

ASSOCIATION MODULATEUR – CONVERTISSEUR

HACHEUR – MOTEUR A COURANT CONTINU

BINOME – 1 SEANCE

1 PRESENTATION

Objectifs

L'objectif de ce TP est d'analyser l'association hacheur – moteur à courant continu en utilisant un modèle multiphysique, c'est-à-dire :

- analyser le fonctionnement d'un hacheur série ;
- comprendre la nécessité d'autres types de hacheurs.

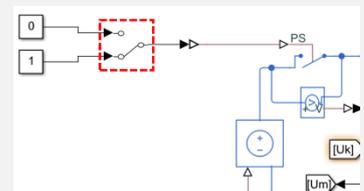
Activité 0 : travail préliminaire

- Copier le fichier « ModelisationHacheur.zip » sur votre espace personnel.
- Décompresser** le fichier.
- Ouvrir Matlab.

2 HACHEUR MANUEL...

Activité 1 : interrupteur commandé manuellement

- Ouvrir le fichier Decouverte.slx et lancer la simulation.
- Visualiser la vitesse de rotation du moteur.
- Visualiser la tension aux bornes de l'interrupteur (peut ne pas être exploitable...).
- Cliquer sur l'interrupteur pour visualiser l'évolution des grandeurs physiques.



- Quelle est la vitesse maximale du moteur grâce à l'interrupteur ?
- Comment obtenir la moitié de la vitesse maximale ?
- Vous venez de créer votre premier hacheur... Expliquer le rôle et le fonctionnement d'un hacheur.
- Proposer une solution pour inverser le sens de rotation du moteur.

3 INTERRUPTEUR COMMANDE

Activité 2 : interrupteur commandé

- Ouvrir le fichier Hacheur_01.slx

L'interrupteur commandé a été remplacé par un transistor MOSFET. Le principe est le même sauf que l'interrupteur est maintenant commandé électriquement par un signal de valeur 0 ou 1.

- Lancer la simulation et visualiser les signaux.

- ❑ **Influence de la période**
 - Quel est le sens physique de « Période » dans le bloc signal de commande du transistor ?
 - Quel est le sens physique de « Pulse Width » dans le bloc signal de commande du transistor ?
 - Quelle est l'allure du signal pour une période de 0,1 sec ? Quelle est l'influence sur la vitesse de rotation ?
 - Quelle est l'allure du signal pour une période de 0,025 sec ? Quelle est l'influence sur la vitesse de rotation ?
 - Quelle est l'allure du signal pour une période de 0,001 sec ? Quelle est l'influence sur la vitesse de rotation ?
 - Quelle est l'allure du signal pour une période de 0,0001 sec ? Quelle est l'influence sur la vitesse de rotation ?
 - Conclure.
- ❑ **Influence de la période de hachage**
 - Quelle est la valeur de la vitesse de rotation pour une « Pulse Width » de 99 % ?
 - Quelle est la valeur de la vitesse de rotation pour une « Pulse Width » de 50 % ?
 - Quelle est la valeur de la vitesse de rotation pour une « Pulse Width » de 33 % ?
 - Conclure.
- ❑ Proposer une solution pour inverser le sens de rotation du moteur.

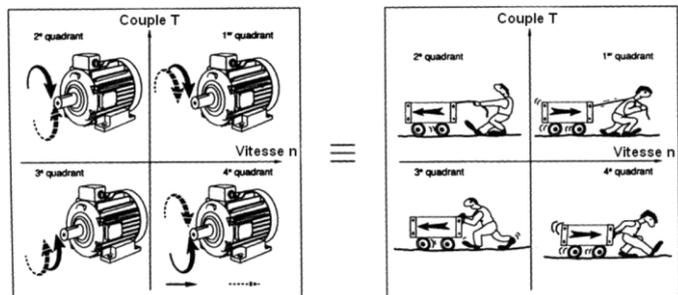
- Activité 3 (Facultative)**
- ❑ Pour une période de 0,001 s et un rapport cyclique de 5%, visualiser le courant traversant le moteur. Commenter.
 - ❑ Ajouter une inductance de 200 mH en série avec le moteur. Commenter.

4 LE HACHEUR 4 QUADRANTS

Le hacheur précédent est appelé hacheur série. Il permet de faire tourner un moteur dans un sens.

Cependant il existe d'autres cas d'utilisation possibles :

- le moteur tourne dans en sens en entrainant une charge ;
- le moteur tourne dans le sens inverse en entrainant une charge ;
- la charge entraine le moteur (qui retient la charge) ;
- la charge entraine le moteur, dans le sens inverse (le moteur retient la charge).

