TRAVAUX PRATIQUES S2I

Modélisation, identification et validation de la boucle collaborative

Modélisation - identification
Choix des correcteurs pour satisfaire les performances de la boucle collaborative

COMPETENCES VISEES

- Analyser ou établir le schéma-bloc du système
- Identifier et interpréter les modèles des constituants du système
- Déterminer les grandeurs influentes
- Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle du deuxième
- Déterminer les paramètres permettant d'assurer la stabilité du système
- Relier la précision aux caractéristiques fréquentielles
- Proposer la démarche de réglage d'un correcteur proportionnel
- Vérifier la cohérence des résultats d'expérimentation avec les valeurs souhaitées du cahier des charges
- Mettre en évidence l'influence des paramètres sur les performances du système

PRE-REQUIS

- Schéma-bloc : fonction de transfert en chaine directe, fonction de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée
- Modèles de comportement
- Réponses temporelle et fréquentielle : systèmes du 1er et 2e ordre, intégrateur
- Identification temporelle
- Diagrammes de Bode

SITUATION DANS LA PROGRESSION

Premier semestre, Deuxième année

SUJET DU TP

- Architecture de la boucle collaborative et de la boucle interne en vitesse
- Mise en évidence de la problématique (précision de l'asservissement)
- Modélisation, identification et validation du modèle de la boucle interne de vitesse par simulation
- Réglage du correcteur de la boucle de vitesse
- Rôle du filtre réjecteur

MATERIEL MIS EN OEUVRE

- Bras de Robot collaboratif CoMax ;
- Interface IHM du bras CoMax ;
- EMP CoMax
- Logiciel Scilab

PRESENTATION DU SYSTEME

Le système étudié est une partie d'un robot collaboratif. Ayant des domaines d'application très variés d'assistance à l'humain (domaine d'assistance à la personne, domaine médical), le contexte d'utilisation est ici le domaine manufacturier. Ce type d'équipement permet d'assister l'humain dans les tâches industrielles où il est nécessaire d'appliquer un effort répétitif pendant le travail. Le robot collaboratif est commandé de manière continue et intuitive par l'utilisateur ; pour cette raison, il est dit collaboratif puisque l'humain se trouve déchargé des efforts dans sa tâche. Cette solution limite les risques des Troubles Musculo Squelettiques (maladies TMS) et l'utilisateur peut alors uniquement se concentrer sur le contrôle du travail à accomplir.



Le diagramme des exigences du robot Collaboratif de la société SAPELEM est fourni dans le dossier ressources.

Le robot CoMax reprend les fonctions du robot collaboratif SAPELEM, tout en les complétant pour une approche didactique. Son diagramme des exigences est fourni dans le dossier ressources.

Objectifs du TP

Ce TP vise à :

- Mettre en œuvre la commande collaborative et mettre en évidence la problématique
- Mettre en évidence l'intérêt du réglage du correcteur de la boucle de vitesse
- Simplifier le modèle compte tenu des performances de la boucle de courant
- Identifier l'inertie équivalente Jeq
- Valider le modèle de la boucle de vitesse
- Déterminer le correcteur de la boucle de vitesse permettant de satisfaire le cahier des charges et l'implanter
- Valider les performances de l'asservissement de vitesse
- Identifier le mode principal de vibrations
- Analyser et justifier le rôle du filtre réjecteur mis en place dans la commande collaborative

A. Mise en évidence de la problématique associée aux performances de la boucle collaborative

▶ ACTIVITE 1 : Mettre en œuvre la commande collaborative

- Démarrer l'EMP CoMax en cliquant sur  et parcourir le menu « *Le Produit* » puis « *Synoptique Cmde collaborative* ».
- L'interface CoMAX étant lancée, cliquer sur Connexion puis sur Activation (boutons de sélection en haut à gauche de l'écran). L'axe se positionne par défaut en position Basse.
- En cliquant sur l'icône , commander l'axe en position *Inter*
- Activer la commande collaborative en cliquant sur le bouton de sélection « collaboration » en haut à gauche de l'écran.

Question 1 : Tester le comportement de l'axe lors d'une action sur la poignée.

