



LEARNING ALGORITHMS AND SYSTEMS LABORATORY (LASA)  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR (STI)  
SCHOOL OF ENGINEERING / SWISS INSTITUTE OF TECHNOLOGY



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Professeur responsable:  
Prof. **Aude Billard**

*Direct:* +41-21-693 54 64  
*Secretary:* +41-21-693 09 39  
*Fax:* +41-21-693 78 50  
*E-mail:* [aude.billard@epfl.ch](mailto:aude.billard@epfl.ch)  
*Web:* <http://lasa.epfl.ch>

Assistant responsable:  
**Mohammad Khansari**

*Direct* +41-21-693 54-62  
*E-mail:* [mohammad.khansari@epfl.ch](mailto:mohammad.khansari@epfl.ch)

## Travaux pratique de Robotique 4-6

### Création d'un robot mobile à plusieurs DDL

#### TP DOF BOX II

Lieu ME A3 445

Heure : Lundi 14h15-18h

Section Microtechnique  
Hiver 2009-2010

## Table des matières

<b>1</b>	<b><i>Présentation du travail</i></b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b><i>Présentation du DOF BOX II</i></b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Généralités</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Mécanique</b>	<b>6</b>
2.2.1	Caractéristiques mécaniques	6
2.2.2	Le moteur	7
2.2.3	Le réducteur ( $r=192$ )	7
2.2.4	Le bus de puissance et ses connecteurs	8
2.2.5	Le bus de communication et ses connecteurs	9
2.2.6	Passages pour les fils	9
2.2.7	Les connexions mécaniques	10
<b>2.3</b>	<b>Schéma de commande</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b><i>Préparation du TP</i></b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>A préparer pour la première séance</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>A préparer pour la deuxième séance</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b><i>Donnée du TP</i></b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Informations de lecture</b>	<b>15</b>
<b>4.2</b>	<b>Notations</b>	<b>15</b>
<b>4.3</b>	<b>Première partie : Caractérisation du DOF BOX II</b>	<b>17</b>
4.3.1	Mesure du rendement du réducteur	17
4.3.1.1	Exercice 1 (6%)	17
<b><i>Vous trouverez dans le chapitre «</i></b>		<b>17</b>
Mesure du jeu dans la réduction		19
4.3.1.2	Exercice 2 (6%)	19
4.3.2	Caractérisation du potentiomètre et l'encodeur	20
4.3.2.1	Exercice 3 (8%)	20
<b>4.4</b>	<b>Deuxième partie : Contrôle d'un module</b>	<b>21</b>
4.4.1.1	Exercice 4 (10%)	22
4.4.2	Dimensionnement de la commande	22
4.4.2.1	Exercice 5 (10%)	22
4.4.2.2	Exercice 6 (10%)	23
<b>4.5</b>	<b>Troisième partie : Fabriquer un robot</b>	<b>24</b>
4.5.1	Marche à suivre	24

4.5.1.1	Exercice 7 (7%)	24
4.5.1.2	Construction	25
4.5.1.3	Exercice 8 (7%)	25
4.5.1.4	Exercice 9 (16%)	25
4.5.2	Caractérisation du robot	25
4.5.2.1	Exercice 10 (10%)	25
4.5.3	Déplacement d'une masse	26
4.5.3.1	Exercice 11 (10%)	26
<b>5</b>	<b><i>Rappel sur les réducteurs et rapports de réduction</i></b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b><i>Rappel sur les moteurs à courant continu</i></b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b><i>Rappel sur la Numérisation d'un régulateur analogique</i></b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b><i>Bibliographie</i></b>	<b>29</b>

## 1 Présentation du travail

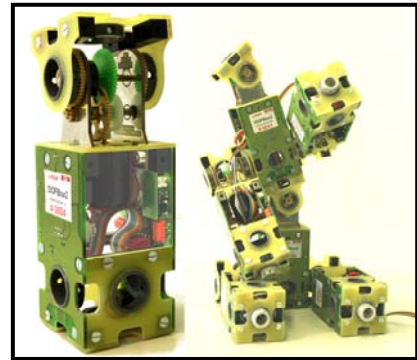
Ce travail a pour but de mettre en pratique les connaissances acquises lors des cours d'automatique et d'électrotechnique et de se familiariser avec la gestion d'un robot à plusieurs degrés de libertés. Les étudiants travailleront en groupes et apprendront à gérer le partage des tâches pour accomplir le travail.

Ce travail consistera à imaginer, fabriquer et faire fonctionner un robot mobile à plusieurs degrés de liberté capable de se déplacer sur une surface plane ainsi que de lui faire exécuter une tâche (pousser une masse sur un plan horizontal).

Pour atteindre cet objectif, les étudiants disposent d'un pack de 5 modules DDL (DOF BOX II). Chacun de ces modules comporte 1 degré de liberté motorisé, contrôlable de manière indépendante et susceptible d'être connecté à un ou plusieurs autres modules équivalents.

Chaque groupe d'étudiant dispose donc de:

- Un pack de 5 modules DOF BOX II.
- Une interface I2C-RS232 (translateur) permettant de connecter le système à un PC.
- Une alimentation.
- Un certain nombre d'outils (tourne-vis, brucelles etc...) nécessaires aux exercices du TP.



**La première partie** du travail consiste à caractériser ce module et son contrôle.

**La seconde partie** du travail est destinée à l'analyse et la synthèse d'un régulateur en position pour chacun des DDLs.

Enfin, dans **la troisième partie** du travail, les étudiants fabriquent le robot, le mettent en mouvement et caractérisent son déplacement.

A la fin du travail, le robot sera photographié, et une petite démonstration sera filmée.

### Préparation des TPs :

Référez vous au chapitre «Préparation au TP». **!!Attention !!** Une préparation est indispensable même pour la 1<sup>ère</sup> séance de TP.

### Rendu :

Le rapport et le code du TP devront être rendus au plus tard une semaine après le dernier TP. Il faudra uploader le rapport en version pdf sur moodle ainsi qu'un fichier zip contenant tous les codes source du programme de contrôle de votre robot.

### Evaluation :

L'évaluation du travail se fera sur la base du rapport et de la vidéo selon le pourcentage de la note indiqué dans les exercices.

## 2 Présentation du DOF BOX II

### 2.1 Généralités

Le DOF BOX II est une unité de robot modulaire. Il s'agit d'un module doté d'un degré de liberté motorisé et d'un certain nombre de connexions mécaniques, électriques et de communication lui permettant d'être connecté à un ou plusieurs autres modules identiques.

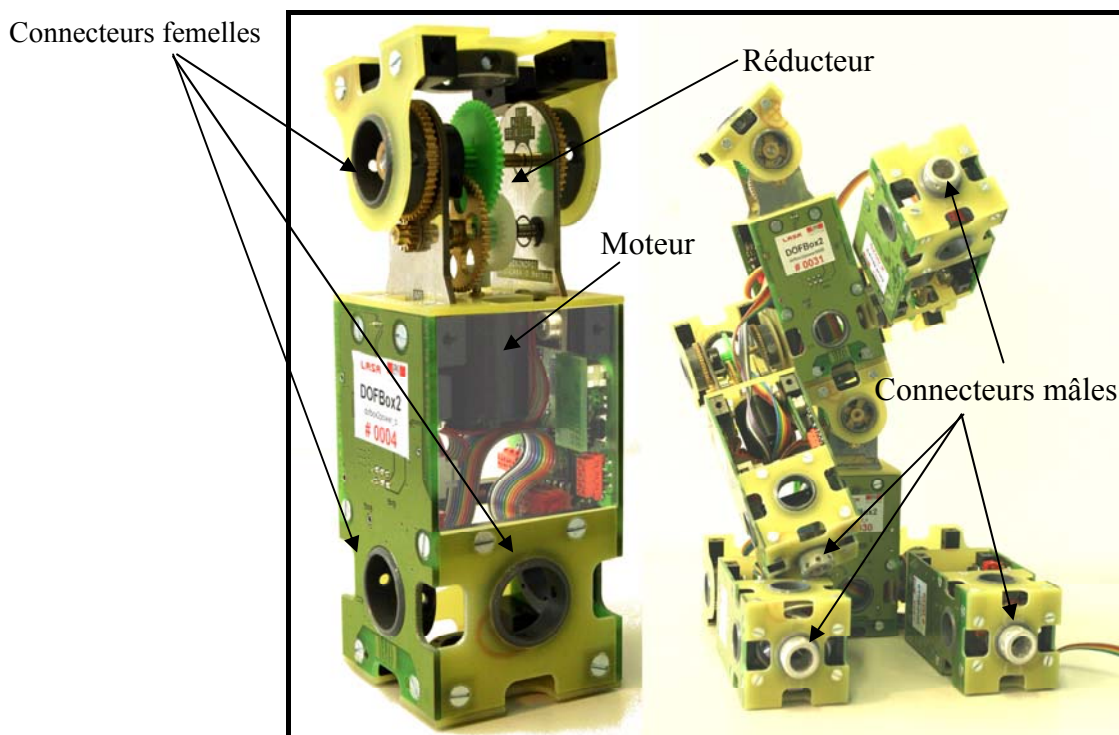


Figure 1: DOF BOX II et assemblage "chien"