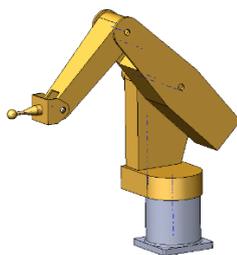


5 PRESENTATION DU SYSTEME REEL

5.1 Le robot Ericc3

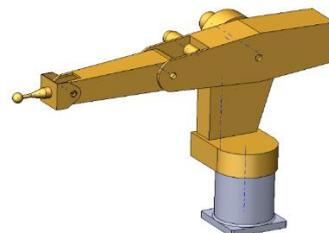
Le Robot Ericc3 est un robot qui présente un caractère anthropomorphique. Il est constitué de 5 axes asservis en position. On considérera deux configurations :

Configuration 1 : bras replié



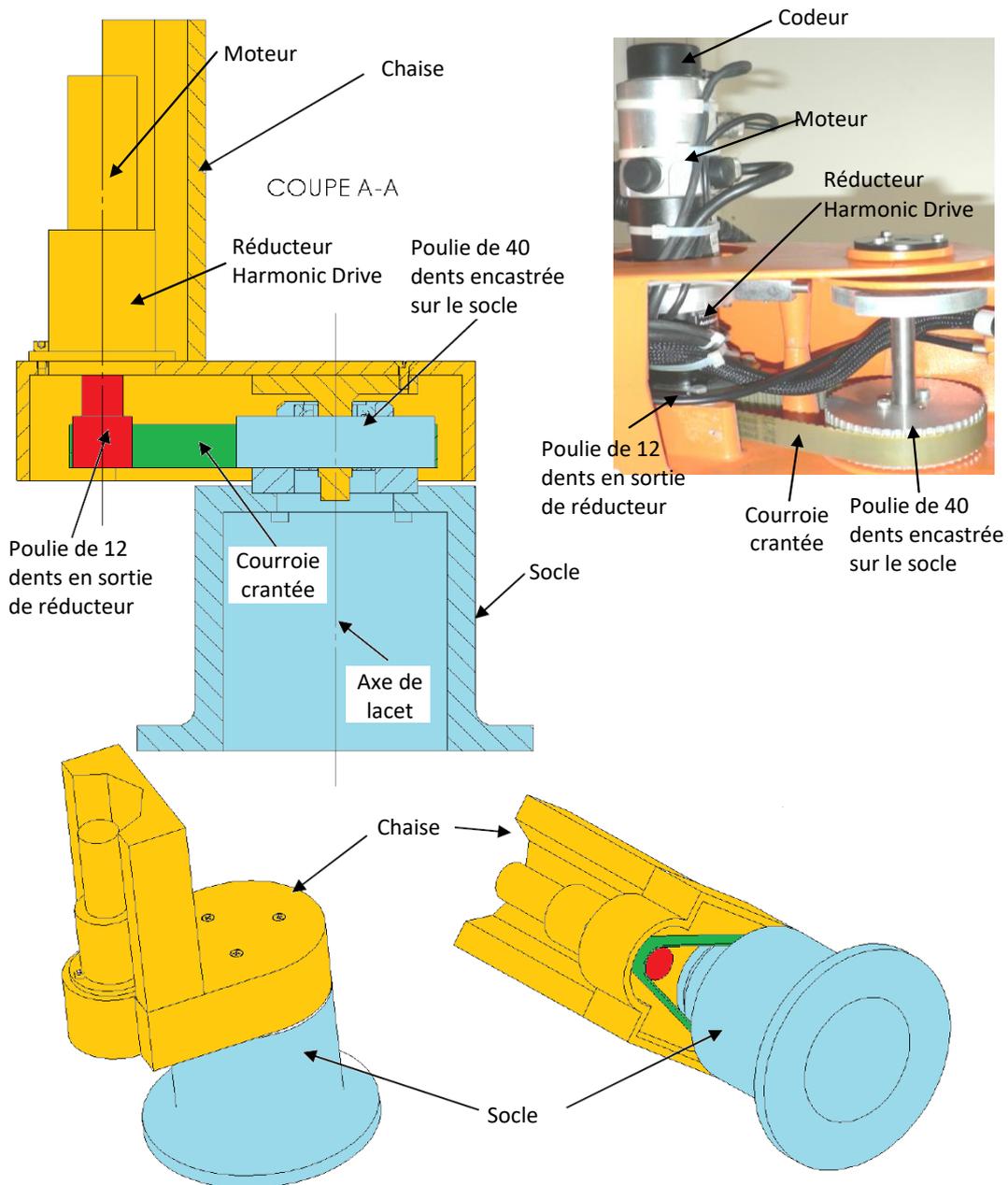
Lacet = 0° ; Epaule = 39° ;
Coude = -90° , Poignet = 130°

Configuration 2 : bras déplié



Lacet = 0° ; Epaule = 90° ;
Coude = 0° , Poignet = 90°

On s'intéresse ici uniquement à l'asservissement autour de l'axe de lacet.