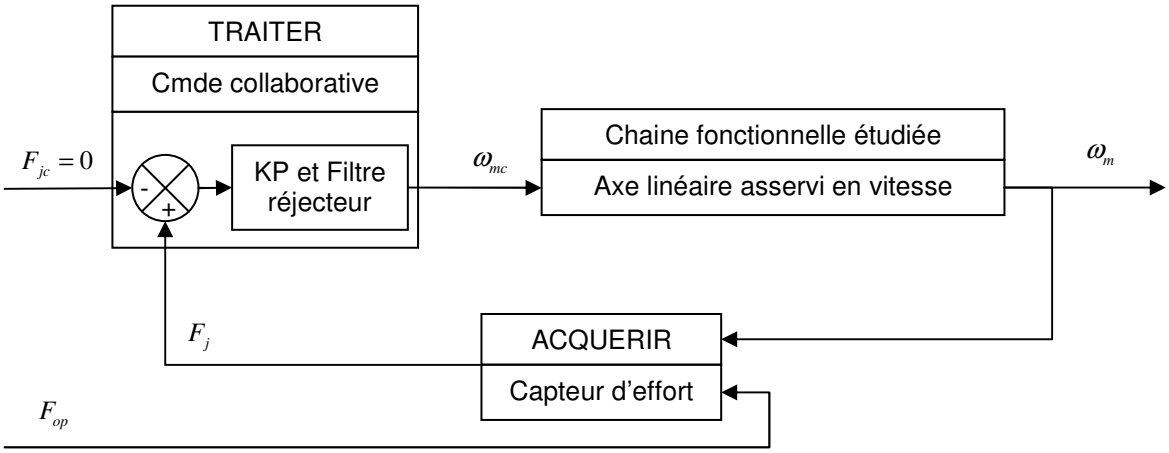
- Placer alors 4 masses supplémentaires de 1 kg sur le support de masse et tester à nouveau le comportement collaboratif.

Question 2 : L'ajout de masses additionnelles influe-t-il sur les performances de la boucle collaborative du robot ? La sensation ressentie par l'utilisateur est-elle modifiée ?

L'objectif de ce TP est alors de modéliser la boucle interne de vitesse puis l'ensemble de la boucle collaborative et de déterminer ou justifier les correcteurs mis en place afin de satisfaire les performances attendues.

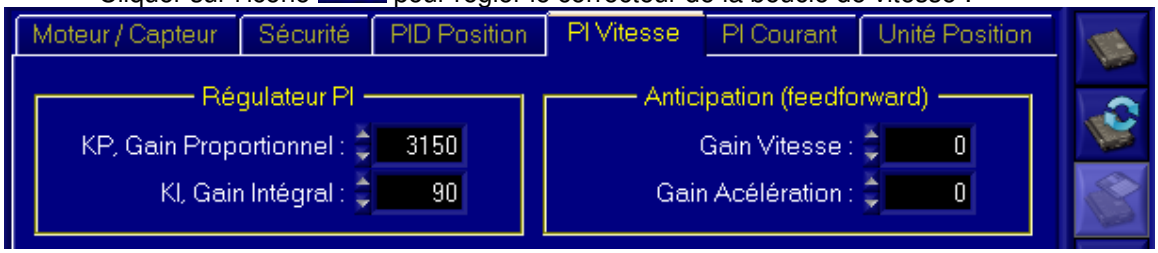
La frontière de l'étude n'englobe pas l'utilisateur qui transmet donc un effort sur la poignée.
Dans cette hypothèse, le système muni de la boucle collaborative peut être modélisé par un système asservi en effort, comme le décrit le schéma bloc ci-dessous, dans lequel les variables suivantes sont utilisées :

- F_j : effort de la jauge
- ω_m : vitesse moteur
- F_{op} : effort imposé par l'utilisateur sur la poignée en mousse



▶ ACTIVITE 2 : Analyser la contribution des masses additionnelles sur la boucle de vitesse

