

TRAVAUX PRATIQUES DE  
Modélisation des Systèmes Mécatroniques 1

---

Master M2E2 1<sup>ère</sup> année

Hector Ramirez et Didace Habineza

Année 2014-2015

Les T.P. de MSM1 des masters M2E2 1<sup>ère</sup> année ont lieu en *salle 106 B* et sont constitués de deux sujets correspondant chacun à deux séances de quatre heures :

- TP 1 : Modélisation d'un système fluïdique ;
- TP 2 : Modélisation d'un système électromécanique.

Les étudiants seront divisés en 4 binômes. Les rotations de T.P. sont indiquées dans le tableau de la FIG. 1.  $S_i$  correspond à la séance  $i$ ,  $B_i$  au binôme  $i$ .

	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$S_1$	TP 1	TP 1	TP 2	TP 2
$S_2$	TP 1	TP 1	TP 2	TP 2
$S_3$	TP 2	TP 2	TP 1	TP 1
$S_4$	TP 2	TP 2	TP 1	TP 1

Figure 1: Tableau des rotations de T.P.

Une préparation est à faire *avant* chaque séance de TP<sup>1</sup> et le compte-rendu est à rendre *à la fin de seconde séance de chacun des deux TPs*. La note de TP sera constituée d'une note de préparation et de contrôle continu pendant la séance et d'une note sur le rapport de TP.

---

<sup>1</sup>Cela ne veut pas dire que vous devez savoir tout faire dans la préparation (sections (préparation) du photocopié de TP) mais que vous devez au moins essayer de tout faire...

# Contents

<b>1</b>	<b>Modélisation d'un système fluidique</b>	<b>3</b>
1.1	Quelques principes de mécanique des fluides . . . . .	4
1.1.1	Le réservoir de fluide : remplissage et vidange . . . . .	4
1.2	Modélisation (préparation) . . . . .	5
1.3	Identifications et vérifications expérimentales . . . . .	6
1.3.1	Identification des éléments de la cuve supérieure . . . . .	7
1.3.2	Identification des lois de comportements des autres cuves . . . . .	7
1.4	Simulation du comportement dynamique de la maquette fluidique . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Modélisation d'un système électromécanique</b>	<b>8</b>
2.1	Quelques principes de conversion d'énergie électromécanique . . . . .	8
2.2	Modélisation d'un moteur à courant continu (préparation) . . . . .	11
2.3	Identification des paramètres du moteur à courant continu . . . . .	13
2.4	Modélisation et identification du système d'entraînement électromécanique . .	14
2.5	Simulation du comportement dynamique de la maquette électromécanique . .	15

## Chapter 1

# Modélisation d'un système fluidique

Le but de ce TP est de modéliser un dispositif fluidique grâce à un réseau de systèmes à paramètres localisés. Ce réseau fluidique utilisera une analogie avec les réseaux électriques. La maquette étudiée, de marque INTECO, correspond à un système automatisable de remplissage et de contrôle de niveau d'eau dans des cuves. Cette maquette est constituée de trois cuves de géométries différentes, chacune pouvant se vider à l'aide d'une vanne manuelle et d'une vanne commandable électriquement grâce à un système numérique de contrôle (PC + carte entrées/sorties sur bus PCI). Une pompe électrique alimentant la cuve supérieure est également commandable à partir du PC et de la carte entrées/sorties (FIG. 1.1).

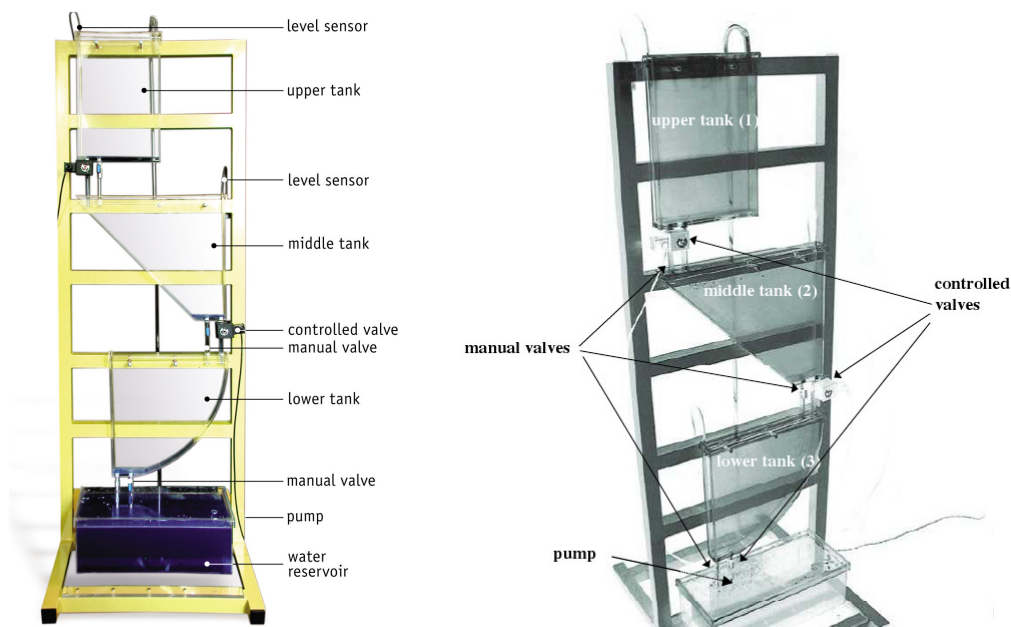


Figure 1.1: Description de la maquette INTECO comportant trois cuves.

