

# Modélisation AxNum avec Simulink®

## Savoirs et compétences développés :

- Analyser : Caractériser les écarts et les interpréter, Analyse fonctionnelle
- **Modéliser : Proposer un modèle de comportement** adapté pour un objectif.
- **Résoudre en utilisant une démarche numérique.**
- Expérimenter : observer un protocole expérimental pour valider un modèle.

## Introduction

### Objectif du TP

**On souhaite améliorer les performances du système AxNum lorsqu'il est asservi en vitesse.** Le cahier de charges de l'axe prototype impose un **temps de réponse à 95% inférieur à 0.5s**. Afin d'améliorer nos connaissances du système et tester rapidement différents réglages une simulation va être développée. Des difficultés de modélisation inhérentes à ce type de système comme les **effets de seuil** provenant des **frottements secs** ou les effets de **saturation** provenant des limitations des composants seront observés. Ce TP permet de préparer le premier projet de modélisation et simulation de systèmes.

### Système

Nous étudierons l'axe numérique Didalab Figure 1. Ce système permet le positionnement ou la régulation de vitesse d'un chariot motorisé par une machine à courant continu. Il pourrait servir à positionner la tête d'impression d'une imprimante 3D, la broche d'une machine-outil (avec un moteur plus puissant) ou encore la tête d'une imprimante grandes dimensions. Cet axe permet de faire des expériences dans un environnement de prototypage contrôlé et de valider des choix techniques avant de réaliser une machine plus complète. Idéalement cet axe doit être rapide et précis, des critères quantifiés étant disponible dans le cahier des charges de la machine que l'on souhaite réaliser.

Une alimentation 24V 2.9A est utilisée. Dans le boîtier se trouvent une carte électronique à microcontrôleur pour les calculs et la correction ainsi qu'une carte électronique de puissance à transistors MOSFET. Cette carte est contrôlée par un logiciel sur PC.

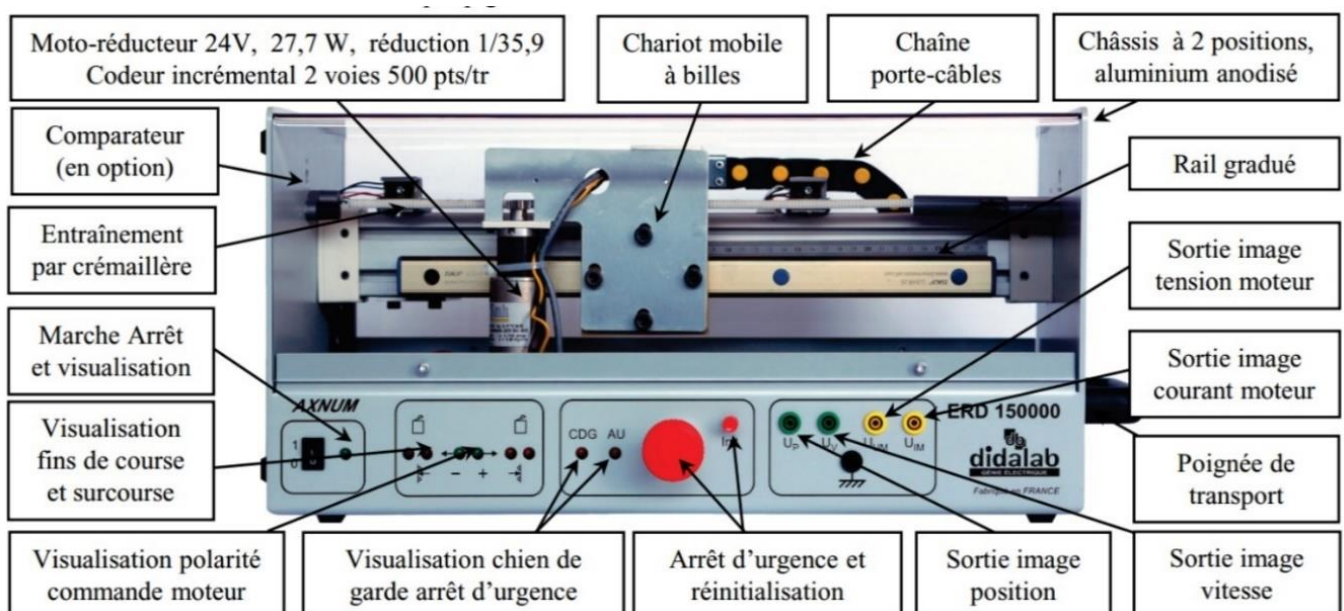


Figure 1 Axe numérique, composants

### Présentation de Matlab® Simulink®

Matlab® est un langage de programmation dédié aux ingénieurs et aux scientifiques. Il dispose de nombreuses similarités avec Python : Il ne se compile pas et le typage est faible : par exemple il n'est pas nécessaire de déclarer le nom ou le type (booléen, entier, flottant...) des variables avant de les utiliser. L'interpréteur se charge de « deviner » les intentions en fonction du type de calcul. Matlab est un logiciel propriétaire. Il dispose d'un environnement de

programmation intégré : éditeur de texte, interpréteur bibliothèques et éléments de visualisation sont dans un même package.