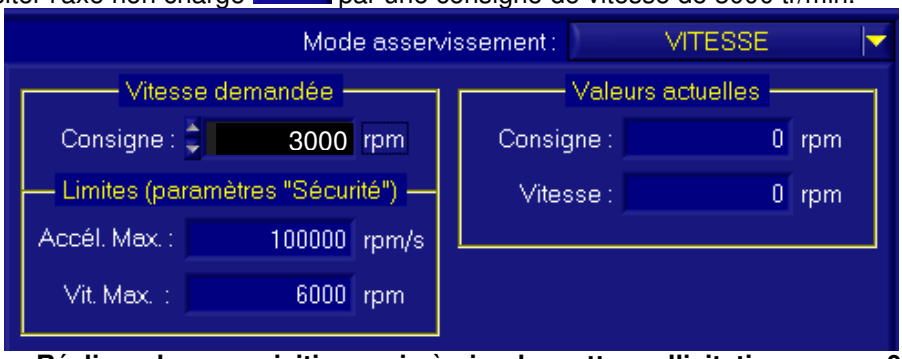
- Dans l'interface Comax, revenir à l'écran de base. En cliquant sur l'icône , positionner l'axe en position *Basse*.
- Cliquer sur l'icône  pour régler le correcteur de la boucle de vitesse :



- Régler le correcteur avec KP=3000 et KI=0, on dit que le correcteur de vitesse est alors uniquement proportionnel.
- Dans l'interface, sélectionner l'icône  puis préparer les acquisitions en cliquant , puis sur l'icône  et sélectionner « Asservissement de Vitesse ».



- Solliciter l'axe non chargé  par une consigne de vitesse de 3000 tr/min.



Question 3 : Réaliser les acquisitions vis-à-vis de cette sollicitation, avec 0 masses, 2 masses et 4 masses sur le support de masses. Compléter alors le tableau du document réponses 1.

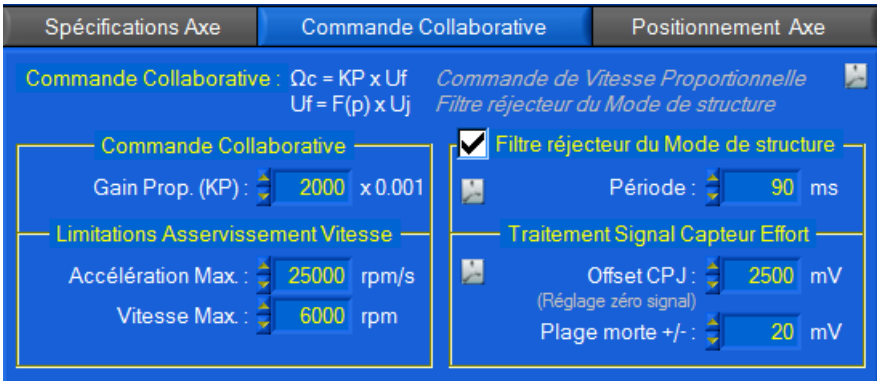
Question 4 : Quelle est essentiellement la performance (Stabilité, Rapidité ou Précision) affectée par l'ajout des masses additionnelles ? Quelle est la cause de cette variation ?

Nous commencerons donc par étudier l'axe linéaire asservi en vitesse et déterminer le correcteur permettant de satisfaire les performances souhaitées de la commande collaborative.

- Cliquer sur l'icône  pour régler le correcteur de la boucle de vitesse puis imposer les paramètres par défaut en cliquant sur .

▶ ACTIVITE 3 : Analyser les performances de la commande collaborative et le rôle du filtre réjecteur

- Dans l'écran de base, cliquer sur l'icône  pour faire apparaître l'écran de paramétrage de la commande collaborative.
- Supprimer le Filtre réjecteur du Mode de structure (décocher la case).



Question 5 : Sur quelle performance (stabilité, rapidité ou précision) du comportement agit-on avec ce filtre réjecteur ?

Nous modéliserons puis analyserons en dernière partie ces phénomènes vibratoires et le rôle du filtre réjecteur.