## 1.1 Quelques principes de mécanique des fluides

Sous certaines hypothèses simplificatrices, il est possible de définir une analogie entre les systèmes électriques et les systèmes fluidiques et de modéliser ces derniers par des réseaux de systèmes à paramètres localisés. Afin de simplifier l'étude, nous supposons pour ce TP que le fluide utilisé est idéal et incompressible et que les écoulements sont laminaires (sans turbulence). Le TAB. 1.1 récapitule l'analogie entre les variables *conservative*, *through*, *potentiel* et *across* pour ces deux domaines physiques.

Variables	Électricité	Mécanique des fluides <sup>a</sup>
Conservative	charge $Q$	masse $= \rho \cdot V$
Through	courant $i$	débit massique $\rho \cdot q$
Potentiel	potentiel électrique $\varphi$	pression absolue $p$
Across	tension $v_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$	différence de pression $p_{12} = p_2 - p_1$

<sup>a</sup> $\rho$  est la masse volumique de ce fluide,  $V$  son volume et  $q$  son débit volumique. Si  $\rho$  reste constante (fluide incompressible), le volume de fluide peut également servir de variable conservative et son débit volumique de variable through, c'est ce que nous ferons dans ce TP.

Table 1.1: Tableau récapitulatif des analogies entre les variables *conservative*, *through*, *potentiel* et *across* pour le domaine électrique et le domaine fluidique.

### 1.1.1 Le réservoir de fluide : remplissage et vidange

Soit un réservoir qui peut être alimenté ou vidangé à l'aide d'une canalisation de remplissage et une de vidange. Le débit volumique de fluide entrant dans ce réservoir vaut  $q_{\text{remplissage}} - q_{\text{vidange}}$  et ce fluide est soumis à la force de gravité (accélération de la pesanteur  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ). La pression en haut de la cuve sera notée  $p_1$  et la pression au fond  $p_2$ . La hauteur de fluide dans la cuve sera notée  $h$ .

**Définition 1.1 (Équation de continuité (conservation de masse))**

La masse  $m(t)$  d'eau stockée dans le réservoir est une grandeur conservative :

$$\frac{dm(t)}{dt} = \rho \cdot (q_{\text{remplissage}}(t) - q_{\text{vidange}}(t)) \quad (1.1)$$

Dans une cuve de section constante  $A$ , nous avons  $m(t) = \rho \cdot A \cdot h(t)$  et l'équation de continuité se réduit à :

$$A \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{\text{remplissage}}(t) - q_{\text{vidange}}(t) \quad (1.2)$$

**Définition 1.2 (Principe de Pascal (loi de Newton en statique))**

Si l'accélération verticale des particules de fluide au fond de la cuve est suffisamment faible pour être négligée (vidange et remplissage relativement lent), la somme des forces verticales au fond de la cuve est nulle. La différence de pression  $p_{21} = (p_2 - p_1)$  entre le fond et le haut de la cuve n'est alors due qu'au poids  $P$  de la masse d'eau :

$$\begin{aligned} P - (p_2 - p_1) \cdot A &= 0 \\ \Rightarrow p_{21} \cdot A &= m \cdot g \\ \Rightarrow p_{21} \cdot A &= (\rho \cdot A \cdot h) \cdot g \\ \Rightarrow p_{21} &= \rho \cdot g \cdot h \end{aligned} \quad (1.3)$$

**Définition 1.3 (Principe de Bernoulli (conservation d'énergie))**

Ce principe est une application directe du principe de conservation de l'énergie à la vidange d'un réservoir au travers d'un orifice de section  $S$  situé au fond de la cuve. Si on fait l'hypothèse que les échauffements et les pertes sont négligeables – vidange sans perte d'énergie –, l'énergie potentielle de gravitation  $\mathcal{V}(h) = \rho \cdot g \cdot h$  d'un volume élémentaire de fluide vidangé est alors intégralement transformée en co-énergie cinétique  $\mathcal{T}^*(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho v^2$  à la sortie de l'orifice de vidange ( $v$  est la vitesse du fluide en sortie de l'orifice de vidange) :

$$\mathcal{V}(h) = \mathcal{T}^*(v) \quad (1.4)$$

Pour un écoulement laminaire, le débit de vidange vaut  $q = \int_S v \, dS \approx v \cdot S$ , ce qui donne :

$$\rho \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \Rightarrow q = S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (1.5)$$