Matlab intègre aussi de nombreux outils dédiés aux problèmes scientifiques et d'ingénierie que l'on ne retrouve pas dans Python. Par exemple Simulink est un outil permettant de mettre en place des modèles par schéma blocs avec une interface graphique et un solveur intégré. Ainsi l'utilisateur dispose les blocs dans une fenêtre, les relie, définit les équations de leurs fonctions de transfert, les entrées et les sorties souhaitées. Ensuite il peut résoudre et nous permettre d'observer les résultats de la modélisation. Simulink est très largement utilisé dans l'industrie (aérospatiale, environnement, défense etc...). Par rapport à une résolution analytique l'ordinateur permet de traiter des systèmes plus complexes et éventuellement de s'affranchir des hypothèses linéarité/continuité/invariance indispensable dans une étude analytique. Simulink permet aussi de s'interfacer avec du matériel (carte de mesure, système physique) ou d'autre logiciel (Solidworks, meca3D).

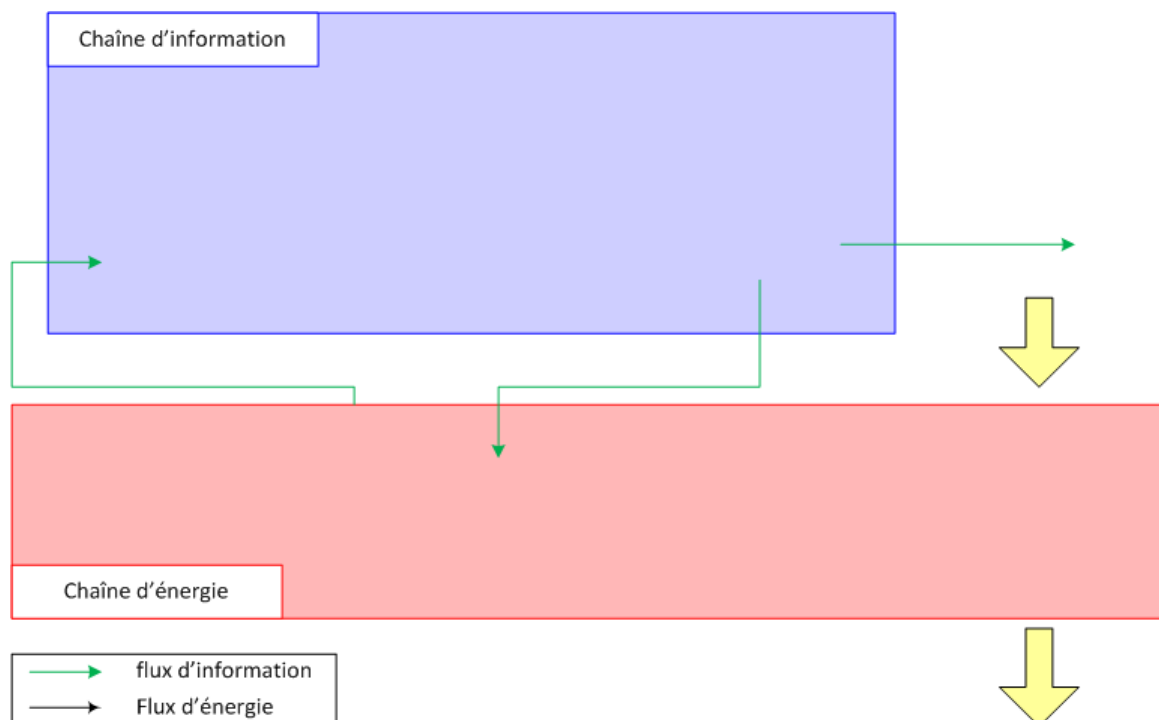
### Déroulement du TP :

1. Analyse de la chaîne fonctionnelle.
2. Mise en place d'un **modèle de connaissance** avec schéma bloc, axe en boucle ouverte.
3. Schéma bloc pour la boucle fermée.
4. Prise en main de Simulink
5. Modélisation de l'axe numérique en **boucle ouverte** et interface de **courant**.
6. Modélisation de l'axe numérique en **boucle fermée de vitesse** et interface de **courant**.
7. Modélisation de l'axe numérique en **boucle fermée de position** et interface de **courant**.
8. Modélisation de l'axe numérique en **boucle fermée de position avec retour tachymétrique** et interface de **courant**.
9. Modélisation de l'axe numérique en **boucle ouverte** et interface de **tension**.

### Préparation

#### Question 1, analyse du système : compléter la chaîne fonctionnelle :

Placer *Codeur incrémental*, *Chariot*, *Alimentation 24V*, *Pignon-crémaillère*, *Moteur*, *réducteur*, *carte électronique de puissance*, *carte électronique à microcontrôleur*, *logiciel PC*, *boutons*, *Leds*.



