordre de commande se traduit par la rotation d'un pas de l'arbre de sortie du moteur. Sur un tour, un moteur pas à pas possède un nombre fini (entier) de positions angulaires : ce qui définit la résolution angulaire.



Afin d'améliorer la précision de positionnement de la caméra, un réducteur de rapport $\frac{1}{r} = \frac{1}{10}$ est inséré entre le moteur pas à pas et la caméra.

La figure ci-dessous fait apparaître le positionnement du X-track au début de la course. La caméra doit viser le milieu de la piste, entre les couloirs 4 et 5 (à ± 15 cm). Chaque couloir a pour largeur 1,22 m :

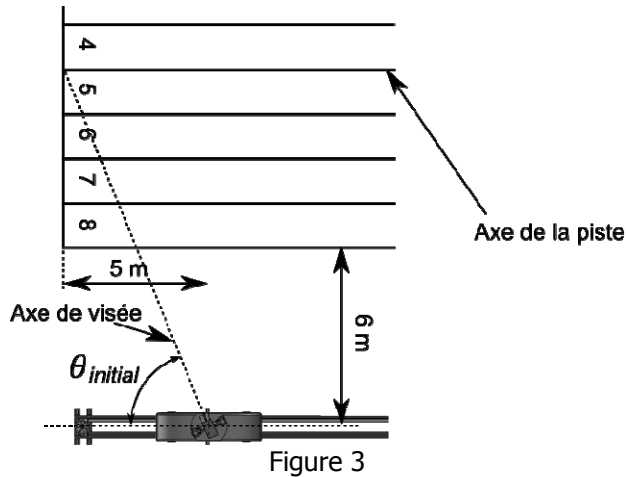


Figure 3

- Déterminer l'angle théorique θ_{initial} (défini sur la figure 3) que forme l'axe de visée avec l'axe de la piste au moment du « top départ » en considérant que la caméra pointe le centre exact de la piste. Sachant que l'angle final de la caméra par rapport à l'axe de la piste doit être de 90° , calculer l'angle $\theta_{\text{caméra}}$ (défini sur la figure 2) que doit parcourir la caméra.
- En déduire l'angle de rotation θ_{moteur} de l'arbre moteur ainsi que le nombre entier N_{pas} de pas correspondant à cette rotation.

Exercice 8.5 – Vitesse de synchronisme d'un moteur asynchrone

Soit un moteur asynchrone ayant les caractéristiques :

- 2 paires de pôles ;
- fréquence nominale 50 Hz.

- Déterminer la vitesse de synchronisme Ω_s (en rad/s).
- En déduire la fréquence de rotation de synchronisme N_s (en tr/min).

→ Solutions

Exercice 8.1 – Dimensionnement d'un vérin

$$1. F_{\text{utile}} = m \cdot g = (7 + (100 * 0,250)) \cdot 10 = 320 \text{ N}$$

- Si on néglige le poids de la tige, la tige est soumise à 2 forces :
 - la charge {paquets de café + plateau} ;
 - l'air de la chambre arrière.

Donc les 2 forces sont directement opposées (même droite support, même norme, sens opposés).

$$3. F_{\text{nécessaire}} = \frac{F_{\text{utile}}}{0,75} = 427 \text{ N}$$

$$4. S = \frac{F_{\text{nécessaire}}}{P} = \frac{427}{5 \cdot 10^5} = 0,00085 \text{ m}^2$$

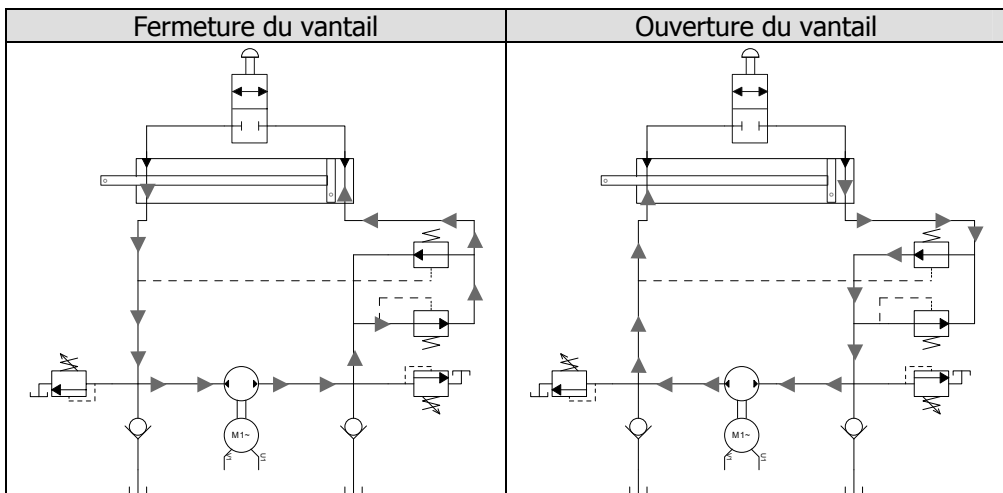
$$5. S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ soit } D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 32,9 \text{ mm}$$

Exercice 8.2 – Ouvre-portail

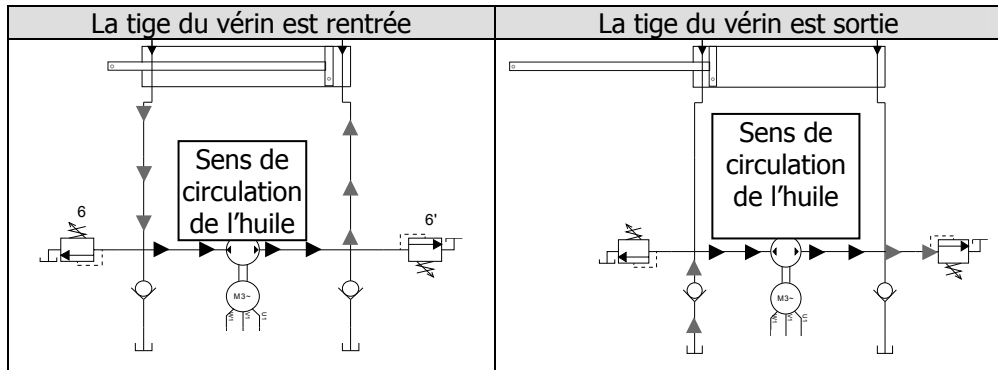
1. Nomenclature du schéma hydraulique :

Repère	Désignation
1	Moteur électrique
2	Pompe hydraulique à 2 sens de flux
3	Vérin double effet à simple tige
4	Distributeur 2/2 de déverrouillage pour commande manuelle
5 et 5'	Clapet d'anti-retour
6 et 6'	Limiteur de pression réglable
7 et 8	Limiteur de pression

2. Sens de parcours du fluide (huile) dans le circuit hydraulique :



3. Sens de parcours du fluide (huile) pour les 2 cas :



4. Ils permettent de faire circuler le fluide par le réservoir afin de ne pas faire forcer la pompe hydraulique.

5. Impossibilité d'évacuer de l'huile de la chambre gauche du vérin.

6. Changer la position du distributeur 4 : ainsi l'huile peut circuler librement entre les deux chambres du vérin.

Exercice 8.3 – Projecteur asservi de spectacle

1. Le moteur possède 4 fils : donc il s'agit d'un moteur pas-à-pas bipolaire.
2. La résolution du moteur est de 200 pas/tour.
3. 1 tour = 360° or le moteur à une résolution de 200 pas/tour, donc l'angle effectué pour un pas est de : $\alpha_{\text{pas}} = 360 / 200 = 1,8^\circ$
4. $R = \text{Diamètre poulie motrice} / \text{Diamètre poulie réceptrice}$
 $R = 25 / 115,6 = 0,216$
5. $\beta = 0,216 * 1,8^\circ = 0,4^\circ$
6. Soit N, le nombre de pas correspondant au débattement de 530° du bras.
 Pour 1 pas, le bras effectue une rotation de $\beta = 0,4^\circ$, d'où :
 $N = 530 / 0,4 = 1325$ pas

Exercice 8.4 – X-track

1. La figure 3 met en évidence un triangle rectangle dont les 3 sommets sont : le centre de la caméra, le croisement entre la ligne de départ et l'axe de visée et le croisement entre la ligne de départ et l'axe de translation du X-track.

On a donc : $\tan(\theta_{\text{initial}}) = \frac{6 + 4 \times 1,22}{5}$ soit $\theta_{\text{initial}} = 65,32^\circ$

La figure 2 montre que : $\theta_{\text{initial}} + \theta_{\text{caméra}} = 90^\circ$

Par conséquent : $\theta_{\text{caméra}} = 90 - 65,32 = 24,68^\circ$

2. En prenant en compte le rapport de réduction, on peut en déduire que :

$$\theta_{\text{moteur}} = \frac{\theta_{\text{caméra}}}{\text{rapport de réduction}} = \frac{1}{1/10} = 246,8^\circ$$

La résolution angulaire du moteur pas-à-pas est de $1,8^\circ$:

$$N_{\text{pas}} = \frac{\theta_{\text{moteur}}}{\text{résolution}} = \frac{246,8}{1,8} = 137,1 \text{ pas}$$

Le nombre entier de pas est donc 137.

Exercice 8.5 – Vitesse de synchronisme d'un moteur asynchrone

$$1. \Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \rightarrow \Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{2} \rightarrow \Omega_s = 157 \text{ rad/s}$$

$$2. \Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_s}{60} \rightarrow N_s = \frac{60 \cdot \Omega_s}{2 \cdot \pi} \rightarrow \Omega_s = 1500 \text{ tr/min}$$


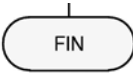

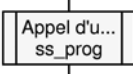

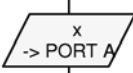

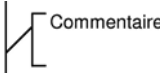
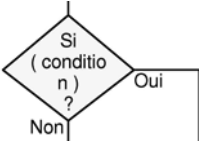
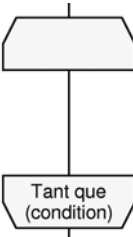
Chapitre 9

Programmation

1. Algorithme

Un algorithme est une description graphique des opérations à exécuter pour résoudre un problème. Il doit être indépendant du langage utilisé pour programmer le microprocesseur du système.

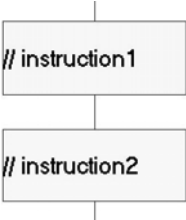
1.1. Liste des symboles

Déclaration			
 DÉBUT	Commencement d'un programme	 FIN	Fin d'un programme
Instruction			
	Instruction, calcul		Appel d'un sous-programme
	Lecture d'une entrée vers une variable		Écriture d'une valeur sur une sortie
	Temporisation		Commentaire à l'attention du lecteur
Structure alternative		Structure itérative	
	Structure alternative		Structure de boucle

1.2. Principales structures

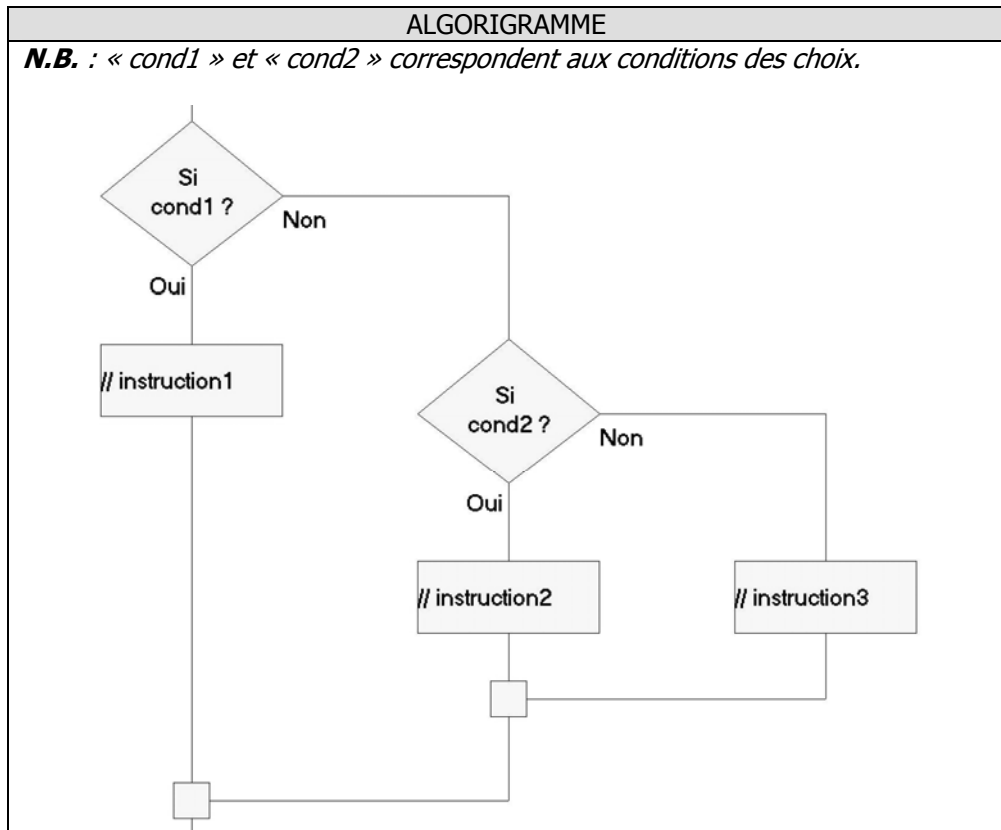
1.2.1. Structure « séquentielle »

Exécution d'instructions les unes après les autres :

ALGORIGRAMME	Langage C (Arduino)	Python
 <pre> graph TD A[// instruction1] --- B[// instruction2] </pre>	<pre> instruction1 ; instruction2 ; ... </pre> <p>N.B. : En langage C, chaque instruction se termine par un point-virgule (;).</p>	<pre> instruction1 instruction2 ... </pre>

1.2.2. Structure « alternative »

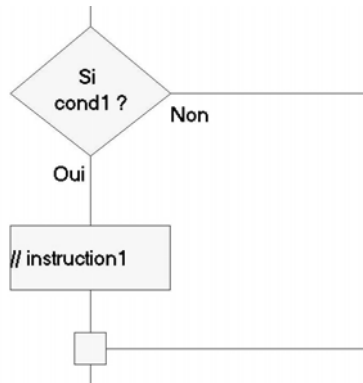
Il s'agit d'exprimer un choix :



Langage C (Arduino)	Python
<pre>if (condition1) { instruction1 ; } else if (condition2) { instruction2 ; } else { instruction3 ; }</pre>	<pre>if condition1 : instruction1 elif condition2 : instruction2 else: instruction3</pre>

N.B. :

- La partie « *sinon-si (else if ou elif)* » est facultative ou peut être dupliquée autant de fois que nécessaire.
- La partie « *sinon (else)* » est facultative :



1.2.3. Structure « itérative » (boucle)

Une structure itérative permet d'effectuer une boucle, c'est-à-dire exécuter plusieurs fois un ensemble d'instructions.

Il existe 2 types de structures itératives : boucle bornée ou non bornée. Pour choisir une structure itérative, il faut se poser 3 questions :

- ✓ « Est-ce que je connais à l'avance, le nombre de fois que doit s'exécuter la boucle ? », si oui alors on utilise une structure bornée « Pour ».
- ✓ Sinon, « Est-il possible que les instructions ne s'exécutent jamais dans le cas où la condition est fausse dès le départ ? », si oui alors on utilise une structure non bornée « Tant que () Faire ».
- ✓ Sinon, « Les instructions doivent-elle être exécutées au moins une fois ? », si oui alors on utilise une structure non bornée « Faire ... Tant que () ».

→ **Boucle bornée**

- Pour (...) Faire ...

ALGORIGRAMME	
Exemple avec une boucle s'exécutant 5 fois :	
Langage C (Arduino)	Python
<pre>int cpt ; for(cpt=0 ; cpt<4 ; cpt++) { intruction1 ; instruction2 ; }</pre> <p>N.B. : « cpt » est une variable qui est initialisée à 0 puis qui s'incréménte (cpt++), à chaque itération. Les instructions 1 et 2 s'exécutent tant que la condition (cpt<4) est vraie.</p>	<pre>for i in range(5): instruction1 instruction2</pre> <p>N.B. : « i » est une variable prenant toutes les valeurs entières de 0 à 4.</p>

→ **Boucle non bornée**

- Faire ... Tant que (...)

ALGORIGRAMME	Langage C (Arduino)	Python
<p>Faire ... Tant que (condition)</p>	<pre>do { instruction1 ; instruction2 ; } while (condition) ;</pre>	<p>Cette structure n'existe pas en Python</p>

- Tant que (...) Faire ...

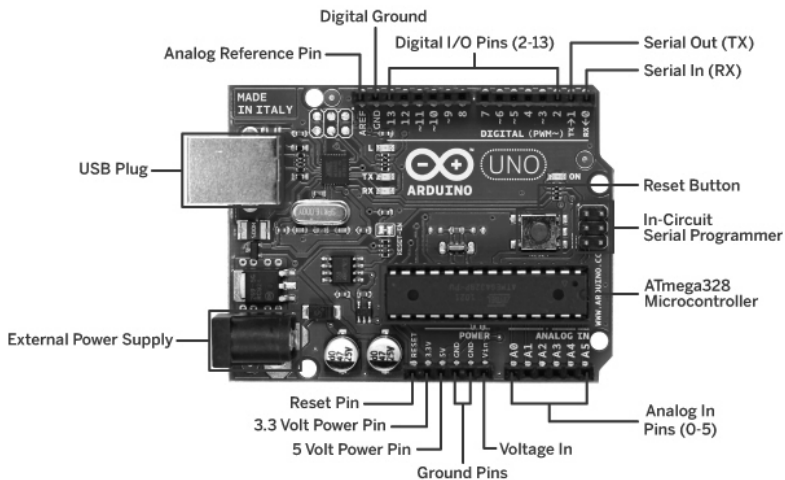
ALGORIGRAMME	
<p>Tant que (condition) faire ...</p> <pre> graph TD Start([Tant que condition]) --> Loop[// instruction(s)] Loop --> End([)] </pre>	
Langage C (Arduino)	Python
<pre> while (condition) { instruction1 ; instruction2 ; } </pre>	<pre> while condition: instruction1 instruction2 </pre>

2. Langage C pour cartes Arduino

2.1. Description d'une carte Arduino

Les cartes Arduino sont des circuits imprimés open-source de prototypage rapide en électronique et informatique embarquée. La carte mère de type UNO contient :

- un microcontrôleur programmable via USB ;
- des broches d'entrée / sortie binaires (TOR = Tout Ou Rien) ;
- et des broches d'entrée analogiques.




N.B. : les broches numériques identifiées par un tilde (~) peuvent être utilisées pour générer un signal MLI (ou PWM).

Une multitude de cartes filles (shield) permettent d'étendre les possibilités de la carte mère. On peut citer les cartes « Grove » :

http://wiki.seeedstudio.com/Grove_System/

2.2. Environnement de développement Arduino

Les cartes Arduino se programment avec un langage proche du langage C.

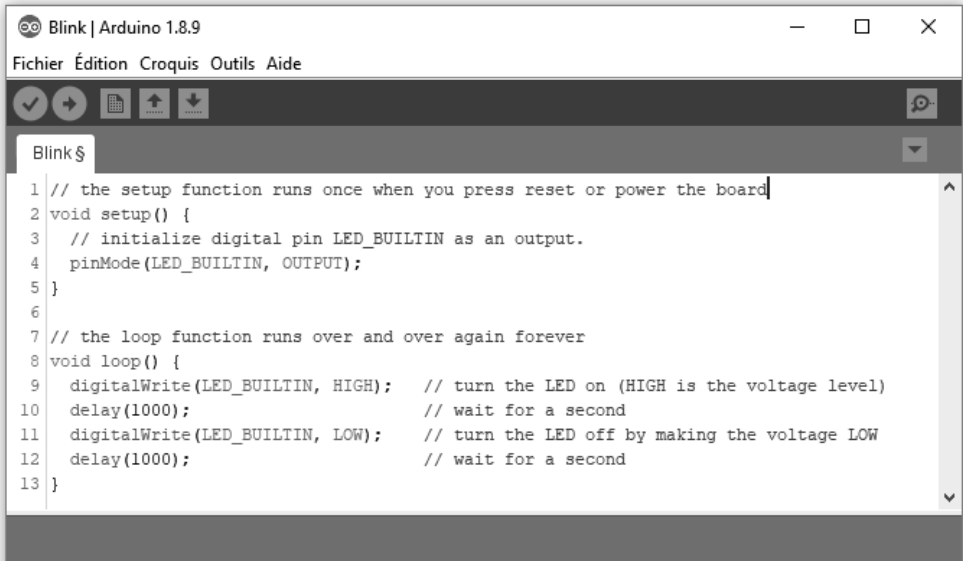
L'EDI (Environnement de Développement Intégré) Processing  `arduino.exe` est open source et en téléchargement sur Internet :

<https://www.arduino.cc>

La liste des structures, des variables d'environnement, des constantes systèmes et des fonctions de base du langage C pour Arduino est fournie à l'adresse :

<https://www.arduino.cc/reference/en/>

Exemple : programme permettant de faire clignoter la LED intégrée à la carte Arduino (période 2 secondes) :



```

Blink $
1 // the setup function runs once when you press reset or power the board
2 void setup() {
3   // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
4   pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
5 }
6
7 // the loop function runs over and over again forever
8 void loop() {
9   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
10  delay(1000); // wait for a second
11  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
12  delay(1000); // wait for a second
13 }

```

La structure du programme se décompose en 2 parties :

- la fonction `void setup()` s'exécute une seule fois, au démarrage du système (mise sous tension ou suite à l'appui sur le bouton reset) ;
- la fonction `void loop()` contient le programme principal. Cette fonction s'exécute en boucle tant que le système est sous tension.

- N.B. :**
- En langage C, chaque instruction se termine par un point-virgule (;).
 - Les lignes débutant par 2 antislash // sont des commentaires à destination du programmeur et non exécutées par le microcontrôleur.

2.3. Déclaration des constantes et des variables

2.3.1. Constante

Pour définir une constante, on peut utiliser l'une des deux syntaxes suivantes :

- `const type nom_de_la_constant = valeur_de_la_constant ;`
- `#define nom_de_la_constant valeur_de_la_constant`

Exemple : `const float pi = 3.14;`
`#define pi 3.14`

2.3.2. Variable

Avec le langage C, les variables doivent être typées. Lors de la déclaration d'une variable, il faut spécifier le type de données qu'elle contiendra : nombre entier, nombre réel, caractères, booléen, ...

La syntaxe est : `type_de_la_variable nom_de_la_variable ;`

Exemple :

- déclaration d'une variable « compteur » de type entier : `int compteur ;`
- déclaration d'une variable « prixHT » de type réel : `float prixHT ;`

2.4. Entrées / sorties numériques

2.4.1. Affectation des entrées / sorties numériques

Les broches numériques (binaires) des cartes Arduino peuvent être configurées individuellement en entrée ou en sortie. Pour cela, dans la fonction `setup()`, il faut spécifier le sens, de chacune des broches utilisées dans l'application avec la fonction : `pinMode(N°_broche, sens) ;`

L'argument « sens » peut prendre 3 valeurs :

- `OUTPUT` : définit la broche en sortie ;
- `INPUT` : définit la broche en entrée ;
- `INPUT_PULLUP` : définit la broche en entrée et active la résistance interne de « pullup ».

2.4.2. Lecture et écriture sur une entrée / sortie numérique

Les fonctions d'entrées / sorties numériques permettent de lire l'état logique d'une entrée ou de commander l'état d'une sortie.

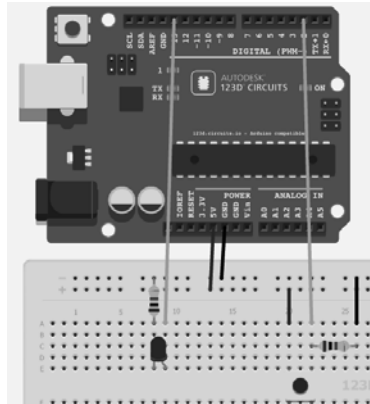
Prototype des fonctions disponibles :

- `bool digitalRead(int N°_broche) ;`
Renvoie le niveau logique (HIGH ou LOW) correspondant à l'état de la broche passée en argument de la fonction.
- `void digitalWrite(int N°_broche, bool état) ;`
Place le niveau logique (HIGH ou LOW) passé en argument (état) sur la broche spécifiée.

Exemple : le programme doit éclairer la LED si l'utilisateur appuie sur le bouton poussoir sinon elle est éteinte.

Câblage :

- Led Rouge connectée à la broche 13.
- Bouton poussoir connecté à la broche 2.



```

E_S_numeriques
1 // Déclaration d'une variable
2 int etatBouton = 0; // variable qui sera utilisée pour stocker l'état du bouton
3
4 void setup() { // le code dans cette fonction est exécuté une fois au début
5   pinMode(2, INPUT);
6   pinMode(13, OUTPUT);
7 }
8
9 void loop(){ // le code dans cette fonction est exécuté en boucle
10 // lit l'état du bouton et stocke le résultat dans "etatBouton" :
11   etatBouton = digitalRead(2);
12
13   if (etatBouton == HIGH) {
14     digitalWrite(13, HIGH);
15   }
16   else {
17     digitalWrite(13, LOW);
18   }
19 }

```

2.5. Entrées / sorties analogiques

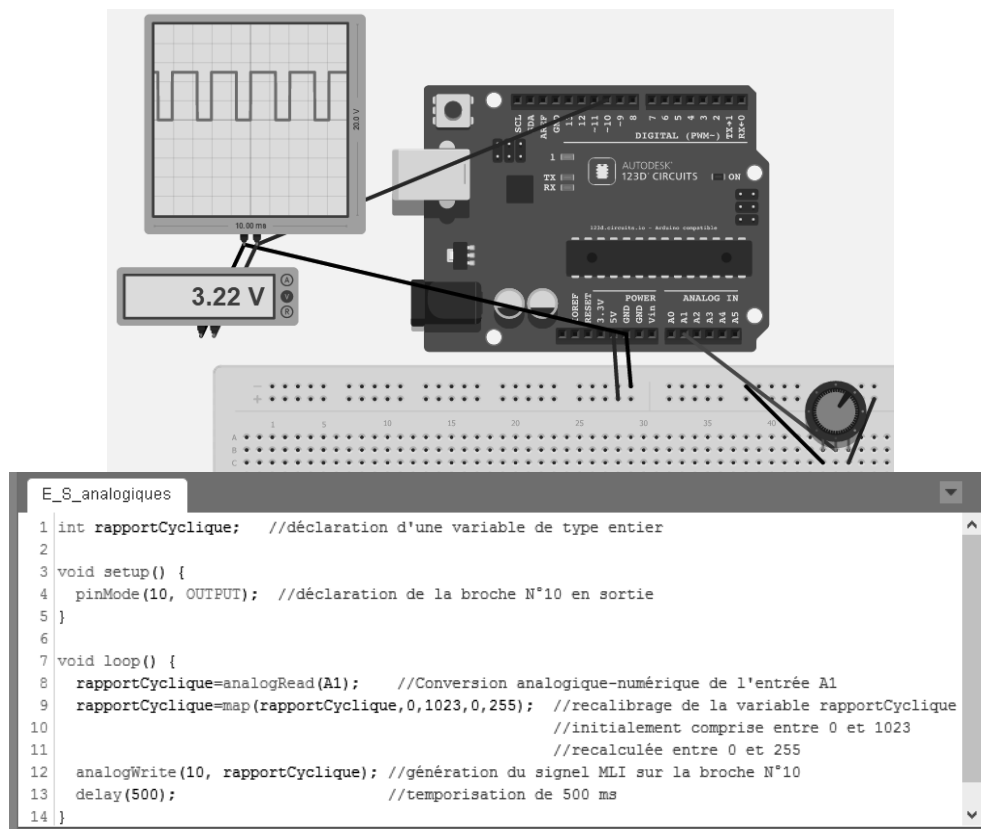
Les fonctions d'entrées / sorties analogiques permettent de convertir la tension analogique présente sur une entrée (0 à 5 V) en un nombre binaire ou de générer un signal MLI (Modulation par Largeur d'Impulsion = PWM en anglais) sur une sortie.

Prototype des fonctions disponibles :

- `int analogRead(int N°_broche) ;`
 Renvoie une valeur entière comprise entre 0 et 1023 correspondant à la conversion analogique-numérique de la tension (comprise entre 0 et 5 V) appliquée sur la broche passée en argument.

- `void analogWrite(int N°_broche, int8 rapportCyclique) ;`
 La fonction génère un signal MLI sur la broche passée en argument dont le rapport cyclique correspond à la valeur passée en argument (cette valeur est comprise entre 0 (= 0 %) et 255 (= 100 %)).

Exemple : programme permettant de générer un signal MLI dont la valeur du rapport cyclique est commandée par l'utilisateur via une résistance ajustable.



2.6. Utilisation d'une librairie

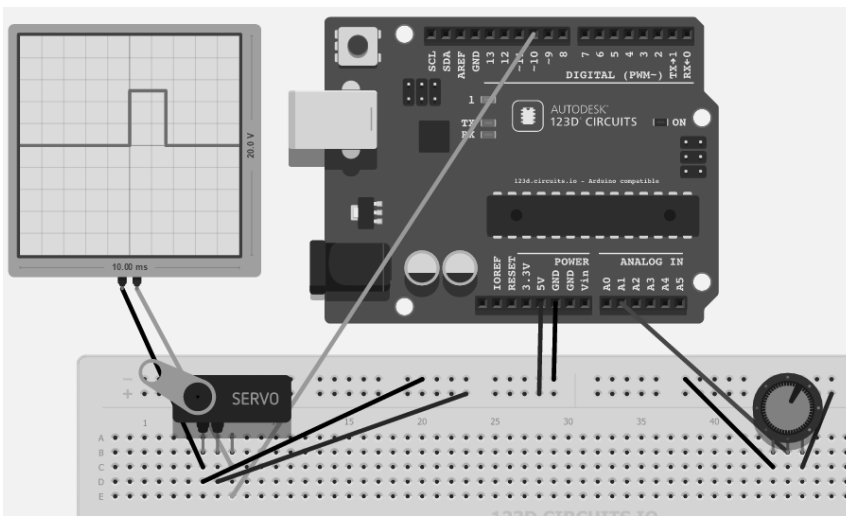
En informatique, une librairie ou bibliothèque logicielle est une collection de fonctions prêtes à être utilisées par des programmes.

Une liste (non exhaustive) de bibliothèques utilisables avec Arduino est disponible :
<https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries>

Pour inclure les fonctions d'une bibliothèque dans un programme, il faut débiter le programme en donnant le nom de la bibliothèque à partir de l'instruction :

```
#include <Nom_de_la_bibliothèque>
```

Exemple : écrire un programme permettant de piloter la position d'un servomoteur en fonction d'une consigne fournie par l'utilisateur via une résistance ajustable.



Pour piloter le servomoteur, il faut utiliser la bibliothèque `servo.h` qui contient les fonctions suivantes :

<code>attach()</code>	Affecte la broche de la carte Arduino connectée au servomoteur.
<code>write()</code>	Envoie une consigne angulaire au servomoteur : valeur comprise entre 0 et 180.
<code>writeMicroseconds()</code>	Envoie une impulsion exprimée en microseconde.
<code>read()</code>	Lit la consigne envoyée au servomoteur.
<code>attached()</code>	Vérifie que le servomoteur est bien associé à la broche de la carte Arduino.
<code>detach()</code>	Libère la broche de la carte Arduino connectée au servomoteur.

On obtient alors le programme :

```

ServoMoteur
1 #include <Servo.h>      //inclusion des fonctions (classes) de la librairie servo.h
2
3 Servo myservo;         //instanciation d'un objet "myservo" de type servomoteur
4 int angle;
5
6 void setup() {
7   myservo.attach(10);  //affectation du servomoteur à la broche N°10
8 }
9
10 void loop() {
11   angle=analogRead(A1);
12   angle=map(angle,0,1023,0,180);
13   myservo.write(angle); //envoi de la consigne angulaire au servomoteur (via la broche N°10)
14   delay(500);
15 }

```

2.7. Fonctions

Les fonctions sont utilisées lorsque des mêmes opérations doivent être réalisées plusieurs fois. Elles aident aussi pour améliorer la lisibilité du code et structurer un programme en éléments modulaires. Une fonction est une « entité » qui intègre une portion de code effectuant un traitement spécifique.

La déclaration d'une fonction suit la syntaxe suivante :

```

typeRetour nomFonction(type argument)
{
  ...
  return variable_à_retourner ;
}

```

Cas particuliers de fonctions :

- La fonction n'a pas besoin d'argument : ne rien mettre entre les parenthèses (ou mettre le type `void`) :

```

typeRetour nomFonction(void)
{
  ...
  return variable_à_retourner ;
}

```

- La fonction a besoin de plusieurs arguments : mettre une virgule entre chaque couple « type variable » :

```

typeRetour nomFonction(type arg1, type arg2, type arg3)
{
  ...
  return variable_à_retourner ;
}

```

- La fonction ne renvoie pas de résultat : spécifier `void` comme type de retour et ne pas mettre la commande `return` à la fin de la fonction :

```
void nomFonction (type argument)
{
    ...
}
```

Exemple : soit une fonction qui renvoie un nombre élevé à la puissance 2 :

Déclaration de la fonction	Utilisation de la fonction dans le programme
<pre>float carre(float nb) { float resultat ; resultat = nb * nb ; return resultat ; }</pre> <p><i>La fonction « <code>carre()</code> » a besoin d'un nombre réel et retourne le résultat sous la forme d'un réel.</i></p>	<pre>void setup() { float x, y ; x = carre(4) ; print(x) ; y = 2.7 ; x = carre(y) ; print(x) ; }</pre>

3. Langage Python pour cartes circuitPython

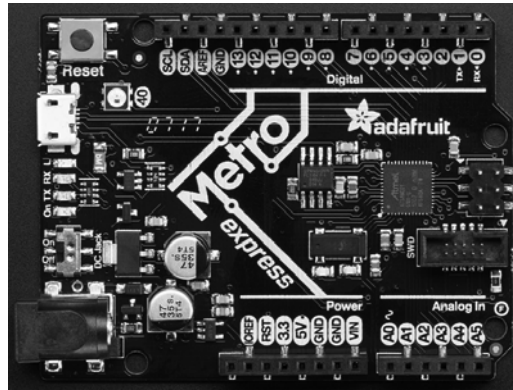
Quelques règles de syntaxe du langage Python, par rapport au « langage C – Arduino » (paragraphe précédent) :

- une instruction se termine par un retour à la ligne (touche [Entrée]), il n'y a pas de point-virgule (;) ;
- les accolades ({ }) qui définissent des blocs sont remplacées par une indentation du code (tabulation) ;
- Une ligne débutant par un hashtag (#) correspond à un commentaire du programmeur non exécuté par le microcontrôleur.

3.1. Description d'une carte Metro M0 Express


La carte Metro M0 Express est un circuit imprimé de prototypage rapide en électronique et informatique embarquée, programmable en Python, qui contient :

- un microcontrôleur programmable via USB ;
- des broches d'entrées / sorties binaires (TOR = Tout Ou Rien) ;
- une sortie analogique (A0) ;
- et des broches d'entrée analogiques (A1 à A5).



N.B. : le brochage de la carte Metro M0 Express est compatible avec la carte Arduino Uno.


3.2. Environnement de développement Mu Editor

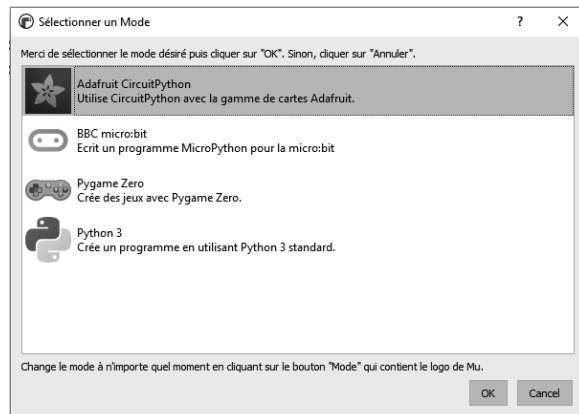
La carte Metro M0 Express (comme la carte micro:bit) se programme en langage Python avec l'EDI (Environnement de Développement Intégré) «  mu editor », en téléchargement sur Internet :

<https://codewith.mu/>

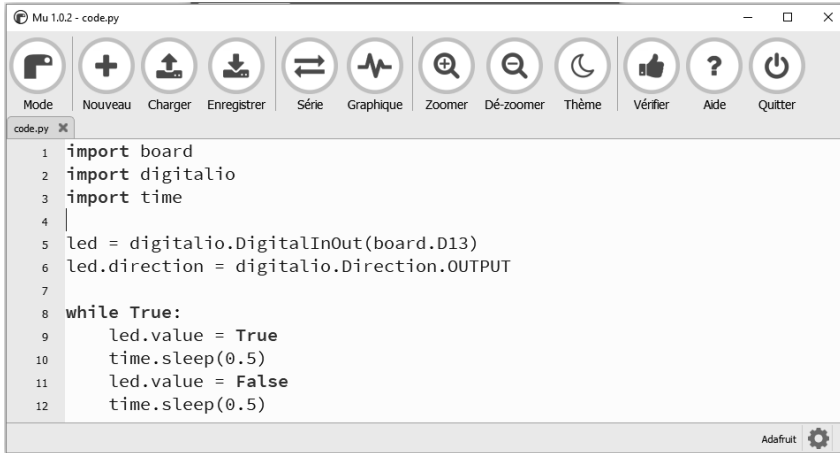
La liste des fonctions circuitPython est fournie à l'adresse :

<https://learn.adafruit.com/adafruit-metro-m0-express-designed-for-circuitpython/the-next-step>

Au lancement de l'EDI «  mu editor », il faut choisir le mode de fonctionnement « Adafruit CircuitPython » :



Puis ensuite on obtient la fenêtre ci-dessous :



Lors de la création d'un nouveau programme, l'enregistrer sur la carte Metro M0 Express, vue comme un lecteur dans l'explorateur Windows, avec le nom « code.py ». À chaque enregistrement, la carte est réinitialisée.

Pour avoir accès aux fonctions de la carte Metro M0 Express, commencer le programme Python en important les bibliothèques utiles à l'application développée : `board`, `digitalio`, `analogio`, `pulseio` et `time`.

N.B. : le programme Python de la copie d'écran ci-dessus, permet de faire clignoter la LED connectée à la broche digitale N°13 de la carte Metro M0 Express, à une fréquence de 1 Hz.

3.3. Utilisation d'une bibliothèque

Pour inclure les fonctions d'une bibliothèque dans un programme, il faut débiter le programme en donnant le nom de la bibliothèque à partir d'une des 2 solutions :

- `import Nom_de_la_bibliothèque as Nom_abrégé`
puis pour accéder à une fonction : `Nom_abrégé.Nom_fonction()`
- `from Nom_de_la_bibliothèque import *`
puis pour accéder à une fonction : `Nom_fonction()`

N.B. : si on souhaite importer uniquement une fonction d'une bibliothèque, on utilise la syntaxe : `from Nom_de_la_bibliothèque import Nom_de_la_fonction`.

3.4. Déclaration des variables

Avec le langage Python, les variables sont typées dynamiquement (fait par la machine et non pas par le programmeur). Pour déclarer une variable, il suffit simplement de donner son nom et de lui affecter une valeur.

Exemple :

- déclaration d'une variable « n » initialisée avec la valeur 12,5 : `n=12,5`
- déclaration d'une variable « trame » initialisée avec une chaîne de caractères : `trame="Bonjour"`

N.B. : il est possible de connaître le type d'une variable avec la fonction `type()`, par exemple :

```

>>> maVariable=12.5
>>> type(maVariable)
<class 'float'>
>>> |

>>> maVariable="Bonjour"
>>> type(maVariable)
<class 'str'>
>>> |
    
```

3.5. Entrées / sorties numériques

3.5.1. Affectation des entrées / sorties numériques

Les broches numériques (binaires) de la carte Metro M0 Express peuvent être configurées individuellement en entrée ou en sortie. Pour cela, il faut créer une variable image de la broche numérique (par exemple « maBroche ») et lui spécifier le sens, entrée ou sortie :

```

maBroche = digitalio.DigitalInOut(board.Dxx)
maBroche.direction = digitalio.Direction.sens
    
```

Remplacer la valeur « xx » par le numéro de la broche numérique utilisée. La propriété « sens » est à remplacer par une des 2 valeurs :

- OUTPUT : définit la broche en sortie ;
- INPUT : définit la broche en entrée.

3.5.2. Lecture et écriture sur une entrée / sortie numérique

Les fonctions d'entrées / sorties numériques permettent de lire l'état logique d'une entrée ou de piloter l'état logique d'une sortie.

- `maBroche.value = False` ou `True`
Commande l'état logique de la sortie « maBroche ».
- `maBroche.value`
Lecture de l'état logique de l'entrée « maBroche » et renvoie la valeur `False` ou `True`.

Exemple : le programme doit éclairer la LED (broche 13) si l'utilisateur appuie sur le bouton poussoir (connecté à la broche 2) sinon elle est éteinte.

```
code.py
2 import digitalio
3 import time
4
5 BP = digitalio.DigitalInOut(board.D2)
6 BP.direction = digitalio.Direction.INPUT
7 LED = digitalio.DigitalInOut(board.D13)
8 LED.direction = digitalio.Direction.OUTPUT
9
10 while True:
11     if BP.value:
12         LED.value = True
13     else:
14         LED.value = False
```

3.6. Entrées / sorties analogiques

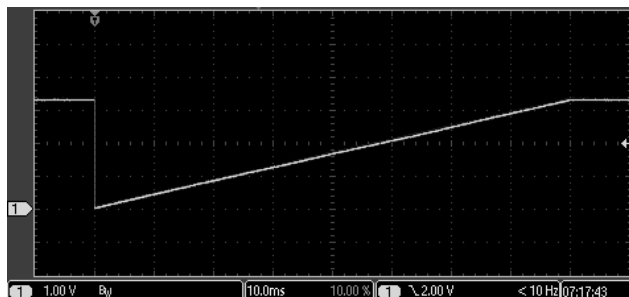
Les fonctions d'entrées / sorties analogiques permettent de convertir la tension analogique présente sur une entrée (0 à 3,3 V) en un nombre binaire ou de convertir un nombre binaire en une tension analogique.

- *maVariable* = `analogio.AnalogIn(board.AXX)`
la variable « *maVariable* » prend la valeur entière comprise entre 0 et 65535 (valeur codée sur 16 bits) correspondant à la conversion analogique – numérique de la tension (comprise entre 0 et 3,3 V) appliquée sur la broche analogique « *xx* ».
- *maBroche* = `analogio.AnalogOut(board.A0)`
maBroche.value = *xx*
Permet de générer une tension analogique (comprise entre 0 et 3,3 V) proportionnelle à la valeur « *xx* » (comprise entre 0 et 65535) affectée.

N.B. : avec la carte Metro M0 Express, il n'y a qu'un seul convertisseur numérique-analogique, connecté à la broche A0.

Exemple : le programme ci-dessous lit la tension appliquée sur l'entrée A1 et génère une rampe de tension sur la sortie analogique A0.

Oscillogramme du signal relevé sur la sortie analogique A0




Programme Python

```
code.py X
3 import analogio
4
5 maBrocheOut = analogio.AnalogOut(board.A0)
6 maBrocheIn = analogio.AnalogIn(board.A1)
7
8 while True:
9     maValeur = maBrocheIn.value
10    print("Valeur analogique : " + str(maValeur))
11    for i in range(0, 65535, 64):
12        maBrocheOut.value = i
13        time.sleep(0.2)
14
```

Adafruit CircuitPython REPL

```
Valeur analogique : 27808
Valeur analogique : 27328
Valeur analogique : 23776
Valeur analogique : 26496
Valeur analogique : 27120
Valeur analogique : 21856
Valeur analogique : 28080
```

La fonction `print` permet d'envoyer un message via la liaison série USB, dans la partie console de « mu editor ». Pour ouvrir et fermer la console, il faut utiliser le bouton .

3.7. Sortie MLI

Un signal MLI (Modulation par Largeur d'Impulsion = PWM en anglais) est un signal rectangulaire de fréquence fixe dont le rapport cyclique est variable.

`maBrocheMli = pulseio.PWMOut(board.Dxx, frequency=yy, duty_cycle=zz)`

- xx : numéro de la broche utilisée ;
- yy : fréquence du signal MLI généré (en hertz) ;
- zz : rapport cyclique compris entre 0 (0 %) et 65535 (100 %).

Exemple : le programme ci-dessous commande l'intensité lumineuse de la LED intégrée à la carte Metro M0 Express (broche 13).

```
code.py X
1 import time
2 import board
3 import pulseio
4
5 led = pulseio.PWMOut(board.D13, frequency=5000, duty_cycle=0)
6
7 while True:
8     for i in range(100):
9         # PWM LED up and down
10        if i < 50:
11            led.duty_cycle = int(i * 2 * 65535 / 100) # Up
12        else:
13            led.duty_cycle = 65535 - int((i - 50) * 2 * 65535 / 100) # Down
14        time.sleep(0.05)
```

N.B. : pour piloter un servomoteur, il faut générer un signal MLI de fréquence 50 Hz dont l'impulsion positive varie de 1 ms (rapport cyclique 5 %) à 2 ms (rapport cyclique 10 %) :

- angle de 0 ° (rapport cyclique 5 %) :

```
maBrocheMli = pulseio.PWMOut(board.Dxx, frequency=50, duty_cycle=3267)
```

- angle de 180 ° (rapport cyclique 10 %) :

```
maBrocheMli = pulseio.PWMOut(board.Dxx, frequency=50, duty_cycle=6554)
```

3.8. Fonctions

La déclaration d'une fonction en Python suit la syntaxe suivante :

```
def nomFonction(liste arguments) :
    ...
    return variable_à_retourner
```

Cas particuliers de fonctions :

- La fonction n'a pas besoin d'argument : ne rien mettre entre les parenthèses.

```
def nomFonction() :
    ...
    return variable_à_retourner
```

- La fonction a besoin de plusieurs arguments : mettre une virgule entre chaque argument.

```
def nomFonction(arg1, arg2, arg3) :
    ...
    return variable_à_retourner
```

- La fonction ne renvoie pas de résultat : ne pas mettre la commande `return` à la fin de la fonction.

```
def nomFonction(arg1, arg2, arg3) :
    ...
```

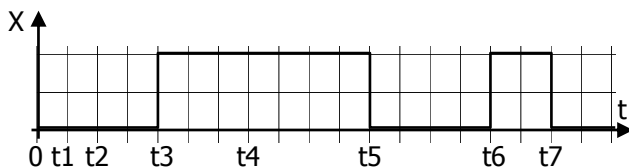
Exemple : soit une fonction qui renvoie un nombre élevé à la puissance 2.

Déclaration de la fonction	Utilisation de la fonction dans le programme
<pre>def carre(x) : resultat=x*x return resultat</pre>	<pre>y=carre(3) print("le résultat vaut : " + str(y)) y=carre(5) print("le résultat vaut : " + str(y))</pre>

➔ Exercices

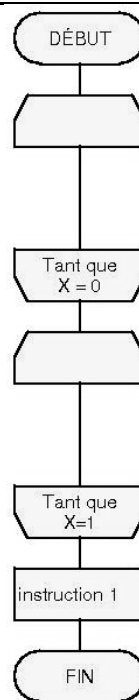
Exercice 9.1

Soit un signal X ci-dessous et l'algorithme ci-contre :

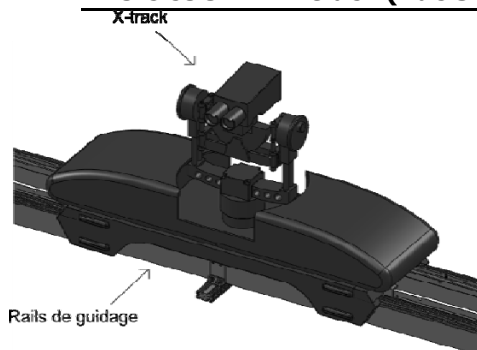


À l'instant $t = 0$, on lance l'exécution du programme.

1. Donner le numéro de l'instant t où le programme sort de la 1^{re} boucle « faire... Tant que ($X=0$) » ?
2. À partir de quel instant t , l'« instruction 1 » s'exécutera-t-elle ?



Exercice 9.2 – X-track (Bac SI)



Pour apporter plus de dynamisme à la retransmission télévisée de l'épreuve d'athlétisme du 100 m, la société XD-motion utilise le système X-track qui est une caméra motorisée sur rails. Cette caméra est positionnée parallèlement à la piste.

Le X-track présente les avantages de réaliser une image de l'ensemble des athlètes avant le départ, de suivre la tête de la course durant l'épreuve et d'obtenir une vue d'ensemble des concurrents de tête sur le final. Ainsi, il donne l'impression au téléspectateur de courir à côté des athlètes.

Avant le début de la course, il faut initialiser correctement la position du X-track, afin de mémoriser la position des lignes de départ et d'arrivée, puis de le placer

5 m après la ligne de départ. Un codeur optique monté sur l'axe de la poulie motrice (figure 1), délivrant 40 impulsions par tour, permet d'obtenir l'image de la position du X-track.

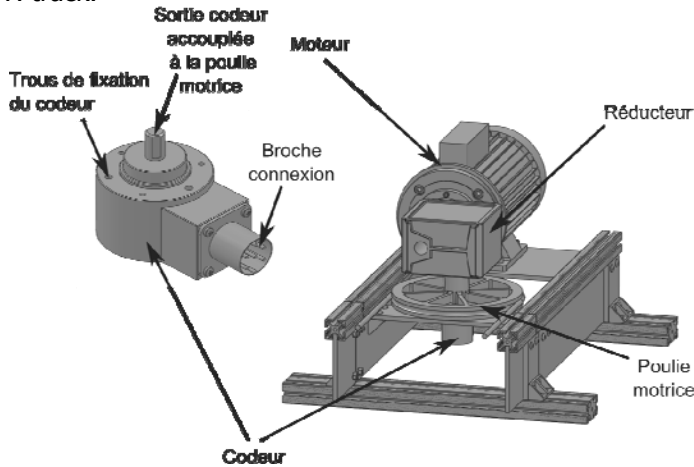


Figure 1

Pour permettre de s'arrêter après une course, les rails sont plus longs que la piste de 100 m, le déplacement pendant la phase d'initialisation sera supposé de 120 m. Pour parcourir les 120 m, la poulie effectue 152,8 tours.

1. Déterminer alors le nombre d'impulsions générées par le codeur lorsque le X-track a parcouru 120 m.
2. En déduire le format nécessaire pour représenter ce nombre d'impulsions (8, 16, 32 ou 64 bits non-signés).

Afin de connaître la position des lignes de départ et d'arrivée, deux capteurs sont disposés le long de la piste (figure 2).

