

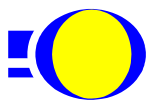
TP 2.1

MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DE CORRECTEUR

PRESENTATION DU SYSTEME

Le système étudié est une attelle de mobilisation du genou, présente dans les cabinets de kinésithérapie et centres de ré-éducation fonctionnelle. Le professionnel de santé l'emploie sur les patients ayant subi des lésions au niveau du genou, avec pour but de faire retrouver au patient, séance après séance, une mobilité satisfaisante de son articulation traumatisée.





COMPETENCES VISEES

- ❖ Associer les fonctions aux constituants
- ❖ Caractériser un constituant de la chaîne de puissance
- ❖ Identifier la structure d'un système asservi
- ❖ Extraire un indicateur de performance pertinent à partir du cahier des charges ou de résultats issus de l'expérimentation ou de la simulation
- ❖ Caractériser les écarts entre les performances
- ❖ Identifier les paramètres d'un modèle
- ❖ Identifier et justifier les hypothèses nécessaires à la modélisation
- ❖ Choisir un modèle adapté aux performances à prévoir ou à évaluer
- ❖ Établir un modèle de comportement à partir d'une réponse temporelle ou fréquentielle
- ❖ Modéliser un système par schéma-blocs
- ❖ Vérifier la cohérence du modèle choisi en confrontant les résultats analytiques et/ou numériques aux résultats expérimentaux
- ❖ Modifier les paramètres et enrichir le modèle pour minimiser l'écart entre les résultats analytiques et/ou numériques et les résultats expérimentaux
- ❖ Proposer une démarche de réglage d'un correcteur
- ❖ Déterminer les performances d'un système asservi
- ❖ Mettre en œuvre une démarche de réglage d'un correcteur
- ❖ Mener une simulation numérique
- ❖ Mettre en œuvre un système en suivant un protocole
- ❖ Proposer et justifier un protocole expérimental
- ❖ Régler les paramètres de fonctionnement d'un système

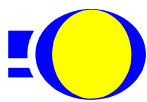
MATERIEL MIS EN ŒUVRE

- ❖ L'attelle CPM130 instrumentée
- ❖ Un PC muni de :
 - l'IHM et de l'Environnement Multimédia Pédagogique (EMP)
 - Un logiciel de modélisation numérique par schéma-blocs (SCILAB XCOS)

OBJECTIFS DU TP

L'objectif du TP est de déterminer les paramètres de correction de l'asservissement de l'attelle CPM-130, en vue d'obtenir un asservissement de vitesse précis, suffisamment rapide, et stable. Le TP se décompose en deux temps :

- Dans un premier temps, l'objectif est d'établir un modèle causal de la CPM-130, dans le contexte d'un asservissement en vitesse ;
- Dans un second temps, on utilisera le modèle élaboré pour régler un correcteur, puis on implantera les paramètres choisis sur le système réel.



I. COMPLETION D'UN MODELE D'ASSERVISSEMENT

On dispose d'une ébauche d'un modèle causal de pilotage de l'attelle CPM-130. Il s'agit dans cette partie de l'adapter au mieux au système réel, en le modifiant et en complétant les différentes grandeurs physiques. Le fichier contenant le modèle est à votre disposition et s'intitule « *asserv_vitesse_a_modifier.zcos* ».

I.1 MODELE DE CONNAISSANCE

Par définition, un **modèle de connaissance** est établi à partir de la « connaissance » des lois et principes physiques auxquels le système est soumis. En d'autres termes, l'étude de la documentation technique, et votre connaissance du cours de SI, doivent vous permettre de déterminer certains paramètres du modèle.

Activité 1 Par analyse de la documentation technique, compléter le schéma-blocs avec les paramètres suivants pour le moteur :

- Résistance électrique (en ohm)
D'après la doc technique, $R=2.14 \text{ ohm}$
- Constante de couple (en Nm.A^{-1})
D'après la doc technique, $k_t=25,6.10^{-3} \text{ Nm.A}^{-1}$

(NB : Dans Scilab, il suffit de faire clic droit, puis « modifier le contexte » pour affecter une valeur numérique à une grandeur littérale)

Activité 2 Déterminer littéralement, en employant toute simplification que vous jugerez pertinente, l'énergie cinétique de l'ensemble rotor + réducteur + vis à billes. Justifier qu'on ne s'intéresse pas aux pièces du mécanisme en aval de la vis à billes pour ce calcul.

