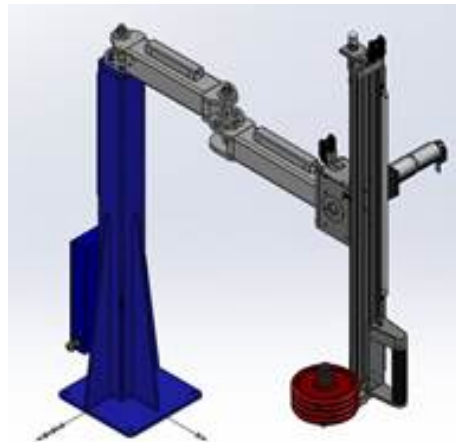


Matériel utilisé :

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

**I. Présentation du TP****1. Présentation du système**

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.

2. Objectifs du TP

Ce TP vise à :

- Mettre en œuvre la commande collaborative et mettre en évidence la problématique de l'asservissement
- Analyser expérimentalement l'asservissement en vitesse du système et étudier l'influences des paramètres d'inertie et de réglage des correcteurs.
- Analyser à l'aide d'un modèle numérique Scilab l'influences des paramètres d'inertie et de réglage des correcteurs.
- Diagnostiquer et caractériser les écarts.
- Améliorer les performances du système


Ce TP doit être organisé en îlot avec :

- Un **chef de projet** qui doit faire le lien entre les différentes parties et analyser les écarts.
- Un **expérimentateur** qui doit effectuer les mesures expérimentales.
- Un **modélisateur** qui doit construire la simulation.

II. Prise en main et analyse des performances de la boucle collaborative1. Analyse de la commande collaborative► **ACTIVITE 1 : Mettre en œuvre la commande collaborative**

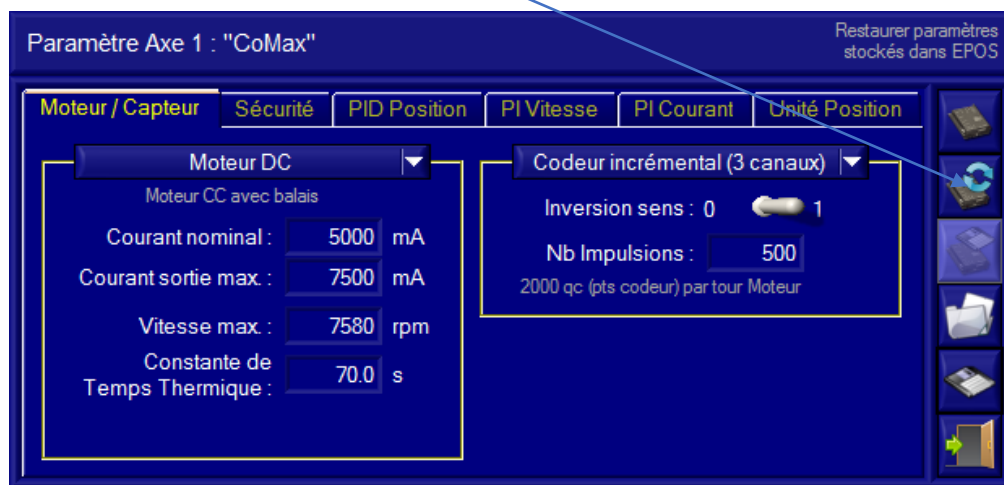
- Vérifier la mise sous tension du système sur le pupitre d'alimentation.



- Démarrer l'EMP CoMax en cliquant sur  et puis appuyer sur « Continuer ».
- 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.



- Aller dans « paramétrer Comax » puis cliquer sur le bouton de restauration des paramètres stockés dans EPOS.




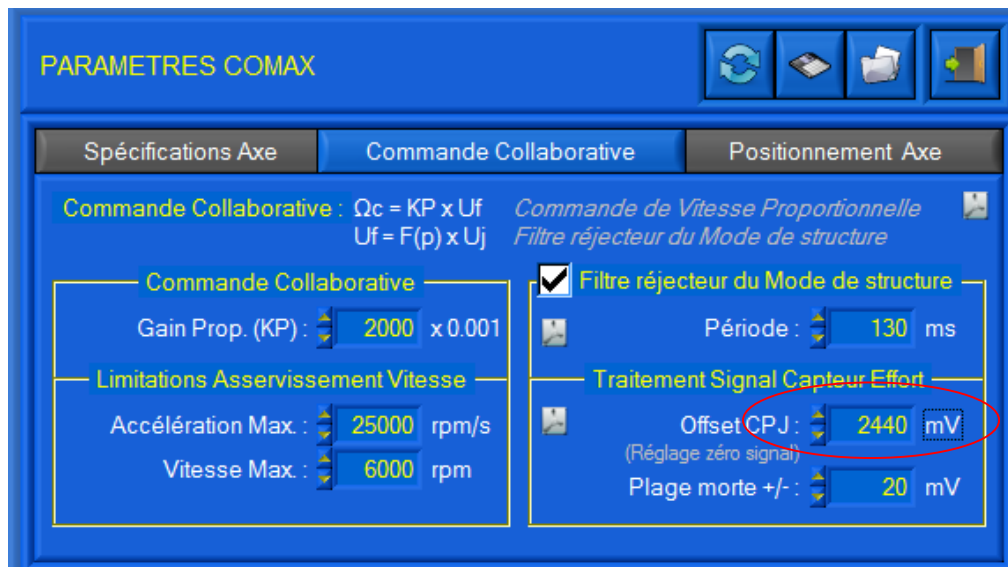
- En cliquant sur l'icône , commander l'axe en position *Inter*

