



AMELIORER LES PERFORMANCES D'UN AXE ASSERVI

PROBLEMATIQUE

Comment optimiser les performances de positionnement d'un système asservi ?

On cherche à mettre en place une démarche permettant d'optimiser les performances de positionnement de l'axe tout en minimisant les délais de mise au point et de validation du cahier des charges. Comme on va le voir dans ce TP, cet objectif passe nécessairement par une démarche de modélisation.

Ce premier TP permet de mettre en place un modèle de boucle ouverte (Modèle de connaissance et modèle de comportement) : étape nécessaire pour effectuer la synthèse d'un correcteur.

Un second TP permettra d'exploiter ce modèle de boucle ouverte pour caler un correcteur permettant de satisfaire au mieux les exigences du cahier des charges.

DEROULEMENT DES SEANCES

Séance 1 : La quasi-totalité des activités doit être menée

Séance 2 :

- 30 minutes sont consacrées à la finalisation de la présentation
- 1h30 sont consacrées aux présentations

Pour mener à bien le projet, il est indispensable de se répartir le travail. Chacun des étudiants aura donc un travail spécifique. Voici le code couleur utilisé pour la répartition des tâches :

TOUTE L'EQUIPE

ANALYSTES MODELISATEURS

ANALYSTES EXPERIMENTATEURS

Le chef de groupe, non représenté par une couleur, devra gérer l'avancement des tâches, superviser et faciliter l'échange entre les modélisateurs et les expérimentateurs et devra réaliser le diaporama.

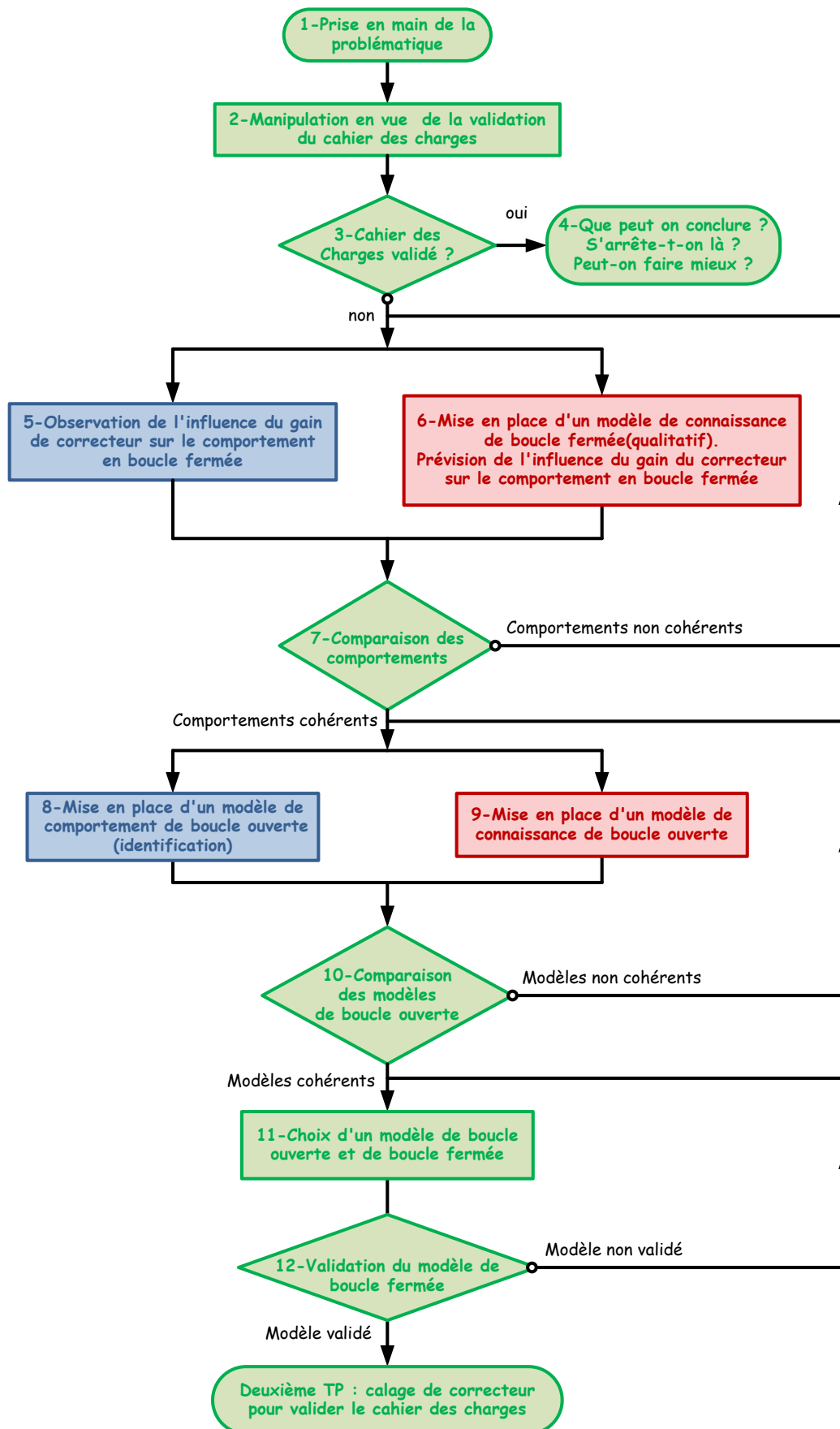
Pour la présentation, chaque groupe dispose de 10 à 12 minutes de présentation puis 10 minutes de questions et remarques. Le temps de parole doit être réparti. Chacune des présentations sera réalisée en utilisant PowerPoint ou Open Office.

Dans le questionnaire qui suit, un certain nombre de réponses sont attendues de façon implicite, elles servent de guide pour mener à bien la démarche entreprise et n'appellent pas forcément une réponse écrite. D'autres questions devront faire l'objet d'une réponse au moment de la présentation.

En fin de sujet une fiche de formalisation est à remplir par chacun des étudiants.