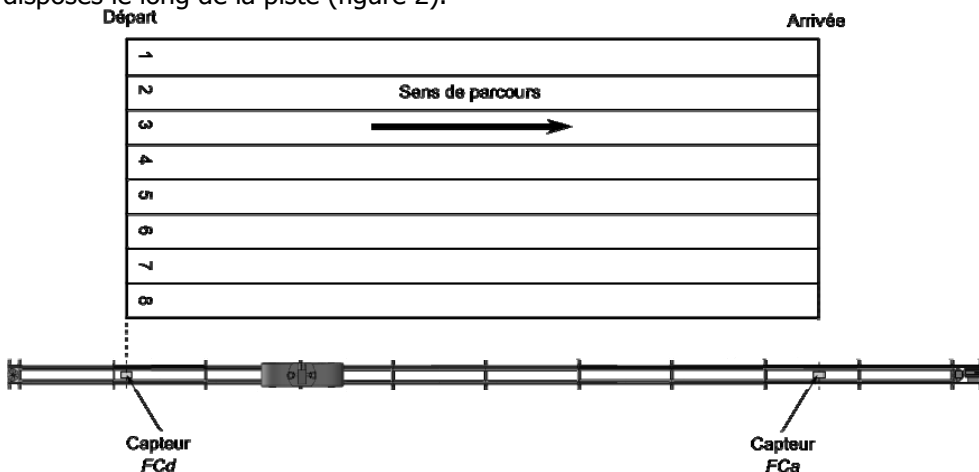


Figure 2

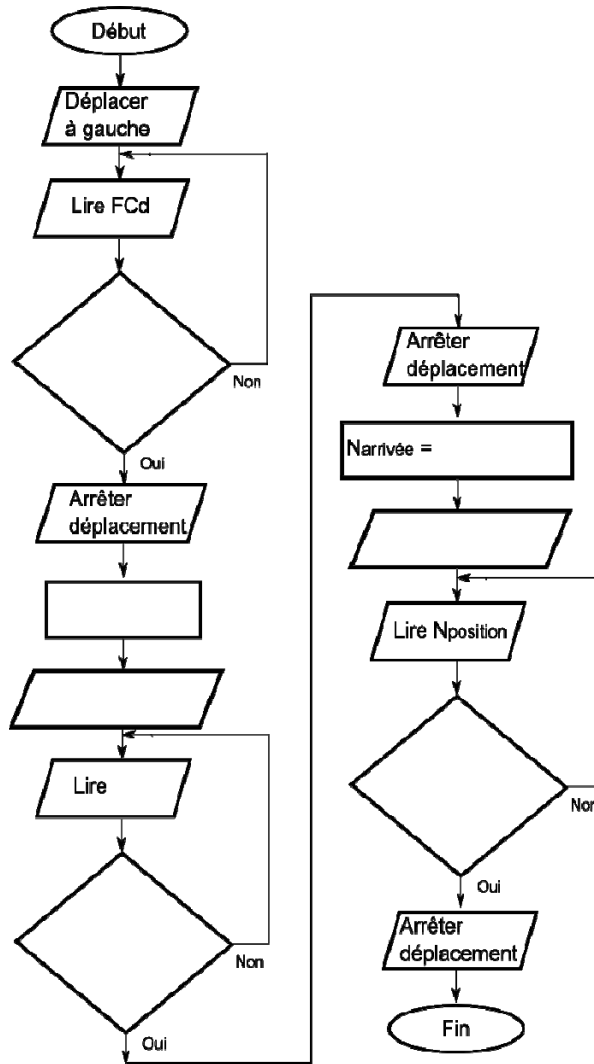
Le capteur FCd permet de localiser la ligne de départ afin de placer le X-track 5 m plus loin. Le capteur FCa permet de repérer la ligne d'arrivée.

En fonctionnement normal, la représentation numérique de sa position permet au X-track d'entamer sa décélération. En cas de dysfonctionnement du codeur pendant la course, le passage devant le capteur FCa permettra alors au logiciel de commander la décélération.

Quand le X-track se trouve devant l'un des deux capteurs, alors la variable binaire qui lui est associée passe au niveau logique 1 (exemple : X-track devant FCa donne $FCa = 1$).

Le X-track est considéré positionné au début entre les deux capteurs, comme le montre la figure 2. Le principe d'initialisation est le suivant :

- le X-track se déplace lentement vers la gauche ;
 - arrivé devant le capteur FCd, le X-track est arrêté et la variable N_{position} est remise à zéro (cette variable est un nombre entier) ;
 - le X-track repart alors lentement dans l'autre sens. La variable N_{position} est alors automatiquement incrémentée par la carte d'acquisition, par l'intermédiaire du codeur optique ;
 - arrivé devant le capteur FCa, le X-track est arrêté et la valeur de N_{position} est mémorisée dans une variable appelée $N_{\text{arrivée}}$;
 - le X-track revient alors vers la gauche et s'arrête à 5 m à droite de la ligne de départ.
- 3.** Compte tenu de la réponse à la question 1, calculer la valeur de la variable N_{position} correspondant à un déplacement de 5 m (prendre la valeur entière inférieure).
- 4.** Compléter l'algorithme (page suivante) afin de réaliser l'initialisation du X-track.



Exercice 9.3 – Scooba (Bac SI)



Le robot domestique nettoyeur de sol Scooba doit remplir les fonctions de service :

- FS1 : nettoyer le sol de façon autonome.
- FS2 : éliminer les saletés et les tâches.
- FS3 : laver avec une solution nettoyante.
- FS4 : être autonome en énergie.
- FS5 : se déplacer en tenant compte des obstacles.

Dans l'idéal, le robot doit pouvoir se déplacer de manière aléatoire dans son espace de travail de telle sorte qu'au bout d'un certain temps, toute la surface ait été nettoyée.

Cependant, différents aléas peuvent conduire à une réduction importante de la surface nettoyée. Il convient donc de contrôler la rotation des moteurs. Pour cela, le constructeur a placé un codeur à l'arrière de chaque moteur.

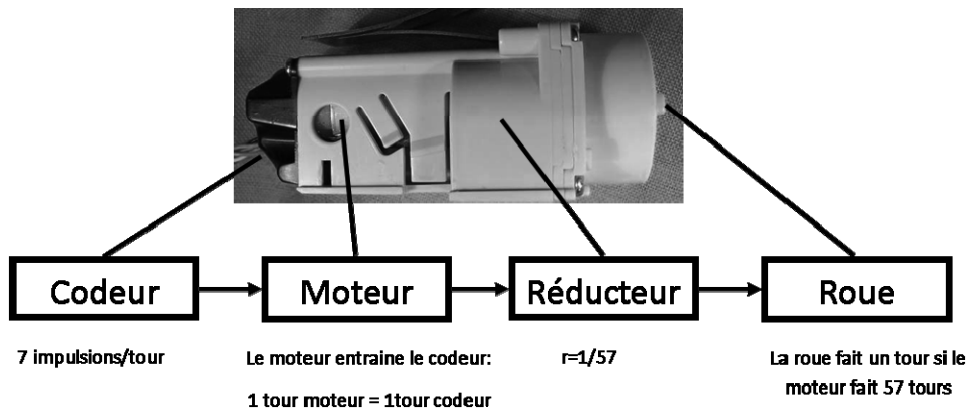


Figure 1

Le codeur possède sept ailettes qui coupent une barrière infrarouge. La carte électronique reçoit sept impulsions par tour de moteur

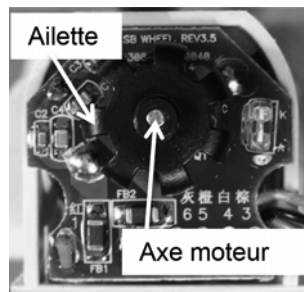


Figure 2

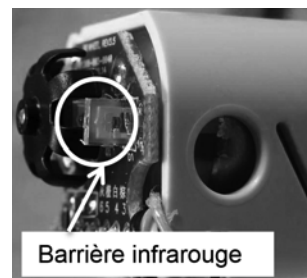


Figure 3

1. En utilisant les informations fournies à la figure 1, calculer le nombre d'impulsions reçu par la carte électronique du robot Scooba pour un tour de roue. En déduire la précision du contrôle qui est la distance parcourue pour une impulsion du codeur.

Un programme, utilisant les informations issues des codeurs (droit et gauche), a été écrit pour corriger le comportement du robot Scooba. On s'intéressera uniquement au déplacement en ligne droite.

On se place dans le cas :

- d'une consigne de déplacement en ligne droite de 50 cm ;
 - d'un écart d'avance toléré entre les deux roues motrices de $\Delta_{\text{roue}} = \pm 5 \text{ mm}$.
2. En s'appuyant sur les données ci-dessous, compléter l'algorithme qui illustre le principe de contrôle de la trajectoire rectiligne du robot Scooba.

Le programme permet de contrôler les 2 roues motrices. Dans le principe, il contrôle l'écart d'avance entre les deux roues motrices et corrige cet écart en réduisant la vitesse de la roue trop rapide. Pour simplifier l'étude, la roue trop rapide sera stoppée.

Action sur les roues :

Commander_Roue_Droite	Le moteur est alimenté afin de commander la rotation de la roue droite.
Stopper_Roue_Droite	L'alimentation du moteur est coupée afin de stopper la rotation de la roue droite.
Commander_Roue_Gauche	Le moteur est alimenté afin de commander la rotation de la roue gauche.
Stopper_Roue_Gauche	L'alimentation du moteur est coupée afin de stopper la rotation de la roue gauche.

Algorithme Contrôle des roues motrices : « Consigne en ligne droite de 50 cm »

```

Codeur_Droit = 0 ;
Codeur_Gauche = 0 ;
Valeur_Finale_Codeur = 1477 ;

Répéter
    Lire Codeur_Droit ;
    Lire Codeur_Gauche ;
    Delta = Codeur_Droit - Codeur_Gauche ;

    Test_Roue_Gauche_en_avance
    Si Delta ..... Alors
        | ..... ;
        | ..... ;
    Fin si ;

    Test_Roue_Droite_en_avance
    Si Delta ..... Alors
        | ..... ;
        | ..... ;
    Fin si ;

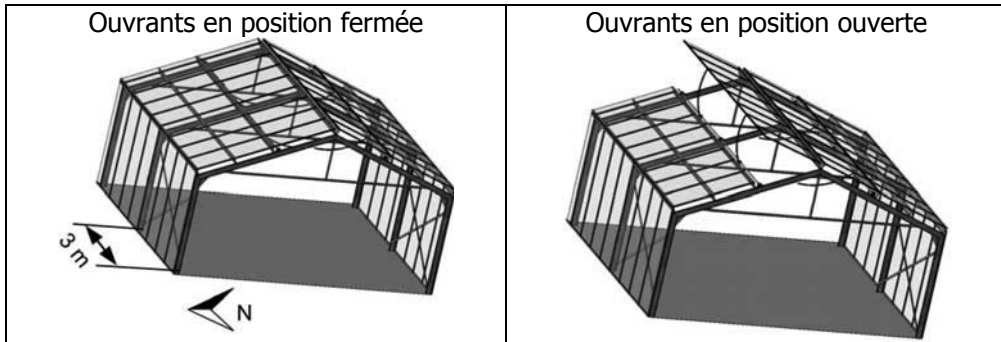
    Test_Delta_OK
    Si -15 < Delta < 15      Alors
        |      Commander_Roue_Gauche ;
        |      Commander_Roue_Droite ;
    Fin si ;

    Lire Codeur_Droit ;
Jusqu'à Codeur_Droit ≥ ..... ;

```

Exercice 9.4 – Serre d'élevage de graines de cyclamen (Bac SI 2017)

Vues partielles de la serre (2 travées de 3 m) :

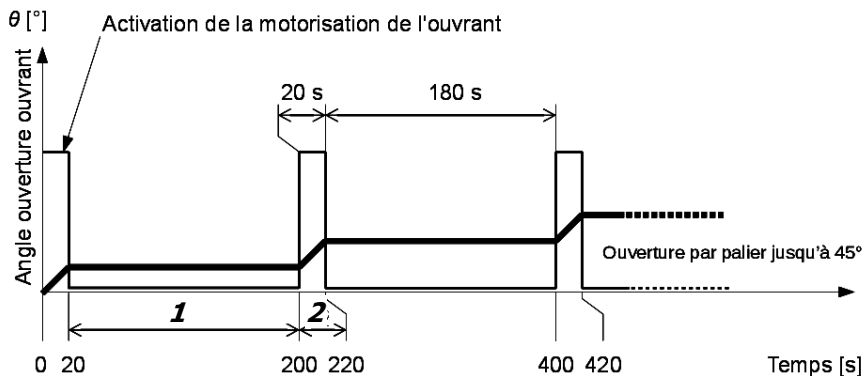


Évolution du système de commande des ouvrants

Deux sondes de température sont placées au centre de la serre. Elles assurent de façon redondante les mesures afin de détecter une éventuelle défaillance de l'une d'entre elles.

Quand la température mesurée dépasse la consigne d'ouverture, les ouvrants sont actionnés. L'ouverture complète correspond à un temps total de fonctionnement moteur de 140 s.

Il est obtenu en cumulant des temps d'ouverture de 20 secondes séparés de pauses de 180 secondes pour assurer l'échange thermique entre l'air extérieur et celui de la serre :

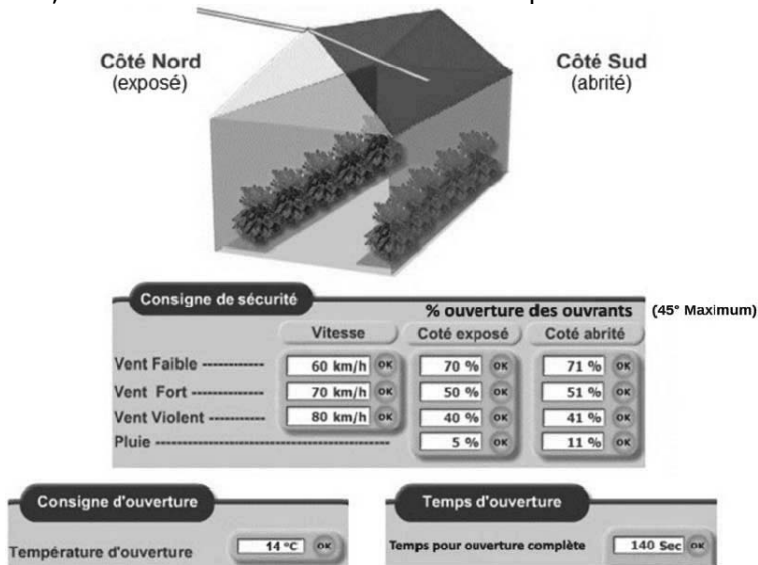


1 : attente entre deux ouvertures afin d'assurer l'échange thermique

2 : paliers d'ouverture (20 s)

Le pilotage temporel d'ouverture des ouvrants tel que décrit ci-dessus n'est pas satisfaisant car il entraîne des décalages angulaires au cours du temps. Un capteur angulaire (potentiomètre) a été installé pour pallier ce problème. L'angle d'ouverture complète des ouvrants sera pris égal à 45 °.

1. À partir de la capture d'écran de la supervision des ouvrants fournie ci-dessous, déterminer les valeurs en degrés des positions angulaires autorisées en cas de vent faible, vent fort et vent violent de l'ouvrant exposé côté nord.



2. Compléter l'algorithme permettant de détecter les quatre positions angulaires des ouvrants :

DÉBUT

position_maximale_ouvrant = ____

Lire la température T1 de la sonde 1 et T2 de la sonde 2

$T_{différence} = T1 - T2$

SI ($T_{différence} < 5 \text{ } ^\circ\text{C}$) ALORS

SI ($T1 > 14 \text{ } ^\circ\text{C}$) ALORS

Mesurer la position de l'ouvrant

Mesurer le vent

SI (____) ALORS

position_maximale_ouvrant = ____

FIN SI

SI (____) ET (____) ALORS

position_maximale_ouvrant = ____

FIN SI

SI (____) ET (____) ALORS

position_maximale_ouvrant = ____

FIN SI

SI (____) ALORS

position_maximale_ouvrant = ____

FIN SI

TANT QUE *position* < *position_maximale_ouvrant*

Ouvrir l'ouvrant

Mesurer la position

FIN TANT QUE

FIN SI

FIN SI

SI ($T_{différence} \geq 5 \text{ } ^\circ\text{C}$) ALORS

Afficher « Défaut sondes de température »

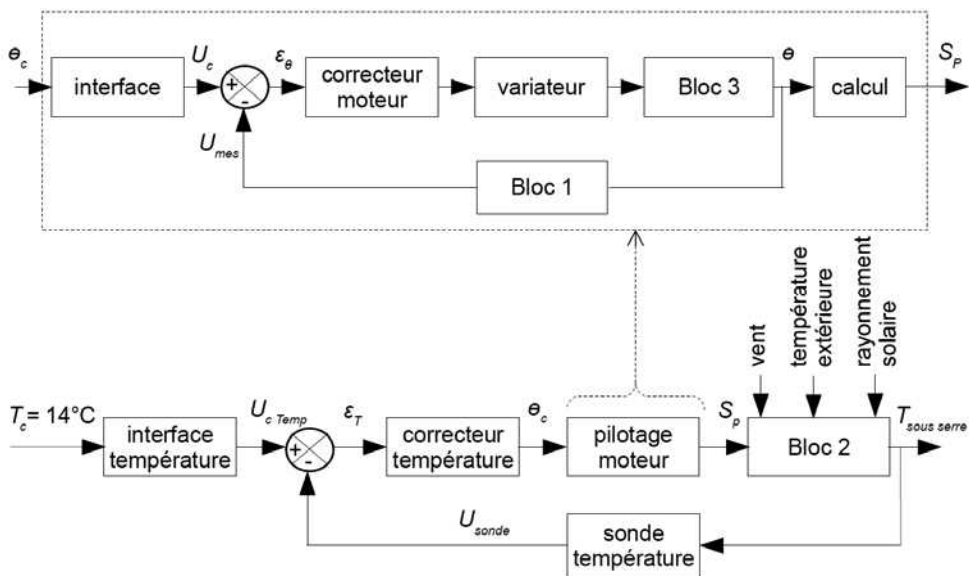
FIN SI

FIN

Régulation de la serre en température

La solution technologique existante ne permet pas un maintien optimal de la température sous serre à sa valeur idéale de 14 °C (contrainte du cahier des charges).

Afin d'optimiser l'élevage des cyclamens il est prévu d'installer une régulation de la température sous serre :



Cette évolution nécessite l'utilisation d'un capteur angulaire au niveau du guidage en rotation de l'ouvrant et d'une sonde de température à l'intérieur de la serre. Un extrait de l'algorithme de la régulation de température est fourni ci-dessous :

```

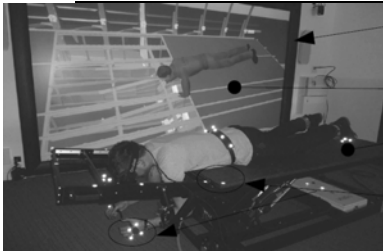
DEBUT
  Lire la valeur de la température de consigne TC
  Lire la valeur de la tension aux bornes de la sonde Usonde
  Uc Temp = partie à compléter par le candidat en question 5.
  eT = partie à compléter par le candidat en question 5.
  TANT QUE (eT ≠ 0)
  ALORS
    Pilotage du moteur de l'ouvrant
  FIN TANT QUE
FIN
    
```

3. Indiquer quels sont les éléments qui correspondent aux blocs 1 à 3 de la régulation de la température (ci-dessus).

La sonde de température possède une plage de mesure allant de 0 à 80 °C et une tension de sortie comprise entre 0 et 12 V.

4. Donner l'expression de U_{sonde} en fonction de la température de la serre $T_{\text{sous serre}}$. En déduire la valeur numérique à programmer dans le bloc « interface température ».
5. Compléter l'algorithme (ci-dessus) qui permet d'écrire la tension image de la température $U_{\text{C Temp}}$ en entrée du comparateur et l'écart ε_T dans le correcteur de température.

Exercice 9.5 – Système tangible déployable (Bac SI 2017)



Écran de contrôle

Plancher avion

Table

Marqueurs réfléchissants

L'objectif d'Airbus est de placer virtuellement ses opérateurs dans un avion en situation de montage, réglage, démontage, dans des postures et des conditions d'immersion reproduisant des situations réelles.

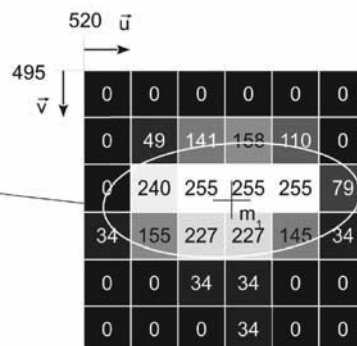
Un système de caméras permet d'enregistrer les positions de la table, de la trappe et des membres de l'opérateur dans l'environnement réel. La table et l'opérateur sont équipés de marqueurs réfléchissants.

Un traitement numérique de l'image recueillie par le capteur CMOS de la caméra est nécessaire pour déterminer les coordonnées d'un marqueur.

Sur l'image, chaque marqueur n'apparaît pas comme un point (pixel), mais comme des amas de points (ensemble de pixels) connectés appelés blobs. Ces blobs sont des ensembles de pixels de niveaux de gris différents.

On définit le seuil de luminosité comme étant la valeur minimale du niveau de gris des pixels d'un blob.

L'illustration ci-dessous montre les différents niveaux de gris des pixels images de la position du marqueur m_1 avec la caméra 4 à partir du point de coordonnées $(520 ; 495)$ dans le repère image $R_i(O, \vec{u}, \vec{v})$. On note que plus le seuil de luminosité est faible, plus le blob comprend de pixels.



Un algorithme de traitement d'image doit permettre de filtrer les blobs pour un seuil de luminosité donné. Pour cela, on applique un masque à l'image obtenue. Tous les pixels ayant un niveau de gris supérieur au seuil de luminosité sont affectés de la valeur 1 et les autres de la valeur 0. Le calcul des coordonnées du centre du blob donne les coordonnées du marqueur.

Compléter l'algorithme qui permet de filtrer les blobs en fonction du seuil de luminosité :

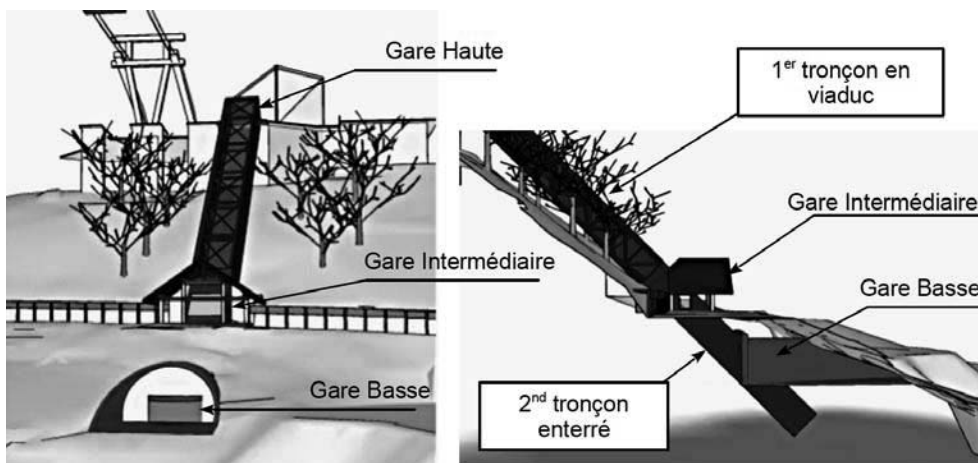
```

DÉBUT
  affecter N à seuil de luminosité
  POUR u ALLANT_DE ..... À .....
    POUR v ALLANT_DE ..... À .....
      SI G(u,v) .....
        ALORS
          affecter à Masque(u,v) la valeur .....
        SINON
          affecter à Masque(u,v) la valeur .....
      FIN SI
    FIN POUR
  FIN POUR
FIN
    
```

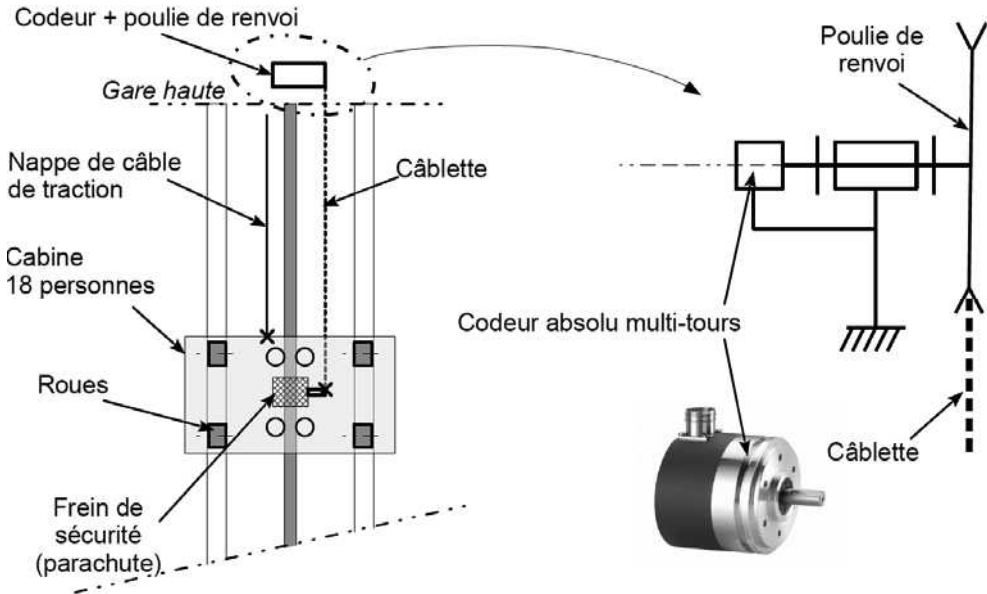
Avec $G(u,v)$ = niveau de gris codé sur 8 bits d'un pixel de coordonnées (u, v) dans le repère image R_i et $Masque(u,v)$ peut prendre les valeurs 1 ou 0.

Exercice 9.6 – Ascenseur de Vaujany (Bac SI 2017)

La station de Vaujany est située dans le massif de l'Oisans. Le village est implanté sur un coteau en pente. Pour relier les différentes infrastructures du village-station, deux ascenseurs y ont été implantés en complément des différents escalateurs :



Pour piloter le mouvement, il est nécessaire de mesurer la position de la cabine. La solution constructive choisie est un codeur absolu multi-tours. Un câble, nommé « câblette », est d'une part fixé d'un côté à la cabine, et d'autre part à un système de mise en tension. Une poulie assure le renvoi et le guidage de la câblette. Le codeur est implanté sur l'axe de cette poulie. Lorsque la cabine se déplace, la câblette entraîne donc la rotation de la poulie et du codeur.



Si la câblette glisse sur la poulie de renvoi, alors le codeur absolu indique une position erronée. Pour détecter un éventuel glissement, des détecteurs inductifs sont placés à proximité des gares haute (CVDH) et basse (CVDB). Au passage de la cabine devant un détecteur, la valeur de position donnée par le codeur absolu est vérifiée.

Si la différence entre la mesure du codeur et la référence indiquée par le détecteur est en dehors de l'intervalle de tolérance Δ , une alarme est déclenchée :

- position du capteur haut CVDH, $x_{\text{CVDH}} = 56,00 \text{ m}$;
- position du capteur bas CVDB, $x_{\text{CVDB}} = 11,40 \text{ m}$.

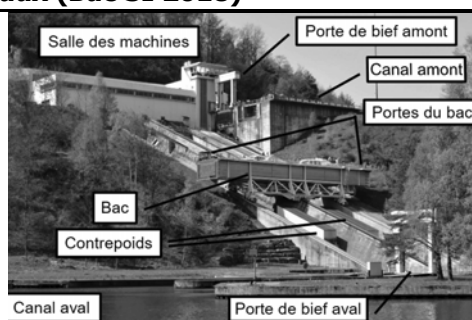
L'algorithme de surveillance ainsi que les variables associées sont donnés dans le tableau :

<p><i>ALARM</i> = 0 SI <i>CVDB</i> ET (<i>POSCA</i> < 1100 OU <i>POSCA</i> > 1180) ALORS <i>ALARM</i> = 1 FIN_SI SI <i>CVDH</i> ET (<i>POSCA</i> < 5560 OU <i>POSCA</i> > 5640) ALORS <i>ALARM</i> = 1 FIN_SI</p>		
Entrées	Sorties	Variables internes
<p><i>CVDH</i> et <i>CVDB</i> : états logiques des détecteurs de vérification de dérive codeur. <i>CVDH</i> ou <i>CVDB</i> = 1 si le détecteur est actif.</p>	<p><i>ALARM</i> : indicateur de dérive excessive du codeur.</p>	<p><i>POSCA</i> : position de la cabine suivant l'axe x, en cm.</p>

1. À partir de l'algorithme de surveillance, calculer l'intervalle de tolérance Δ.
2. Indiquer, en le justifiant, l'état logique de la sortie ALARM lorsque l'image de la position de la cabine (*POSCA*) est de 5 530 cm quand celle-ci passe devant le détecteur *CVDH* en montée.

Exercice 9.7 – Ascenseur à bateaux (Bac SI 2018)

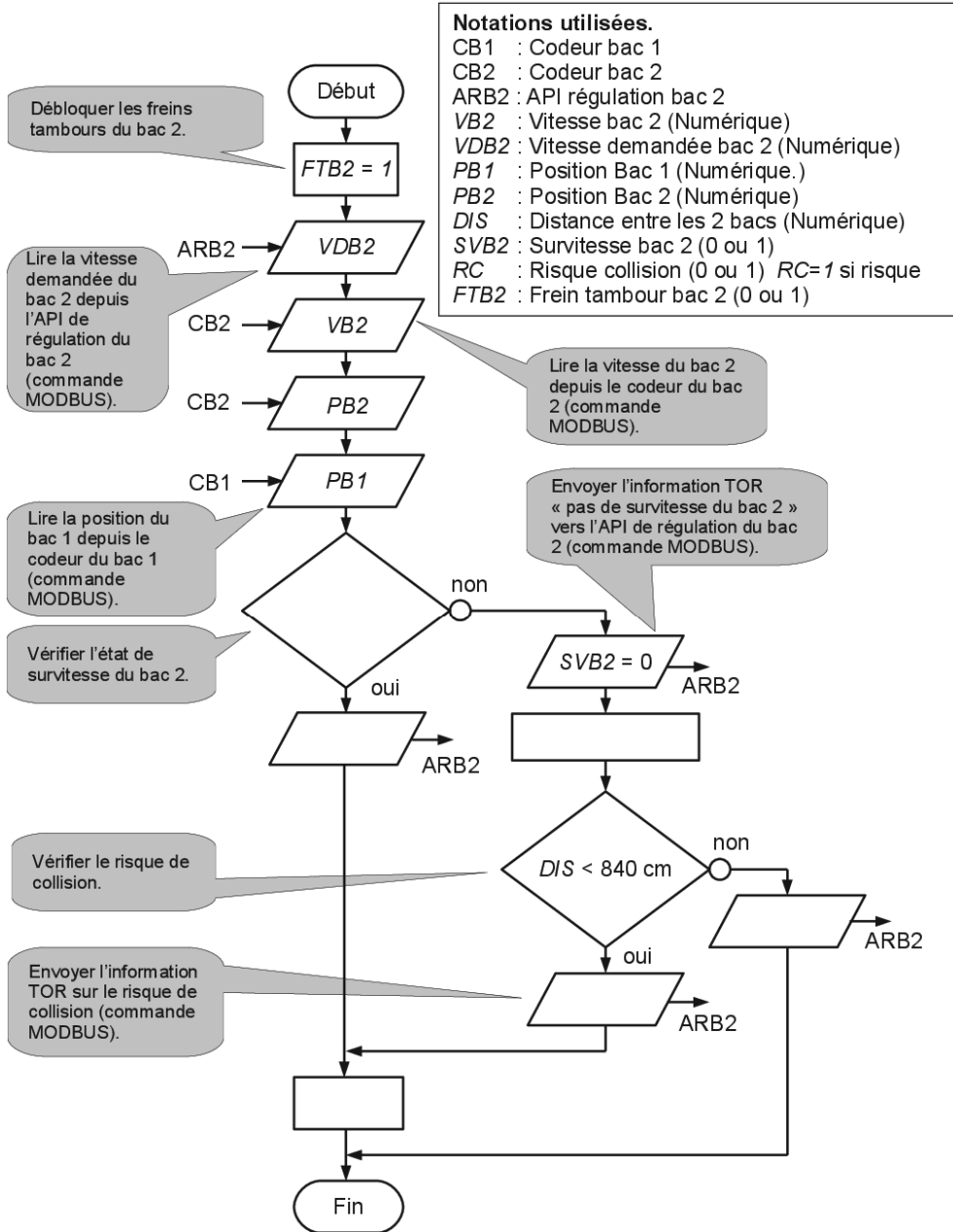
Le canal de la Marne au Rhin est jalonné par plus de 150 écluses, 3 tunnels, plusieurs ponts-canaux et par 2 ouvrages remarquables, dont l'ascenseur à bateaux, de Saint-Louis-Arzviller (57). Lors de sa mise en service, en 1969, le il a remplacé 17 écluses, permettant de franchir une dénivelée de 44,50 mètres.



Les informations issues du capteur devront, entre autres, être utilisées par l'API de sécurité 1 afin de prévenir les risques de sur-vitesse du Bac, et de collisions entre les deux bacs.

La vitesse du bac ne doit jamais dépasser la valeur demandée de plus de 10 %. La vitesse demandée est définie par l'API de régulation du bac en fonction de la position du bac. Elle peut être lue par l'API de sécurité via des commandes MODBUS. La distance entre les deux bacs ne doit jamais être inférieure à 840 cm. En cas de sur-vitesse, ou de risque de collision, l'API de sécurité doit informer l'API de régulation du bac et arrêter le bac en agissant sur les freins de tambours.

Sur la page suivante, compléter l'algorithme « sur-vitesse et risque de collision » du programme à implanter dans l'API de sécurité 1 du bac 2.



→ Solutions

Exercice 9.1

1. Le programme sort de la 1^{re} boucle « faire... Tant que () » à l'instant t3.
2. L' « instruction 1 » s'exécutera à l'instant t5.

Exercice 9.2 – X-track (Bac SI)

1. Le codeur délivre 40 impulsions par tour de poulie, soit :

$$n_{\text{impulsions}} = 40 \times 152,8 = 6112$$

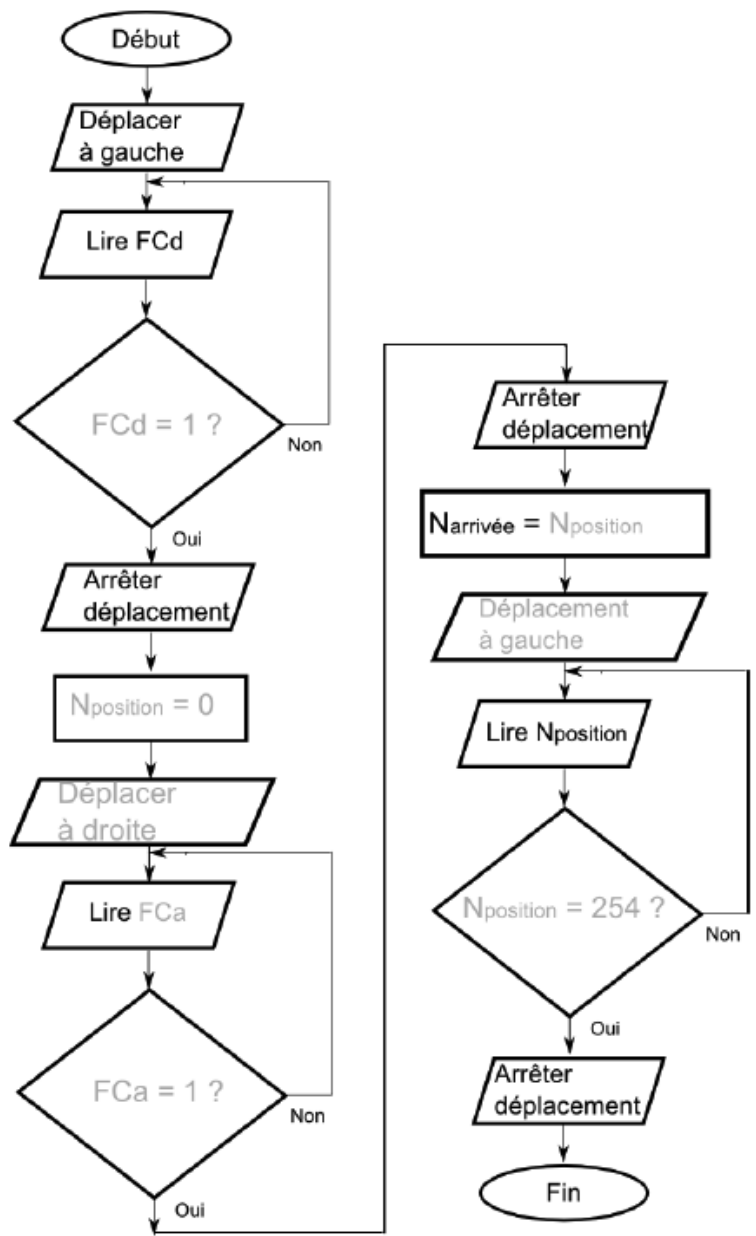
2. Le nombre de combinaisons que le format utilisé peut offrir doit être supérieur au nombre d'impulsions calculé. Ainsi : $2^8 < 6112 < 2^{16}$, un format de 16 bits est donc nécessaire pour représenter ce nombre car sur 8 bits on peut seulement coder 256 états (de 0 à 255).

3. Sachant que le nombre d'impulsions est proportionnel à la distance parcourue, on a alors pour 5 m :

$$N_{\text{impulsion}} = 5 \times \frac{6112}{120} = 254,66$$

La valeur entière inférieure est donc 254.

4. Logigramme réalisant l'initialisation du X-track :



Exercice 9.3 – Scooba (Bac SI)

1. D'après les informations fournies sur la figure 1, 1 tour de roue permet au codeur de générer $7 \times 57 = 399$ impulsions.

Ce qui correspond à une précision de contrôle du codeur de :

$$\text{Précision} = \frac{\text{périmètre roue}}{399} = \frac{\pi \times 4,3 \cdot 10^{-2}}{399} = 0,338 \text{ mm}$$

2. Algorithme de contrôle des roues motrices complété pour les données suivantes :

- Valeur_Finale_Codeur = 1477 ;
- Contrôle de l'écart entre les deux roues motrices = 15 impulsions.

```
Codeur_Droit = 0 ;
Codeur_Gauche = 0 ;
Valeur_Finale_Codeur = 1477 ;
```

Répéter

```

    Lire Codeur_Droit ;
    Lire Codeur_Gauche ;
    Delta = Codeur_Droit - Codeur_Gauche ;

    Test_Roue_Gauche_en_avance
    Si Delta < -15 Alors
        |   Commander_Roue_Droite ;
        |   Stopper_Roue_Gauche ;
    Fin si ;

    Test_Roue_Droite_en_avance
    Si Delta > 15 Alors
        |   Commander_Roue_Gauche ;
        |   Stopper_Roue_Droite ;
    Fin si ;

    Test_Delta_OK
    Si -15 < Delta < 15 Alors
        |   Commander_Roue_Gauche ;
        |   Commander_Roue_Droite ;
    Fin si ;

    Lire Codeur_Droit ;
    Jusqu'à Codeur_Droit ≥ Valeur_Finale_Codeur ;
```

Exercice 9.4 – Serre d'élevage de graines de cyclamen (Bac SI 2017)

1. On sait que l'angle d'ouverture maximal des ouvrants est de 45° .
D'où les résultats suivants :

Vent faible	Vent fort	Vent violent
70 % d'ouverture	50 % d'ouverture	40 % d'ouverture
$31,5^\circ$	$22,5^\circ$	18°

2. DÉBUT

$position_maximale_ouvrant = 45^\circ$

Lire la température T1 de la sonde 1 et T2 de la sonde 2

$T\ difference = T1 - T2$

SI ($T\ difference < 5^\circ\text{C}$) ALORS

SI ($T1 > 14^\circ\text{C}$) ALORS

Mesurer la position de l'ouvrant

Mesurer le vent

SI ($vent < 60\ \text{Km/h}$) ALORS

$position_maximale_ouvrant = 45^\circ$

FIN SI

SI ($vent \geq 60\ \text{Km/h}$) ET ($vent < 70\ \text{Km/h}$) ALORS

$position_maximale_ouvrant = 31,5^\circ$

FIN SI

SI ($vent \geq 70\ \text{Km/h}$) ET ($vent < 80\ \text{Km/h}$) ALORS

$position_maximale_ouvrant = 22,5^\circ$

FIN SI

SI ($vent \geq 80\ \text{Km/h}$) ALORS

$position_maximale_ouvrant = 18^\circ$

FIN SI

TANT QUE $position < position_maximale_ouvrant$

Ouvrir l'ouvrant

Mesurer la position

FIN TANT QUE

FIN SI

FIN SI

SI ($T\ difference \geq 5^\circ\text{C}$) ALORS

Afficher « Défaut sondes de température »

FIN SI

FIN

3. ■ Bloc 1 : le capteur de position angulaire
 ■ Bloc 2 : la serre
 ■ Bloc 3 : le moteur de l'ouvrant

$$4. U_{\text{sonde}} = \frac{12}{80} \cdot T_{\text{sous serre}} = 0,15 \cdot T_{\text{sous serre}}$$

L'observation du schéma bloc fait apparaître que, tout comme la sonde de température, l'interface température fait le lien entre une température (T_C en °C) et une tension (U_{C_Temp} en V).

Dans un souci d'homogénéité des unités (et surtout pour ne pas introduire d'écart au niveau de ϵ_T), la valeur à programmer dans l'interface de température devra être égale à celle qui régit le comportement de la sonde de température :

$$\ll \text{interface température} \gg = 0,15 \text{ V} \cdot \text{°C}^{-1}$$

5. DEBUT

Lire la valeur de la température de consigne T_C

Lire la valeur de la tension aux bornes de la sonde U_{sonde}

$$U_{C_Temp} = 0,15 \times T_C$$

$$\epsilon_T = U_{C_Temp} - U_{\text{sonde}}$$

TANT QUE ($\epsilon_T \neq 0$)

ALORS

 Pilotage du moteur de l'ouvrant

FIN TANT QUE

FIN

Exercice 9.5 – Système tangible déployable (Bac SI 2017)

DÉBUT

 affecter N à seuil de luminosité

 POUR u ALLANT_DE 0 À 1279

 POUR v ALLANT_DE 0 À 1023

 SI $G(u,v) \geq \text{seuil}$

 ALORS

 affecter à Masque(u,v) la valeur 1

 SINON

 affecter à Masque(u,v) la valeur 0

 FIN SI

 FIN POUR

 FIN POUR

FIN

Exercice 9.6 – Ascenseur de Vaujany (Bac SI 2017)

1. En position haute, l'intervalle de tolérance Δ est égal à :

$$\Delta_H = x_{\text{CVDH}} - 5560 = |x_{\text{CVDH}} - 5640| = 40 \text{ cm}$$

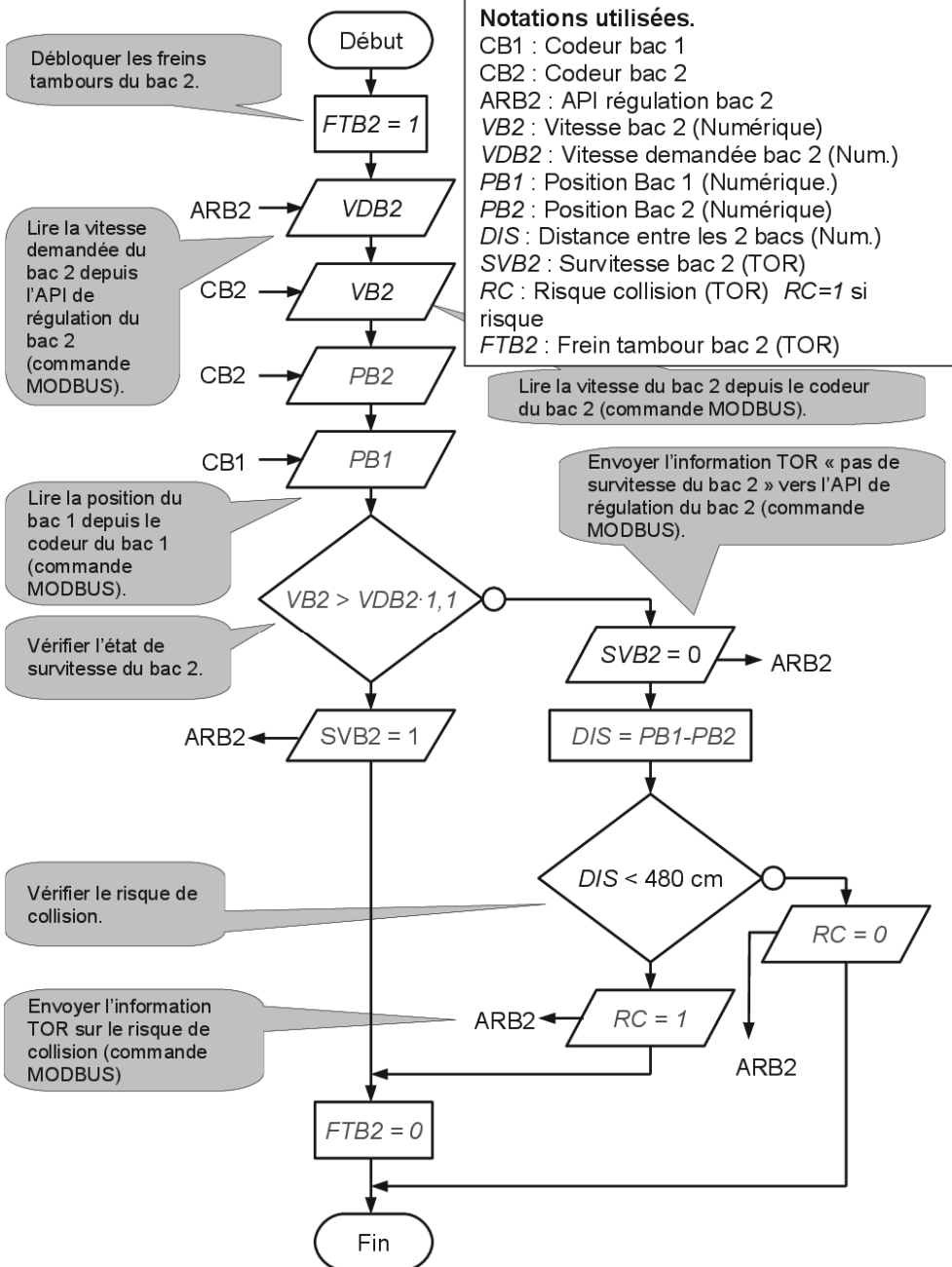
En position basse, l'intervalle de tolérance Δ est égal à :

$$\Delta_B = x_{\text{CVDB}} - 1100 = |x_{\text{CVDB}} - 1180| = 40 \text{ cm}$$

Donc on en déduit que l'intervalle de tolérance est de 40 cm.

2. Lorsque la cabine passe devant le capteur CVDH, alors la variable CVDH est égale à 1 et la variable POSCA est en dehors de l'intervalle de tolérance [5560 ; 5640], la condition « **SI CVDH ET (POSCA < 5560 OU POSCA > 5640) ALORS** » est vrai, alors la variable ALARM = 1.

Exercice 9.7 – Ascenseur à bateaux (Bac SI 2018)

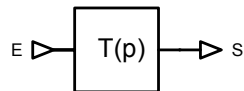


Chapitre 10

Asservissements

1. Fonction de transfert

La fonction de transfert d'un système correspond à l'équation mathématique liant la sortie d'un système (réponse) au signal d'entrée (consigne) : $T = \frac{S}{E}$.



Exemple : moteur à courant continu RX120L



- une fonction de transfert du moteur serait l'équation de la vitesse en fonction de la tension d'alimentation :

$$T = \frac{N_{\text{mot}} \text{ (tr/min)}}{U_{\text{mot}} \text{ (V)}}$$

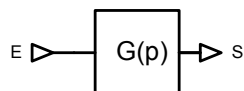
- ou le couple moteur en fonction du courant consommé :

$$T = \frac{C_{\text{mot}} \text{ (N.m)}}{I_{\text{mot}} \text{ (A)}}$$

2. Boucle ouverte / boucle fermée

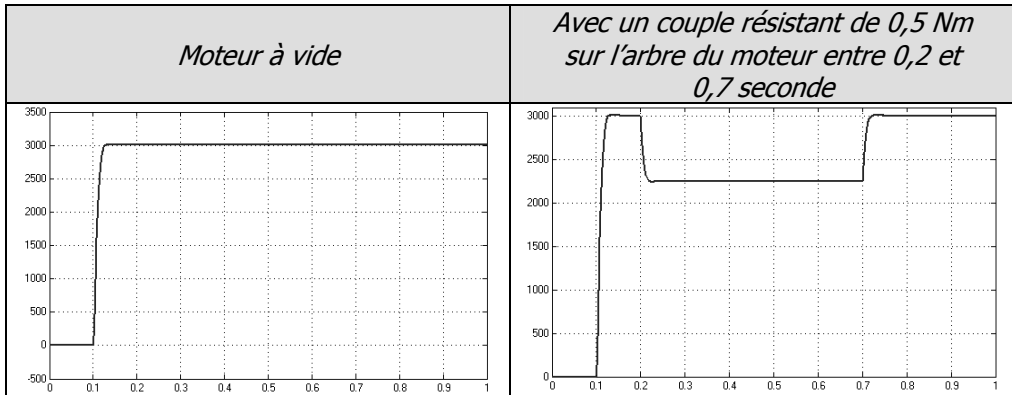
2.1. Boucle ouverte (BO)

Le pilotage d'un système en boucle ouverte correspond à la commande de ce dernier sans contrôle de sa réponse (sortie S) :



En boucle ouverte, la fonction de transfert du système s'écrit : $S = G \cdot E$

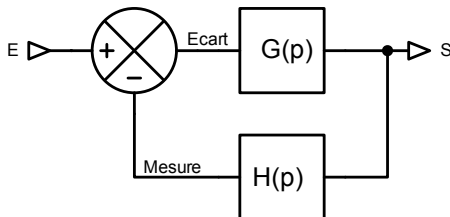
Exemple : courbes de la vitesse de rotation du moteur à courant continu RX120L pour une tension de consigne de 45 V :



En boucle ouverte, on constate que la réponse du système (vitesse de rotation du moteur) dépend du couple exercé sur son arbre.

On souhaiterait que le moteur continue de tourner à 3000 tr/min quelque soit le couple résistant sur l'arbre du moteur. Pour cela il faut mesurer la vitesse de rotation et la comparer avec la consigne souhaitée d'où l'utilisation d'un montage en boucle fermée.

2.2. Boucle fermée (BF)



En boucle fermée, un capteur H permet de mesurer la réponse du système (sortie S). Cette réponse est alors comparée à la consigne (E) afin d'adapter la commande et réguler (ou asservir) le signal de sortie à la valeur souhaitée.