#### Question 2, schéma bloc du système Boucle ouvert et Interface de courant.

Ou souhaite étudier l'évolution temporelle de la vitesse du chariot (dans le cadre de la future étude en mode asservi). En boucle ouverte le logiciel permet de contrôler le courant d'alimentation. Identifier l'entrée et la sortie du modèle recherché (**indispensable** pour identifier le contenu des blocs).

**Entrée :**

**Sortie :**

Placer les éléments suivants : Couple réducteur **Cr**, Force motrice **F**, Courant commande **Im**, Couple moteur **Cm**, Accélération **Mx''**, et Vitesse **Mx'**. Les gains ou fonctions des blocs sont ensuite à spécifier. Une intégration et une équation du mouvement seront nécessaires.

- Documentation du motoréducteur et du pignon en annexe 1.
- Diamètre primitif d'un pignon :  $D = m Z$  avec  $m$  le module (ici en mm) et  $Z$  le nombre de dents.
- Masse équivalente du chariot : 120 Kg (masse chariot et inertie motoréducteur combinées).

Une attention particulière sera portée aux unités.



Question 3, schéma bloc du système Boucle fermée vitesse et Interface de courant

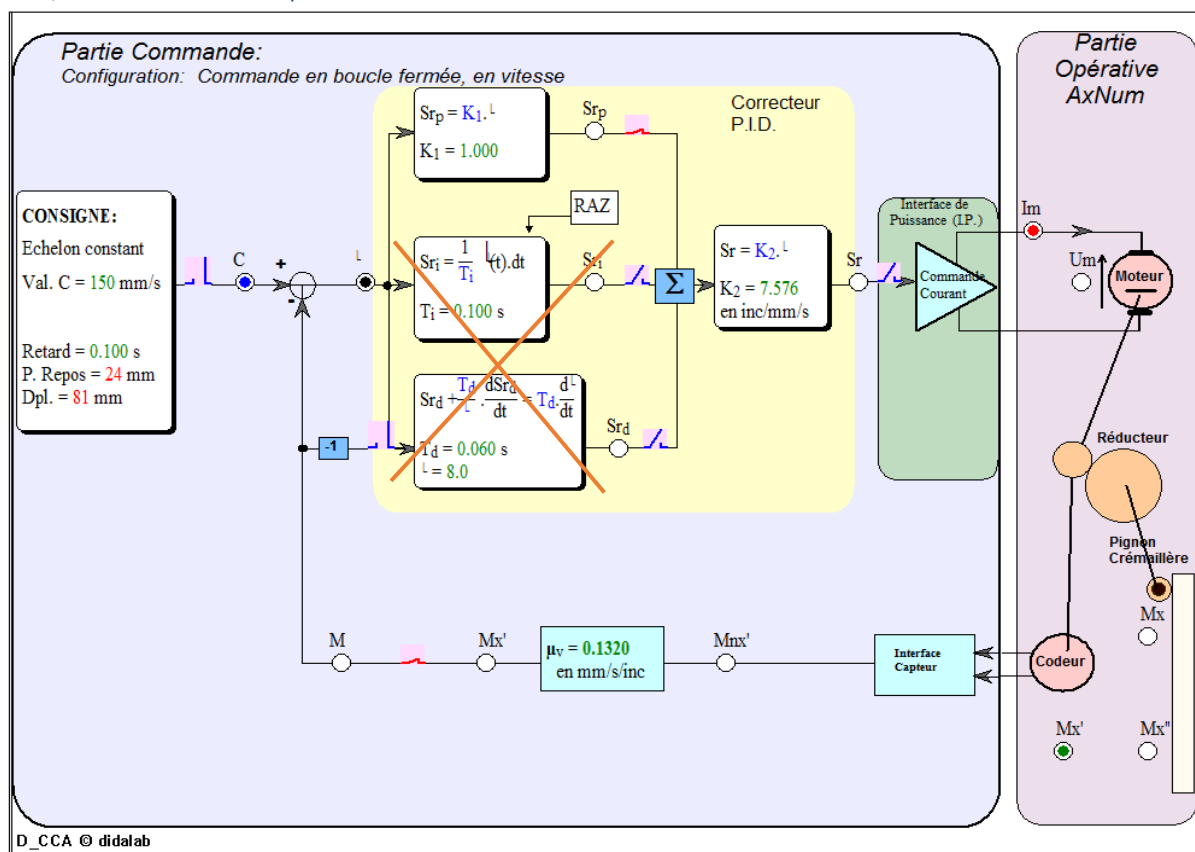


Figure 2 Boucle fermée vue logiciel

Identifier l'entrée et la sortie du modèle. Réutiliser le travail sur la boucle ouverte pour la partie opérative (chaîne d'énergie). S'inspirer du cours et de la vue du logiciel pour modéliser la correction. Pour le capteur de vitesse on le considérera idéal et un retour unitaire de la vitesse sera utilisé. Une conversion m/s mm/s restera nécessaire avant le comparateur.