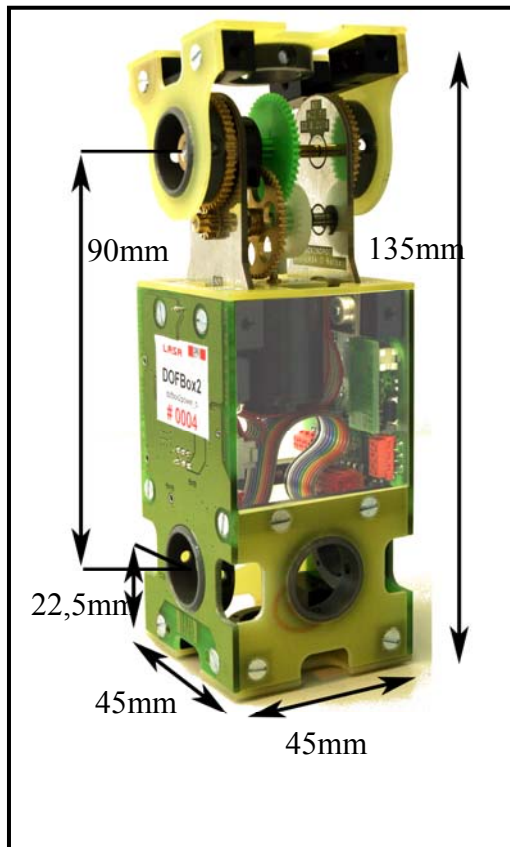
Le DOF BOX II a été développé afin de donner la possibilité de tester plusieurs configurations de robots différentes à partir d'une structure de base unique.

Un DOF BOX II comprend donc :

- Un moteur DC
- Un réducteur
- Un châssis comprenant plusieurs points de fixations pour d'autres modules
- Une électronique de commande (logique d'asservissement, de communication)
- Un étage de puissance (alimentation du moteur)

## 2.2 Mécanique

### 2.2.1 Caractéristiques mécaniques



Masse :	180 g
Masse connecteur mâle :	6 g
Couple maximum admissible :	~1 Nm
Hauteur :	135 mm
Arêtes :	45 mm
Centre de gravité :	70 mm (en z)
Distance entre connecteurs (d'un même plan)	90 mm
Rotation du DDL :	+/- 90°

Figure 2: DOF BOX II

## 2.2.2 Le moteur

Le moteur est un moteur à courant continu (à collecteur) **Faulhaber 2224012SR** alimenté à 12V.

Les caractéristiques principales sont:

- Tension nominale :  $U_0=12\text{ V}$
- Résistance de l'induit :  $R_{\text{mot}}=8,71\ \Omega$
- Constante de couple :  $k_M=14,5\text{ mNm/A}$
- Inductance de l'induit :  $L=200\ \mu\text{H}$
- Inertie du rotor :  $J_{\text{mot}}=2,7\text{ gcm}^2$

Le châssis est constitué d'une partie principale dans laquelle sont montés le moteur, l'électronique de contrôle et de puissance. Le réducteur est fixé à cette partie et supporte l'axe de la seconde partie constituée de trois connecteurs femelles.

Le module moteur permet d'asservir le moteur et de recevoir les valeurs de consignes, ainsi que toutes les valeurs d'initialisation du module, du PC via une ligne I2C (bus I2C). Ce module est doublement alimenté, puisqu'il utilise une alimentation de 5 V pour la logique et de 9 V pour les amplis attaquant le moteur.

## 2.2.3 Le réducteur (r=192)

Dernier étage de réduction,  
 2 pignons parallèles ( $z=12$ )  
 et  
 2 roues dentées parallèles  
 ( $z=48$ )

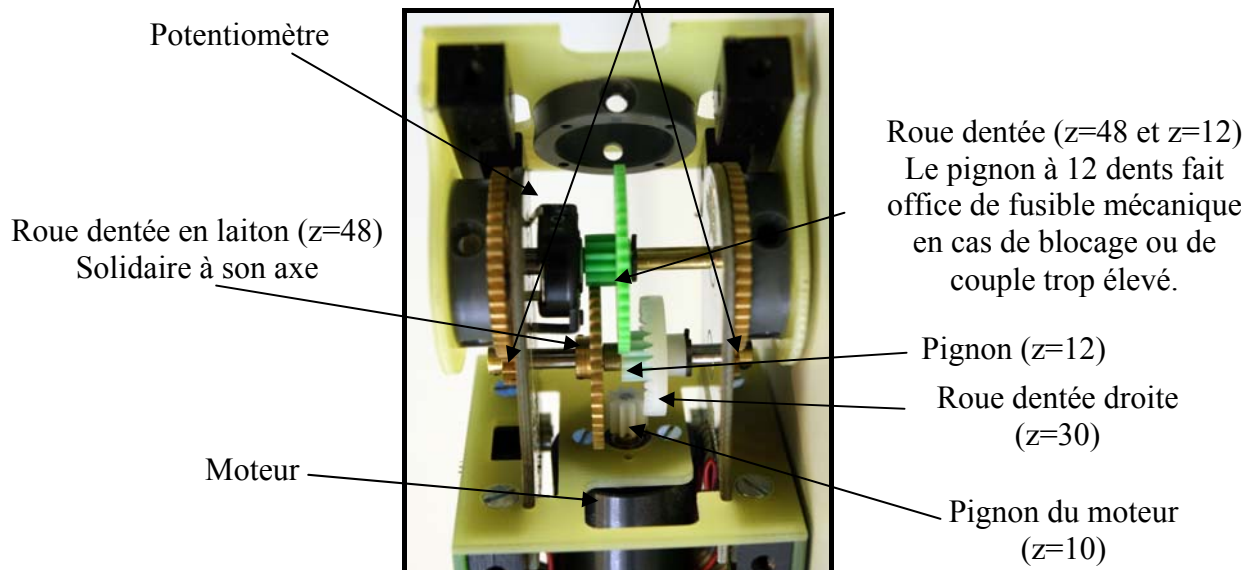


Figure 3: Réducteur

## 2.2.4 Le bus de puissance et ses connecteurs

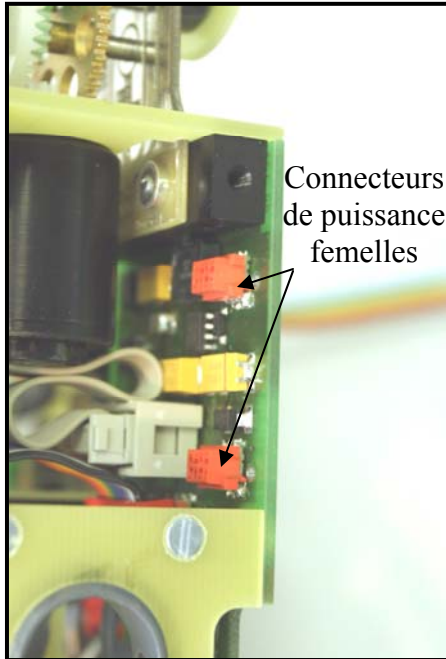


Figure 4: Connecteurs femelles de puissance

Chaque DOF BOX II dispose de deux connecteurs (MicroMatch 4 pôles SMD, femelles) de puissance. Chaque DOF BOX II doit être alimenté. Un ou plusieurs câbles plats (à 4 fils) munis de connecteurs mâles doivent donc parcourir le robot afin d'alimenter chaque module.