On ne s'intéresse pas aux pièces en aval du mécanisme car le rapport de réduction du du système vis-écrou, dont le terme est au carré dans le calcul de l' E_c , rend toutes les énergies cinétiques en aval négligeables devant celles en amont dans la chaîne cinématique.

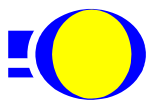
Soit le système matériel $S=\{\text{rotor} + \text{éléments mobiles du réducteur} + \text{vis}\}$, soit r le rapport de réduction du réducteur.

$$\begin{aligned}
 T(S/Rg) &= T(\text{rotor}/Rg) + T(\text{"réducteur"}/Rg) + T(\text{vis}/Rg) \\
 &= \frac{1}{2}J_m\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_r\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_v\omega_r^2 \quad (\text{On note que l'énergie cinétique du réducteur s'écrit en son entrée}) \\
 &= \frac{1}{2}(J_m + J_r)\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_v(r\omega_m)^2 \\
 &= \frac{1}{2}(J_m + J_r + r^2J_v)\omega_m^2
 \end{aligned}$$

Activité 3 En déduire l'expression de l'inertie équivalente J_{eq} vue depuis le moteur. Affecter la valeur numérique correspondant à J_{eq} (en kg.m^2) dans le schéma-blocs.

$$J_{eq} = \frac{1}{2}(J_m + J_r + k^2J_v)\omega_m^2$$

A.N : $J_{eq}=2,06.10^{-6} \text{ kg m}^2$ (on considère que la vis est un cylindre en acier de longueur 0.722m, de diamètre moyen 15 mm, en acier (masse volumique 7800 kg.m^{-3}). J_m et J_r sont dans la doc technique.



Activité 4 Quelles hypothèses simplificatrices ont été mises en œuvre pour établir le modèle qui vous est proposé. Discuter de leur pertinence.

- La boucle de courant n'est pas modélisée. Son utilité est essentiellement de saturer le courant à une valeur fixée par le constructeur, afin d'éviter les surintensités dans les composants d'électronique de puissance ainsi que dans le moteur. Cette simplification est acceptable si on ne s'intéresse pas au régime transitoire du courant. La plupart du temps (hors transitoires « brutaux »), le courant n'est pas en saturation, et la boucle de courant peut généralement être considérée comme parfaite, donc modélisable par un gain pur unitaire.
- Le modèle de frottement est très simple, dans la mesure où C_{rsec} est constant. Dans la réalité, à chaque démarrage ou arrêt (éventuellement momentanée lors d'un changement de sens), C_{rsec} constitue un majorant du couple résistant sec réel (cf lois de Coulomb). Le modèle employé ici est acceptable pour l'asservissement de vitesse, puisque l'attente n'est à l'arrêt qu'à $t=0s$.

I.2 MODELE DE COMPORTEMENT

Il s'agit dans cette partie de déterminer des paramètres physiques de la CPM-130, que seule l'expérience peut nous aider à déterminer avec une bonne précision.

- Lancer le logiciel lhm_CPM-130.
- Connecter l'interface PC (la LED devient verte en mode « connexion ») au CPM-130



- Cliquez sur l'interrupteur « Activation » pour activer la carte de commande
- Passer en mode LABO

Activité 5 Préparer un pilotage du chariot avec les paramètres suivants :

- Amener le chariot à son abscisse initiale $P_{a0}=230$ mm grâce à la commande ci-contre

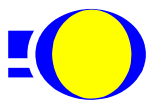
Paramétrer le mouvement commandé en cliquant sur « envoyer sollicitation axe » (cocher *acquisition*) avec les paramètres suivants :

- Consigne de vitesse du chariot= 20 mm/s
- Choix des mesures : Courant et Vitesse Axe
- Période d'échantillonnage 100ms (pour une durée de mesure d'environ 4s)
- Correcteur vitesse : $K_p=90$; $K_i=0$



Activité 6 Justifier l'évolution temporelle du courant, et expliquer notamment quel phénomène est mis en évidence en régime permanent

On observe qu'en régime permanent, le courant est non nul. Le phénomène mis en évidence est la présence de frottement (sec et/ou fluide).