En pratique, l'écoulement en sortie de l'orifice n'est jamais parfaitement laminaire et un coefficient de débit de cet orifice  $k_S < 1$  est alors utilisé<sup>1</sup> :

$$q = k_S \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (1.6)$$

**1.2 Modélisation (préparation)**

**Question 1.1** En vous aidant des équations rappelées dans la section précédente (continuité et principe de Pascal) et en considérant l'analogique électrique/fluidique suivante :

1.  $Q \Leftrightarrow V$  ;
2.  $i \Leftrightarrow q$  ;
3.  $v_{12} \Leftrightarrow p_{12}$ ,

montrez qu'il y a une analogie complète entre une cuve de section constante  $A$  et un condensateur électrique. Indiquez alors la valeur de  $C_f$ , la capacité de la cuve. Exprimez sa loi de comportement pour un composant idéal (fluide incompressible et loi de comportement de la cuve linéaire). Qu'est ce qui change si la section de la cuve n'est pas constante ?

**Question 1.2** Expliquez le fonctionnement d'une électrovanne proportionnelle puis, à l'aide des équations rappelées dans la section précédente (principe de Bernoulli et de Pascal), donnez la loi de comportement d'une électrovanne sous la forme d'une relation entre le débit obtenu en sortie de la vanne et ses deux grandeurs de commande :

- la différence de pression  $p_{21}$  à ses extrémités ;
- sa section d'ouverture  $S$  (fonction de la tension de commande pour une électrovanne).

Quel est le type de ce composant (actif/passif, conservatif/dissipatif) et sa causalité associée ?

**Question 1.3** Trouvez le graphe linéaire associé au réseau des trois cuves de la maquette INTECO et déduisez en son rang et sa nullité.

<sup>1</sup> $k_S \approx 0,62$  pour un trou simple et  $k_S \approx 0,98$  pour une tuyère.

**Question 1.4** *Rappelez les lois de comportement des différents sous-systèmes composant cette maquette ainsi que leur causalité. Déduisez-en l'ordre dynamique de ce système et proposez des variables permettant de modéliser son état.*

**Question 1.5** *En fonction des lois de comportement des différents sous-systèmes, choisissez un arbre et le co-arbre associé respectant la causalité de ces composants. Déduisez en les matrices d'interconnexion  $\mathbf{Q}$  et  $\mathbf{B}$  puis les lois de Kirchhoff généralisées correspondantes. Quel est la dimension de l'espace vectoriel des débits volumiques<sup>2</sup> et celle de l'espace vectoriel des différences de pression ?*

### 1.3 Identifications et vérifications expérimentales

La maquette INTECO est contrôlée par un PC et une carte d'entrées/sorties branchée sur son bus PCI. Cette dernière est programmable et commandable au moyen de *Matlab Simulink*. La conversion et la compilation du schéma *Simulink* en un programme C est réalisée en utilisant la *toolbox Real Time Workshop* de Matlab. Le lancement et le pilotage en temps réel du programme sur le processeur du PC est réalisé en utilisant la *toolbox Real Time Windows Target* de Matlab.

Lancez le logiciel Matlab. Placez vous dans un répertoire (*directory*) que vous aurez créé dans le répertoire C:\etudiants\Master\_M2E2\_1\MSM1\ puis lancer la boîte à outils (*toolbox*) Simulink (> `simulink`). Ouvrez le fichier original `pilote_maquette_niveau.mdl` (cf. FIG. 1.2) puis sauvegardez le sous un nouveau nom dans votre répertoire.

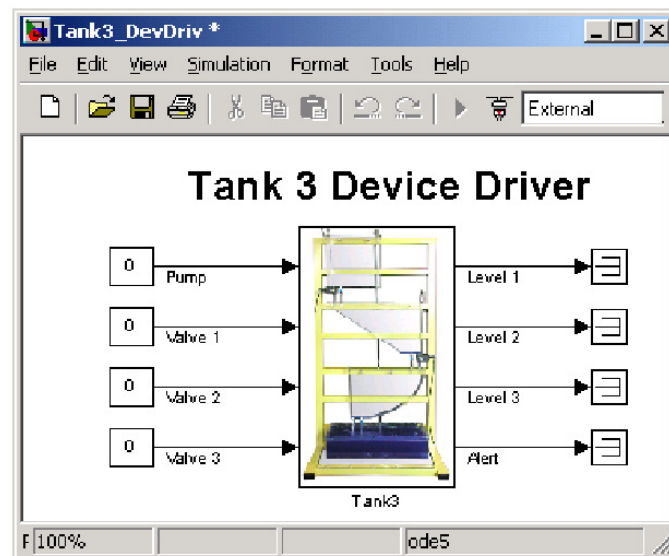


Figure 1.2: Capture d'écran du fichier original de commande de la maquette INTECO.

Vous pouvez compiler votre fichier à l'aide des menus suivants :  
→ **Tools** → **Real-Time Workshop** → **Build Model**

<sup>2</sup>La dimension de l'espace vectoriel des débits volumiques est le nombre de débits volumiques indépendants dans le graphe associé à ce système.