SCENARIO DU TP





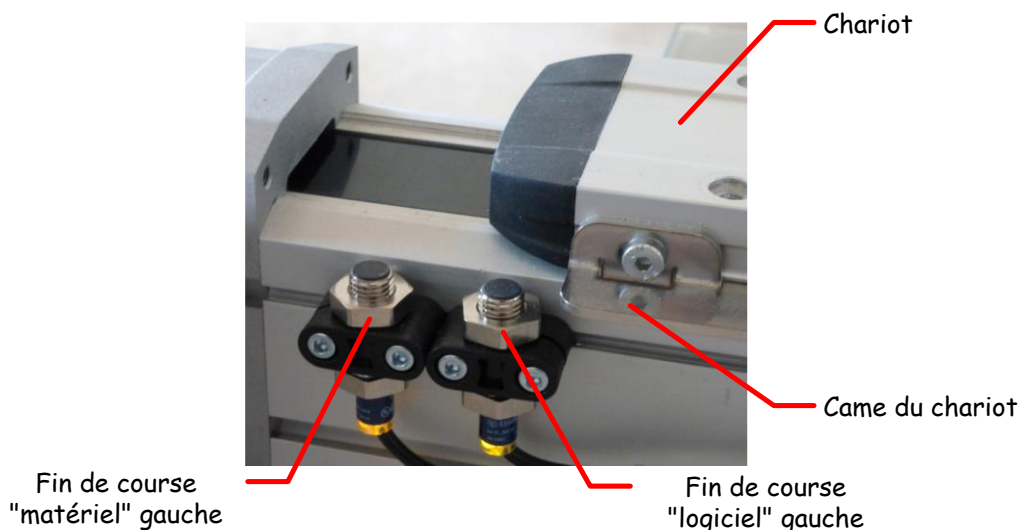
TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

Prise en main matérielle de Control'X

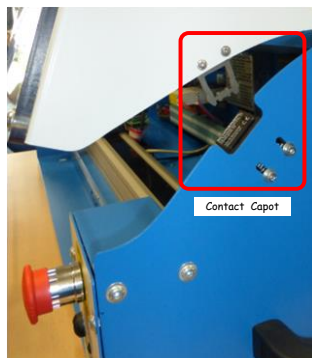
- Mettre sous tension Control'X : pour cela, basculer l'interrupteur situé au dos du carter sur la position 1 :



- 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 :





TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

- 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.

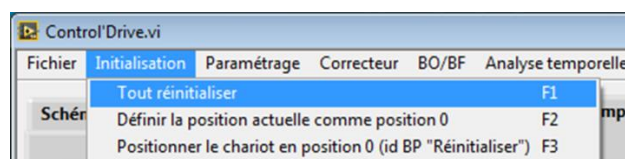


- Lancer maintenant le logiciel Control'Drive :

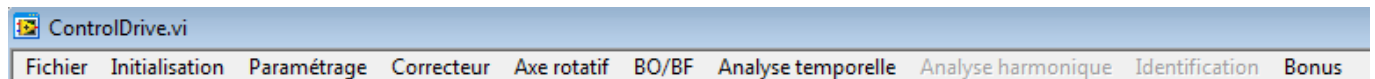


Sauf s'il ne l'est déjà, le chariot de Control'X doit s'initialiser à gauche sur le capteur de fin de course "logiciel".

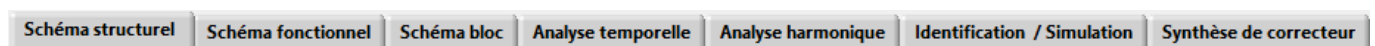
Si Control'Drive a été lancé avant d'armer Control'X, effectuer une réinitialisation en utilisant la fonction "Tout réinitialiser" du menu "Initialisation" :



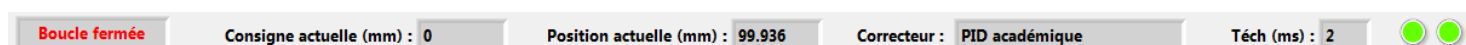
Dans ce qui suit le menu désigne le bandeau supérieur :



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 :

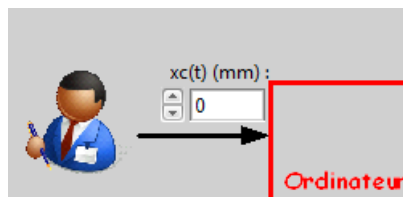




TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

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") puis 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.

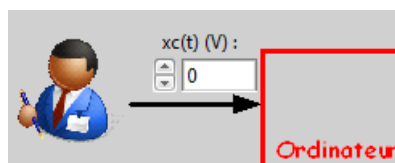


A travers la rainure dans la partie supérieure du carter en plexiglas, exercer des perturbations à la main sur le chariot. Observer le comportement du système.

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.

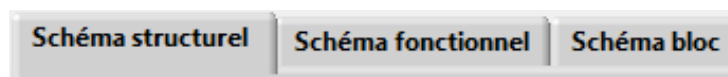
A tout instant on peut repositionner le chariot à son origine en appuyant sur le bouton "Réinitialiser" du pupitre ou en cliquant sur "Positionner le chariot en position 0" du menu "Initialisation".

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



Observer et commenter le comportement observé.

De la même façon, explorer les onglets "Schéma fonctionnel" et "Schéma bloc" :





TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

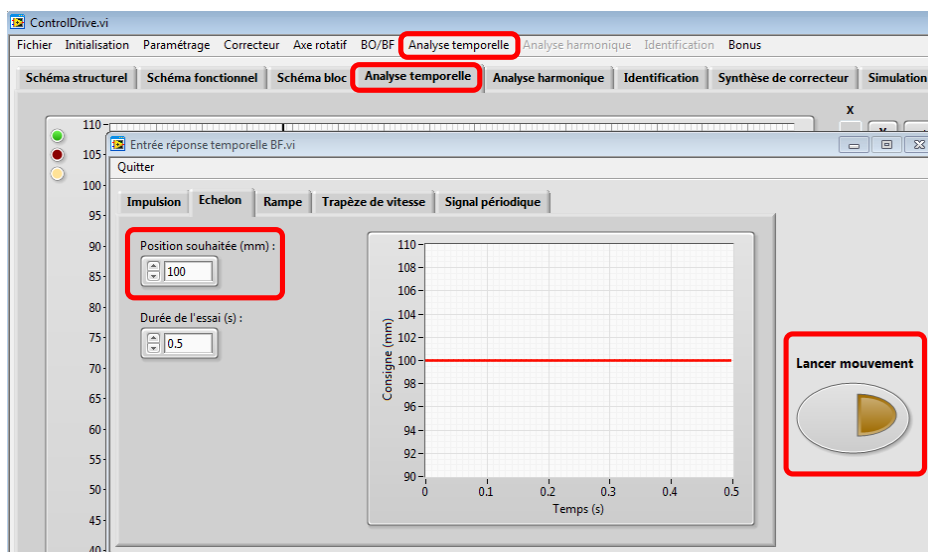
Validation du cahier des charges

On impose le cahier des charges ci-dessous :

Exigence	Critères		Niveaux
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" :