5.2 Analyse structurelle du robot

Activité 0 :

- Réaliser la chaîne fonctionnelle décrivant la chaîne cinématique « axe de lacet ».

6 ANALYSE DU MODELE SIMMECHANICS

Activité 1 : ouvrir un modèle

- Copier le dossier «ModeleEricC» sur votre espace personnel.
- Ouvrir Matlab (s'il n'est pas déjà ouvert !)
- Placer le chemin d'accès de ce dossier dans la barre d'adresse Matlab.

D: Documents(D) Bellevue 0-PSI 1-Cycle 1 Chaîne Multiphysique 3 TP OK TP1 ModelisationHacheur ModeleEricC

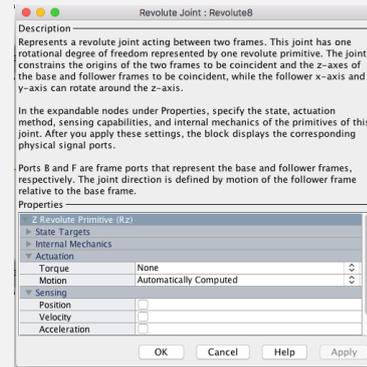
- Dans Matlab ouvrir le fichier « ericc3_DataFile.m » et « data_modele_ericc.m » puis les exécuter. *On note dans le workspace la création d'un objet appelé smiData qui contient l'ensemble des variables mécaniques nécessaires au calcul.*
- Lancer Simulink et ouvrir le fichier Ericc3_SimMeca.slx.
- Exécuter le programme, observer le résultat de la simulation et expliquer ce comportement.

Activité 2 : modifier un modèle

On peut bloquer des rotations en modifiant les blocs intitulés

« Revolute » (liaisons pivot).

- « Actuation » permet de préciser les grandeurs imposées (*torque signifie couple en Anglais*).
- « Sensing » permet de préciser les grandeurs mesurées.



- Modifier alors le fichier Ericc3_SimMeca.slx pour obtenir le bras dans sa configuration 2 tout en laissant la possibilité de commander la liaison entre la **chaise et le bâti**. (**Angles en radian**).
- Sauvegarder votre travail**.

7 CONSTRUCTION DU MODELE DU MOTEUR A COURANT CONTINU

Le moteur à courant continu du robot est caractérisé par les paramètres suivants :

- K_t : la constante de couple ;
- K_e : la constante de force contre électromotrice (fcem) ;
- R : la résistance de l'induit ;
- L : l'inductance de l'induit ;
- J_m : Inertie de l'arbre moteur ;

On note :

- $u_m(t)$: la tension appliquée aux bornes de l'induit ;
- $e(t)$: tension de force contre-électromotrice ;
- $i_m(t)$: le courant absorbé par l'induit ;
- $\omega_m(t)$: la vitesse angulaire de l'arbre ;
- $C_m(t)$: le couple moteur.

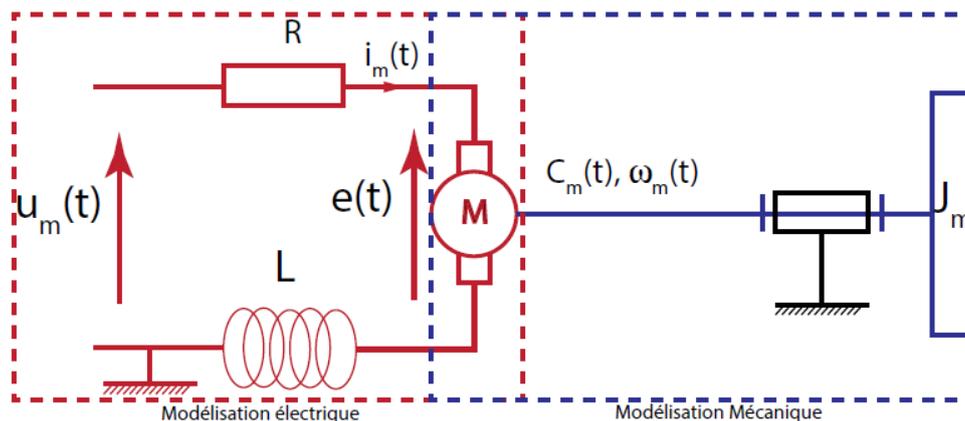
Les équations temporelles décrivant le fonctionnement d'un moteur à courant continu seul sont données ci-dessous :