Vous pouvez lancer votre programme de commande à l'aide des menus suivants :

→ Tools → External Mode Control Panel

Vous pouvez voir les éléments composants le block Tank3 en effectuant la manipulation :

Click bouton droit → Look under Mask

### 1.3.1 Identification des éléments de la cuve supérieure

**Question 1.6** À partir des dimensions géométriques mesurées sur la cuve ou des données constructeurs, déterminer la loi de comportement de la cuve supérieure. À partir de ce résultat, proposez un protocole expérimental permettant de déterminer la loi de comportement de la pompe débit  $q_p$ /tension de commande  $u_p$ . Tracez la courbe  $q_p = f(u_p)$  pour  $0 \leq u_p \leq 1$ . Que pouvez vous dire du comportement de la pompe ?

**Question 1.7** Proposez un protocole expérimental permettant de déterminer les lois de comportement des deux vannes de vidange de la cuve supérieure (vanne manuelle et électrovanne). Réalisez les expériences correspondantes pour ces deux types de vannes et tracez leurs caractéristiques. Comparez les résultats obtenus expérimentalement aux lois déterminées dans la préparation. Déduisez en les paramètres physiques des vannes manuelles et des électrovannes.

### 1.3.2 Identification des lois de comportements des autres cuves

**Question 1.8** À partir des dimensions géométriques mesurées ou des données constructeurs, déterminer les lois de comportement des deux autres cuves. À partir des résultats des questions précédentes, proposez un protocole expérimental permettant de mesurer les lois de comportement de ces deux cuves. Tracez les courbes caractéristiques correspondantes et comparez les aux résultats théoriques. Concluez

## 1.4 Simulation du comportement dynamique de la maquette fluidique

Dans un premier temps, vous ne prendrez en compte que la cuve supérieure. Le fonctionnement de la maquette comportant les trois cuves ne sera étudié que dans un second temps si il vous reste du temps.

**Question 1.9** Par réduction des équations de comportement et d'interconnexion, proposez un modèle d'état de ce système fluidique. Les entrées de ce modèle d'état seront la commande (ou le débit) de la pompe et/ou la commande des vannes et électrovannes. Les sorties de ce modèle seront le ou les niveaux dans les différentes cuves.

**Question 1.10** Proposez une méthode ou un programme informatique permettant de résoudre ces équations d'état et donc de simuler le comportement dynamique de cette maquette. Vous pouvez utiliser l'un des logiciels suivants : matlab, simulink, scilab.

**Question 1.11** À l'aide du modèle obtenu, simulez différents comportements dynamiques et vérifiez expérimentalement la concordance entre les résultats théoriques (simulations) et les résultats pratiques (expérimentaux).



## Chapter 2

# Modélisation d'un système électromécanique

Le but de ce TP est de modéliser un système de conversion électromécanique d'énergie et un système de transmission du mouvement. Une maquette de la société INTECO (cf. FIG. 2.1 et 2.2), constituée d'un moteur à courant continu (MCC), de plusieurs dispositifs de transmission (accouplements, inerties, reducteurs...) et de plusieurs capteurs (position et vitesse) sera utilisée dans ce TP. La première partie du sujet consiste à modéliser puis à identifier expérimentalement le fonctionnement du moteur à courant continu. Dans un second temps, le même travail sera réalisé sur la transmission mécanique. Enfin dans la dernière partie, ces différents sous-systèmes seront interconnectés afin d'obtenir un dispositif complet d'entraînement électromécanique en rotation. Une modélisation sous forme d'état sera alors utilisée pour réaliser des simulations. Celles-ci seront alors comparées au comportement dynamique réel de la maquette.

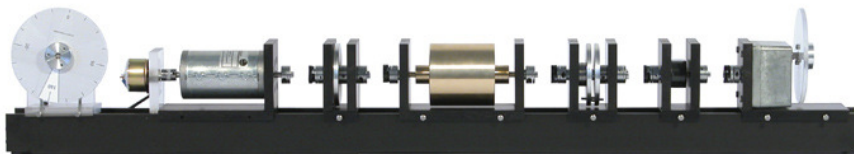


Figure 2.1: Description de la maquette INTECO.

### 2.1 Quelques principes de conversion d'énergie électromécanique

Le moteur à courant continu de la maquette INTECO est à *aimants permanents*. Son *stator* – la partie fixe du moteur –, est ainsi constitué d'aimants permanents qui permettent de générer un champ magnétique constant  $\vec{B}$  dans la partie centrale de la machine (c.f. FIG.