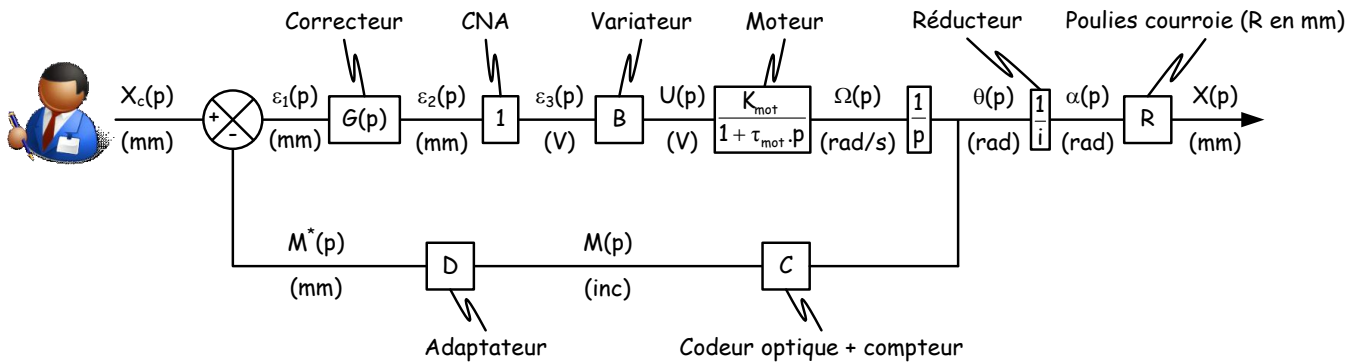


En observant la réponse indicielle, constater que les critères du cahier des charges ne sont pas tous respectés.

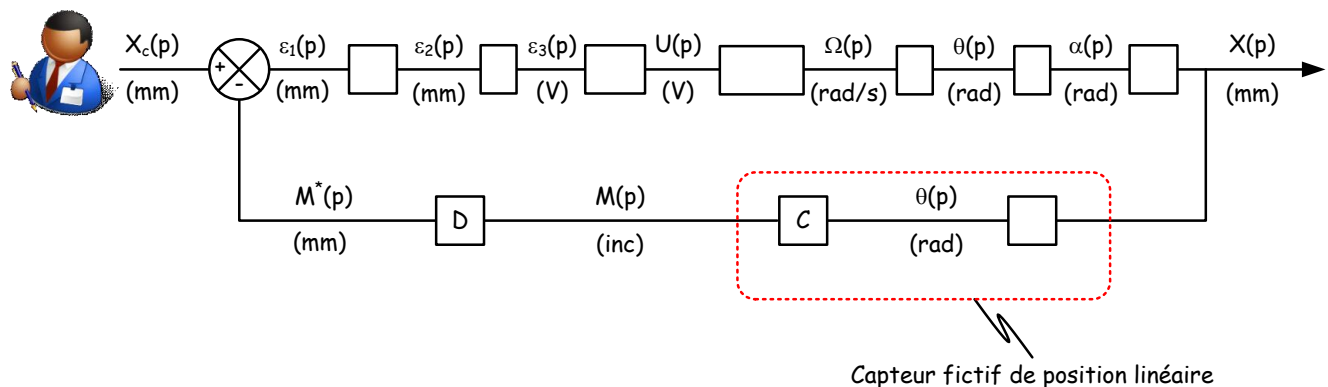
On va maintenant chercher à prévoir le comportement de l'asservissement et notamment l'influence du correcteur sur ses performances. La finalité étant de concevoir un correcteur permettant de satisfaire tous les critères du cahier des charges.

ANALYSTES MODELISATEURS : modèle de connaissance de boucle fermée (qualitatif)

On travaille sur le schéma bloc ci-dessous :

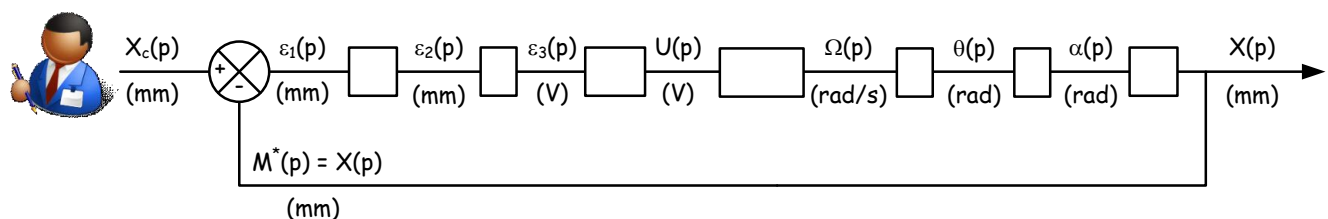


Modifier le schéma bloc pour lui donner l'allure ci-dessous pour bien mettre en évidence qu'asservir la position angulaire $\theta(t)$ revient à asservir la position linéaire $x(t)$.



Quel est le gain du capteur fictif de position linéaire en incréments/mm ?

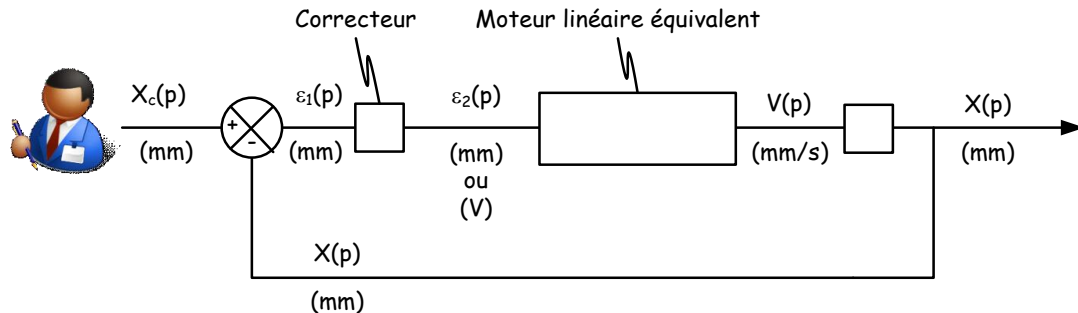
Quel gain D (en mm/incrément) donner à l'adaptateur pour que le retour soit unitaire c'est-à-dire pour que $m^*(t) = x(t)$?





ANALYSTES MODELISATEURS : modèle de connaissance de boucle fermée (qualitatif)

Donner 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 :



On considère pour commencer un correcteur proportionnel $G(p) = G$. Calculer analytiquement la fonction de transfert en boucle ouverte ainsi corrigée : $H_{bo}(p)$. Préciser sa classe et son gain de boucle. On pourra la mettre sous la forme $H_{bo}(p) = \frac{G.K_{eq}}{p.(1 + \tau_{eq}.p)}$ où l'on précisera les expressions de

K_{eq} et τ_{eq} .

