

Travaux pratiques
- Modélisation SLCI -
 système : axe numérique en translation Control'X

Problématique, activités et objectifs du Tp :

- On s'intéresse à un axe numérique en translation de structure comparable à ce qu'on retrouve sur les axes numériques des machines-outils d'usinage. On cherche à mettre en place une démarche permettant d'optimiser les performances de positionnement de l'axe **asservi en position linéaire Control'X** tout en minimisant les délais de mise au point et de validation du cahier des charges. Cela passe par une démarche de modélisation.
- On effectuera des essais pour caler des correcteurs (proportionnel et proportionnel intégrateur) permettant de satisfaire au mieux les exigences du cahier des charges.
- On va mettre en place des modèles de boucle ouverte et de boucle fermée (Modèle de connaissance et modèle de comportement).
- On finira sur un modèle non linéaire indispensable à la simulation permettant d'effectuer la synthèse d'un correcteur.

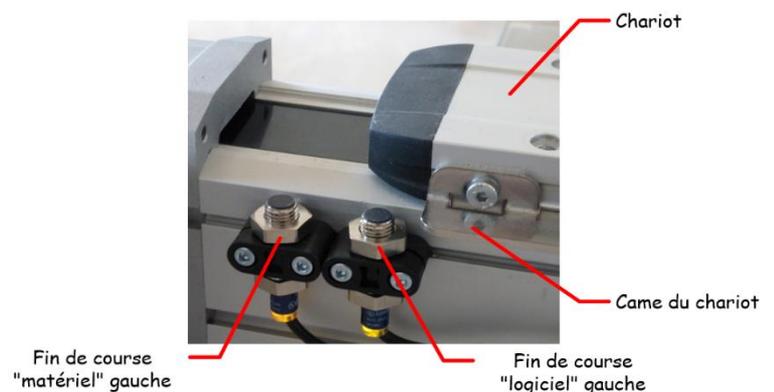
1^{ère} partie : mise en œuvre du système et réglage du correcteur

Prise en main matérielle de Control'X

- Mettre sous tension Control'X : pour cela, basculer l'interrupteur situé au dos du carter sur la position 1 :



- Vérifier que la came du chariot de Control'X ne recouvre pas les capteurs de fin de course "matériels". Si cela devait être le cas, déplacer à la main le chariot vers l'intérieur de façon à découvrir ces deux capteurs :



- Fermer le capot du carter pour fermer l'interrupteur de sécurité :



- Sur le pupitre, déverrouiller l'arrêt d'urgence puis appuyer sur le bouton poussoir "Armer système". Un relais auto alimenté colle et la diode verte "variateur prêt" s'allume.



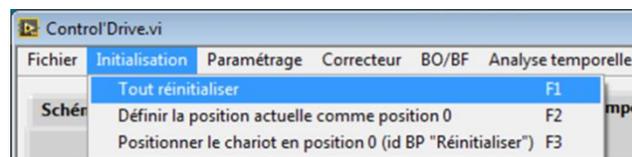
- Lancer maintenant le logiciel Control'Drive :



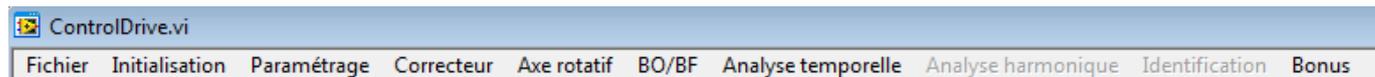
Control'Drive

Sauf s'il ne l'est déjà, le chariot de Control'X doit s'initialiser à gauche sur le capteur de fin de course "logiciel".

Si Control'Drive a été lancé avant d'armer Control'X, effectuer une réinitialisation en utilisant la fonction "Tout réinitialiser" du menu "Initialisation" :



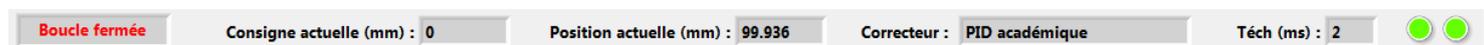
Dans ce qui suit le menu désigne le bandeau supérieur :



Un onglet désigne un bandeau du type :

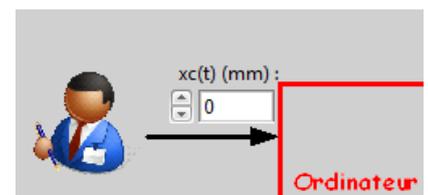


On peut fréquemment observer la barre d'état en-bas de Control'Drive qui regroupe les informations essentielles relatives à l'état de Control'X :



Le TP peut maintenant commencer : on se placera, pour débiter, successivement sur les onglets "Schéma structurel", "Schéma fonctionnel" et "Schéma bloc".