Activer la commande collaborative en cliquant sur le bouton de sélection « collaboration » en haut à gauche de l'écran.

Il se peut que le réglage du système (courant résiduel) ne soit pas correct ce qui provoque un déplacement du bras vers le bras. Il faut alors régler l'Off-set CPJ.



- Cliquer sur 



- 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 1 : 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 ?

- Enlever les 4 masses supplémentaires mises en place.

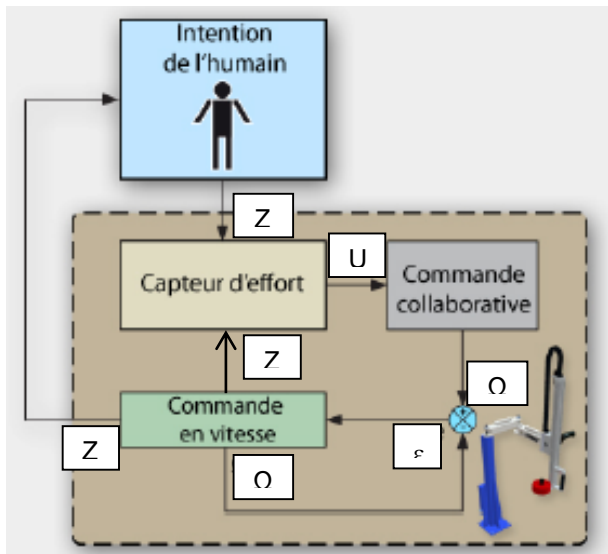
A des fins ergonomiques, l'objectif est de faire ressentir à l'utilisateur une action faible lorsqu'il manipule le robot, même si ce dernier avec lequel il collabore déplace une lourde charge. Pour que la coopération avec le robot soit intuitive, l'humain est dans la boucle de commande.

L'humain impose un déplacement Z_c à une extrémité du capteur déformable (en exerçant un effort sur la poignée) et à partir de la tension U_j fournie par le capteur, la commande collaborative calcule une consigne de vitesse Ω_c pour l'envoyer à l'axe linéaire asservi en vitesse.

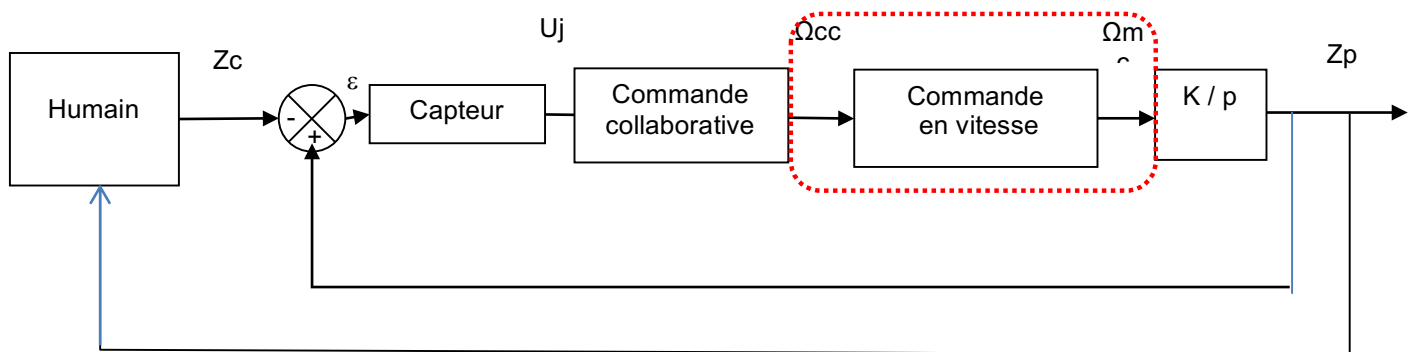
L'autre extrémité du capteur liée à la partie mobile en translation de l'axe se déplace alors de la valeur Z_p . L'objectif est alors de maintenir nulle (ou très petite) la valeur $Z_c - Z_p$.

La figure ci-dessous précise le montage du capteur déformable à jauge équipant la poignée du robot (voir aussi la documentation du dossier technique).