On trouve alors une fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{bf}(p) = \frac{X(p)}{X_c(p)} = \frac{K_{bf}}{1 + \frac{2.\zeta_{bf}}{\omega_{nbf}}.p + \frac{p^2}{\omega_{nbf}^2}}$$

où

$$\begin{cases} K_{bf} = 1 \\ \zeta_{bf} = \frac{1}{2.\sqrt{G.K_{eq}.\tau_{mot}}} \\ \omega_{nbf} = \sqrt{\frac{G.K_{eq}}{\tau_{mot}}} \end{cases}$$

D'après le modèle mis en place, analyser **qualitativement** l'influence du gain G sur les performances de l'asservissement en termes de :

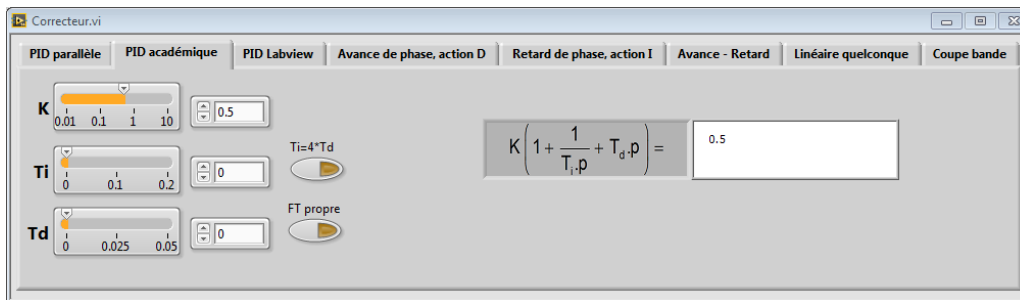
- Amortissement
- Rapidité
- Précision vis-à-vis d'une entrée en échelon



ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : influence du gain de correcteur

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.

Quels est l'influence qualitative du gain du correcteur sur les performances en termes de :

- Amortissement
- Rapidité
- Précision

TOUTE L'EQUIPE : mise en commun des observations

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

Pourquoi, le système étant en théorie précis vis-à-vis d'une consigne en échelon (Classe = 1), il ne l'est pas en pratique ?

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

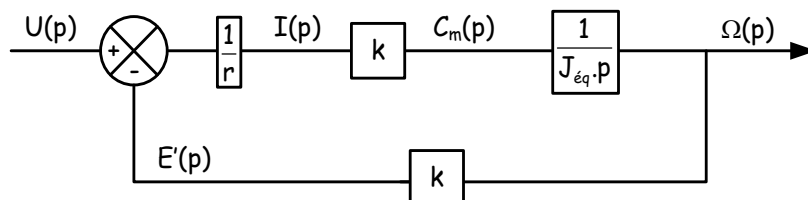
Pourquoi, le système étant en théorie précis vis-à-vis d'une consigne en échelon (Classe = 1), il ne l'est pas en pratique ?

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



ANALYSTES MODELISATEURS : mise en place d'un modèle de connaissance de BO

Exploiter le dossier technique pour renseigner les valeurs des paramètres du modèle mis en place.
On pourra partir sur un modèle du moteur seul du type :



Où :

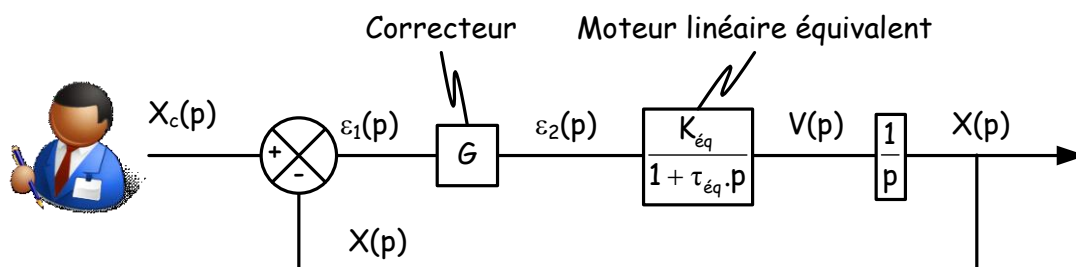
r : résistance de l'induit

k : constante de couple ou de force contre électromotrice

J_{eq} : moment d'inertie ramené sur l'arbre moteur

ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : mise en place d'un modèle de comportement de BO

On cherche dans cette partie à mettre en place un modèle de comportement de boucle fermée.

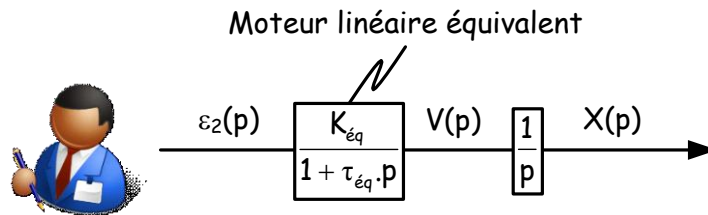


Ce modèle de comportement se résume à priori à la connaissance des deux paramètres K_{eq} et τ_{eq} .

Pour déterminer ces deux paramètres (K_{eq} et τ_{eq}), on va procéder à une identification sur la base de la réponse indicielle en boucle ouverte du moteur linéaire équivalent.



ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : mise en place d'un modèle de comportement de BO



On se place en boucle ouverte (Menu "BO/BF"). Après avoir réinitialisé le système (Menu "Initialisation", "Tout réinitialisation") lancer un échelon $\varepsilon_2(t)$ de 10 V d'amplitude (Menu "Analyse temporelle", "Définir entrée").

Utiliser ensuite l'onglet "Identification / Simulation", "Temporelle linéaire" pour mettre en place un modèle de comportement du moteur linéaire équivalent. L'essai temporel en mémoire (à priori le dernier essai effectué) est rapatrié dans cet onglet.

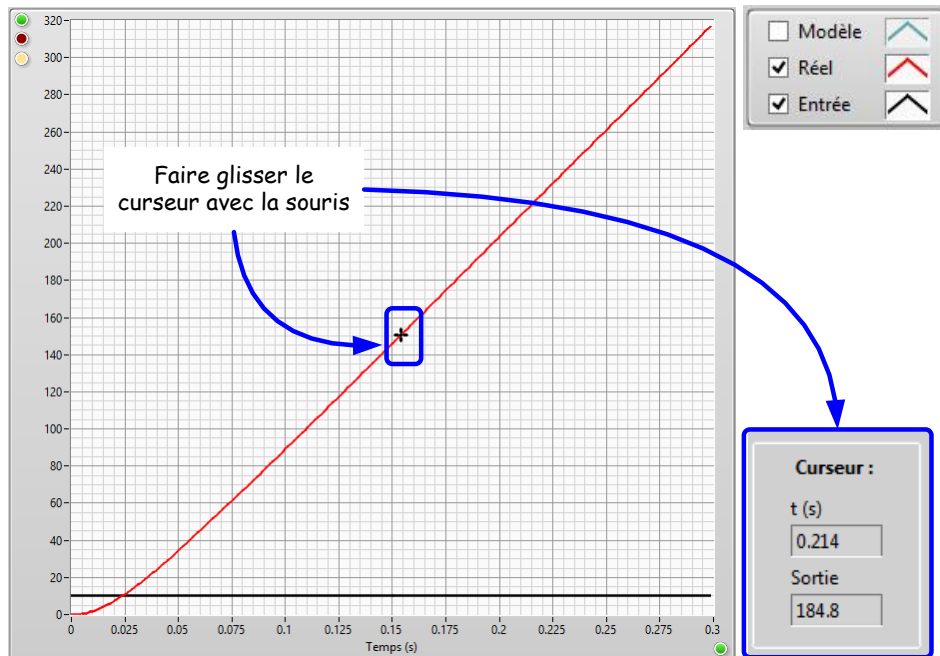
Vérifier que l'amplitude de l'échelon vaut bien 10 V dans le champ de définition de l'entrée :