B. Modélisation et identification d'un modèle pour la boucle de vitesse

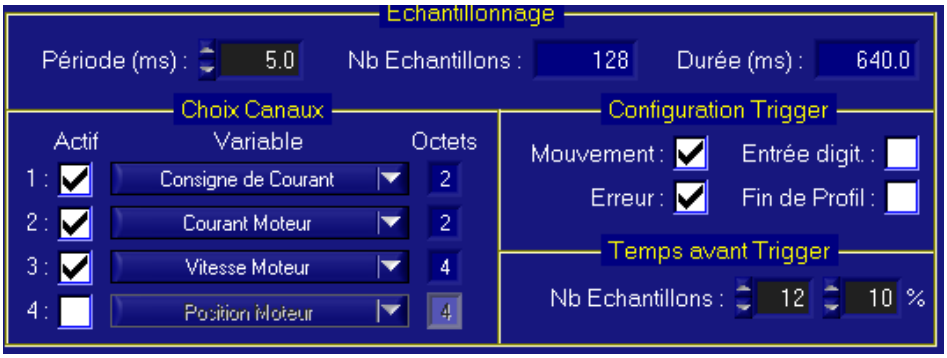
Le schéma des chaînes d'énergie et d'information de cette boucle de vitesse est fourni en annexe 1.

▶ ACTIVITE 5 : Simplifier le modèle compte tenu des performances de la boucle de courant

Le moteur à courant continu est muni d'un asservissement de courant. La première étape est de montrer que cet asservissement de courant peut être considéré comme parfait afin de simplifier l'étude de l'asservissement en vitesse proprement dit.

- Dans l'Interface de commande, désactiver la commande collaborative à l'aide du bouton de sélection et repositionner, dans l'écran de base, l'axe en position *Basse*.
- Ne laisser définitivement que deux masses additionnelles sur le support de masses.
- Dans l'interface, sélectionner l'icône  puis préparer les acquisitions en cliquant , puis sur l'icône  et sélectionner « Asservissement de Courant » . Ajouter dans l'écran l'acquisition de la vitesse moteur :





- En partant de la position basse, lancer une sollicitation en Courant (BO) en cliquant sur , avec une valeur de 4500 mA.

Question 6 : En comparant la courbe de la consigne de courant et celle du courant moteur, justifier que l'on puisse considérer à tout instant que l'asservissement de courant est parfait, c'est-à-dire que $I=I_C$.

Dans cette hypothèse, le schéma bloc simplifié de l'asservissement de vitesse est fourni en annexe 2. Les deux masses additionnelles doivent toujours être en place.

- On considère au départ un correcteur de vitesse proportionnel tel que $C_v(p) = K_{PV}$. Avec le réglage K_{pvepos}=3000, nous avons $K_{PV} = 0,06$.

▶ ACTIVITE 6 : Identifier l'inertie équivalente Jeq

Question 7 : Déterminer l'expression de $\omega_m(p)$ en fonction de $\omega_{mc}(p)$ et de $C_{pes}(p)+C_{resm}(p)$.

- On considère comme au départ une sollicitation en échelon de vitesse (on prendra au départ une sollicitation de 1500 rpm).
- Les perturbations $C_{pes}(p)$ et $C_{resm}(p)$ sont aussi des échelons.

Question 8 : De quel type est la réponse temporelle $\omega_m(t)$ vis-à-vis de cette sollicitation en échelon de vitesse. Proposer alors puis réaliser un protocole expérimental permettant de déterminer la valeur de J_{eq}.

Question 9 : Proposer une valeur de J_{eq} à partir de la courbe expérimentale.

Question 10 : Refaire la même identification avec une sollicitation en échelon de vitesse de 3000 rpm. Que constate-t-on ? Comment expliquer cela à partir de l'analyse de la courbe d'intensité ?

▶ ACTIVITE 7 : Valider le modèle de la boucle de vitesse

Le modèle utilisé précédemment est fourni dans le fichier Scilab/xcos nommé « Asservissement de vitesse tp2-2.zcos ».

- Démarrer Scilab en cliquant sur l'icône .
- Lorsque la fenêtre de commande apparaît, taper « xcos » ou cliquer sur .
- Dans la fenêtre graphique qui apparaît, sélectionner Ouvrir dans le Menu Fichier et sélectionne le fichier « Asservissement de vitesse tp2-2.zcos ».
- La variable de Laplace dans Scilab est notée « s ». Les blocs  permettent de tracer des réponses temporelles.
- Le bloc 

permet de tracer les réponses temporelles. Il suffit de double cliquer dessus pour modifier les paramètres de simulation.
- Il suffit, pour lancer les simulations, de cliquer sur  (Simulation).
- Vous devez au préalable cliquer avec le bouton droit sur le fond d'écran Scilab et choisir « Modifier le contexte » pour vérifier les valeurs mises en place dans les paramètres.