## Schéma bloc en boucle fermée :

### Question 4, Expérimentation avec Simulink

- Créer un répertoire SimA<sub>xnum</sub> à la racine de u:\ (Perso). Lancer MATLAB (dernière version). Placer l'adresse du répertoire dans la barre d'adresse de Matlab.
- Tester le mode calculatrice en tapant un calcul dans la barre d'exécution en bas de l'écran.
- Faire click droit dans la fenêtre de gauche « New Script » pour créer un fichier de commandes Matlab dans le répertoire de travail. Ce fichier permettra de faire des calculs, des programmes et de définir des variables ce qui sera utile pour Simulink. Par exemple taper «  $A=3+\pi$  » dans le script et l'exécuter (onglet lecture). La variable A apparaît dans le « Workspace ».
- Désormais presser le bouton Simulink puis choisir un « Blank model » pour créer votre premier schéma bloc à simuler. En pressant le bouton de couleur on peut choisir ses blocs. Dans les rubriques « commonly » (blocs courants) « source » (entrées) « sinks » (sorties) « continuous » (intégrale, dérivé, fonction de transfert) et « Math » (polynômes, trigonométrie, seuils) vous trouverez l'essentiel des blocs de base dont vous aurez besoin.
- Glisser un signal échelon « source » dans le nouveau modèle et paramétrez le à la valeur finale 3, ajoutez un bloc gain dont vous donnez la valeur 7 et un bloc Scope « sink ». Reliez-les et exécutez (bouton lecture). Ouvrir le scope et commenter le résultat.
- Remplacer la valeur 3 par la variable A et observer le nouveau résultat. En modifiant la source faite démarrer le « Step » dès  $t=0.1s$ .
- Taper  $B=2$  dans le script, le ré-exécuter, remplacer A par B, et ajouter un bloc intégrateur « Continuous/Integrator » dans la boucle. Commenter.

## Partie 1 Simulation en boucle ouverte, interface de courant

### Question 5, résolution du schéma bloc en boucle ouverte

Placer dans un nouveau modèle les gains et blocs nécessaires pour le modèle en boucle ouverte.

Ajouter une entrée échelon d'amplitude 200mA avec un retard de 0.1s. Limiter la durée du calcul à 2s (à côté du bouton play). En sortie placer un scope et un bloc «sink/to workspace » pour observer la vitesse afin d'enregistrer les résultats et les comparer à ceux mesurés sur la machine. Nommer la variable vitesse mxp dans le bloc. Pour effectuer la comparaison récupérer les fichiers du répertoire Axnum sur le réseau et les placer dans votre répertoire SimA<sub>xnum</sub>. Après avoir lancé la simulation la variable mxp apparaît dans le workspace. On peut alors exécuter le script compareBO pour afficher la courbe de simulation et la courbe expérimentale (Figure 3). Les résultats expérimentaux sont aussi disponibles dans la figure « BOC200mA ». Commenter les écarts.