Le schéma bloc simplifié ci-dessous précise la structure du robot.



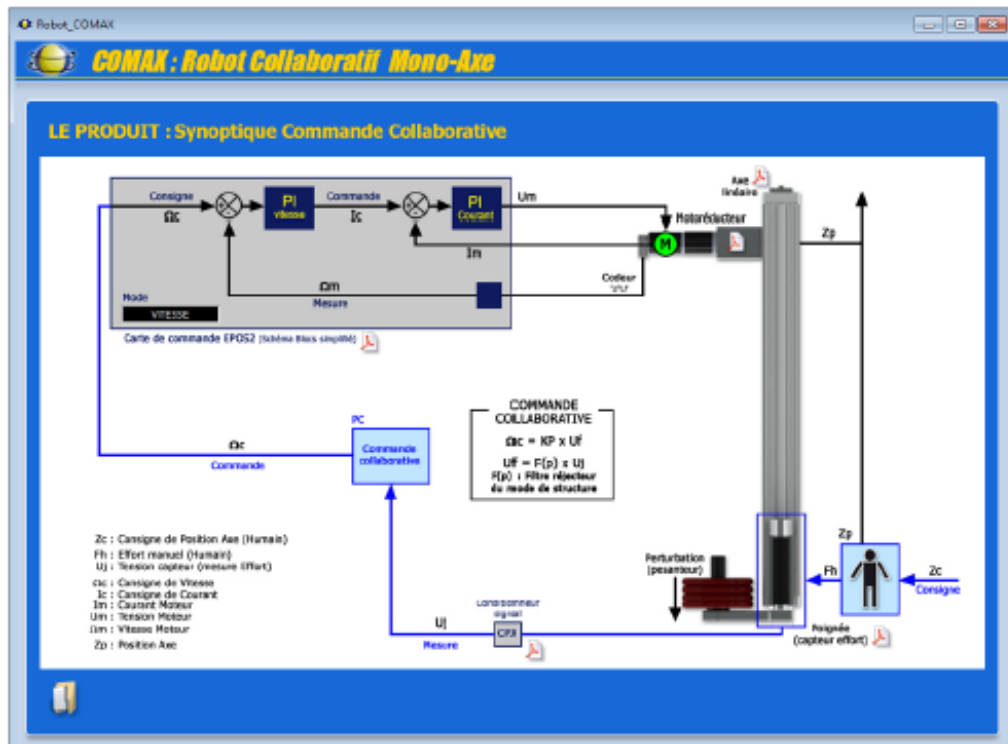
La Commande collaborative est exécutée en continu par l'interface du PC.

La Commande collaborative envoie (via la liaison USB) une consigne de vitesse Ω_c à la carte de commande EPOS de l'axe asservi en vitesse, en fonction de la tension U_j image de la mesure effectuée par le capteur (intention de l'opérateur).

Le synoptique à l'écran reprend les éléments ci-dessus.

Il montre de plus que la commande asservie (avec un correcteur Proportionnel Integral) en vitesse possède une boucle interne de courant (avec aussi un correcteur PI).

Un codeur incrémental placé à l'arrière du moteur renvoie la valeur mesurée de la vitesse de rotation du moteur.



Dans la suite du TP, nous étudierons uniquement l'axe linéaire asservi en vitesse dans le cadre des performances souhaitées de la commande collaborative.

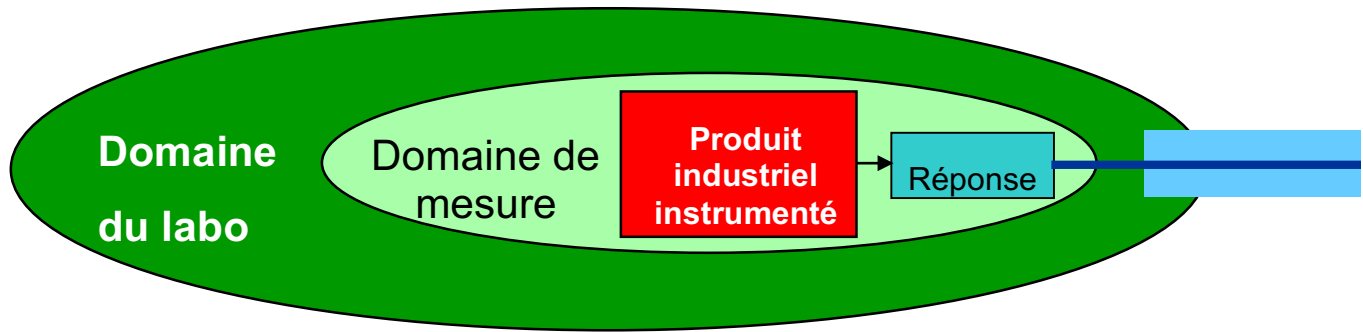
La consigne de l'asservissement étudié désormais est donc la vitesse de rotation du moteur à courant continu, consigne qui est en fait la sortie du bloc *Commande collaborative*.