En boucle fermée, la fonction de transfert du système se détermine à partir des équations :

- ❶ $S = G \cdot \text{Ecart}$
- ❷ $\text{Ecart} = E - \text{Mesure}$
- ❸ $\text{Mesure} = H \cdot S$

Avec ❶ et ❷, on obtient : $S = G \cdot (E - \text{Mesure})$

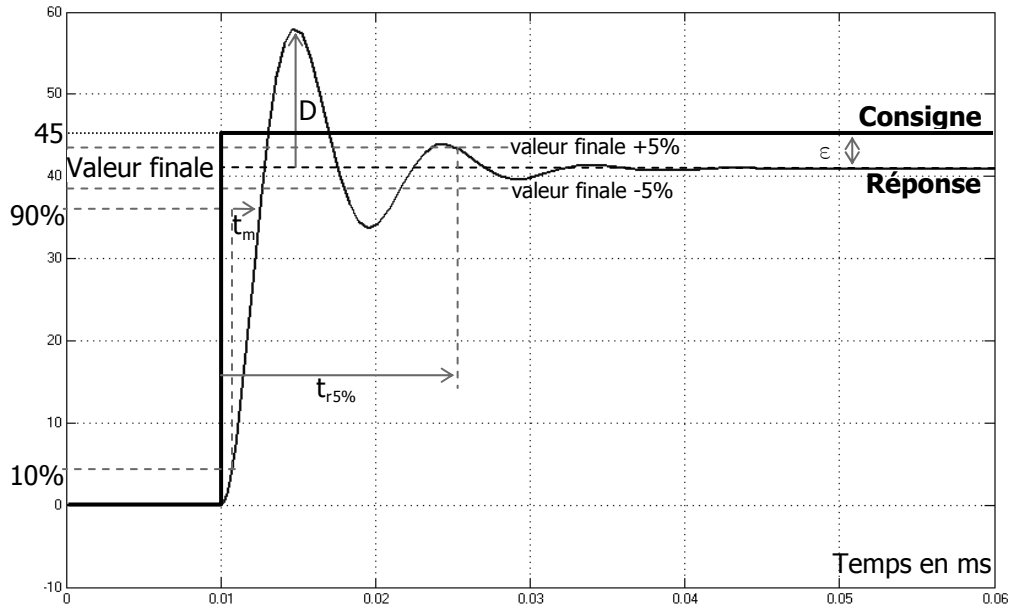
Et avec ❸, on a : $S = G \cdot (E - H \cdot S)$

Ainsi après remise en forme de l'équation, on trouve la fonction de transfert en boucle fermée du système :

$$\frac{S}{E} = \frac{G}{1 + G \cdot H}$$

3. Réponse à un échelon

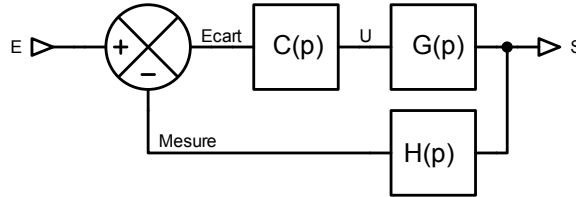
Soit l'exemple de la réponse (sortie) d'un système en fonction d'un échelon de consigne (entrée) de 0 à 45. Sur cette courbe, on identifie 4 grandeurs caractéristiques d'un système bouclé :



	Définition	Application numérique sur l'exemple ci-dessus
Dépassement D	Amplitude du 1 ^{er} dépassement de la réponse par rapport à la valeur finale. Exprimée en %.	$58 - 41 = 17$ Soit $D = 41 \%$
Erreur statique ϵ	Différence entre la consigne et la valeur finale du système. Exprimée en %.	$45 - 41 = 4$ Soit $\epsilon = 10 \%$
Temps de montée à 90% t_m	Temps mis par le système pour passer de 10 % à 90 % de la valeur finale. Exprimé en seconde.	$t_m \approx 1,5 \mu s$
Temps de réponse à 5% $t_{r5\%}$	Temps mis par le système pour que le signal de sortie soit compris entre +5 % et -5 % de la valeur finale. Exprimé en seconde.	$t_{r5\%} \approx 16 \mu s$

4. Correcteur PID

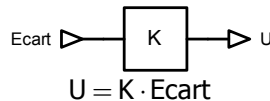
Afin d'optimiser la réponse d'un système en rapidité, en stabilité ou en précision, on ajoute généralement un correcteur C entre l'écart (différence entre la consigne et la mesure de la sortie) et le système à piloter G :



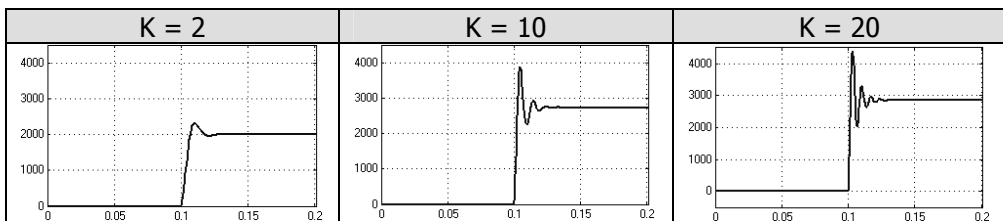
Le correcteur PID, pour Proportionnel-Intégral-Dérivée, possède donc 3 paramètres sur lequel on peut agir.

4.1. Influence du paramètre proportionnel

Le paramètre proportionnel correspond à un gain K (coefficient). Ce dernier permet d'amplifier l'écart entre la consigne et la mesure de la réponse du système :



Exemple : courbe de la vitesse de rotation du moteur à courant continu RX120L pour une vitesse de consigne de 3000 tr/min :

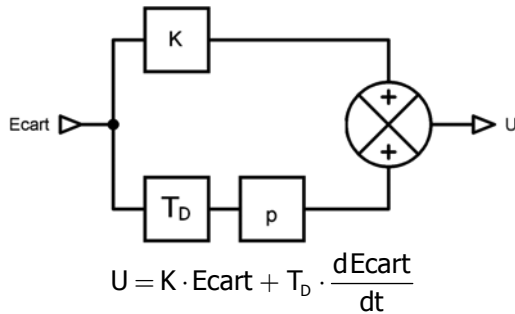


Lorsque le gain K augmente :

- l'erreur statique se trouve diminuée : amélioration de la précision ;
- le dépassement est plus important : dégradation de la stabilité ;
- le temps de montée est plus court : amélioration de la rapidité.

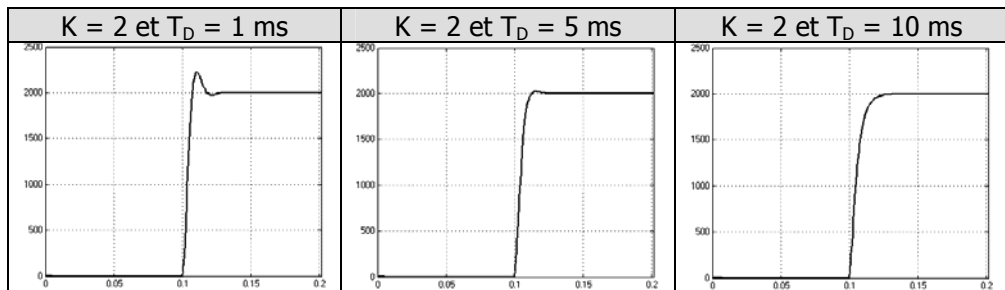
4.2. Influence du paramètre dérivé

Le paramètre dérivé a pour rôle d'amortir la réponse du système. Ci-dessous, la structure d'un correcteur PD (proportionnel-dérivé) :



N.B. : la notation $\frac{dy}{dt}$ correspond à la dérivée de la variable y par rapport au temps (généralement noté y' en math).

Exemple : courbe de la vitesse de rotation du moteur à courant continu RX120L pour une vitesse de consigne de 3000 tr/min :

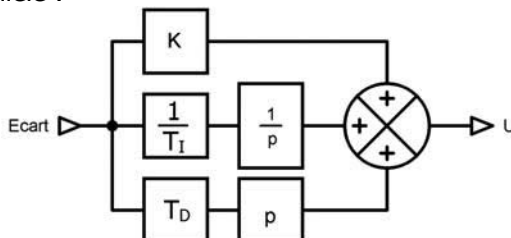


Lorsque le paramètre dérivé T_D augmente :

- pas d'influence sur l'erreur statique : pas d'amélioration de la précision ;
- le dépassement est diminué : amélioration de la stabilité ;
- le temps de réponse est plus court : amélioration de la rapidité.

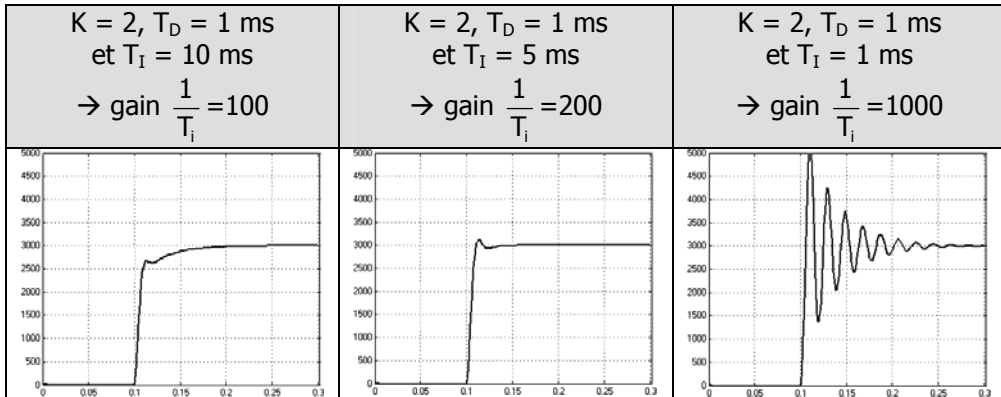
4.3. Influence du paramètre intégral

Le paramètre intégral d'un correcteur PID permet de « prédire » la variation de l'écart afin d'anticiper la commande du système. On donne la structure d'un correcteur PID parallèle :



$$U = K \cdot \text{Ecart} + \frac{1}{T_I} \int \text{Ecart} \cdot dt + T_D \cdot \frac{d\text{Ecart}}{dt}$$

Exemple : courbe de la vitesse de rotation du moteur à courant continu RX120L pour une vitesse de consigne de 3000 tr/min :



Lorsque le paramètre intégral $\frac{1}{T_I}$ augmente :

- l'erreur statique est nulle : amélioration de la précision ;
- le dépassement est amplifié : dégradation de la stabilité ;
- le temps de réponse est plus long : dégradation de la rapidité.

4.4. Synthèse de l'influence des paramètres d'un correcteur PID

4.4.1. Synthèse des résultats

À partir des résultats précédents, le tableau ci-dessous donne l'influence des 3 paramètres d'un correcteur PID :

	Précision	Stabilité	Rapidité
Proportionnel : si K augmente...	+	-	+
Intégral : si $\frac{1}{T_I}$ augmente...	+	-	-
Dérivée : si T_D augmente...	-	+	+

4.4.2. Compromis

On constate qu'en agissant sur les 3 paramètres d'un correcteur PID, on ne peut pas améliorer la réponse d'un système sur l'ensemble des 3 aspects : précision, stabilité et rapidité. Ainsi, il faut faire un compromis.

En fonction du cahier des charges d'un système, on privilégiera l'un ou l'autre des 3 aspects et en conséquence on agira sur l'un ou l'autre des 3 paramètres du correcteur PID.

5. Méthode d'identification de Strejc

Il s'agit d'une méthode permettant d'obtenir la fonction de transfert dans le cas où le système :

- n'a pas de dépassement (on parle de système *apériodique*) ;
- et que sa pente ne présente pas de discontinuité.

Alors la fonction de transfert est de la forme :

$$G_{(p)} = G_s \cdot \frac{e^{-T \cdot p}}{(1 + \tau \cdot p)^n}$$

avec :

G_s : gain statique du système

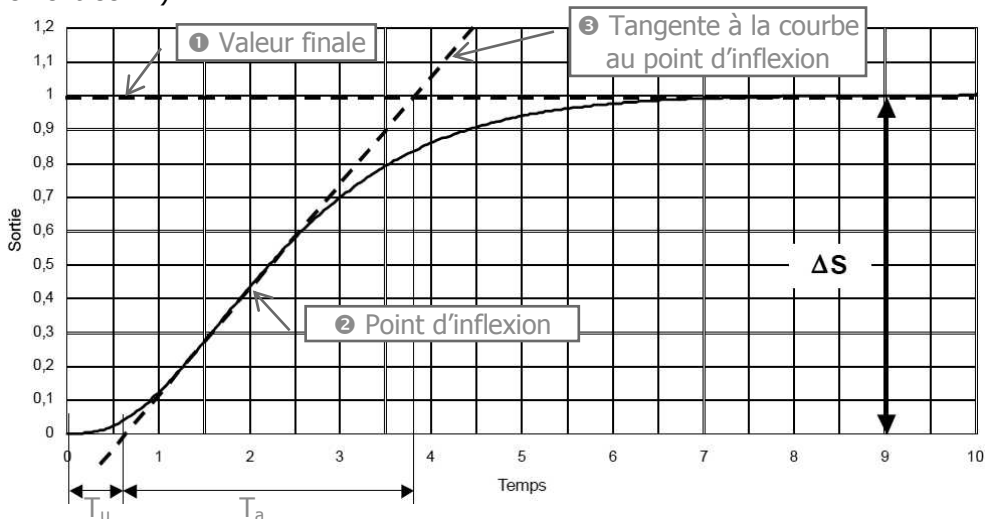
T : retard pur

τ : constante de temps multiple

n : ordre du système (nombre entier > 0)

N.B. : « p » correspond à l'opérateur mathématique de Laplace. À notre niveau, on peut considérer : $p = j \cdot \omega$ (« j » étant l'opérateur des nombres complexes, noté « i » en mathématique).

L'identification des constantes de la fonction de transfert se fait à partir d'une réponse indicielle (allure de la sortie $S(t)$ correspondant à un échelon de consigne en entrée ΔE) :



Détermination des constantes de la fonction de transfert

- Gain statique :

$$G_s = \frac{\Delta S}{\Delta E}$$

avec :

ΔE : amplitude de l'échelon d'entrée appliqué au système

ΔS : amplitude de la variation de la sortie.

- Identification des paramètres n , τ et T :

- Calculer le rapport $\frac{T_u}{T_a}$ puis, à partir du tableau ci-dessous, identifier la valeur inférieure la plus proche et déterminer l'ordre n du système :

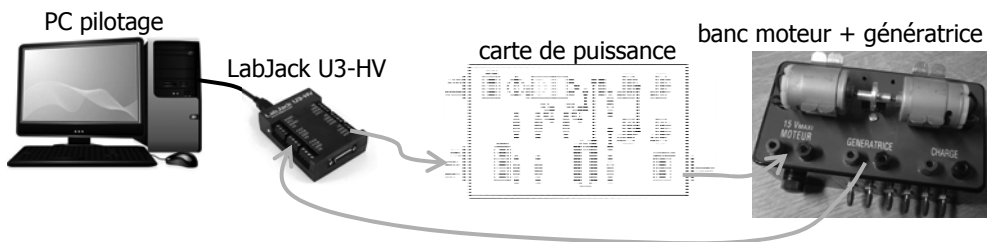
n	1	2	3	4	5
$\frac{T_u}{T_a}$	0	0,104	0,218	0,319	0,410
$\frac{T_a}{\tau}$	1	2,718	3,695	4,463	5,119

- À partir de la colonne de l'ordre n identifié précédemment, calculer la constante de temps τ se déduisant du rapport $\frac{T_a}{\tau}$.
- Le retard pur T se calcule à partir de : $T = \left[\left(\frac{T_u}{T_a} \right)_{\text{mesuré}} - \left(\frac{T_u}{T_a} \right)_{\text{tableau}} \right] \cdot T_a$

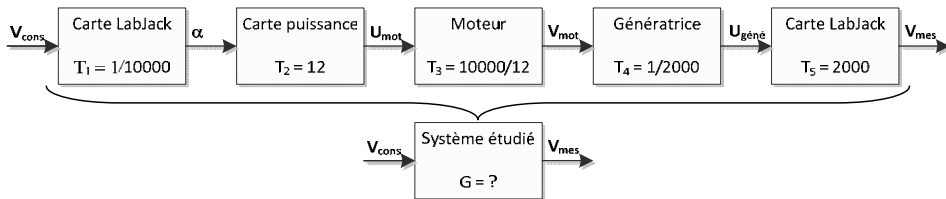
➔ Exercices

Exercice 10.1 – Commande d'un moteur à courant continu

On donne le schéma de l'architecture étudiée :



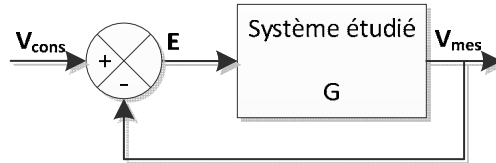
Ainsi on obtient le schéma bloc suivant :



- V_{cons} : vitesse de consigne (en tr/min) ;
- α : rapport cyclique (en %) ;
- U_{mot} : tension appliquée aux bornes du moteur (en V) ;
- V_{mot} : vitesse de rotation du moteur (en tr/min) ;
- $U_{géné}$: tension générée par la génératrice tachymétrique (en V) ;
- V_{mes} : vitesse mesurée (en tr/min).

1. Déterminer la fonction de transfert du système en boucle ouverte $G = \frac{V_{mes}}{V_{cons}}$.

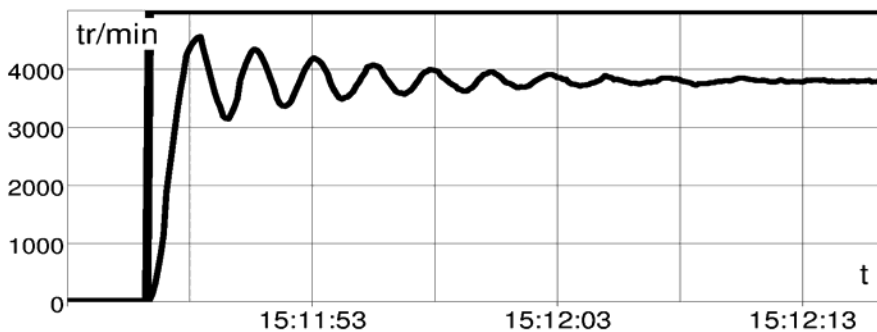
Afin de réguler la vitesse, on effectue un asservissement tel que :



2. Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée $T = \frac{V_{mes}}{V_{cons}}$.

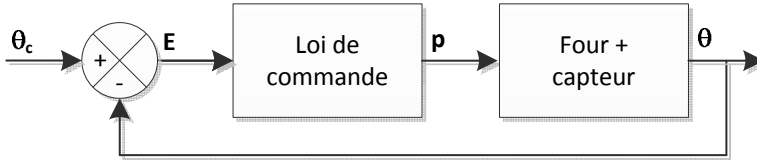
Donner la valeur numérique de T.

3. Pour une vitesse de consigne de 3000 tr/min, quelle sera la valeur de la vitesse mesurée ?
4. Avec un correcteur proportionnel, on obtient la réponse à une consigne de 5000tr/min. Déterminer :
 - le dépassement ;
 - l'erreur statique ;
 - le temps de montée ;
 - le temps de réponse à 5 %.



Exercice 10.2 – Asservissement de la température d'un four

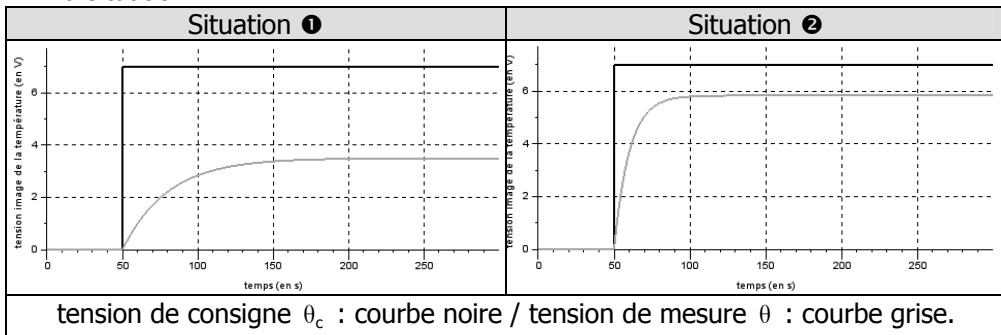
On considère l'asservissement de température du système constitué d'un four et d'un capteur de température :



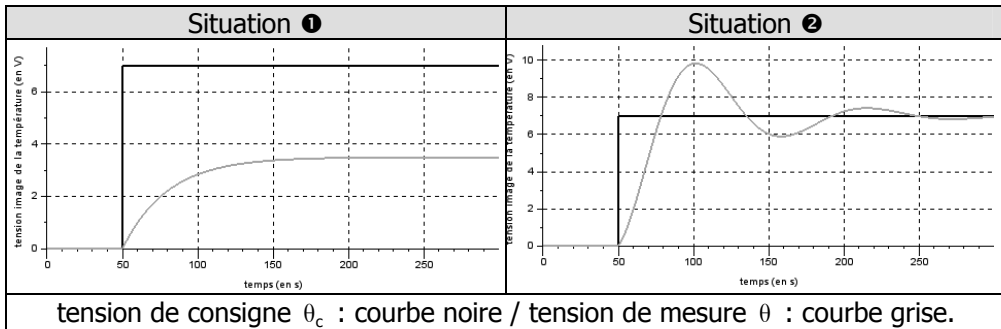
- θ_c : tension de consigne, image de la température de consigne désirée pour le four ;
- θ : tension de mesure délivrée par le capteur image de la température intérieure du four ;
- p : puissance électrique délivrée au four ;
- E : erreur entre la consigne et la mesure (en V).

Le bloc « loi de commande » correspond à un correcteur PID.

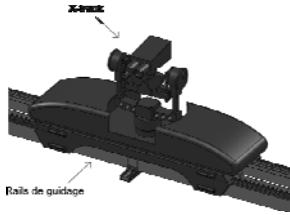
1. Sur quel paramètre du correcteur PID a-t-on agi pour passer de la situation ❶ à la situation ❷ ?



2. Sur quel paramètre du correcteur PID a-t-on agi pour passer de la situation ❶ à la situation ❷ ?



Exercice 10.3 – X-track (Bac SI)

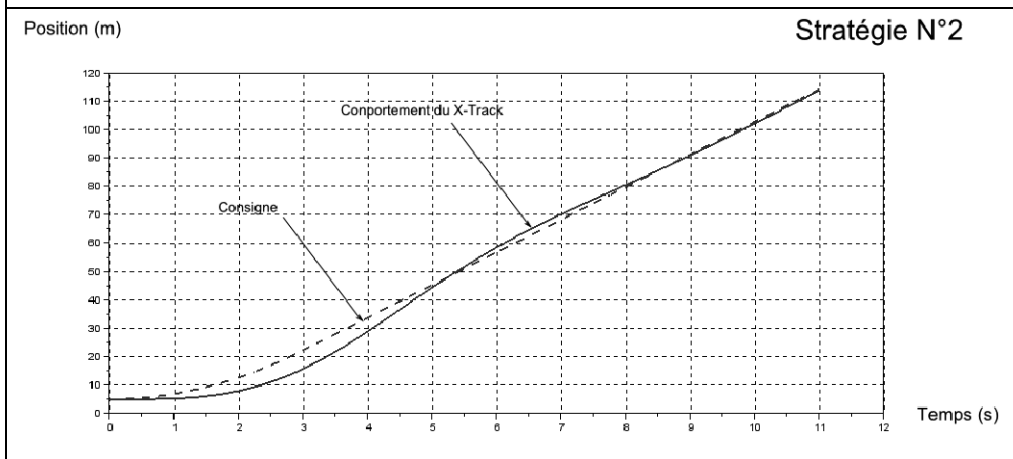
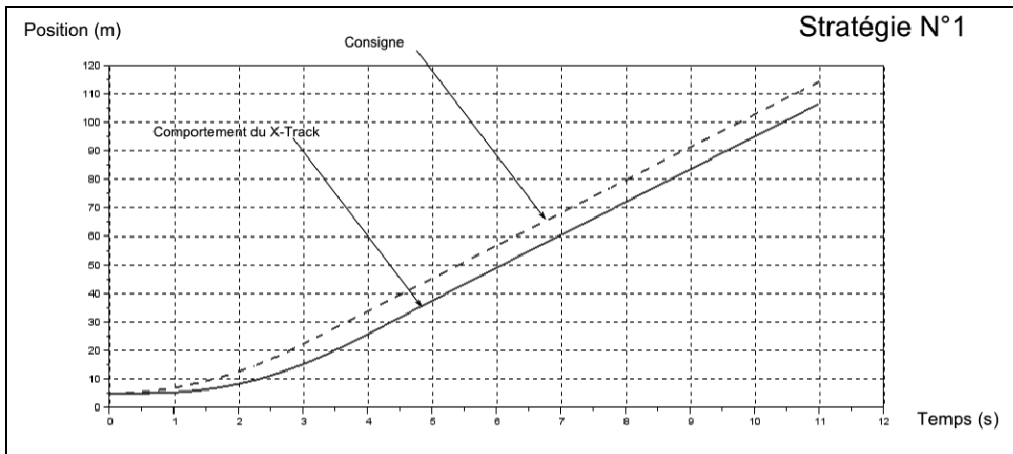


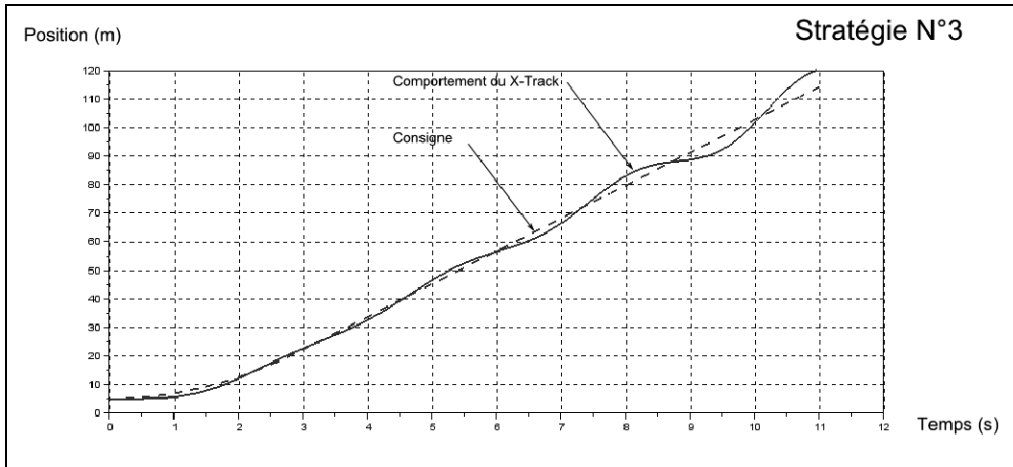
Pour filmer une épreuve d'athlétisme du 100 m, on utilise le système X-track qui est une caméra motorisée sur rails, positionnée parallèlement à la piste.

Le X-track présente les avantages de réaliser une image de l'ensemble des athlètes avant le départ, de suivre la tête de la course durant l'épreuve et d'obtenir une vue d'ensemble des concurrents de tête sur le final. Ainsi, il donne l'impression au téléspectateur de courir à côté des athlètes.

Un logiciel de modélisation et de simulation multi-physique a permis de simuler le comportement du X-track pour différentes stratégies d'asservissement.

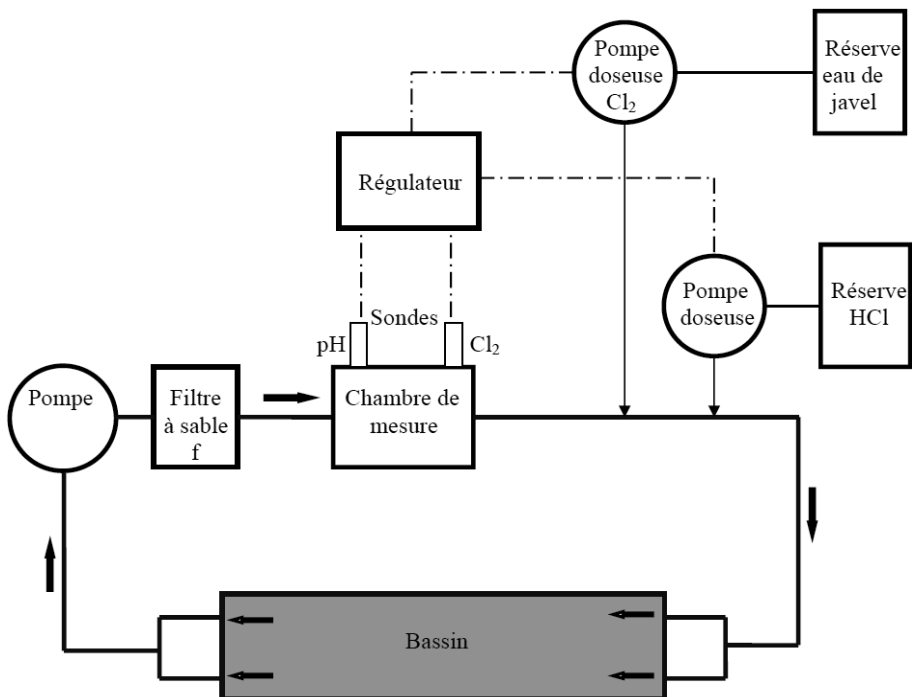
En comparant les 3 courbes proposées ci-dessous, déterminer laquelle des trois stratégies de commande est la plus adaptée à un suivi fidèle de toute l'épreuve ?





Exercice 10.4 – Traitement chimique de l'eau dans une piscine

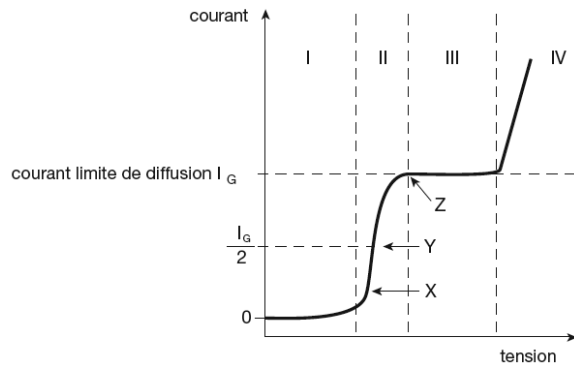
La figure ci-dessous représente la structure simplifiée du traitement chimique de l'eau dans une piscine :



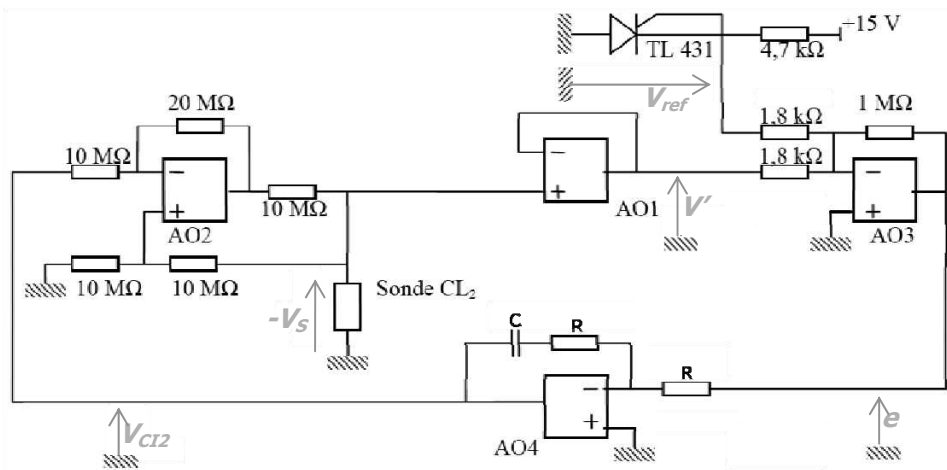
1 Mesure de la concentration en chlore libre par capteur ampérométrique

La cellule de mesure ampérométrique (**sonde CL₂**) se comporte comme un dipôle électrique dont la fonction de transfert courant / tension est représentée ci-contre :

Une tension appliquée aux bornes de la sonde détermine un fonctionnement dans la *zone III*. Le courant qui circule est alors proportionnel à la concentration en chlore libre du liquide dans lequel est plongé ce capteur.

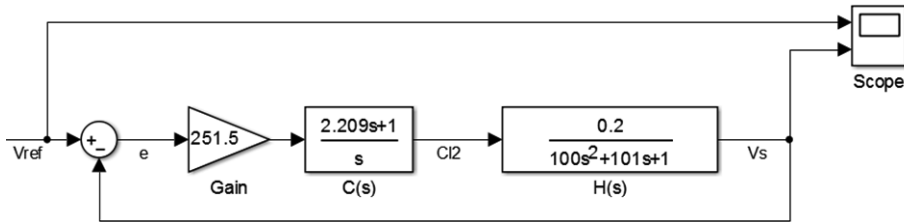


Le schéma d'exploitation de la sonde ampérométrique est :



- Le composant TL431 fournit une tension de référence $V_{ref} = 2,495 \text{ V}$.
- On donne : $R = 47 \text{ k}\Omega$ et $C = 47 \text{ }\mu\text{F}$.
- La sonde consomme un courant proportionnel à la concentration en chlore libre : $I = 25 \text{ nA / mg/l}$.
- En dynamique, le comportement de la sonde est tel que : $V_S = -k_S \cdot I$.
- L'amplificateur linéaire intégré AO1 fonctionne en suiveur donc $V' = -V_S$.

On obtient alors la modélisation multiphysique suivante :

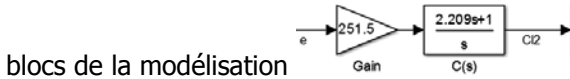


N.B. : sur la modélisation le symbole « s » correspond à l'opérateur de Laplace noté p en français et est assimilée à « j.ω » (« j » étant l'opérateur des nombres complexes).

1. Pour l'amplificateur linéaire intégré AO3 et en utilisant le théorème de Millman, démontrer que $e = -555,5 \cdot (V^+ + V_{ref})$.

2. Pour l'amplificateur linéaire intégré AO4, on a $\frac{V_{Cl2}}{e} = \frac{-1}{R \cdot C} \cdot \frac{1 + j \cdot R \cdot C \cdot \omega}{j \cdot \omega}$.

Montrer que $V_{Cl2} = 251,5 \cdot \frac{1 + j \cdot 2,209 \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot (V_{ref} - V_s)$ ce qui correspond aux



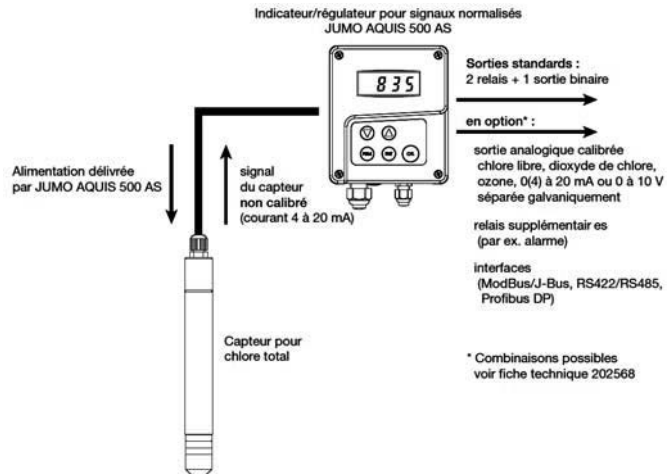
blocs de la modélisation

2 Régulation de la concentration en chlore libre par régulateur industriel

La cellule de mesure du chlore intègre l'interface électronique qui produit un signal 4/20 mA proportionnel à la teneur en chlore.

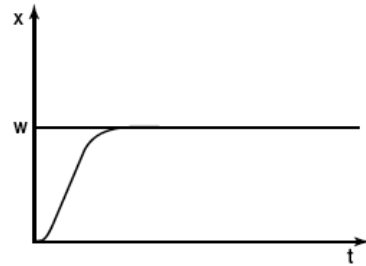
Le régulateur dTRANS Az01 est destiné à piloter la pompe doseuse de chlore.

Ce régulateur est doté d'une correction de type PID.



En fonction de la consigne paramétrée par le technicien, le régulateur dTRANS Az01 doit asservir la concentration de chlore libre dans le bassin de la piscine. Ci-contre une réponse optimale, avec des valeurs de P , T_i et T_d correctes :

- x est la teneur en chlore libre C_{Cl2} du bassin ;
- W est la consigne en chlore libre de C_{Cl2} .



3. Pour chacun des 4 essais du système asservi, donner l'état que vous estimez pour les paramètres du correcteur PID :

Essai N°1	Essai N°2
<p>P : <input type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input type="checkbox"/> Trop fort T_i : Correct T_d : Correct</p>	<p>P : <input type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input type="checkbox"/> Trop fort T_i : Correct T_d : Correct</p>
Essai N°3	Essai N°4
<p>P : Correct T_i : <input type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input type="checkbox"/> Trop fort T_d : Correct</p>	<p>P : Correct T_i : Correct T_d : <input type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input type="checkbox"/> Trop fort</p>

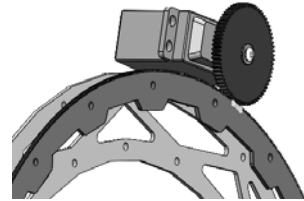
Exercice 10.5 – Nacelle gyrostabilisée (Bac SI)



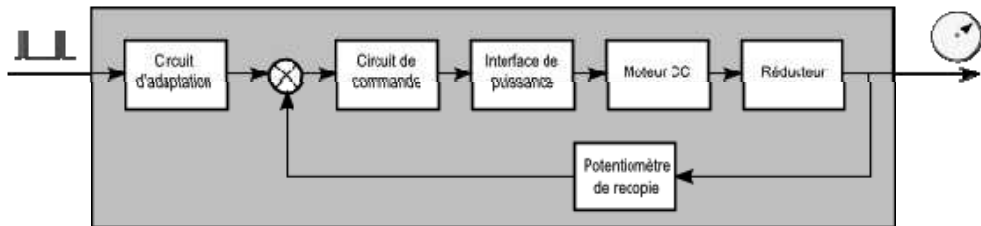
Depuis quelques années, des multicoptères, appelés « drones », servent à la prise de vue aérienne.

Ces multicoptères sont pilotés depuis le sol à l'aide d'une radiocommande. Ils embarquent un appareil de prise de vue qui peut retransmettre les images en temps réel grâce à un système de transmission sans fil.

L'axe de roulis est motorisé par un servomoteur SAVOX SH-1290MG alimenté sous 6 volts. Une roue dentée, solidaire de l'axe de sortie du servomoteur, entraîne l'arceau par l'intermédiaire de son secteur denté.



Un servomoteur est constitué notamment d'un moteur électrique à courant continu, d'un réducteur à engrenages, d'un potentiomètre de recopie monté sur l'axe de sortie du servomoteur et d'une carte électronique qui interprète le signal d'entrée et commande le moteur jusqu'à ce que la position angulaire voulue soit atteinte :

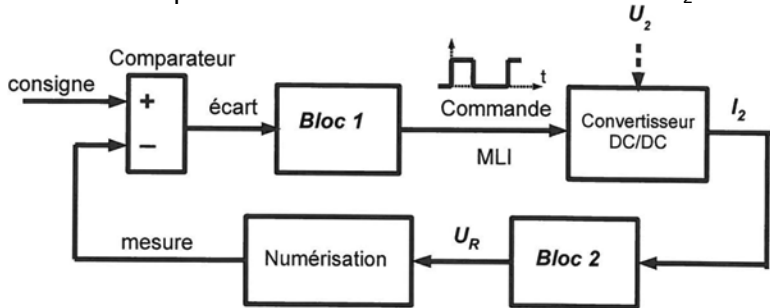


Justifier qu'un servomoteur est un système asservi.

Exercice 10.6 – Bus Watt System (Bac SI 2017)

L'aéroport Nice Côte d'Azur expérimente un service de bus électrique : l'innovation majeure est le « biberonnage » du véhicule qui consiste à effectuer un transfert d'énergie à chaque station d'arrêt (Totem) pendant le transfert des passagers :

La figure ci-dessous représente la boucle de contrôle du courant I_2 :

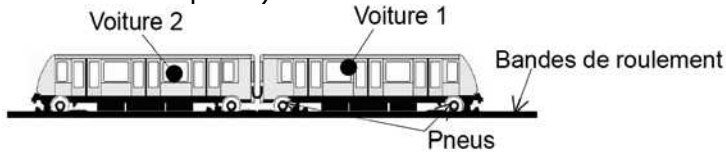


Justifier que le courant I_2 est asservi. Identifier le bloc représentant le correcteur et celui représentant le capteur.

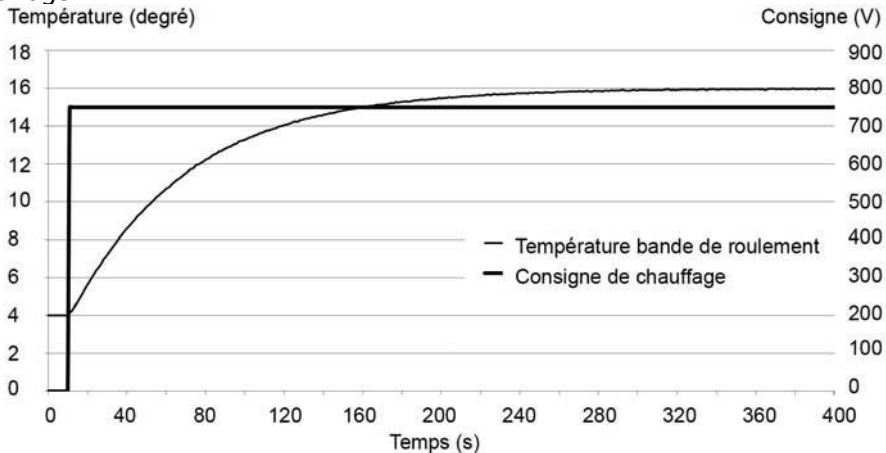
Exercice 10.7 – Métro rennais (Bac SI 2018)

Le métro de Rennes (de type VAL : Véhicule Automatique Léger) est un système de transport en commun entièrement automatique. Ce métro, alimenté en énergie électrique, est équipé de pneus.

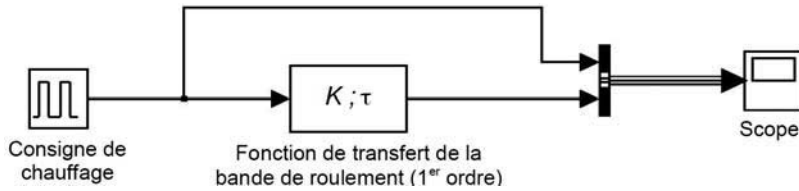
Les deux postes importants de consommation d'énergie sont l'alimentation des rames (une rame est constituée de deux voitures) et le chauffage des voies (bandes de roulement des pneus) :



L'étude suivante vise à définir les paramètres de mise en chauffe des bandes de roulement afin de stabiliser leur élévation de température à $+8\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Aucun capteur n'étant utilisé pour réguler le système de chauffage, un relevé expérimental du comportement d'une bande de roulement mise en chauffe a été réalisé (ci-dessous). Ces mesures doivent permettre de modéliser son comportement thermique et ainsi de déterminer les paramètres optimaux de la commande de chauffage.

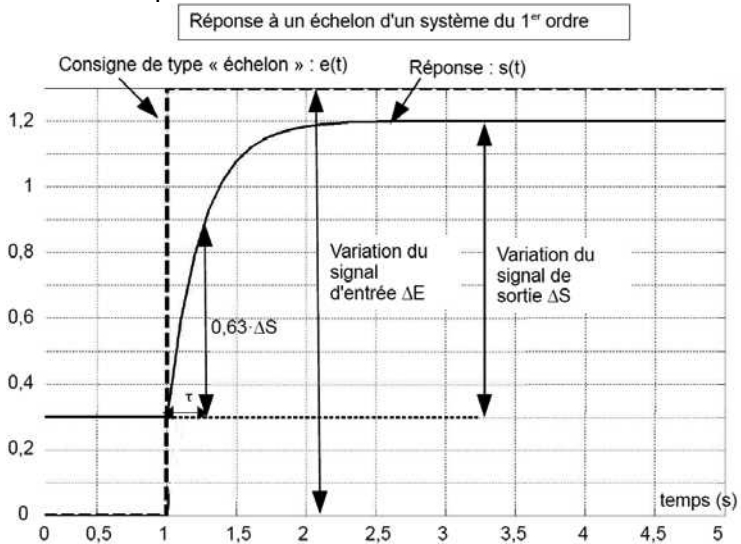


Le modèle de la commande de chauffage est représenté :



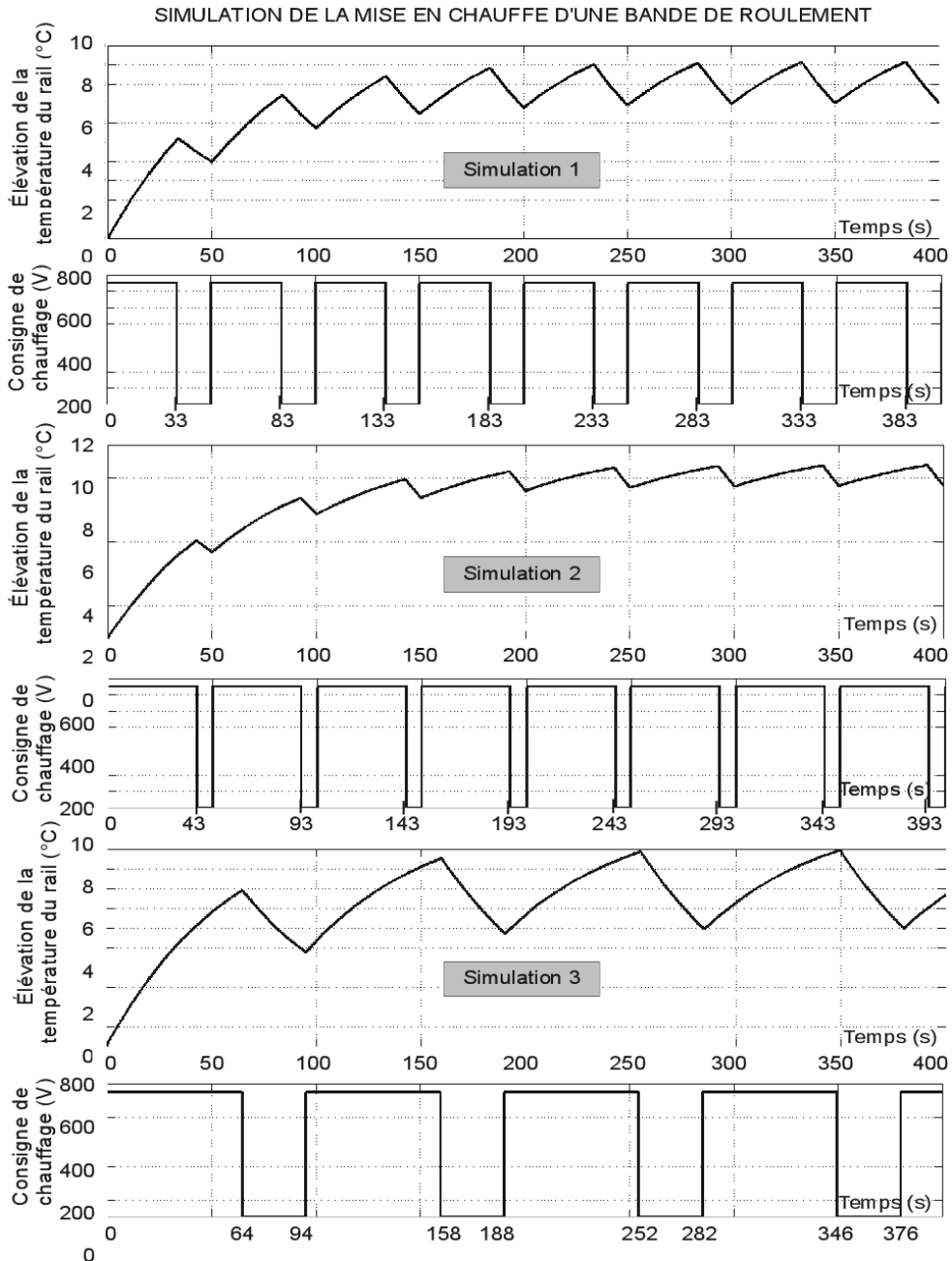
1. À l'aide du relevé expérimental ci-dessus et du document technique ci-dessous, déterminer l'amplification statique K et la constante de temps τ en vue de paramétrer le modèle de comportement de la bande de roulement. Préciser les unités.

Documentation technique :



- K est l'amplification statique : $K = \frac{\Delta S}{\Delta E}$
- τ représente la constante de temps : durée mise par $s(t)$ pour atteindre 63 % de sa variation ΔS .

On donne 3 simulations de mise en chauffe d'une bande de roulement :



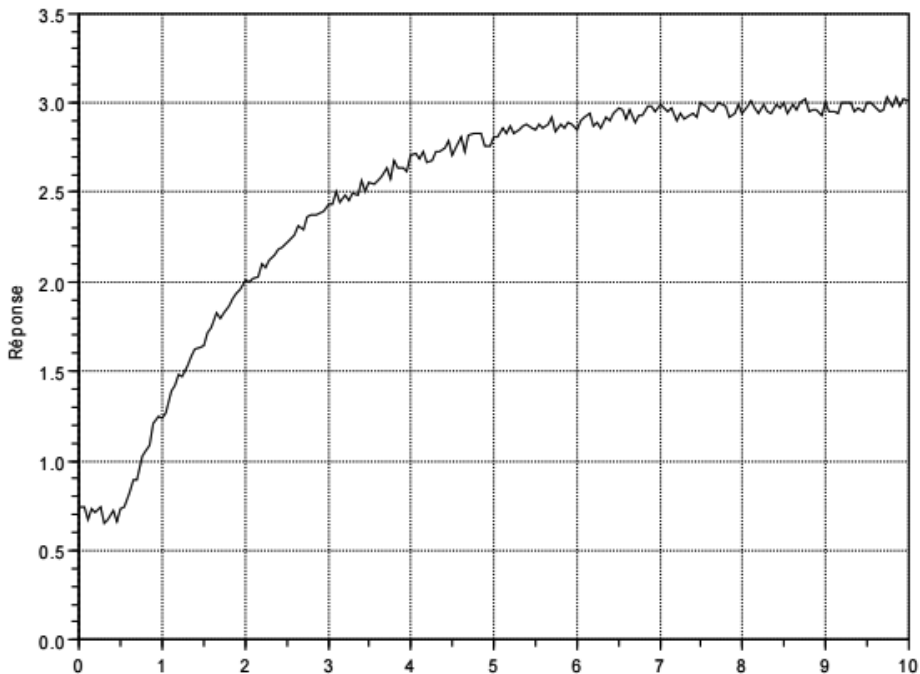
2. En justifiant la réponse, préciser quelle simulation correspond à l'élévation de température attendue ($+8\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$). Pour la simulation retenue, déterminer la période T et le rapport cyclique α à paramétrer dans le bloc commande de chauffage. Estimer en pourcentage, le gain énergétique réalisable par rapport au fonctionnement actuel ($\alpha = 1$).

Exercice 10.8 – Identification de Strejc

Soit un système linéaire de fonction de transfert $G_{(p)}$:



On donne la réponse indicielle S correspondant à un échelon E d'amplitude 2, relevée avec un enregistreur :



1. Sur la courbe ci-dessus :
 - identifier le point d'inflexion de la courbe ;
 - tracer les 2 tangentes ;
 - identifier les 3 valeurs ΔS , T_u et T_a .
2. Déterminer le gain statique G_s .
3. Calculer le rapport $\frac{T_u}{T_a}$ et en déduire l'ordre n du système (se reporter au tableau du paragraphe 5.).
4. À partir du rapport $\frac{T_a}{\tau}$ et de la valeur mesurée sur la courbe, en déduire la constante de temps τ .
5. En déduire alors la valeur du retard pur T .
6. Donner l'équation de la fonction de transfert $G_{(p)}$.

→ Solutions

Exercice 10.1 – Commande d'un moteur à courant continu

$$1. G = \frac{V_{\text{mes}}}{V_{\text{cons}}} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 = 1$$

$$2. E = V_{\text{cons}} - V_{\text{mes}} \text{ or } V_{\text{mes}} = G \cdot E \text{ donc } V_{\text{mes}} = G \cdot (V_{\text{cons}} - V_{\text{mes}})$$

$$\text{Ainsi on obtient : } T = \frac{G}{1 + G} = \frac{1}{2}$$

$$3. T = \frac{G}{1 + G} = \frac{1}{2}, \text{ donc la vitesse mesurée sera de } 1500 \text{ tr/min.}$$

4.