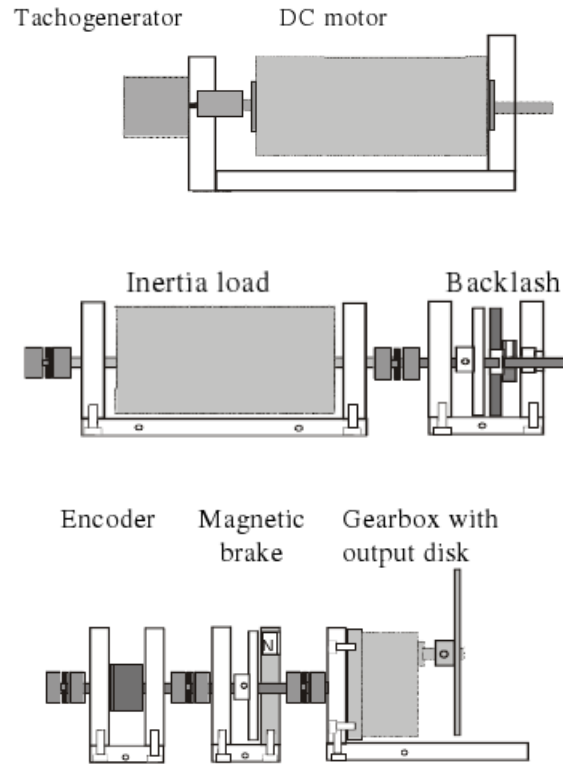


Figure 2.2: Description de différents constituants de la maquette INTECO.

2.3). Un bobinage alimenté par un courant continu  $i$  est fixé sur le *rotor* – la partie mobile du moteur. Comme le bobinage de ce rotor est *placé* dans le champ statorique  $\vec{B}$ , chacun des conducteurs de ce bobinage subi une force de Laplace :

$$\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

$d\vec{l}$  est le vecteur unitaire porté par le conducteur et il est orienté dans le sens du courant. Lorsque le bobinage est dans la position  $a_1-b_1$  (FIG. 2.4 (a)) ou dans la position  $a_3-b_3$  (FIG. 2.4 (c)), les résultantes de force et de couple créées par les deux conducteurs du bobinage s'annulent. Cependant lorsque le bobinage est dans la position  $a_2-b_2$  (FIG. 2.4 (b)), un couple négatif est créé et lorsque le bobinage est dans la position  $a_4-b_4$  (FIG. 2.4 (d)), un couple positif est créé. Ces deux dernières positions permettent de mettre en rotation le rotor dans un sens ou dans l'autre.

Un système appelé *collecteur + balais* permet d'alimenter cette bobine de manière différente pour chacune de ces positions :

- position  $a_1-b_1$  : le bobinage n'est pas alimenté ;
- position  $a_2-b_2$  : le bobinage est alimenté dans le sens négatif ( $i \leq 0$ ) donc un couple positif est créé ;

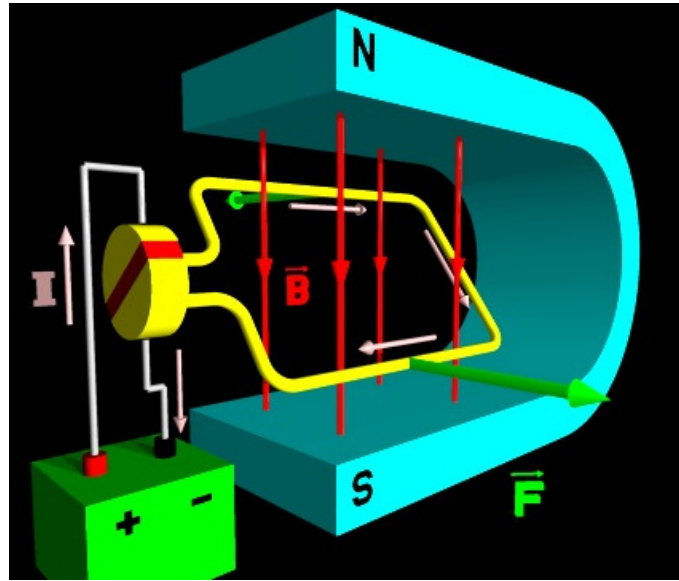


Figure 2.3: Constitution simplifiée d'un MCC.