Choisir une identification sur la base de la position ou de la vitesse de l'axe :

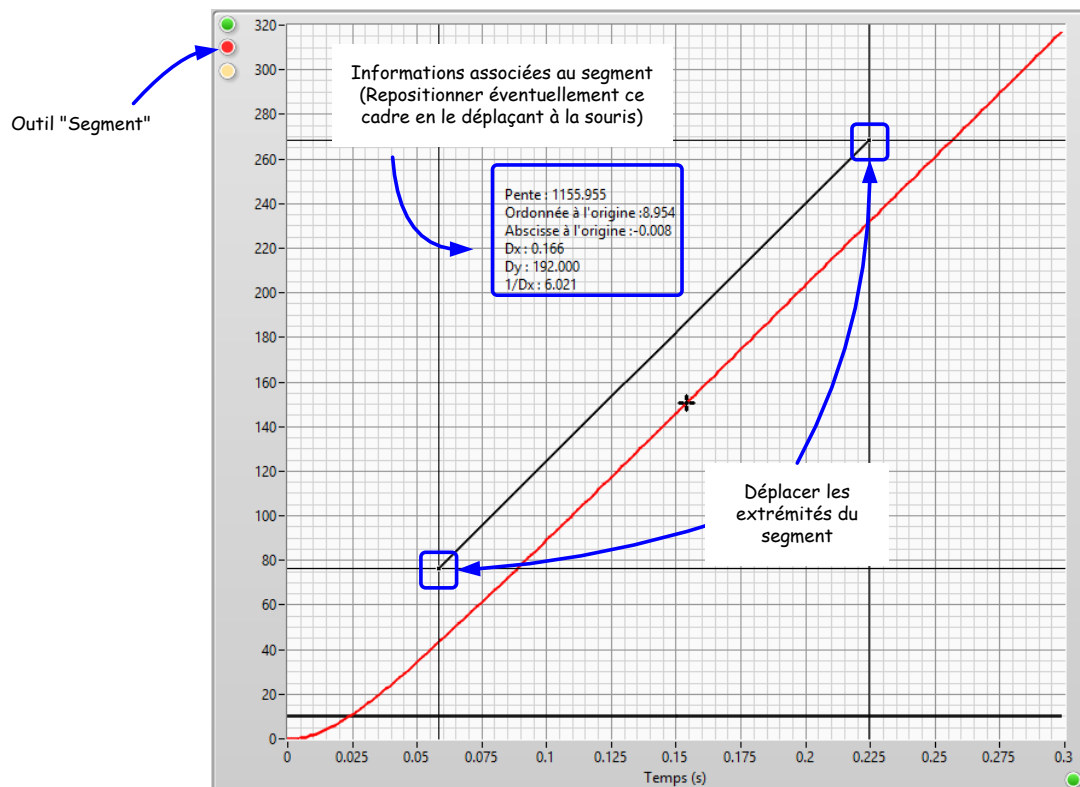
On peut pour l'identification utiliser trois types d'outils :

ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : mise en place d'un modèle de comportement de BO

1) Le curseur associé au graphe



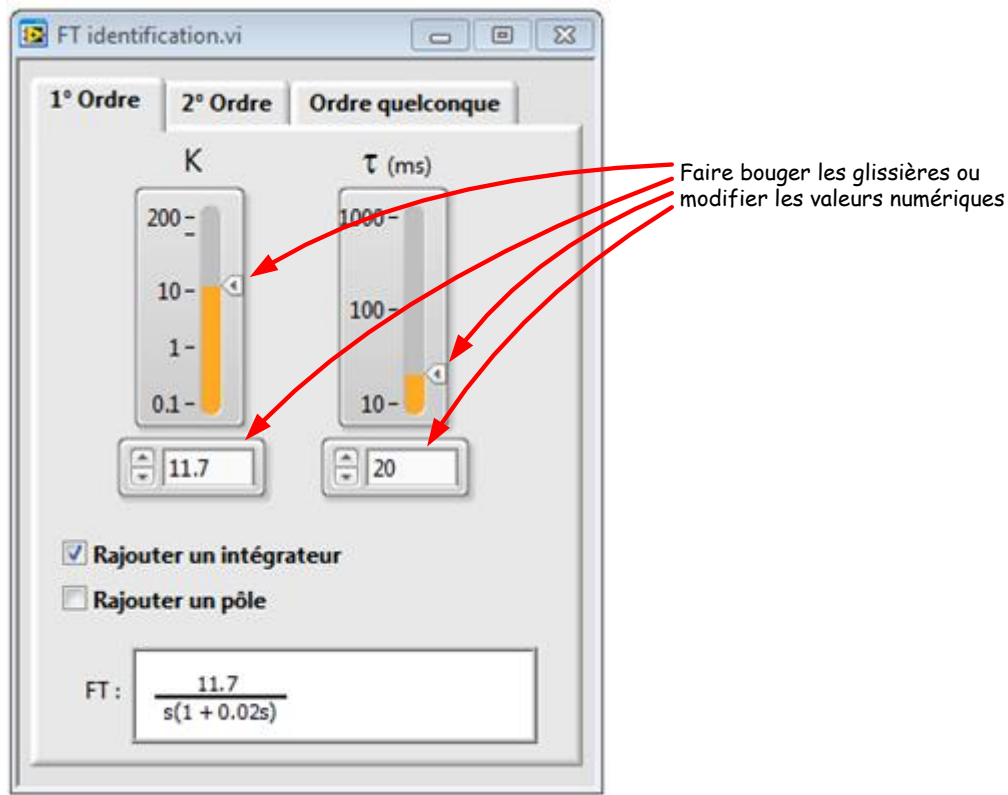
2) Le segment associé au graphe



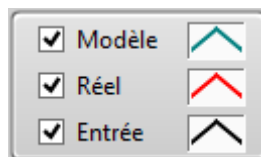


ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : mise en place d'un modèle de comportement de BO

3) La palette de modèle "FT identification"



Il faut pour cela que le modèle correspondant soit visible :



Quel type de modèle semble pouvoir refléter le comportement de boucle ouverte observé ?