- Dépassement : $D = 4600 - 3800 = 800$ soit $D = 21\%$
- Erreur statique : $\varepsilon = 5000 - 3800 = 1200$ soit $\varepsilon = 24\%$
- Temps de montée : $t_m \approx 1\text{s}$
- Temps de réponse à 5% : $t_{r,5\%} \approx 20\text{s}$

Exercice 10.2 – Asservissement de la température d'un four

1. Augmentation de la précision (diminution de l'erreur statique), pas de changement pour la rapidité et la stabilité. Donc on a agi sur le paramètre proportionnel.
2. Détérioration de la stabilité (augmentation du dépassement) et amélioration de la précision (erreur statique nulle), donc on a agi sur le paramètre intégral.

Exercice 10.3 – X-track

L'observation des réponses pour les 3 stratégies de commande donne les résultats suivants :

- Avec la stratégie N°1, l'écart entre la consigne et le comportement du X-track est trop important. Le X-track étant toujours en retard sur la consigne, le téléspectateur verrait donc les athlètes de dos et n'aurait pas l'impression d'être immergé dans la course aux côtés des coureurs.
- Avec la stratégie N°2, l'écart est faible et le comportement est stable, pas de grande accélération ou freinage, en fin de course l'écart est quasi nul.
- Avec la stratégie N°3, l'écart est faible en début de course mais le comportement est instable (apparition d'oscillations autour de la consigne). Les accélérations et freinages successifs sont probablement néfastes à la prise de vue et à son rendu.

La meilleure stratégie est celle qui ne déstabilise pas le système et qui présente un écart le plus faible possible par rapport à la consigne. C'est donc la stratégie N°2 qui est la plus adaptée.

Exercice 10.4 – Traitement chimique de l'eau dans une piscine

$$1. V^+ = V^- = 0 = \frac{V'}{1,8k} + \frac{V_{\text{ref}}}{1,8k} + \frac{e}{1M}$$

$$\text{Soit : } -e = \frac{1M}{1,8k} (V' + V_{\text{ref}}) \rightarrow e = -555,5 \cdot (V' + V_{\text{ref}})$$

2. On a :

- $V' = -V_S$

- $e = -555,5 \cdot (V' + V_{\text{ref}})$

- et $\frac{V_{\text{cl2}}}{e} = \frac{-1}{R \cdot C} \cdot \frac{1 + j \cdot R \cdot C \cdot \omega}{j \cdot \omega}$

$$\text{Donc : } V_{\text{cl2}} = \frac{-1}{R \cdot C} \cdot \frac{1 + j \cdot R \cdot C \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot e$$

$$V_{\text{cl2}} = \frac{-1}{R \cdot C} \cdot \frac{1 + j \cdot R \cdot C \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot (-555,5 \cdot (V' + V_{\text{ref}}))$$

$$V_{\text{cl2}} = \frac{-1}{R \cdot C} \cdot \frac{1 + j \cdot R \cdot C \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot (-555,5 \cdot (-V_S + V_{\text{ref}}))$$

$$\text{Soit : } V_{\text{cl2}} = \frac{555,5}{R \cdot C} \cdot \frac{1 + j \cdot R \cdot C \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot (V_{\text{ref}} - V_S)$$

Application numérique :

$$V_{\text{cl2}} = \frac{555,5}{47 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1 + j \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-6} \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot (V_{\text{ref}} - V_S)$$

$$V_{\text{cl2}} = \frac{555,5}{2,209} \cdot \frac{1 + j \cdot 2,209 \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot (V_{\text{ref}} - V_S)$$

$$V_{\text{cl2}} = 251,471 \cdot \frac{1 + j \cdot 2,209 \cdot \omega}{j \cdot \omega} \cdot (V_{\text{ref}} - V_S)$$

3.

Essai N°1	Essai N°2
P : <input type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input checked="" type="checkbox"/> Trop fort	P : <input checked="" type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input type="checkbox"/> Trop fort

Essai N°3	Essai N°4
Ti : <input checked="" type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input type="checkbox"/> Trop fort	Td : <input type="checkbox"/> Trop faible - <input type="checkbox"/> Correct - <input checked="" type="checkbox"/> Trop fort

Exercice 10.5 – Nacelle gyrostabilisée

On remarque que le système est bouclé par l'intermédiaire d'un capteur (potentiomètre de copie). De plus, la position angulaire de sortie étant mesurée et comparée à la consigne, il s'agit bien d'un asservissement.

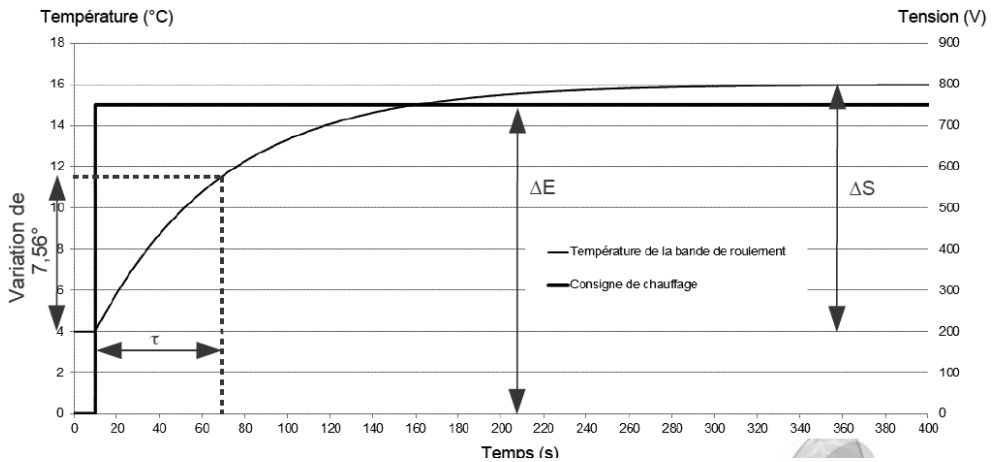
Exercice 10.6 – Bus Watt System

La sortie I_2 est rebouclée sur un comparateur qui permet de comparer la consigne avec la mesure afin d'adapter la commande MLI du convertisseur DC/DC. On identifie donc un système en boucle fermée, donc le système est asservi.

Le « Bloc 1 » correspond au correcteur et le « Bloc 2 » au capteur.

Exercice 10.7 – Métro rennais

1. Amplification statique : $K = \frac{\Delta S}{\Delta E} = \frac{12}{750} = 0,016 \text{ degré} \cdot \text{V}^{-1}$



τ correspond au temps mis pour atteindre 63 % de ΔS soit :
 $0,63 \times \Delta S = 7,56^\circ$

Constante de temps $\tau = 70 - 10 = 60 \text{ s}$

2. Le cahier des charges indique une stabilisation de l'élévation de température à $+8^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

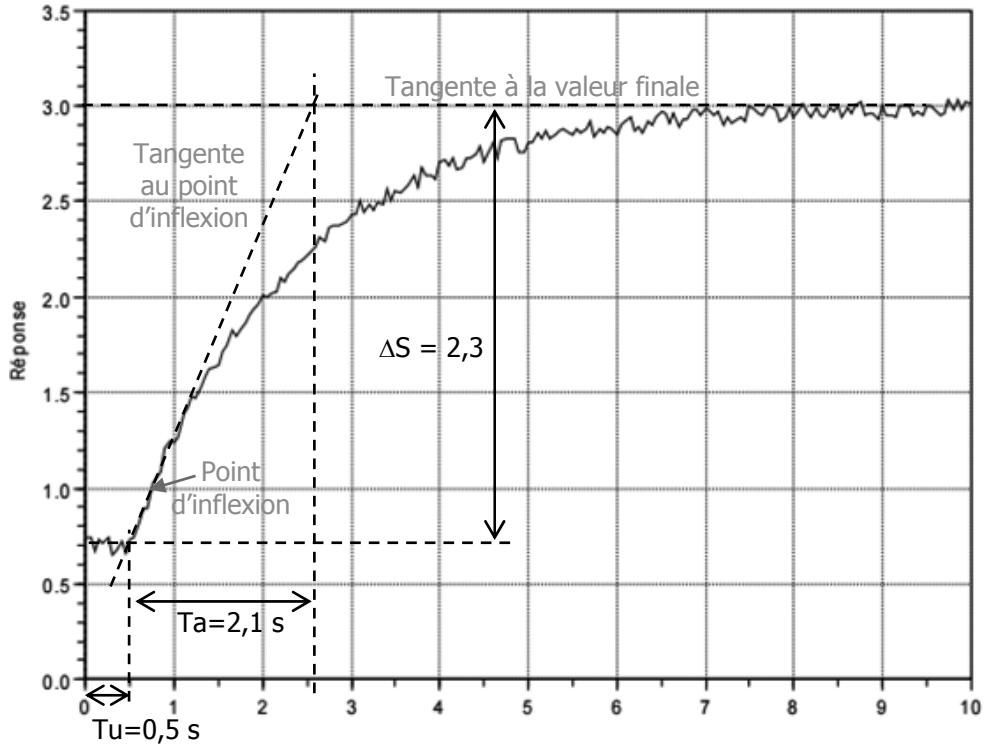
- La simulation N°1 correspond au fonctionnement attendu.
- La période T de la commande de chauffage est de 50 s et le rapport cyclique

$$\alpha = \frac{t_{\text{ON}}}{T} = \frac{33}{50} = 0,66 = 66 \%$$

- Gain énergétique réalisable : $(1 - 0,66) \times 100 = 34 \%$.

Exercice 10.8 – identification de Strejc

1.



$$2. G_s = \frac{\Delta S}{\Delta E} = \frac{2,3}{2} = 1,15$$

3. $\frac{T_u}{T_a} = \frac{0,5}{2,1} = 0,249$, dans le tableau du paragraphe 5., on prend la valeur inférieure $\left(\frac{T_u}{T_a} = 0,218\right)$. Et donc on en déduit : $n = 3$.

4. D'après le tableau du paragraphe 5., pour $n = 3$, $\frac{T_a}{\tau} = 3,695$ soit :

$$\tau = \frac{T_a}{3,695} = \frac{2,1}{3,695} = 0,583 \text{ s}$$

$$5. T = \left[\left(\frac{T_u}{T_a} \right)_{\text{mesuré}} - \left(\frac{T_u}{T_a} \right)_{\text{tableau}} \right] \cdot T_a = [0,249 - 0,218] \cdot 2,154 = 66,8 \text{ ms}$$

$$6. G_{(p)} = 1,15 \cdot \frac{e^{-66,8 \cdot 10^{-3} \cdot p}}{(1 + 0,583 \cdot p)^3}$$

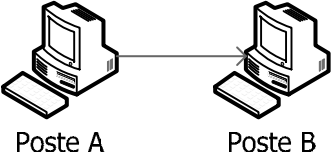
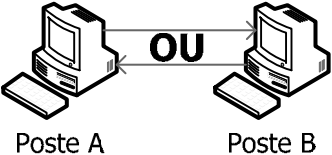
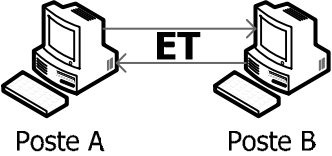
Chapitre 11

Transmission de données Bus de terrain

1. Définitions

1.1. Types de communication

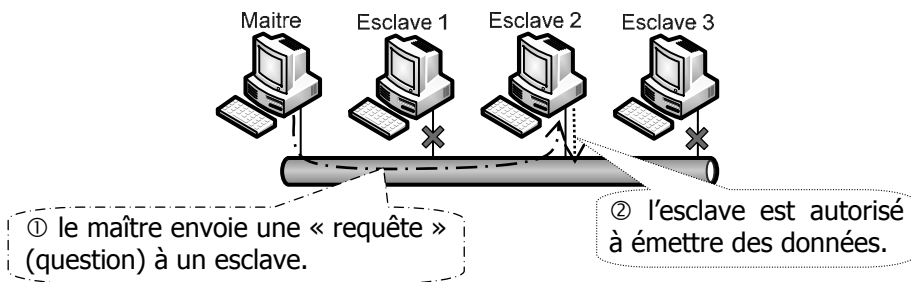
Il existe 3 types de communication :

Simplex	<p>Transmission unidirectionnelle : le poste A est émetteur et le poste B est récepteur.</p> 
Half-Duplex	<p>Émission et réception alternées : à un instant donné, le poste A est émetteur et le poste B est récepteur. Puis la communication s'inverse.</p> 
Full-Duplex	<p>Émission et réception simultanées : les postes A et B peuvent émettre et recevoir en même temps.</p> 

1.2. Gestion des communications

1.2.1. Maître / esclave

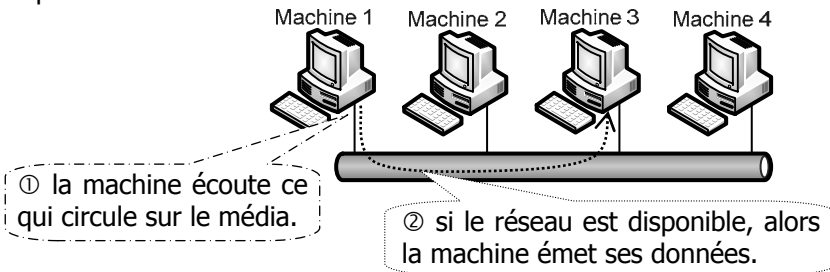
Dans ce mode, le maître gère toutes les communications. Seul le maître peut initier une communication. Un esclave ne peut émettre des données sur le réseau que s'il a reçu l'autorisation du maître :



1.2.2. Multi-maître

Dans une communication de type multi-maître, toutes les machines sont maîtres, elles peuvent donc émettre des données lorsqu'elles le souhaitent. Cependant, si 2 machines émettent des données simultanément, il va y avoir des « collisions de trames » et donc des données seront perdues.

Pour éviter ce problème, l'envoi de données sur le réseau par une machine se fait en 2 temps :



1.3. Vitesse de la transmission

La vitesse de la transmission série s'exprime en baud (Bd). Il s'agit de la quantité « d'information élémentaire » transmise par seconde.

Les vitesses de transmission sont normalisées : 115 200 bauds, 57 600 bauds, ..., 9 600 bauds, 4 800 bauds, 2 400 bauds, ..., 110 bauds.

1.4. Code ASCII

Le code ASCII (American Standard Code for Information Interchange) est une norme d'encodage informatique des caractères alphanumériques.

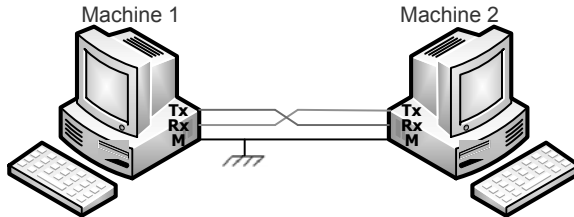
La norme ASCII établit une correspondance entre une représentation binaire (ou hexadécimale ou décimale) des caractères de l'alphabet latin et les symboles qui constituent cet alphabet.

Liste des codes décimaux et hexadécimaux de la table ASCII standard :

Déc	Hex	Car	signification
0	00	NUL	Null
1	01	SOH	Start of Heading (début d'en-tête)
2	02	STX	Start of Text (début de texte)
3	03	ETX	End of Text (fin de texte)
4	04	EOT	End of Transmission (fin de transmission)
5	05	ENQ	Enquiry (demande)
6	06	ACK	Acknowledge (accusé de réception)
7	07	BEL	Bell (sonnerie)
8	08	BS	Backspace (espacement arrière)
9	09	HT	Horizontal Tab (tabulation horizontale)
10	0A	LF	Line Feed (saut de ligne)
11	0B	VT	Vertical Tab (tabulation verticale)
12	0C	FF	Form Feed (saut de page)
13	0D	CR	Carriage Return (retour chariot)
14	0E	SO	Shift Out (code spécial)
15	0F	SI	Shift In (code standard)
16	10	DLE	Data Link Escape (échappement en transmission)
17	11	DC1	Device Control 1 à 4 (contrôle de périphérique)
18	12	DC2	
19	13	DC3	
20	14	DC4	
21	15	NAK	Negative Acknowledge
22	16	SYN	Synchronous Idle (attente synchronisée)
23	17	ETB	End of Transmission Block (fin de bloc de transmission)
24	18	CAN	Cancel
25	19	EM	End of Medium (fin de support)
26	1A	SUB	Substitute (remplacement)
27	1B	ESC	Escape (échappement)
28	1C	FS	File Separator
29	1D	GS	Group Separator
30	1E	RS	Record Separator
31	1F	US	Unit Separator
32	20	SP	Space (espace)
33	21	!	
34	22	"	
35	23	#	
36	24	\$	
37	25	%	
38	26	&	
39	27	'	
40	28	(
41	29)	
42	2A	*	
43	2B	+	
44	2C	,	
45	2D	-	
46	2E	.	
47	2F	/	
48	30	0	
49	31	1	
50	32	2	
51	33	3	
52	34	4	
53	35	5	
54	36	6	
55	37	7	
56	38	8	
57	39	9	
58	3A	:	
59	3B	;	
60	3C	<	
61	3D	=	
62	3E	>	
63	3F	?	
64	40	@	
65	41	A	
66	42	B	
67	43	C	
68	44	D	
69	45	E	
70	46	F	
71	47	G	
72	48	H	
73	49	I	
74	4A	J	
75	4B	K	
76	4C	L	
77	4D	M	
78	4E	N	
79	4F	O	
80	50	P	
81	51	Q	
82	52	R	
83	53	S	
84	54	T	
85	55	U	
86	56	V	
87	57	W	
88	58	X	
89	59	Y	
90	5A	Z	
91	5B	[
92	5C	\	
93	5D]	
94	5E	^	
95	5F	_	
96	60	`	
97	61	a	
98	62	b	
99	63	c	
100	64	d	
101	65	e	
102	66	f	
103	67	g	
104	68	h	
105	69	i	
106	6A	j	
107	6B	k	
108	6C	l	
109	6D	m	
110	6E	n	
111	6F	o	
112	70	p	
113	71	q	
114	72	r	
115	73	s	
116	74	t	
117	75	u	
118	76	v	
119	77	w	
120	78	x	
121	79	y	
122	7A	z	
123	7B	{	
124	7C		
125	7D	}	
126	7E	~	
127	7F	DEL	

2. Liaison série UART

Un UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) est une liaison série asynchrone permettant de transmettre des informations sur un seul fil (bit après bit) entre 2 machines pour un sens donné :



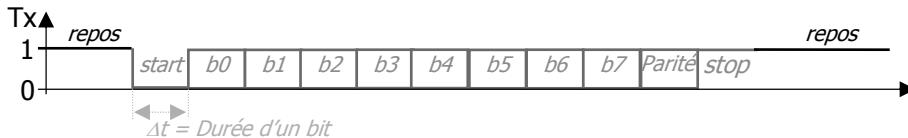
- Tx : broche d'émission (Transmission) ;
- Rx : broche de réception ;
- M : masse, référence de tension entre les 2 machines.

N.B. : dans le cas d'une liaison directe, il est généralement nécessaire d'utiliser un « câble croisé » ; de telle sorte que la broche Tx soit reliée à la broche Rx.

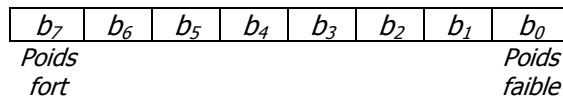
2.1. Format d'une trame

Une trame UART est composée de 4 blocs :

- 1 « bit de start » (niveau logique 0) : début de l'envoi d'une donnée ;
- la « donnée » : formatée sur 7 ou 8 bits ;
- 1 « bit de parité » (facultatif) : parité paire ou impaire ;
- 1 ou 2 « bit de stop » (niveau logique 1) : fin de l'envoi d'une donnée ;



N.B. : les données sont émises en commençant par le bit de poids faible : format « big endian » (poids fort en dernier). La donnée transmise est codée sur 8 bits (chaque bit pouvant valoir 0 ou 1) :



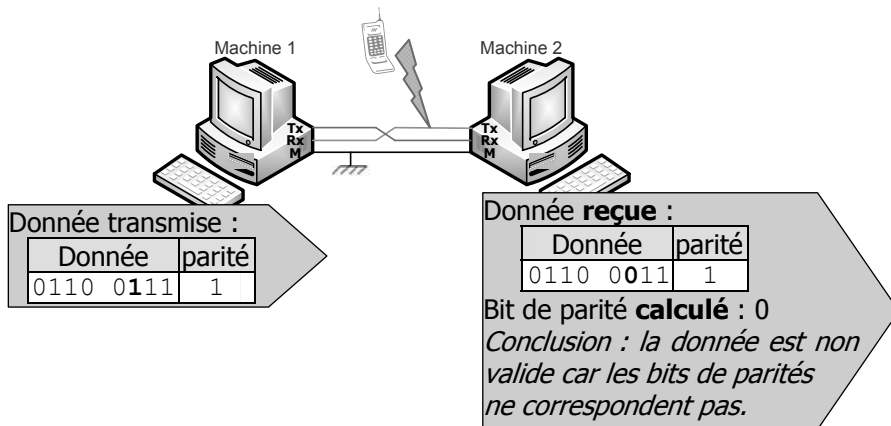
2.2. La parité

Le bit de parité est optionnel et il y a le choix entre 2 configurations :

Parité	Description
Paire	Le bit de parité est tel que le nombre de bit au niveau logique 1 de l'ensemble {donnée + parité} soit paire.
Impaire	Le bit de parité est tel que le nombre de bit au niveau logique 1 de l'ensemble {donnée + parité} soit impaire.

Le bit de parité permet de détecter une éventuelle erreur lors de la transmission : une machine qui reçoit une donnée, va calculer le bit de parité à partir de la donnée reçue et le comparer avec celui reçu. S'ils sont différents, la machine en déduit que la donnée reçue est fautive et va donc demander à l'émetteur de ré-émettre cette donnée.

Exemple : mise en évidence du rôle du bit de parité dans le cas d'une parité paire avec une perturbation lors de la transmission (bit en gras) :



2.3. Vitesse de transmission d'un UART

Dans le cas d'un UART, l'« information élémentaire » correspond à 1 bit, donc 1 baud = 1 bit/s.

Ainsi lors de la transmission d'une donnée, la durée d'un bit Δt correspond à :

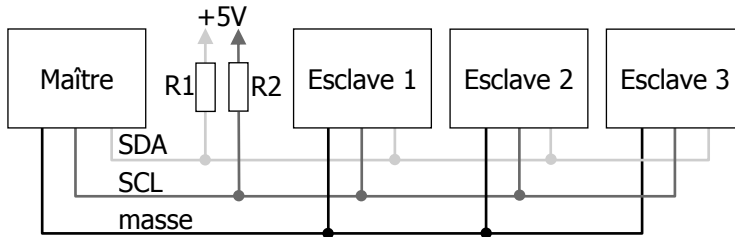
$$\Delta t = \frac{1}{\text{vitesse de transmission}}$$

3. Liaison série I²C

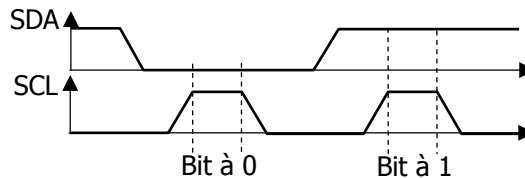
La liaison I²C (Inter-Integrated Circuit) a été conçue par Philips pour des communications de courte distance entre un microprocesseur et différents périphériques.

La liaison I²C est une communication de type maître-esclave synchrone : c'est-à-dire qu'elle nécessite un signal d'horloge pour cadencer l'émission des données. La liaison I²C utilise 2 fils (+ la masse) :

- SDA (Serial Data Line) : signal de données ;
- SCL (Serial Clock Line) : signal d'horloge.



Lors de l'envoi d'un bit, le niveau logique de ce bit est placé sur le signal SDA. Le récepteur peut acquérir le bit lorsque le signal SCL est au niveau logique haut :

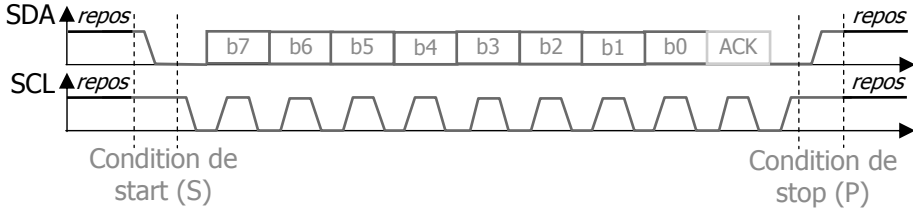


3.1. Format d'une trame

Une trame I²C est composée de 4 blocs :

- 1 « condition de start » (front descendant de SDA pendant que SCL reste au niveau logique 1) : début de l'envoi d'une donnée ;
- la « donnée » : formatée sur 1 octet (8 bits) ;
- 1 « bit ACK » (acknowledge) : après l'envoi d'un octet, le récepteur doit confirmer la réception de ce dernier en générant un bit d'acquittement (ACK). Ce bit est placé à 0 par le récepteur si l'octet est reçu et à 1 s'il n'a pas été reçu correctement (on parle alors de non acquittement, NACK) ;
- 1 « condition de stop » (front montant de SDA pendant que SCL reste au niveau logique 1) : fin de l'envoi d'une donnée.

Trame I²C correspondant à l'envoi d'un octet :



N.B. : les données sont émises en commençant par le bit de poids fort : format « little endian » (poids faible en dernier).

3.1.1. Écriture d'une donnée

Trame I²C correspondant à l'écriture d'une donnée du maître vers l'esclave (bit R/W à 0) :

S	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	R/W	ACK	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	ACK	P
Start	Adresse de l'esclave (sur 7 bits)							Read/Write=0	Acquittement=0	Donnée (sur 8 bits)								Acquittement=0	Stop

Bits émis par le maître Bits émis par l'esclave

3.1.2. Lecture d'une donnée

Trame I²C correspondant à la lecture de données de l'esclave par le maître (bit R/W à 1) :

S	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	R/W	ACK	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	ACK	
Start	Adresse de l'esclave (sur 7 bits)							Read/Write=1	Acquittement=0	Donnée 1 (sur 8 bits)								Acquittement=0	→ Suite de la trame ci-dessous

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	ACK	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	NACK	P
Donnée 2 (sur 8 bits)								Acquittement=0	Donnée 3 (sur 8 bits)								Non-Acquittement=1	Stop

Bits émis par le maître Bits émis par l'esclave

Après que l'esclave ait envoyé une donnée, le maître génère un bit d'acquiescement ACK :

- =0 : si le maître souhaite lire un octet supplémentaire ;
- =1 (NACK, non-acquiescement) : si le maître veut arrêter la lecture.

3.2. Vitesse de transmission

Dans le cas d'une trame I²C, l'« information élémentaire » correspond à 1 bit, donc 1 baud = 1 bit/s.

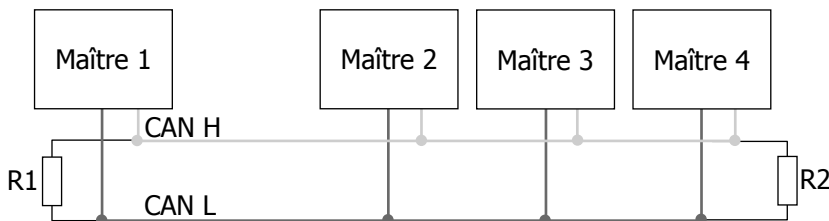
Ainsi lors de la transmission d'une donnée, la durée d'un bit Δt correspond à :

$$\Delta t = \frac{1}{\text{vitesse de transmission}}$$

4. Bus CAN

Le bus CAN (Controller Area Network) est un protocole de communication série initialement utilisé dans l'industrie automobile, ayant les caractéristiques suivantes :

- communication multi-maître ;
- architecture du réseau en bus ;
- transmission asynchrone (sans signal d'horloge) ;
- transmission des données de façon différentielle sur 2 fils :



N.B. : chaque extrémité du bus est fermée par une résistance de 120 Ω , appelée « bouchon » ou résistance de terminaison.

Il existe 2 types de bus CAN :

- LS (Low Speed) : débits classiques de 100 kbits/s ou 125 kbits/s.
- HS (High Speed) : débits classiques de 250 kbits/s ou 500 kbits/s.

De plus, il existe 2 standards du CAN HS :

- ✓ CAN 2.0A, dit « CAN standard » : l'identificateur de la trame est codé sur 11 bits ;
- ✓ CAN 2.0B, dit « CAN étendu » : l'identificateur de la trame est codé sur 29 bits.

4.1. Mode de transmission différentielle

4.1.1. Rôle de la transmission différentielle

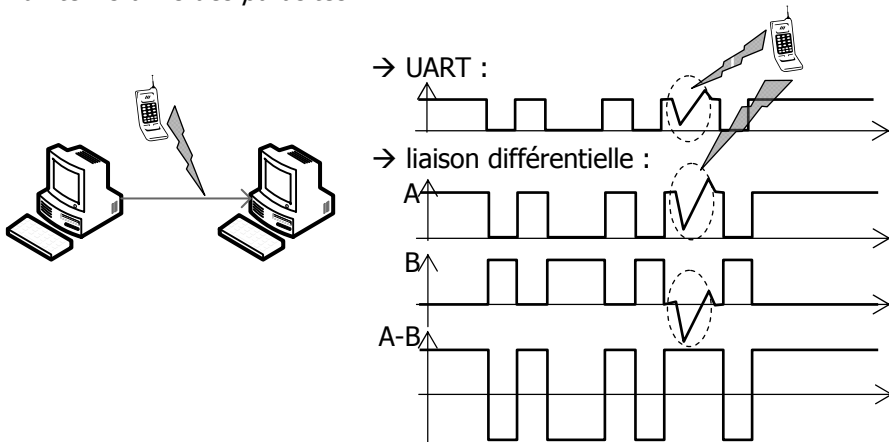
Une transmission différentielle est dite symétrique, c'est-à-dire que la donnée à transmettre est émise sur 2 conducteurs de façon symétrique : le signal sur un fil et son opposé sur l'autre fil. Le niveau logique correspond à la différence de tension entre les 2 fils.

Exemple

- Pour transmettre un bit au niveau logique 1, on émet une tension de $+5\text{ V}$ sur le conducteur A et 0 V sur le conducteur B, de telle sorte que $A - B > 0$.
- Pour transmettre un bit au niveau logique 0, on émet une tension de 0 V sur le conducteur A et $+5\text{ V}$ sur le conducteur B, de telle sorte que $A - B < 0$.

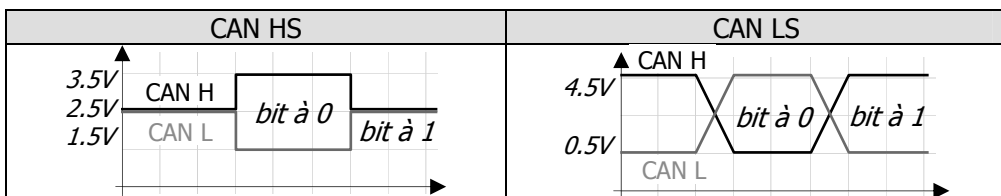
Le principal intérêt d'une transmission différentielle est d'être immunisée contre les perturbations électromagnétiques. Si une perturbation électromagnétique dégrade un fil, on suppose que cette perturbation dégrade de la même manière l'autre fil et donc la différence entre les 2 fils reste inchangée.

Exemple : mise en évidence de l'intérêt de la transmission différentielle pour l'immunité vis-à-vis des parasites.



Dans le cas de l'UART (asymétrique), les parasites altèrent le signal et celui-ci devient incompréhensible. Dans le cas de la liaison différentielle, les parasites sont supprimés.

4.1.2. Signaux HS (High Speed) et LS (Low Speed)



N.B. : la terminologie utilisée dans le protocole CAN indique que :

- un bit à 0 est appelé « bit dominant » ;
- un bit à 1 est appelé « bit récessif ».

4.2. Auto re-synchronisation (bit de stuffing)

Dans un réseau CAN, chaque élément raccordé au bus CAN possède un contrôleur de ligne. Or ces contrôleurs de ligne possèdent un quartz pour générer les signaux. Mais avec le temps, les quartz peuvent dériver, il faut donc re-synchroniser périodiquement les horloges de tous les contrôleurs de ligne.

Ainsi tous les 5 bits identiques, il y a insertion d'un bit de re-synchronisation appelé bit de bourrage (Stuffing). La valeur de ce bit est l'inverse des 5 bits précédents.

4.3. Vitesse de transmission

Dans le cas d'une trame CAN, l'« information élémentaire » correspond à 1 bit, donc 1 baud = 1 bit/s.

Ainsi lors de la transmission d'une donnée, la durée d'un bit Δt correspond à :

$$\Delta t = \frac{1}{\text{vitesse de transmission}}$$

4.4. Format d'une trame

Structure d'une trame CAN 2.0A (identifiant codé sur 11 bits) :

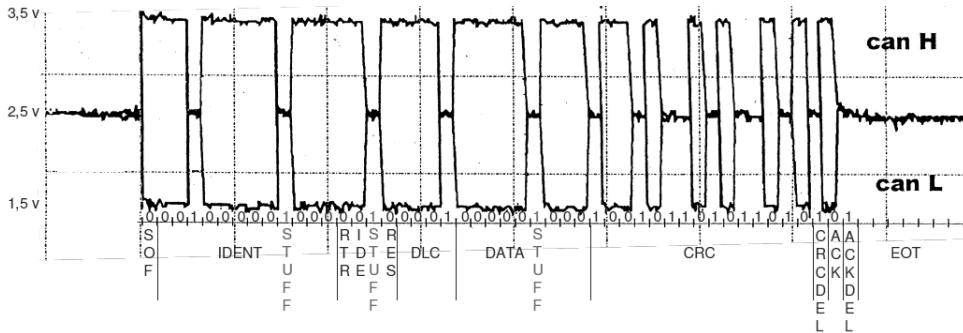
SOF (1bit)	Arbitrage (12bits)	Commande (6bits)	Données (de 0 à 64bits)	CRC (16bits)	ACK (2bits)	EOF (7bits)
---------------	-----------------------	---------------------	----------------------------	-----------------	----------------	----------------

- SOF (Start Of Frame) : début de trame –1 bit à 0
- Arbitrage : champ d'identification de la trame constitué de :
 - ✓ 11 bits pour l'identificateur de la trame ;
 - ✓ 1 bit RTR (Remote Transmission Request) au niveau logique 0.
- Commande :
 - ✓ 2 bits de poids fort au niveau logique 0, appelés « bit de réserve » pour une évolution ultérieure...
 - ✓ 4 bits formant le champ DLC (Data Length Code) indiquant le nombre d'octets contenus dans le champ de données.
- Données : les données transmises peuvent contenir jusqu'à 8 octets et sont émises au format « little endian » (le MSB est transmis en premier).
- CRC (Cyclic Redundancy Code) : 'somme' de contrôle correspondant à un nombre calculé à partir des données transmises. Il permet au récepteur qui calcule son propre CRC de vérifier si les données reçues sont conformes ou bien s'il y a eu des problèmes lors de la transmission.

- ACK (Acknowledge) : champ d'accusé de réception, composé de :
 - ✓ 1 bit ACK Slot au niveau logique 0.
 - ✓ 1 bit délimiteur d'ACK au niveau logique 1.
- EOF (End Of Frame) : symbole indiquant la fin de la trame. Il est composé de 7 bits au niveau logique 1 (pas de bit de Stuffing durant cette phase).

Exemple : décodage d'une trame CAN 2.0A émise à 250 kbits/s.

La durée d'un bit Δt correspond alors à : $\Delta t = \frac{1}{250 \cdot 10^3} = 25 \mu\text{s}$.



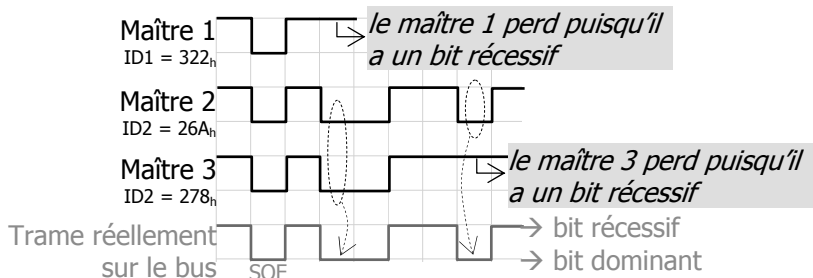
On valide que tous les 5 bits identiques, un bit de stuffing est inséré dans la trame.

4.5. Principe d'arbitrage

Étant donné que le bus CAN est de type multi-maître, il y a des risques de collision de trames dans le cas où plusieurs maîtres émettent simultanément.

Pour éviter ce problème, le bus CAN utilise un principe d'arbitrage "bit à bit" : un bit dominant est prioritaire sur un bit récessif. C'est-à-dire que le maître qui a la priorité sur le bus est celui qui émet la trame avec l'identifiant le plus petit.

Exemple : illustration du principe d'arbitrage lorsque 3 maîtres émettent simultanément des données avec des identifiants différents.

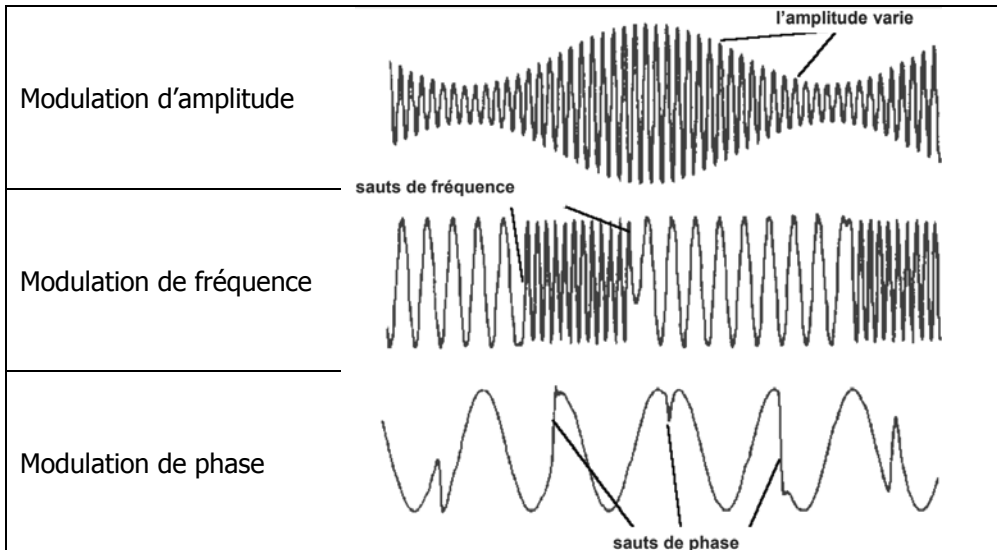


5. Modulations

En télécommunications, le signal transportant une information transite par un canal de transmission (entre l'émetteur et le récepteur). Le signal est rarement adapté à la transmission directe : hertzien, filaire ou optique.



La modulation correspond au processus permettant de transformer le signal original en une forme adaptée au canal de transmission. Par exemple, en faisant varier les paramètres d'amplitude ou de fréquence ou de phase d'une onde sinusoïdale appelée « porteuse » :

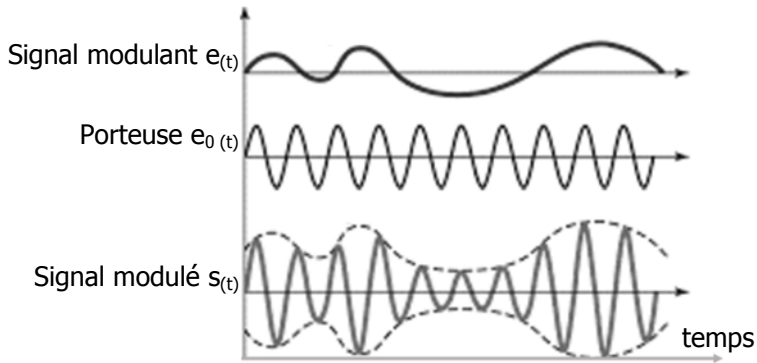


5.1. Modulation d'amplitude

5.1.1. Définition d'une modulation d'amplitude

La modulation d'amplitude (notée AM) consiste à faire varier l'amplitude d'une onde sinusoïdale porteuse (haute fréquence) $e_{0(t)} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$ par un signal modulant basse fréquence $e(t)$ (signal audio par exemple). L'expression mathématique du signal modulé $s(t)$, en sortie de la modulation d'amplitude, donne :

$$\bullet s(t) = E_0 \cdot (1 + k \cdot e(t)) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$



N.B. : on rappelle que la pulsation correspond à : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Caractéristiques du signal modulé :

- L'amplitude de la porteuse varie entre 2 limites appelées « enveloppe supérieure » et « enveloppe inférieure ».
- L'enveloppe supérieure suit l'allure du signal modulant basse fréquence $e(t)$.

Dans le cas où le signal modulant est une sinusoïde $e(t) = E \cdot \cos(\omega_e \cdot t)$, l'équation du signal modulé ❶ devient :

$$s_{(t)} = E_0 \cdot (1 + k \cdot E \cdot \cos(\omega_e \cdot t)) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$

$$\text{❷ } s_{(t)} = E_0 \cdot (1 + m \cdot \cos(\omega_e \cdot t)) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$

Le coefficient m est appelé « indice de modulation ».

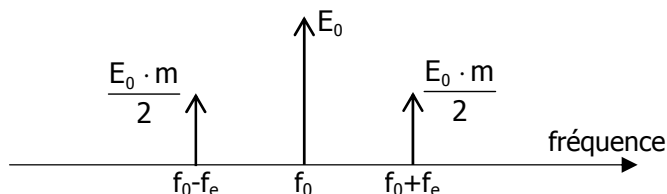
5.1.2. Spectre d'une modulation d'amplitude

Dans le cas où le signal modulant est une sinusoïde, on peut développer l'équation précédente ❷ :

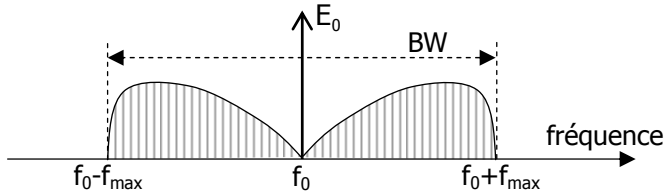
$$s_{(t)} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + E_0 \cdot m \cdot \cos(\omega_e \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$

$$\text{❸ } s_{(t)} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \frac{E_0 \cdot m}{2} \cdot \cos((\omega_0 + \omega_e) \cdot t) + \frac{E_0 \cdot m}{2} \cdot \cos((\omega_0 - \omega_e) \cdot t)$$

Le spectre est donc formé de 3 raies :



Dans le cas où le signal modulant $e(t)$ est un signal basse fréquence dont la fréquence peut varier de 0 à f_{\max} , on obtient le spectre suivant :



La bande de fréquences BW (Band Width) occupée par un signal modulé en amplitude vaut 2 fois la fréquence maximale du signal modulant basse fréquence $e_{(t)}$: $BW = 2 \cdot f_{\max}$

5.2. Modulation de fréquence

5.2.1. Définition d'une modulation de fréquence

La modulation de fréquence (FM) consiste à faire varier la fréquence de la porteuse $e_{0(t)}$ avec l'amplitude instantanée du signal modulant basse fréquence $e_{(t)}$. La fréquence de la porteuse dépend alors du temps : ❶ $f_{(t)} = f_0 + k \cdot e_{(t)}$

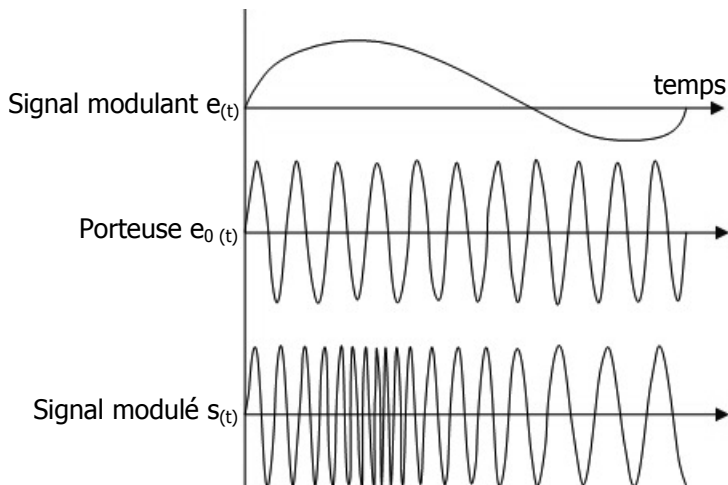
On obtient alors la pulsation instantanée : ❷ $\omega_{(t)} = 2 \cdot \pi \cdot f_{(t)} = \omega_0 + 2 \cdot \pi \cdot k \cdot e_{(t)}$

Or on obtient la phase en intégrant la pulsation :

$$\text{❸ } \theta_{(t)} = \int \omega_{(t)} \cdot dt = \omega_0 \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \int e_{(t)} \cdot dt$$

Le signal modulé en fréquence $s_{(t)}$ correspond à :

$$\text{❹ } s_{(t)} = S \cdot \cos(\theta_{(t)}) = S \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \int e_{(t)} \cdot dt\right)$$



L'amplitude E du signal modulant $e_{(t)}$ influe sur la fréquence du signal modulé $s_{(t)}$, ainsi d'après l'équation ❶, la fréquence du signal modulé varie entre :

$$f_{\min} = f_0 - k \cdot E_{\max} \quad \text{et} \quad f_{\max} = f_0 + k \cdot E_{\max}$$

La grandeur $k \cdot E_{\max}$ est appelée « excursion en fréquence » et notée :

$$\text{❷} \quad \Delta f = \pm k \cdot E_{\max}$$

5.2.2. Spectre d'une modulation de fréquence

Lorsque le signal modulant est sinusoïdal $e_{(t)} = E \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot t)$, de fréquence f_e , la fréquence instantanée ❶ s'écrit : $f_{(t)} = f_0 + k \cdot E \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot t)$.

L'excursion en fréquence ❷ vaut alors : $\Delta f = \pm k \cdot E$.

On définit l'indice de modulation : ❸ $m = \frac{\Delta f}{f_e}$

Le spectre d'une modulation FM est complexe et ne se calcule mathématiquement que dans le cas particulier où le signal modulant basse-fréquence $e_{(t)}$ est sinusoïdal. D'après l'équation ❹, on a :

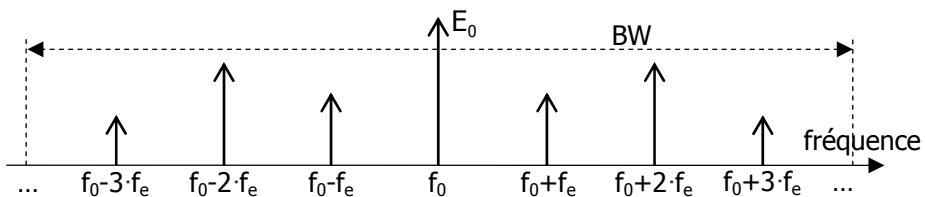
$$s_{(t)} = S \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \int E \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot t) \cdot dt\right)$$

$$\text{Soit :} \quad s_{(t)} = S \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot f_e} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot t)\right)$$

$$s_{(t)} = S \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \frac{k \cdot E}{f_e} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot t)\right)$$

$$\text{D'où :} \quad s_{(t)} = S \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot t))$$

Cette expression se développe à l'aide des fonctions de Bessel, afin de permettre de tracer le spectre d'une modulation de fréquence :



La porteuse (fréquence f_0) modulée par un signal basse-fréquence sinusoïdal (fréquence f_e) est donc caractérisée par :

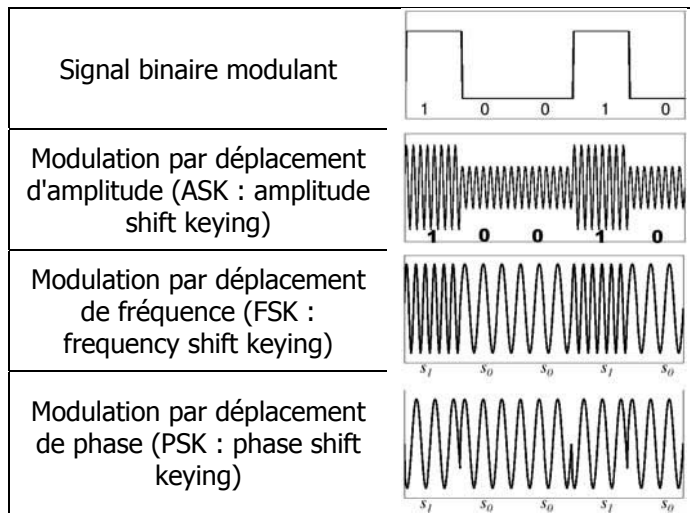
- un spectre centré sur f_0 et symétrique ;

- des raies espacées de la fréquence du signal modulé f_e dont l'amplitude est donnée par les fonctions de Bessel .

La bande occupée BW (Band Width) peut être lue sur le tracé du spectre ou calculée par la formule de Carson : $BW = 2 \cdot (\Delta f + f_e)$ avec $\Delta f = \pm k \cdot E$.

5.3. Modulation numérique

Dans ce cas, le signal modulant est un signal binaire avec un débit (en bit/s) très inférieur à la fréquence de la porteuse f_0 . Les modulations numériques les plus fréquentes sont :



Pour optimiser l'encombrement spectral du signal modulé, on utilise des modulations mixtes. Par exemple :

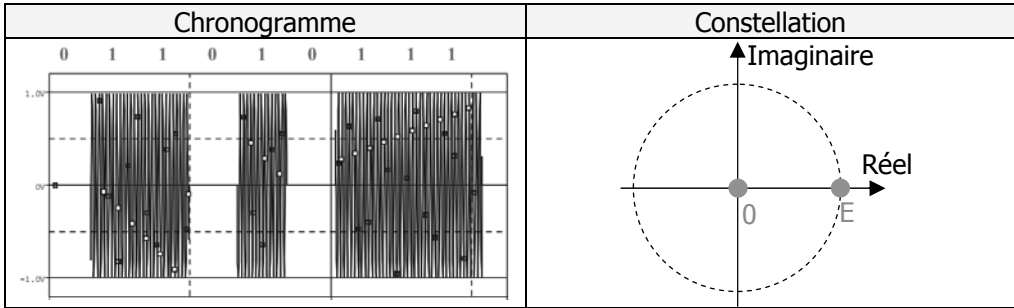
- Modulation amplitude et phase : QAM.
- Modulation multiporteuse : COFDM.

Le milieu de propagation est source de perturbations (atténuations, parasites, dispersions, échos...). Il y a alors dégradation de la porteuse modulée, et par conséquence l'apparition d'un certain taux d'erreurs de transmission. Le taux d'erreur binaire BER (bit error rate) est défini :

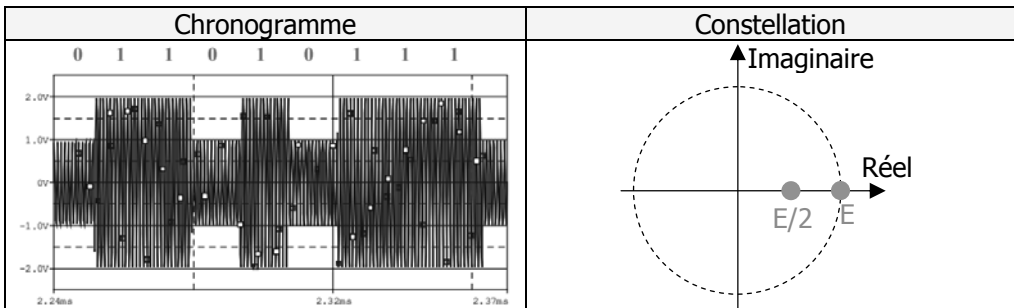
$$BER = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

5.3.1. Modulation ASK

- Modulation OOK (on off keying) : l'indice de modulation m est de 100 % (modulation tout-ou-rien). Un niveau logique 0 correspond à une tension nulle et un niveau logique 1 correspond à une porteuse de fréquence f_0 et d'amplitude E .