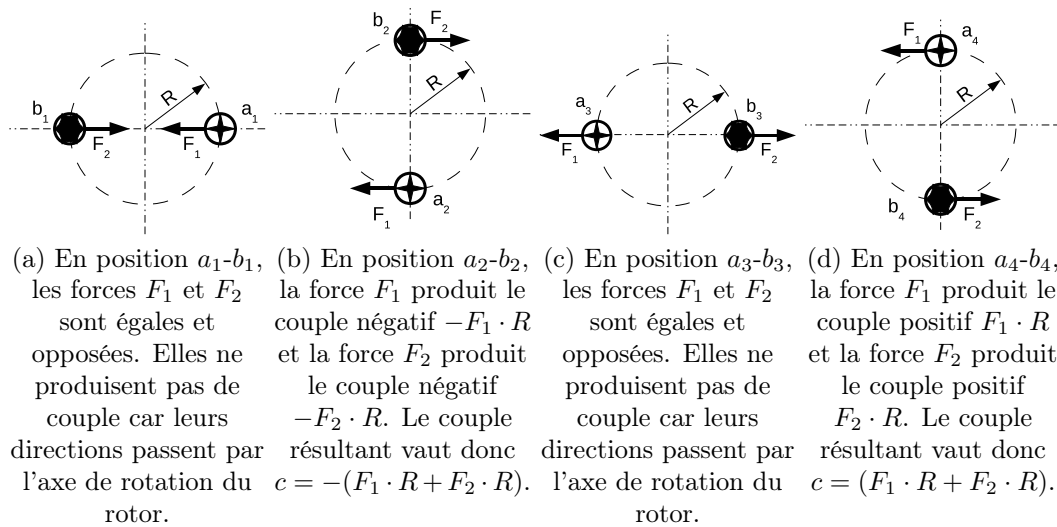
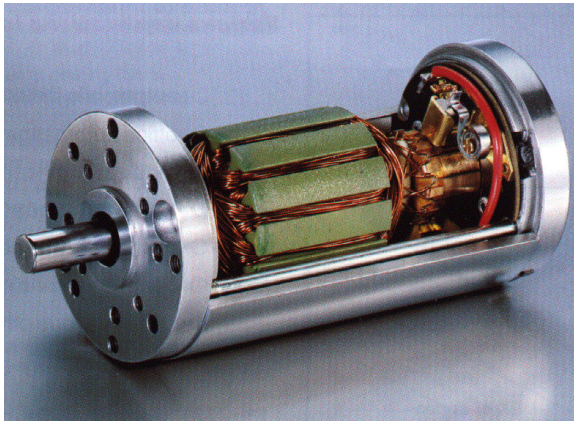


Figure 2.4: Création du couple dans un MCC en fonction de la position des conducteurs rotoriques par rapport au champ statorique.

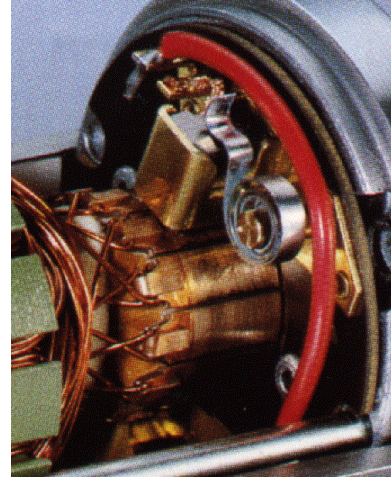
- position  $a_3-b_3$  : le bobinage n'est pas alimenté ;
- position  $a_4-b_4$  : le bobinage est alimenté dans le sens positif (inversion du sens du courant par rapport à la position  $a_2-b_2$  :  $i \geq 0$ ) donc un couple positif est créé.

Les couples créés dans ces quatre positions étant positifs ou nuls, le couple moyen est globalement positif. Si la machine est composée de nombreux conducteurs répartis sur toute la périphérie du rotor (c.f. FIG. 2.5), les oscillations de couples autour de sa valeur moyenne

deviennent faibles et donc négligeables. Avec cette hypothèse, le couple instantané ne dépend plus de la position du bobinage du rotor par rapport aux aimants mais uniquement du courant  $i$ , du champ  $\vec{B}$  produit par les aimants du stator et de la géométrie de la machine.



(a)



(b)

Figure 2.5: Constitution d'un moteur à courant continu : (a) vue éclatée, (b) détail du système *collecteur + balais*.

Dans ce cas, pour un champ  $\vec{B}$  constant (aimants permanents), le couple produit  $c(t)$  est proportionnel au courant  $i(t)$  circulant dans ce bobinage :

$$c(t) = K_c \cdot i(t) \quad (2.2)$$

$K_c$  est appelée la constante de couple de la machine.

Lorsque le rotor tourne par rapport au stator à la vitesse  $\omega(t)$ , il y a également une variation du flux magnétique de couplage  $\lambda(t)$  dans le bobinage du rotor. Ce flux dépend du champ magnétique généré par les aimants permanents du stator et de l'angle entre rotor et stator (qui définit la surface de couplage par projection). D'après la loi de Faraday, il y aura alors création d'une force électromotrice (f.e.m.)  $e(t)$  induite aux bornes de ce bobinage. Celle-ci est de la forme  $e(t) = -\frac{d\lambda(t)}{dt}$ . Cette f.e.m. dépend de la variation du flux de couplage, donc de la vitesse de rotation du rotor. Ainsi, la f.e.m. induite est proportionnelle à la vitesse de rotation  $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$  du moteur :

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t) \quad (2.3)$$

$K_e$  est appelée la constante de fem de la machine.