III. Analyse des performances expérimentales du système en commande directe

1. Mesure de la vitesse du moteur

Objectif : Réaliser des mesures de vitesse du moteur pour une entrée échelon, afin de quantifier les performances de précision et de rapidité, avec différentes masses additionnelles et différentes valeurs du gain proportionnel.


Conclure sur l'intérêt et les limites du correcteur proportionnel.



Chaine de mesure		
<p>Grandeur à évaluer</p> <p>Grandeur évaluée utilisation et/ou affichage</p> <p>Grandeur à mesurer</p> <p>CHAÎNE D'ADAPTATION</p> <p>CAPTEUR</p> <p>CONDITIONNEUR / TRAITEMENT DU SIGNAL</p> <p>Signal, image de la grandeur mesurée</p>		<p>Sources principales d'erreurs (chaîne d'adaptation et conditionneur)</p>
CAPTEUR	<p>Principe de la mesure :</p>	<p>Caractéristiques : précision, linéarité,(voir document industriel)</p> <p>Montage du capteur : (isostatique, compensation jeux,...)</p> <p>Position capteur (dans chaîne mesure) et conséquences sur performances</p> <p>Industriel ou pédagogique (entourer)</p>






Remplir le tableau ci dessus .

- 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 :

Moteur / Capteur	Sécurité	PID Position	PI Vitesse	PI Courant	Unité Position
<div> <div> Régulateur PI <p>KP, Gain Proportionnel : 3150</p> <p>KI, Gain Intégral : 90</p> </div> <div> Anticipation (feedforward) <p>Gain Vitesse : 0</p> <p>Gain Accélération : 0</p> </div> </div>					


- Régler le correcteur avec $KP = 3000$ et $KI = 0$, on dit que le correcteur de vitesse est alors uniquement proportionnel.
Penser à valider ces valeurs en cliquant sur l'icône en haut et à droite (ecrire les parametres dans EPOS)

- Dans l'interface, sélectionner l'icône  puis préparer les acquisitions en cliquant , puis sur l'icône  et sélectionner « Asservissement de Vitesse ».

	Asservissement Profil de Position
	Asservissement de Position
	Asservissement de Vitesse
	Asservissement en Courant

Puis cocher l'affichage de la consigne en vitesse du moteur, de la vitesse moteur et du courant moteur.

Echantillonnage		
Période (ms) :	5.0	Nb Echantillons : 128
		Durée (ms) : 640.0
Choix Canaux		
Actif	Variable	Octets
1: <input checked="" type="checkbox"/>	Consigne de Courant	2
2: <input checked="" type="checkbox"/>	Courant Moteur	2
3: <input checked="" type="checkbox"/>	Vitesse Moteur	4
4: <input type="checkbox"/>	Position Moteur	4
Configuration Trigger		
Mouvement :	<input checked="" type="checkbox"/>	Entrée digit : <input type="checkbox"/>
Erreur :	<input checked="" type="checkbox"/>	Fin de Profil : <input type="checkbox"/>
Temps avant Trigger		
Nb Echantillons :	12	10 %

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

Mode asservissement : VITESSE	
Vitesse demandée <p>Consigne : 3000 rpm</p>	Valeurs actuelles <p>Consigne : 0 rpm</p> <p>Vitesse : 0 rpm</p>
Limites (paramètres "Sécurité") <p>Accél. Max : 100000 rpm/s</p> <p>Vit. Max : 6000 rpm</p>	

Question 2 : Réaliser les acquisitions vis-à-vis de cette sollicitation, avec 0 masses, 2 masses et 4 masses sur le support de masses (Pensez à sauvegarder les données pour ensuite les comparer). Compléter alors le tableau ci dessous.

A quelle valeur le constructeur a-t-il saturé le courant moteur ? Pourquoi ?

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			

2. Influence d'une correction proportionnelle

Question 3 : Quelle est essentiellement la performance (Stabilité, Rapidité ou Précision) affectée par l'ajout des masses additionnelles ? Quelle est la cause de cette variation ?

Question 4 : En conservant 2 masses additionnelles sur le support de masses, réaliser les mêmes acquisitions mais en réglant KP (correcteur proportionnel de l'asservissement de vitesse) tel que KP = 1000 et KP = 5000. Compléter aussi le tableau ci dessus.

Question 5 : Quelle(s) est (sont) la (les) performance(s) affectée(s) par le réglage du gain KP ?

Question 6 : A votre avis, le correcteur uniquement proportionnel pour la boucle de vitesse est-il suffisant dans le cadre de l'action collaboratrice souhaitée ?