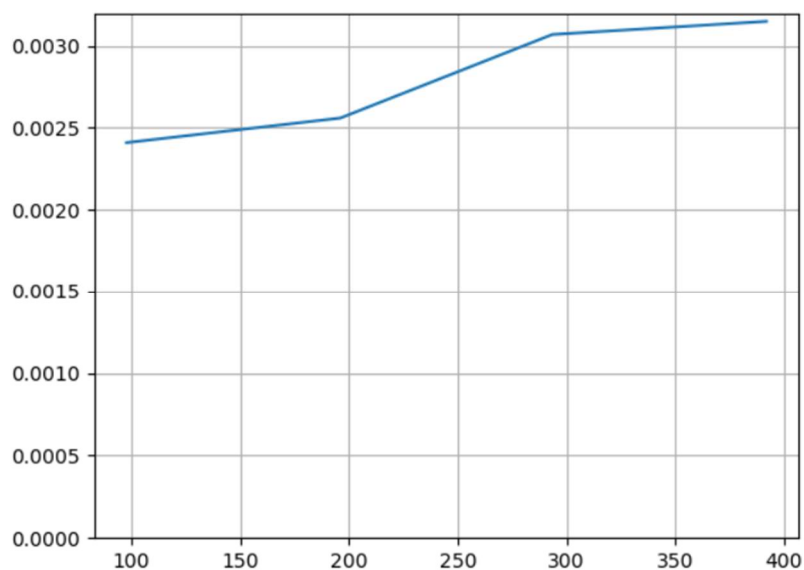
Activité 7 Faire 4 mesures, pour lesquelles la consigne en vitesse du chariot sera successivement de 5, 10, 15, et 20 mm/s, lors desquelles vous relèverez les valeurs de ω_{moteur} (rad.s^{-1}), et l'intensité I (A) en régime permanent. Justifier que la mesure de l'intensité nous fournit en régime permanent une image du couple résistant C_r (Nm) dû aux frottements.

En régime permanent, on a $C_m = C_r$. Or, $C_m = kt.I$, par conséquent, en R.P., $C_r = kt.I$

Activité 8 Tracer avec un outil numérique (Excel, Python,...) vos relevés de points $C_r = f(I)$. En déduire les valeurs du couple résistance sec $C_{r\text{sec}}$ (N.m), et le coefficient de frottement visqueux f (N.m.s).

V_{cons} (mm/s)	N_{m_RP} (tr/min)	Ω_{m_RP} (rad.s^{-1})	I en RP (A)	C_r en RP (Nm)
5	933	97.70	0.094	0.00241
10	1872	196.0	0.100	0.00256
15	2803	293.5	0.120	0.00307
20	3742	391.9	0.123	0.00315

Tracé du couple résistant en RP en fonction de la vitesse de rotation du moteur



En approchant le nuage de point obtenu avec une fonction affine, dans la mesure où $C_r = C_{r\text{sec}} + f \omega_m$, l'ordonnée à l'origine est le couple résistant sec C_r , et le coefficient directeur est f .

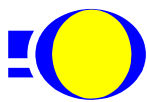
On trouve $C_{r\text{sec}} = 0.0021$ Nm

$f = 2,78 \cdot 10^{-6}$ Nms

Activité 9 Compléter le schéma-blocs pour tenir compte de ces observations.

1.3 VALIDATION DU MODELE

On se propose ici de confronter avec deux réglages distincts le modèle élaboré et l'expérience correspondante, puis de confronter les résultats.