Question 11 : En cliquant sur « Modifier le contexte », renseigner la valeur de Jeq que vous avez identifiée et lancer la simulation, avec la consigne de 1500 rpm puis de 3000 rpm.

Question 12 : Comparer les courbes simulées et les courbes expérimentales. Le modèle identifié peut-il être validé ?

Question 13 : Par simulation, en modifiant la valeur de Jeq dans le Contexte, déterminer une valeur acceptable permettant d'avoir un écart minimum entre la courbe simulée et la courbe réelle.

Le cahier des charges de l'asservissement en vitesse, afin d'obtenir les performances souhaitées de la boucle collaborative est le suivant :

Critère de performances	Niveau
Stabilité	Marge de phase la plus grande possible
Rapidité	$\omega_{0dB} = 100 rad/s$
Précision	Écart en régime permanent nul vis-à-vis d'une consigne constante ou d'une perturbation constante

Question 14 : A partir de l'analyse de la structure du schéma bloc de l'annexe 2, justifier que le correcteur proportionnel ne permet pas de satisfaire le cahier des charges.

▶ ACTIVITE 8 : Déterminer le correcteur optimal pour la boucle de vitesse

Le correcteur choisi par le constructeur est le suivant :

$$C_v(p) = K_{PV} + \frac{K_{IV}}{p} = K_i \frac{1+T_i p}{T_i p} \text{ avec } K_{pvepos} = \frac{K_{PV}}{20.10^{-6}} = \frac{K_i}{20.10^{-6}} \text{ et } K_{ivepos} = \frac{K_{IV}}{5.10^{-3}} = \frac{K_i}{5.10^{-3} T_i}$$

On choisit pour la suite $T_i = 0,15s$.

Question 15 : Justifier qu'avec ce correcteur les performances en terme de précision sont atteintes.

Afin de déterminer la valeur du paramètre K_i , on choisit de tracer les diagrammes de Bode de la FTBO avec $K_i = 1$ et $T_i = 0,15s$ soit $K_{pvepos} = 50000$ et $K_{ivepos} = 1333$.

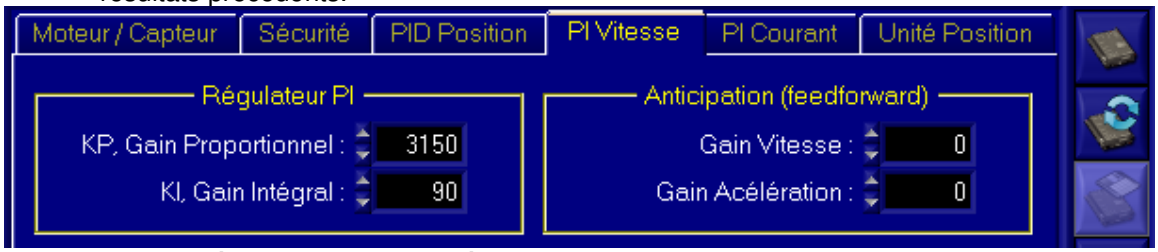
Ouvrir le fichier « Asservissement de vitesse frequentiel tp2-2.zcos », Modifier « Le Contexte » et affecter la valeur de Jeq ainsi que les deux valeurs précédentes pour K_{pvepos}et K_{ivepos} .

- Lancer la simulation en cliquant sur ▷ (Simulation) pour tracer les diagrammes de Bode de la FTBO dans ce cas.

Question 16 : Déterminer alors la valeur de K_i permettant de satisfaire le cahier des charges. En déduire la valeur de la marge de phase et la valeur des deux paramètres K_{pvepos}et K_{ivepos} .

▶ ACTIVITE 9 : Valider les performances de l'asservissement de vitesse

- Dans l'interface Comax, revenir à l'écran de base. En cliquant sur l'icône , positionner l'axe en position *Basse*.
- Cliquer sur l'icône  pour régler le correcteur de la boucle de vitesse conformément aux résultats précédents.