3. Influence d'une correction proportionnelle intégrale

Question 7 : En conservant 2 masses additionnelles et un Kp réglé à 3000 sur le support de masses, réaliser les mêmes acquisitions mais en réglant Ki (correcteur proportionnel intégral de l'asservissement de vitesse) tel que Ki = 0, 1500 et KP = 3000. Compléter aussi le tableau ci dessous.

KP	KI	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	1500			
3000	3000			

Question 8 : Quelle(s) est (sont) la (les) performance(s) affectée(s) par le réglage du gain KI ?

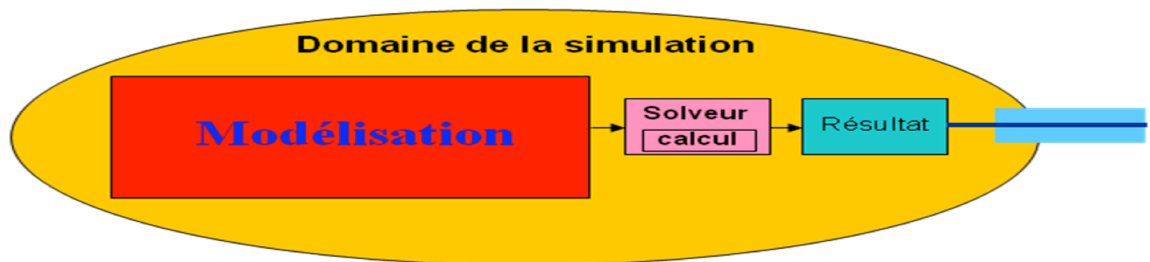
Question 9 : Conclure sur l'intérêt d'un tel correcteur pour la boucle de vitesse est-il suffisant dans le cadre de l'action collaboratrice souhaitée ?

IV. Modélisation et simulation des performances expérimentales du système en commande directe

1. Construction du modèle

Objectif : Analyser une modélisation de l'axe asservi en vitesse, en vue de sa validation .

Objectif		Analyser une modélisation de l'axe asservi en vitesse .
Modélisation	Modèles de connaissance (issu de lois, principes, equations)	
	Modèles de comportement (issu de mesures)	
	Modèle de produit	Nom et composants
	Modèle de l'environnement	Eléments du Milieu Extérieur
Solveur (manuel ou numérique)		Numerique Logiciel Scilab
Domaine de validité (hypothèses)		
Résultat		Modèle de l'axe asservi en vitesse



Question 10 : Mettre en place les différents modèles : connaissance environnement et produit, puis remplir le tableau suivant

Dans ces conditions, le schéma bloc simplifié de l'asservissement de vitesse est fourni en annexe .

On considère dans un premier temps un correcteur de vitesse proportionnel tel que $C_v(p) = K_{PV}$.

Avec le réglage $K_{pv\text{epos}} = 3000$, nous avons $K_{PV} = 0,06$.

**Question 11 : Sans calculs, préciser si l'écart statique est nul ou pas? Justifier.
Qui est responsable de sa valeur ?**

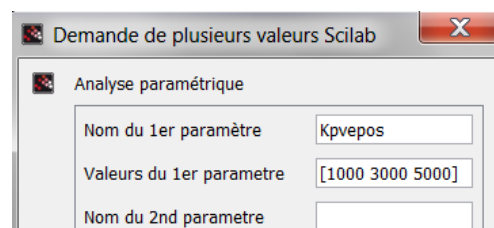
Les mesures précédemment effectuées permettaient elles de le prédire ?

Le modèle utilisé précédemment est fourni dans le fichier Scilab/xcos nommé « Asservissement de vitesse tp1-2.zcos ».

- Démarrer Scilab en cliquant sur l'icône .
- **Charger le module CPGE, voir l'annexe.**
- 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 tp1-2.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.
- 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.
Mettre à 0 la variable Cresm (pas de frottement dans cette simulation), mettre des valeurs fortes dans les variables Isatsup et Isatinf, par exemple 200 A pour ne pas prendre en compte la saturation de courant), faire de même pour la saturation de tension.
Le correcteur de courant prend les valeurs utilisées sur le robot quand les mesures ont été effectuées, c'est-à-dire $K_{piepos} = 200$ et $K_{iiepos} = 75$.
- Double cliquez sur les blocs pour en connaître les contenus.
- Justifier les gains de 0.105 (entrée) et 9.55 (sortie).

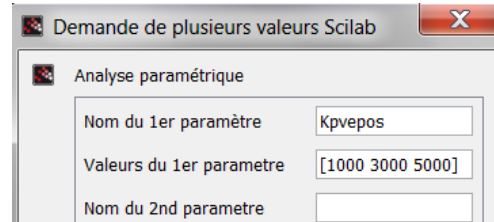
Question 12 : Lancer la simulation en cliquant sur la fleche dans le menu supérieur horizontal, avec la consigne de 3000 rpm. Analyser les résultats.