Relever la valeur finale atteinte V_{∞} et la constante de temps du système τ_{eq} (éventuellement du seul mode dominant retenu).

On a réalisé le même type d'essai avec les tensions $\varepsilon_2(t)$ indiquées dans le tableau ci-dessous :

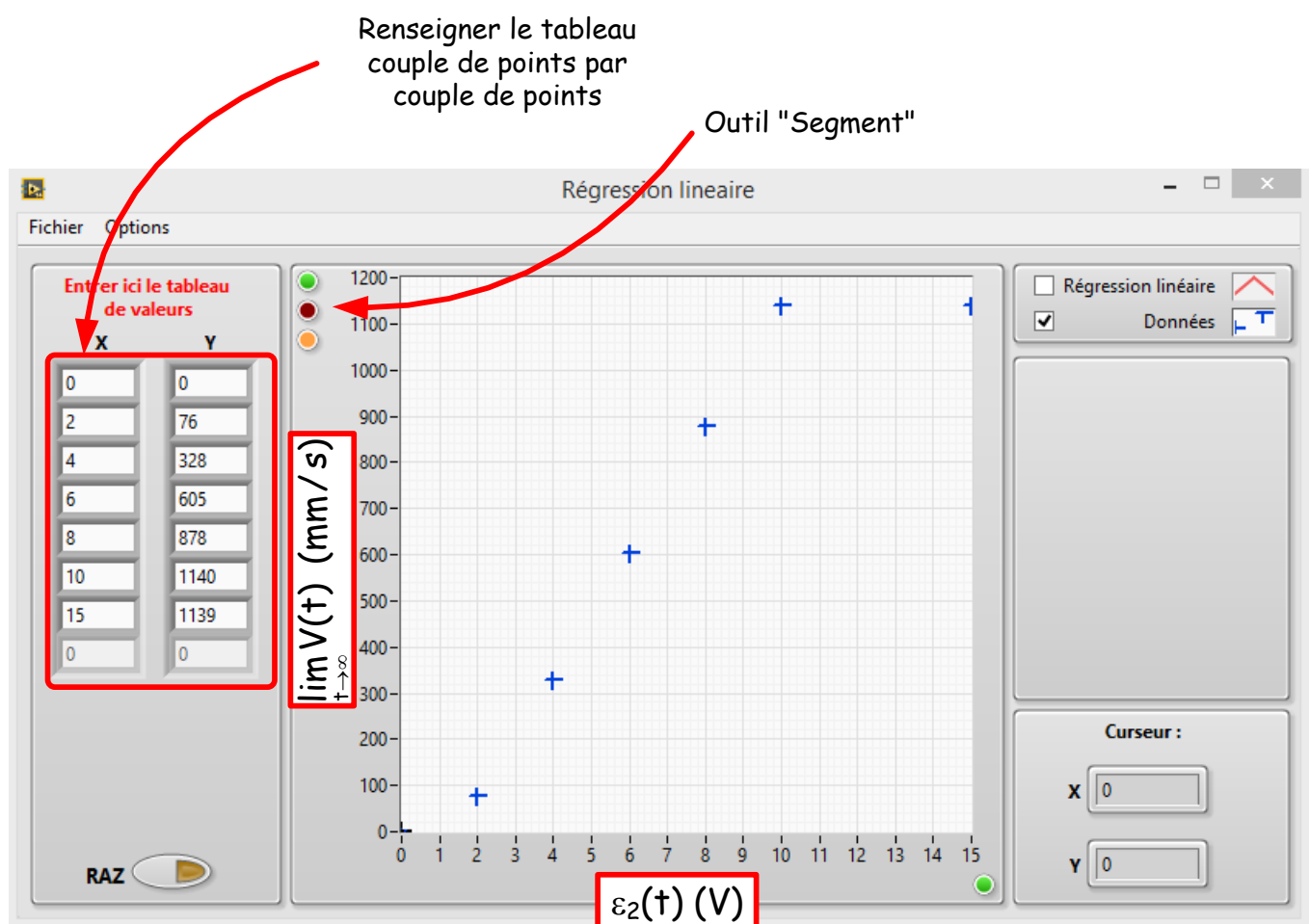


ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : mise en place d'un modèle de comportement de BO

Tension $\varepsilon_2(t)$ appliquée (V)	Vitesse finale atteinte $V_\infty(t)$ (mm/s)	τ_{eq} (ms)
0	0	xx
2	76	xx
4	328	20
6	605	19
8	878	21
10	1140	22
15	1139	22

Dépouiller les résultats de ce tableau et tracer notamment la courbe donnant la vitesse finale atteinte V_∞ (en mm/s) en fonction de la tension appliquée $\varepsilon_2(t)$ (en Volts) : $V_\infty = V_\infty(\varepsilon_2)$.

On peut utiliser pour ceci le menu "Bonus", "Outil de régression linéaire".



Que retenir pour les paramètres K_{eq} et τ_{eq} ?



ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : mise en place d'un modèle de comportement de BO

On pourra introduire la tension de seuil u_{seuil} que l'on calculera

On pourra introduire la tension de saturation V_{sat} que l'on calculera

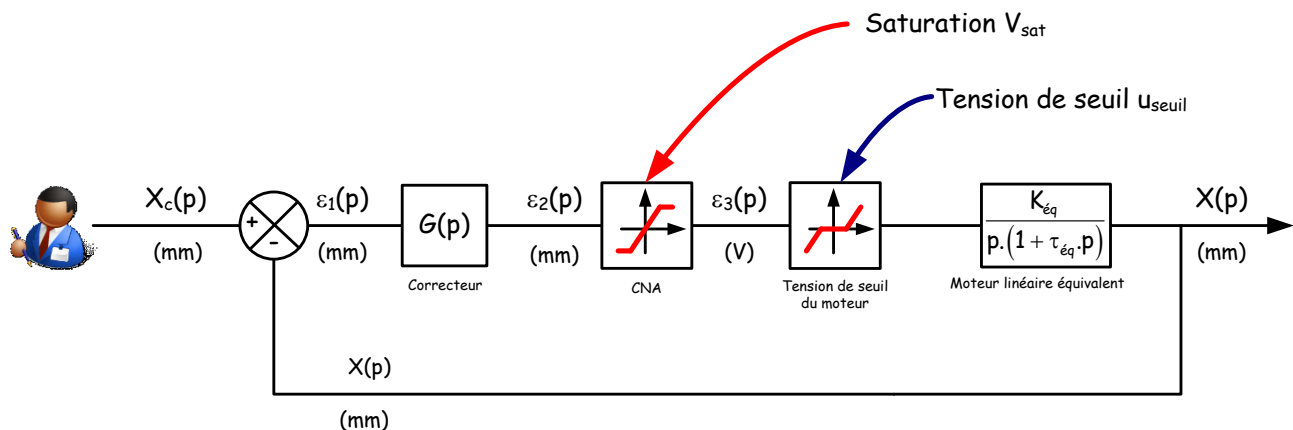
Quelle peut être l'origine physique de cette tension de seuil ? Peut-elle être considérée comme une perturbation ?