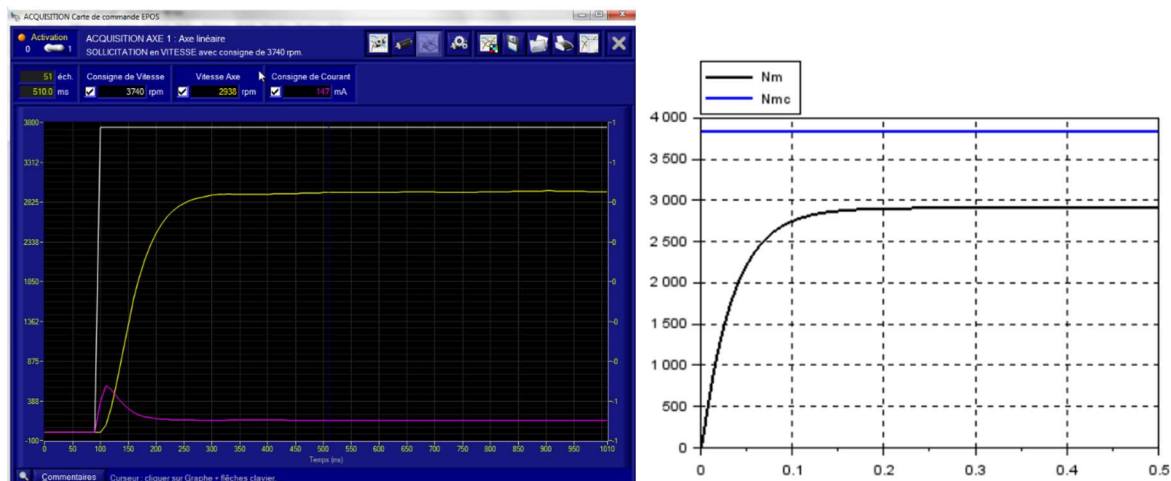


Activité 10 Exécuter sous Scilab la simulation suivante :

- Echelon de vitesse de +20 mm/s, $K_{pepos}=90$, $K_i=0$

Activité 11 Réaliser sur l'attelle l'essai correspondant.

Activité 12 Conclure sur la validité du modèle, le modifier si nécessaire.



Les allures sont similaires, les erreurs relatives sur l'écart statique (21% et 23% respectivement) et sur le temps de réponse à 5% sont faibles (à préciser en fonction du modèle utilisé en labo). Le modèle est validé.

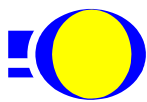
NB : il faudrait, pour parfaire la démarche, renouveler la comparaison pour différents réglages de consignes, et de correcteur. Les non-linéarités présentes (notamment les saturations de tension et d'intensité) pourraient assez rapidement mettre en défaut le modèle. Il faudra pour la suite du TP travailler dans un domaine de travail limité afin de conserver au possible la validité du modèle.

II. RÉGLAGE DE CORRECTEUR

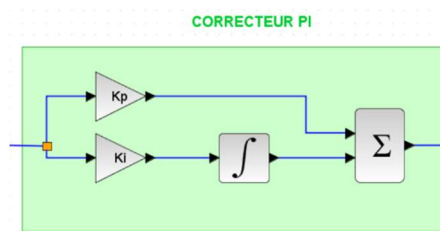
Le modèle précédemment élaboré, à priori valide dans certaines conditions d'emploi du système, nous permet dorénavant de prévoir les performances du système pour un réglage donné. L'objectif de cette partie est de prévoir un réglage de correction à l'aide du modèle numérique sous Scilab, puis de les valider sur le système réel.

On ne s'intéresse dans ce TP qu'aux critères de performances listés dans l'extrait de cahier des charges ci-dessous :

	Critère	Niveau
Précision	Erreur statique	$e_s=0$ mm/s
Rapidité	Tr5%	$Tr5\% \leq 200$ ms

**II.1 CORRECTION PROPORTIONNELLE**

Le modèle Scilab proposé utilise pour l'asservissement en vitesse un correcteur proportionnel intégral :



On souhaite ici analyser l'influence de la correction proportionnelle seule. A cet effet, dans toute la partie II.1, afin d'annuler le caractère intégral du correcteur, on prendra $K_{iepos}=0$ (clic droit dans Scilab, puis « modifier le contexte »). On note au passage que $K_i=K_{iepos} \cdot 0.06$ (K_{iepos} correspondant à une grandeur « constructeur » de la carte EPOS, est linéairement liée avec la grandeur correspondante sur le schéma-blocs).

