

AMELIORER LES PERFORMANCES D'UN AXE ASSERVI

PROBLEMATIQUE

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.

Dans un premier TP on a pu mettre en place un modèle de boucle ouverte avec une variante linéaire et une non linéaire. Cette dernière variante de modèle a été validée et s'est révélée refléter très correctement le comportement du système et ce sous une large variété d'entrées.

Dans ce second TP on cherche à exploiter le modèle mis en place pour caler un correcteur permettant de satisfaire au mieux les exigences du cahier des charges.

Deux autres méthodes de synthèse de correcteur sont utilisées par les expérimentateurs.

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.

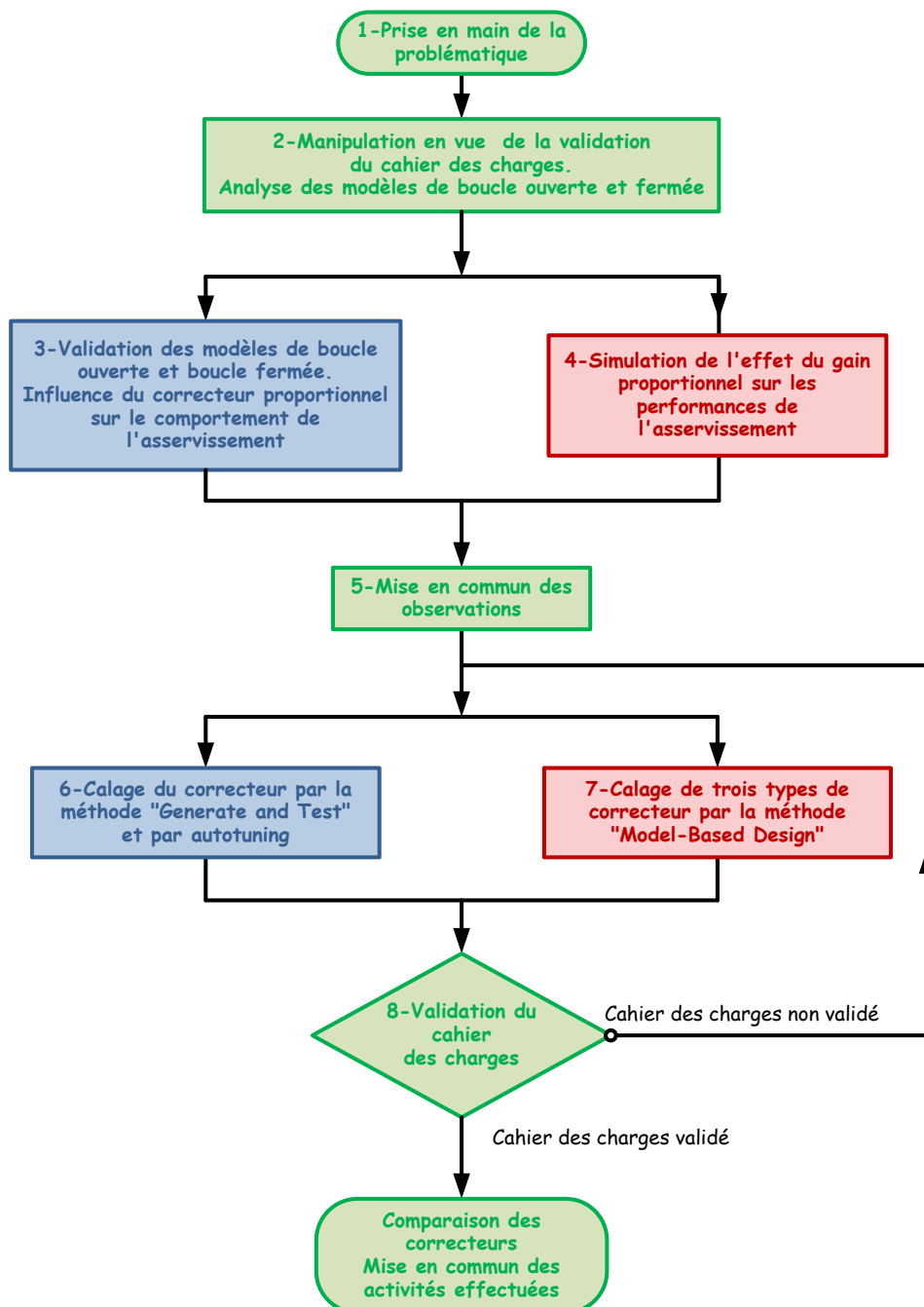
Pour la présentation, chaque groupe dispose de 10 à 12 minutes de présentation puis 10 minutes de questions et remarques. Le temps de parole doit être réparti. Chacune des présentations sera réalisée en utilisant PowerPoint ou Open Office.