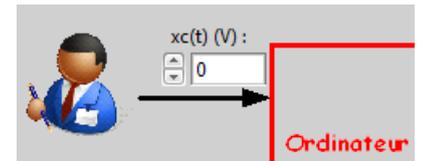
- Vérifier que le pilotage se fait en boucle fermée (Menu "BO/BF") et que le gain du correcteur vaut 0.1 (Menu "Correcteur", onglet "PID académique")
- Piloter le système avec différents échelons d'amplitude 50 mm. Pour cela, agir sur les petites flèches "haut" et "bas" de la commande ci-dessous ou saisir une valeur numérique dans le champ blanc et valider par entrée. Puis cliquer successivement sur la flèche « haut ».
- A travers la rainure dans la partie supérieure du carter en plexiglas, exercer des perturbations à la main sur le chariot. Observer le comportement du système.



Le survol à la souris des différentes zones de l'écran permet d'afficher des informations sur les composants mis en œuvre dans l'asservissement.

A tout instant on peut repositionner le chariot à son origine en appuyant sur le bouton "Réinitialiser" du pupitre ou en cliquant sur "Positionner le chariot en position 0" du menu "Initialisation".

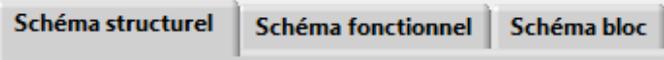
- Se placer maintenant en boucle ouverte (Menu "BO/BF"), piloter le système avec différents échelons de tension par pas de 0.5 V :



Question 1. Observer et commenter le comportement observé. L'axe en translation est un axe numérique asservi. Comment définiriez-vous ce terme « asservi ».

Question 2. En boucle ouverte, la structure est-elle en chaîne directe ou bouclée ? Evaluer la tension mini à partir de laquelle le chariot se déplace. Que vaut alors la tension (appelée tension seuil) aux bornes du moteur ? Que permet-elle de compenser mécaniquement ?

Ne pas hésiter à explorer les onglets "Schéma fonctionnel" et "Schéma bloc" :

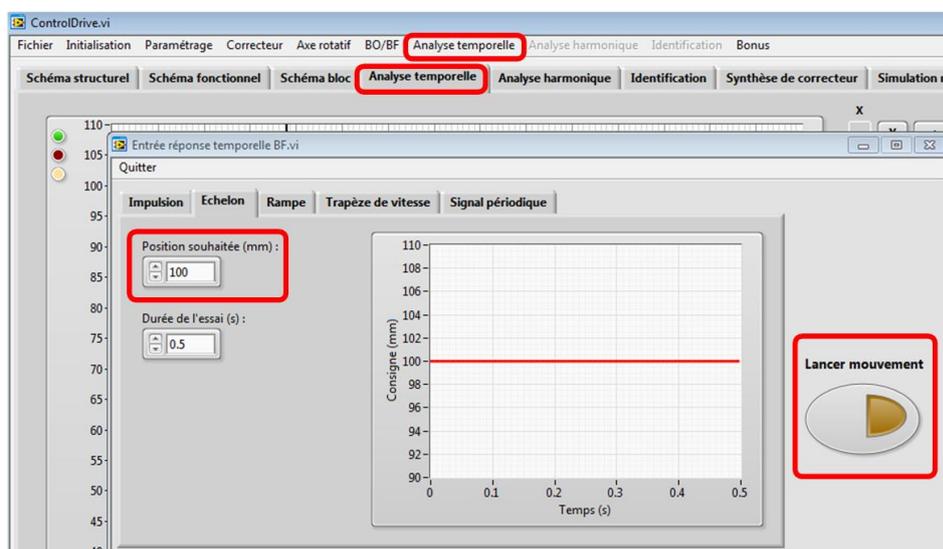


Validation du cahier des charges avec correction proportionnelle

On impose le cahier des charges ci-dessous :