Activité 13 Exécuter consécutivement 4 simulations, pour lesquelles :

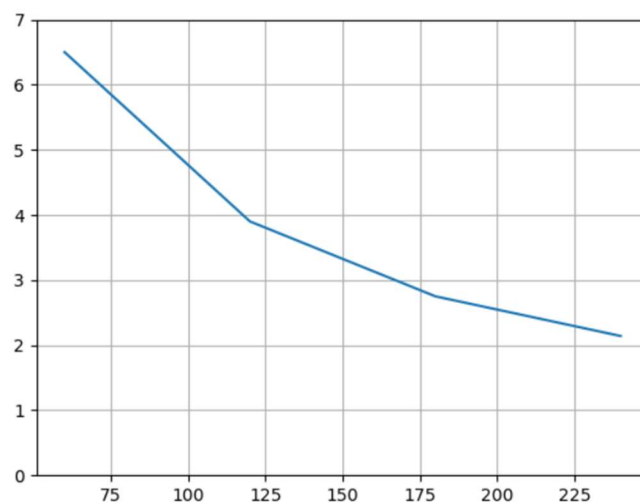
- la consigne en vitesse du chariot sera de 20 mm/s
- Le correcteur sera réglé successivement avec les couples de valeurs suivants :

$(K_{pepos}, K_{iepos}) = (60, 0), (120, 0), (180, 0)$ et enfin $(240, 0)$

Vous relèverez à chaque fois l'erreur statique, puis à l'aide d'un outil numérique (Excel, Python,...) vous tracerez l'erreur statique en fonction de K_p .

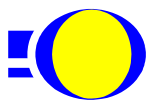
K_{pepos}	Erreur statique (mm.s ⁻¹)
60	6.5
120	3.9
180	2.75
240	2.14

Erreur statique simulée en fonction de K_{pepos}



Activité 14 Justifier l'allure du tracé observé vis-à-vis de la nature de la correction et des fonctions de transferts employées dans le schéma-blocs.

La FTBO étant de classe nulle (penser qu'elle inclut la FTBE de la MCC), et l'entrée étant en échelon, on pouvait anticiper ce comportement asymptotique.



Afin de préparer le réglage d'asservissement sur le système réel, ouvrir sur l'IHM de la CPM-130, cliquer sur « paramétrer axe » :

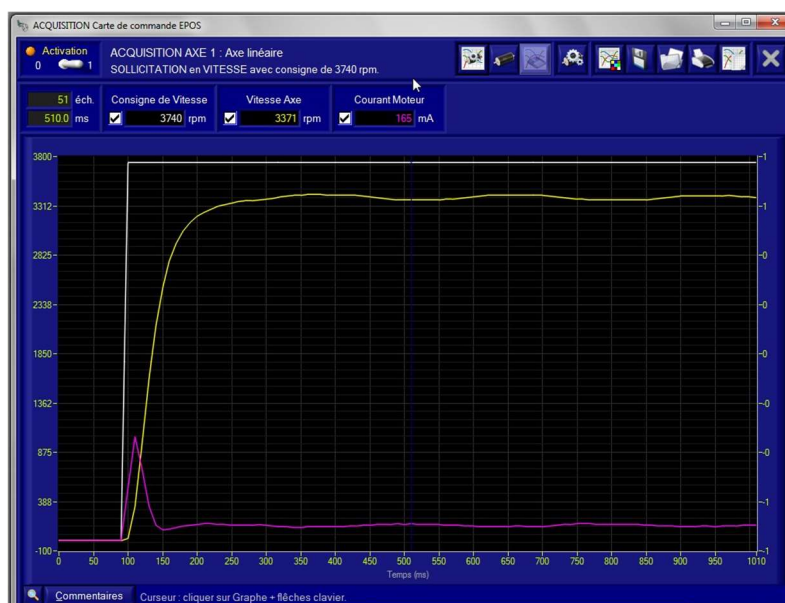


puis ouvrir la fenêtre suivante :

Paramètre Axe 1 : "Axe linéaire"

Moteur / Capteur	Sécurité	Unité Position	PID Position	PI Vitesse	PI Courant
Correcteur PI					
KP, Gain Proportionnel : 60					
KI, Gain Intégral : 0					
Anticipation (feedforward)					
Gain Vitesse : 0					
Gain Accélération : 0					

Activité 15 Mettre en œuvre (K_{pepos} , K_{iepos})= (210 , 0) le réglage sur le système réel, et conclure quant à la pertinence de ce type de correction vis-à-vis d'un critère de précision, pour ce système.