$$C_m(t) - f_v \cdot \omega_m(t) = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt}$$

$$e(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$$

$$u_m(t) = e(t) + L \frac{di_m(t)}{dt} + R \cdot i_m(t)$$

$$C_m(t) = K_c \cdot i_m(t)$$



Les données numériques nécessaires à la réalisation du modèle sont déclarées dans le fichier : **data_modele_ericc.m**.

7.1 Construction du modèle électrique

Créer un nouveau fichier Simulink (Blank model).

Activité 3 : construire le modèle électrique

- On modélisera ici le comportement donné par l'équation issue de la loi des mailles en utilisant ici les blocs situés dans la bibliothèque : Simscape ► Foundation Library ► Electrical :
 - la tension $u_m(t)$ sera imposée par un bloc *Controlled Voltage Source* (catégorie : Electrical Sources) ;
 - l'intensité pourra être mesurée par un bloc *Current sensor* (catégorie : Electrical Sensors) ;
 - les autres composants se trouveront dans la catégorie « *Electrical Elements* ».

- ❑ Pour imposer la tension $u_m(t)$ (échelon) et pour visualiser l'intensité $i_m(t)$, il faut utiliser des blocs qui permettent de passer de grandeurs causales à acausales (« Simulink – PS converter ») et inversement (« PS – Simulink Converter ») situés dans la catégorie « Simscape ► Utilities ».

Dans Simulink, réaliser le schéma électrique de la motorisation du robot sans la conversion électromécanique.

7.2 Construction du modèle mécanique

Activité 4 : construire le modèle mécanique

- ❑ On modélisera ici le comportement donné par l'équation mécanique issue du PFD en utilisant ici les blocs situés dans la bibliothèque : Simscape ► Foundation Library ► Mechanical :
 - on modélisera une inertie en rotation par rapport à une référence de mouvement de rotation à l'aide de blocs situés dans « Rotational Elements » ;
 - pour visualiser la rotation du moteur il faut utiliser un bloc « Ideal Rotational Motion Sensor » (catégorie « Mechanical sensor ») couplé à un bloc qui permet de passer de grandeurs acausales à causales (« PS-Simulink Converter ») situés dans la catégorie « Simscape ► Utilities » qu'on raccordera au port noté « W ».

Dans Simulink, réaliser le schéma mécanique de la motorisation du robot sans la conversion électromécanique.

7.3 Construction complète de la modélisation électromécanique du moteur (acausal)

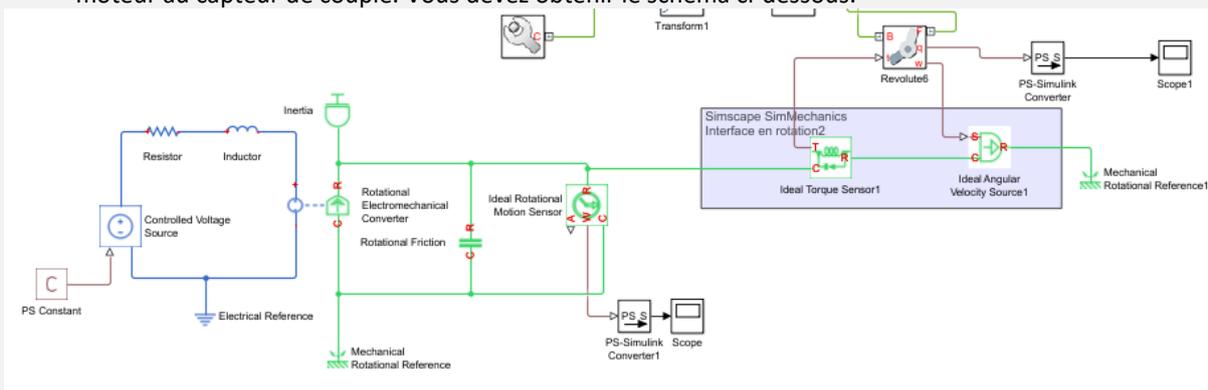
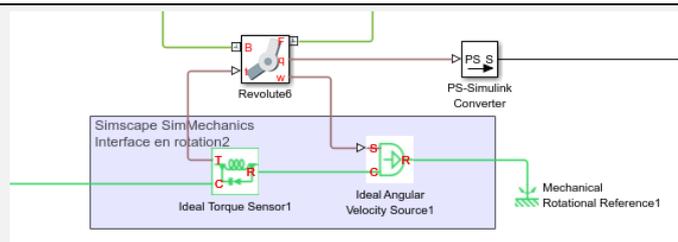
Activité 5 : réaliser le lien électro-mécanique