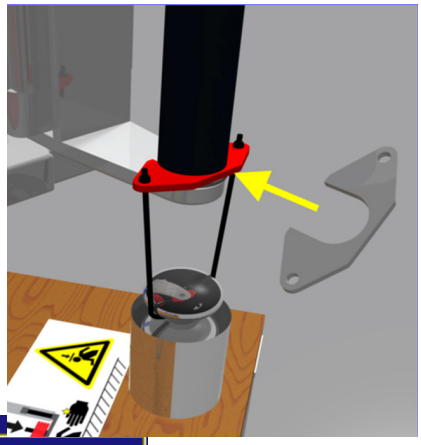
Question 17 : Réaliser un essai d'échelon de vitesse et conclure quant aux performances obtenues.

C. Valider la commande collaborative mise en place

▶ ACTIVITE 10 : Identifier les phénomènes vibratoires

Les paramètres précédents seront désormais conservés.

- Dans l'interface Comax, revenir à l'écran de base et cliquer sur l'icône  pour positionner l'axe en position *Haute* sans masse additionnelle.
- Suspendre une masse (par exemple 500 grammes) à l'aide de la plaque en aluminium qui se fixe sous la poignée, conformément à la photo ci-contre.



- Aller dans le Menu « Acquisition Axe », icône  et choisir  l'acquisition de l'entrée analogique 1 (le signal en sortie de la jauge) et la vitesse moteur.



- Revenir dans l'écran de base et lancer la collaboration en cliquant sur le bouton levier.



Question 18 : Retourner dans le menu des mesures , et sélectionner  pour faire apparaître la vitesse moteur et le signal jauge (respectivement à gauche et à droite) qui ont été acquis pendant le mouvement. Analyser les courbes qui apparaissent et relever la période des oscillations.



Question 19 : Refaire la même manipulation, mais en suspendant une masse différente. Montrer que la période des oscillations est indépendante de la masse ajoutée.

Question 20 : Refaire la même manipulation, mais avec un gain de la commande collaborative de 2500 et montrer là aussi que la période des oscillations n'est pas modifiée.

▶ ACTIVITE 11 : Validation du modèle de simulation de la commande collaborative

Le comportement vibratoire de la structure est modélisé par un système du second ordre.

- Ouvrir le fichier « boucle collaborative tp2-2.zcos » avec xcos (logiciel Scilab).
- On définit la pulsation propre des vibrations par $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, avec T la période des oscillations.

Question 21 : En cliquant sur « Modifier le contexte », renseigner les valeurs déterminées précédemment ainsi que la valeur de ω_0 correspondant à la valeur identifiée. La simulation se fait avec les valeurs 0 et 1 pour le paramètre a. La valeur de a est nulle sans filtre réjecteur et vaut 1 avec le filtre réjecteur. Lancer la simulation et valider le comportement vibratoire pour le gain de la commande collaborative de 2000.

▶ ACTIVITE 12 : Justification de l'introduction du filtre réjecteur

- Ouvrir le fichier « boucle collaborative frequentiel tp2-2.zcos » avec xcos (logiciel Scilab).
- Ce fichier permet de comprendre le fonctionnement de la boucle collaborative, en fréquentiel, avec et sans le filtre réjecteur (bloc d'analyse nommé PARAM VAR qui permet de tracer les diagrammes de Bode avec et sans filtre réjecteur).