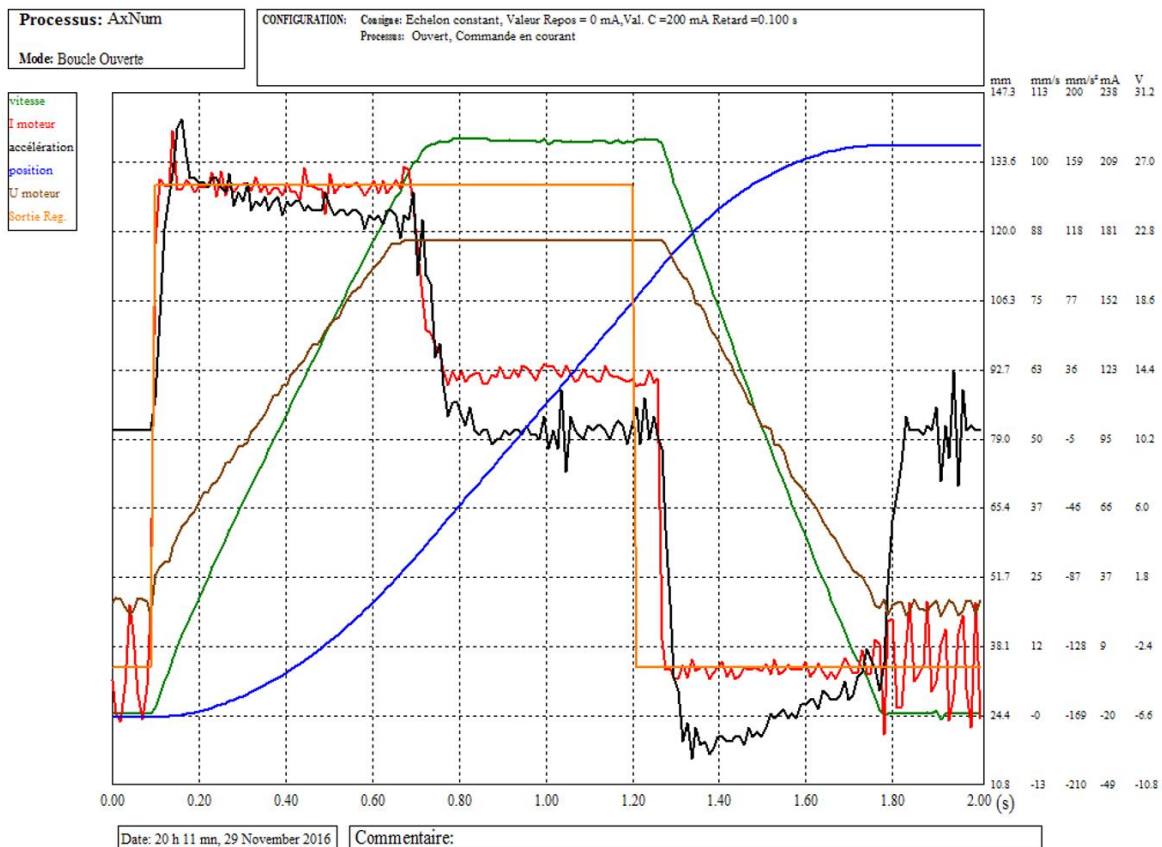


Figure 3 Résultats expérimentaux boucle ouverte

Sur une mesure expérimentale non saturée ( $I_c=100\text{mA}$ ) mesure le temps de réponse à 95%.  $T_{95\%} =$

#### Question 6, amélioration du modèle boucle ouverte

Le modèle accélère trop fort car les frottements sont négligés. On constate que 50mA sont nécessaire pour mettre l'Axnum en mouvement (effet de frottement sec). Placer un bloc « Discontinuities/Deadzone » avant le moteur pour prendre en compte cet effet. Exécuter de nouveau la comparaison et observer l'amélioration.

Dans un second temps on peut ajouter des frottements visqueux. Pour cela une force proportionnelle à la vitesse  $F_v = f \cdot v$  est ajoutée lors du bilan des forces. Il faut ajouter un additionneur (block « add ») pour faire le nouveau bilan des forces (avant le calcul de l'accélération). A l'aide d'un gain et d'un sommateur (commonly used block) mettre en place le frottement visqueux.  $f = 1$ . Un fichier corrigé « corBO.slx » accompagné d'un fichier de définition des constantes « cons.m » sont disponibles. Donner l'unité de  $f$ , observer et commenter le résultat : ...

Au bout de 0.7s le système s'arrête brutalement d'accélérer (vitesse constante) contrairement au modèle. En observant la mesure de tension proposer une explication à cette limitation. On pourra aussi raisonner sur le comportement sur un temps long du modèle comparé à la mesure et sa pertinence.

...

## Partie 2 Simulation en boucle fermée de vitesse, interface de courant

### Question 7, modélisation asservissement de vitesse, commande courant

Résultat expérience : Figure 4 et « BF100mmsVI ». Copier le modèle précédent que l'on va réutiliser pour modéliser le système physique en boucle fermée. Ajouter les éléments manquant et la sollicitation (cf Q3, Figure 2). Lancer le script compareBF pour comparer les résultats de la simulation avec l'expérience. Commenter sur la qualité de l'asservissement puis de la simulation.