- ❑ On modélisera ici le comportement donné par les équations électromécaniques.
 - Le convertisseur électromécanique d'un moteur à courant continu se modélise à l'aide du bloc « Rotational Electromechanical Converter » situé dans la catégorie « Simscape ► Foundation Library ► Electrical Elements ► Rotational Electromechanical Converter.
- ❑ Raccorder les deux schémas électrique et mécanique définis précédemment à l'aide du bloc de conversion électromécanique. Il faudra utiliser un bloc Solver Configuration présent dans Simscape ► Utilities à connecter (par exemple) au flux électrique.
- ❑ Réaliser la simulation consistant à imposer un échelon de tension au moteur (5V) et à visualiser la réponse en vitesse de rotation du moteur.
- ❑ Sauvegarder votre modèle.

7.4 Couplage du moteur et du modèle SimMechanics

Activité 6 : couplage

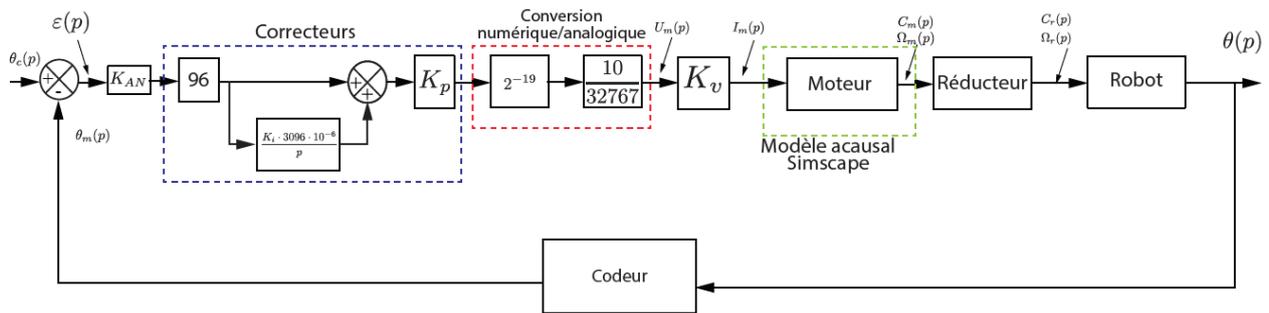
- ❑ Revenir au modèle mécanique. On cherche à piloter l'axe de lacet tout en mesurant son évolution. Pour cela, réaliser les modifications ci-contre sur votre modèle.
- ❑ Copier-coller le modèle de moteur dans le modèle mécanique et relier la sortie du moteur au capteur de couple. Vous devez obtenir le schéma ci-dessous.