Exigence	Critères		Niveaux
Permettre à l'utilisateur de positionner une pièce	C1	Système asymptotiquement stable	
	C2	Amortissement caractérisé par le premier dépassement.	$D_1 < 25\%$
	C3	Rapidité caractérisée par le temps de réponse à 5 %.	$T_{5\%} < 500 \text{ ms}$
	C4	Précision caractérisée par l'écart statique (écart permanent pour une entrée en échelon)	$\varepsilon_s < 0.5 \text{ mm}$

- Vérifier que le pilotage se fait en boucle fermée (Menu "BO/BF") et que le gain du correcteur vaut 0.1 (Menu "Correcteur").
- On travaille maintenant dans l'onglet "Analyse temporelle". Générer une consigne en échelon de 100 mm d'amplitude : menu "Analyse temporelle", "Définir entrée" puis cliquer sur le bouton "Lancer mouvement" :

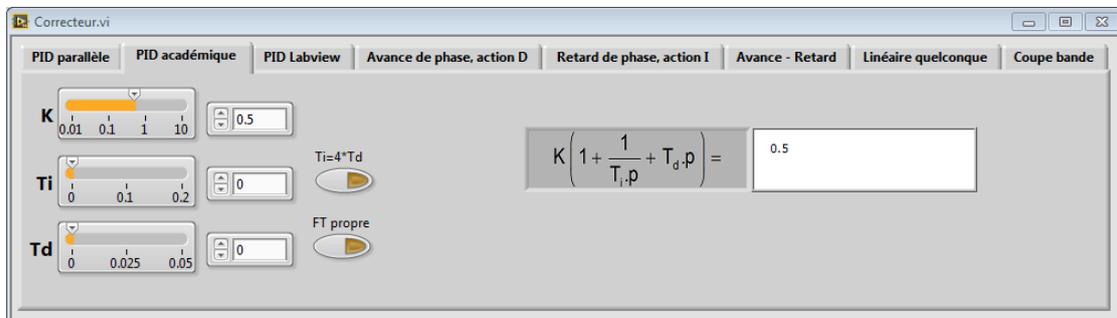


Question 3. En observant la réponse à l'échelon imposé et constater que les critères du cahier des charges ne sont pas tous respectés. Apporter une réponse précise.

Influence du gain du correcteur proportionnel

On cherche ici à analyser qualitativement l'influence du correcteur proportionnel.

- On continue à travailler dans l'onglet "Analyse temporelle". On conserve une amplitude d'échelon de 100 mm et on modifie la valeur du gain proportionnel que l'on choisira parmi {0.1, 0.5, 1, 3}. Utiliser pour cela le menu "Correcteur", onglet "PID académique" :



- Lancer des consignes en échelon et observer le comportement du système réel. Penser à utiliser le bouton poussoir "Réinitialiser" du pupitre qui permet de repositionner le chariot à son origine entre deux essais.

Question 4. *Quelle est l'influence qualitative du gain du correcteur sur les performances en termes de :*

- *Amortissement*
- *Rapidité*
- *Précision*

Correction Proportionnelle intégrale

On envisage un correcteur proportionnel intégral pour améliorer la précision de l'asservissement. On a pu constater que celle-ci n'est pas bonne dans le cas d'une correction uniquement proportionnelle avec des valeurs faibles du gain.

Dans tous les cas, on cherchera à valider les exigences du cahier des charges sur une **réponse indicielle d'amplitude 100mm**.

- Ouvrir la fenêtre de correcteurs (Menu "Correcteur") et choisir un correcteur "PID académique"

$$G(p) = K \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$

- On procédera en deux étapes :

Étape 1 : Fixer le gain K à la valeur 0.5. Vérifier que les critères C1, C2 et C3 sont satisfaits.

Étape 2 : Fixer la valeur de la constante de temps T_i à 0.22 (s).

- Faire exécuter un essai de réponse indicielle de 100mm sur la base de ce correcteur.

Question 5. *Discuter de l'influence de l'action intégrale sur la réponse. Est-elle satisfaisante ?*

Le cahier des charges est-il validé ?

A l'aide du logiciel d'acquisition, observez la courbe d'évolution de la tension aux bornes du moteur pendant l'essai effectué. Quelle valeur maximale ne peut-elle pas dépasser ?