Dans le fichier « Asservissement de vitesse tp1-2.zcos », rajouter, grâce au Navigateur de palettes, dans le Menu CPGE et Analyses un bloc PARAM_VAR et paramétrer le de la manière ci-contre.



2. Etude de l'influence d'un correcteur proportionnel

Dans le fichier « Asservissement de vitesse tp1-2.zcos », rajouter, grâce au Navigateur de palettes, dans le Menu CPGE et Analyses un bloc PARAM_VAR et paramétrer le de la manière ci-contre.



Question 13 : Lancer la simulation, avec la consigne de 3000 rpm. Analyser les résultats relatifs aux différentes valeurs du gain proportionnel : 1000, 3000, 5000. Les saturations de courant et de tension ont-elles eu lieu ?

3. Etude de l'influence d'un correcteur proportionnel intégrale

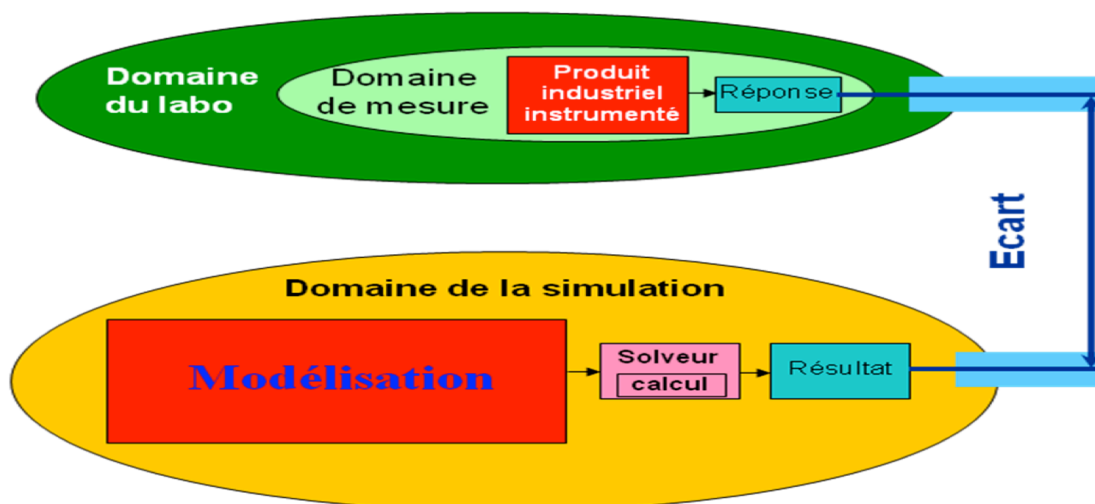
Question 14 : Dans le modèle En conservant 2 masses additionnelles et un Kp réglé à 3000, réaliser les mêmes simulations mais en réglant Ki (correcteur proportionnel intégral de l'asservissement de vitesse) tel que Ki = 0, 1500 et KP = 3000. Compléter aussi le tableau ci dessous.

KP	KI	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	1500			
3000	3000			

V. Diagnostiquer les écarts

Objectif : Analyser les écarts entre les valeurs issues de la mesure d'une part, et celles issues de la simulation d'autre part, puis prendre des dispositions pour réduire cet écart, faire évoluer et valider le modèle.

1. Analyse des écarts entre les mesures et les simulations effectuées



Question 15 : Comparer les courbes expérimentales et les courbes simulées (allures, valeurs finales, saturations temps de réponse).

Les saturations imposées par le constructeur sont en courant : 7.5 A et en tension : 19.4 V

Question 16 : Le modèle peut-il être validé ?

Question 17 : Remplir le tableau des écarts suivant.

TABLEAU DES ECARTS

Objectif de la modélisation	Faire évoluer et valider un modèle de l'axe asservi en vitesse, afin de vérifier le cahier des charges fourni.		
Paramètre représentatif	Vitesse moteur	Flexibilité (cahier des charges)	plus ou moins 10%
Caractérisation écart	Allure, ordre de grandeurs	?	
	Valeur	?	

		Plan d'action	Action à réaliser
Modélisation	Modèle de connaissance (issu de principes)	Ajouter une loi relative à un phénomène physique non pris en compte Faire varier la valeur d'un paramètre dans la simulation	
	Modèle de comportement (issu de mesures)	Remettre en cause les mesures (tableau suivant) Remettre en cause la modélisation des valeurs mesurées	
	Modèle de produit	Remettre en cause la modélisation de certaines interactions (liaisons,...) entre composants (ensembles de pièces,...) Décomposer certains ensembles pour analyser d'autres interactions Remettre en cause les valeurs de paramètres (constructeur : J, Ki,...)	Neant
	Modèle de l'environnement	Remettre en cause la frontière d'étude et inclure d'autres composants Remettre en cause la modélisation des interactions avec l'extérieur	Neant Neant
	Solveur	Choisir un solveur adapté (complexité, type d'étude : mécanique, automatique, RDM,...)	Neant
	Domaine de validité	Remettre en cause toutes les hypothèses (linéaires, continus, invariants)	