## 2.2 Modélisation d'un moteur à courant continu (préparation)

Dans la section précédente nous avons montré qu'un moteur à courant continu est un convertisseur d'énergie de la forme électrique vers la forme mécanique. Nous avons montré

que le couple de mise en rotation du rotor  $c(t)$  est créé par l'interaction entre un champ magnétique statorique généré par un aimant permanent fixé au stator et un champ magnétique rotorique généré par le courant  $i(t)$  circulant dans le bobinage rotorique (création d'une force de Laplace). Le courant rotorique est *commuté* par un système *balais + collecteur mécanique* afin que le champ rotorique reste fixe et perpendiculaire au champ statorique et ainsi que le couple ne dépende pas de la position du rotor. Nous avons également montré qu'en raison de la rotation de la bobine rotorique à la vitesse  $\omega(t)$  devant le champ statorique fixe créé par l'aimant permanent, une f.e.m.  $e(t)$  est induite dans le bobinage rotorique. Les équations de ce couplage électromécanique sont :

$$\begin{cases} c(t) = K_c \cdot i(t) \\ e(t) = K_e \cdot \omega(t) \end{cases} \quad (2.4)$$

Ces deux équations décrivent le comportement de *transduction électromécanique*. Le sous-système  $\mathcal{S}_T$  assurant la conversion de l'énergie électrique  $p_e(t) = e(t) \cdot i(t)$  en une énergie mécanique  $p_m(t) = c(t) \cdot \omega(t)$  (et inversement) est représenté sur la FIG. 2.6.

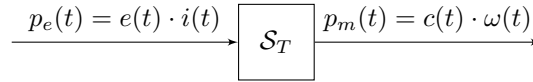


Figure 2.6: Représentation du sous-système transducteur  $\mathcal{S}_T$ .

La modélisation précédente nous permet d'obtenir la perte d'énergie pendant la conversion électromécanique :

$$\begin{aligned} p_e(t) - p_m(t) &= e(t) \cdot i(t) - c(t) \cdot \omega(t) \\ &= K_e \cdot \omega(t) \cdot i(t) - K_c \cdot i(t) \cdot \omega(t) \\ &= (K_e - K_c) \cdot i(t) \cdot \omega(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Cependant, le sous-système  $\mathcal{S}_T$  est généralement considéré comme un système parfait de conversion d'énergie et donc comme un système purement conservatif (sans perte). Or, pour que cette conversion d'énergie soit sans perte, il faut que  $p_e(t) - p_m(t) = 0$ , c'est-à-dire que  $K_e = K_c$ . Si le couple  $c(t)$  est exprimé en N.m, le courant  $i(t)$  en A, la f.e.m.  $e(t)$  en V et la vitesse de rotation  $\omega(t)$  en  $\text{rad.s}^{-1}$  les constantes  $K_c$  et  $K_e$  sont donc égales afin de respecter le principe de conservation de l'énergie au cours d'une transduction parfaite (sans perte).

Afin de pouvoir également modéliser les pertes mécaniques et électriques ainsi que les énergies magnétiques et mécaniques stockées, le modèle de la machine à courant continu doit également comporter des sous-systèmes électriques et mécaniques classiques. Les éléments additionnels du réseau électromécanique de la machine à courant continu sont les suivants :

- une résistance  $R$  pour prendre en compte l'énergie dissipée par effet Joule dans les bobinages ;
- une inductance  $L$  pour tenir compte des phénomènes électromagnétiques d'auto-induction dans les bobinages (énergie magnétique stockée) ;
- un coefficient de frottement  $D$  pour prendre en compte l'énergie dissipée par frottement visqueux dans l'air et les roulements du moteur ;

- une inertie  $J$  pour tenir compte des phénomènes mécaniques d'accumulation d'énergie cinétique dans le rotor.

De plus une alimentation électrique – source de tension  $u(t)$  – est branchée du côté électrique et une charge mécanique – source de couple résistant  $c_r(t)$  – est branchée du côté mécanique.

**Question 2.1** *Représentez le réseau à paramètres localisés permettant de modéliser le comportement dynamique d'un moteur à courant continu. Trouvez le graphe linéaire associé à ce système électromécanique et déduisez en son rang et sa nullité.*

**Question 2.2** *Rappelez les lois de comportement des différents sous-systèmes de ce réseau ainsi que leur causalité. Déduisez-en l'ordre dynamique de ce système et proposez des variables permettant de modéliser son état.*

**Question 2.3** *En fonction des lois de comportement et des causalités des différents sous-systèmes, choisissez un arbre et le co-arbre associé. Déduisez en les matrices d'interconnexion  $\mathbf{Q}$  et  $\mathbf{B}$  puis les lois de Kirchhoff correspondantes.*

## 2.3 Identification des paramètres du moteur à courant continu

Certains paramètres de modélisation de ce moteur sont données par le constructeur (cf. documentation jointe) mais toutes les informations ne sont en général pas disponibles. Cette partie se propose de les identifier expérimentalement.

La maquette INTECO est contrôlée par une carte d'entrées/sorties branchée sur le bus PCI du PC. Cette dernière est programmable et commandable au moyen de *Matlab Simulink*. La conversion et la compilation du schéma *Simulink* en un programme C est réalisée en utilisant la *toolbox Real Time Workshop* de Matlab. Le lancement et le pilotage en temps réel du programme sur le processeur du PC est réalisé en utilisant la *toolbox Real Time Windows Target* de Matlab.

Lancez le logiciel Matlab. Placez vous dans un répertoire (*directory*) que vous aurez créé dans le répertoire `C:\etudiants\Master_M2E2_1\MSM1\` puis lancer la boîte à outils (*toolbox*) Simulink (`> simulink`). Ouvrez le fichier original `pilote_maquette_mcc.mdl` puis sauvegardez le sous un nouveau nom (cf. FIG. 2.7).