La réponse montre clairement un effet windup : la saturation en tension du moteur est telle que le chariot a été loin du but très longtemps, le terme intégrateur du correcteur a donc intégré un écart important pendant très longtemps. Lorsque le chariot dépasse la valeur de consigne, il faut attendre longtemps pour que le terme intégral redescende de façon à ce que la tension d'alimentation du moteur change de signe. Le chariot revient ensuite doucement vers la consigne.

- Ouvrir la fenêtre de correcteurs (Menu "Correcteur") et choisir un correcteur "PID Labview" et régler le correcteur de la même façon.

Le correcteur PI LabVIEW intègre un effet antiwindup : l'action intégratrice est déclenchée lorsque le chariot est proche du but. Le chariot est déclaré proche du but lorsque la tension moteur cesse de saturer.

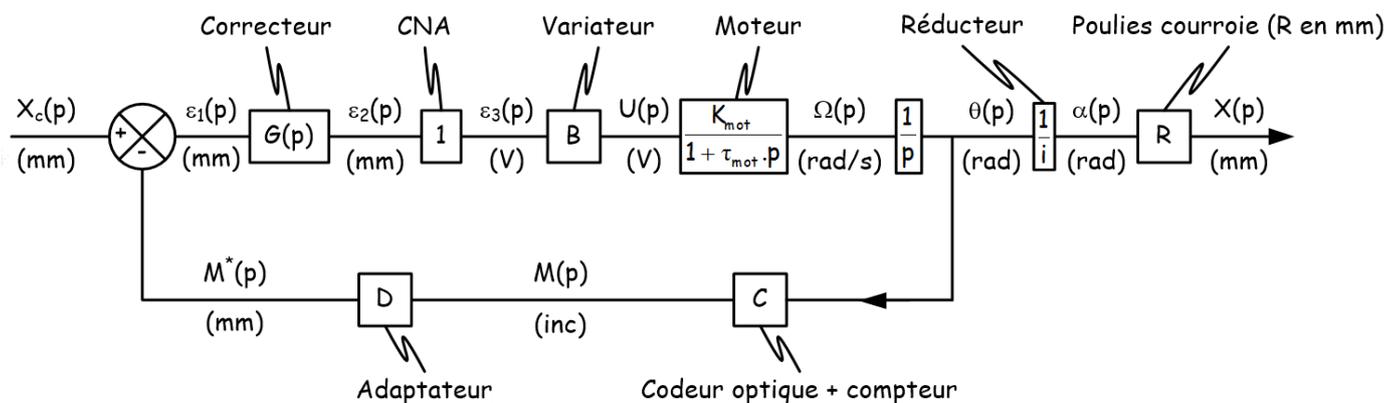
- Faire exécuter un essai de réponse indicielle de 100mm sur la base de ce correcteur.

Question 6. Conclure sur la réponse obtenue.

2^{ème} partie : modélisation linéaire de l'asservissement

On va maintenant chercher à prévoir le comportement de l'asservissement et notamment l'influence du correcteur sur ses performances. La finalité étant de concevoir un correcteur permettant de satisfaire tous les critères du cahier des charges.

On travaille sur le schéma bloc ci-dessous représentant un modèle de l'axe en translation control'X :