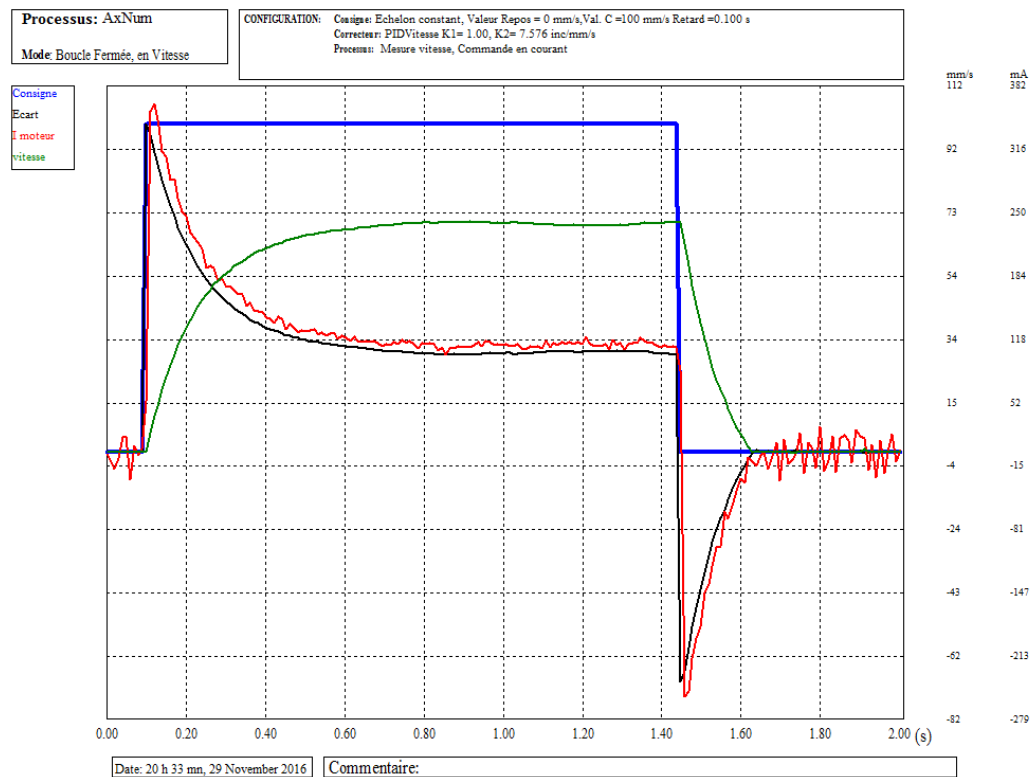


Figure 4 Résultats boucle fermée vitesse

### Question 8, amélioration des performances de l'asservissement.

Pour améliorer les performances on double la valeur de la correction proportionnelle :  $K1=2$ . Commenter sur les performances du système ainsi modifié, du point de vue du modèle puis de la mesure (figure BF100mmsK2 et K1). En particulier observer la précision et le temps de réponse. Observer l'évolution de la valeur expérimentale du courant dans le cas  $K1=2$  et commenter sur la nature et l'objet de l'écart avec la simulation.

## Partie 4 Simulation en boucle ouverte, interface de tension

Cette fois si le moteur sera commandé à partir d'une source de tension. La modélisation de la motorisation sera plus complexe et va nécessiter 3 nouvelles équations. De plus nous allons utiliser une technique de modélisation alternative pour le mouvement. Au lieu de considérer la translation d'une masse équivalente  $m_{eq}$  qui contient la masse du chariot plus l'inertie équivalente de la rotation du moteur ramenée en translation, nous allons considérer le mouvement en rotation du moteur.

Equations moteur :

Equation électrique avec force contre électro-motrice :  $I_m = \frac{(U_m - U_{FCEM})}{R}$