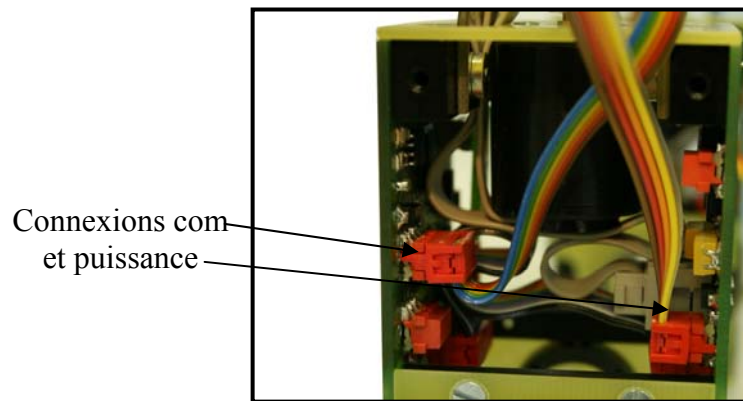


Figure 5: Connexion des bus de puissance et de communication.

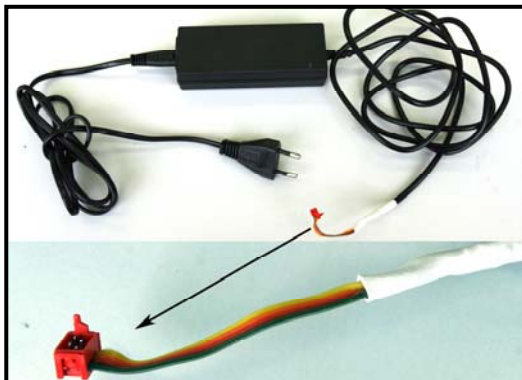


Figure 6: Alimentation continu 12 V, 5 A max et son connecteur

Le tout est alimenté par une alimentation continue 12 V externe, en la connectant à l'un des connecteurs de puissance de l'un des modules (n'importe lequel).

Chaque extrémité du robot ainsi que le PCB supportant le moteur sont munis de passages destinés au bus de puissance (câbles plat à 4 fils) et au bus de communication (câble plat à 6 fils, présenté au chapitre suivant). De cette manière, il est possible de faire passer tous les fils sans risquer de gêner le mouvement du robot ou d'avoir des fils externes disgracieux.

## 2.2.5 Le bus de communication et ses connecteurs

Le bus de communication physique est formé d'un câble plat à 6 fils muni de connecteurs mâles MicroMatch 6 pôles. Le principe de connexion est le même que pour le bus de puissance.

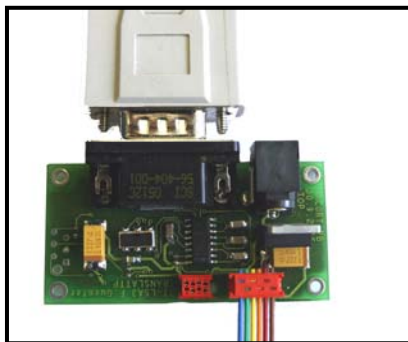


Figure 8: Translateur entre la prise série du PC est le bus I2C

Le bus de communication est connecté au translateur, lui-même connecté à un port série du PC de contrôle.

**Attention**, les deux connecteurs I2C se trouvent du même côté que les connecteurs de puissance, le connecteur 6 pôles qui se trouve du côté opposé est utilisé pour le bus UART.

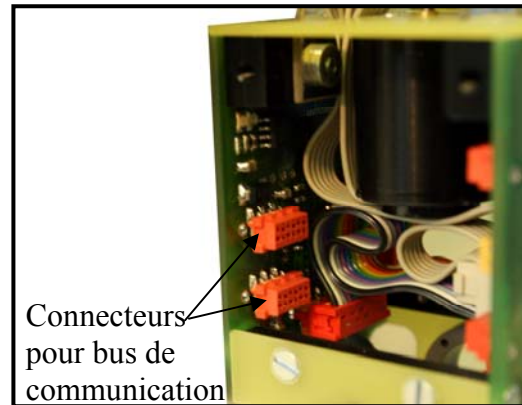


Figure 7: Connecteurs femelles de communication

## 2.2.6 Passages pour les fils

Un certain nombre d'ouvertures ont été prévues sur les arêtes du DOF BOX II afin de laisser passer les bus de puissance et de communication. Les fils passent ainsi donc principalement à l'intérieur de la structure du robot, ce qui diminue les risques d'interférences mécaniques lors des mouvements de ce dernier.

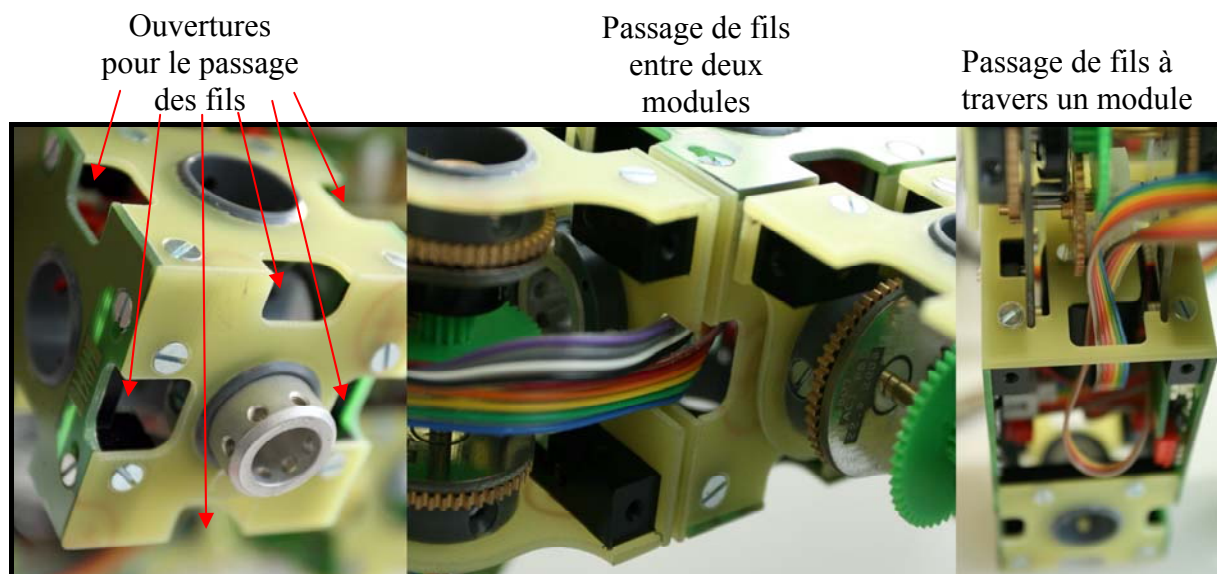


Figure 9: Passages pour les bus de communication et de puissance

## 2.2.7 Les connexions mécaniques

Les modules sont dotés de connecteurs femelles formés d'une bague munie de trous radiaux.