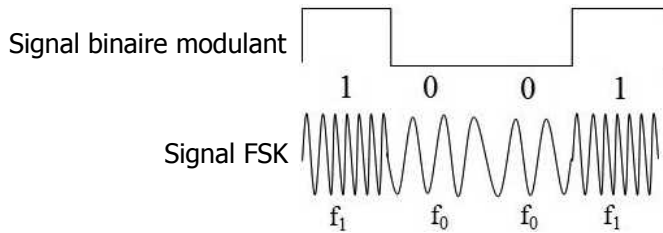


- Modulation à 2 états : un niveau logique 0 correspond à une porteuse de fréquence f_0 et d'amplitude $\frac{E}{2}$ et un niveau logique 1 correspond à une porteuse de fréquence f_0 et d'amplitude E .



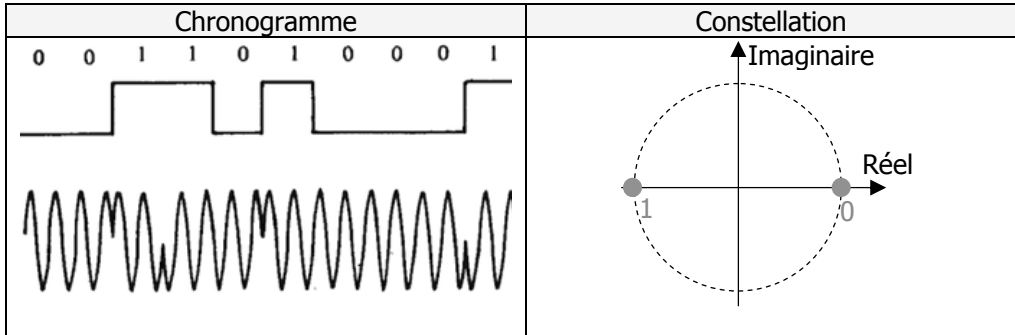
5.3.2. Modulation FSK

La porteuse est modulée en fréquence, c'est-à-dire que sa fréquence "saute" d'une valeur f_0 (pour un niveau logique 0) à f_1 (pour un niveau logique 1).



5.3.3. Modulation PSK

À partir de la porteuse $e_{0(t)} = E_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi)$, la phase φ "saute" d'une valeur 0 rad (pour un niveau logique 0) à π rad (pour un niveau logique 1).



5.3.4. Modulation QAM

Dans les modulations précédentes, on transmet les bits de donnée un par un. Pour augmenter le débit des transmissions, on a mis au point des modulations à M états ($M = 4, 8, 16\dots$).

Ces modulations reposent sur 2 principes simples :

- On regroupe les données binaires de débit D en symboles de M ;
- On utilise 2 porteuses en quadrature (déphasée de $\frac{\pi}{2}$ rad) modulées en phase et en amplitude notée I et Q.

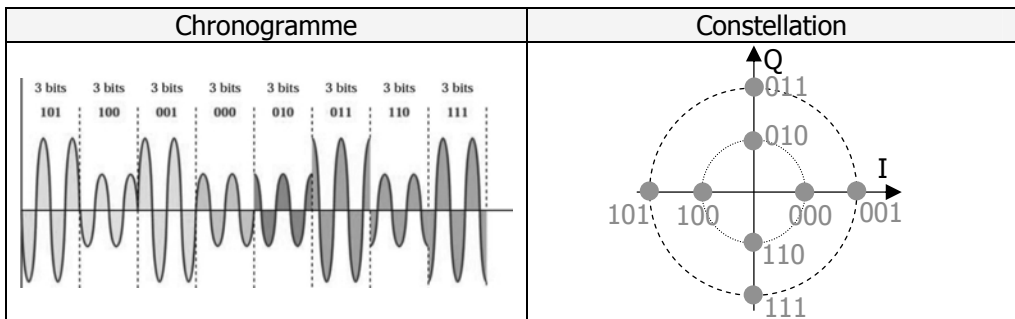
Exemple : soient les 3 octets à transmettre :

$$1011\ 0000_b - 1000\ 0100_b - 1111\ 0111_b$$

En supposant une modulation QAM avec $M = 3$ états, on regroupe les bits par trois et on obtient alors les symboles suivants à transmettre :

101	100	001	000	010	011	110	111
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

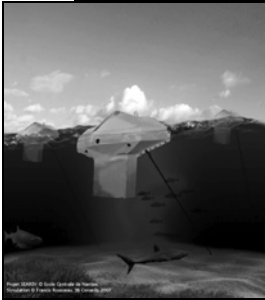
À chaque symbole de 3 bits, on va associer une amplitude et une phase à la porteuse. On a alors le chronogramme suivant :



➔ Exercices

Liaison série UART

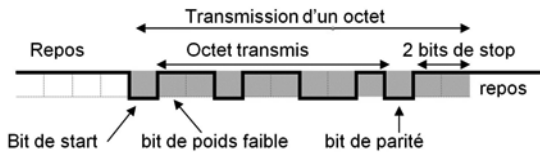
Exercice 11.1 – Ferme houlomotrice (Bac SI)



Une ferme houlomotrice sera constituée de plusieurs dizaines de modules SEAREV (Système Électrique Autonome de Récupération de l'Énergie des Vagues) ancrés par 30 à 50 m de fond, donc à 5 ou 10 km des côtes. L'électricité sera transportée à terre par un câble sous-marin.

Le SEAREV grandeur réelle (24 m sur 14 m, 1 000 tonnes dont 400 tonnes pour la roue pendulaire) devrait avoir une puissance électrique installée de 500 kW.

N_{alti} est un octet image de l'altitude qu'il s'agit de la transmettre à la base terrestre qui est éloignée de plusieurs kilomètres. Le protocole de transmission série est présenté :



Identifier et analyser le message transmis : entourer les bits utiles et déterminer l'octet envoyé en binaire et en décimal.

Bit de start →		Ligne au repos Pendant 0,75 s
	Octet N_{alti} en base 2 :	
	Octet N_{alti} en base 10 :	

Exercice 11.2 – Émission d'un caractère ASCII

- À partir de la table ASCII, donner le code hexadécimal correspondant à la lettre « A ». Convertir ce code en binaire.
- Compléter l'allure du chronogramme correspondant à l'émission de la lettre « A » avec un UART ayant les caractéristiques suivantes :

Paramètres	Valeurs
Vitesse de transmission (bit/s ou bps)	9600
Format des données (bit)	8
Bit de parité	Paire
Bits de stop	1



Exercice 11.3 – Tri'Ode (Bac SI)



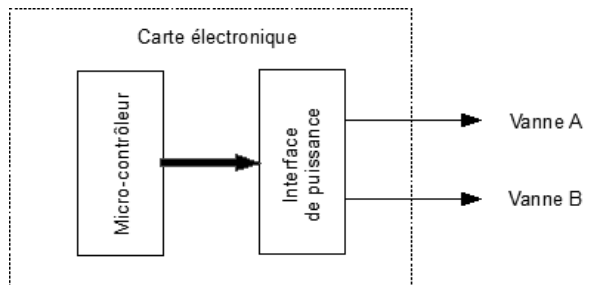
Le Tri'Ode est un véhicule électrique à trois roues. Il combine une architecture longitudinale issue des véhicules à deux roues et une architecture transversale de voiture au niveau du train avant. Ce type de disposition présente l'avantage d'être plus stable qu'un « deux roues » classique, d'avoir une meilleure tenue de route et une distance de freinage plus courte d'environ 20 %.

Le système de blocage de l'inclinaison est constitué d'un vérin hydraulique double effet, et de deux conduites unidirectionnelles comprenant chacune un clapet anti-retour et une électrovanne.

Les électrovannes autorisent, ou non, la circulation du fluide hydraulique entre les chambres avant et arrière du vérin permettant de le bloquer dans la position courante ou d'autoriser uniquement la rentrée ou la sortie de la tige.

L'ensemble fonctionne en circuit fermé avec un accumulateur (non représenté) permettant de compenser la différence de volume entre la chambre avant et arrière du vérin.

Les électrovannes sont commandées par une carte électronique intégrant un microcontrôleur :



Fonctionnement :

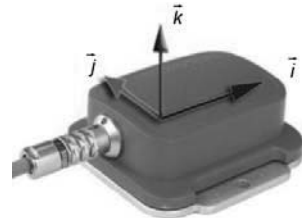
- à l'arrêt les deux électrovannes sont inactives, interdisant la circulation du fluide et donc le basculement du Tri'ode ;
- à faible vitesse (inférieure à $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), la commande des électrovannes permet de bloquer l'angle d'inclinaison à une valeur maximale de 5° ;
- en cas de détection de chute imminente, l'accélération détectée par la centrale d'inertie doit provoquer le blocage immédiat du vérin correspondant au sens du mouvement détecté ;
- à haute vitesse, si aucun risque de chute n'est détecté, la tige du vérin est libre de rentrer ou de sortir.

Dans son cahier des charges, le constructeur annonce un certain nombre de performances :

Fonction à réaliser	Critères
Assurer le confort du conducteur à l'arrêt	L'effort de maintien exercé par le conducteur à l'arrêt ne doit pas excéder 100 N
Alimenter le système	Autonomie : 45 km
Prévenir le conducteur de l'imminence de la décharge de la batterie	Réserve de 6 km parcourables après allumage du voyant d'avertissement
Assurer la sécurité du conducteur à vitesse élevée	Blocage de l'architecture transversale en moins de 300 ms en cas de risque de chute

La centrale inertielle XSENS MTI-10 fournit les informations de position à l'aide de 9 capteurs :

- 3 accéléromètres (accélération linéaire) ;
- 3 gyromètres (vitesse angulaire) ;
- 3 magnétomètres (intensité du champ magnétique terrestre).



La structure de la trame composant le message fourni par la centrale d'inertie est la suivante :

Début de trame (1 octet)	Identification (3 octets)	Data (défini ci-dessous)	CS (1 octet)
-----------------------------	------------------------------	-----------------------------	-----------------

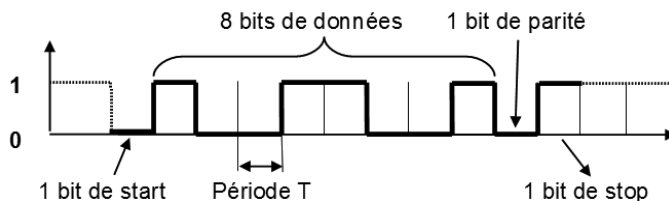
Format des données à transmettre (Data), en 9 champs :

ACC _i	ACC _j	ACC _k	GYR _i	GYR _j	GYR _k	MAG _i	MAG _j	MAG _k
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Chacun de ces 9 champs transmis est codé sur 4 octets.

- N.B. :**
- ACC... : valeurs données par les accéléromètres
 - GYR... : valeurs données par les gyroscopes
 - MAG... : valeurs données par les magnétomètres

Les informations fournies par la centrale inertielle sont transmises au microcontrôleur par une liaison RS 232 dont le format général de l'échange d'un octet est rappelé :

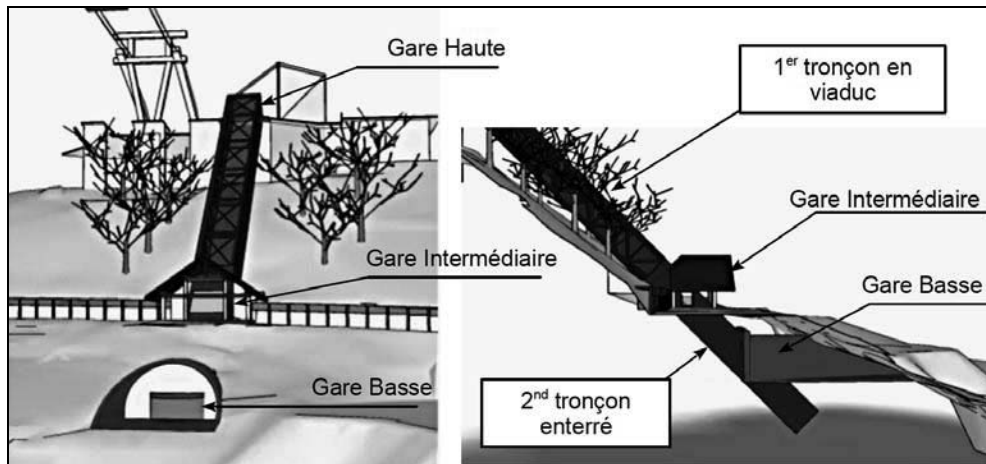


La vitesse de transmission est de 19 200 bits par seconde.

1. Déterminer le temps nécessaire pour transmettre une trame complète.
2. Sachant que le temps de réaction des électrovannes est de 45 ms et que celui des autres composants est négligeable, vérifier que le temps de réaction du système correspond à celui du cahier des charges.

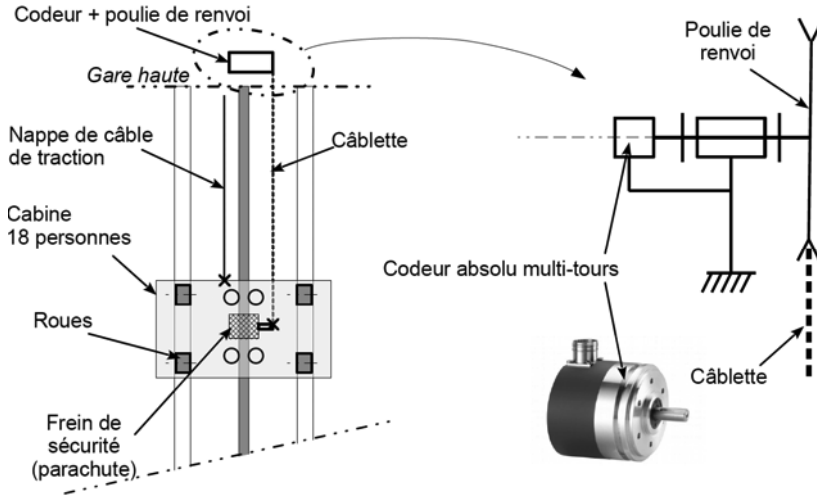
Exercice 11.4 – Ascenseur de Vaujany (Bac SI 2017)

La station de Vaujany est située dans le massif de l'Oisans. Le village est implanté sur un coteau en pente. Pour relier les différentes infrastructures du village-station, deux ascenseurs y ont été implantés en complément des différents escalateurs :



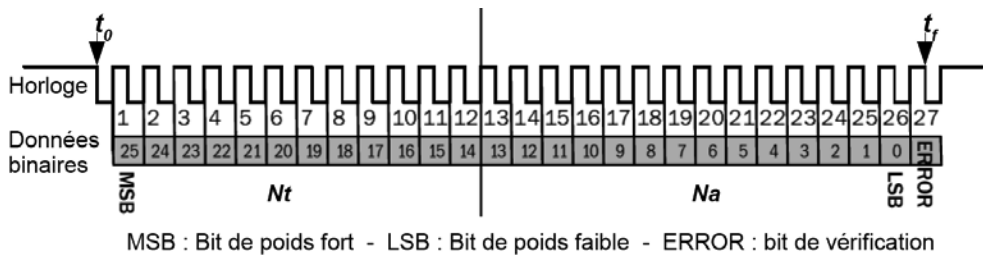
Le système dispose d'une partie aérienne en viaduc entre la gare haute et la gare intermédiaire et d'une partie dans une gaine enterrée entre la gare intermédiaire et la gare basse.

Pour piloter le mouvement, il est nécessaire de mesurer la position de la cabine. La solution constructive choisie est un codeur absolu multi-tours. Un câble, nommé « câblette », est d'une part fixé d'un côté à la cabine, et d'autre part à un système de mise en tension. Une poulie assure le renvoi et le guidage de la câblette. Le codeur est implanté sur l'axe de cette poulie. Lorsque la cabine se déplace, la câblette entraîne donc la rotation de la poulie et du codeur.



Données :

- le diamètre primitif de la poulie de renvoi de la câblette est $D_{pr} = 20 \text{ cm}$;
- la course totale de la cabine est de 65 m ;
- la résolution imposée pour la position de la cabine est de 1 cm ;
- dans l'automatisme, tous les calculs de position se font en centimètres ;
- le codeur absolu multi-tours renvoie un nombre N_a , image de la position angulaire de son axe, sur un format de 14 bits. Le nombre N_t de tours effectués par son axe est exprimé sur 12 bits ;
- la communication entre l'automatisme de commande et le codeur est conforme au protocole SSI (interface série synchrone) :



1. Calculer en centimètres la distance parcourue par la cabine lorsque le codeur tourne d'un tour. Vérifier que la résolution du codeur est très largement suffisante.
2. Calculer le nombre de tours effectués par l'axe du codeur lors d'un trajet complet de la cabine (65 m) ; le calcul sera fait avec une précision à 10^{-2} près. En supposant, pour simplifier, que le codeur absolu est à 0 lorsque la cabine est en gare de départ, exprimer en binaire les valeurs de N_t et N_a fournies par le codeur lorsque la cabine atteint la gare d'arrivée. Vérifier que l'étendue de mesure du codeur est suffisante.

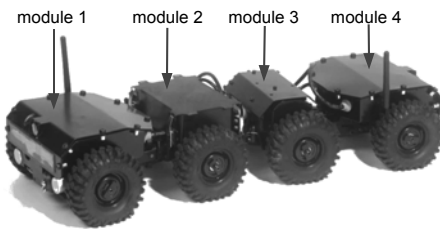
Afin de valider entièrement le choix du capteur de position, il est nécessaire de vérifier la fréquence de rafraîchissement de l'information de la position de la cabine.

Données et hypothèses :

- la vitesse de transmission de la position est $f_T = 400$ kbps (kilobits par seconde) ;
- à l'instant $t = t_f$, l'information de position est considérée reçue par l'automatisme ;
- un temps de pause minimal $t_p = 21 \mu\text{s}$ est imposé entre la fin d'une transmission de données et le départ d'une nouvelle transmission.

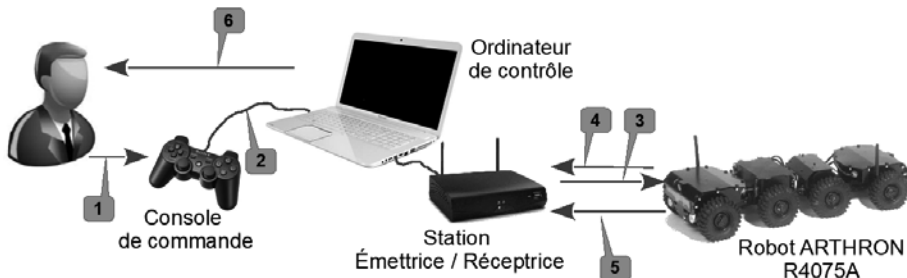
3. Calculer la durée T_2 minimale écoulée entre deux réceptions d'informations de position par l'automatisme. En déduire la distance D_{T_2} parcourue par la cabine pendant ce temps, à la vitesse nominale $V_{\text{cab/rail}} = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vérifier que la rapidité de transmission de l'information de position est compatible avec la résolution imposée.

Exercice 11.5 – Robot de reconnaissance tout terrain (Bac SI 2016)



La maîtrise et la qualité de l'air dans un bâtiment nécessite d'avoir un réseau aéraulique (réseau de ventilation, traitement de l'air, climatisation,...) en bon état de fonctionnement. Ce robot doit être capable d'inspecter des canalisations. Ces capacités de franchissement doivent permettre des opérations de reconnaissance et de surveillance.

Pour anticiper le pilotage de l'engin, l'utilisateur est informé, du niveau de charge de la batterie sur l'écran de l'ordinateur de contrôle par une alarme visuelle et sonore.



Description du protocole de communication entre la station émettrice/réceptrice et le robot :

- **Format de la trame** : Les trames échangées entre la station émettrice et le robot sont composées de 5 octets.

STX	CMD	DATA_0	DATA_1	ETX
\$02				\$03

STX : début de la trame (Start transmission) ;

ETX : fin de la trame (End transmission) ;

CMD, DATA_0, DATA_1, dépendent de la demande de l'utilisateur.

- **Les ordres de mouvements** : Dans le cas où l'utilisateur veut faire bouger le robot, l'octet CMD est égal à \$02. Les octets DATA_0, DATA_1, dépendent de la nature du mouvement souhaité :

- L'octet DATA_0

DATA_0							
RAZ	Vitesse		Consigne de mouvement				
B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0

RAZ : actif à l'état haut

Consigne mouvement	B4	B3	B2	B1	B0
Roue libre	0	0	0	0	0
Avance	0	0	0	0	1
Recul	0	0	0	1	0
Frein moteur	0	0	0	1	1
Cabrage	0	0	1	0	0

Vitesse	B6	B5
0 %	0	0
33 %	0	1
66 %	1	0
100 %	1	1

- L'octet DATA_1

DATA_1								
Boost PTZ	LED	F	Cmd PTZ			Commutation caméras		
B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0	
						0	0	Rien faire
						0	1	Caméra suivante
						1	0	Caméra précédente
						1	1	Commutation automatique

Boost PTZ (Pan / Tilt / Zoom) : actif à l'état haut, permet d'activer le mode Boost ;

LED : actif à l'état haut, permet d'activer l'éclairage à LEDs ;

F : Cycle de franchissement, actif à l'état haut, permet d'actionner un cycle de franchissement automatique.

- Les demandes d'informations : La valeur CMD varie selon la nature de la demande. Les valeurs DATA_0 (octet de poids faible) et DATA_1 (octet de poids fort) émises par défaut sont \$00 :

Nature de la demande	Valeur CMD	Trame émise en retour par le robot
Lecture codeur gauche	\$05	02 05 (valeur capteur) 03
Lecture codeur droit	\$06	02 06 (valeur capteur) 03
Lecture codeur capteur avance	\$07	02 07 (valeur capteur) 03
Lecture tours roue moteur	\$08	02 08 (valeur capteur) 03
Lecture paramètres batterie	\$12	02 12 (valeur batterie) 03
Lecture télémètre	\$0C	02 0C (valeur télémètre) 03

En utilisant le protocole de communication du robot présenté ci-dessus, déterminer quelle devra être la trame émise par la station émettrice pour connaître l'état de charge de la batterie ainsi que la trame émise en retour par le robot lorsque la batterie aura atteint une charge de 80 %.

N.B. :

- La tension nominale de la batterie est de $U_{bat} = 15 V$.
- La fonction de transfert du convertisseur analogique-numérique de la mesure de la tension aux bornes de la batterie est : $N_{(\text{en décimal})} = \frac{2^{10} - 1}{5} \times 0,3 \times U_{bat}$

Liaison I²C

Exercice 11.6 – Sèche-linge

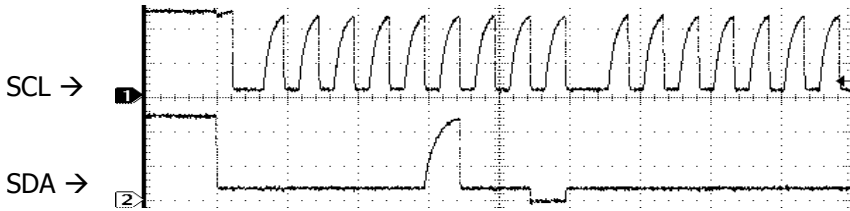
Le système de gestion du cycle de séchage est réparti sur 2 cartes électroniques :

- une carte « affichage » (A) placée sur le dessus du sèche-linge, comportant les voyants et les boutons nécessaires à l'utilisateur ;
- une carte « puissance » (P) permettant la commande des différents actionneurs et capteurs : moteur, résistance chauffante, capteurs d'humidité et de température, ...

La communication entre les 2 cartes se fait via une liaison I²C pour laquelle la carte « affichage » est le maître. Le protocole de communication se décompose en 5 octets :

N° octet	1 ^{er} octet	2 ^e octet	3 ^e octet	4 ^e octet	5 ^e octet
Rôle	Adresse de la carte « puissance »	État du sèche-linge	Variable « cycle »	État présent du sèche-linge	Durée restante de séchage
Sens	A → P	A → P	A → P	P → A	P → A

1. Avec un oscilloscope, on a capturé (page suivante) le début d'une trame d'échange entre les cartes « affichage » et « puissance ». Identifier les éléments suivants :
 - la condition de start ;
 - l'adresse de l'esclave (carte « puissance ») ;
 - l'état du bit R/W (Read/Write).



N.B. : les signaux ne sont pas rectangulaires, car il a été ajouté des capacités sur les lignes SDA et SCL afin de réduire les perturbations électromagnétiques.

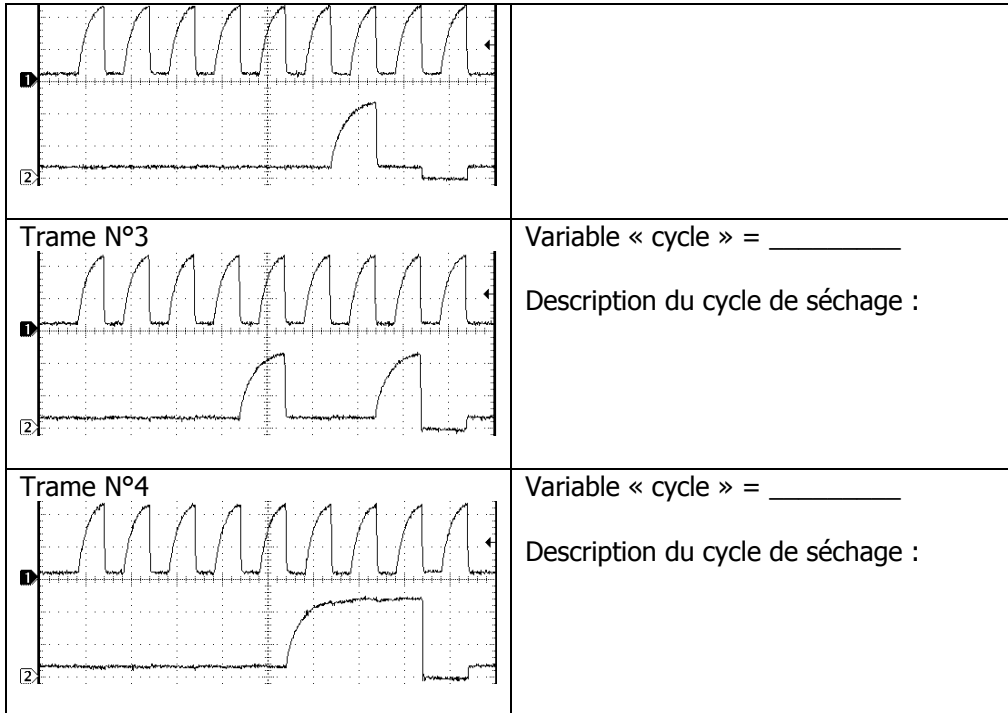
2. Lorsque l'utilisateur appuie sur le bouton « pause », la donnée 80_h est transmise à la carte « puissance ». Tracer l'allure des chronogrammes des signaux SDA et SCL correspondant à l'envoi de cette donnée.

Pour le 3^e octet, on donne le codage de la variable « cycle » :

b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
Départ différé				Séchage et entretien : 00 : prêt à ranger 01 : prêt à repasser 10 : entretien à sec		Choix de textiles : 00 : tous textiles 01 : linge de maison 10 : label soie 11 : aéré laine	

3. Pour les 4 trames ci-dessous, identifier la valeur de la variable « cycle » et en déduire le type de cycle de séchage choisi par l'utilisateur (1 = SCL, 2 = SDA) :

<p>Trame N°1</p>	<p>Variable « cycle » = _____</p> <p>Description du cycle de séchage :</p>
<p>Trame N°2</p>	<p>Variable « cycle » = _____</p> <p>Description du cycle de séchage :</p>



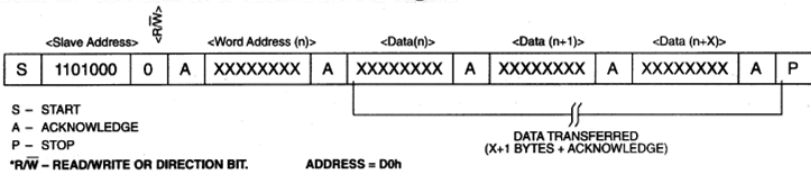
Exercice 11.7 – Horloge temps réel

Une horloge temps réel (RTC) est un circuit intégré permettant de garder la notion du temps (seconde, minute, heure, jour, année) dans les systèmes électroniques. L’horloge temps réel est connectée à une batterie ce qui permet de continuer de mesurer le temps même si l’appareil est éteint.

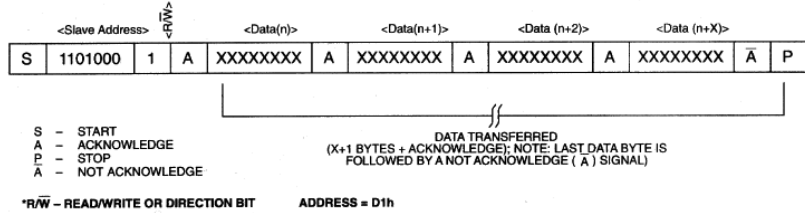
Dans cet exercice, on se propose d’analyser la communication avec le composant DS1307 :

<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>00H</td><td>SECONDS</td></tr> <tr><td></td><td>MINUTES</td></tr> <tr><td></td><td>HOURS</td></tr> <tr><td></td><td>DAY</td></tr> <tr><td></td><td>DATE</td></tr> <tr><td></td><td>MONTH</td></tr> <tr><td></td><td>YEAR</td></tr> <tr><td>07H</td><td>CONTROL</td></tr> <tr><td>08H</td><td>RAM</td></tr> <tr><td></td><td>56 x 8</td></tr> <tr><td>3FH</td><td></td></tr> </table>	00H	SECONDS		MINUTES		HOURS		DAY		DATE		MONTH		YEAR	07H	CONTROL	08H	RAM		56 x 8	3FH		<p>Procédure de lecture d’un octet :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ envoyer un ordre d’écriture afin de positionner le registre à l’adresse de début de la mémoire ; ▪ envoyer un ordre de lecture pour lire le 1^{er} octet puis envoyer un ACK pour lire le suivant ou un NACK pour stopper la lecture. <p>Exemple : lecture de la date (à l’adresse mémoire \$04) :</p> <p>Start, \$D0, ACK, \$04, ACK</p> <p>Restart, \$D1, ACK, \$Date, NACK, Stop</p> <p>(info émise par le maître en noire et réponse de l’esclave en gris).</p>
00H	SECONDS																						
	MINUTES																						
	HOURS																						
	DAY																						
	DATE																						
	MONTH																						
	YEAR																						
07H	CONTROL																						
08H	RAM																						
	56 x 8																						
3FH																							

DATA WRITE - SLAVE RECEIVER MODE Figure 6



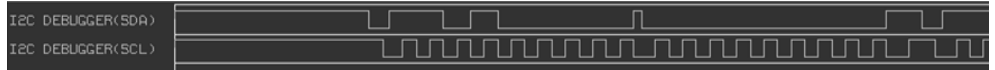
DATA READ - SLAVE TRANSMITTER MODE Figure 7



1. Dans la carte mémoire du DS1307, à quelle adresse trouve-t-on le registre contenant le nombre des secondes ?
2. À partir de la documentation technique du DS1307, donner la valeur de l'octet « Address » permettant de :

Écrire une donnée dans le DS1307	Lire une donnée à partir du DS1307
Adresse = _____	Adresse = _____

3. Identifier sur les chronogrammes (ci-dessous), le début de la trame émise par le microcontrôleur : Start, \$D0, \$00.



Avec un debugger I²C, on relève la trame suivante :

S D0 A 00 A Sr D1 A 32 A 46 A 14 N P

Ce qui correspond à l'affichage de l'heure :

14 : 46 : 32

4. Décoder la trame I²C afin de justifier la valeur de l'heure affichée.

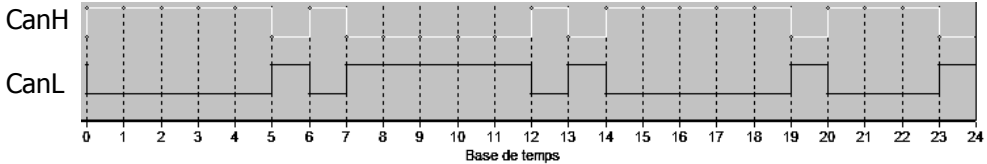
N.B. : on donne la syntaxe et le format des données utilisées par le debugger I²C :

Instruction ou signification	Syntaxe
Envoi d'une condition de Start	S
Envoi d'une condition de Restart	Sr
Envoi d'une condition de Stop	P
Envoi d'un acquittement (Acknowledge)	A
Envoi d'un non acquittement (Non Acknowledge)	N
Formatage en hexadécimal (exemple 0x1A, \$1A, 1Ah)	0x ou \$ ou h
Formatage en binaire (exemple %10100011, 10100011b)	% ou b
Formatage en décimal (exemple 44d)	d

Bus CAN

Exercice 11.8 – Décodage d’une trame

On donne une trame CAN 2.0A :



N.B. :

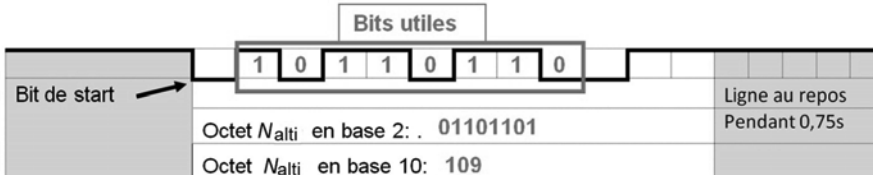
- 1 bit correspond à un carreau de la base de temps.
- Le bit SOH est émis à l’instant $t = 0$.

1. Identifier les bits de stuffing.
2. Déterminer la valeur de l’identificateur (11 bits du champ « arbitrage »).

→ Solutions

Exercice 11.1 – Ferme houlomotrice

Entourer les bits utiles et déterminer l’octet envoyé en binaire et en décimal :

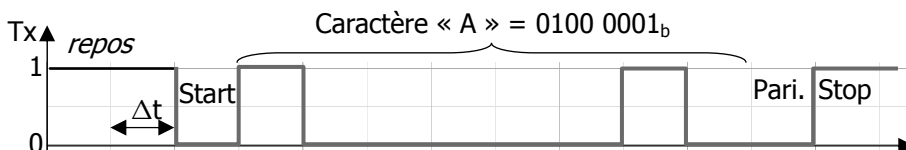


Exercice 11.2 – Émission d’un caractère ASCII

1. À partir de la table ASCII, le caractère « A » correspond au code hexadécimal 41_{h} , soit en binaire $0100\ 0001_{\text{b}}$.

2. L’allure du chronogramme correspondant à l’émission de la lettre « A » :

La durée d’un bit correspond à : $\Delta t = \frac{1}{\text{vitesse de transmission}} = \frac{1}{9600} = 104\ \mu\text{s}$



Exercice 11.3 – Tri'Ode (Bac SI)

1. Une trame est composée de N_{octets} :

$N_{\text{octets}} = 1$ octet (début trame) + 3 octets (identification) + 9×4 octets (champs Data) + 1 octet (CS)

$N_{\text{octets}} = 41$ octets

Or d'après la trame RS232, 1 octet comporte 11 bits (1 start + 8 données + 1 parité + 1 stop) ainsi le nombre de bits à transmettre vaut :

$$N_{\text{bits}} = 41 \text{ octets} \times 11 \text{ bits/octet} = 451 \text{ bits}$$

Et la vitesse de transmission est de 19200 bits/s, donc la durée d'un bit vaut :

$$\Delta t = \frac{1}{19200} = 52 \mu\text{s}$$

Le temps nécessaire pour transmettre une trame est donc :

$$T_{\text{trame}} = 451 \text{ bits} \times \Delta t = 23,5 \text{ ms}$$

2. Le temps de réaction du système est de : $T_{\text{trame}} + 45 \text{ ms} = 68,5 \text{ ms}$

Il est inférieur au temps de blocage spécifié dans le cahier des charges, qui est de 300ms ; la réactivité du système de blocage est suffisante pour assurer la sécurité du pilote.

Exercice 11.4 – Ascenseur de Vaujany

1. Un tour du codeur correspond à un tour de la poulie de renvoi ; donc le déplacement de la cabine pour un tour de poulie correspond au périmètre de la poulie :

$$\text{Distance cabine} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{pr}}}{2} = \pi \cdot D_{\text{pr}} \text{ cm} = 62,8 \text{ cm}$$

La position angulaire du codeur absolu est codée sur 14 bits pour 1 tour. Donc la précision du système de mesure de la position de la cabine est de :

$$\text{précision de la position cabine} = \frac{62,8}{2^{14} - 1} = 3,8 \text{ mm}$$

On valide alors que la précision obtenue est bien inférieure à celle désirée de 1 cm.

2. Nombre de tours du codeur correspondant au trajet complet de la cabine (65 m = 6500 cm) :

$$\text{Nombre de tours du codeur} = \frac{6500}{\pi \cdot D_{\text{pr}}} = 103,45 \text{ tours}$$

Ainsi en sortie du codeur absolu, on a $N_a = 103$ tours et $N_t = 0,45$ tour. Conversion de ces 2 valeurs en binaires :

- N_a est codé sur 12 bits : $N_a = 103 = 0000 \ 0110 \ 0111_b$
- N_t est codé sur 14 bits :

$$N_t = 0,45 \text{ tour} = 0,45 \times (2^{14} - 1) = 7372 = 01 \ 1100 \ 1100 \ 1100_b$$

Pour le trajet complet de la cabine, le nombre de tours du codeur $N_a = 103$ utilise que 7 bits sur les 12 bits du codeur. Donc l'étendue de mesure du codeur est suffisante.

3.

- Durée écoulée entre 2 réceptions de trames de position de la cabine :

$$T_2 = (t_r - t_0) + t_p$$

Or $(t_r - t_0)$ correspond à la durée de la transmission des 26 bits des nombres N_a et $N_t + 1$ bit ERROR, à la vitesse de 400 kbps.

$$\text{Donc : } T_2 = 27 \text{ bits} \times \frac{1}{400 \cdot 10^3 \text{ bps}} + 21 \cdot 10^{-6} = 88,5 \mu\text{s}$$

- Distance parcourue par la cabine entre 2 réceptions de trames :

$$D_{T2} = V_{\text{cab/rail}} \cdot T_2 = 2 \times 88,5 \cdot 10^{-6} = 177 \mu\text{m}$$

Le cahier des charges, impose une précision de mesure de la position de la cabine de 1 cm, ainsi on valide que le déplacement de la cabine entre 2 réceptions de trame du capteur est bien très inférieur à 1 cm. Donc la rapidité de transmission de l'information est bien compatible avec le cahier des charges.

Exercice 11.5 – Robot de reconnaissance tout terrain

Trame émise : 02 12 00 00 03 (trame de lecture des paramètres de la batterie)

Format de la trame de retour : 02 12 XX YY 03 (XX = DATA_0 et YY = DATA_1)

Lorsque la batterie a atteint 80 % de sa charge : $U_{\text{bat } 80\%} = 80 \% \times 15 \text{ V} = 14,4 \text{ V}$

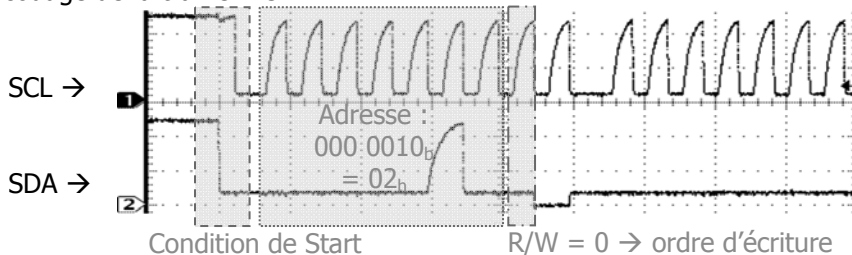
Ainsi la conversion numérique vaut : $N_{80\%} = \frac{2^{10} - 1}{5} \times 0,3 \times 14,4 = 884 = 0374_{\text{h}}$

On a alors : DATA_0 = \$74 et DATA_1 = \$03

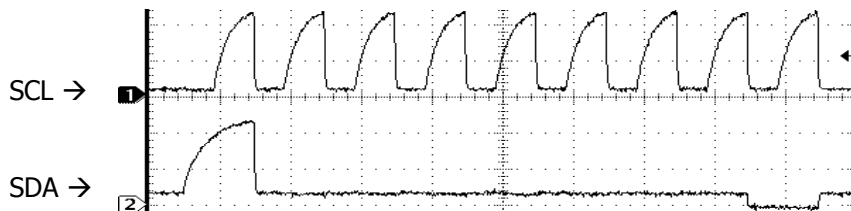
Trame de retour : 02 12 74 03 03

Exercice 11.6 – Sèche-linge

1. Décodage de la trame I²C :



2. Allure des chronogrammes des signaux SDA et SCL correspondant à l'envoi de la donnée 80_h (bouton « pause ») :



3. Pour les 4 trames ci-dessous, identifier la valeur de la variable « cycle » et en déduire le type de cycle de séchage choisi par l'utilisateur (1 = SCL, 2 = SDA) :

<p>Trame N°1 :</p>	<p>Variable « cycle » = 00_h</p> <p>Description du cycle de séchage :</p> <p>Tous textiles – prêt à ranger</p>
<p>Trame N°2 :</p>	<p>Variable « cycle » = 02_h</p> <p>Description du cycle de séchage :</p> <p>Label soie – prêt à ranger</p>
<p>Trame N°3 :</p>	<p>Variable « cycle » = 09_h</p> <p>Description du cycle de séchage :</p> <p>Linge de maison – entretien à sec</p>
<p>Trame N°4 :</p>	<p>Variable « cycle » = 07_h</p> <p>Description du cycle de séchage :</p> <p>Aéré laine – prêt à repasser</p>

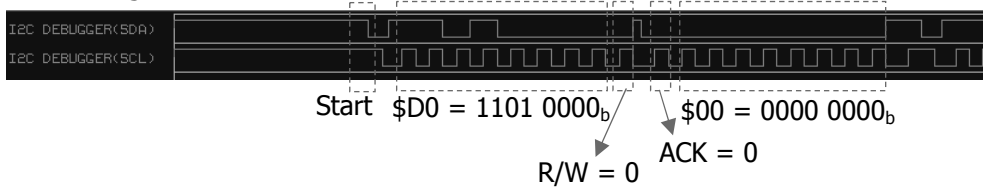
Exercice 11.7 – Horloge temps réel

1. Dans la RAM de la RTC, les secondes se trouvent à l'adresse \$00.

2.

Écrire une donnée dans le DS1307	Lire une donnée à partir du DS1307
Adresse = \$D0	Adresse = \$D1

3. Décodage de la trame I²C :



4. Décoder la trame I²C afin de justifier la valeur de l'heure affichée :

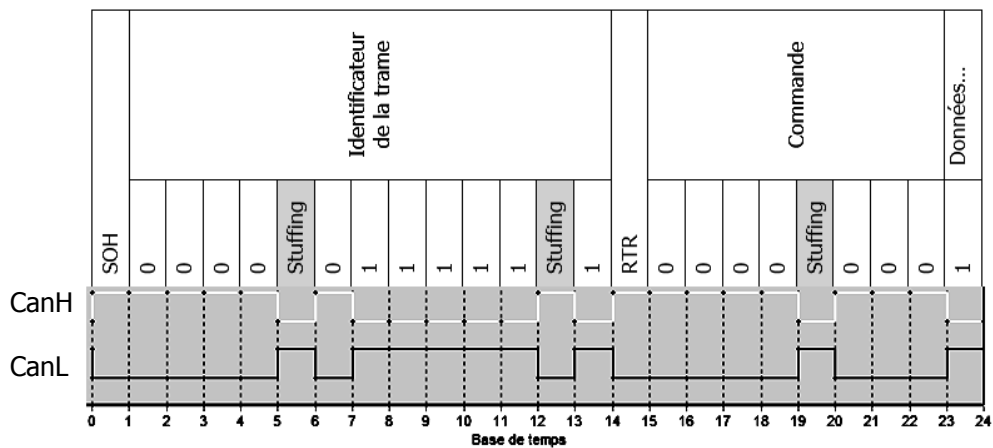
Trame	Description
S	Condition de start
D0 _h	Adresse de l'esclave en écriture
A	Acquittement par l'esclave
00	Valeur du registre d'adresse
A	Acquittement par l'esclave
Sr	Condition de restart
D1 _h	Adresse de l'esclave en lecture
A	Acquittement par l'esclave
32	Valeur décimale de l'adresse 00 _h (seconde)
A	Acquittement par le maître
46	Valeur décimale de l'adresse 01 _h (minute)
A	Acquittement par le maître
14	Valeur décimale de l'adresse 02 _h (heure)
N	Non acquittement par le maître
P	Condition de stop

On valide alors l'affichage de l'heure :

14 : 46 : 32

Exercice 11.8 – Décodage d’une trame

On donne une trame CAN 2.0A :



L'identificateur de la trame est alors égal à : $000\ 0011\ 1111_b = 03F_n$.

Chapitre 12

Réseaux

1. Définitions

Un réseau informatique est un ensemble d'équipements reliés entre eux pour échanger des informations. Il peut se définir suivant 2 axes :

- l'architecture (physique ou logique) définissant la façon dont les équipements sont interconnectés ;
- les protocoles (règles de communication) permettant l'échange des données.


Les réseaux se répartissent en 2 grandes familles :

Type de réseau	Étendue du réseau	Exemple
LAN Local Area Network	Réseau local : confiné à un lieu particulier.	Réseau interne du lycée
WAN Wide Area Network	Réseau étendu : limité à un pays, un continent, voire la planète...	Internet

2. Constitution physique d'un réseau

2.1. Topologie

Il existe 4 grands types de topologie (architecture) réseau :

Anneau (token ring) 	L'accès des stations au réseau est géré par un « jeton » passant de station en station. Ainsi une station ne peut émettre sur le réseau que si elle dispose du « jeton » (si elle n'a rien à émettre, elle passe le « jeton » à la station suivante). L'avantage de cette topologie est de garantir la vitesse de transmission des données, puisqu'il n'y a aucun problème de collision de trames ou de répartition d'information à gérer. L'inconvénient majeur réside dans le fait que la rupture d'une partie du réseau provoque un blocage total de celui-ci.
--	---

Bus



Dans ce type de réseau, toutes les stations sont connectées à un seul média. Pour éviter la perte de données, il ne doit y avoir qu'une seule station en train d'émettre à un instant donné sinon il y a un risque de collision de trames.

Pour pallier ce risque, on utilise la méthode « maître-esclave » ; une station dite maître invite les stations esclaves à émettre chacune leur tour. Par défaut, une station esclave ne peut pas émettre de données sur le réseau, si elle n'y a pas été invitée par la station maître.

Etoile



Dans ce type de réseau, toutes les stations sont reliées à un concentrateur central. De plus, toutes les stations sont « maîtres ».

Pour éviter les risques de collision de données, on utilise la méthode CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection) qui consiste à écouter le réseau pour savoir s'il est disponible avant d'émettre une donnée ; puis à écouter ce qu'émet la station et détecter une erreur si la donnée présente sur le média ne correspond pas à celle émise.

Dans le cas où le concentrateur tombe en panne, tout le réseau est hors service. Par contre, si un câble ou une station tombe en panne, cela n'affecte pas le reste du réseau.

Maillé



Dans cette architecture, toutes les stations sont reliées entre-elles ; cela engendre un coût élevé au niveau du nombre de cartes réseaux par station et en longueur de câbles.




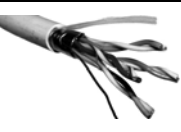


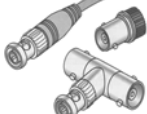

L'accès au média est le même que dans un réseau en étoile.

L'avantage d'un réseau maillé est que la rupture d'une liaison ou la défaillance d'une station n'affecte pas le reste du réseau ; puisqu'il suffit de changer de route.

2.2. Média

2.2.1. Connectiques et câbles

Quelques exemples d'éléments de connexion :

Câbles ou médias de communication				
Fibre optique	Coaxial	U/UTP	Paire torsadée F/UTP	U/FTP
				
⇕	⇕		⇕	
GBIC	BNC		RJ45	
				
Connectiques associées à chaque type de médias				

La dénomination des paires torsadées fait référence au blindage utilisé pour limiter les interférences électromagnétiques entre les différentes paires et le câble avec son environnement extérieur :

<i>type de blindage du câble</i>	/	<i>type de blindage des paires torsadées</i>	TP (Twisted Pair)
--------------------------------------	---	--	-----------------------------

Les lettres utilisées pour identifier le type de blindage sont :

- **U** (unshielded) : aucun blindage ;
- **F** (foil shielding) : blindage avec une feuille d'aluminium ;
- **S** (braided shielding) : blindage avec une tresse.

2.2.2. Carte réseau

La carte réseau assure 2 fonctions :

- Elle sert d'interface physique entre l'ordinateur et le câble du réseau. Elle a pour fonction de préparer, d'envoyer et de contrôler le flux de données sur le réseau.
- De plus, chaque carte dispose d'une adresse unique, appelée adresse MAC, qui permet de l'identifier parmi toutes les autres cartes réseau. Cette adresse lui est attribuée par son fabricant et est inscrite sur la puce de la carte.

3. Adresse MAC

L'adresse MAC (Media Access Control) correspond à l'adresse physique de la carte réseau. Elle est constituée de 48 bits (6 octets) et est généralement représentée sous la forme hexadécimale en séparant les octets par un double point ou un tiret.

Exemple : *5E:FF:56:A2:AF:15*

Les 3 premiers octets correspondent au code du fabricant de la carte réseau et les 3 derniers octets correspondent au numéro (identifiant) de la carte réseau.

4. Adresse IPv4

4.1. Constitution d'une adresse IP

L'adresse IP (version 4) est codée sur 32 bits (4 octets) et est constituée de 3 blocs :

Classe du réseau	Numéro du réseau NetId	Numéro de la station HostId
-------------------------	-------------------------------	------------------------------------

Une adresse IP s'exprime sous la forme dite « décimale pointée » ; les 32 bits sont découpés en 4 blocs de 8 bits qui sont traduits en décimal.

Exemple : *Binaire : 1100 0000 . 1010 1000 . 1100 1000 . 0000 0001*
 Décimal pointé : 192 . 168 . 200 . 1

4.2. Les classes d'adresses

Les 3 principales classes des adresses IP sont :

classe	Adresse IP (en binaire sur 32 bits)	Plage d'adresses (en décimal)	Remarques
A	0 nnnnnnn . hhhhhhhh . hhhhhhhh . hhhhhhhh	1.0.0.0 à 126.255.255.255	126 réseaux. ≈16 millions PC par réseau.
B	10 nnnnnn . nnnnnnnn . hhhhhhhh . hhhhhhhh	128.0.0.0 à 191.255.255.255	16575 réseaux. ≈65000 PC par réseau.
C	110 nnnnn . nnnnnnnn . nnnnnnnn . hhhhhhhh	192.0.0.0 à 223.255.255.255	≈2 millions de réseaux. 254 PC par réseau.

- Les premiers bits en gras permettent de déterminer la classe du réseau.
- Les bits n permettent de coder le numéro de réseau : NetId.
- Les bits h permettent de coder le numéro de l'hôte : HostId.