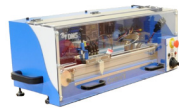
Dans le questionnaire qui suit, un certain nombre de réponses sont attendues de façon implicite, elles servent de guide pour mener à bien la démarche entreprise et n'appellent pas forcément une réponse écrite. D'autres questions devront faire l'objet d'une réponse au moment de la présentation.

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



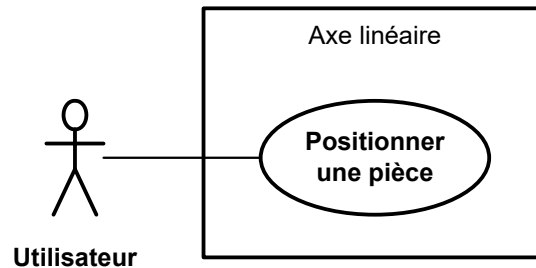
SCENARIO DU TP





TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

On se donne le cahier des charges suivant :

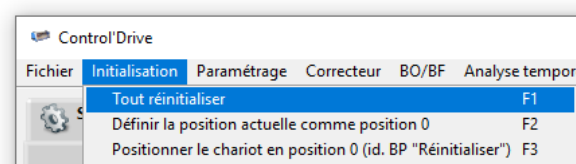


| Exigence | Critères | | Niveaux |
|--|----------|--|----------------------------------|
| Permettre à l'utilisateur de positionner une pièce | C1 | Système asymptotiquement stable | |
| | C2 | Amortissement caractérisé par le premier dépassement. | $D_1 < 25\%$ |
| | C3 | Rapidité caractérisée par 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) | $\varepsilon_S < 0.5 \text{ mm}$ |

Mettre en fonctionnement Control'X : basculer l'interrupteur général au dos de Control'X, fermer le capot en plexiglas, déverrouiller l'arrêt d'urgence et armer le système (bouton vert du pupitre). Toutes les diodes doivent s'allumer.

Sauf s'il ne l'est déjà, le chariot de Control'X doit s'initialiser à gauche.

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

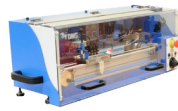


Vérifier que le pilotage se fait en boucle fermée (Menu "BO/BF") et que le gain du correcteur vaut 0.1 (Menu "Correcteur").

On travaille ici dans l'onglet "Analyse temporelle". Générer une consigne en échelon de 100 mm d'amplitude : menu "Analyse temporelle", "Définir entrée".

En observant la réponse indicielle, indiquer si les critères du cahier des charges sont respectés.

On cherche à partir de maintenant à effectuer la synthèse d'un correcteur qui permette de respecter tous les critères du cahier des charges



TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

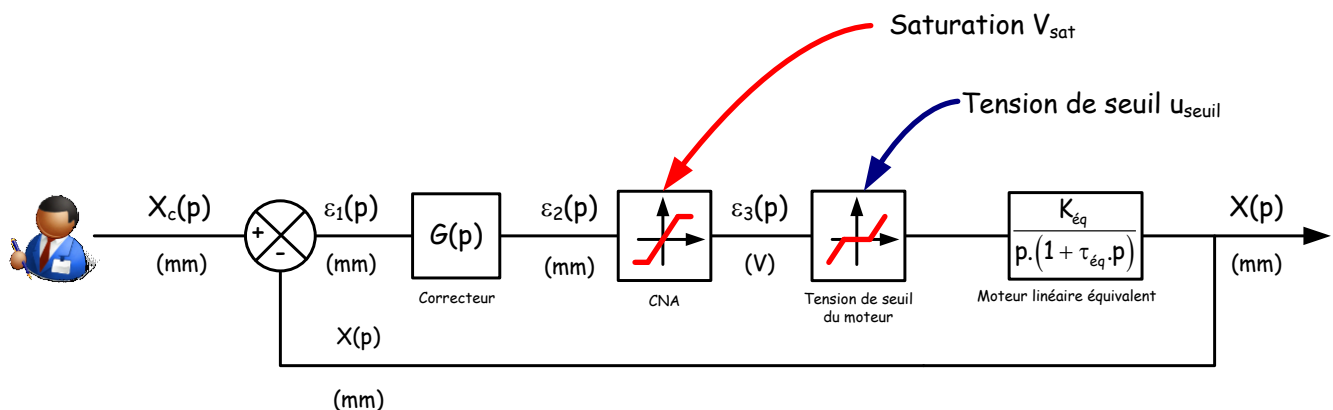
Plusieurs méthodes sont envisageables :

Méthode du type "**Model-Based Design**" : on dispose d'un modèle validé et on l'exploite le plus longtemps possible pour minimiser les délais de conception. Lorsque les résultats de simulation sont satisfaisants, on implémente le correcteur sur le système réel (la cible) et on valide le comportement du système réel en regard du cahier des charges.