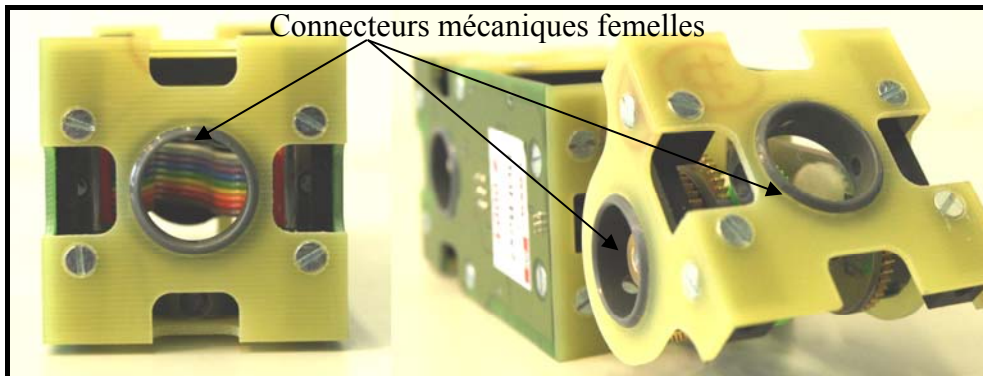


Figure 10: Vue de connecteurs mécaniques femelles

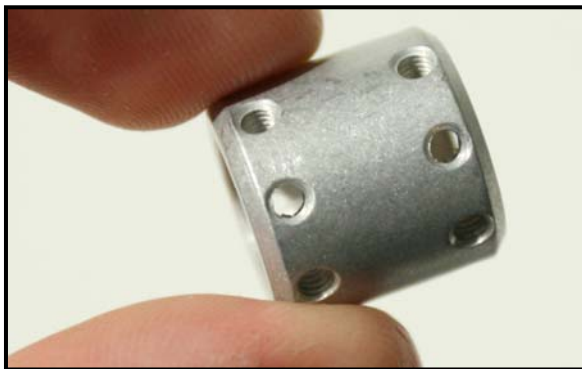


Figure 11: Double connecteur mâle

Les doubles connecteurs mâles, formés de tubes en alu munis de taraudages (M2,5) radiaux, se placent entre deux connecteurs femelles.



Figure 12: Insertion du connecteur mâle



Figure 14: fixation du connecteur mâle avec une vis

Deux vis (M2,5) radiales aux connecteurs, placées à 90° et serrées garantissent la solidité de la liaison mécanique.

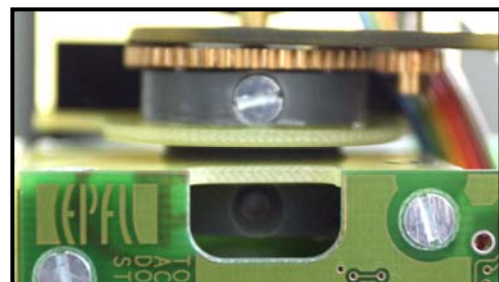


Figure 13: Double connecteur mâle entre deux connecteurs femelles

## 2.3 Schéma de commande

Le DOF BOX II est pourvu d'une logique d'asservissement au sein même du module. Le contrôleur est un PID, duquel l'utilisateur peut choisir les coefficients, et le contrôle peut se faire en position, en vitesse ou en courant (couple, pour un moteur DC de « bonne qualité »<sup>1</sup>). L'utilisateur dispose d'un certain nombre de registres qui lui permettent de choisir nombre d'options ou de grandeurs, par exemple, la fréquence d'échantillonnage du contrôle, le choix de la mesure de position, le type de contrôle, la source de la consigne, etc...

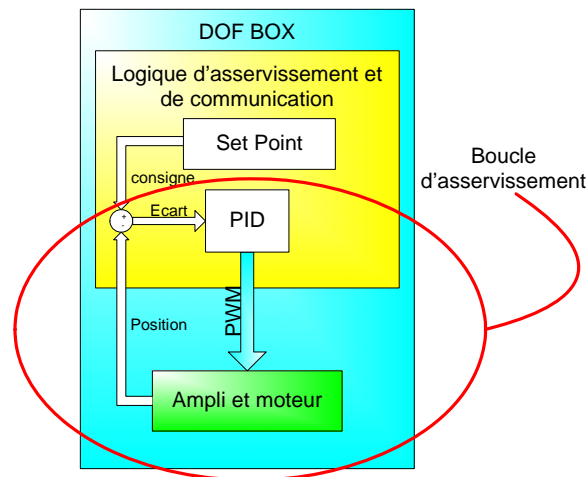


Figure 15: schéma de la boucle d'asservissement

Chacun des modules est connecté à un bus de communication I<sup>2</sup>C et à un bus de puissance (qui fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du système).

Le contrôle plus haut niveau, c'est-à-dire la génération de trajectoire et les éventuels changements de référentiels se font au sein du PC qui contrôle tout le système.

Le PC communique par liaison série avec le système via un translateur qui fait le lien entre la ligne série du PC et le bus I<sup>2</sup>C du robot.

<sup>1</sup> On entend par « moteur de bonne qualité », un moteur dont la constante de couple ne dépend pas de la position torique et/ou avec très peu d'effet réductant, et avec un très faible couple de décollement. Si c'est le cas, le moteur a une caractéristique courant/couple très linéaire. Le moteur sera donc ainsi bien modélisé par des équations linéaires.

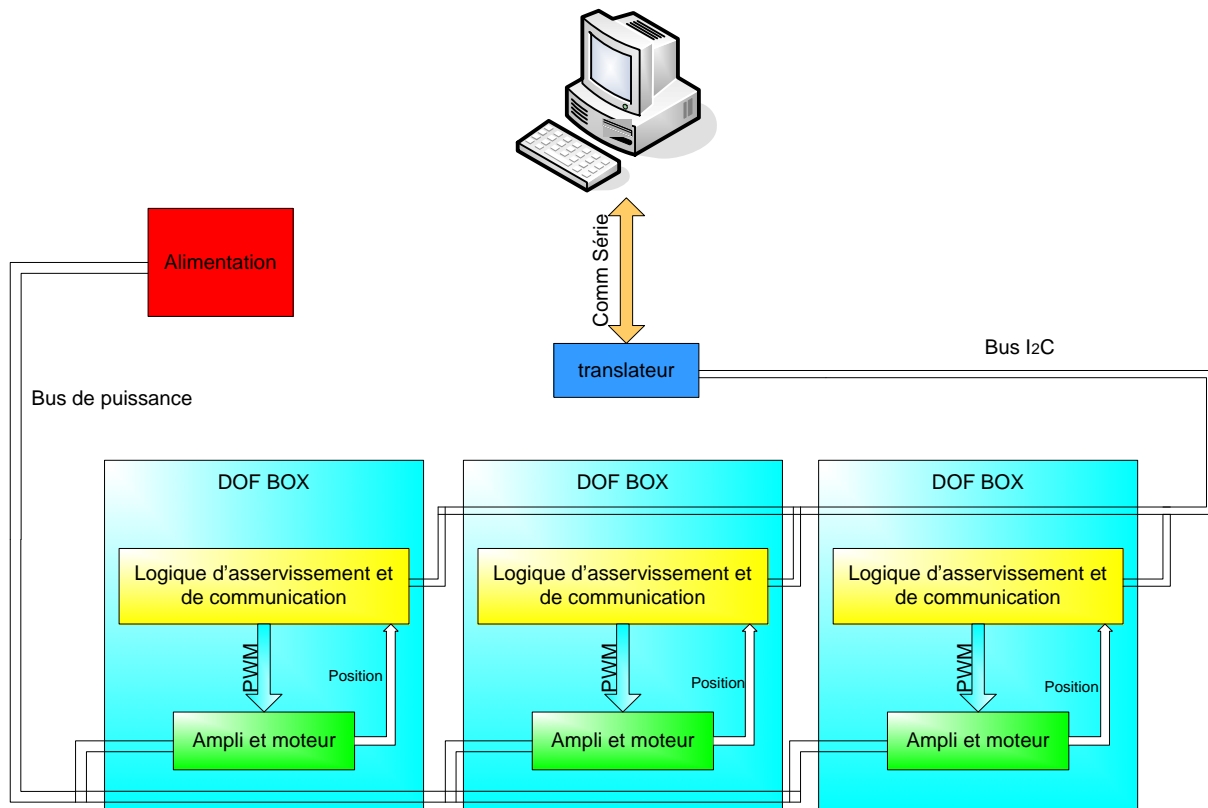


Figure 16: Schéma de configuration du système complet

Une fois l'initialisation et la configuration des contrôleurs moteurs effectuées, il suffit de mettre à jour, dans le temps, la consigne en position, vitesse, ou couple, selon les trajectoires calculées.

## 3 Préparation du TP

### 3.1 A préparer pour la première séance

Les points énoncés ci-dessous doivent être réalisés préalablement à la 1<sup>ère</sup> séance de TP.