Quelle peut être l'origine physique de cette saturation ?

TOUTE L'EQUIPE : comparaison des modèles de boucle ouverte

Comparer les modèles de connaissance et de comportement mis en place. Discuter.

On présente ci-dessous un modèle non linéaire qui reflète très bien le comportement de Control'X :



La tension de seuil explique en particulier qu'un écart $\varepsilon_1(t)$ (mm) non nul génère une tension moteur $\varepsilon_3(t)$ (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 $\varepsilon_{1 \text{ statique max}} = \frac{u_{\text{seuil}}}{G}$.

En effet, lorsque le régime permanent est atteint, c'est-à-dire lorsque le moteur ne tourne plus, on a $\varepsilon_2(t) = \varepsilon_3(t) \in [-u_{\text{seuil}}, u_{\text{seuil}}]$ donc $\varepsilon_1(t) \in \left[-\frac{u_{\text{seuil}}}{G}, \frac{u_{\text{seuil}}}{G} \right]$: 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.

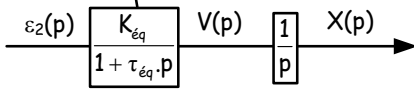
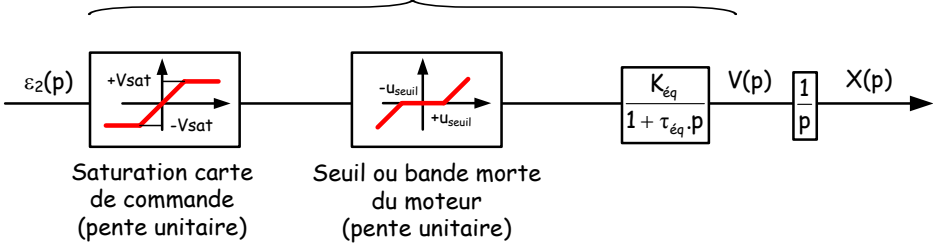
Plus le gain G est grand, plus les perturbations sont rejetées et plus l'écart $\varepsilon_{1 \text{ statique}}$ est faible.



TOUTE L'EQUIPE : comparaison des modèles de boucle ouverte

Le comportement étant manifestement non linéaire, il faut à ce stade faire des choix :

Renseigner dans la colonne de droite les valeurs des paramètres du modèle de boucle ouverte.

Modèle linéaire (seuil et saturation non pris en compte)	<p>Moteur linéaire équivalent</p> 	$K_{éq} =$ $\tau_{éq} =$
Modèle non linéaire (avec seuil et saturation)	<p>Moteur linéaire équivalent</p>  <p>Saturation carte de commande (pente unitaire)</p> <p>Seuil ou bande morte du moteur (pente unitaire)</p>	$K_{éq} =$ $\tau_{éq} =$ $U_{seuil} =$ $V_{sat} =$

Le modèle de boucle ouverte ayant été mis en place, on va maintenant le valider.

Pour cela, on va procéder à différents essais de réponses indicielles en boucle ouverte pour différentes amplitudes d'échelon : à choisir parmi {2V, 5V, 10V, 15V}.

Choisir un pilotage en boucle ouverte (Menu BO/BF) et réinitialiser la position du chariot (bouton rouge "Réinitialiser"). On commence avec $\varepsilon_2(t) = 10 \text{ V}$: Menu analyse temporelle "Définir entrée".

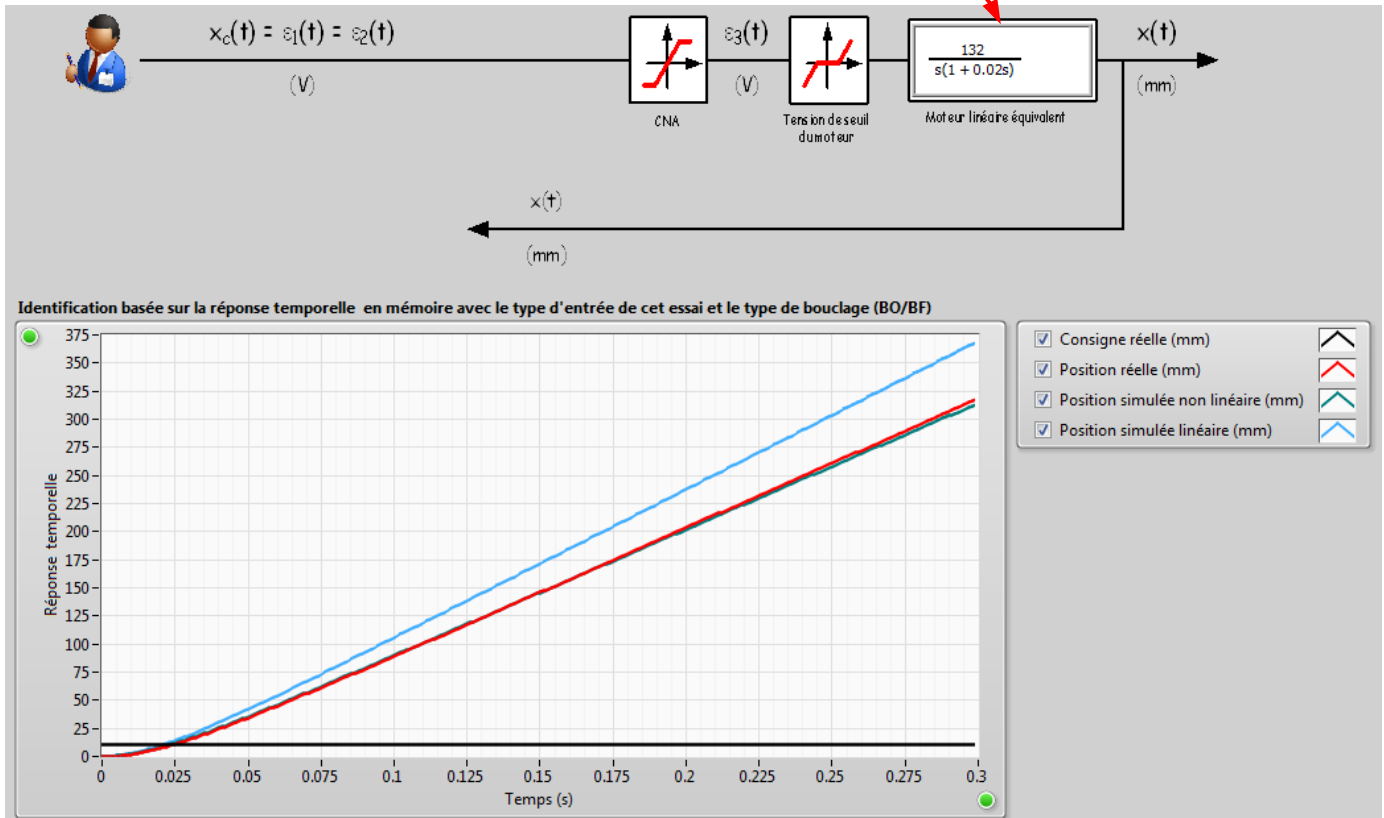
On se place dans l'onglet "Identification / Simulation", "Temporelle non linéaire", "Modèle 1" qui permet de comparer la réponse réelle, la réponse issue du modèle linéaire et celle issue du modèle non linéaire.