Méthode "**Generate and Test**" ou méthode essais-erreurs : permet, sans poser de modèle, de piloter le système réel en agissant sur les différents paramètres du correcteur jusqu'à en trouver un qui valide le cahier des charges.

Méthode "**Autotuning**" : on confie le calage du correcteur à un algorithme automatique de détermination des coefficients d'un correcteur P, PI ou PID.

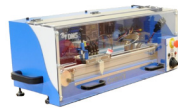
La modélisation de la boucle ouverte qui avait été faite rentre dans le cadre du Model-Based Design. On rappelle ci-dessous les résultats trouvés : il s'agit d'un modèle de comportement.



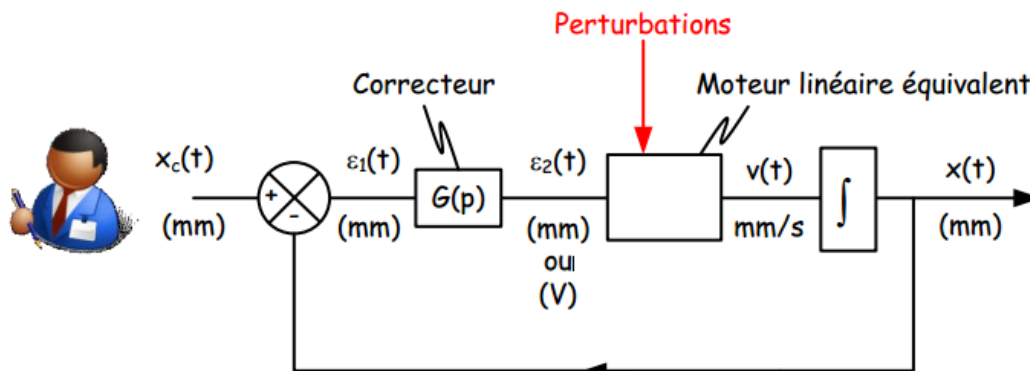
L'origine physique de la saturation V_{sat} provient du convertisseur numérique analogique de la carte de commande.

La tension de seuil u_{seuil} quant à elle est un modèle pratique qui permet de prendre en compte les résistances passives type frottements secs ou résistances au roulement sans les faire intervenir explicitement : ces résistances sont converties en tension.

Un tel modèle est pratique parce qu'il permet de ne pas avoir à faire intervenir les grandeurs d'effort en interne du moteur (comme sur le schéma ci-dessous). Il s'agit d'un modèle très satisfaisant cependant.



TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

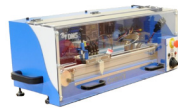


Le but consiste donc à trouver un correcteur de fonction de transfert $G(p)$ permettant de satisfaire les critères du cahier des charges.

On rappelle les valeurs numériques des modèles de boucle ouverte mis en place :

| | |
|--|---|
| Modèle linéaire (seuil et saturation non pris en compte) | <p>Moteur linéaire équivalent</p> <p>$K_{eq} = 132 \text{ (mm/s)/V}$ $\tau_{eq} = 0.02 \text{ s}$</p> |
| Modèle non linéaire (avec seuil et saturation) | <p>Moteur linéaire équivalent</p> <p>$K_{eq} = 132 \text{ (mm/s)/V}$ $\tau_{eq} = 0.02 \text{ s}$ $V_{sat} = 10 \text{ V}$ $U_{seuil} = 1.5 \text{ V}$</p> |

En considérant pour commencer un correcteur proportionnel $G(p) = G$ et un modèle linéaire, on peut prévoir l'influence du correcteur sur les performances de l'asservissement.


TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique
Prévision de l'influence du gain G sur les performances : Analyse basée sur la boucle ouverte

$$H_{bo}(p) = \frac{X(p)}{\varepsilon_1(p)} = \frac{G \cdot K_{\varepsilon q}}{p \cdot (1 + \tau_{\varepsilon q} \cdot p)}$$

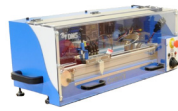
| Performance | Effet d'une augmentation du gain de correcteur G |
|---------------|---|
| Stabilité | Les marges de stabilité sont toujours positives, G n'a pas d'influence sur la stabilité de la BF. |
| Amortissement | La marge de gain est toujours infinie, la marge de phase diminue lorsque le gain G augmente : L'amortissement diminue. |
| Rapidité | La pulsation de coupure à 0 dB de la BO augmente lorsque le gain G augmente : la rapidité augmente (au sens vivacité ou temps de montée). |
| Précision | La classe vaut 1, l'asservissement est précis pour une entrée indicielle. L'écart de poursuite pour une entrée en rampe diminue lorsque le gain G augmente : la précision s'améliore. |

Prévision de l'influence du gain G sur les performances : Analyse basée sur la boucle fermée

$$H_{bf}(p) = \frac{X(p)}{X_c(p)} = \frac{K_{bf}}{1 + \frac{2 \cdot \zeta_{bf}}{\omega_{nbf}} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_{nbf}^2}} \quad \text{où : } \begin{cases} K_{bf} = 1 \\ \zeta_{bf} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{K_{bo} \cdot \tau_{mot}}} \\ \omega_{nbf} = \sqrt{\frac{K_{bo}}{\tau_{mot}}} \end{cases} \quad \text{et } K_{bo} = G \cdot \frac{B \cdot K_{mot} \cdot R}{i}$$

Nota : L'expression de la fonction de transfert en boucle fermée se base forcément sur un modèle de boucle ouverte linéaire.

| Performance | Effet d'une augmentation du gain de correcteur G |
|---------------|---|
| Stabilité | Les pôles de la boucle fermée sont toujours à partie réelle strictement négative (tous les coefficients du dénominateur sont strictement de même signe) : l'asservissement est toujours stable. |
| Amortissement | ζ_{bf} diminue lorsque G augmente : l'amortissement diminue. |
| Rapidité | La pulsation propre non amortie ω_{nbf} augmente lorsque le gain G augmente : La rapidité (au sens vivacité) augmente avec G . |
| Précision | $K_{bf} = 1$: l'asservissement est précis pour des entrées indicelles. (Raisonnement valable car retour est unitaire) |



ANALYSTES MODELISATEURS : simulation de l'effet du gain proportionnel

On utilise ici Control'Drive en mode hors ligne (pas forcément connecté à Control'X). On travaille dans l'onglet "Synthèse correcteur".

Le but de cette partie est de valider par simulation numérique l'influence qualitative du correcteur proportionnel sur les quatre performances du système asservi (stabilité, amortissement, rapidité et précision).

On parcourra pour cela les sous-onglets :

- "Modèle linéaire" pour spécifier le modèle linéaire mis en place
- "Aspect temporel linéaire" pour visualiser les réponses temporelles avec ou sans correction,
- "Aspect fréquentiel linéaire" pour caler le correcteur
- "Aspect temporel non linéaire" pour prévoir le comportement sur la base d'un modèle non linéaire