- Point 1 de l'exercice 3 : « calcul de la résolution théorique de l'encodeur »
- Exercice 4 (les deux points) : « équations du mouvement et fonction de transfert du système à commander »
- Exercice 5 : Dimensionner le régulateur PID numérique
- Exercice 6, points 1 et 3 : « calculer la dynamique en boucle fermée et l'écart en position »

### 3.2 A préparer pour la deuxième séance

Les points énoncés ci-dessous doivent être réalisés préalablement à la 2<sup>ème</sup> séance de TP.

- Exercice 7 : Concevoir le robot
- Exercice 9 : Imaginer et représenter les différentes séquences de mouvement du robot

## 4 Donnée du TP

***!!!! MISE EN GARDE!!!!***

Le DOF BOX II est capable de générer un couple conséquent supérieur à 1 Nm, celui-ci peut être dangereux en cas de mauvaise manipulation.

Une commande erronée ou un problème technique peut engendrer un comportement inattendu du robot et blesser gravement les utilisateurs de ce dernier.

Les utilisateurs sont donc priés de prendre toutes les précautions nécessaires afin d'éviter un malencontreux accident.

## 4.1 Informations de lecture

Certaines parties de la donnée sont indispensables à la compréhension des tâches à réaliser lors du TP. Ces parties sont en caractères italiques.

*Parties à lire absolument*

D'autres sont données à titre d'information et ne sont pas absolument nécessaires à la compréhension du TP, bien que certains concepts importants y soient notés. Ces dernières sont en caractère normal.

Parties à lire à titre d'information

Pour la plupart des mesures à réaliser, vous disposez d'un programme vous permettant de les réaliser facilement.

Le fichier Executables\_de\_mesures.zip, disponible sur la page Web du cours, contient tous les programmes nécessaires à la réalisation des mesures.

Téléchargez-le et dézippez-le dans votre dossier de travail. Chaque exécutable est dans un dossier séparé dans lequel se trouvent également les fichiers dont il a besoin pour être exécuté. Ne déplacez rien.

Si le programme génère des résultats (fichiers), ceux-ci se trouveront dans le dossier « résultat » lorsqu'il y en a un.

Le rapport devra contenir tous les résultats et les discussions demandées dans la donnée des exercices. Le pourcentage de la note est indiqué pour chaque exercice.

## 4.2 Notations

$P_{red\_out}$	Puissance à la sortie du réducteur	[W]
$P_{red\_in}$	Puissance à l'entrée du réducteur	[W]
$\mu_{red}$	Rendement du réducteur	
$\omega_{red\_in}$	Vitesse angulaire à l'entrée du réducteur	[rad/s]
$\omega_{red\_out}$	Vitesse angulaire à la sortie du réducteur	[rad/s]
$M_{red\_in}$	Couple à l'entrée du réducteur	[Nm]
$M_{red\_out}$	Couple à la sortie du réducteur	[Nm]
$r_{red}$	Rapport de réduction du réducteur	
$u_{mot}$	Tension aux bornes du moteur	[V]

$R_{mot}$	Résistance de l'induit du moteur	$[\Omega]$
$i_{mot}$	Courant dans le moteur	$[A]$
$L_{mot}$	Inductance de l'induit du moteur	$[H]$
$K_M$	Constante de couple du moteur	$[Nm/A]$
$\Omega_{mot}$	Vitesse angulaire du rotor du moteur	$[rad/s]$
$M_{mot}$	Couple mécanique à la sortie du moteur	$[Nm]$
$M_{mot\_el}$	Couple électromécanique du moteur	$[Nm]$
$M_{pert}$	Couple cumulé de toutes les perturbations	$[Nm]$
$M_{mot\_ch}$	Couple transmis à la charge côté moteur	$[Nm]$
$J_{mot}$	Inertie du rotor du moteur	$[kgm^2]$
$J_{ch}$	Inertie de la charge	$[kgm^2]$
$J'_{ch}$	Inertie de la charge ramenée au moteur	$[kgm^2]$
$\theta_{mot}$	Position angulaire du rotor du moteur	$[rad]$
$\theta_{out}$	Position angulaire à la sortie du réducteur	$[rad]$
$e$	Écart entre la mesure et la consigne	Dépend du système à régler
$y_c$	Consigne	Dépend du système à régler
$u$	Grandeur de commande	Dépend du système à régler
$u_i$	Composante « intégrale » de la commande	Dépend du système à régler
$u_d$	Composante « dérivée » de la commande	Dépend du système à régler
$u_i$	Composante « intégrale » de la commande	Dépend du système à régler
$K_p$	Gain proportionnel du régulateur PID	Dépend du système à régler
$T_i$	Constante de temps du terme intégral	$[s]$
$T_d$	Constante de temps du terme proportionnel	$[s]$
$h$	Période d'échantillonnage du régulateur (A/D)	$[s]$
$s$	Fréquence imaginaire dans les transformées de Laplace	
$K$	Fonction de transfert du contrôleur	Dépend du système à régler
$H$	Fonction de transfert du système à régler	Dépend du système à régler
$G$	Fonction de transfert du système en boucle fermée	Dépend du système à régler
$k$	Variable de temps discrétisée : $t \approx k \cdot h$	

## 4.3 Première partie : Caractérisation du DOF BOX II

Cette première partie est destinée à caractériser un module. Les résultats obtenus sont nécessaires à certaines tâches de la partie 2 (applications numériques).

### 4.3.1 Mesure du rendement du réducteur

Le réducteur est utilisé pour augmenter le couple (et réduire la vitesse) à la sortie. Le réducteur est formé de roues dentées montées sur deux axes. Le rapport de dents entre chaque paire de roues donne le rapport de réduction du couple en question. Le produit des diverses réductions donne finalement le rapport de réduction total du réducteur. Cette technique de réduction est communément utilisée, mais elle a un coût... son rendement. En effet, les dents frottent les unes contre les autres pour transmettre le mouvement. De plus, les roues dentées sont montées sur des paliers lisses qui frottent également. Ainsi, le rendement n'est pas parfait. De manière générale, plus le rapport de réduction est grand, plus le rendement est faible, plus le jeu est important et la rigidité faible. Un rendement inférieur à 50% implique que le système est irréversible.

En général, on caractérise le rendement d'un réducteur par une constante de telle sorte que :

$$\mu_{red} = \frac{P_{red\_out}}{P_{red\_in}} = \frac{\omega_{red\_out} \cdot M_{red\_out}}{\omega_{red\_in} \cdot M_{red\_in}} \Leftrightarrow M_{red\_out} = r_{red} \cdot \mu_{red} \cdot M_{red\_in}$$

Où  $M_{red\_in}$  et  $M_{red\_out}$  sont respectivement les couples d'entrée et de sortie du réducteur,  $r_{red}$  est le rapport de réduction et  $\mu_{red}$  et le rendement du réducteur. Il s'agit d'une simplification, car, dans la réalité, ce rapport n'est pas constant et dépend de la position, de la vitesse et de la charge. De plus, il y a généralement un couple de décollement nécessaire à mettre en mouvement le système (dû au coefficient de frottement statique supérieur au coefficient dynamique)

#### 4.3.1.1 Exercice 1 (6%)

Mesurez le rendement du réducteur pour un module choisi en fonction de la charge et de la position à une vitesse donnée (mouvement quasi statique).

**Remarque :**

- Le rapport de réduction est de 192.
- Vous trouverez dans le chapitre «

- *Rappel sur les réducteurs et rapports de réduction* », quelques informations sur les réducteurs et les équations qui y sont liées.

#### **4.3.1.1.1 Protocole de mesure**

Afin de mesurer le rendement du réducteur, nous allons tenter de mesurer le courant consommé par le moteur, afin d'en déduire le couple pendant un mouvement vertical (simplification) d'une masse fixée sur un levier solidaire de la sortie du DOF BOX.

La charge vous est fournie. Il s'agit d'une barre (équilibrée) sur laquelle peut être fixée une masse à certains points précis. Les charges équivalentes à la sortie du réducteur sont respectivement 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 et 0.5 Nm.