Sur le système réel, on retrouve évidemment le même défaut de précision.

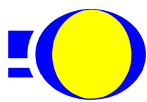
Ce correcteur proportionnel, sur ce système, ne peut pas être retenu pour valider le critère de précision.

II.2 CORRECTION PROPORTIONNELLE ET INTEGRALE

Activité 16 Justifier la pertinence d'une correction présentant un caractère intégral vis-à-vis d'une problématique de précision.

Le système étant de classe nulle, il faut un correcteur de classe au moins égale à 1 pour annuler l'écart (et l'erreur) statique.

Pour cette partie, on garde pour K_p la valeur suivante : $K_p=210$, et on va déterminer K_i par la méthode des pôles dominants, avant de le mettre en œuvre sur le système. Cette méthode est pratique pour pré-dimensionner un correcteur Proportionnel Intégral, en vue d'obtenir un système précis et suffisamment dynamique.



Activité 17 En vous appuyant sur le schéma-blocs sous Scilab, déterminer analytiquement une valeur de K_i permettant de compenser le pôle dominant de la FTBO. On note que $K_p = K_{pepos} * 0.000917$

La FTBO s'écrit :

$$FTBO(p) = \frac{(K_p + \frac{K_i}{p}) \dots}{(1 + \frac{RJ}{K_e K_t} p) \dots}$$

$$= \frac{K_i (1 + \frac{p}{K_i}) \dots}{p (1 + \frac{RJ}{K_e K_t} p) \dots}$$

Donc pour simplifier le pôle dominant on choisit K_i tel que :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{RJ}{K_e K_t} \quad \text{soit} \quad K_i = \frac{K_e K_t K_p}{RJ} \Leftrightarrow K_i = \frac{0.000917 K_e K_t K_{pepos}}{RJ}$$

$$\text{A.N : } K_i = 24.6$$

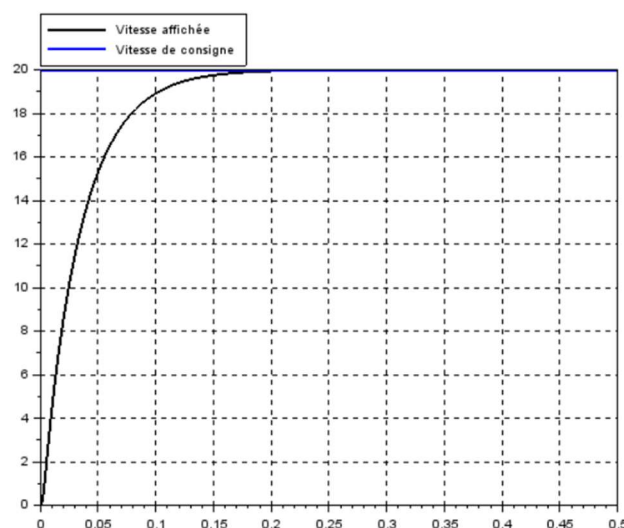
Activité 18 En déduire la valeur de K_{iepos} correspondante sachant que $K_i = K_{iepos} * 0.060$

$$K_{iepos} = \frac{K_i}{0.060} = 410$$

Activité 19 Implémenter cette valeur de K_{iepos} dans le modèle numérique Scilab, exécuter, et discuter de la pertinence du réglage effectué.

La réponse simulée présente un écart statique nul, et le temps de réponse de 100 ms est inférieur à celui imposé comme maximum par le cahier des charges.

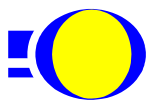
Le cahier des charges est donc validé selon ce modèle.



Activité 20 Implémenter le réglage complet (K_{pepos} , K_{iepos}) sur le système réel. Conclure.

Avec ce réglage, le cahier des charges est également vérifié sur le système réel.





II.3 SYNTHESE

Activité 21 Synthétiser les résultats obtenus pour le réglage du correcteur, et discuter qualitativement de la démarche suivie lors de ce travail pratique.