On peut dans cet onglet d'identification rajouter les deux non linéarités observées lors de l'identification de la boucle ouverte : tension de seuil U_{seuil} du moteur linéaire équivalent et saturation V_{sat} à $\pm 10 \text{ V}$.



TOUTE L'EQUIPE : comparaison des modèles de boucle ouverte

Cliquer sur les différents blocs pour les renseigner



Valider le modèle **non linéaire** de boucle ouverte pour les différentes amplitudes de tension d'entrée $\varepsilon_2(t)$. Expliquer physiquement les différences observées entre le modèle linéaire et le modèle non linéaire.

Le modèle **non linéaire** de boucle ouverte étant validé, on va l'exploiter pour prévoir le comportement de la boucle fermée qui en découle. On se place dans le cadre d'un correcteur proportionnel de gain $G(p) = G$. On choisira les gains G du correcteur parmi $\{0.5, 1, 5\}$

On va maintenant procéder à différents essais de réponses indicielles en boucle fermée : différentes amplitudes d'échelon et différents gains G .

Choisir un pilotage en boucle fermée (Menu "BO/BF") et réinitialiser la position du chariot (bouton rouge "Réinitialiser").

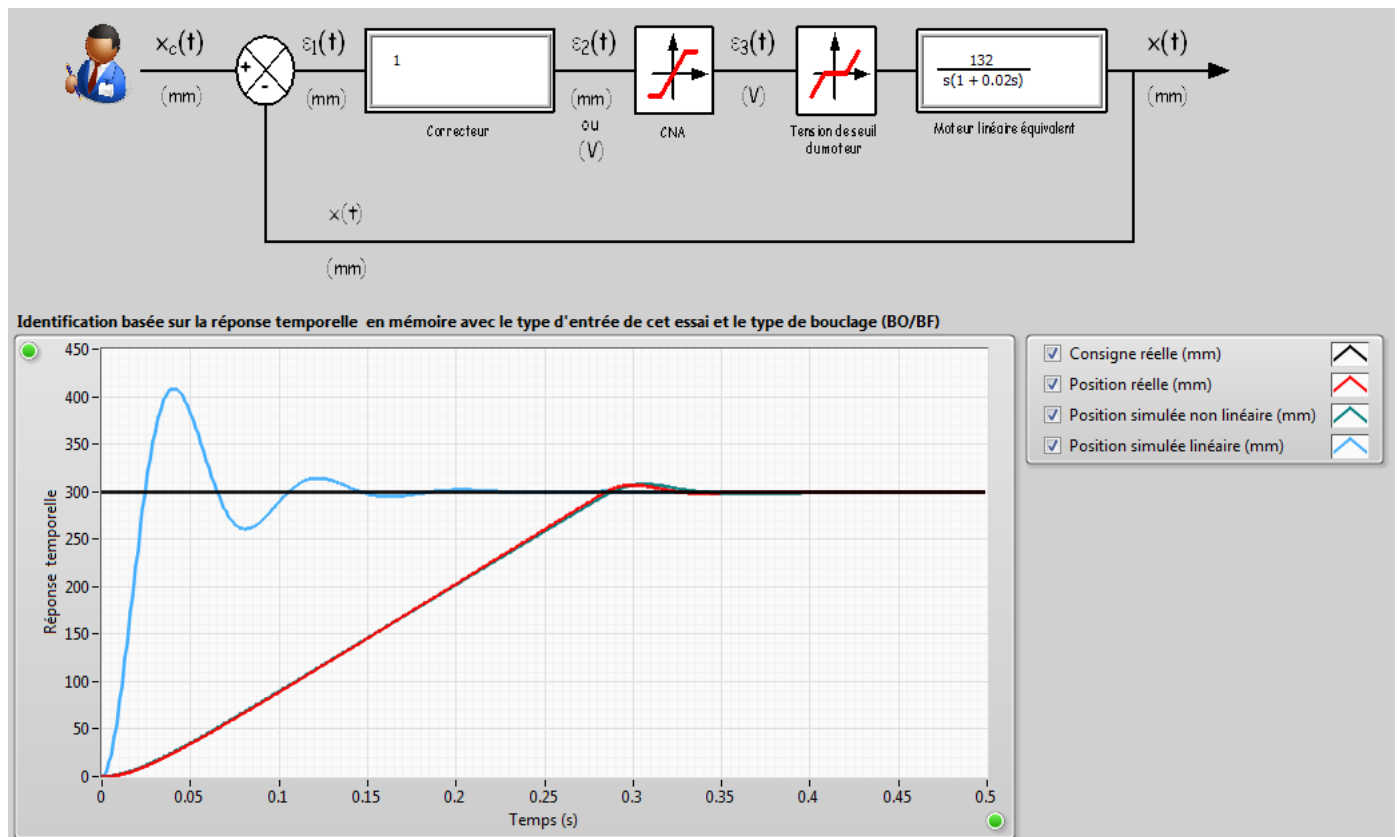
Faire un premier essai avec une amplitude d'échelon de 0 à 300 mm et un gain $G = 1$: menu "Analyse temporelle", "Définir entrée".



TOUTE L'EQUIPE : comparaison des modèles de boucle ouverte

Valider le modèle **non linéaire** de boucle fermée.

Expliquer physiquement les différences observées entre le modèle linéaire et le modèle non linéaire.





FICHE DE FORMALISATION

Savoir-faire	Je saurais refaire sans aide	Je saurais refaire avec de l'aide	Je ne saurais pas refaire
Déterminer les fonctions de transfert à partir d'équations physiques (modèle de connaissance)			
Analyser ou établir le schéma-bloc du système			
Renseigner les paramètres caractéristiques d'un modèle de comportement			

Connaissances	Je saurais refaire sans aide	Je saurais refaire avec de l'aide	Je ne saurais pas refaire
Systèmes linéaires continus et invariants : - modélisation par équations différentielles - calcul symbolique - fonction de transfert ; gain, ordre, classe, pôles et zéros			
Signaux canoniques d'entrée : - échelon			
Schéma-bloc : - fonction de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée			
Modèles de comportement			