Marche à suivre :

- Fixez la barre sur le DOF BOX que vous désirez tester
- Connectez le DOF BOX (un seul à la fois) au bus de communication et ce dernier au translateur.
- Connectez l'alimentation au DOF BOX
- Lancez le programme « Exercice1\_\_Rendement\_reducteur.exe »
- Suivez les instructions
- Lorsque vous avez terminé les mesures et fermé le programme, exécutez le script « plot\_torque\_data.m »

A la fin de la procédure, vous trouverez les images des graphs correspondants dans le dossier « figures » et les données (sous la forme d'un fichier data.mat) dans le dossier « data ».

#### **4.3.1.1.2 Points à discuter dans le rapport**

- *Insérez les graphiques qui vous semblent appropriés avec vos éventuelles annotations supplémentaires.*
- *Discussion personnelle (5 lignes max).*
- *Peut-on identifier une fonction simple liant la charge et le rendement du réducteur ?*
- *Peut-on identifier une valeur de frottement statique/dynamique ? (5 lignes max)*
- *Discutez la signification des écarts types calculés sur les mesures effectuées. (5 lignes max)*

**Rappel :**

L'écart type  $s$  d'une liste de nombre  $y = [y_1; y_2; \dots; y_n]$  est:

$$s = \sqrt{\frac{(y_1 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2}{n - 1}}$$

où  $\bar{y}$  représente la moyenne de la liste  $y$ .

## Mesure du jeu dans la réduction

L'un des inconvénients majeurs dans une réduction est son jeu. On peut l'éviter en faisant du « rattrapage de jeu », mais cela implique une complexité technique qui n'est souvent pas envisageable pour des projets à coût réduit. Ce jeu doit donc rester acceptable pour une application donnée. Le jeu varie en fonction de la position, de la vitesse, de la charge, de l'usure, etc.

### 4.3.1.2 Exercice 2 (6%)

*Mesurez le jeu du réducteur pour un module choisi en fonction de la position à faible charge.*

#### 4.3.1.2.1 Protocole de mesure

Il s'agit ici de mesurer le jeu dans le réducteur en fonction de la position pour une faible charge. Pour cela, le moteur sera asservi en position par le biais de l'encodeur (afin de ne pas être soumis au jeu du réducteur). Un gain élevé du régulateur permettra, à très faible charge, de pouvoir faire l'hypothèse que le moteur est bloqué à la position de consigne.

Marche à suivre :

- Fixez l'outil de mesure sur le DOF BOX que vous désirez mesurer.
- Connectez le DOF BOX (un seul à la fois) au bus de communication et ce dernier au translateur.
- Connectez l'alimentation au DOF BOX
- Ouvrez le fichier excel : « ./data/mesure du jeu du réducteur.xls »
- Lancez le programme « ./Debug/Exercice2\_\_Jeu\_reducteur.exe »
- Suivez les instructions pour incrémenter ou décrémenter la consigne de position.
- Pour chacune des positions de mesure, mesurez le battement au bout de la tige et reportez vos mesures dans le fichier excel.

#### 4.3.1.2.2 Points à discuter dans le rapport

- *Insérez le graphique du jeu du réducteur en fonction de la position (à faible charge) et vos éventuelles annotations.*
- *Discussion à propos du jeu dans le réducteur (5 lignes max)*
- *Le jeu dépend-il de la position, comment et pour quelle(s) raison(s) ?(max 5 lignes)*
- *Si cela a un sens, insérez ici un histogramme du jeu mesuré (quelle que soit la position), Calculez l'écart type sur ces valeurs (si cela a du sens) et discutez-le. Pour les points qui n'ont pas de sens, expliquez pourquoi. (10 lignes max).*
- *Tous vos modules semblent-ils avoir le même jeu (sans les mesurer effectivement et en comparant vos résultats avec d'autres groupes) ? Expliquez les éventuelles différences. (max 5 lignes)*
- *Proposez d'autres méthodes de démultiplication, comparez les en quelques points aux réducteurs à roues dentées et proposez une application pour chacune d'elles où celles-ci sont mieux adaptées (que le réducteur à roues dentées). (10 lignes max)*

## 4.3.2 Caractérisation du potentiomètre et l'encodeur

La position du degré de liberté de chaque module est mesurée de deux manières :

- Par un potentiomètre à la sortie (au niveau de l'axe de sortie).
- Par un encodeur à 16 pulses/tours sur le moteur.

L'avantage du potentiomètre est qu'il permet une mesure de la position absolue alors que la mesure de l'encodeur se réfère toujours à un 0 fixé à l'initialisation et est dépendante du jeu du réducteur, puisque la mesure se fait en amont de ce dernier.

Par contre, le potentiomètre est une résistance que l'on mesure, donc sujette au bruit. De plus c'est une mesure analogique, également sujette au bruit de mesure alors que l'encodeur permet une mesure numérique (incrémentale) de la position, donc, sauf erreur de comptage, après initialisation, la répétabilité de la mesure est parfaite.

### 4.3.2.1 Exercice 3 (8%)

- *Calculez la résolution théorique de l'encodeur.*
- *Mesurez la résolution de mesure pour le potentiomètre en fonction de la position pour un module donné, à faible charge (et direction de charge constante).*
- *Représentez sur un graph la courbe « position mesurée par le potentiomètre » en fonction de la « position mesurée par l'encodeur » et calculez l'écart type de la différence des deux données.*

#### 4.3.2.1.1 Protocole de mesure

La méthode utilisée est la suivante: après l'initialisation de la position de l'encodeur, nous plaçons la barre de mesure à un angle d'environ 60° pour ensuite la laisser descendre doucement et la laisser se bloquer sur un obstacle placé au préalable. L'obstacle va servir à déterminer une position fixe qui ne dépend ni de l'encodeur ni du potentiomètre. Comme la barre est freinée durant ça descente, les conditions de jeu seront les mêmes pour chaque mesure. Dix mesures seront effectuées pour trois positions différentes. Afin d'évaluer la précision de chacun des capteurs, il faudra calculer la moyenne et l'écart type pour chaque position.

Marche à suivre :

- Fixez la barre de mesure dans alignement du DOF BOX que vous désirez mesurer.
- Connectez le DOF BOX (un seul à la fois) au bus de communication et ce dernier au translateur.
- Connectez l'alimentation au DOF BOX
- Lancez le programme « ./Debug/Exercice3\_\_Resolution\_et\_lin\_pot.exe »
- Suivez les instructions.

A la fin de la procédure, vous trouverez les mesures des positions correspondantes dans le fichier « datam.txt ».

### 4.3.2.1.2 Points à discuter dans le rapport

- Insérez votre calcul de résolution de l'encodeur.
- Donnez la moyenne et l'écart type pour chaque capteur et chaque position.
- Enumérez en quelques points les avantages et inconvénients de ces deux méthodes de mesure de la position. (max 5 lignes)
- Comment peut-on réaliser l'initialisation de la position avec un encodeur ? Que dire des aspects de sécurité (lorsque cela a du sens) pour une mesure de la position avec un encodeur ? (max 5 lignes)
- Proposez une application où l'encodeur est plus approprié et une où c'est le potentiomètre qui est le plus approprié en précisant les modalités d'implémentation. Justifiez. (5 lignes max)

## 4.4 Deuxième partie : Contrôle d'un module

Lorsque le robot est monté, le système à commander peut être vu de la manière suivante.

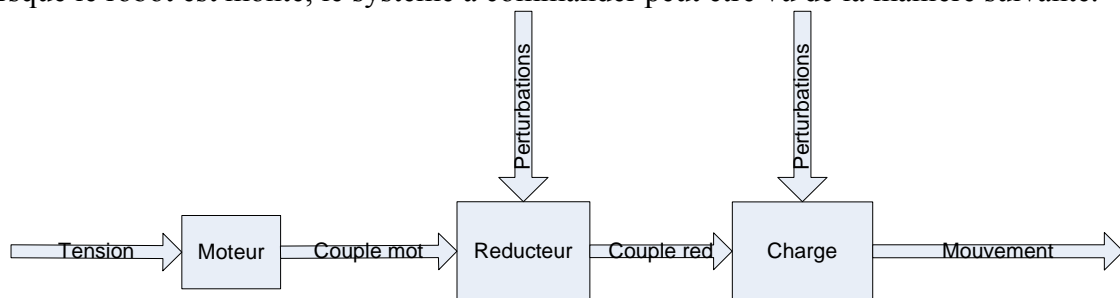


Figure 17: Schéma du système à commander

En faisant les hypothèses que

- chacun de ces éléments est linéaire
- la charge est constante

et en rapportant l'inertie de la charge et les perturbations au niveau du moteur, on a le système linéaire suivant.