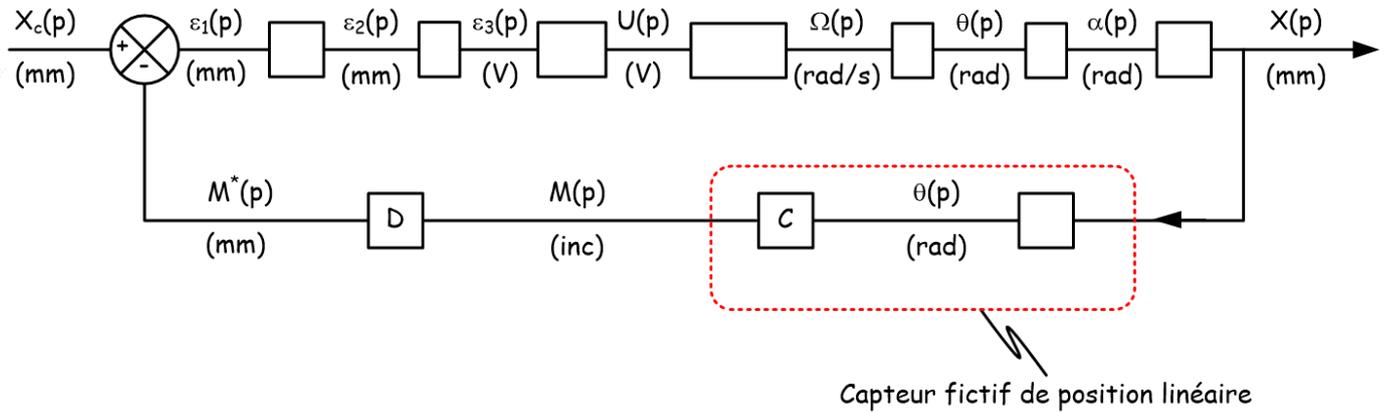


B, R, i, D, C sont des gains purs (des constantes donc). K_{mot} et τ_{mot} sont des constantes.

Question 7. Rechercher sur le logiciel (ou fichier « caractéristiques techniques » dans le répertoire de travail ou sur le logiciel d'acquisition) les informations nécessaires sur les composants et déterminer numériquement R, i, B et C. Préciser les unités et les noms de ces constantes. Justifier le bloc « 1/p ».

On modifie le schéma bloc ci-dessus pour lui donner la forme ci-dessous

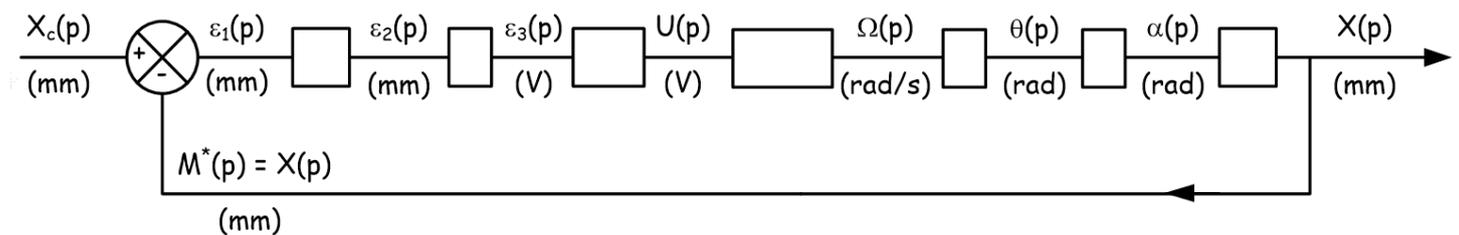
Question 8. Compléter le schéma bloc ci-dessous (sauf le bloc inconnu encadré en rouge) qui met en évidence qu'asservir la position angulaire $\theta(t)$ revient à asservir la position linéaire $x(t)$.



Question 9. Exprimer le gain (sa fonction de transfert qui est constante) du capteur fictif de position linéaire en incréments/mm en fonction de i , C et R .

Question 10. Quel gain D (en mm/incrément) donner à l'adaptateur pour que le retour soit unitaire c'est-à-dire pour que $m^*(t) = x(t)$ ou $M^*(p) = X(p)$?

Le schéma bloc de l'asservissement en position linéaire devient donc le schéma bloc équivalent suivant :



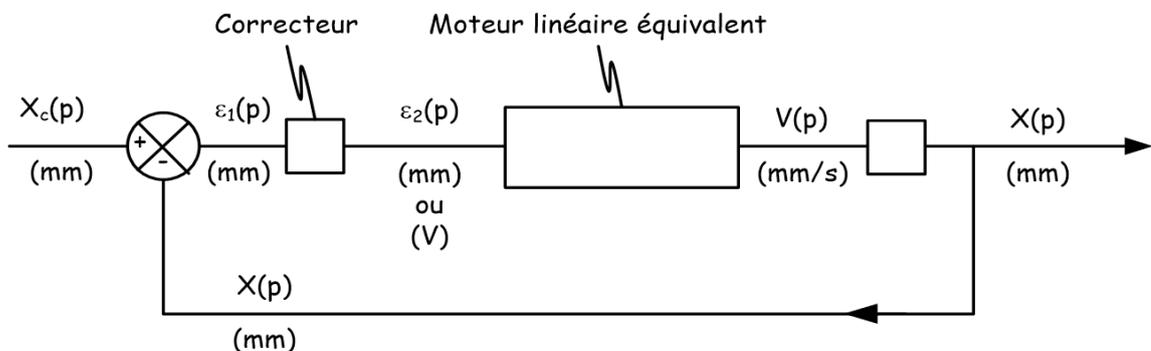
Question 11. Compléter le schéma bloc de l'asservissement en position linéaire ci-dessus

La vitesse de translation du chariot (notée $v(t)$) est la dérivée de la position $x(t)$.