4.3. Choix des adresses IP dans un réseau

Les 3 conditions nécessaires sur le choix des adresses IP pour que 2 machines puissent communiquer entre-elles sont :

- appartenir à la même classe ;
- avoir un NetId identique ;
- avoir des HostId différents.

N.B. : ✓ Ces 3 conditions sont nécessaires mais pas suffisantes : il faut aussi paramétrer le « masque de sous-réseau ».
 ✓ Chaque adresse doit être unique dans l'espace d'un réseau.

4.4. Masque de sous-réseau

Le masque de sous-réseau (Subnet mask) est lui aussi constitué de 32 bits et permet de subdiviser un réseau en coupant la partie hôte (HostId) de l'adresse IP en 2 :

NetId	HostId	
	Sous-réseau	hôte

Masques de sous-réseau par défaut :

Classe	Nombre de bits réservés pour le NetId	Masque de sous-réseau par défaut	Notation abrégée ou notation CIDR
A	8	255.0.0.0	/8
B	16	255.255.0.0	/16
C	24	255.255.255.0	/24

La notation CIDR correspond tout simplement au nombre de bits de poids forts à « 1 » du masque de sous-réseau.

Pour savoir si 2 machines appartiennent au même réseau, il faut que les résultats du « ET-logique » des adresses IP de l'émetteur et du destinataire, avec le masque de sous-réseau de l'émetteur soient identiques.

Exemple : le PC1 d'adresse IP 172.31.71.17 /20 peut-il communiquer avec le PC2 d'adresse IP 172.31.67.12 ?

Détermination du réseau du PC1 (fonction « ET-logique » entre son adresse IP et son masque de sous-réseau) :

	Décimal pointé		Binaire
Adresse IP PC1	172.31.71.17 →		1010 1100 . 0001 1111 . 0100 0111 . 0001 0001
Masque de sous-réseau PC1 /20	255.255.240.0 →	&	1111 1111 . 1111 1111 . 1111 0000 . 0000 0000
Réseau PC1	172.31.64.0 ←		1010 1100 . 0001 1111 . 0100 0000 . 0000 0000

Détermination du réseau du PC2 (fonction « ET-logique » entre son adresse IP et le masque de sous-réseau du PC1) :

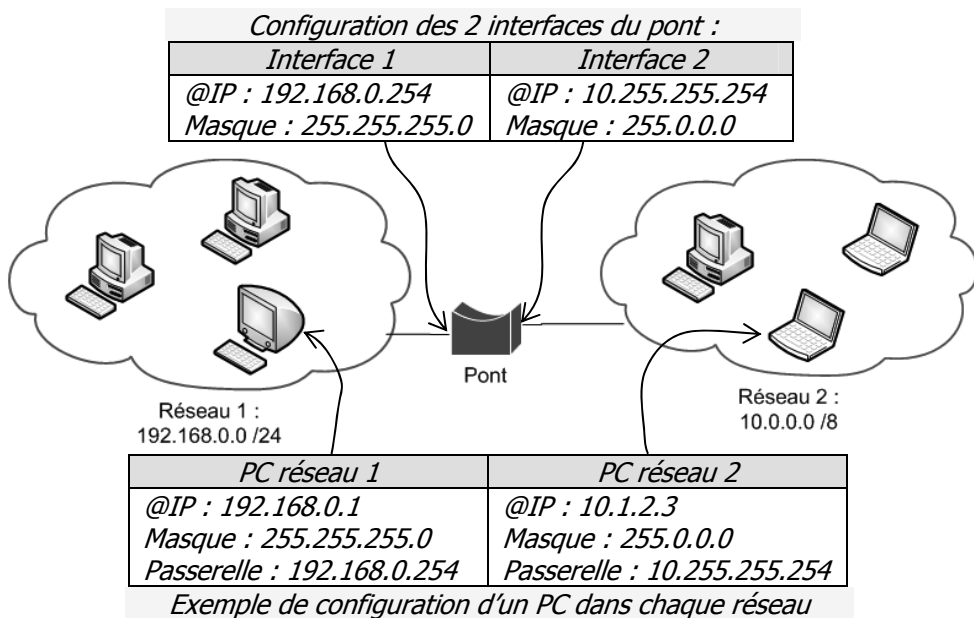
	Décimal pointé		Binaire
Adresse IP PC2	172.31.67.12	→	1010 1100 . 0001 1111 . 0100 0011 . 0000 1100
Masque de sous-réseau PC1 /20	255.255.240.0	→	& 1111 1111 . 1111 1111 . 1111 0000 . 0000 0000
Réseau PC2	172.31.64.0	←	1010 1100 . 0001 1111 . 0100 0000 . 0000 0000

On constate que les résultats des 2 fonctions « ET-logique » sont identiques ; donc le PC1 peut communiquer avec le PC2.

4.5. Passerelle

Une passerelle (ou pont) est un équipement réseau permettant de faire le lien entre 2 réseaux. La passerelle doit avoir une liaison dans chacun des réseaux et fournit donc une adresse IP dans chacun de ces réseaux. L'adresse de la passerelle d'un PC correspond à l'adresse IP de l'interface qui permet de sortir du réseau local vers l'extérieur.

Exemple : soit l'architecture comportant 2 réseaux. Le pont doit permettre la communication entre les 2 réseaux d'adresse IP différentes :

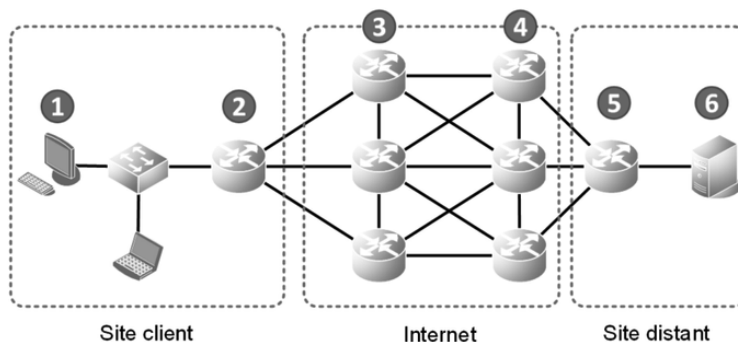


Pour sortir du réseau 1, il faut passer par l'interface 1 du pont ; donc l'adresse IP de la passerelle à spécifier sur chaque PC du réseau 1 est l'adresse IP de l'interface 1 (192.168.0.254).

Pour sortir du réseau 2, c'est l'interface 2 du pont qui est utilisée ; donc l'adresse IP de l'interface 2 correspond à la passerelle pour les PC du réseau 2.

5. Routage de paquets

Le routage consiste en une succession de sauts pour passer de réseaux en réseaux afin d'atteindre le destinataire :



Description du cheminement de l'information :

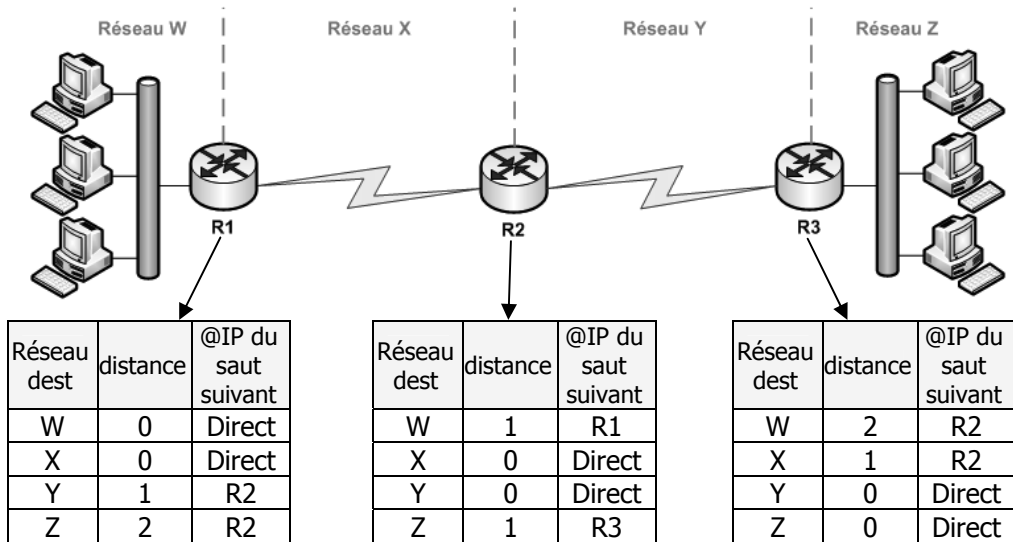
①	Le PC détermine que l'adresse IP destinataire n'appartient pas au réseau local (LAN site client) ; donc transmission du datagramme au routeur ②.
②	Le routeur ② connaît une route vers le réseau ⑥, il transmet le datagramme au routeur ③.
③	Le routeur ③ connaît une route vers le réseau ⑥, il transmet le datagramme au routeur ④.
④	Le routeur ④ connaît une route vers le réseau ⑥, il transmet le datagramme au routeur ⑤.
⑤	Le routeur ⑤ appartient au réseau local destinataire (LAN site distant), il transmet donc le datagramme au destinataire ⑥.

Le "routeur" a pour rôle de faire progresser le datagramme vers le destinataire, il consulte sa "table de routage" à la recherche d'une route vers le réseau destinataire.

La "table de routage" est une table de correspondance entre un réseau que le routeur est capable d'atteindre et l'adresse IP du prochain routeur à qui il faut confier le datagramme pour s'approcher du réseau destinataire. À chaque couple « réseau destinataire / adresse de passerelle », on associe une "distance" correspondant au nombre de sauts nécessaire pour atteindre le destinataire.

Chaque routeur diffuse périodiquement le contenu de sa table de routage à tous les routeurs directement connectés ; ainsi chaque routeur qui reçoit des informations de routes, met à jour sa table de routage.

Exemple : contenu des tables de routage de chacun des 3 routeurs R1, R2 et R3 :



6. Les protocoles

6.1. Définition

Un protocole de communication est un ensemble de règles permettant l'échange de données entre 2 machines.

Exemples : quelques protocoles utilisés sur Internet :

Nom	Signification	Utilisation
HTTP	HyperText Transfer Protocol	Protocole client-serveur développé pour accéder aux pages web (www = World Wide Web).
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol	Transférer le courrier électronique (courriel) vers les serveurs de messagerie électronique.
POP3	Post Office Protocol	Permet d'aller récupérer son courrier sur un serveur de messagerie électronique distant.
IMAP	Internet Message Access Protocol	Protocole alternatif au protocole POP3 offrant plus de possibilités : gérer plusieurs accès simultanés, gérer plusieurs boîtes aux lettres, trier le courrier selon plus de critères...
FTP	File Transfer Protocol	Destiné à l'échange de fichiers informatiques sur un réseau TCP/IP.

6.2. Protocole IP

Le protocole IP (Internet Protocol) est un protocole de communication de couche 3 (voir modèle OSI au paragraphe 7) permettant un adressage unique des machines pour l'ensemble du réseau.

Pour identifier chaque machine sur le réseau, le protocole IP nécessite l'attribution d'une configuration IP sur la machine :

- une adresse IP ;
- un masque de sous-réseau ;
- l'adresse IP de la passerelle ;
- l'adresse IP d'un serveur DNS.

6.3. Protocole TCP

Le protocole TCP est un protocole permettant le transfert des données entre 2 applications réseaux, généralement exécutées sur 2 machines différentes. À chaque application réseau exécutée sur une machine, est affecté un numéro unique appelé « port ».

Le port est codé sur 16 bits (1 à 65535). Les ports numérotés de 0 à 1023 sont appelés « ports connus » et sont réservés à des usages définis.

Exemple : quelques ports connus :

Port	Protocole correspondant
80	HTTP
25	SMTP
20 et 21	FTP

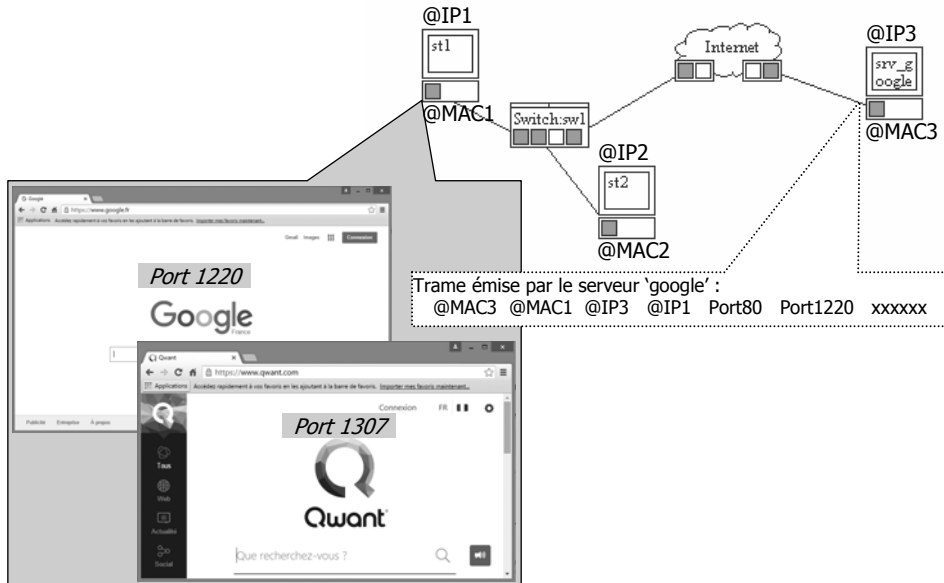
Le numéro de port permet alors de diriger les données reçues, via la carte réseau, vers la bonne application.

Exemple : supposons qu'on ouvre 2 onglets sur un navigateur web de la machine *st1* (ci-dessous).

Chacun des 2 onglets se voit attribuer un numéro de port (par exemple 1220 et 1307).

À partir de l'onglet de port 1220, on saisit l'url « <https://www.google.fr> » ; ci-dessous, on schématise la réponse fournie par le serveur 'google'.

Lorsque le machine *st1* reçoit la trame ci-dessous, elle vérifie que les adresses MAC et IP correspondent bien à sa configuration, puis dirige les données « xxxxxx » vers l'application possédant le port 1220. Ainsi la page d'accueil de 'google' apparaît dans le bon onglet.



7. Couches réseau : modèle OSI et TCP/IP

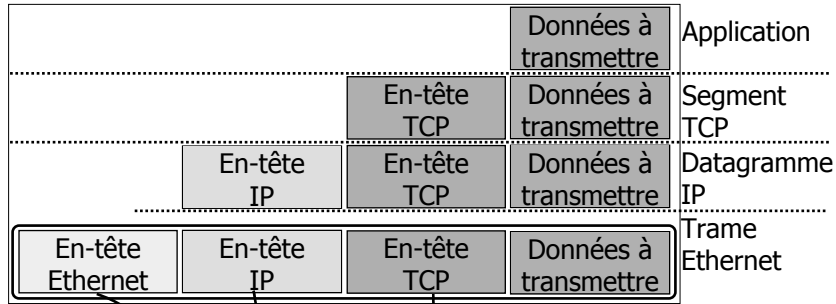
Une application réseau est un ensemble complexe qui nécessite une décomposition en éléments logiciels directement réalisables ; d'où la décomposition des systèmes en couches.

Le modèle OSI décompose une application réseau en 7 couches.

Par simplification le modèle Internet TCP/IP ne comporte que 4 couches, en regroupant certaines couches du modèle OSI.

N° couche	Modèle O.S.I.	Modèle TCP/IP (ou DOD)
7	Application	Application
6	Présentation	
5	Session	Transport (<i>port</i>)
4	Transport	
3	Réseau	Internet (<i>@IP</i>)
2	Liaison	Ethernet (<i>@MAC</i>)
1	Physique	

Lorsqu'une donnée est émise par une application, cette donnée descend les diverses couches du réseau, en récupérant au passage des informations supplémentaires à chaque couche, comme le montre l'illustration suivante :



En-tête Ethernet :

@MAC Dest (6 octets)	@MAC source (6 octets)	Type de trame (2 octets)
----------------------	------------------------	--------------------------

En-tête IP :

Version (4bits)	Long en-tête (4bits)	Type service (1oct)	Long totale (2oct)	ident (2oct)	drapeau (3bits)	Décalage fragment (13bits)	Durée de vie (TTL)	protocole (1oct)	CRC (2oct)	@IP source (4 oct)	@IP dest (4oct)
-----------------	----------------------	---------------------	--------------------	--------------	-----------------	----------------------------	--------------------	------------------	------------	--------------------	-----------------

En-tête TCP :

Port source (2oct)	Port dest (2oct)	Numéro séquence (4oct)	Numéro acquittement (4oct)	Longueur en-tête (4bits)	réservé (6bits)	code (6 bits)	Taille fenêtre (2oct)	CRC (2oct)	Pointeur urgent (2oct)
--------------------	------------------	------------------------	----------------------------	--------------------------	-----------------	---------------	-----------------------	------------	------------------------

Lorsque les données sont transmises à la couche transport, on dit qu'elles sont encapsulées dans un segment TCP. Puis le segment TCP est encapsulé dans un datagramme IP qui est lui-même encapsulé dans une trame Ethernet. C'est cette dernière qui est émise sur le média de communication.

Lorsqu'un PC reçoit une trame Ethernet, l'opération inverse de désencapsulation est effectuée pour remonter les données jusqu'à la couche application.

Exemple : décodage d'une trame Ethernet, capturée avec le logiciel Wireshark :

La capture d'écran de Wireshark illustre le processus de décodage :

- Liste des trames capturées** : Affiche une liste de trames avec des détails tels que le temps, l'adresse source, l'adresse destination, le protocole et la longueur.
- Décodage de la trame sélectionnée (grisée ci-dessus)** : Le détail de la trame sélectionnée est affiché, montrant les protocoles Ethernet II, Internet Protocol version 4 et Hypertext Transfer Protocol.
- Liste des octets contenus dans la trame sélectionnée** : Une vue hexadécimale des octets de la trame est présentée, avec des flèches indiquant la position des en-têtes Ethernet, IP et TCP.

Les en-têtes sont identifiés par des flèches pointant vers des séquences d'octets dans la vue hexadécimale :

- En-tête Ethernet** : Correspond aux octets 0000 à 0010.
- En-tête IP** : Correspond aux octets 0010 à 0020.
- En-tête TCP** : Correspond aux octets 0020 à 0030.

À partir des octets de la trame sélectionnée et de la description des différentes entêtes, on peut identifier les caractéristiques :

	Destinataire	Source
Adresse MAC	6 premiers octets de l'en-tête Ethernet : 00:1F:95:33:1D:FA	6 octets suivants de l'en-tête Ethernet : 08:60:6E:18:7A:34
Adresse IP	4 derniers octets de l'en-tête IP : 68.14.07.43 Il faut convertir les données hexadécimales en décimales : 104.20.7.67	4 octets précédents de l'en-tête IP : C0.A8.01.0C Il faut convertir les données hexadécimales en décimales : 192.168.1.12
Numéro Port	3 ^e et 4 ^e octets de l'en-tête TCP : 00 50 Conversion de ce nombre hexadécimal en décimal : 80	2 premiers octets de l'en-tête TCP : C8 AE Conversion de ce nombre hexadécimal en décimal : 51 374

8. Serveurs DNS et DHCP

8.1. Serveur DNS

Pour faciliter l'accès aux hôtes sur un réseau IP, un mécanisme a été mis en place pour associer un nom à une adresse IP. Ce nom, plus simple à retenir que l'adresse IP, est appelé « nom de domaine ».

Un serveur DNS (Domain Name System) permet de résoudre un nom de domaine c'est-à-dire de trouver l'adresse IP qui lui est associée. Il contient une table de correspondance entre des noms de domaine et les adresses IP des hôtes.

Exemple :

Domaine	Adresse IP
<i>www.google.fr</i>	<i>216.58.209.227</i>
<i>www.qwant.fr</i>	<i>194.187.168.99</i>
<i>eduscol.education.fr</i>	<i>185.75.143.28</i>
<i>www.editions-ellipses.fr</i>	<i>213.186.33.97</i>

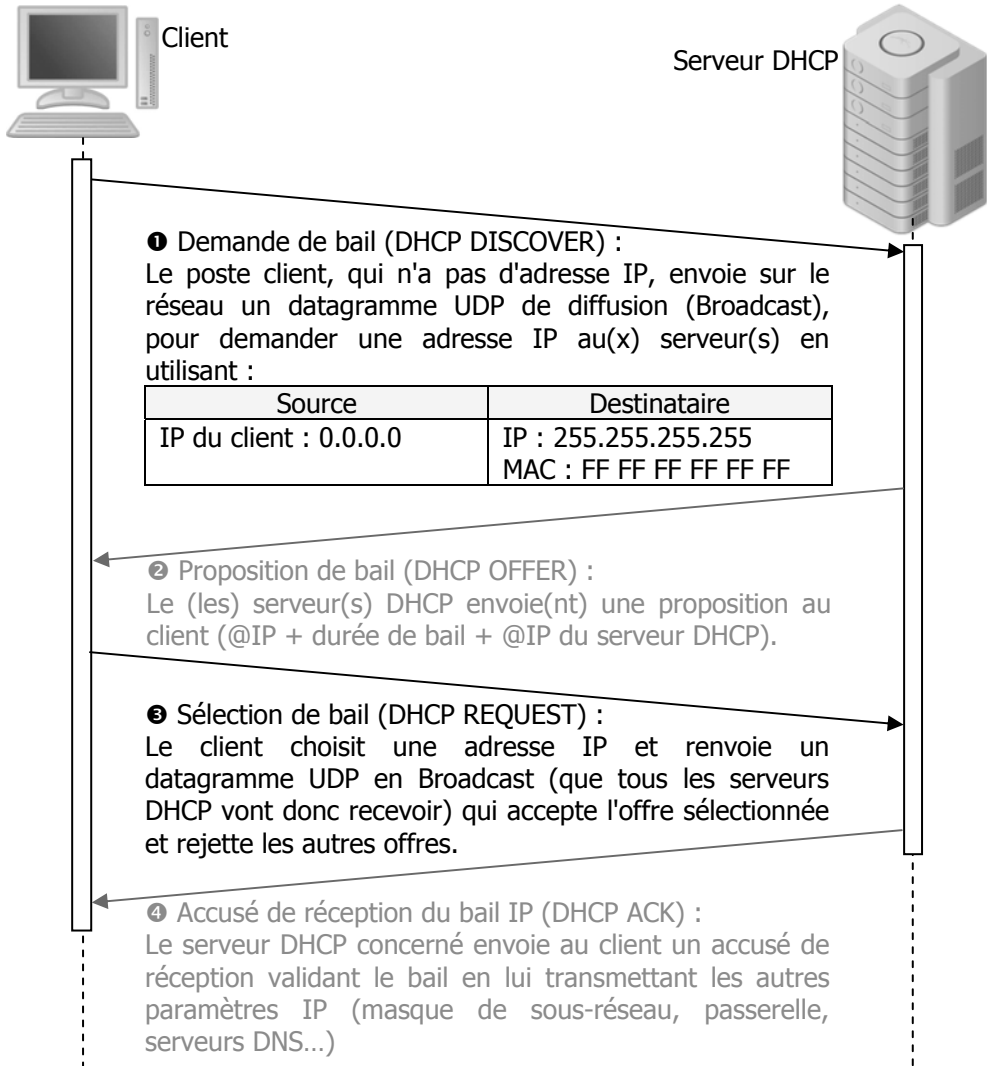
8.2. Serveur DHCP

DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) est un protocole réseau dont le rôle est d'assurer la configuration automatique des paramètres IP d'une station, en lui attribuant automatiquement :

- une adresse IP ;
- un masque de sous-réseau ;
- l'adresse de la passerelle par défaut ;

- l'adresse IP du serveur de noms DNS ;
- ...

Fonctionnement d'un serveur DHCP :



N.B. : la configuration IP fournie par le serveur DHCP est valide pendant une durée prédéfinie (le « bail ») et doit être renouvelable.

Exemple : configuration d'un PC obtenue via un serveur DHCP :

```

Windows PowerShell
PS C:\Users\marc> ipconfig /all

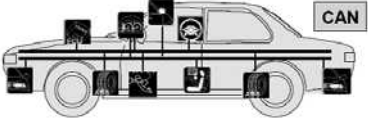
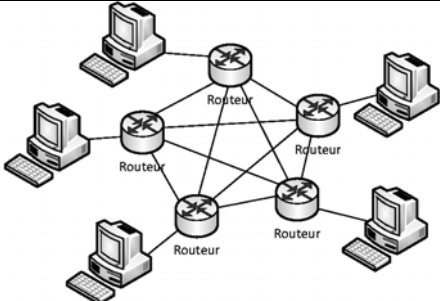
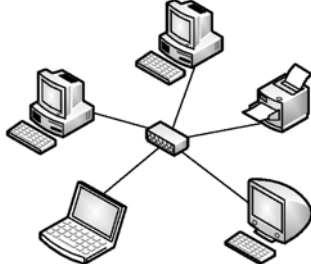
Carte Ethernet Ethernet :
    Suffixe DNS propre à la connexion. . . . . : home
    Description. . . . . : Contrôleur Ethernet Qualcomm Atheros AR8151 PCI-E Gigabit (NDIS 6.30)
    Adresse physique. . . . . : 08-60-6E-18-7A-34
    DHCP activé. . . . . : Oui
    Configuration automatique activée. . . . . : Oui
    Adresse IPv4. . . . . : 192.168.1.12(préféré)
    Masque de sous-réseau. . . . . : 255.255.255.0
    Bail obtenu. . . . . : dimanche 2 juin 2019 07:22:05
    Bail expirant. . . . . : lundi 3 juin 2019 07:22:06
    Passerelle par défaut. . . . . : 192.168.1.1
    Serveur DHCP. . . . . : 192.168.1.1
    Serveurs DNS. . . . . : 192.168.1.1
                            192.168.1.1
    NetBIOS sur Tcpip. . . . . : Activé
    
```

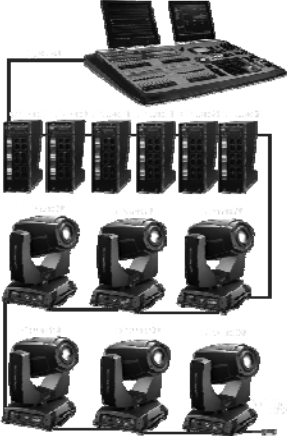
On remarque que la configuration IP est attribuée pour une durée (bail) de 1 jour.

➔ Exercices

Exercice 12.1 – Topologie réseau

Donner le nom de la topologie utilisée pour les différents réseaux ci-dessous :

Réseau	Topologie
 <p>Le protocole CAN (Controller Area Network) est utilisé pour la communication entre les différents calculateurs d'une voiture.</p>	<input type="checkbox"/> anneau <input type="checkbox"/> bus <input type="checkbox"/> étoile <input type="checkbox"/> maillé
	<input type="checkbox"/> anneau <input type="checkbox"/> bus <input type="checkbox"/> étoile <input type="checkbox"/> maillé
	<input type="checkbox"/> anneau <input type="checkbox"/> bus <input type="checkbox"/> étoile <input type="checkbox"/> maillé

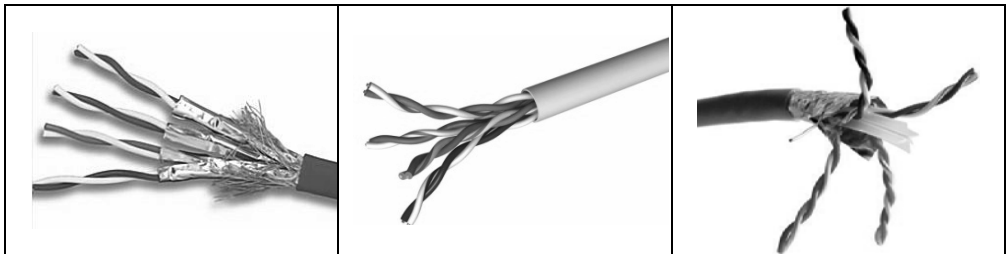


Le protocole DMX512 est utilisé dans le domaine de l'éclairage de spectacle.

anneau
 bus
 étoile
 maillé

Exercice 12.2 – Type de câbles

En fonction des blindages du câble et des paires, donner le type de chacun des 3 câbles (sous la forme .../...TP) :



Exercice 12.3 – Classes d'adresses IP

Donner la classe à laquelle appartient chacune des adresses IP suivantes :

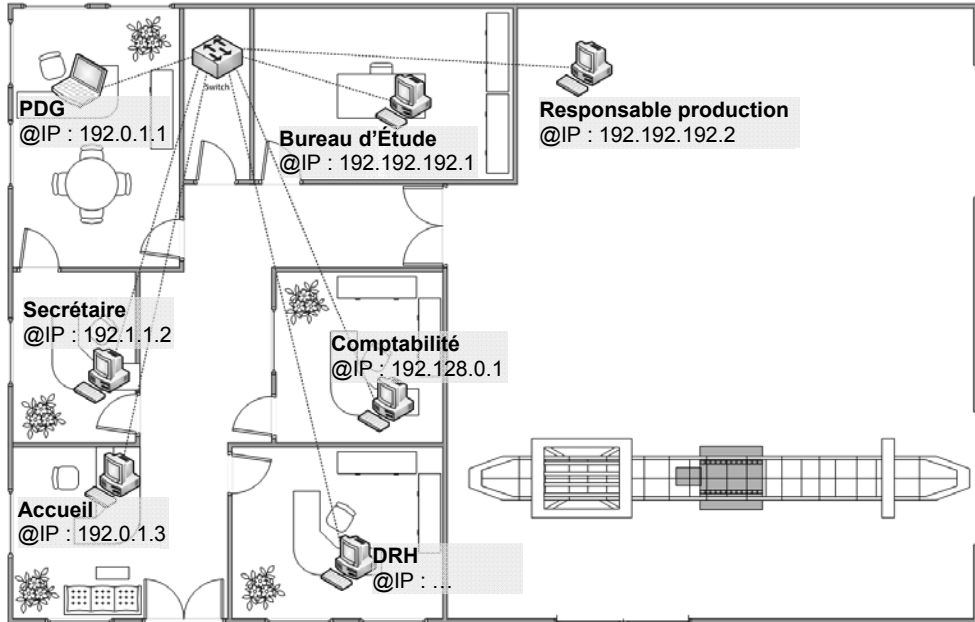
Adresses	Conversion du 1 ^{er} octet en binaire afin d'identifier la place du premier « 0 » en partant du MSB	Classes
10.0.100.254		
82.0.79.143		
212.150.23.54		
192.168.18.3		
155.230.140.1		
127.0.0.1		
181.205.10.99		

Exercice 12.4 – Choix d'une classe d'adresses IP

Une entreprise possède 350 machines (PC, imprimantes, serveurs) connectées au réseau local ; pourquoi cette entreprise ne peut pas utiliser des adresses IP de classe C ?

Exercice 12.5 – Plan d'adressage IP

On suppose l'entreprise suivante :



Tous les ordinateurs de l'entreprise sont connectés au même switch mais par la configuration des adresses IP, on souhaite avoir 3 réseaux indépendants :

Réseau N°1	Réseau N°2	Réseau N°3
<ul style="list-style-type: none"> ▪ PDG ▪ Secrétaire ▪ Accueil 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Comptabilité ▪ DRH (Direction des Ressources Humaines) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bureau d'Étude ▪ Responsable de Production

1. Donner la classe des adresses IP de cette entreprise.
2. Donner le « NetID » du Réseau 2.
3. D'après les adresses IP proposées, est-ce que les ordinateurs du PDG, de la secrétaire et de l'accueil peuvent communiquer ensemble ? Justifier votre réponse et proposer si nécessaire la (ou les) modification(s).
4. Proposer une adresse IP pour le bureau du « DRH ».

Exercice 12.6 – Masque de sous-réseau

1. La machine PC1 d'adresse IP 192.168.1.1 /26 peut-elle communiquer avec la machine PC2 d'adresse IP 192.168.1.60 ?
2. La machine PC1 d'adresse IP 192.168.1.1 /27 peut-elle communiquer avec la machine PC2 d'adresse IP 192.168.1.60 ?

Exercice 12.7 – Conflit d'adressage IP

Certains utilisateurs du réseau local d'une entreprise se plaignent de ne pas pouvoir communiquer avec tous les autres utilisateurs. Le responsable vous demande d'expertiser son réseau. Pour lui, le fait qu'une station puisse émettre des messages vers une autre et que cette dernière ne puisse répondre, le laisse perplexe. Votre rapport d'expertise, à compléter, comporte les éléments suivants :

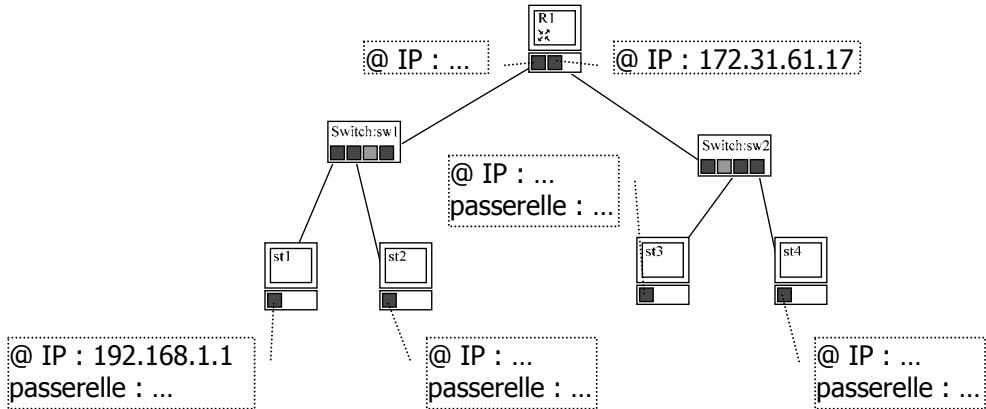
- Vous constatez que toutes les stations sont sur le même segment Ethernet et que celui-ci ne comporte aucun routeur et qu'aucune station n'est configurée pour remplir ce rôle.
- Vous relevez les configurations suivantes :
 - ✓ Station A : @IP 150.150.1.28/24
 - ✓ Station B : @IP 150.150.1.57 /16
 - ✓ Station C : @IP 150.150.2.2 8/24
 - ✓ Station D : @IP 150.150.2.57/16

Établir la matrice de communication (compléter par oui lorsque la communication est possible et par non dans le cas contraire).

@IP source →	150.150.1.28	150.150.1.57	150.150.2.28	150.150.2.57
Masque source → (notation décimale pointée)				
@IP destinataire ↓				
150.150.1.28				
150.150.1.57				
150.150.2.28				
150.150.2.57				

Exercice 12.8 – Passerelle

À partir de l'architecture réseau :



Compléter l'adressage IP du réseau afin que toutes les machines puissent communiquer entre elles. Respecter les contraintes suivantes :

- st2 et st4 auront le HostID le plus grand possible.
- st3 aura le HostID le plus petit possible.

Exercice 12.9 – Système tangible déployable (Bac SI 2017)

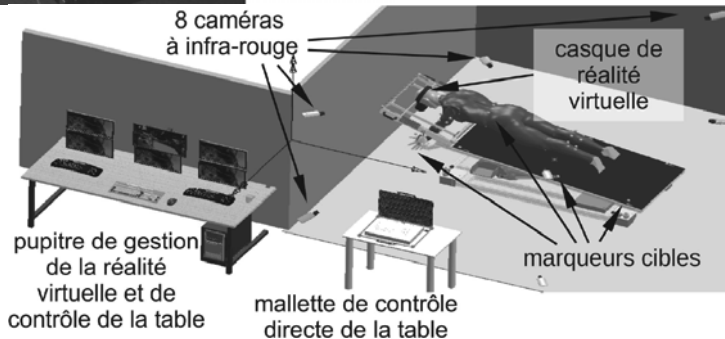


Écran de contrôle

Plancher avion
Table

Marqueurs réfléchissants

L'objectif d'Airbus est de placer virtuellement ses opérateurs dans un avion en situation de montage, réglage, démontage, dans des postures et des conditions d'immersion reproduisant des situations réelles.



8 caméras à infra-rouge

casque de réalité virtuelle

pupitre de gestion de la réalité virtuelle et de contrôle de la table

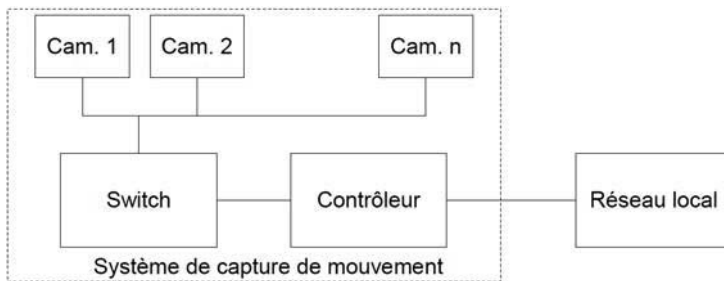
mallette de contrôle directe de la table

marqueurs cibles


Un système de caméras permet d'enregistrer les positions de la table, de la trappe et des membres de l'opérateur dans l'environnement réel.

La table et l'opérateur sont équipés de marqueurs réfléchissants.

Le système de capture de mouvement est connecté au réseau local du CIRV (Centre Industriel de Réalité Virtuelle) de standard Ethernet 1 Gbit/s.



Le contrôleur peut gérer jusqu'à 50 caméras.
Caractéristiques techniques d'une caméra :

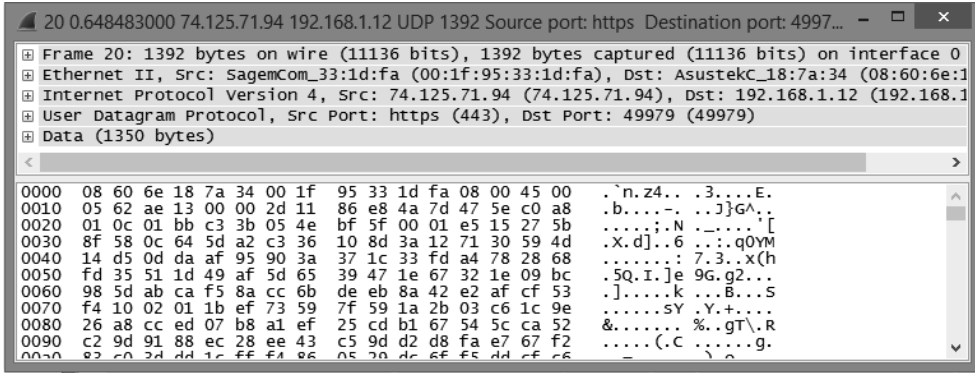
	Capteur	CMOS 1,3 MPx résolution 1280×1024 taille 6mm×4,8mm
	Taille d'une cellule photosensible	4,7×4,7 (µm×µm)
	Fréquence d'acquisition	150 images/s
	Traitement d'image	Intégré
	Source Infra-rouge	8 LED de longueur d'onde 850 nm
	Connexion / alimentation	Câble RJ45
	Consommation	17 W
	Distance de tracking maximale	5,5 m pour un marqueur sphérique de diamètre 12 mm
	Focale	F = 3,5 mm

Chaque pixel d'une image est codé sur 1 octet.

1. En utilisant les caractéristiques des caméras, calculer le nombre d'octets nécessaire pour coder une image.
2. Puis calculer le débit maximal qui transiterait en entrée du contrôleur si celui-ci gérait 50 caméras.
3. Justifier pourquoi il a été choisi d'utiliser des caméras intégrant un traitement des images.

Exercice 12.10 – Décodage d’une trame Ethernet

Avec un logiciel de capture de trames, on a relevé la trame correspondant à la connexion à la page www.google.fr :



À partir des octets de la trame, compléter le tableau suivant :

	Destinataire	Source
Adresse MAC		
Adresse IP		
Numéro Port		

Exercice 12.11 – Production hydroélectrique (concours général)

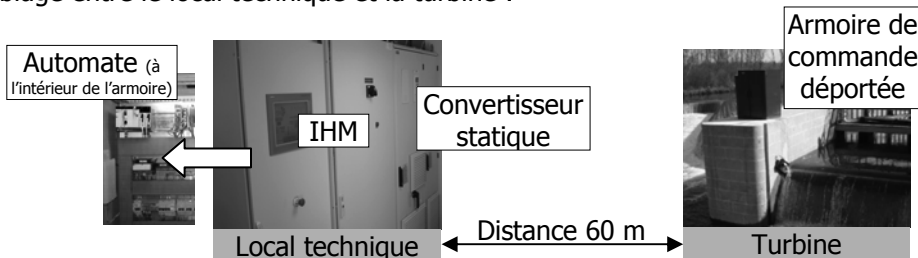
Le sujet porte sur la mise en place d’une centrale hydroélectrique sur la Mayenne.

La turbine est gérée par un automate situé dans un local technique distant d’environ 60 m.

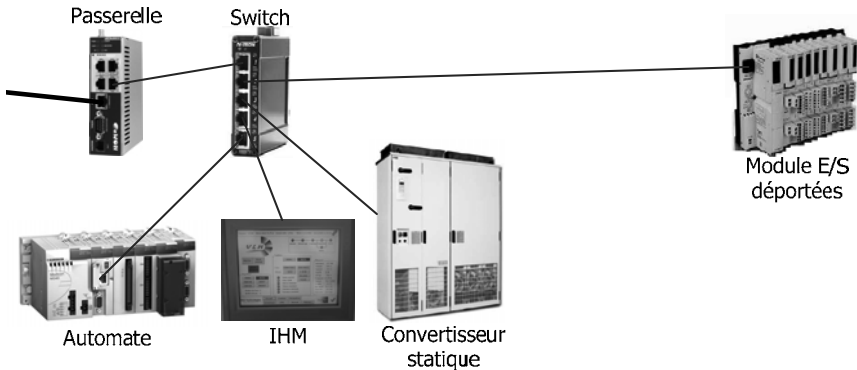
Les ordres et informations liés au fonctionnement de la turbine sont donnés ou recueillis au plus près de la



turbine au moyen de modules d’entrées/sorties déportées, afin de minimiser le câblage entre le local technique et la turbine :



Architecture du réseau :



1. Donner la topologie du réseau.

Au moyen d'un logiciel de capture de trame, on a relevé deux trames entre l'automate et la carte analogique (capteur de niveau d'eau) du module d'entrées/sorties déportées. La première trame correspond à une demande de l'automate au module d'entrées/sorties déportées, la deuxième trame correspond à la réponse à cette demande.

▪ Trame de demande

```
00 30 de 01 e9 bb 00 80 f4 01 8b a7 08 00 45 00
00 34 c5 3c 00 0a 06 ed 57 ac 11 53 0a ac 11
53 03 13 00 01 f6 00 27 c9 1a 93 eb f8 70 50 18
08 00 e5 84 00 00 5a 6c 00 00 00 06 ff 03 15 0f
00 01
```

▪ Trame de réponse

```
00 80 f4 01 8b a7 00 30 de 01 e9 bb 08 00 45 00
00 33 d9 01 40 00 40 06 63 93 ac 11 53 03 ac 11
53 0a 01 f6 13 00 93 eb f8 70 00 27 c9 26 50 18
3e 80 ec fa 00 00 5a 6c 00 00 00 05 ff 03 02 2a
20
```

On donne le format d'une trame MODBUS portée par TCP/IP :

En-tête Ethernet	En-tête IP	En-tête TCP	Modbus	CRC
14 octets	20 octets	20 octets	1 à 255 octets	4 octets

En-tête Modbus	Code Fonction	Données
7 octets	1 octet	

Description de la trame Modbus :

▪ Format d'une trame de question (demande)

Ident Transaction (2 octets)	Ident protocole (2 octets) 00 _h 00 _h	Longueur (2 octets)	Adresse Esclave (1 octet) (FF _h)	Code fonction (1 octet)	Adresse de départ (2 octets)	Nombre de bits ou de mots lus (2 octets)

- Format d'une trame de réponse

Ident Transaction (2 octets)	Ident protocole (2 octets) 00 _h 00 _h	Longueur (2 octets)	Adresse Esclave (1 octet) FF _h	Code fonction (1 octet)	Nombre octets renvoyés (1 octet)	Valeurs demandées (n octets)
------------------------------	---	---------------------	--	-------------------------	----------------------------------	------------------------------

- Description des valeurs de l'octet « Code fonction »

Décimal	Hexadécimal	
01	01	lecture de bits de sortie ou bits internes
02	02	lecture de bits d'entrées
03	03	lecture de mots de sortie ou de mots internes
04	04	lecture de mots d'entrée
05	05	écriture d'un bit
06	06	écriture d'un mot
15	0F	écriture de n bits consécutifs
16	10	écriture de n mots consécutifs
23	17	lecture / écriture de n mots consécutifs

2. Repérer sur chacune des 2 trames, en les encadrant, les en-têtes Ethernet, IP, TCP et Modbus. En déduire, l'adresse MAC de la carte réseau de l'automate, l'adresse MAC du module d'entrées/sorties déportées, l'adresse IP (en décimal) de l'automate et l'adresse IP du module d'entrées/sorties déportées :

Équipements	Adresse MAC	Adresse IP
Automate		
Module entrées/sorties déportées		

3. Décoder la partie Modbus des trames en précisant ce que demande l'automate et la réponse qu'il reçoit à cette demande.

Exercice 12.12 – Ascenseur à bateaux (Bac SI 2018)

Le canal de la Marne au Rhin est jalonné par plus de 150 écluses, 3 tunnels, plusieurs ponts-canaux et par 2 ouvrages remarquables, dont l'ascenseur à bateaux, de Saint-Louis-Arzviller (57). Lors de sa mise en service, en 1969, il a remplacé 17 écluses, permettant de franchir une dénivellée de 44,50 mètres.



Le déplacement du bac est actuellement géré et supervisé en « temps réel ». Il est donc nécessaire de connaître la position du bac sur toute la longueur de la rampe, ainsi que sa vitesse de déplacement.

Le codeur sera intégré dans le réseau de l'installation (Ethernet 100 Base T).

Les informations contenues dans le codeur pourront alors être exploitées via des commandes MODBUS.

Remarque : MODBUS est un protocole de messagerie de couche d'application, qui assure la communication client / serveur entre les périphériques connectés sur différents types de bus ou de réseaux. Il s'appuie ici sur les protocoles TCP et IP.

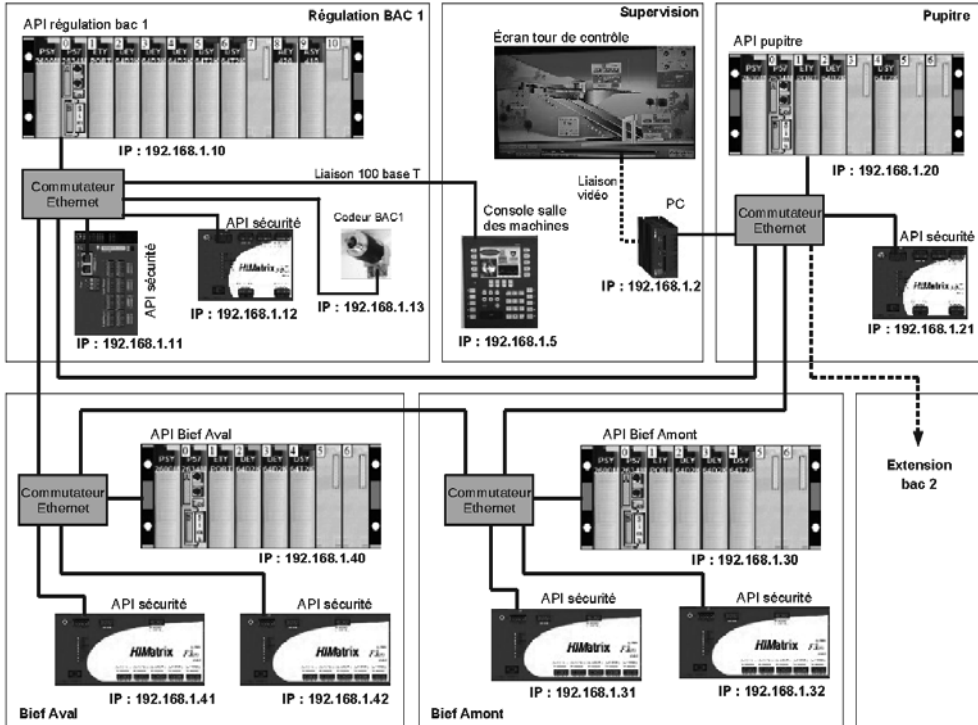
Pour la mise en œuvre du capteur, il est nécessaire d'intervenir au niveau des couches 100 Base T (câblage du capteur sur le réseau), IP (paramétrage de l'adresse) et Modbus (gestion des commandes) du modèle OSI, ce qui nécessite de les désigner précisément.

1. Compléter le modèle OSI avec les désignations « Ethernet », « 100 Base T », « Modbus », « IP » et « TCP » :

Couche OSI	Désignation
7 : application	
6 : présentation	
5 : session	
4 : transport	
3 : réseau	
2 : liaison de données	
1 : physique	

L'intégration du capteur du bac 2 dans le réseau existant nécessite un paramétrage des adresses. L'adressage IP utilisé dans l'installation est du type 192.168.1.x/24 (adresses fixes). Il a été conçu par zones d'adresses réservées :

Supervision	192.168.1.(1 à 9)
Régulation Bac 1	192.168.1.(10 à 19)
Pupitre	192.168.1.(20 à 29)
Bief amont (et porte)	192.168.1.(30 à 39)
Bief aval (et porte)	192.168.1.(40 à 49)



La présence du deuxième bac ajoute 4 éléments (dont le capteur) au réseau existant.

- Vérifier le nombre d'adresses hôtes disponibles (non réservées) sur le réseau. Indiquer et justifier la classe d'adresses utilisée. Proposer des adresses IP et des masques de sous-réseaux pour les composants du bac 2, en respectant la logique du plan d'adressage.

Élément	Adresse IP	Masque
API régulation bac		
API sécurité 1		
API sécurité 2		
Capteur MHK5		

À tout moment, les automates de régulation et de sécurité peuvent donc accéder aux données numériques enregistrées dans le codeur.

- Indiquer, en utilisant le document technique du capteur ci-dessous, les codes MODBUS, ainsi que les numéros des registres internes concernés par une lecture de la position ou de la vitesse du bac.