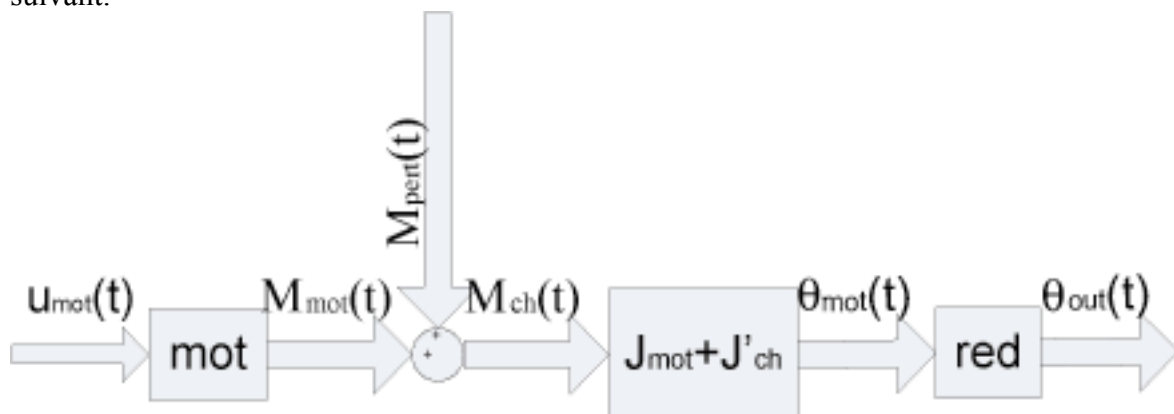


Figure 18: Linéarisation et simplification du système à commander

#### 4.4.1.1 Exercice 4 (10%)

Calculez la fonction de transfert de ce système en considérant le moteur en fonctionnement quasi-statique ( $di/dt = 0$ ) et sans tenir compte des perturbations. Refaite ensuite le calcul en tenant compte des perturbations.

##### 4.4.1.1.1 Points à discuter dans le rapport

- Quelles sont les hypothèses réalisées pour pouvoir considérer le système à commander comme un système linéaire ?
- Insérez les équations et calculs amenant à la fonction de transfert du système à commander ( $\frac{\theta_{out}(s)}{U_{mot}(s)}$  ou  $\frac{\theta_{mot}(s)}{U_{mot}(s)}$ ). La tension du moteur est contrôlée par la valeur du PWM (-128 à 127) et la position à la sortie du réducteur varie de -90 à 90 sur toute la plage de mouvement du module (180°). Déduisez donc la fonction de transfert  $\frac{POS(s)}{PWM(s)}$  où pos est la position telle qu'elle est codée dans le registre position du module et pwm est la valeur du pwm généré par le module sur le pont de puissance.
- Comment sont modélisés les frottements secs dans la fonction de transfert, et qu'est-ce que cela implique en terme de régulation ? (5 lignes max)

#### 4.4.2 Dimensionnement de la commande

La fréquence d'échantillonnage des mesures et de la commande est de 264Hz. On désire dimensionner un régulateur PD pour le système précédent avec le cahier des charges ci-dessous et en considérant que l'inertie la charge est de 5,52 gm<sup>2</sup>.

Cahier des charges du système en boucle fermée pour le contrôle en position.

- La fréquence de coupure du système en boucle fermée est supérieure ou égale à 15Hz.
- On ne veut pas de terme intégral (PD et non PID).
- Dépassement de la valeur de consigne inférieure à 15% lors d'un saut indicial de la consigne.

#### 4.4.2.1 Exercice 5 (10%)

Dimensionnez le régulateur PD répondant au cahier des charges ci-dessus.

**Remarque :**

- Pour le dimensionnement de la commande, considérer le rendement de réducteur comme un paramètre. L'application numérique sera faite lors du TP avec les données mesurées lors de l'exercice 1.
- Vous trouverez dans les chapitres 8 et 9 de [1] (Numérisation et synthèse discrète), un rappel sur la numérisation et la synthèse dans le diagramme de Bode d'un régulateur analogique.

- La charge de  $5,52 \text{ gm}^2$  vous est fournie lors du TP.

L'algorithme codé dans le DOF BOX II n'inclut pas de filtre passe-bas dans le terme dérivateur et utilise la seconde méthode d'Euler également pour le terme intégral, on a ainsi (voir le chapitre « Rappel sur la Numérisation d'un régulateur analogique »):

$$e(k) = y_c(k) - y(k)$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \frac{h}{T_i} e(k)$$

$$u_d(k) = \frac{T_d}{h} \cdot (e(k) - e(k-1))$$

$$u(k) = K_p \cdot (e(k) + u_i(k) + u_d(k))$$

Les valeurs des registres KP, KD, KpDivPos et KdDivPos à passer comme paramètres au DOF BOX II pour le PID se déduisent des équations suivantes:

$$K_p = KP \cdot 2^{-KpDivPos}$$

$$K_d = KD \cdot 2^{-KdDivPos}$$

$$K_d = K_p \cdot T_d$$

#### 4.4.2.1.1 Points à discuter dans le rapport

- Insérez ici le raisonnement vous amenant à identifier les valeurs des paramètres  $K_p$  et  $T_d$  de votre régulateur en précisant les points clés du cahier des charges qui vous ont aiguillés.
- Les calculs du PID dans le DOF BOX étant faits sur 16 bits (12.4), selon la méthode expliquée dans la donnée, calculez les valeurs des registres Kp, KpDiv, Kd et KdDiv du module.
- Insérez les calculs (ou le raisonnement) vous permettant de trouver la dynamique en boucle fermée du système à commander et de son contrôleur.

#### 4.4.2.2 Exercice 6 (10%)

- Calculez la dynamique en boucle fermée
- Mesurez la dynamique en boucle fermée
- Calculez l'écart en position
- Mesurez de l'écart en position
- Représentez et expliquez les différences observées.

**Question :** Justifiez votre choix de fréquence de coupure pour le système en boucle fermée.

##### 4.4.2.2.1 Protocole de mesure pour l'exercice 6

Pour mesurer la dynamique du système en boucle fermée, plutôt que de réaliser des essais harmoniques, nous allons faire des essais de saut indiciel en position, supposant que le système est du premier ordre.

Marche à suivre :

- Fixez la charge au DOF BOX que vous désirez mesurer.
- Connectez le DOF BOX (un seul à la fois) au bus de communication et ce dernier au translateur.
- Connectez l'alimentation au DOF BOX
- Lancez le programme « ./Debug/Exercice6\_\_Dynamique.exe »
- Suivez les instructions.
- Lorsque vous avez terminé les mesures et fermé le programme, exécutez le script « plot\_step.m »

A la fin de la procédure, vous trouverez les images des graphes correspondants dans le dossier « figures » et les données (sous la forme d'un fichier data.mat) dans le dossier « data ».

#### **4.4.2.2 Points à discuter dans le rapport**

- *Insérez vos graphiques de la réponse du système à des sauts indiciels.*
- *Interprétez les graphiques ci-dessus. Comment en déduire la bande passante du système en boucle fermée (sous hypothèse que le système en boucle fermée s'apparente à un système du premier ordre)? Que se passe-t-il pour des sauts d'amplitude élevée ? Comment interpréter cela à partir de la modélisation linéaire du système à commander ? Compléter le schéma fonctionnel du système à commander en y incluant des blocs permettant de prendre en compte les phénomènes observés. (max 10 lignes)*
- *Le système mesuré correspond-il à vos prédictions théoriques ? Quelles sont les différences et d'où proviennent-elles (5 lignes max)*

## **4.5 Troisième partie : Fabriquer un robot**

*Dans cette troisième et dernière partie du TP, il s'agira de concevoir, de fabriquer, de commander et de caractériser un robot capable de :*

- *se mouvoir en avant et en arrière (au moins)*
- *d'exercer une force horizontale de 1 N sur un objet extérieur ou de déplacer cet objet.*

### **4.5.1 Marche à suivre**

#### **4.5.1.1 Exercice 7 (7%)**

*Concevez un robot susceptible de répondre au cahier des charges ci-dessus.  
Pour cette tâche, reportez-vous au chapitre « Présentation du DOF BOX II ».*

#### **4.5.1.1.1 Points à discuter dans le rapport**

- Expliquez votre démarche de conception du robot. (max 10 lignes)
- Insérez une photo de votre robot.