Question 12. Donner la relation entre les transformées de Laplace de $v(t)$ et de $x(t)$: $V(p) = ? X(p)$

Cette vitesse provient de la vitesse de rotation ($\Omega(p)$) du moteur réduite par le réducteur puis transformée en déplacement linéaire par le système poulie/courroie.

L'asservissement étudié peut donc se ramener à l'étude du schéma bloc suivant :



Question 13. Justifier que la fonction de transfert du bloc "moteur linéaire équivalent" qui comprend le convertisseur numérique analogique, le variateur (interface de puissance), le moteur et le système de transformation de mouvement s'écrit :
$$\frac{V(p)}{\varepsilon_2(p)} = \frac{\frac{B \cdot K_{mot} \cdot R}{i}}{1 + \tau_{mot} \cdot p}$$

On considère pour commencer un correcteur proportionnel $G(p) = G$ avec G constant.

Question 14. *Exprimer analytiquement la fonction de transfert en boucle ouverte ainsi corrigée que l'on mettra sous la forme : $H_{bo}(p) = \frac{X(p)}{\varepsilon_1(p)} = \frac{G \cdot K_{\acute{e}q}}{p \cdot (1 + \tau_{\acute{e}q} \cdot p)}$. Préciser les expressions de $K_{\acute{e}q}$ et $\tau_{\acute{e}q}$.*

Question 15. *Exprimer alors la fonction de transfert en boucle fermée : $H_{bf}(p) = \frac{X(p)}{X_c(p)} = \frac{K_{bf}}{1 + \frac{2 \cdot \zeta_{bf}}{\omega_{nbf}} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_{nbf}^2}}$. Identifier les caractéristiques, gain (statique), pulsation propre et facteur d'amortissement en fonction de G , $K_{\acute{e}q}$ et τ_{mot}*

Nous venons d'établir un modèle de l'asservissement de type deuxième ordre. Il va nous permettre d'anticiper le comportement de l'asservissement.

Question 16. *D'après le modèle mis en place, analyser qualitativement l'influence du gain G sur les performances de l'asservissement (donc sur la fonction de transfert en boucle fermée) en termes de :*

- *Amortissement*
- *Rapidité*
- *Précision vis-à-vis d'une entrée en échelon*

On va confronter les prévisions théoriques et les constats expérimentaux quant à l'influence du gain du correcteur proportionnel sur les performances de l'asservissement.

Question 17. *Confronter les résultats des questions 4 et 16 et conclure.*

Où apparaîtraient sur le schéma bloc d'éventuelles perturbations si l'on avait décidé de les modéliser ?

Pourquoi, le système étant en théorie précis vis-à-vis d'une consigne en échelon, il ne l'est pas en pratique pour des valeurs de G faibles ?

Comment en pratique doit-on choisir le gain G pour rejeter au mieux ces perturbations ?