Mesure	Mesure	Analyser la documentation du capteur et de la chaîne de mesure pour estimer l'incertitude de mesure. Analyser la position du capteur dans la chaîne de mesure Réaliser l'étalonnage de la chaîne de mesure Analyser le traitement de la mesure : influence de la valeur de la fréquence d'échantillonnage, de la présence de filtres, de... Analyser l'affichage : influence de la mise en place de moyennes, du nombre de points affichés, de l'échelle,...	Neant
	Environnement recréé	Imaginer et mettre en oeuvre une solution permettant de recréer au mieux les éventuelles interactions extérieures manquantes	Neant
	Produit du laboratoire	Vérifier si la présence de capteurs a dégradé certaines performances du système Analyser le produit et conclure sur la réalité industrielle des solutions technologiques	Neant
	Protocole	Adapter la manipulation au type de modélisation réalisée Réaliser plusieurs mesures	
	Opérateur	Repertorier et remédier aux erreurs de manipulation, de lecture, d'interprétation,...	

Conclusion	
-------------------	--

Question 18 : Mettre en place la saturation de courant en donnant aux variables Isatsup et Isatinf respectivement les valeurs 7.5 A et -7.5A dans Modifier le contexte. Conclure.

Question 19 : Proposer une manipulation et mesure permettant d'évaluer l'influence du frottement ;
 Vous disposez d'un capteur d'effort, d'un axe seul et du robot complet pour effectuer des mesures.
Réaliser ces mesures . Donner la valeur de l'effort à produire sur l'axe pour vaincre les frottements, en déduire la valeur en couple rammenée sur l'axe du moteur . on donne la relation entre la vitesse de translation de l'axe et la vitesse de rotation du moteur (voir le TD) $V = K_{\text{tran}} \Omega_m = 1.1 \cdot 10^{-3} \Omega_m$

Question 20 : Justifier la modélisation des frottements secs et en particulier la fonction SIGN utilisée.

Comparer les courbes expérimentales et les courbes simulées (allures, valeurs finales, saturations temps de réponse) données sur la figure ci dessous.

Le modèle peut-il être validé ?

2. Amélioration du système asservi

Objectif : Modifier la modélisation de l'axe asservi en vitesse, en vue du respect du cahier des charges.

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	Flexibilité
Stabilité	Dépassement < 10% pour $K_p < 3000$	$\pm 20 \%$
Rapidité	$t_m < 150 \text{ ms}$, t_m étant le temps de montée	$\pm 20 \%$
Précision	Écart en régime permanent nul vis-à-vis d'une consigne constante ou d'une perturbation constante	

Question 21 : Le correcteur proportionnel permet-il de satisfaire le cahier des charges ?

Le correcteur choisi par le constructeur est le suivant : $C_v(p) = K_{PV} + \frac{K_{IV}}{p} = K_i \frac{1 + T_i p}{T_i p}$

$$\text{avec } K_{pvpos} = \frac{K_{PV}}{20 \cdot 10^{-6}} = \frac{K_i}{20 \cdot 10^{-6}} \text{ et } K_{ivepos} = \frac{K_{IV}}{5 \cdot 10^{-3}} = \frac{K_i}{5 \cdot 10^{-3} T_i}$$

On propose les valeurs suivantes admises pour la suite de l'étude :


$K_{pvpos} = 3000$ et $K_{ivepos} = 90$.


Question 22 : Sans calculs, préciser si l'écart statique est nul ou pas? Justifier.

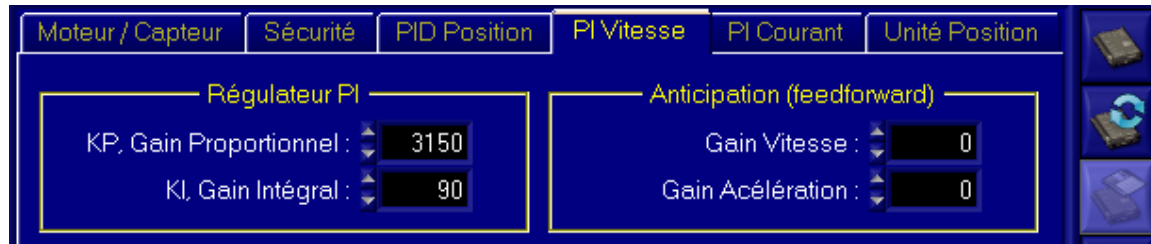
Dans le fichier « Asservissement de vitesse tp1-2.zcos », Modifier « Le Contexte » et affecter les deux valeurs de $K_{pvpos} = 3000$ et $K_{ivepos} = 90$, en supprimant le bloc PARAM_VAR mis en place.