## 4.5.1.2 Construction

Fabriquez le robot.

Il s'agit ici de :

- fabriquer le robot
- connecter correctement les bus de puissance et de communication
- connecter le bus de communication au translateur
- connecter le câble série du PC au translateur
- connecter l'alimentation à l'un des connecteurs d'alimentation du robot

## 4.5.1.3 Exercice 8 (7%)

Générez une trajectoire dans l'espace des articulations.

### 4.5.1.3.1 Points à discuter dans le rapport

- Imaginez et représentez (dessin) les différentes séquences de mouvement du robot générant son déplacement.

## 4.5.1.4 Exercice 9 (16%)

Codez un petit programme en C (ou C++) permettant à l'utilisateur de commander le robot. Celui-ci devra être capable au moins de se déplacer sur une dimension et dans les 2 sens (avancer et reculer). Attention, le code sera jugé pour la note finale (clarté, modularité, commentaire, interface, etc...), ainsi que la vidéo du déplacement du robot.

Remarques :

- Le fichier exemple.zip disponible sur la page Web ([lasa.epfl.ch](http://lasa.epfl.ch)) du cours contient toutes les sources nécessaires à la réalisation de ce programme et également un exemple applicable à un robot « chien »

## 4.5.2 Caractérisation du robot

### 4.5.2.1 Exercice 10 (10%)

- Mesurez la vitesse moyenne de déplacement du robot (selon une direction et dans les deux sens) pour un déplacement supérieur à 50 cm.
- Mesurez la distance parcourue et représentez-la sur un graphique pour plusieurs répétitions du même mouvement. Faites un histogramme ainsi qu'un graphique distance de consigne/distance parcourue (avec représentation de l'erreur) de ces résultats et commentez-les.

#### 4.5.2.1.1 Points à discuter dans le rapport

- *Insérez un graphique (histogramme) de la vitesse de déplacement du robot pour une distance à parcourir donnée (50 cm). Commentez quelque peu ces résultats (5 lignes max)*
- *Représentez par un histogramme la distance parcourue par le robot pour une séquence de mouvement donnée. (min 10 répétitions)*
- *Donnez la moyenne de la distance parcourue ainsi que l'écart type.*
- *Le robot est-il adapté à une localisation de type odométrique ? Expliquez pourquoi et proposez une autre méthode de localisation adaptée à la géométrie de votre robot, si ce n'est pas le cas. (5 lignes max)*

### 4.5.3 Déplacement d'une masse

*Plusieurs masses sont à disposition.*

*Le but de ce point est de définir quelle est la masse maximum que le robot est capable de déplacer.*

#### 4.5.3.1 Exercice 11 (10%)

*Utilisez le dispositif fourni pour déterminer la masse maximale que le robot peut déplacer.*

##### 4.5.3.1.1 Points à discuter dans le rapport

- *Quelle est la masse maximale que le robot a pu déplacer ? Ce robot est-il adapté au déplacement d'une masse ?*
- *Proposez une équation basée sur les grandeurs mécaniques de votre robot (connues ou mesurées) permettant de caractériser sa « compétence » dans la tâche consistant à déplacer une masse, et commentez-la. (max 5 lignes).*

*Fin du TP*

*BRAVO*

*Une petite vidéo de votre robot en mouvement sera faite.*

## 5 Rappel sur les réducteurs et rapports de réduction

Rapport de réduction :

$$r_{red} = \frac{\omega_{red\_in}}{\omega_{red\_out}}$$

Inertie de la charge vue par le moteur :

$$J'_{ch} = \frac{J_{ch}}{r_{red}^2}$$

Rapport des couples (sous hypothèse de frottements nuls).

$$M_{red\_out} = r_{red} \cdot M_{red\_in}$$

Sous l'hypothèse d'un frottement sec constant :

$$\mu_{red} = \frac{P_{red\_out}}{P_{red\_in}} = \frac{\omega_{red\_out} \cdot M_{red\_out}}{\omega_{red\_in} \cdot M_{red\_in}} \Leftrightarrow M_{red\_out} = r_{red} \cdot \mu_{red} \cdot M_{red\_in}$$

## 6 Rappel sur les moteurs à courant continu

Tension aux bornes d'un moteur DC :

$$u_{mot}(t) = R_{mot} \cdot i_{mot}(t) + L_{mot} \cdot \frac{di_{mot}(t)}{dt} + K_M \cdot \Omega_{mot}(t)$$

En mode quasi-statique, on a

$$u_{mot}(t) = R_{mot} \cdot i_{mot}(t) + K_M \cdot \Omega_{mot}(t)$$

Le couple moteur vaut :

$$M_{mot\_el} = K_M \cdot i_{mot}(t)$$

En supposant que les frottements visqueux et autres pertes mécaniques du moteur sont négligeables, on a :

$$M_{mot} \approx M_{mot\_el}$$

## 7 Rappel sur la Numérisation d'un régulateur analogique

Généralement, les PID sont implémentés de façon numérique, alors que le système à commander est analogique.

Une méthode couramment utilisée est de dimensionner un régulateur analogique puis de le numériser.

Plusieurs méthodes de numérisation existent et ont leurs avantages et inconvénients (simplicité d'implémentation, vitesse de calcul, stabilité etc...).

La méthode présentée ci-dessous s'applique bien à des contrôles sans grandes prétentions. Elle a l'avantage d'être simple et intuitive.

La discussion ci-dessous est tirée de [1].

Le régulateur PID analogique est de la forme :

$$K(s) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right)$$

Ce régulateur inclut un filtre dans le terme dérivateur de constante de temps  $T_d/N$ . Le nombre  $N$  est généralement fixé à l'avance entre 3 et 20 et peut généralement être négligé lors de la synthèse.

La forme la plus courante est celle présentée ci-dessus pour laquelle  $N \rightarrow \infty$  (donc sans le filtre).

La forme standard du régulateur proportionnel intégral dérivateur numérique, après numérisation du terme dérivateur avec la seconde méthode d'Euler et du terme intégrateur avec la première méthode d'Euler, est :

$$K(z) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{h}{z-1} + \frac{N \cdot (z-1)}{\left(1 + N \frac{h}{T_d}\right) \cdot z - 1} \right)$$

L'algorithme prêt à être implémenté à la forme suivante :

$$e(k) = y_c(k) - y(k)$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \frac{h}{T_i} e(k-1)$$

$$u_d(k) = \frac{T_d}{T_d + Nh} \cdot (u_d(k-1) + N \cdot (e(k) - e(k-1)))$$

$$u(k) = K_p \cdot (e(k) + u_i(k) + u_d(k))$$

L'algorithme codé dans le DOF BOX II n'inclut pas de filtre passe bas dans le terme dérivateur et utilise la seconde méthode d'Euler également pour le terme intégral, on a ainsi :

$$e(k) = y_c(k) - y(k)$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \frac{h}{T_i} e(k)$$

$$u_d(k) = \frac{T_d}{h} \cdot (e(k) - e(k-1))$$

$$u(k) = K_p \cdot (e(k) + u_i(k) + u_d(k))$$

## 8 Bibliographie

- [1] Longchamp, R. (1995). Commande numérique de systèmes dynamiques. Presse Polytechnique et universitaires romandes. Lausanne.
- [2] Bär, D. (2003) The ASL I<sup>2</sup>C motor control module. ASL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [3] Daidié, D (2005) Création d'un robot mobile à plusieurs DDL. LASA, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.