Extrait de la documentation technique du capteur :

CODEURS ABSOLUS* MULTI-TOURS MODBUS/TCP, SERIE MHK5

Codeur standard Ø58 mm à transmission Modbus/TCP : MHK5-EM00B-1213-B150-PRM

Résolution dans le tour	13 bits=8192 pts.tour ⁻¹
Nombre de tours	12 bits=4096 tours.
Code	Binaire
Protocole	Modbus/TCP
Transmission	10/100 Mbit.s ⁻¹
Adressage IP	Via le maître
Alimentation	10 – 30 Vdc
Consommation	100 mA max (24 Vdc)
Fréquence sur le LSB	Max 800 kHz (code valide)
Précision	+ ½ LSB
Durée de vie électrique	> 10 ⁵ h
Connectique	M12



Registres internes

N°	Type de donnée	Donnée
0	Position (32 bits non signé)	Bit 31-16
1		Bit 15-0
2	Vitesse (32 bits signé)	Bit 31-16
3		Bit 15-0
4	Horodatage (64 bits non signé)	Bit 63-48
5		Bit 47-32
6		Bit 31-16
7		Bit 15-0
8	Non utilisé	-
9	Non utilisé	-
10	Résolution physique utilisée	Bit 31-16
11		Bit 15-0
12	Résolution totale calibrée	Bit 31-16
13		Bit 15-0
14	Présélection de position	Bit 31-16
15		Bit 15-0
16	Décalage de position	Bit 31-16
17		Bit 15-0
18	Sens de croissance du code	Bit 15-0
19		Bit 31-16

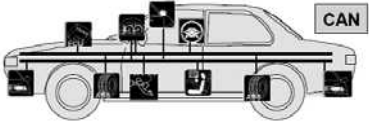
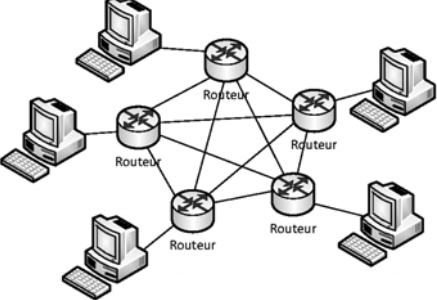
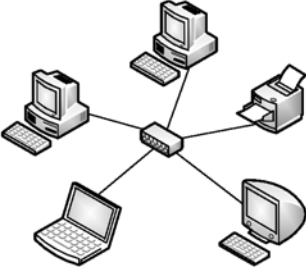
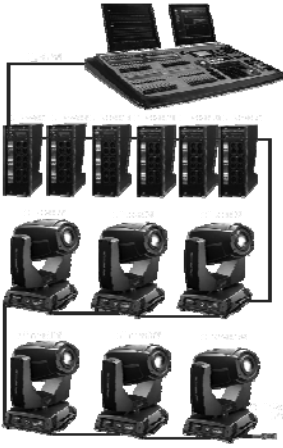
Codes MODBUS

Code	Nature des fonctions
\$ 01	Lecture de n bits consécutifs
\$ 03	Lecture de n registres consécutifs
\$ 05	Écriture de 1 bit
\$ 06	Écriture de 1 registre
\$ 0F	Écriture de n bits consécutifs
\$ 10	Écriture de n registres consécutifs
\$ 11	Lecture d'identification de l'esclave
\$ 13	Reset de l'esclave après erreur non recouverte




*Les codeurs rotatifs absolus fournissent un code unique pour chaque position de rotation possible.

➔ Solutions

Exercice 12.1 – Topologie réseau

 <p>CAN</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> bus</p>	 <p><input checked="" type="checkbox"/> maillé</p>
 <p><input checked="" type="checkbox"/> étoile</p>	 <p><input checked="" type="checkbox"/> bus</p>

Exercice 12.2 – Type de câbles

 <p>S / FTP</p>	 <p>U / UTP</p>	 <p>F / UTP</p>
--	--	---

Exercice 12.3 – Classes d'adresses IP

Adresses	Conversion du 1 ^{er} octet en binaire afin d'identifier la place du premier « 0 » en partant du MSB	Classes
10.0.100.254	0000 1010	A
82.0.79.143	0101 0010	A
212.150.23.54	1101 0100	C
192.168.18.3	1100 0000	C
155.230.140.1	1001 1011	B
127.0.0.1	0111 1111	A
181.205.10.99	1011 0101	B

Exercice 12.4 – Choix d'une classe d'adresses IP

Dans un réseau, il faut que toutes les machines aient des HostID différents. Or dans un réseau de classe C, le HostID est codé sur 8 bits cela fait donc au maximum $2^8 = 256$ machines différentes (en réalité il n'y a que 254 adresses possible car l'adresse 0 correspond au numéro du réseau et l'adresse 255 correspond à l'adresse de broadcast). Donc l'entreprise ne peut pas choisir un plan d'adressage de classe C pour les 350 machines de son réseau local.

Exercice 12.5 – Plan d'adressage IP

1. Les adresses IP de l'entreprise commence par « 192 » qui se converti en binaire : 11000000_2 .
Étant donné que l'adresse IP commence par la séquence binaire « 110 », il s'agit d'adresses IP de classe C.
2. En classe C, le NetID est codé sur les 3 premiers octets.
Donc $\text{NetID}_{\text{réseau2}} = 192.128.0.0$
3. Pour que des PC puissent communiquer ensemble, ils doivent :
 - appartenir à la même classe ;
 - avoir le même NetID ;
 - avoir des HostID différents.

Les 3 adresses IP commencent par « 192 » donc elles appartiennent à la même classe.

En classe C, le NetID est codé sur les 3 premiers octets.
Donc les 3 PC doivent avoir les mêmes 3 premiers octets.
Or le PC de la secrétaire n'a pas le même NetID que les 2 autres PC → il faut donc modifier son netID : 192.0.1

Les 3 hostID (dernier octet) sont bien différents.

La seule modification à apporter concerne l'adresse IP du PC de la secrétaire ; remplacer « 192.1.1.2 » par « 192.0.1.2 ».

4. Pour que des PC puissent communiquer ensemble, ils doivent :
- appartenir à la même classe ;
 - avoir le même NetID ;
 - avoir des HostID différents.

Afin d'être dans la même classe et le même réseau que le PC de la comptabilité, l'adresse IP du PC du DRH doit commencer par « 192.128.0 ».

Le hostID (dernier octet) de l'adresse IP du PC du DRH doit être différent de celui du PC de la comptabilité ; on peut donc choisir toutes les valeurs comprises entre 2 et 254 (les valeurs 0 et 255 sont interdites, et la valeur 1 est déjà prise par le PC de la comptabilité).

Exercice 12.6 – Masque de sous-réseau

1. Détermination du réseau du PC1 (fonction « ET-logique » entre son adresse IP et son masque de sous-réseau) :

	Décimal pointé		Binaire
Adresse IP PC1	192.168.1.1	→	1100 0000 . 1010 1000 . 0000 0001 . 0000 0001
Masque de sous-réseau PC1 /26	255.255.255.192	→	& 1111 1111 . 1111 1111 . 1111 1111 . 1100 0000
Réseau PC1	192.168.0.0	←	1100 0000 . 1010 1000 . 0000 0000 . 0000 0000

Détermination du réseau du PC2 (fonction « ET-logique » entre son adresse IP et le masque de sous-réseau du PC1) :

	Décimal pointé		Binaire
Adresse IP PC2	192.168.1.60	→	1010 1100 . 0001 1111 . 0100 0011 . 0011 1100
Masque de sous-réseau PC1 /26	255.255.255.192	→	& 1111 1111 . 1111 1111 . 1111 1111 . 1100 0000
Réseau PC2	192.168.0.0	←	1100 0000 . 1010 1000 . 0000 0000 . 0000 0000

On constate que les résultats des 2 fonctions « ET-logique » sont identiques ; donc le PC1 peut communiquer avec le PC2.

2. Détermination du réseau du PC1 (fonction « ET-logique » entre son adresse IP et son masque de sous-réseau) :

	Décimal pointé		Binaire
Adresse IP PC1	192.168.1.1	→	1100 0000 . 1010 1000 . 0000 0001 . 0000 0001
Masque de sous-réseau PC1 /27	255.255.255.224	→	& 1111 1111 . 1111 1111 . 1111 1111 . 1110 0000
Réseau PC1	192.168.0.0	←	1100 0000 . 1010 1000 . 0000 0000 . 0000 0000

Détermination du réseau du PC2 (fonction « ET-logique » entre son adresse IP et le masque de sous-réseau du PC1) :

	Décimal pointé		Binaire
Adresse IP PC2	192.168.1.60	→	1010 1100 . 0001 1111 . 0100 0011 . 0011 1100
Masque de sous-réseau PC1 /27	255.255.255.224	→	& 1111 1111 . 1111 1111 . 1111 1111 . 1110 0000
Réseau PC2	192.168.0.32	←	1100 0000 . 1010 1000 . 0000 0000 . 0010 0000

On constate que les résultats des 2 fonctions « ET-logique » sont différents ; donc le PC1 ne peut pas communiquer avec le PC2.

Exercice 12.7 – Conflit d’adressage IP

@IP source →	150.150.1.28	150.150.1.57	150.150.2.28	150.150.2.57
Masque source → (notation décimale pointée)	255.255.255.0	255.255.0.0	255.255.255.0	255.255.0.0
@IP destinataire ↓				
150.150.1.28		OUI	NON	OUI
150.150.1.57	OUI		NON	OUI
150.150.2.28	NON	OUI		OUI
150.150.2.57	NON	OUI	OUI	

Exercice 12.8 – Passerelle

(On utilise les masques standards : /16 en classe B et /24 en classe C)

Machine	@ IP	Passerelle
R1	Par exemple : 192.168.1.2	/
st2	192.168.1.254	@ IP R1 : 192.168.1.2
st3	172.31.0.1	@ IP R1 : 172.31.61.17
st4	172.31.255.254	@ IP R1 : 172.31.61.17

Exercice 12.9 – Système tangible déployable

1. Pour 1 image, il y a autant d’octet que de pixels (car chaque pixel d’une image est codé sur 1 octet) :

$$\text{Nombre octets} = 1280 \text{ pixels} \times 1024 \text{ pixels} = 1\,310\,720 \text{ octets} = 1,31 \text{ Mo}$$

2. Une caméra transmet 150 images/s ; donc pour 50 caméras, on a un débit de 7500 images/s.

De plus, une image correspond à 1,31 Mo, donc le débit maximal serait de :

$$\text{Débit} = 1,31 \text{ Mo/image} \times 7500 \text{ images/s} = 9825 \text{ Mo/s} = 9,8 \text{ Go/s}$$

3. Le protocole Ethernet (1 Gbit/s) reste insuffisant pour transmettre ces données. Il est donc pertinent de distribuer le traitement en local (sur chaque caméra) et de

ne transmettre au contrôleur que les coordonnées des points observés sur chaque image. Le contrôleur se charge de la reconstruction spatiale.

Exercice 12.10 – Décodage d’une trame Ethernet

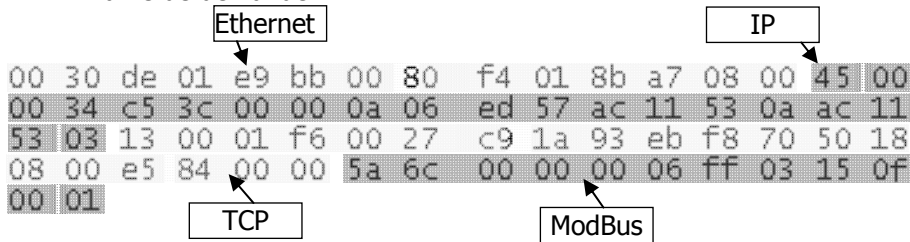
	Destinataire	Source
Adresse MAC	00 50 FC 6D 6D 88	00 00 5E 00 01 03
Adresse IP	Hex : 48 0E DD 63 Déc : 72.14.221.99	Hex : AC 1F 3D 8C Déc : 172.31.61.140
Numéro Port	Hex : 0050 Déc : 80	Hex : 0535 Déc : 1333

Exercice 12.11 – Production hydroélectrique (concours général)

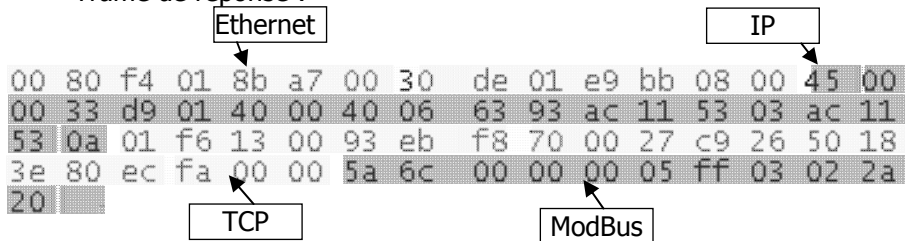
1. Tous les équipements réseaux sont connectés à un concentrateur central (Switch) donc il s’agit d’une topologie en étoile.

2. Identification des en-têtes Ethernet, IP, TCP et MODBUS :

▪ Trame de demande :



▪ Trame de réponse :



Équipements	Adresse MAC	Adresse IP
Automate	00:80:F4:01:8B:A7	AC.11.53.0A → 172.17.83.10
Module entrées/sorties déportées	00:30:DE:01:E9:BB	AC.11.53.03 → 172.17.83.3

3. Demande : lecture d’un mot de sortie ou d’un mot interne.

Réponse : valeur reçue 2A_h 20_h (10784 en décimal)

Exercice 12.12 – Ascenseur à bateaux**1.**

Couche OSI	Désignation
7 : application	MODBUS
6 : présentation	
5 : session	
4 : transport	TCP
3 : réseau	IP
2 : liaison de données	Ethernet
1 : physique	100 Base T

2. 192.x.x.x → adresse IP de classe C, le HostID est codé sur 1 octet (8 bits).

Nombre d'adresses disponibles :

$$NB_{\text{adresses}} = 2^8 - 49 - 2 \text{ (adresse réseau + adresse broadcast)} = 206$$

La classe C est donc bien adaptée au type et à la taille du réseau.

Proposition d'adressage des composants du bac 2 :

Élément	Adresse IP	Masque
API régulation bac	192.168.1.50	255.255.255.0
API sécurité 1	192.168.1.51	255.255.255.0
API sécurité 2	192.168.1.52	255.255.255.0
Capteur MHK5	192.168.1.53	255.255.255.0

3.

	code MODBUS	Numéros des registres
Lecture de la position	\$03	0 et 1
Lecture de la vitesse	\$03	2 et 3

Modélisation multiphysique et écarts

1. Modélisation multiphysique

1.1. Définition

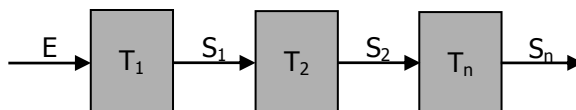
Le fonctionnement de la plupart des systèmes industriels met en jeu des interactions entre plusieurs phénomènes physiques de natures différentes : mécaniques, électriques, thermiques, chimiques, électromagnétiques, ...

Il est souvent nécessaire de modéliser les interactions des différents phénomènes physiques du système pour en simuler le comportement global avant de passer à la phase de prototypage. Ceci doit permettre de diminuer les coûts de mise au point d'un produit.

La modélisation multiphysique consiste donc à réaliser une mise en équations mathématiques du comportement d'un système (ou produit) où apparaissent les équations mathématiques de l'ensemble des domaines physiques mis en jeu.

1.2. Modélisation causale et acausale

- Modélisation causale : correspond classiquement à un schéma bloc. Chaque bloc ayant une fonction de transfert T , telle que : $S = T \cdot E$. Ainsi la sortie S dépend de la « cause » en entrée E . la lecture du schéma est orientée de l'entrée vers la sortie :

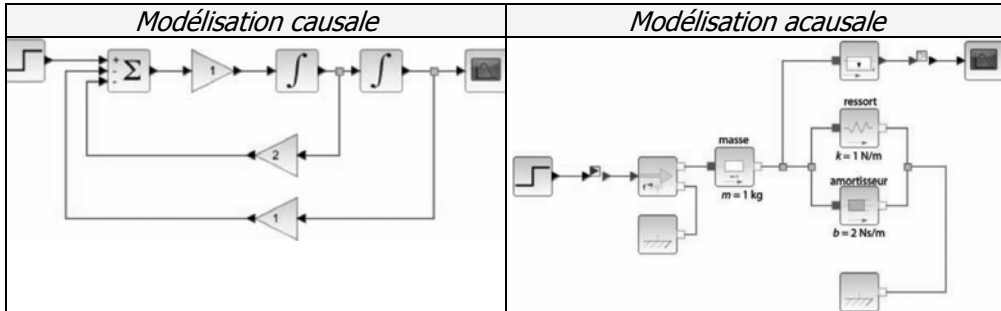
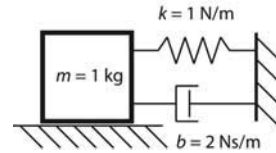


Chacun des blocs de ce modèle représente une ou plusieurs opérations mathématiques (équations algébriques et/ou différentielles).

- Modélisation acausale : pas de lien « de cause à effet » entre l'entrée et la sortie d'un bloc. Un modèle acausal contient des objets qui représentent les constituants du modèle réalisant sa structure interne et son comportement.

Le modèle acausal est réversible, les liens entre les blocs ne sont pas orientés.

Exemple : modélisation d'un système ressort avec amortisseur :



1.3. Modélisation multiphysique d'un moteur à courant continu

Soit un moteur électrique à courant continu RX 120L ainsi que les caractéristiques techniques fournies par le constructeur :

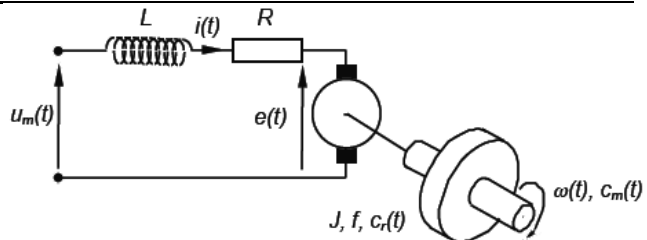


Désignation	Unité	Valeur
Inductance moteur L	H	$7,5 \times 10^{-3}$
Résistance moteur R	Ω	2,5
Constante de couple mécanique Kc	N.m/A	0,11
Constante de fem Ke	V/rad/s	0,11
Moment d'inertie du rotor J	kg.m ²	5×10^{-5}
Coefficient de frottement visqueux f	N.m/rad/s	0,00145
Tension nominale U _N	V	45
Vitesse nominale N _N	tr/min	3000

1.3.1. Mise en équations du moteur

Le schéma fonctionnel du moteur à courant continu se décompose en 2 parties :

- une partie électrique ;
- et une partie mécanique.



▪ **Point de vue électrique**

D'après la loi des mailles, on a : $U_m = e + U_R + U_L$, d'où : $U_m = e + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$

N.B. : la notation $\frac{di}{dt}$ correspond à la dérivée du courant i par rapport au temps t , généralement noté i' en mathématiques.

De plus, la force électromotrice (fem) correspond à : $e = K_e \cdot \omega$

Ainsi l'équation de la partie électrique s'écrit : $U_m = K_e \cdot \omega + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$

ou : ❶ $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (U_m - K_e \cdot \omega - R \cdot i)$

▪ **Point de vue mécanique**

Avec le principe fondamental de la dynamique (PFD), on a : $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_m - C_f - C_r$

- Avec :
- C_m : couple moteur ;
 - C_f : couple de frottement visqueux ;
 - C_r : couple résistant (charge entraînée par le moteur).

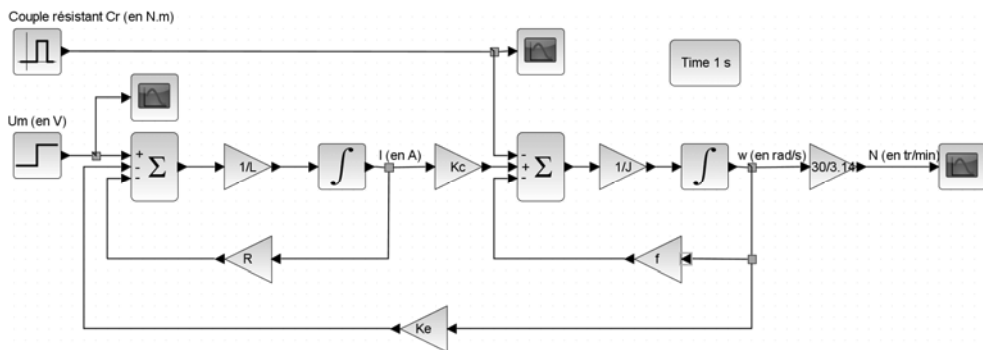
- De plus :
- $C_m = K_c \cdot i$
 - $C_f = f \cdot \omega$

Ainsi l'équation de la partie mécanique s'écrit : $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = K_c \cdot i - f \cdot \omega - C_r$ ou :

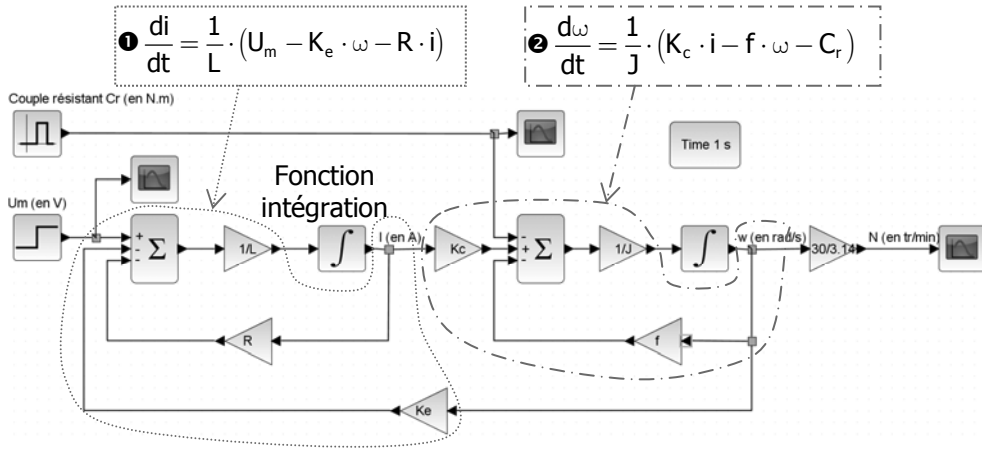
❷ $\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (K_c \cdot i - f \cdot \omega - C_r)$

1.3.2. Modèle multiphysique

Il s'agit de dessiner le schéma bloc correspondant aux équations du système :



Décodage du modèle à partir des équations trouvées précédemment :

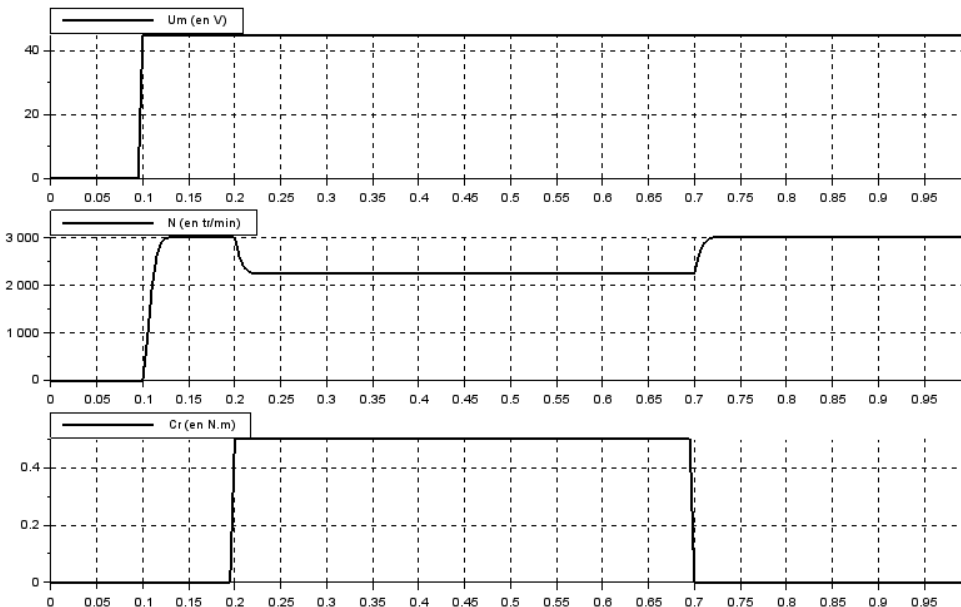


1.3.3. Simulation du comportement du modèle multiphysique

À partir du modèle causal ci-dessus, on réalise une simulation sur une durée de 1 s (ci-dessous).

En fonctionnement nominal, on retrouve bien les valeurs annoncées par le constructeur : vitesse de rotation de 3000 tr/min pour une tension de 45 V.

Lorsqu'on applique une charge sur l'arbre du moteur (couple résistance C_r), la vitesse du moteur diminue.

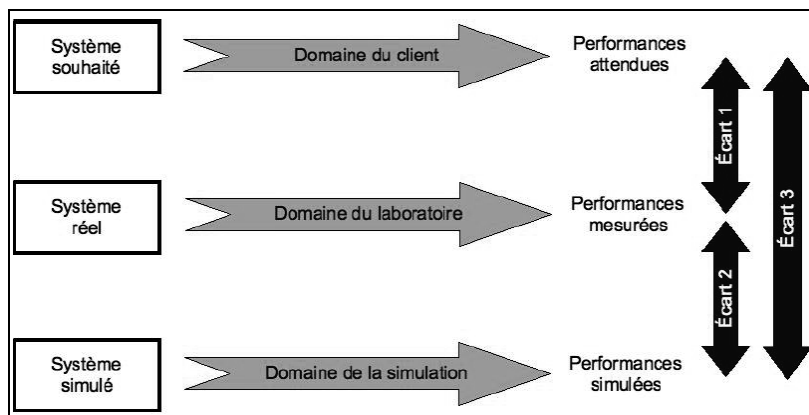


2. Écarts et erreur relative

2.1. Les différents écarts sur un système

Pour concevoir et mettre au point un système, il faut évaluer ses performances par simulation (logiciels) à partir d'un modèle théorique, ou en laboratoire par mesures sur un prototype. Il faut ensuite comparer les résultats de ces évaluations aux performances attendues par le client. On identifie alors 3 écarts :

- les écarts entre le domaine du client et celui du laboratoire ;
- les écarts entre le domaine du client et celui de la simulation ;
- les écarts entre le domaine du laboratoire et de la simulation.



Pour quantifier ces écarts, il faut s'appuyer sur des indicateurs de performances qui correspondent à des grandeurs physiques. Ainsi l'« écart 1 » est obtenu par :

$$\varepsilon = \text{valeur mesurée} - \text{valeur attendue}$$

N.B. : l'écart peut aussi être appelé « erreur absolue ».

Exemple 1 : extrait « panoramique des dômes » (Bac SI)

- Sur un train, le système de freinage déclenché par une balise doit arrêter le train avant un aiguillage. La distance entre la balise et l'aiguillage est de 45 m.
- Des essais de freinage d'une rame ont permis d'obtenir une valeur réelle de la distance de freinage qui vaut 35 m.
- Dans le sujet, en appliquant le principe fondamental de la dynamique, le candidat calcule la distance d'arrêt pour une vitesse initiale de la rame de $28,4 \text{ km.h}^{-1}$. La réponse du calcul est de 24,5 m.

Le candidat doit commenter les écarts entre le besoin 45 m, l'essai 35 m et le résultat des calculs 24,5 m.

Exemple 2 : extrait « masseur de dos » (Bac SI)

- Sur un masseur de dos, la vitesse des têtes de massage doit être de $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ à $\pm 10\%$.
- À partir des données, le candidat calcule cette vitesse. Le résultat du calcul donne $62,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Le candidat doit conclure pour savoir si le résultat est compris dans la fourchette des $\pm 10\%$ ($56 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1} \leq 62,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1} \leq 64 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$).

Exemple 3 : extrait sous marin « AUV » (Bac SI)

- Un sous-marin de surveillance AUV doit assurer une mission de 60 min en autonomie.
- Le candidat calcule la performance de la batterie embarquée à partir des données. Le résultat du calcul donne une autonomie de $1,25 \text{ h}$ (= 75 min).

Le candidat doit conclure : $75 \text{ min} \geq 60 \text{ min}$ autorisées .

2.2. Erreur relative

Pour quantifier un écart, la mesure de la différence absolue entre les domaines du client, du laboratoire et de la simulation n'est pas suffisante. Il faut pouvoir exprimer ces écarts en pourcentage afin de pouvoir relativiser les différences.

L'erreur relative correspond au pourcentage d'erreur par rapport à une valeur attendue :

$$\varepsilon_{\%} = \left| \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur attendue}}{\text{valeur attendue}} \right|$$

Exemple 1 : extrait « panoramique des dômes » (Bac SI)

À partir des résultats du paragraphe précédent, on peut calculer les erreurs relatives :

- entre le domaine du laboratoire et le domaine attendu du client :

$$\varepsilon_{\%} = \left| \frac{35 - 45}{45} \right| \approx 0,22 = 22 \%$$

- entre le domaine de la simulation et le domaine attendu du client :

$$\varepsilon_{\%} = \left| \frac{24,5 - 45}{45} \right| \approx 0,45 = 45 \%$$

Exemple 2 : extrait « masseur de dos » (Bac SI)

À partir des résultats du paragraphe précédent, on peut calculer l'erreur relative entre le domaine de la simulation et le domaine attendu du client :

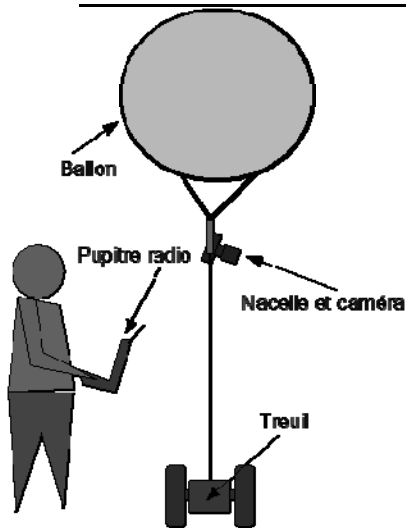
$$\varepsilon_{\%} = \left| \frac{62,8 - 60}{60} \right| \approx 0,046 = 4,6 \%$$

Ainsi on valide que le résultat est bien dans la plage de vitesse $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ à $\pm 10\%$.

Exemple 3 : extrait sous marin « AUV » (Bac SI)

À partir des résultats du paragraphe précédent, on peut calculer l'erreur relative entre le domaine de la simulation et le domaine attendu du client :

$$\varepsilon_{\%} = \left| \frac{75 - 60}{60} \right| = 0,25 = 25 \%$$

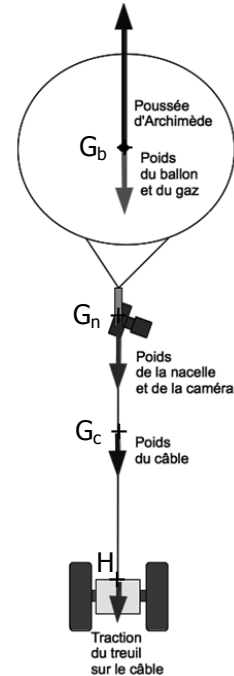
Exercices**Exercice 13.1 – Ballon captif (Bac SI)**

La thermographie par ballon captif (ballon relié au sol par un câble) permet de cibler plus précisément un bâtiment. Elle présente l'avantage de réduire les délais d'intervention, de simplifier les démarches administratives, et elle est sans danger pour les personnes présentes sur la zone d'intervention.

Le ballon, gonflé à l'hélium (gaz porteur plus léger que l'air) transporte une caméra thermique fixée sur une nacelle, l'ensemble est piloté depuis le sol par un système de radiocommande. Les images sont visualisées en temps réel depuis le sol sur un écran de contrôle grâce à un système de transmission vidéo sans fil.

Modélisation des actions mécaniques :

- il est prévu d'utiliser le ballon à une altitude comprise entre 1800 m (altitude de la station de ski) et 1950 m (ballon en vol au bout de 150 m de câble) ;
- le ballon, en altitude au bout de son câble, est soumis à une action mécanique ascensionnelle (poussée d'Archimède) modélisée par une force dirigée vers le haut et s'exerçant au point G_b ;
- l'ensemble {ballon, nacelle + caméra, câble déroulé} est soumis à l'action mécanique du câble enroulé sur le tambour du treuil qui l'empêche de s'envoler et modélisée par une force s'exerçant au point K ;
- les actions mécaniques de la pesanteur sur le ballon, la nacelle + caméra et le câble déroulé sont modélisées par des forces s'exerçant respectivement aux points G_b , G_n et G_c . Prendre $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Définition de la poussée d'Archimède : Tout corps entièrement plongé dans un fluide au repos subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé. Le volume du ballon gélule de type 3 est de $10,5 \text{ m}^3$.

Formule internationale du nivellement barométrique :

$$p_{(h)} = 101325 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \cdot h}{288,15} \right)^{5,255} \quad (\text{en Pa})$$

Cette formule permet, dans une première approche, le calcul de la pression de l'air en pascal à une certaine altitude h (en m), sans avoir besoin de connaître la température.

Loi des gaz parfaits : $\rho = \frac{p}{R_s \cdot T}$ (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

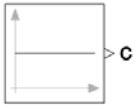
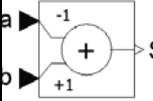
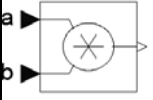
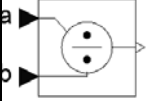
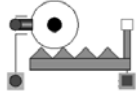
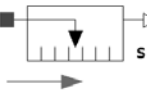
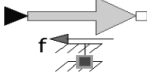
Cette relation permet de déterminer la masse volumique d'un gaz parfait en fonction de la pression p en pascal et de la température T en kelvin. R_s est la constante spécifique en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pour l'air : $R_s = 287,05 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

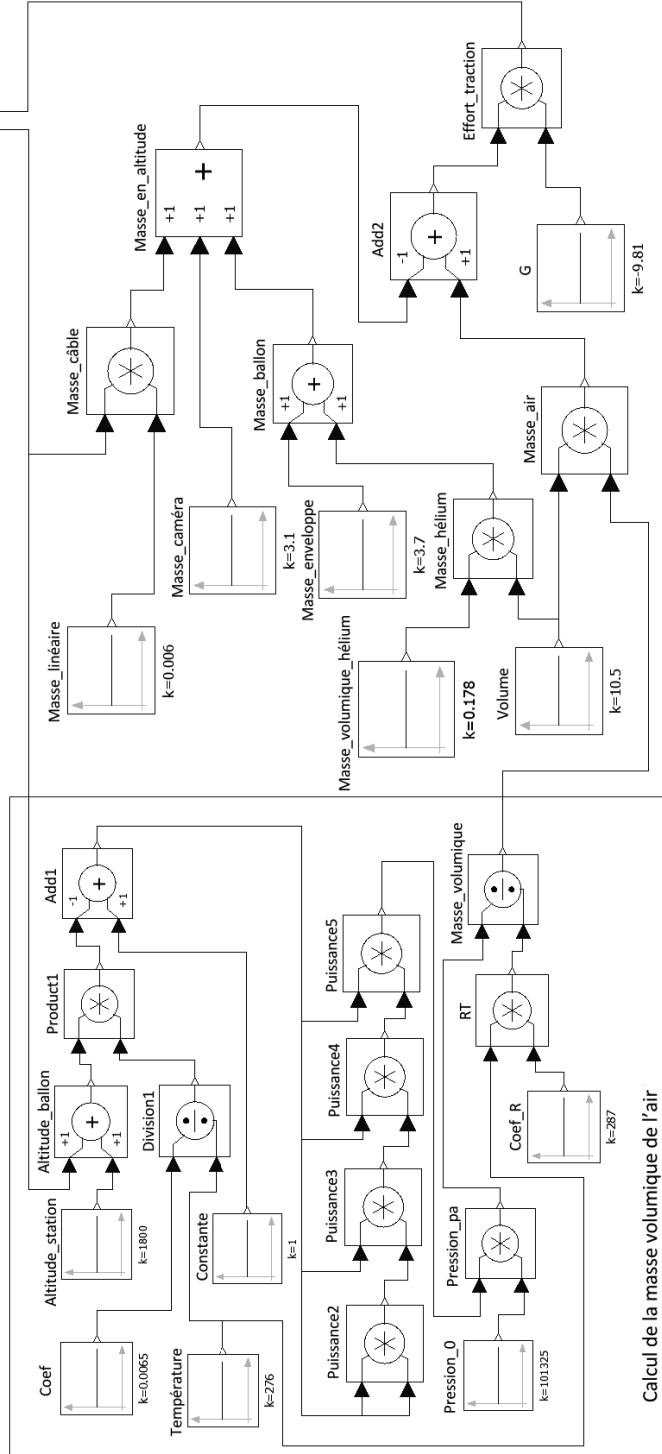
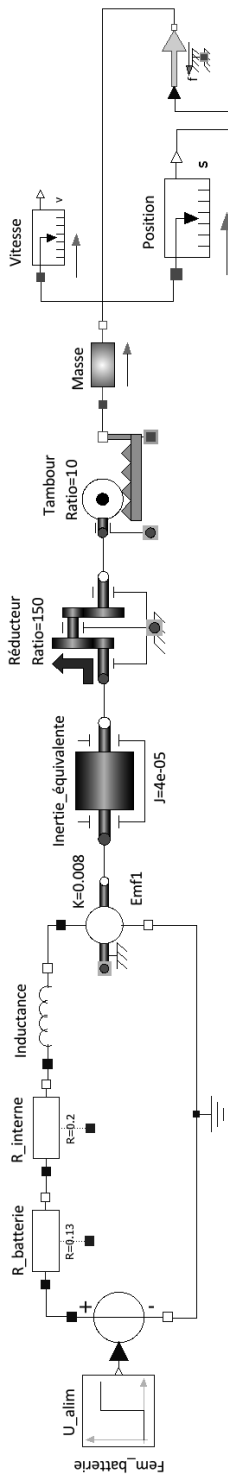
Le **modèle multiphysique** (voir pages suivantes) de la chaîne d'énergie du treuil avec la batterie, le moteur, la transmission et le câble ainsi que le ballon dans l'atmosphère nous permet de prendre en compte tous les paramètres de fonctionnement. Comme tout modèle, il comporte certaines simplifications :

- température constante entre 1800 m et 1950 m ;

- masse volumique et volume de l'hélium constants entre 1800 m et 1950 m ;
- exposant de la formule internationale du nivellement barométrique égal à 5.

Définition des différents opérateurs du modèle multiphysique :

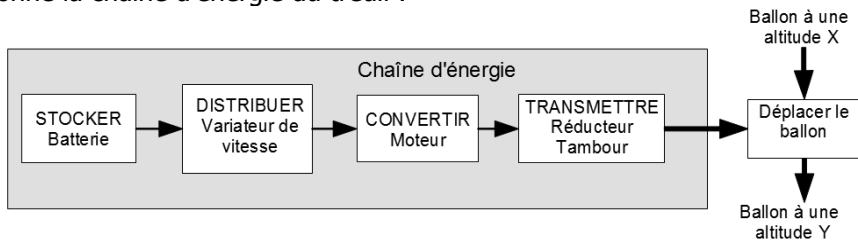
Constante		La valeur de la constante c est définie par le nombre placé en paramètre.
Additionneur / Soustracteur		La valeur en sortie est la somme ou la différence des deux entrées. Ici : $S=b-a$
Multiplieur		La valeur en sortie est le produit des deux entrées. Ici : $S=a \cdot b$
Diviseur		La valeur en sortie est le quotient des deux entrées. Ici : $S=a/b$
Transformateur de mouvement		Transformation de mouvement de rotation en translation (entrée : angle, sortie : distance). La valeur du ratio associé correspond au coefficient $\frac{\text{grandeur d'entrée}}{\text{grandeur de sortie}}$.
Capteur virtuel		Cet élément permet de mesurer une grandeur physique (vitesse, position).
Effort		Cet élément permet de convertir une valeur numérique en force.



Calcul de la masse volumique de l'air

▪ Analyse de la modélisation du treuil

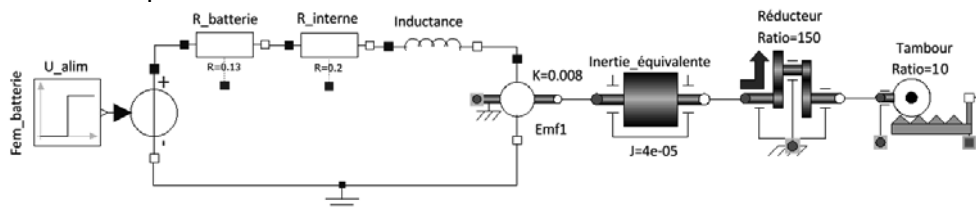
On donne la chaîne d'énergie du treuil :



La tension moyenne d'alimentation du moteur est de 12 V. La vitesse angulaire en sortie du moteur est réduite par un réducteur à engrenages et une transmission par poulies et courroie crantées. Le tambour permet d'enrouler ou de dérouler le câble qui maintient le ballon.

Dans ce type d'utilisation, le système peut être considéré comme étant irréversible.

Modèle comportemental du treuil :



La puissance en entrée du composant nommé tambour peut être caractérisée par une grandeur d'effort de type couple (en N.m) et une grandeur de flux de type vitesse angulaire (en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$).

1. Indiquer la nature et l'unité des deux grandeurs d'effort et de flux correspondant à la puissance en sortie du composant nommé tambour.

Treuil électrique dorsal



Utilisation sur terrain difficile, autonomie réduite.

Caractéristiques techniques :

- structure aluminium-fibre de verre ;
- moteur 250 W ;
- vitesse de rembobinage de 0 à $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$;
- diamètre d'enroulement de 20 cm ;
- capacité : $2 \times 400 \text{ m}$, type Dyneema 150 kg ;
- batteries 36 V – 1 500 mA.h ;
- masse linéaire du câble : $0,003 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$;
- traction : 10 kg ;
- 3 compartiments de rangement ;
- masse en ordre de marche 11,5 kg ;
- sangles avec système anti-transpiration.

Exercice 13.2 – Serre d'élevage de graines de cyclamen (Bac SI 2017)

L'étude est menée sur une serre dans laquelle sont élevées des graines en phase de germination. Après la germination les plans sont transférés dans une autre serre.

Afin de germer dans des conditions optimales, les graines de cyclamen doivent être plantées dans un substrat (mélange de terreau et de petits graviers) dont le taux d'humidité est contrôlé.

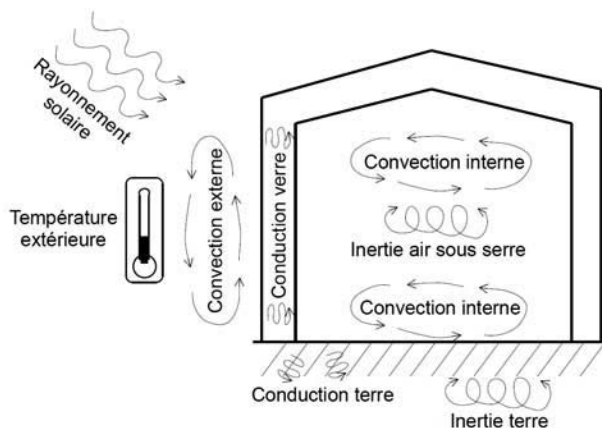


Extrait des contraintes liées à l'élevage des graines de cyclamen :

Fonctions à réaliser	Critères
Contrôler la température et la luminosité	Température ambiante sous serre idéale d'élevage : 14 °C. Température ambiante minimale : 8 °C. Température maximale admissible : ne pas dépasser 30 °C pendant plus de 3 h.

Modélisation d'une serre sans système d'ouverture

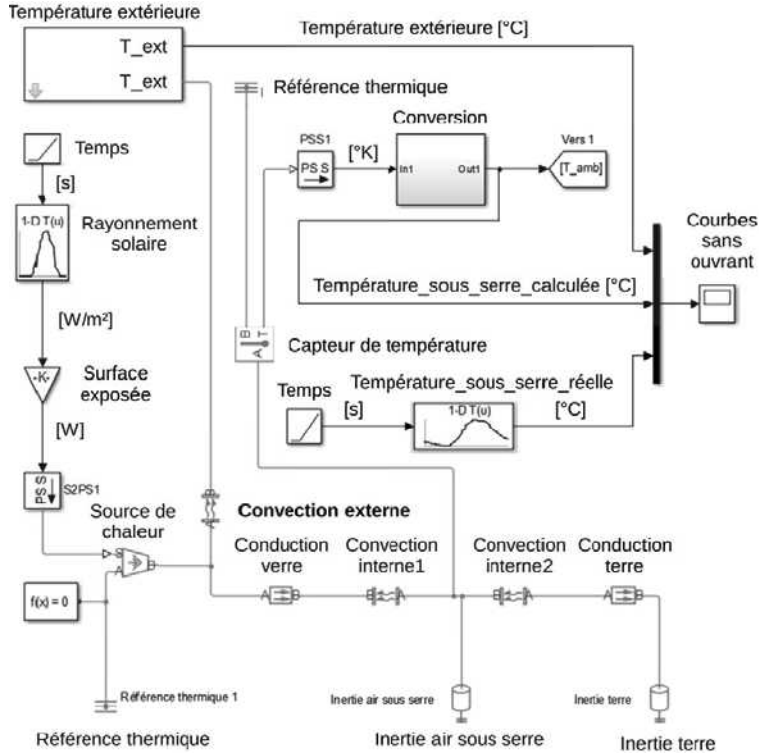
Un schéma de principe des échanges thermiques dans la serre est fourni :



- La conduction est le mode de transfert de chaleur existant dans un milieu donné qui se réalise sans déplacement de matière.
- Le rayonnement est une transmission de chaleur provoquée par la différence de température entre deux corps sans contact physique, mais séparés par un milieu transparent tel que l'air ou le vide.
- La convection désigne l'ensemble des mouvements qui animent un fluide. Elle est caractérisée par un coefficient, appelé « coefficient de convection », qui dépend de la nature du fluide, de sa température et de la manière dont il s'écoule.

- L'inertie thermique d'un matériau peut être définie comme sa capacité à emmagasiner de la chaleur en un temps donné, pour la restituer ensuite.

Le modèle multiphysique permettant de prédire la température de la serre est fourni :



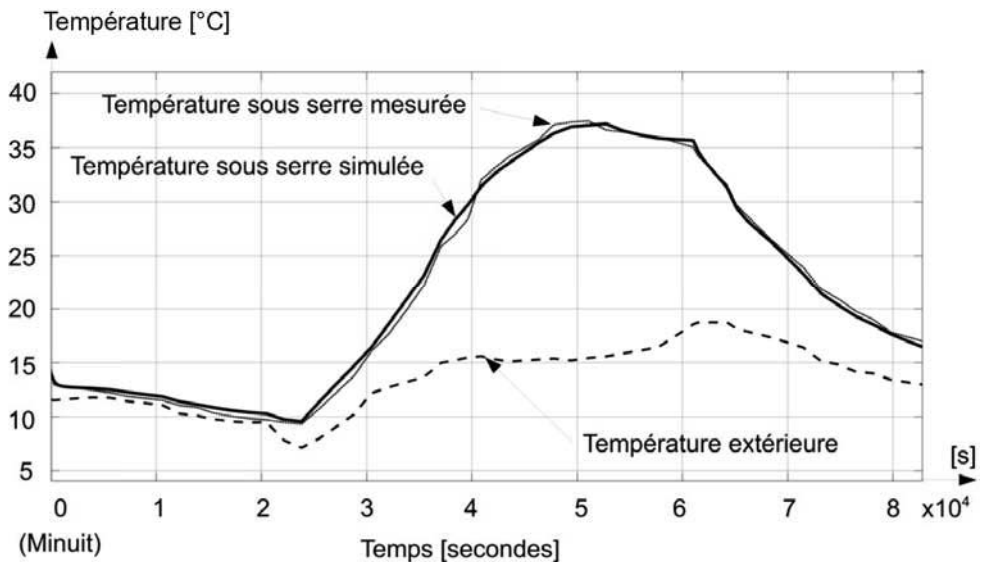
Des valeurs des coefficients de convection notés h sont indiquées :

Type de fluide	Intervalle de h (en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$)
Eau	250 à 1000
Huile	100 à 1000
Hydrogène	150 à 300
Air comprimé	22 à 500
Air atmosphérique	3 à 11
Hydrocarbure	250 à 300
Fréon	1500 à 3500

1. Choisir un intervalle de valeurs pour le coefficient de convection externe de la serre afin de renseigner le modèle multiphysique.

À partir de relevés météorologiques effectués sur site, l'évolution de la température extérieure, le rayonnement solaire ainsi que la température sous serre

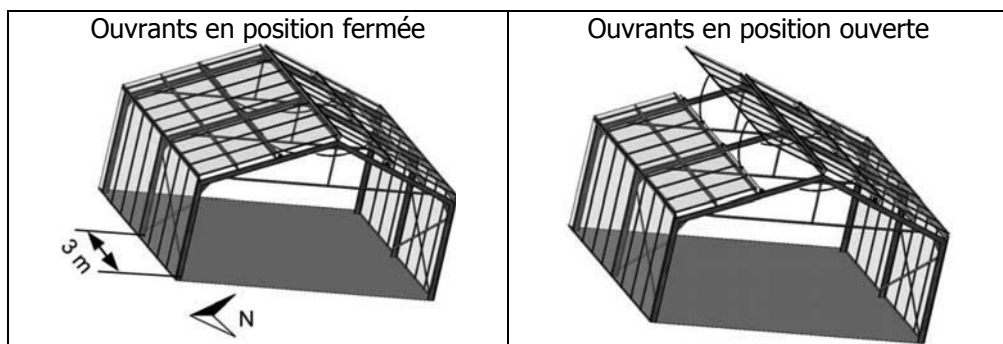
réelle sont fournis en entrée du modèle multiphysique. Le résultat de la simulation est fourni :



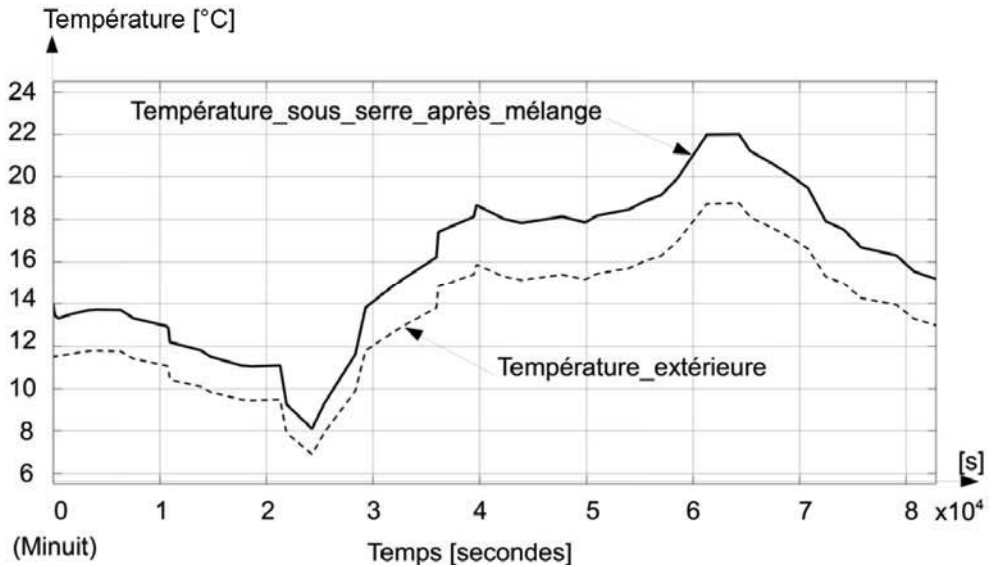
- Déterminer l'écart relatif maximal entre la température sous serre mesurée et la température sous serre simulée. Conclure quant à la validité du modèle.
- Conclure quant au respect des critères énoncés dans le cahier des charges concernant les températures minimales et maximales.