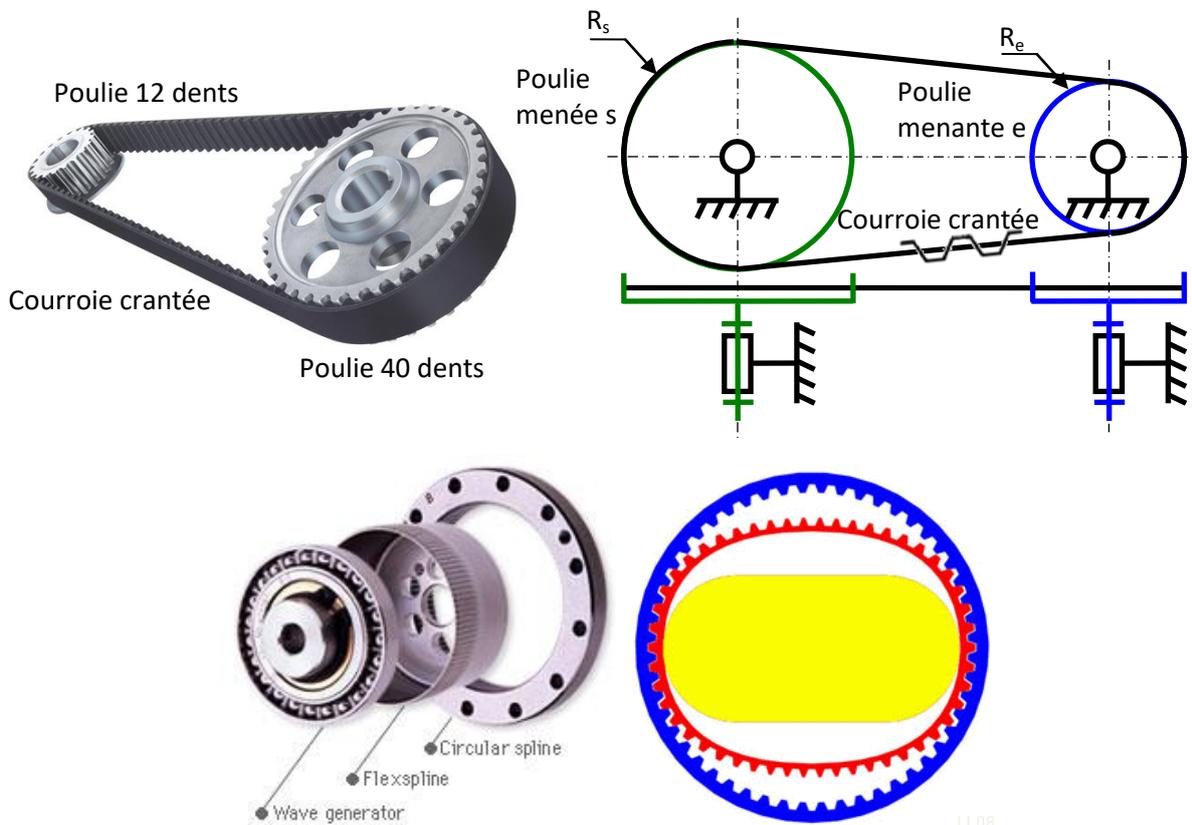
- ❑ Tester le fonctionnement du modèle.

8 CONSTRUCTION DU MODELE DU ROBOT ERICC3

On donne le schéma bloc global du système :



- ❑ L'angle de consigne de lacet se note : $\theta_c(p)$.
- ❑ La vitesse de rotation à la sortie du moteur se note $\theta_m(p)$.
- ❑ La vitesse de rotation à la sortie du réducteur se note $\theta_r(p)$.
- ❑ Le système comporte un correcteur PID (Proportionnel Intégral Dérivé). Ici n'est représenté que le correcteur Proportionnel (de gain K_p) et Intégrale (de gain K_i). Dans l'étude on n'étudiera que l'influence de K_p . Ainsi on prendra $K_i = 0$.
- ❑ Après une conversion numérique analogique, on modélise le moteur avec un variateur (de constante K_v) qui permet d'imposer au moteur un courant $I_m(p)$
- ❑ On note $C_m(p)$ le couple délivré par le moteur.
- ❑ Le frottement visqueux est modélisé par le coefficient f_v .
- ❑ Le **système de réduction** de vitesse de fonction de transfert K_r est composé
 - d'un réducteur poulie-courroie (**vidéo2**) ;
 - d'un réducteur Harmonic Drive de rapport de réduction 1/100.



La chaîne retour est composée d'un **capteur de position** qui mesure directement l'angle à la sortie du moteur. C'est un codeur incrémental et on prendra comme gain 1.

Activité 7 : comparaison causale-acausale

- Déterminer le rapport de réduction K_r du système.
- Compléter le schéma bloc modele_ericc_complet_eleve.slx pour modéliser le système asservi en boucle fermée.
- Lancer la simulation et analyser les résultats.
- Conclure quant aux avantages et inconvénients des deux méthodes de modélisation employées.

9 ANALYSE TEMPORELLE DES PERFORMANCES DU ROBOT**9.1 Comparaison des performances simulées entre les modèles causal et acausal**

L'étude portera sur les configurations 1 et 2 (bras en partie replié et déplié).

Activité 8

- Modifier le programme pour tenir compte des configurations 1 et 2.
- Exécuter la simulation sur une durée de 2.5s et observer le résultat en double cliquant sur le Scope.

9.2 Comparaison des performances simulées et expérimentales

Le schéma bloc "modele_ericc_complet_eleve.slx" comporte une partie permettant de tracer le résultat expérimental.