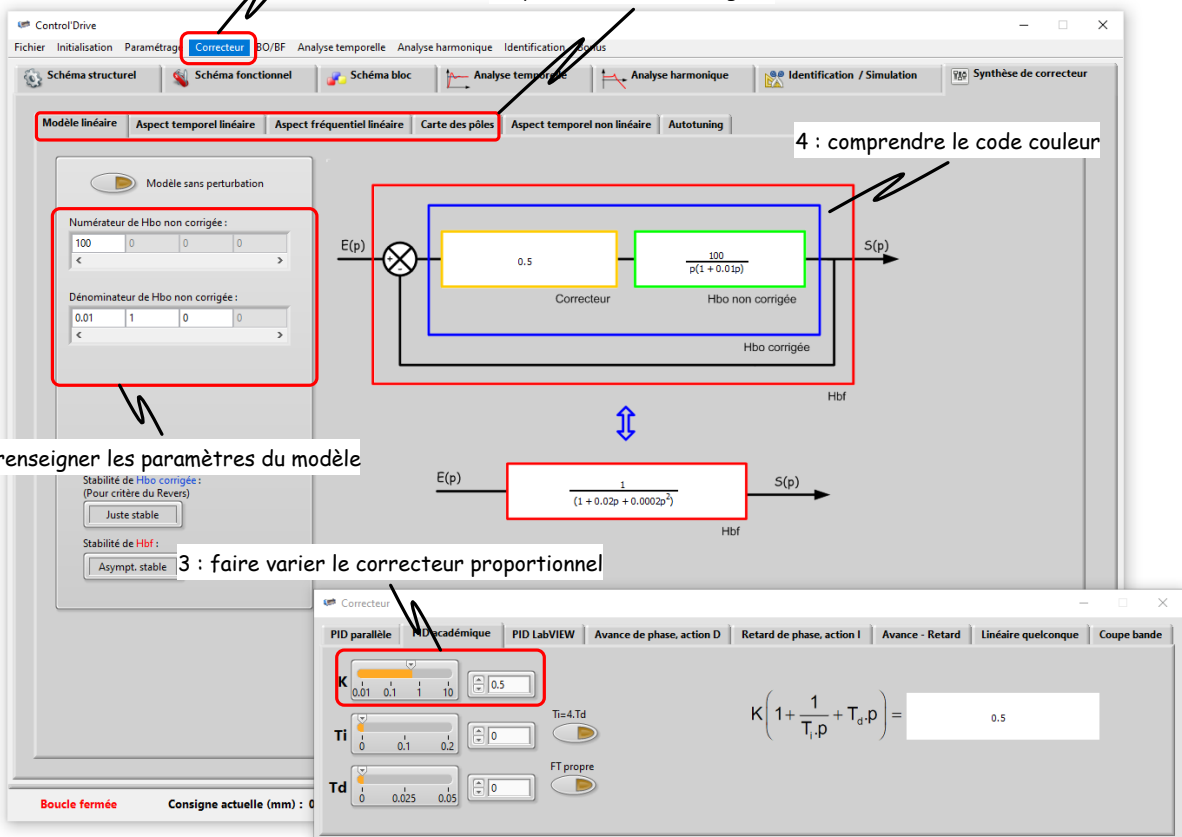
1 : ouvrir la fenêtre de correcteurs

5 : parcourir tous les onglets

4 : comprendre le code couleur

2 : renseigner les paramètres du modèle

3 : faire varier le correcteur proportionnel



Modèle sans perturbation

Numérateur de Hbo non corrigée :

100 0 0

Dénominateur de Hbo non corrigée :

0.01 1 0 0

Stabilité de Hbo corrigée :
(Pour critère du Revers)

Juste stable

Stabilité de Hbf :

Asympt. stable

Stabilité de Hbf :

Asympt. stable

Correcteur

PID parallèle

K 0.01 0.1 1 10 0.5

Ti 0 0.1 0.2 0

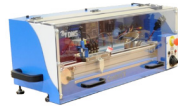
Td 0 0.025 0.05 0

FT propre

Coupe bande

Boucle fermée

Consigne actuelle (mm) : 0

**ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : validation des modèles de boucle ouverte et fermée**

Le but de cette partie est de valider le modèle de boucle ouverte puis le modèle de boucle fermée qui en découle. Il ne s'agit ici que de rappels puisque cela a déjà été effectué dans le TP qui a conduit à mettre en place le modèle de boucle ouverte.

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

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

Renseigner les valeurs numériques des différents blocs du modèle. On peut dans cet onglet 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} .

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

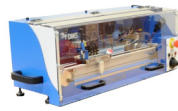
Réitérer éventuellement les opérations précédentes pour $\varepsilon_2(t)$ à choisir parmi {2V, 5V, 10V, 15V}. Les valeurs numériques du modèle ne sont pas censées être modifiées entre chaque essai. Un modèle performant est censé coller au comportement réel quelles que soient les caractéristiques de l'entrée, il doit être intrinsèque au système.

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

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 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").



ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : validation des modèles de boucle ouverte et fermée

Faire un premier essai avec une amplitude d'échelon de 0 à 100 mm et un gain $G = 1$: menu "Analyse temporelle", "Définir entrée".

Réitérer éventuellement les opérations précédentes pour des entrée en échelon d'amplitude à choisir parmi {10, 100, 300mm} et des gains G à choisir parmi {0.5, 1, 5}. On pourrait aussi imposer d'autres types d'entrées que des échelons.

Valider le modèle **non linéaire** de boucle fermée. Expliquer physiquement les différences observées entre le modèle linéaire et le modèle non linéaire.

Travail à faire s'il vous reste du temps :

Le modèle **linéaire** de boucle fermée colle-t-il ? Que se passe-t-il ?

L'allure de la courbe de position réelle est-elle conforme à ce que prévoit le modèle (linéaire) de boucle fermée du second ordre issu du modèle linéaire de boucle ouverte ? Interpréter.