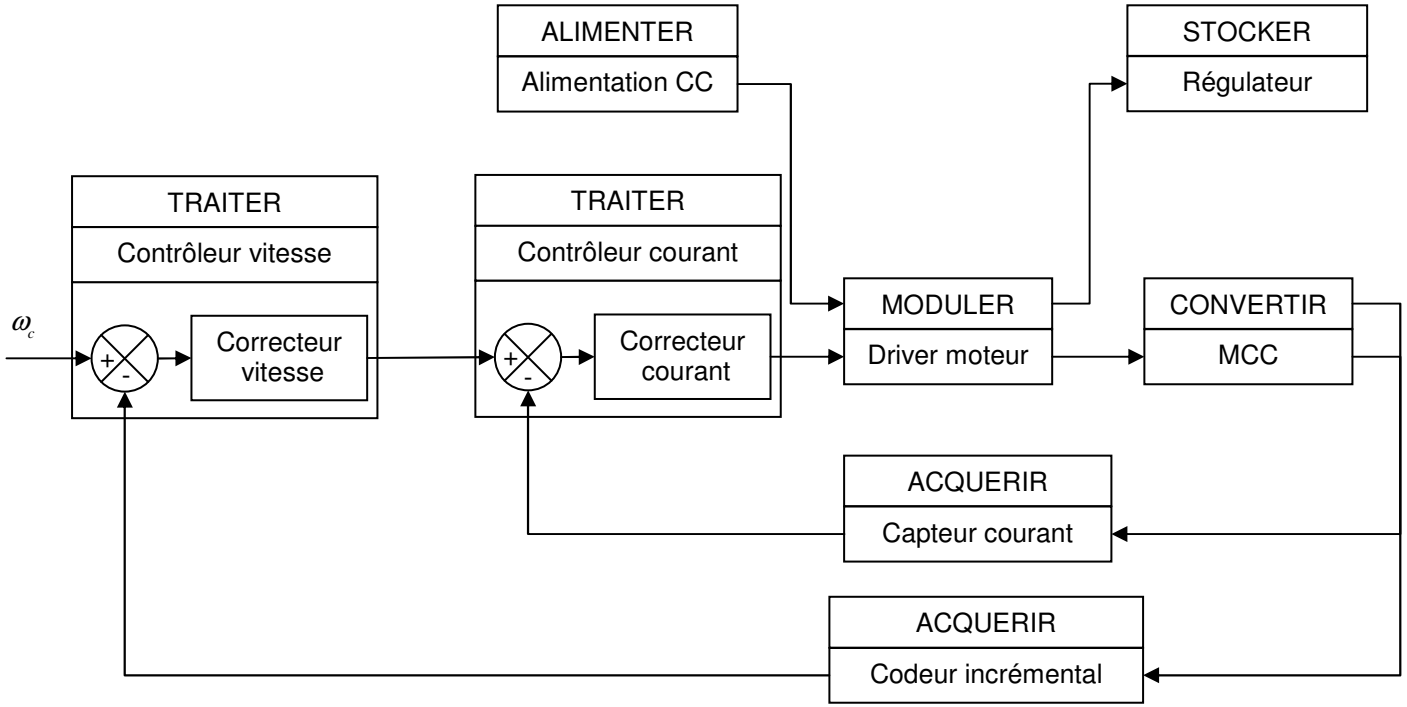
Question 22 : Après avoir vérifié les valeurs des différents paramètres dans le contexte, lancer la simulation et commenter le diagramme de Bode en l'absence du filtre réjecteur.

Un filtre réjecteur est mis en place dans la boucle collaborative. Ce filtre a pour fonction de transfert :

$$F(p) = \frac{1 + \frac{2\xi_1}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}{1 + \frac{2\xi_2}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \text{ avec } \xi_1 = 0,005 \text{ et } \xi_2 = 1$$

Question 23 : Tracer l'allure du diagramme de Bode réel de ce filtre et analyser sa pertinence. Interpréter alors le diagramme de Bode tracé précédemment en présence du filtre réjecteur.

D. Annexe 1


ALIMENTER
Alimentation CC
STOCKER
Régulateur
TRAITER
Contrôleur vitesse
TRAITER
Contrôleur courant
ω_c
+
-
Correcteur vitesse
+
-
Correcteur courant
MODULER
Driver moteur
CONVERTIR
MCC
ACQUERIR
Capteur courant
ACQUERIR
Codeur incrémental