K_p	Configuration	Nom du fichier de données
10^6	1	conf1_1e6.csv
10^6	2	conf2_1e6.csv
10^5	1	conf1_1e5.csv
10^5	2	conf2_1e5.csv

Activité 9

- Mettre en place des simulations pour comparer les essais expérimentaux et numériques.
- Pour changer les fichiers, modifier le script data_modele_ericc.m et l'exécuter.

10 ANNEXE HACHEUR

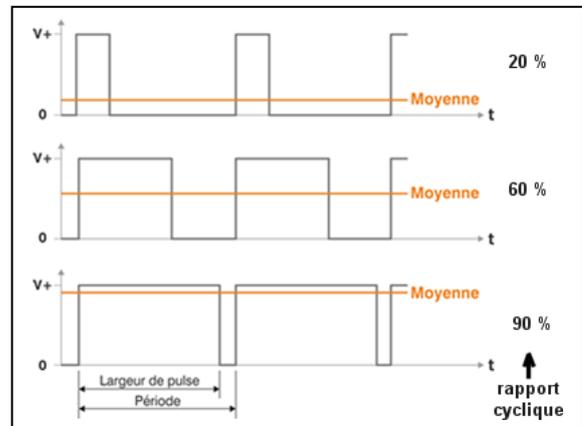
10.1 La commande en modulation de largeur d'impulsion : « MLI » (ou PWM)

La technique la plus utilisée est la **Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)** ou **Pulse Width Modulation (PWM)** en anglais.

Une manière pratique de réaliser la conversion Numérique/Analogique est d'exploiter les performances des ports numériques de sortie du microcontrôleur ou du calculateur ;

Beaucoup de microcontrôleurs disposent à l'intérieur de circuits dédiés facilitant la génération de signaux PWM.

La programmation effectue le « hachage » du signal en exploitant les performances des « **timers** » qui libèrent l'occupation du processeur.



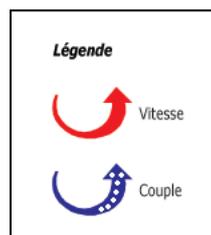
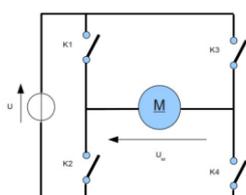
La fréquence du signal va dépendre de l'application. Pour commander une diode lumineuse, la fréquence doit être supérieure à 100Hz, pour que l'oeil humain ne voie pas le clignotement. Dans ce cas, c'est bien l'oeil qui effectue l'intégration du signal pour en percevoir une valeur moyenne. Pour un moteur à courant continu, ce sont à la fois l'inductance de son circuit électrique et son inertie qui participent à cette intégration. Les fréquences des signaux PWM peuvent aller couramment jusqu'à des centaines de kHz. Mais plus la fréquence est élevée, plus les pertes électriques à l'instant des commutation sont importantes et peuvent dissiper de l'énergie dans les éléments de commutation. L'utilisation de **fréquences supérieures à 20 kHz** permet d'éviter que l'oreille humaine ne perçoive les vibrations induites par la commande.

Ex. Arduino : Les 6 ports dédiés « PWM »

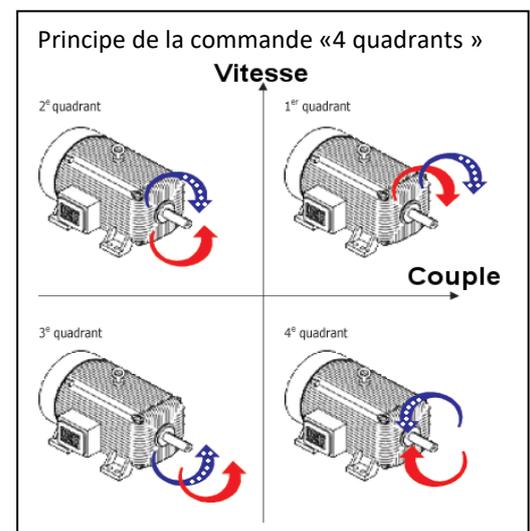
Arduino fonction	ATmega328P pin mapping	Arduino fonction
reset	PC6 1	PC5 analog input 5
digital pin 0 (RX)	PD0 2	PC4 analog input 4
digital pin 1 (TX)	PD1 3	PC3 analog input 3
digital pin 2	PD2 4	PC2 analog input 2
digital pin 3 (PWM)	PD3 5	PC1 analog input 1
digital pin 4	PD4 6	PC0 analog input 0
VCC	VCC 7	GND GND
GND	GND 8	AREF analog reference
crystal	PB6 9	AVCC AVCC
crystal	PB7 10	PB5 (MISO) digital pin 13
digital pin 5 (PWM)	PD5 11	PB4 (MOSI) digital pin 12
digital pin 6 (PWM)	PD6 12	PB3 (SS) (PWM) digital pin 11
digital pin 7	PD7 13	PB2 (SCK) (PWM) digital pin 10
digital pin 8	PB0 14	PB1 (MCLR) (PWM) digital pin 9