$$Cm = K_i I_m$$

$$U_{FCEM} = K_e \omega_m$$

Dynamique en rotation :  $\Sigma C = J_{eq} \dot{\omega}$

## Partie 3 Simulation en boucle fermée de position, interface de courant

### Question 9 Boucle fermée de position

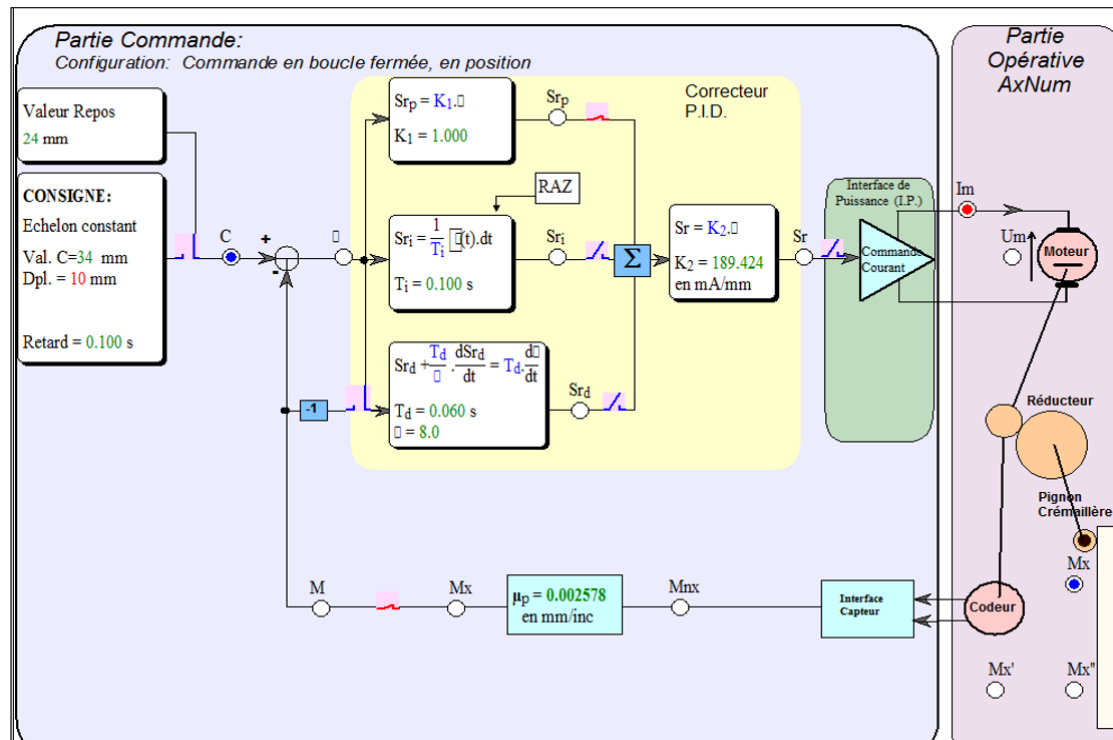


Figure 5 Vue synoptique, boucle de position

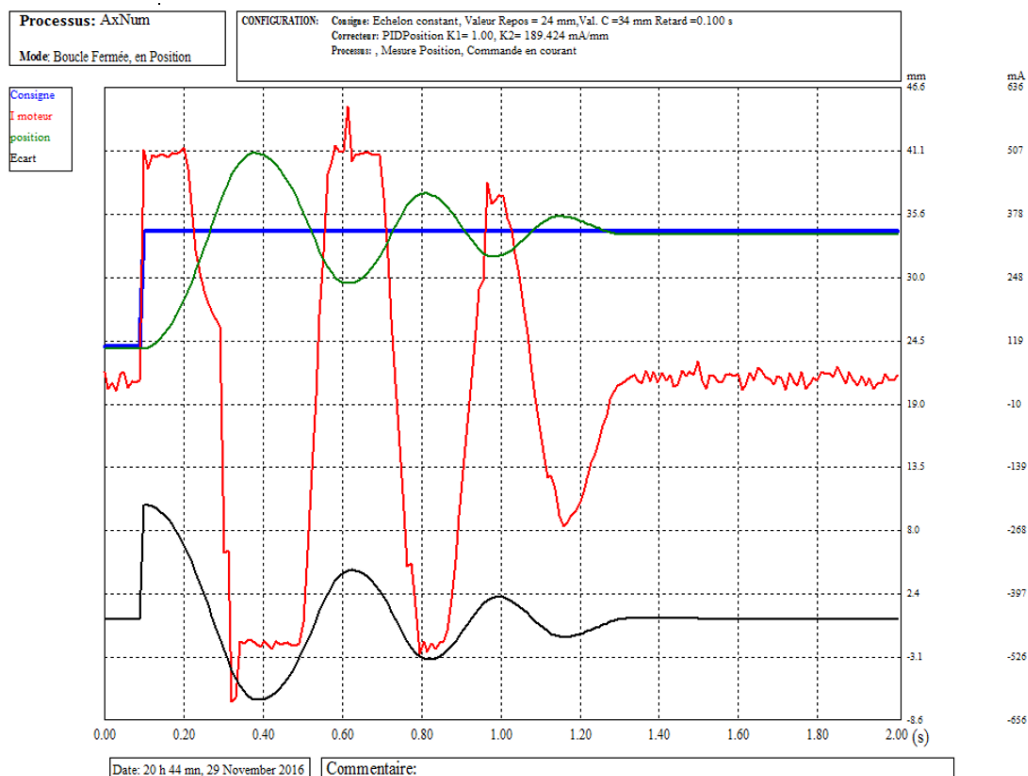


Figure 6 Boucle fermée de position

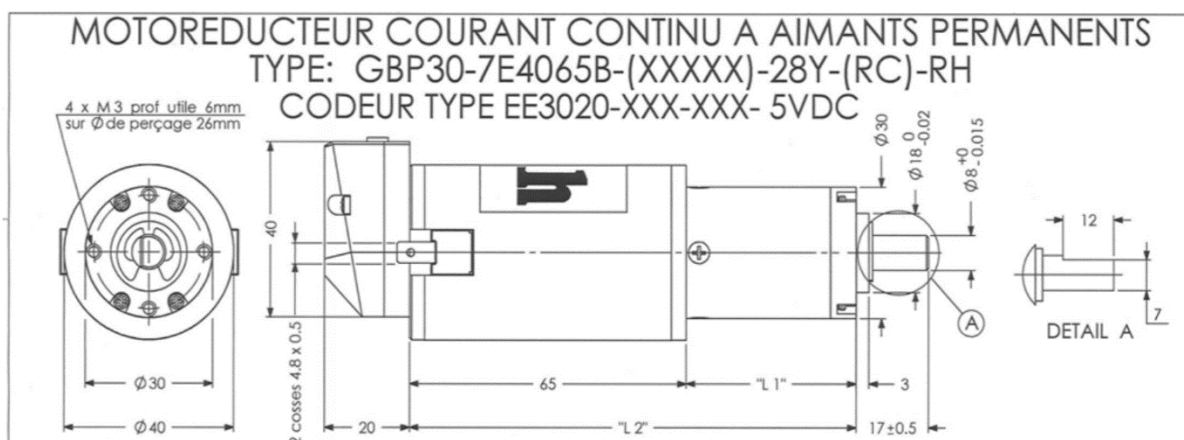
Commenter la qualité de l'asservissement de position. En modifiant votre schéma boucle fermée de vitesse interface de courant, simuler à partir des informations de la Figure 6. Expliquer les écarts observés avec la mesure et les interpréter.