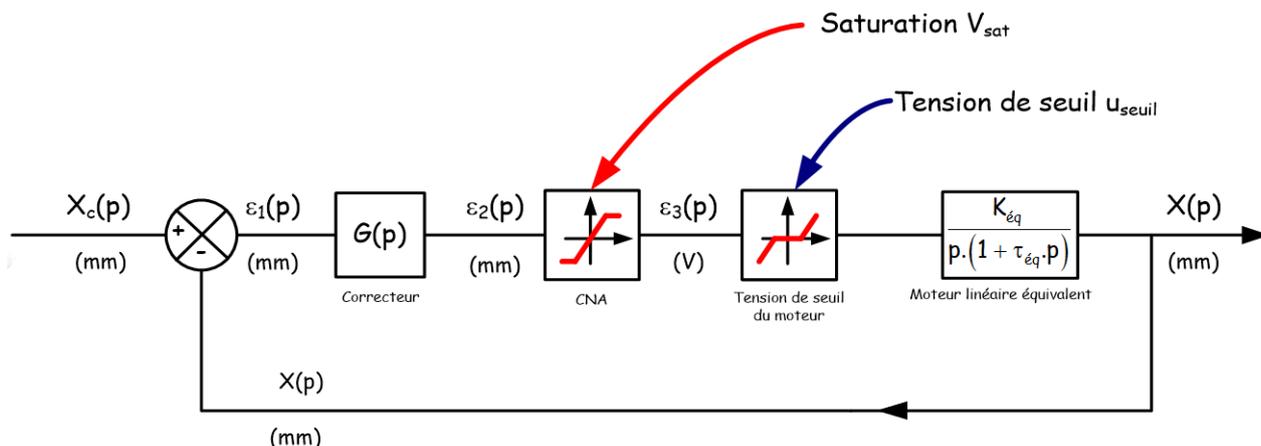
3^{ème} partie : modèles linéaires et non linéaires

Les conclusions précédentes nous orientent vers une modélisation non linéaire pour certains composants.

Linéaire signifie proportionnel.

On constate typiquement que la vitesse en régime permanent est proportionnelle à la tension $\varepsilon_2(t)$ jusqu'à ce que celle-ci atteigne 10v environ. Le coefficient de proportionnalité est $K_{\acute{e}q}$. Ensuite la vitesse du moteur sature. Il n'y a plus proportionnalité. La vitesse sature à 1140 mm/s quelle que soit la tension de commande $\varepsilon_2(t)$. C'est une saturation programmée pour protéger le moteur.

D'autres phénomènes de non linéarité (seuil de tension mesuré à la question 2 pour contrer les frottements par exemple) nous amène à un modèle non linéaire proche du comportement réel des constituants et sous-ensembles.



La tension de seuil explique en particulier qu'un écart $\epsilon_1(t)$ (mm) non nul génère une tension moteur $\epsilon_3(t)$ (Volts) non nulle mais qui peut ne pas suffire à entraîner le moteur.

Si on se place dans le cadre d'une correction proportionnelle de gain $G(p) = G$ avec une entrée indicielle d'amplitude x_c , ce modèle permet d'expliquer en particulier que la tension de seuil u_{seuil} est susceptible de

générer des écarts de position maxi $\epsilon_{1 \text{ statique max}} = \frac{u_{seuil}}{G}$.

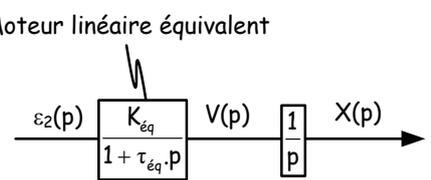
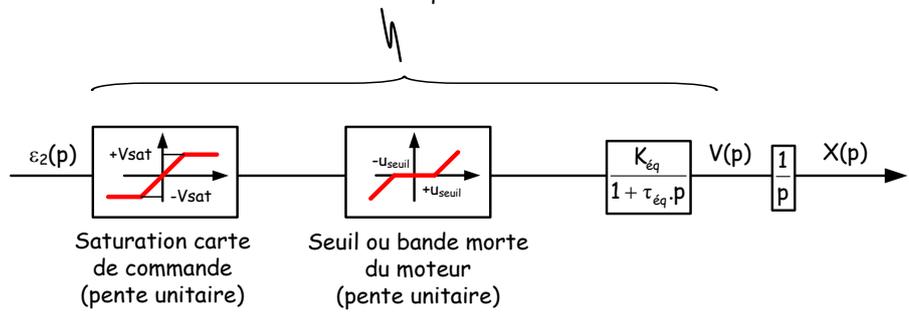
En effet, lorsque le régime permanent est atteint, c'est-à-dire lorsque le moteur ne tourne plus, on a $\epsilon_2(t) = \epsilon_3(t)$

$\in [-u_{seuil}, u_{seuil}]$ donc $\epsilon_1(t) \in \left[-\frac{u_{seuil}}{G}, \frac{u_{seuil}}{G} \right]$: l'écart statique est directement relié à la tension de seuil qui elle-

même prend son origine dans les divers frottements secs présents dans le mécanisme.

Plus le gain G est grand, plus les perturbations sont rejetées et plus l'écart $\epsilon_{1 \text{ statique}}$ est faible.