E. Annexe 2

Schéma bloc général de l'asservissement de vitesse

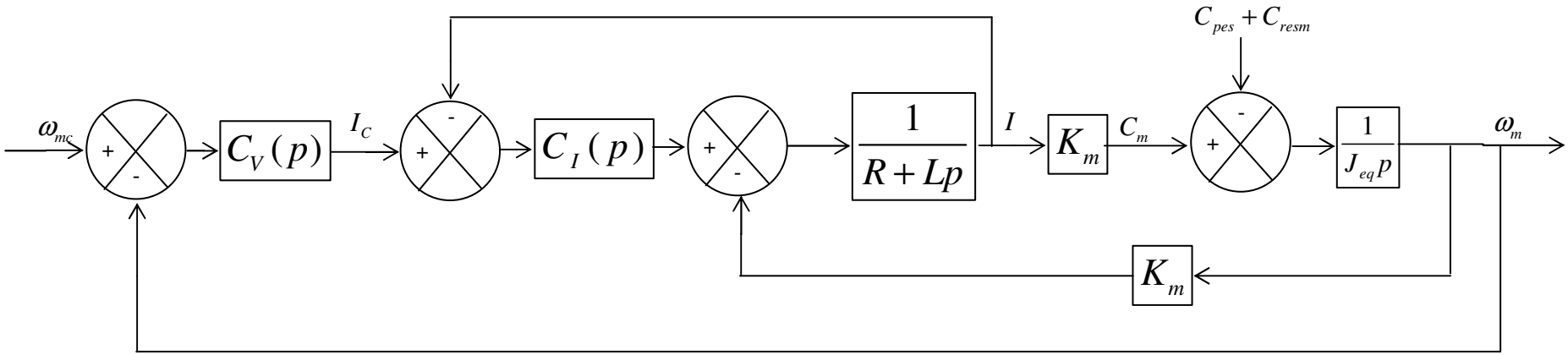
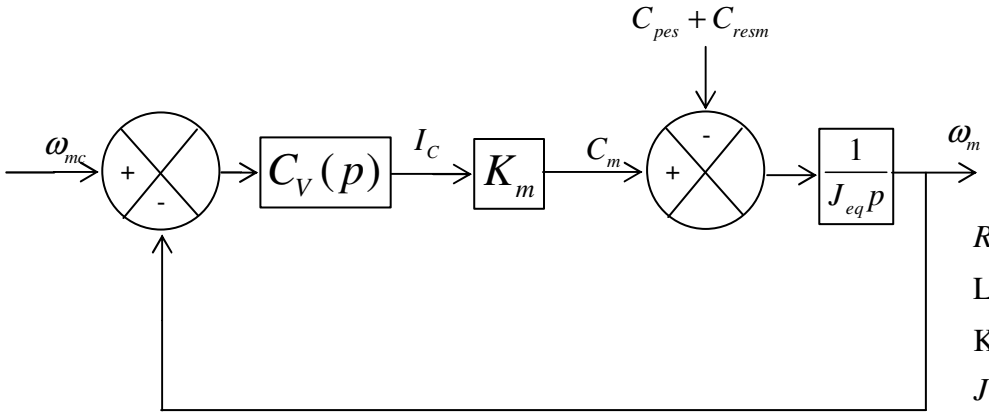


Schéma bloc simplifié de l'asservissement de vitesse (asservissement de courant parfait)



$$C_v(p) = K_{PV} + \frac{K_{IV}}{p} = K_i \frac{1+T_i p}{T_i p}$$

$$K_{pvepos} = \frac{K_{PV}}{20.10^{-6}} = \frac{K_i}{20.10^{-6}} \text{ et } K_{ivepos} = \frac{K_{IV}}{5.10^{-3}} = \frac{K_i}{5.10^{-3} T_i}$$

R : résistance aux bornes du moteur $R = 0,3\ \Omega$

L : inductance du bobinage $L = 8,2.10^{-5}$ H

K_m : constante de couple ou de vitesse du moteur $K_m = 0,0302$ Nm.A^{-1}

J_{eq} : inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur J_{eq} = ??

C_{pes} : couple dû à la pesanteur ramené sur l'arbre moteur $C_{pes} = 0,075$ N.m

C_{resm} : couple dû aux frottements secs ramené sur l'arbre moteur $C_{resm} = 0,035$ N.m

F. Document réponses 1

KP	Nombre de masses additionnelles	Valeur finale de la vitesse de rotation du moteur en rpm	Erreur en régime permanent sur la vitesse en rpm	Temps de réponse à 5%
3000	0			
3000	2			
3000	4			
1000	2			
5000	2			