On nomme x_c l'amplitude de l'échelon.

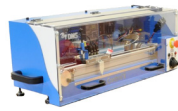
Le modèle linéaire colle-t-il lorsque $G.x_c \leq 10$?

Le modèle linéaire colle-t-il encore même lorsque $G.x_c \gg 10$?

Comment justifier que c'est le modèle non linéaire qui est validé et que c'est pourtant le modèle linéaire qui va être utilisé par l'équipe des modélisateurs pour caler le correcteur.

TOUTE L'EQUIPE : mise en commun des observations

Faire le point sur les comportements observés



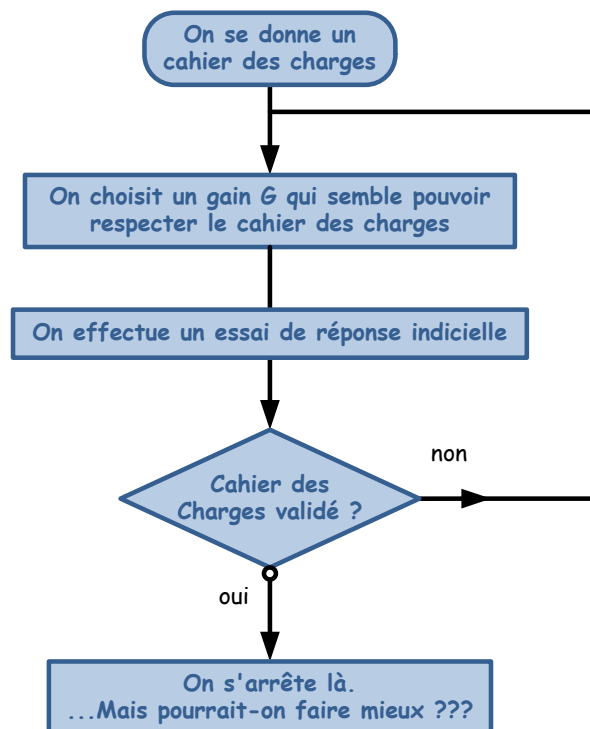
ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : calage du correcteur

On envisage ici les deux méthodes énoncées plus haut pour caler le correcteur. Dans tous les cas, on cherchera à valider les exigences du cahier des charges sur une **réponse indicielle d'amplitude 100 mm**.

Méthode "Generate and Test" et "Autotuning.

1) Méthode "Generate and Test"

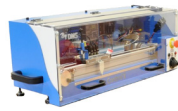
Tenter de caler un correcteur (de type proportionnel uniquement) permettant de satisfaire tous les critères du cahier des charges par cette méthode "essai erreur" :



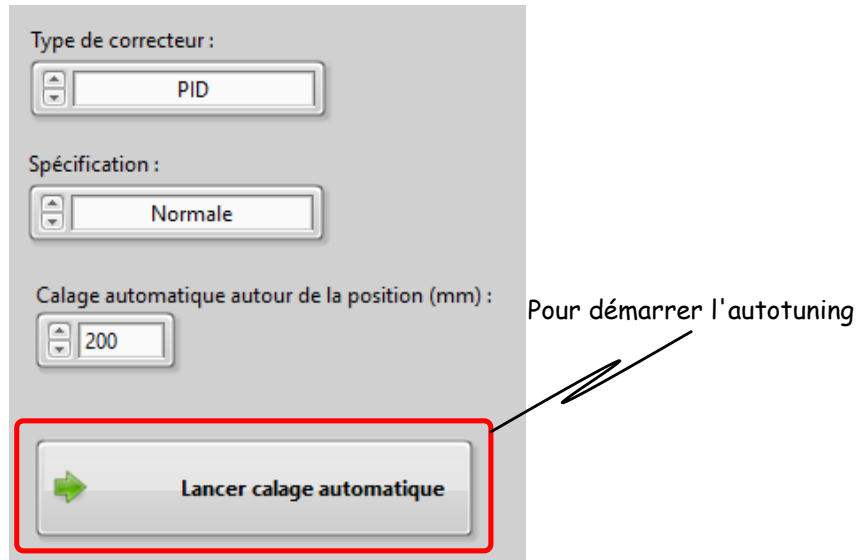
Une fois un correcteur proportionnel jugé satisfaisant, exercer des perturbations à la main sur le chariot, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre et laisser revenir le chariot doucement vers sa position d'équilibre. Le critère C4 (précision) est-il toujours validé ? Analyser finement le rôle de la tension de seuil dans le rejet de perturbation.