## Annexe 1 documentation Motoréducteur/pignon SMH

CARACTERISTIQUES	Valeur	Unités
Tension d'alimentation	24	Vdc
Vitesse moteur à vide	5 200	Tr/min
Courant au meilleur rendement	911	mA
Constante de couple	4.32	N-Cm/A
Rendement moteur maximum	72.34	%
Puissance utile au meilleur rendement	12.94	W
Rapport de réduction du réducteur	1/35,9	
Nombre de fentes codeur	500 pts	2 voies
Nombre de dents pignon	21	
Module pignon	0.8	

- Entraînement par pignon crémaillère
- Guidage par billes sur rail
- Réducteur 1/35,9 à train épicycloïdal
- Moteur 24 Vdc  
P utile max 27,77 W
- Codeur optique 500 pts/tour



TYPE	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
RAPPORTS DE REDUCTION	3.2	4	5.2	10.9	13.2	16	20.8	27	39.0	43.6	52.8	64	89.2	108.2	140.6	118.6	186.9	226.5	256	332.6	432.6	562.4	731.2
NOMBRE D'ETAGE(S)	1					2						3							4				
DIMENSIONS																							
« L 1 »	21					27						34							40				
« L 2 »	86					92						99							105				
RENDEMENT %	81					73						65							60				
COUPLE CONSTANT : Kg-cm	8					20						30							30				
COUPLE MAXI EN CRETE : Kg-Cm	24					40						60							60				

- JEU AXIAL MAXI : 0.3 mm - JEU RADIAL MAXI : 0.03 mm - TEMPERATURE D'UTILISATION : - 30° C A + 100° C

Pour déterminer votre moteur : Remplacer les (xxxxx) par la \* référence du bobinage

* Réference du bobinage	Tension Nominale	Caractéristiques à vide		Caractéristiques au meilleur rendement					Caractéristiques au démarrage		Puissance en pic	Résistance Totale	Self Inductance	Constante de Couple	Force Electro Motrice
	Vc/c	mA	Rpm	g-cm	Rpm	mA	%	Watt(s)	g-cm	mA	Watt(s)	Ohm(s) Ω	mH	Kg-Cm/A	V/1000 tours

23080	24	85	4400	242	3808	555	71.08	9.47	1800	3580	20.33	6.70	5.10	0.52	5.30
25068	24	110	5200	280	4500	745	72.34	12.94	2080	4830	27.77	4.97	3.77	0.44	4.50
27058	24	122	6100	287	5348	911	72.12	15.76	2328	6520	36.46	3.68	2.70	0.36	3.80
29050	24	150	7100	303	6233	1119	72.23	19.39	2480	8080	45.21	2.97	2.00	0.31	3.30

Bobinage 25068, Inertie : 0.043 Kg.cm<sup>2</sup> Poids : 280g

## Annexe 2 Moment d'une force et mouvement d'un solide en rotation en rotation autour d'un axe fixe.

La force et le moment sont deux actions mécaniques distinctes. Une force modélise une intention de faire translater un solide. Plus elle est importante plus on essaye de faire translater le solide. Une force opposée peut empêcher le mouvement. Si le bilan est non nul la somme des forces sera proportionnelle au produit de l'accélération et de la masse. Ce sont les lois de Newton. Si l'on étudie la rotation d'un solide autour d'un axe fixe, le moment représente l'intention de mettre un solide en rotation. Le moment est proportionnel au produit de la force et du bras de levier : distance orthogonale du point d'application de la force à l'axe de rotation. Observer le pédalier de vélo Figure 7.

- Si la manivelle est trop courte il sera difficile de mettre le vélo en mouvement : le moment qui permet de faire tourner la roue est proportionnel à la longueur de la manivelle.
- Si l'on force plus, bien sur le vélo accélère plus : proportionnalité à la force sur la pédale.
- Si la pédale est en bas on peut forcer tout ce que l'on veut le vélo n'avancera pas plus : nécessité de perpendicularité, le moment est maximum à  $90^\circ$  de la verticale.

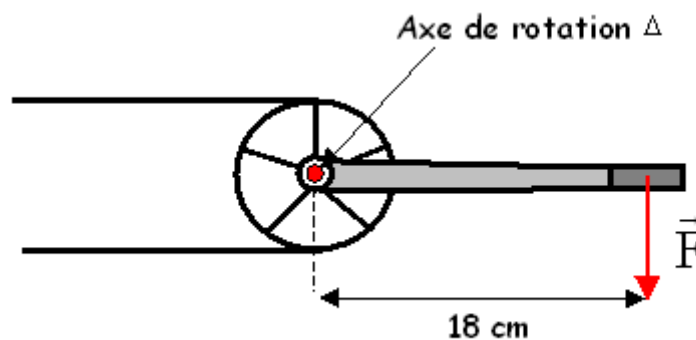


Figure 7 Pédalier de vélo

En dynamique si la somme des moments n'est pas nulle on observera une accélération de la vitesse de rotation. Cette accélération angulaire

Les mouvements quelconques sont au programme de deuxième année.

Le

## Annexe 3 Mouvement d'un solide en rotation en rotation autour d'un axe fixe.