Modélisation de la serre réelle et validation du système d'ouverture

La serre réelle est équipée d'un système d'ouvrants. Vues partielles de la serre (2 travées de 3 m) :



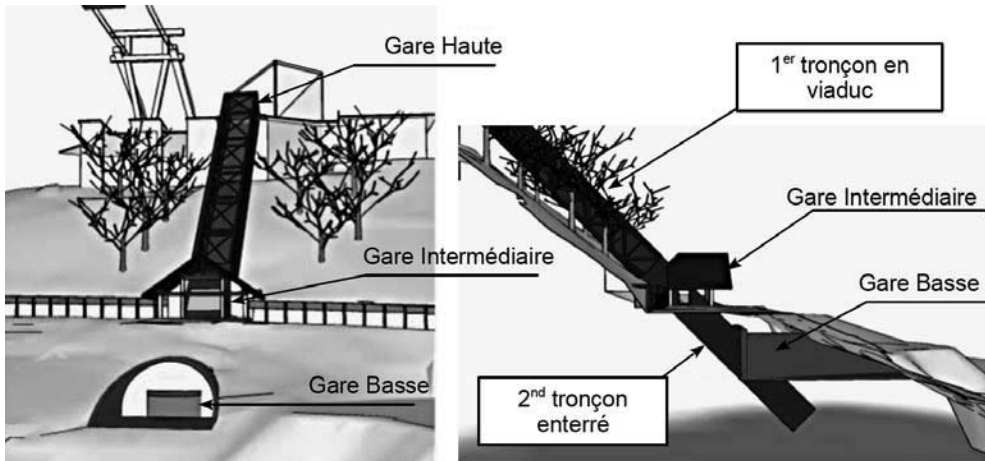
La figure ci-dessous fournit les courbes de températures issues de la simulation (Température_sous_serre_après_mélange) et du relevé météo de l'air extérieur (Température_extérieure) :



4. Déterminer si le système d'ouverture est validé au regard des critères de températures maximales admissibles énoncés dans le cahier des charges.

Exercice 13.3 – Ascenseur de Vaujany (Bac SI 2017)

La station de Vaujany est située dans le massif de l'Oisans. Le village est implanté sur un coteau en pente. Pour relier les différentes infrastructures du village-station, deux ascenseurs y ont été implantés en complément des différents escalateurs :



En cas de rupture des câbles, les ascenseurs sont équipés d'un frein dit « frein parachute » qui permet de bloquer la cabine sur son rail de guidage. Ce frein se

déclenche lorsque le système détecte une survitesse supérieure à 115 % de la vitesse nominale de la cabine (Norme NF EN 81-22).

Extrait de la norme NF EN 81-22. Amortisseurs à caractéristiques non linéaires

Les amortisseurs à accumulation d'énergie à caractéristiques non linéaires doivent respecter les prescriptions ci-dessous.

Lors d'un heurt de l'amortisseur du véhicule équipé d'une charge nominale, et dans le cas d'une chute libre à une vitesse de 115 % de la vitesse nominale :

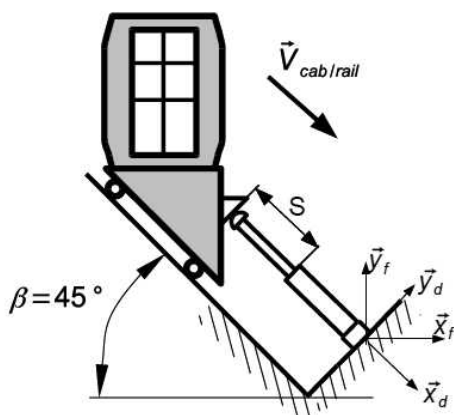
- la valeur de la composante verticale de la décélération ne doit pas être supérieure à 1,0 g ;
- la valeur de la composante horizontale de la décélération ne doit pas être supérieure à 0,5 g ;
- si les valeurs instantanées ci-dessus sont supérieures à 2,5 g pour la composante verticale, et 1,0 g pour la composante horizontale, alors leur durée ne doit pas être supérieure à 0,04 s.

En cas de rupture des câbles à proximité de la gare « basse », la cabine se trouve dans une zone critique dans laquelle le frein parachute n'a pas le temps de se déclencher. Un amortisseur fixé sur le mur bas permet d'arrêter la cabine et de suppléer au frein parachute.

L'étude qui suit a pour but, à partir de trois études, de valider la conformité de l'amortisseur choisi. Un modèle multi-physique permet de choisir au préalable l'amortisseur vis-à-vis des exigences de la norme (étude 1 : modélisation multi-physique). Au moment de l'installation de la cabine sur le rail (avant de relier les câbles tracteurs), un essai de lâcher est effectué sur la cabine munie d'un lest (équivalent aux 18 passagers). Cet essai est filmé et son exploitation vidéo permet de valider la conformité de l'amortisseur (étude 3 : analyse du lâcher réel).

Un essai en laboratoire est réalisé en vue de valider le principe de mesure par exploitation vidéo (étude 2 : validation de la méthode vidéo).

Étude 1 : modélisation multi-physique



Paramétrage de l'étude :

- le début de l'étude correspond au moment où la cabine entre en contact avec l'amortisseur ;
- le vecteur accélération du centre de gravité de la cabine est noté

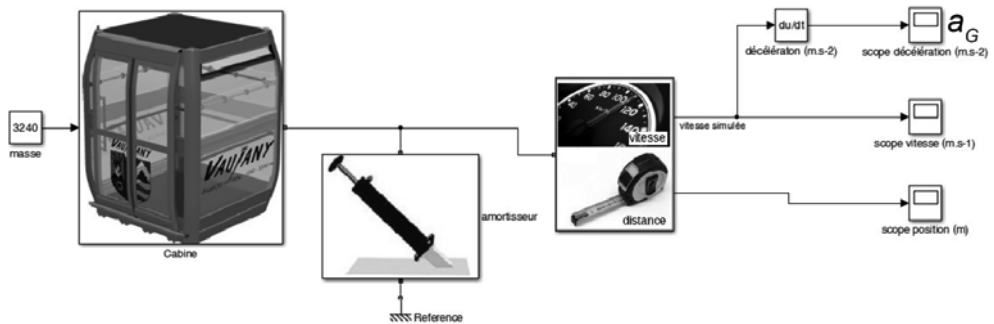
$$\vec{a}_G = a_h \cdot \vec{x}_f + a_v \cdot \vec{y}_f = a_G \cdot \vec{x}_d$$

a_G , l'accélération du centre de gravité de la cabine.

a_{hr} , l'accélération horizontale, projection de \vec{a}_G suivant \vec{x}_f .

a_{vr} , l'accélération verticale, projection de \vec{a}_G suivant \vec{y}_f .

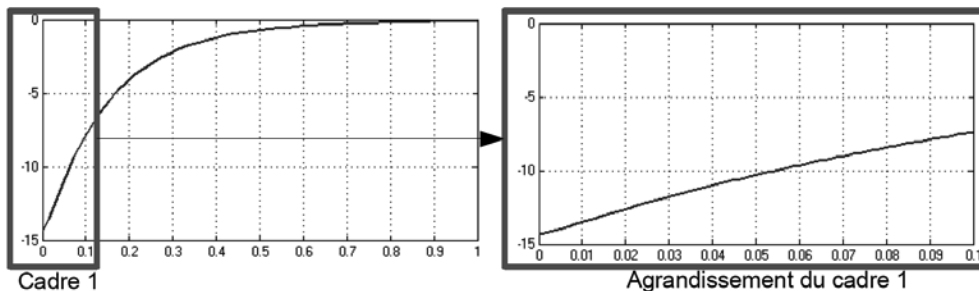
La simulation multi-physique permet d'évaluer l'impact de l'amortissement de la cabine sur les passagers :



Les résultats de la simulation sont obtenus en paramétrant la masse de l'ensemble {cabine+passagers}, la vitesse initiale de la cabine ainsi que les caractéristiques de l'amortisseur.

Dans cette simulation, la résistance au roulement des galets sur les rails ainsi que les frottements secs et visqueux présents dans les différentes parties mobiles du système ne sont pas pris en compte.

Courbe de l'accélération a_G (en $m \cdot s^{-2}$) en fonction du temps t (en s) :

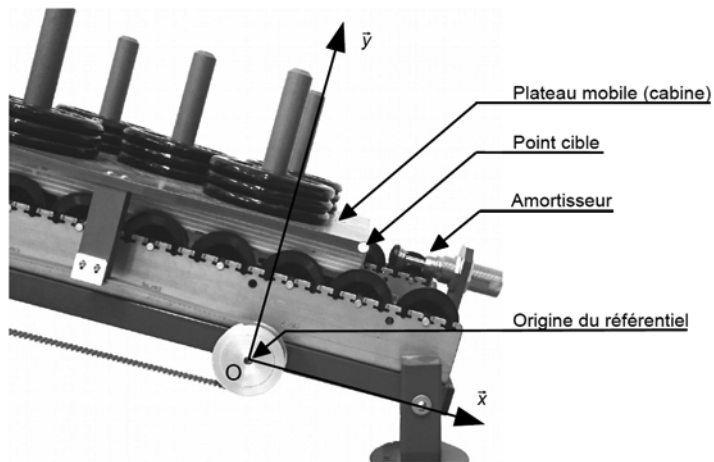


1. En observant les résultats de la simulation (ci-dessus), vérifier à partir du calcul des composantes horizontale et verticale de l'accélération, la conformité de l'amortisseur par rapport à la norme NF EN 81-22.

Étude 2 : validation de la méthode vidéo

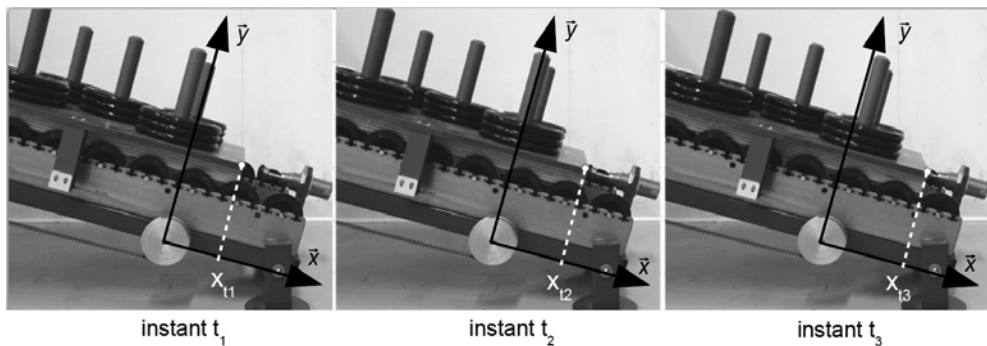
Afin de valider la méthode de mesure (logiciel d'analyse et de pointage vidéo), un essai en laboratoire sur un banc de test est effectué.

Le but de la manipulation est de comparer les données issues du traitement d'image avec celles obtenues par un accéléromètre placé directement sur le plateau mobile.



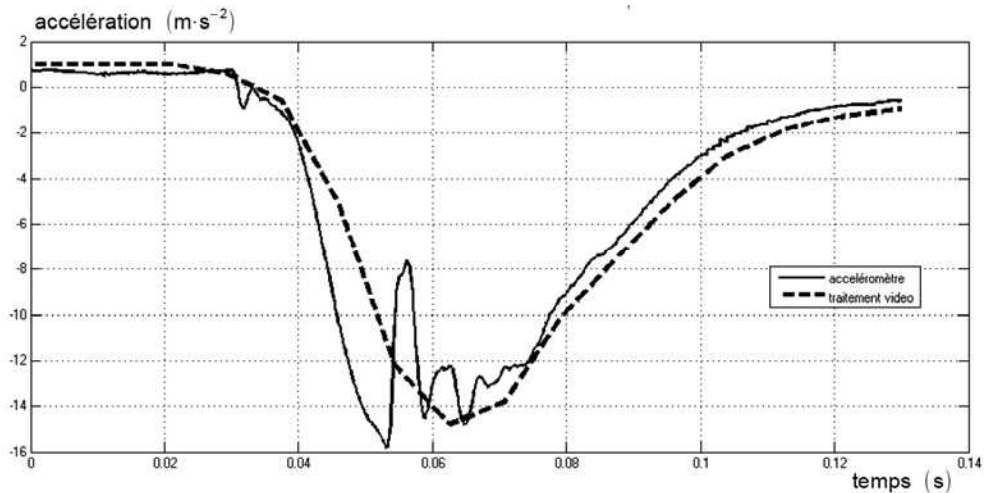
Le pointage vidéo consiste à repérer, pour chaque image de la séquence vidéo, un point cible placé sur le plateau mobile. L'intervalle de temps entre chaque image est toujours le même et est lié à la vitesse d'enregistrement de la caméra utilisée.

La figure suivante présente 3 clichés issus de la vidéo effectuée en laboratoire. La durée Δt entre chacun de ces clichés est supposée constante :



- Exprimer de façon littérale le calcul permettant d'obtenir, à partir des 3 clichés et en fonction de Δt les vitesses moyennes durant les intervalles de temps $[t_1 ; t_2]$ et $[t_2 ; t_3]$. On note ces vitesses v_{12} et v_{23} . Indiquer sous quelle condition ces vitesses moyennes sont très proches des vitesses instantanées.
- Dans l'hypothèse où v_{12} et v_{23} sont les vitesses instantanées du mobile à deux instants décalés de Δt , exprimer le calcul permettant d'obtenir l'accélération moyenne.

L'essai de validation en laboratoire a donné le résultat :



4. En comparant les allures des deux courbes, justifier la validité de la méthode vidéo.

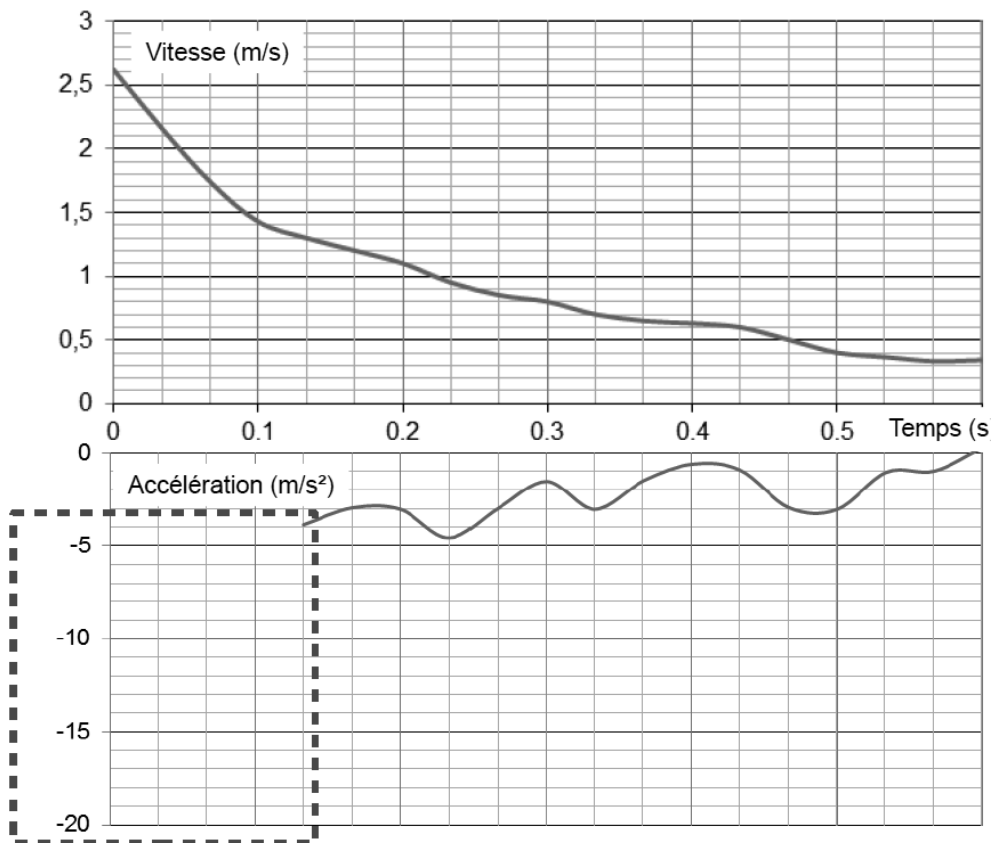
Étude 3 : analyse d'un lâcher réel

L'analyse de la vidéo de l'essai de lâcher de la cabine réelle a donné l'allure de vitesse de la figure ci-dessous. L'amortisseur utilisé est celui déterminé à partir de la modélisation.

La distance à laquelle est placée la cabine est déterminée théoriquement de manière à ce que la cabine atteigne 115 % de la vitesse nominale au moment de l'impact.

5. En analysant la courbe de vitesse de la cabine, retrouver, par calcul, les valeurs des accélérations moyennes :
- au début de l'analyse vidéo ;
 - durant l'intervalle de temps $[0 \text{ s} ; 33 \text{ ms}]$;
 - durant l'intervalle de temps $[33 \text{ ms} ; 66 \text{ ms}]$;
 - et durant l'intervalle de temps $[66 \text{ ms} ; 0,1 \text{ s}]$.

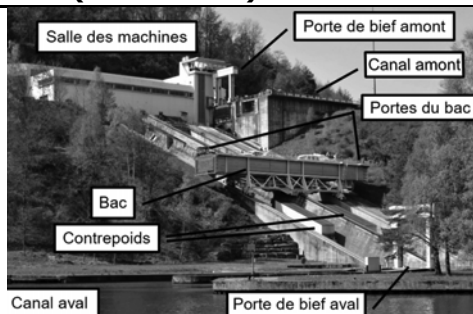
Conclure sur la conformité de l'amortisseur mis en place.



Exercice 13.4 – Ascenseur à bateaux (Bac SI 2018)

Le canal de la Marne au Rhin est jalonné par plus de 150 écluses, 3 tunnels, plusieurs ponts-canaux et par 2 ouvrages remarquables, dont l'ascenseur à bateaux, de Saint-Louis-Arzviller (57).

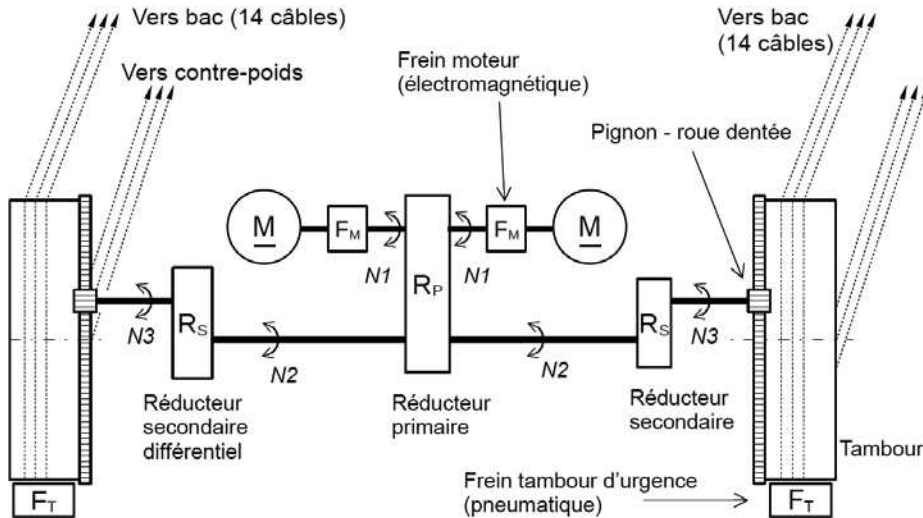
Lors de sa mise en service, en 1969, le il a remplacé 17 écluses, permettant de franchir une dénivelée de 44,50 mètres.



La solution à deux moteurs (présentée page suivante) a été choisie de manière à pouvoir achever la manœuvre du plan incliné en cas de panne d'un moteur.

La fréquence de rotation de ces moteurs, notée N_{moteur} , est un paramètre influent du système.

La motorisation est réalisée à l'aide de deux machines à courant continu :



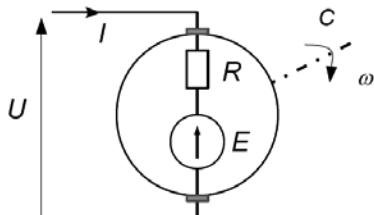
Les paramètres suivants seront utilisés dans le modèle multiphysique :

- rapport de réduction du réducteur primaire, $R_{rp} = 0,18$;
- rapport de réduction du réducteur secondaire, $R_{rs} = 0,15$;
- nombre de dents du pignon qui entraîne la couronne du tambour, $Z_{pignon} = 14$ dents ;
- nombre de dents de la couronne du tambour, $Z_{roue} = 182$ dents ;
- diamètre du tambour (enroulement des câbles), $D_T = 3,62$ m.

De plus, les caractéristiques nominales des actionneurs (moteurs à courant continu), fournies par le constructeur, sont les suivantes :

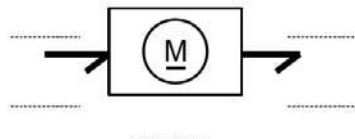
$P_u = 88$ kW (puissance utile) ; $U_N = 400$ V ; $I_N = 243$ A ; $N_{moteur-N} = 1\,500$ tr·min⁻¹ ;
 $R = 0,12$ Ω (résistance induit) ; $L = 3$ mH (inductance induit) ;
 $J_{rot} = 0,65$ kg·m² (moment d'inertie du rotor).

Le modèle retenu pour la machine à courant continu est rappelé :

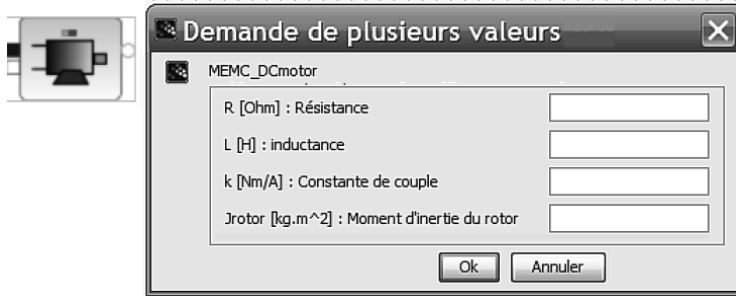


Résistance de l'induit : R en Ω
 Force électromotrice : $E = k \cdot \omega$
 avec ω : vitesse angulaire en rad·s⁻¹
 Couple moteur : $C = k \cdot I$

1. Placer sur le synoptique énergétique du moteur les éléments U , ω , I , C , η (ω : vitesse angulaire ; C : Couple moteur ; η : rendement).



2. Renseigner le modèle d'un des deux moteurs :



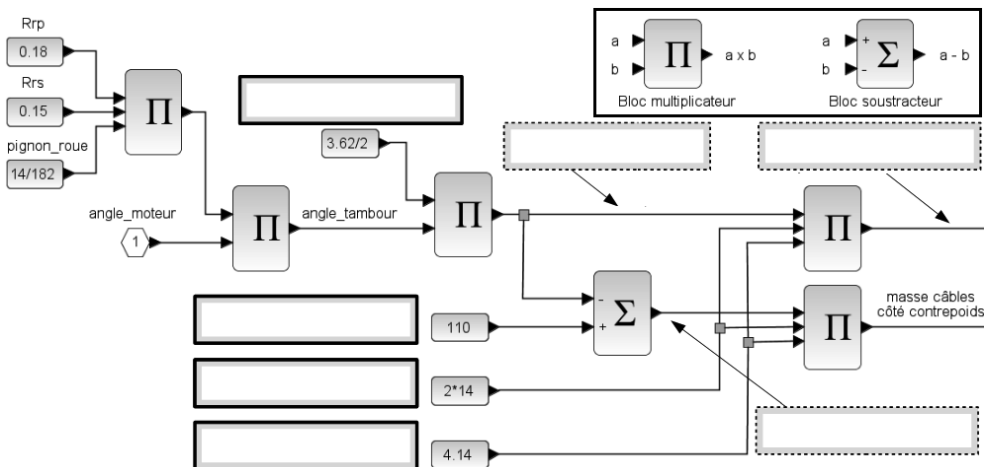
Chacun des 28 câbles a une longueur de 110 mètres. Leur masse linéaire, notée m_l , est de $4,140 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$.

3. Calculer la masse, notée m_{cables} , de l'ensemble des câbles.

La modélisation de l'influence de la masse des câbles fait intervenir les éléments suivants :

- longueur des câbles ;
- longueur « enroulée » côté bac ;
- rayon des tambours ;
- nombre de câbles ;
- longueur restante, côté contrepoids ;
- masse linéique des câbles ;
- masse des câbles, côté bac.

4. Compléter, à l'aide des éléments précédents, l'extrait du modèle numérique :

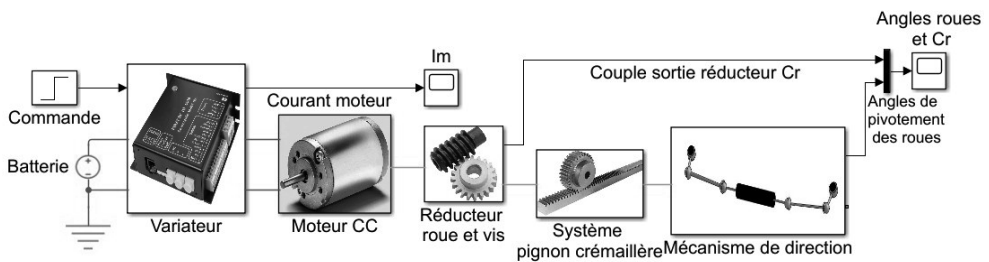


Exercice 13.5 – Navette autonome (Bac SI 2018)

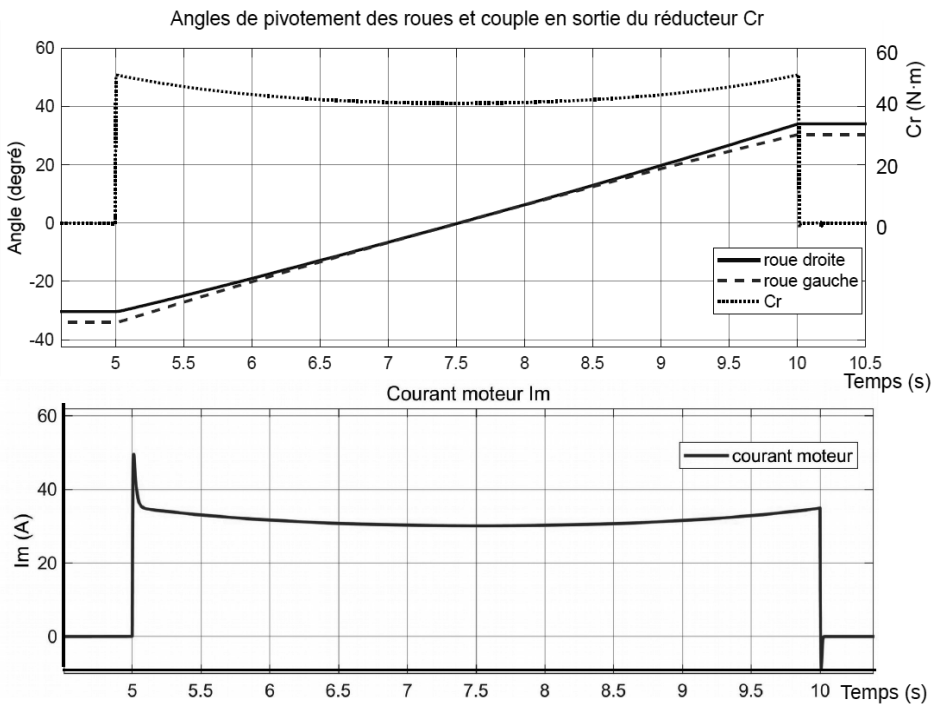
Lors de l'aménagement du quartier de la Confluence, la métropole de Lyon a eu pour objectif de développer un projet durable, où se mêlent innovation technique, environnementale et architecturale.

Deux navettes Arma, véhicules sans conducteur et 100 % électrique, desservent les entreprises, centres commerciaux et restaurants. Silencieuses, sans rejet polluant, les navettes Arma s'inscrivent totalement dans l'esprit de l'éco-quartier lyonnais.

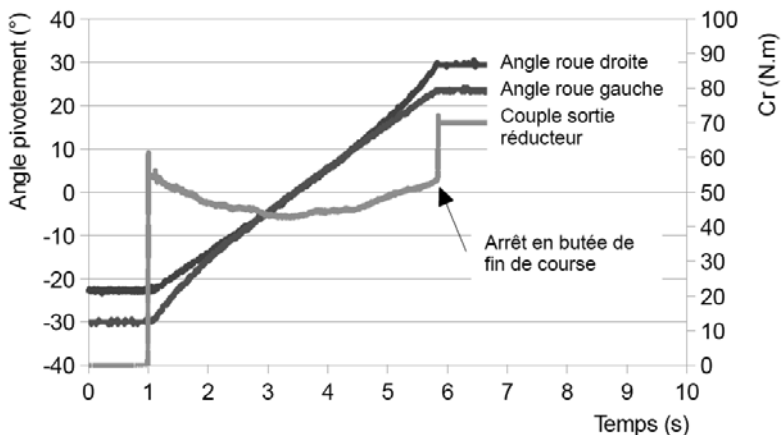
Afin d'analyser le comportement du mécanisme de direction de la navette Arma pour tous les angles de braquage, un modèle multi physique a été réalisé :



L'exploitation de ce modèle permet d'obtenir les résultats de simulation :



Les résultats des mesures effectuées sur la navette Arma sont donnés :



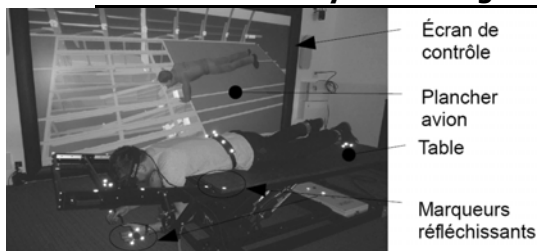
On souhaite évaluer la validité du modèle en comparant les évolutions des grandeurs physiques, les décalages temporels au sein d'un essai et les écarts d'amplitudes.

1. En comparant les angles de pivotement des roues de la simulation et des mesures effectuées sur la navette, analyser la validité du modèle d'un point de vue cinématique.
2. Relever les valeurs extrêmes du couple en sortie de réducteur obtenues expérimentalement et par simulation. Compléter la première ligne du tableau :

	Valeurs minimales		Valeurs maximales	
	mesurée	simulée	mesurée	simulée
Couple réducteur C_r en N.m				
Écart relatif en %				

3. Calculer l'écart relatif (en %) entre les valeurs mesurées et simulées. Compléter le tableau ci-dessus. Justifier ces écarts et analyser la validité du modèle du point de vue des actions mécaniques.

Exercice 13.6 – Système tangible déployable (Bac SI 2017)



L'objectif d'Airbus est de placer virtuellement ses opérateurs dans un avion en situation de montage, réglage, démontage, dans des postures et des conditions d'immersion reproduisant des situations réelles.

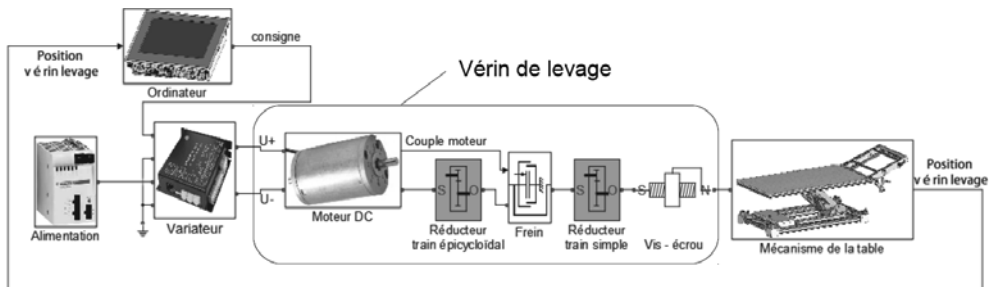
La table sert à mettre l'opérateur dans une position identique à celle qu'il aurait en situation de travail. L'opérateur est équipé d'un masque qui lui permet de visualiser la scène virtuelle dans laquelle il est immergé.

Une bielle et deux vérins électriques permettent de déplacer la table en hauteur et de l'incliner.

Extrait du cahier des charges :

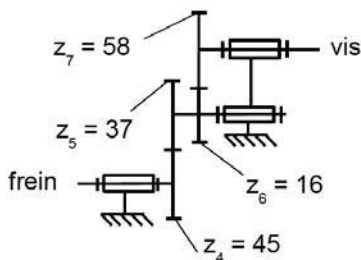
Fonction	Énoncé	Critère	Niveau	Flexibilité
F1	Commander la position de la table	Hauteur	De 250 mm à 600 mm	± 5 mm
		Inclinaison	De -20° à $+20^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
		Temps de déplacement	30 s	maximale

Pour savoir comment commander les vérins (asservis en position, ou non), le comportement dynamique du système doit être connu. Afin de déterminer celui-ci par simulation, un modèle multi-physique est élaboré pour simuler le mouvement vertical de la table :



Le vérin de levage a été décomposé suivant sa conception en un moteur à courant continu, deux réducteurs et une transformation vis-écrou. Entre les deux réducteurs, un frein à ressort de torsion en contact avec le bâti exerce un couple de freinage lorsque le couple issu du moteur est insuffisant.


La transmission mécanique entre le frein et la vis est détaillée.



Z_4, Z_5, Z_6, Z_7 : nombre de dents des roues d'engrenages

Les propriétés de cette partie dans le modèle multi-physique se présente ainsi :

Paramétrage du réducteur 2 :

ω_1

 ω_2

$\omega_1 = K \cdot \omega_2$

ω_1 : vitesse d'entrée
 ω_2 : vitesse de sortie
K : rapport de transmission (Gear ratio)

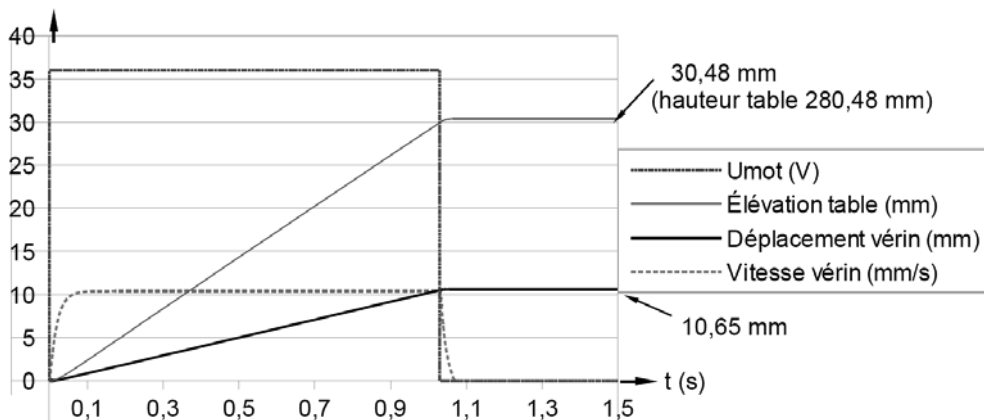
Parameters

Gear ratio:

1. Déterminer la valeur de K à saisir dans le modèle multi-physique.

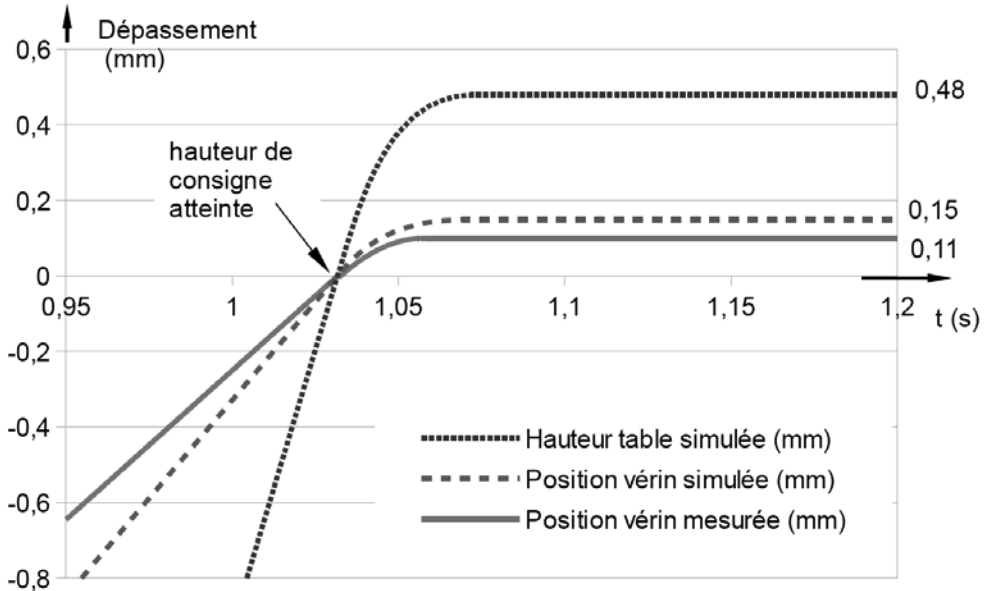
Pour mettre en position la table, plusieurs stratégies se présentent : réaliser un asservissement de la position ou plus simplement une commande de marche avec arrêt dès que la position cible est atteinte. Le modèle multi-physique a été utilisé pour étudier, d'abord, la réponse du système non asservi à un échelon de commande de position.

Les courbes ont été obtenues dans ce cas de simulation, pour une commande de levage de la table (non chargée) de 250 à 280 mm, à pleine tension dès $t = 0$ s :



2. Analyser l'écart sur la précision de la hauteur de table obtenue par simulation à partir du modèle multi-physique et celle spécifiée dans le cahier des charges. Déterminer si la commande d'arrêt, lorsque la position est atteinte, suffit pour respecter le cahier des charges.

Le déplacement du vérin a été mesuré et comparé avec celui obtenu par la simulation précédente :



3. Relever l'écart entre les résultats de position du vérin obtenus par simulation et ceux obtenus par mesure. Proposer une modification à apporter sur le modèle multi-physique au niveau du couple de freinage du frein pour réduire cet écart. Indiquer l'influence de cette modification sur le déplacement simulé de la table.

➔ Solutions

Exercice 13.1 – Ballon captif

1. La puissance disponible à la sortie du tambour est une puissance mécanique de translation, caractérisée par le produit d'une force (grandeur d'effort : unité N) et d'une vitesse linéaire (grandeur de flux : unité $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).
2. Le diamètre d'enroulement du tambour est de 20 cm, ce qui correspond à un rayon d'enroulement de 0,1 m.

La longueur d , d'un arc de cercle de rayon R et d'angle α (en radian), s'exprime par : $d = R \cdot \alpha$

Pour le tambour, le ratio angle/distance est donc :

$$\text{ratio} = \frac{\alpha}{d} = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ m}^{-1}$$

3. Le rayon du tambour est ici considéré constant alors qu'en réalité, il augmente lorsque le câble s'enroule, et diminue lorsque le câble se déroule.

4. La masse du câble suspendu sous le ballon est obtenue en multipliant la longueur de câble déployée par sa masse linéaire (ou linéique), qui, d'après le modèle multiphysique est de $0,006 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$:

$$m_{\text{câble déployé}} = 0,006 \times l_{\text{câble déployé}}$$

5. Elle est calculée à partir de la masse volumique de l'air multipliée par le volume d'air déplacé, donc le volume du ballon ($10,5 \text{ m}^3$ pour un ballon de type gélule 3).

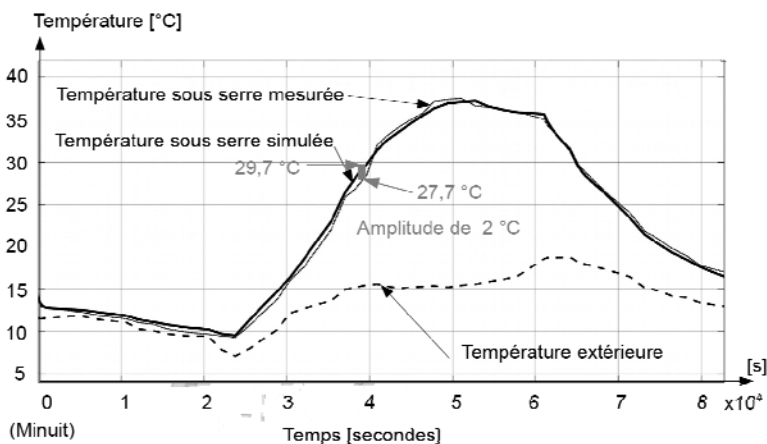
6. « Masse_en_altitude » permet de calculer la somme de la masse du câble, de la masse de la caméra (qui est composée de celle de la caméra, ajoutée à celle de la nacelle et de différents accessoires) et de la masse du ballon, soit la somme de toutes les masses en élévation au-dessus du sol.

Exercice 13.2 – Serre d'élevage de graines de cyclamen

1. La convection externe se fait au contact de l'air extérieur et des parois verticales de la serre.

Nous prendrons donc la valeur pour l'air atmosphérique $h = 3 \text{ à } 11 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$.

2. Sur l'axe des abscisses, on peut lire à l'instant $3,9 \times 10^4 \text{ s}$ (soit $\frac{3,9 \times 10^4}{3600} = 10,8$ heures) que l'écart entre la température extérieure et la température réelle sous serre est maximal : $29,7 \text{ °C} - 27,9 \text{ °C} = 2 \text{ °C}$.



$$\text{Calcul de l'écart relatif : } \left| \frac{29,7 - 27,7}{27,7} \right| = 7,2\%$$

La température sous serre simulée oscille autour de la température réelle avec un écart relatif maximal de 7,2 %. Le modèle est donc validé.

3. Le critère de température minimale est respecté car la température sous serre ne descend pas en dessous 8°C.

Le critère de température maximale n'est pas respecté car la température reste supérieure à 30 °C trop longtemps :

environ $2,45 \times 10^4$ s (soit $\frac{2,45 \times 10^4}{3600} = 6,8$ heures = 6 heures et 49 minutes).

Même si ce critère n'est pas discriminant, l'écart avec la température idéale d'élevage (14 °C) est trop important.

En l'état la serre ne convient pas.

4. Nous pouvons voir sur la courbe que la température sous serre après mélange est au minimum de 8°C et au maximum de 22 °C. Elle est donc comprise entre les bornes imposées par le cahier des charges.

L'installation d'un système d'ouvrants tels que modélisés permettrait de répondre au cahier des charges.

Les écarts avec la température idéale d'élevage sont cependant assez importants.

Exercice 13.3 – Ascenseur de Vaujany

1. Composante horizontale :

$$a_h = a_G \cdot \cos(\beta) = -14 \times 0,707 = -9,89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ donc } a_h > 0,5 \text{ g (cf norme)}$$

Composante verticale :

$$a_v = a_G \cdot \sin(\beta) = -14 \times 0,707 = -9,89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ donc } a_v \approx 1 \text{ g}$$

La contrainte la plus défavorable correspond à la composante horizontale. Comme celle-ci est supérieure à 0,5 g, il faut vérifier que la durée correspond à une accélération supérieure à 1 g n'excède pas 40 ms : Sur la courbe (agrandissement du cadre 1), à $t = 40$ ms, on relève une accélération de $a_{G(40\text{ms})} = -11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, soit $a_{h(40\text{ms})} = a_{G(40\text{ms})} \cdot \cos(\beta) = -11 \times 0,707 = -7,78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ d'où $a_{h(40\text{ms})} \approx 0,8 \text{ g} < 1 \text{ g}$.

Donc on en déduit que la norme est respectée.

2. En considérant que les instants de la prise des clichés soient rapprochés (Δt petit), alors on peut écrire :

$$v_{12} = \frac{x_{t2} - x_{t1}}{\Delta t} \text{ et } v_{23} = \frac{x_{t3} - x_{t2}}{\Delta t}$$

En considérant que Δt tend vers 0, alors le calcul de la vitesse moyenne est très proche de la vitesse instantanée.

3. De la même manière on peut calculer l'accélération moyenne sur une durée du mouvement Δt : $a_{\text{moy}} = \frac{v_{23} - v_{12}}{\Delta t}$

4. Le traitement vidéo de l'essai permet d'obtenir une image relativement fidèle de l'accélération. Le décalage observé est lié au mode de calcul vu à la question 3.

La méthode est globalement valide. La durée Δt semble donc être suffisamment petite pour que l'accélération moyenne calculée soit proche de l'accélération instantanée mesurée.

5. À partir de l'équation de l'accélération moyenne trouvée à la question précédente :

$$a_{\text{moy}} = \frac{v_{23} - v_{12}}{\Delta t}$$

- Pour l'intervalle de temps [0 ; 33 ms], l'accélération moyenne $a_{\text{moy}1}$ vaut :

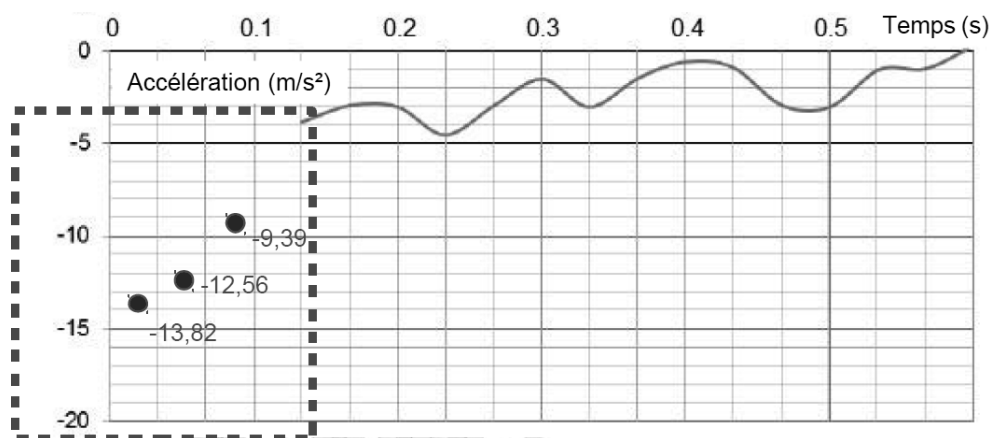
$$a_{\text{moy}1} = \frac{2,15 - 2,61}{33 \text{ ms} - 0} = -13,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

- Pour l'intervalle de temps [33 ms ; 66 ms], l'accélération moyenne $a_{\text{moy}2}$ vaut :

$$a_{\text{moy}2} = \frac{1,74 - 2,15}{66 \text{ ms} - 33 \text{ ms}} = -12,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

- Pour l'intervalle de temps [66 ms ; 0,1 s], l'accélération moyenne $a_{\text{moy}3}$ vaut :

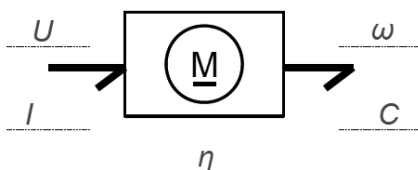
$$a_{\text{moy}3} = \frac{1,43 - 1,74}{0,1 \text{ s} - 66 \text{ ms}} = -9,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$



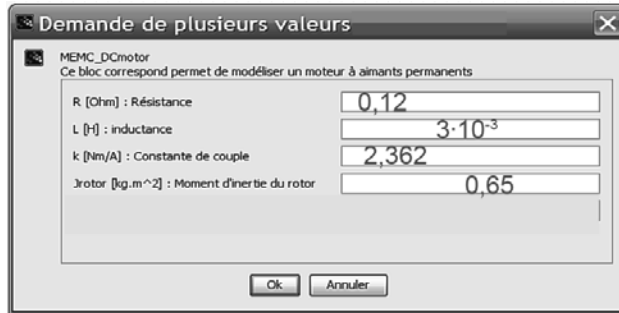
L'accélération a_G calculée à partir de l'analyse vidéo est inférieure à celle trouvée par simulation donc l'amortisseur mis en place rend l'équipement conforme à la norme.

Exercice 13.4 – Ascenseur à bateaux

1.



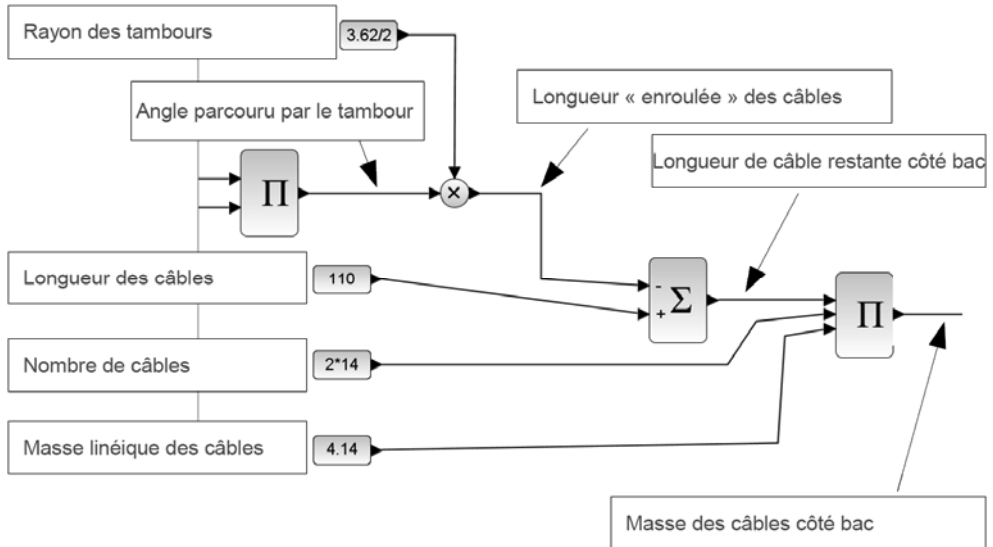
2. Renseigner le modèle d'un des deux moteurs :



3. Soit n_{cables} le nombre de câbles et l_{cables} la longueur des câbles.

$$m_{\text{cables}} = n_{\text{cables}} \cdot l_{\text{cables}} \cdot m_l = 28 \times 110 \times 4,14 = 12\,751 \text{ kg}$$

4.



Exercice 13.5 – Navette autonome

1. En examinant les courbes de variation des angles de pivotement des roues, on remarque que les résultats de la simulation sont proches des résultats expérimentaux : les valeurs extrêmes des angles sont comparables et l'évolution de la grandeur physique en fonction du temps est cohérente.

2.

	Valeurs minimales		Valeurs maximales	
	mesurée	simulée	mesurée	simulée
Couple réducteur C_r en N.m	43	41	54	51
Écart relatif en %	4,5 %		5,5 %	

3. En comparant les résultats expérimentaux et simulés, on constate que le modèle est assez fidèle au comportement mesuré sur la navette autant d'un point de vue de la cinématique de la direction, que du couple en sortie du réducteur. Les écarts constatés au niveau du couple en sortie de réducteur peuvent être expliqués par une sous évaluation du couple résistant des pneumatiques sur le sol. On remarque aussi une augmentation brutale du couple moteur lors de l'arrivée en butée de la direction. Cette butée n'a pas été modélisée dans le modèle de simulation.

Exercice 13.6 – Système tangible déployable

1. Le rapport de transmission entre le frein et la vis est de :

$$r = \frac{1}{K} = \frac{\omega_{\text{vis}}}{\omega_{\text{frein}}} = \frac{Z_4}{Z_5} \cdot \frac{Z_6}{Z_7} = \frac{45}{37} \times \frac{16}{58} = \frac{1}{2,98}, \text{ soit } K = 2,98$$

2. Pour une consigne de 280 mm, la hauteur atteinte est de 280,48 mm soit un écart de 0,48 mm.

La tolérance de position est de ± 5 mm en hauteur. Ce mode de commande donne une précision de positionnement acceptable au regard du cahier des charges.

3. On note un arrêt plus rapide et plus court (0,11 mm au lieu de 0,15 mm) que sur la simulation. L'action réelle du frein semble plus importante que celle modélisée. Le couple de freinage pourrait être augmenté. Le déplacement simulé de la table sera donc plus court (meilleure précision de positionnement).

Ce livre s'adresse aux élèves de **Première** et **Terminale** qui ont choisi de suivre la **spécialité de Sciences de l'Ingénieur**.

Il met en évidence les **fondamentaux du cours** et reprend la plupart des champs technologiques abordés par des systèmes réels, supports de **sujets de baccalauréat** :

- Analyse et modélisation des systèmes
- Énergie et grandeurs physiques
- Mécanique et électricité
- Systèmes numériques, acquisition et programmation
- Actionneurs
- Communication et réseaux
- Asservissements
- Modélisations multiphysiques et écarts.

Chaque chapitre est décomposé en 3 parties :

- les notions de cours
- des exercices variés (dont une majorité est issue de sujets de bac)
- les corrigés détaillés.