Montrer qu'une tension de seuil de valeur u_{seuil} avec un gain proportionnel de valeur G peut être à l'origine d'un écart statique allant jusqu'à $\varepsilon_{1 \text{ statique max}} = \frac{u_{\text{seuil}}}{G}$ en valeur absolue.

Nota : quelle est la place du modèle dans cette démarche ? Est-il complètement absent ? Finit-on par obtenir un correcteur qui optimise les performances ?

**ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : calage du correcteur****2) Méthode "Autotuning"**

Se placer en boucle fermée. Aller dans l'onglet "Synthèse correcteur", sous onglet "Autotuning" et lancer un calage automatique.

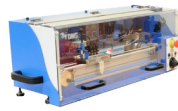


Suivre les instructions des fenêtres qui vont s'ouvrir. Accepter notamment la valeur du bruit de mesure estimé (à une valeur nulle puisque un codeur incrémental présente une excellente immunité au bruit)

Accepter les paramètres du PID obtenu. Retourner dans l'onglet "Schéma bloc par exemple" et lancer des consignes par pas de 50 mm. Observer le type de mouvement obtenu.

Valider le cahier de charges en lançant un essai de réponse indicielle de 100 mm.

Nota : quelle est la place du modèle dans cette démarche ? Est-il complètement absent ? Pourquoi suivre un cours sur les systèmes asservis en S2I alors que cette méthode d'autotuning semble très performante ?



ANALYSTES MODELISATEURS : calage de trois types de correcteur

On cherche à caler un correcteur qui permet de satisfaire les critères C1 à C4 du cahier des charges. Le calage sera effectué par raisonnement sur le **modèle linéaire** (sans tension de seuil, sans saturation) sur la **boucle ouverte et dans le domaine fréquentiel**.

Pour la synthèse de correcteur, les critères C2 et C3 du cahier des charges sont transformés dans le domaine fréquentiel, les critères C1 et C4 demeurent inchangés :

| Exigence | Critères | | Niveaux |
|--|----------|--|---|
| Permettre à l'utilisateur de positionner une pièce | C2 | Amortissement caractérisé par la marge de gain et la marge de phase. | $M_G > 10 \text{ dB}$ $M_\varphi > 45^\circ$ |
| | C3 | Rapidité caractérisée par la pulsation de coupure à 0dB de la boucle ouverte | $\omega_{co-0dB} > 15 \text{ rad/s}$ |

On va caler trois types de correcteurs permettant de satisfaire le cahier des charges :

- 1) Un correcteur à avance de phase
- 2) Un correcteur proportionnel intégral
- 3) Un correcteur à retard de phase

Pour le calage du correcteur, on utilisera l'onglet "Synthèse de correcteur".

On parcourra alors les sous-onglets :

- "Modèle linéaire" pour spécifier le modèle linéaire choisi
- "Aspect temporel linéaire" pour visualiser les réponses temporelles avec ou sans correction,
- "Aspect fréquentiel linéaire" pour caler le correcteur
- "Aspect temporel non linéaire" pour prévoir le comportement sur la base d'un modèle non linéaire (modèle qui reflètera forcément mieux le comportement réel).

Pour la validation du cahier des charges sur le système réel, après un essai de réponse indicielle d'amplitude 100 mm, le cahier des charges sera effectivement déclaré satisfait si les critères temporels C1 à C4 sont respectés.

ANALYSTES MODELISATEURS : calage de trois types de correcteur

1) Calage du correcteur à avance de phase

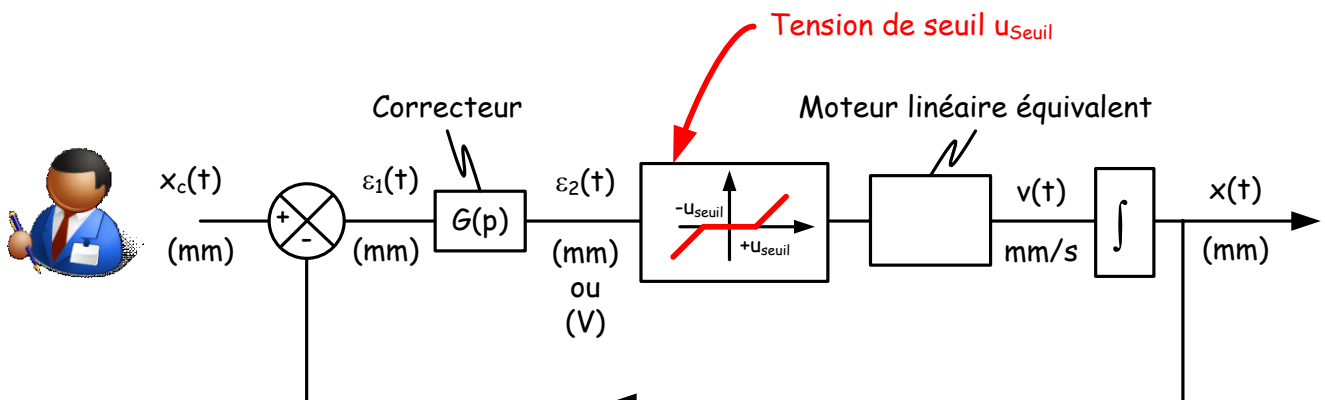
Ouvrir la fenêtre de correcteurs (Menu "Correcteur") et choisir un correcteur à "Avance de phase, action D"