10.2 Modulation de puissance par convertisseur statique

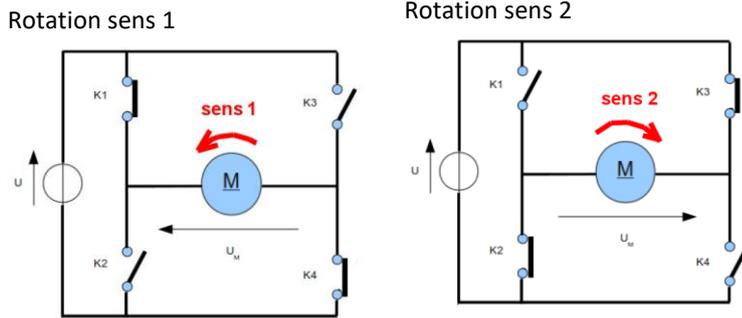
Les broches de sortie des microcontrôleurs fournissent quelques dizaines de milliampères, sous des faibles tensions (3,3V ou 5V) ; il est donc nécessaire d'utiliser des convertisseurs de puissance. Nous étudions le cas du moteur à courant continu qui doit être commandé dans ses quatre quadrants (2 sens de rotation et moteur/récepteur) :



a. Circuit de base



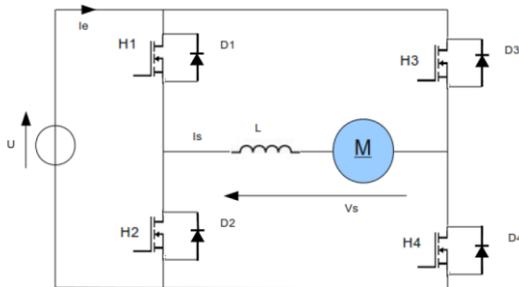
ce schéma conduit à l'appellation du circuit « pont en H » :



Réalisation des interrupteurs : thyristors, transistors bipolaires, transistors à effet de champ (Mosfet).

(Nota : prendre garde à éviter les courts-circuits : ne pas alimenter simultanément K1, K2 ou K3, K4).

b. Exemple de circuit de puissance avec des transistors MOSFETS



les MOSFETS (H1, H2, H3, H4) utilisés en mode de commutation présentent l'intérêt de faibles pertes à puissance transmise élevée.

Les diodes D1, D2, D3, D4 permettent :

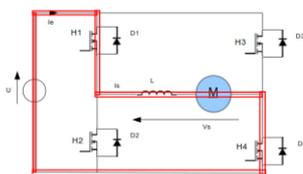
- d'évacuer les pics de tensions inverses générés par la charge inductive lors des phases de commutation (= « diodes de roue libre ») ;
- de faire circuler le courant pour la récupération d'énergie (moteur en générateur) ou le freinage.

Compléter les schémas en coloriant le circuit de circulation du courant (commande donnée : H1, H2, H3, H4)

Charge réceptrice :

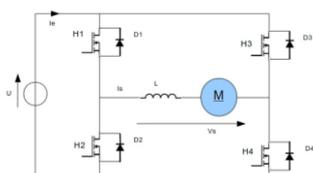
Cadran 1 et (1,0,0,1)

Sens 1 :



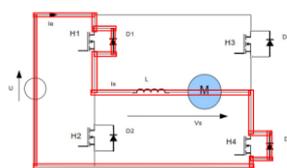
Cadran 3 et (0,1,1,0)

Sens 2 :

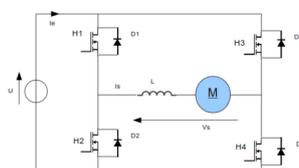


Récupération d'énergie

Cadran 2 et (1,0,0,1)

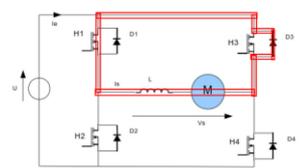


Cadran 4 et (0,1,1,0)



Freinage

Cadran 2 et (1,0,1,0)



Cadran 4 et (0,1,0,1)