Vous pouvez compiler votre fichier à l'aide des menus suivants :

→ **Tools** → **Real-Time Workshop** → **Build Model**

Vous pouvez lancer votre programme de commande à l'aide des menus suivants :

→ **Tools** → **External Mode Control Panel**

Vous pouvez voir les éléments composants le block **Servo** en effectuant la manipulation :

Click bouton droit → **Look under Mask**

**Question 2.4** *Reprenez les équations électriques du moteur à courant continu et indiquez les équations qui utilisent les trois paramètres électriques  $R$ ,  $L$  et  $K_e$ . En utilisant judicieusement ces équations, proposez un protocole expérimental permettant de déterminer ces paramètres indépendamment les uns des autres. Réalisez l'essai correspondant pour obtenir la valeur expérimentale de chacun de ces paramètres. Comparez les valeurs expérimentales aux valeurs théoriques fournies par le constructeur.*

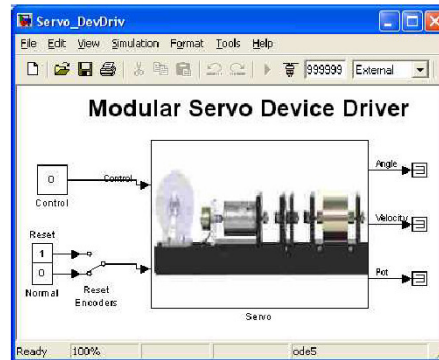


Figure 2.7: Capture d'écran du fichier original de commande de la maquette.

**Question 2.5** Reprenez les équations mécaniques du moteur à courant continu et indiquez les équations qui utilisent les trois paramètres électriques  $D$ ,  $J$  et  $K_c$ . En utilisant judicieusement ces équations, proposez un protocole expérimental permettant de déterminer ces paramètres indépendamment les uns des autres. Réalisez l'essai correspondant pour obtenir la valeur expérimentale de chacun de ces paramètres. Comparez les valeurs expérimentales aux valeurs théoriques fournies par le constructeur.

## 2.4 Modélisation et identification du système d'entraînement électromécanique

La transmission mécanique de la maquette va d'abord être étudiée avant de la coupler au moteur à courant continu.

**Question 2.6** Pour chacun des sous-systèmes de la transmission mécanique, proposez une loi de comportement. Indiquez à chaque fois, le type de sous-système (passif/actif, conservatif/dissipatif, statique/dynamique) et la causalité associée.

**Question 2.7** Lorsque c'est possible, proposez une méthode d'identification permettant de déterminer expérimentalement la valeur des paramètres entrant dans ces lois de comportement. Réalisez alors l'essai correspondant sur la maquette pour identifier ces paramètres.

Le moteur à courant continu est maintenant accouplé à l'ensemble de la transmission mécanique sans utiliser le jeu mécanique (ce sous-système non-linéaire hystérétique n'est pas modélisable par un modèle d'état standard ni par un modèle entrée/sortie bijectif).

**Question 2.8** Trouvez le graphe linéaire associé au système de transmission électromécanique complet et déduisez en son rang et sa nullité.

**Question 2.9** Rappelez les lois de comportement des différents sous-systèmes ainsi que leur causalité. Déduisez-en l'ordre dynamique de ce système et proposez des variables permettant de modéliser son état.

**Question 2.10** En fonction des lois de comportement des différents sous-systèmes, choisissez un arbre et le co-arbre associé respectant la causalité de ces composants. Déduisez en

*les matrices d'interconnexion  $\mathbf{Q}$  et  $\mathbf{B}$  puis les lois de Kirchhoff correspondantes. Y-a-t-il un problème au niveau de la causalité de ces sous-systèmes ? Pourquoi ? Comment y remédier ?*

## 2.5 Simulation du comportement dynamique de la maquette électromécanique

Dans un premier temps, vous ne prendrez en compte que le moteur à courant continu. Le fonctionnement de la maquette complète ne sera étudié que dans un second temps si il vous reste du temps.

**Question 2.11** *Par réduction des équations de comportement et d'interconnexion, proposez un modèle d'état de ce système électromécanique. Deux entrées seront utilisées, la tension d'alimentation du moteur  $u(t)$  (entrée de commande) et le couple résistant – de charge –  $c_r(t)$  (entrée de perturbation). La vitesse de sortie  $\omega_s(t)$  sera choisie comme sortie de ce modèle.*

**Question 2.12** *Proposez une méthode ou un programme informatique permettant de résoudre ces équations d'état et donc de simuler le comportement dynamique de cette maquette. Vous pouvez utiliser l'un des logiciels suivants : matlab, simulink, scilab.*

**Question 2.13** *À l'aide du modèle obtenu, simulez différents comportements dynamiques et vérifiez expérimentalement la concordance entre les résultats théoriques (simulations) et les résultats pratiques (expérimentaux).*