Synthèse sur 2 modèles en boucle ouverte mis en évidence :

<p>Modèle linéaire (seuil et saturation non pris en compte)</p>	<p>Moteur linéaire équivalent</p> 	<p>$K_{\epsilon q} = 157$ (mm/s)/V $\tau_{\epsilon q} = 25$ ms</p>
<p>Modèle non linéaire (avec seuil et saturation)</p>	<p>Moteur linéaire équivalent</p> 	<p>$K_{\epsilon q} = 132$ (mm/s)/V $\tau_{\epsilon q} = 22$ ms $U_s = 1.5$ V $V_{sat} = 10$ V</p>

Dans les deux modèles proposés on utilise une constante de temps équivalente notée τ_{eq} . Elle est directement liée à l'inertie équivalente ramenée à l'axe moteur.

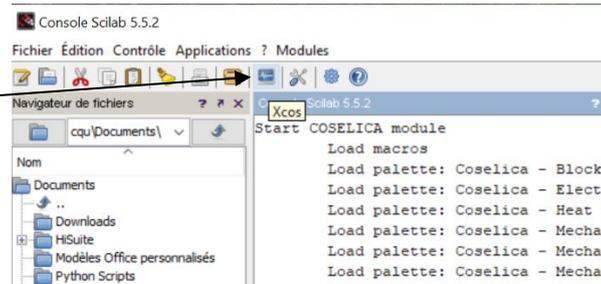
Précisions sur l'inertie équivalente : Dans le cas d'un solide en translation (de masse m à une vitesse V), l'énergie cinétique s'écrit : $Ec = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$. Dans le cas d'un solide en rotation autour d'un axe fixe (de moment d'inertie autour de l'axe I et à une vitesse Ω), l'énergie cinétique s'écrit : $Ec = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \Omega^2$. Le moment d'inertie représente la difficulté de mettre en rotation ou de freiner cette rotation.

L'énergie cinétique d'un ensemble de solides est la somme des énergies cinétiques de chacun des solides.

Question 18. En écrivant l'énergie cinétique de l'ensemble en mouvement sous la forme $E_{C_{total}} = \frac{1}{2} \cdot I_{eq} \cdot \Omega_{moteur}^2$, donner l'expression de l'inertie équivalente ramenée à l'axe moteur I_{eq} , en fonction de J_{mot} (inertie moteur), R (rayon poulie), i (rapport réduction réducteur), J_r (inertie réducteur) et m (masse du chariot). Faire les applications numériques et conclure sur les écarts entre les valeurs des constantes de temps des modèles établis partie 2 et partie 3.

Simulation des modèles

- Lancer le logiciel Scilab. Sur la console principale, sélectionner le module Xcos
- Ouvrir les fichiers : *modele lin correction P.zcos* et *modele nonlin correction PI.zcos*
- Vérifier le paramétrage de ces modèles (voir ci-dessous) pour qu'ils soient conformes à l'étude menée puis **Démarrer** la simulation. **Conclure**.



modèle linéaire avec correction Proportionnelle

The screenshot shows the Xcos simulation environment. The main window displays a block diagram for a 'moteur linéaire équivalent' (equivalent linear motor). The diagram includes a 'consigne déplacement' (displacement command) block, a summing junction, a gain block 'G', a transfer function block $\frac{k}{1 + t_o * s}$, an integrator block, and a 'visualisations' (visualizations) block. A 'Time 0.5 s' block is also present, labeled as 'paramètres étude temporelle' (temporal study parameters). A 'Param. variation' block is labeled as 'réglage paramètres variables' (variable parameter adjustment). Three configuration windows are shown: 'Modifier le contexte' (Modify context) with parameters k=157, t_o=0.025, G=1; 'Demande de plusieurs valeurs Scilab' (Request several Scilab values) for 'Paramètres de l'étude temporelle' (Temporal study parameters) with values: 500 points, 0.5 duration, 1 grid, 5 response time, 0 rise time, 1 first overshoot; and 'Demande de plusieurs valeurs Scilab' for 'Analyse paramétrique' (Parametric analysis) with parameters G, 0.1, and empty fields for the 2nd and 3rd parameters.

modèle non linéaire avec correction Proportionnelle et Intégrale