Question 23 : Lancer la simulation, montrer que les performances sont atteintes.

On précise que le temps de montée est le temps pour lequel le système coupe pour la première fois l'asymptote finale.

- 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 :



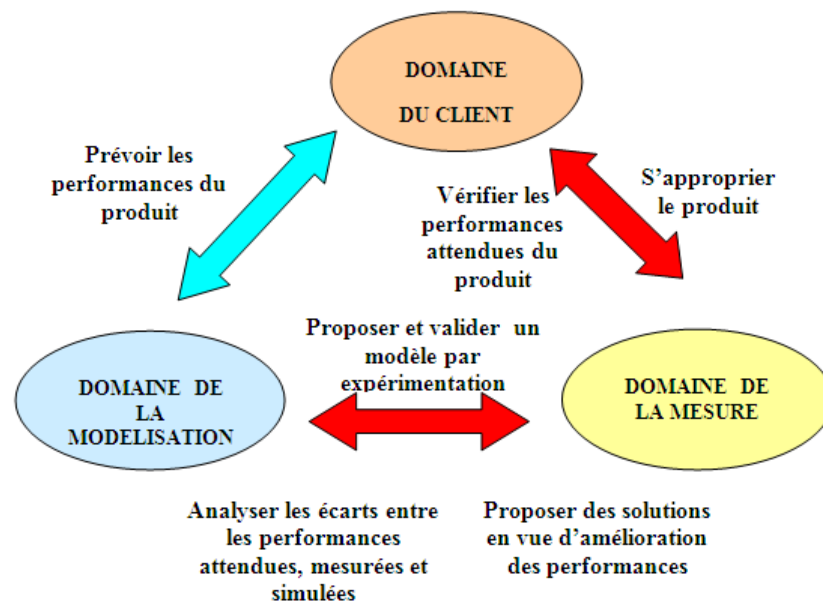
Question 24 : Réaliser un essai d'échelon de vitesse et conclure quant aux performances obtenues.

On donne ci-dessous les courbes simulées et mesurées représentant la réponse à un échelon de vitesse de 3000 t/mn dans ces conditions. **Conclure.**

Question 25 : Expliquer pourquoi l'axe reste maintenu dans sa position finale.

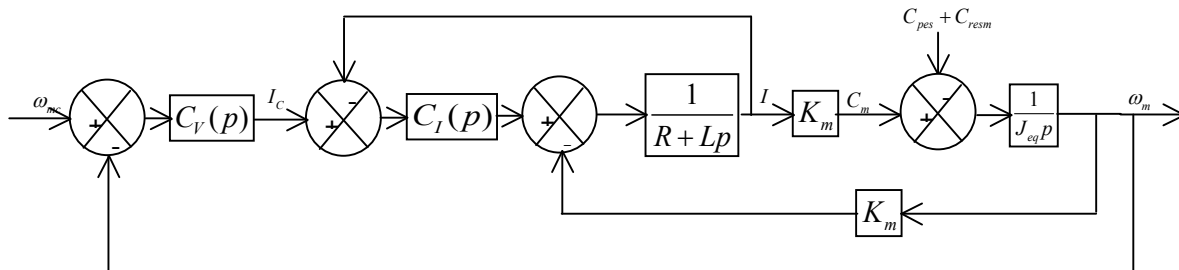
Question 26 : Mettre en évidence la démarche qui a permis ici de construire un modèle encore plus fin, en entourant les activités correspondantes sur le diagramme ci dessous.

Quel est en général l'intérêt pour les constructeurs d'établir un modèle le plus affiné possible, y compris pour un mécanisme existant si il en est prévu une évolution ?



Proposer un poster présentant une synthèse de votre travail.
Sur ce poster devront apparaître les éléments clés des différents temps forts abordés précédemment ainsi que la démarche scientifique mise en œuvre pour répondre à la problématique.
Les outils de communication nécessaires à sa rédaction sont laissés à votre initiative.

(extrait d'un TP du concours CCP)

VI. Annexes1. Schéma bloc du système

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

$$K_{pvepos} = \frac{K_{pV}}{20 \cdot 10^{-6}} = \frac{K_i}{20 \cdot 10^{-6}} \text{ et } K_{ivepos} = \frac{K_{IV}}{5 \cdot 10^{-3}} = \frac{K_i}{5 \cdot 10^{-3} T_i}$$

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

L : inductance du bobinage $L = 8,2 \cdot 10^{-5} \quad \text{H}$

K_{mm} : constante de couple ou de vitesse du moteur $K = 0,03 \text{ Nm.A}^{-1}$

J_{eq} : inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur $J_{eq} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$

C_{pespes} : couple dû à la pesanteur ramené sur l'arbre moteur $C = 0,075 \text{ N.m}$ (2 masses)

$C_{resmresm}$: couple dû aux frottements secs ramené sur l'arbre moteur