$$G(p) = K \cdot \frac{1 + a \cdot \tau \cdot p}{1 + \tau \cdot p} \text{ où } a > 1$$

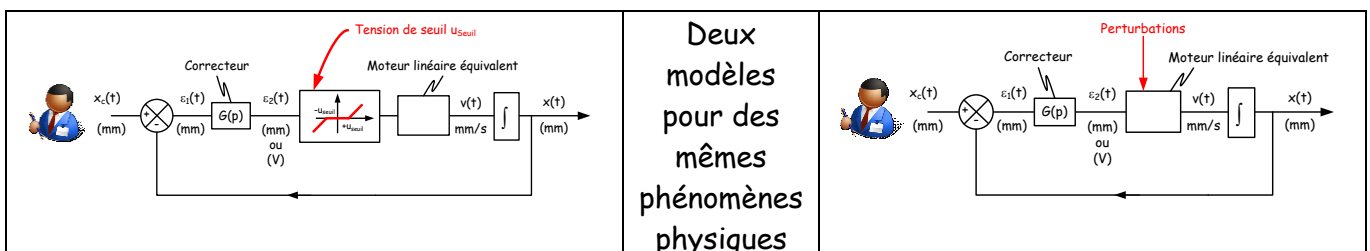
On procédera en quatre étapes :

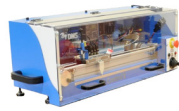
Etape 1 : On commencera par choisir K de façon à respecter le critère C4 compte tenu de la tension de seuil u_{seuil} .

Indice : En raisonnant très simplement sur le schéma bloc ci-dessous, indiquer l'écart statique $\varepsilon_{1 \text{ stat}}$ maximal que l'on est susceptible d'obtenir en fonction de K et u_{seuil} .



N.B. : A propos de précision, le modèle linéaire (non perturbé) laisse prévoir que l'écart statique va être nul (une intégration dans la boucle ouverte). En pratique il n'en n'est rien. Il ne faut pas oublier que la tension de seuil u_{seuil} n'est qu'un modèle pratique pour rendre compte de dissipations passives type frottements secs ou résistances au roulement qui sont des phénomènes perturbateurs non modélisés (non pris en compte). Si ces efforts perturbateurs avaient été modélisés, ils seraient intervenus au niveau du moteur.



**ANALYSTES MODELISATEURS : calage de trois types de correcteur**

Etape 2 : On choisira ensuite la valeur de a pour respecter les critères $C1$ et $C2$.

Etape 3 : On choisira ensuite la constante de temps τ de façon à ce que la phase soit apportée "au bon endroit".

Etape 4 : Enfin, on vérifiera à posteriori que le critère $C3$ est respecté.

Demander aux expérimentateurs de réaliser un essai de réponse indicielle sur la base de ce correcteur. Pour cela ils doivent :

- Revenir dans l'onglet "Analyse temporelle" et réinitialiser la position du chariot.
- Définir le correcteur à avance de phase (menu "Correcteur").
- Imposer une consigne en échelon de 100 mm d'amplitude par exemple (Menu "Analyse temporelle", "Définir entrée").

Enregistrer cet essai sur une clé USB ou sur le réseau du lycée : menu "Analyse temporelle", "Sauvegarder essai temporel en mémoire".

Ouvrir cet essai en mode hors ligne sous Control'Drive : menu "Analyse temporelle", "Ouvrir un essai temporel".

Dépouiller les résultats. Le cahier des charges est-il respecté ?

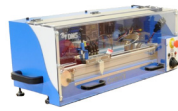
On pourra si on le souhaite revenir dans l'onglet "Identification / Simulation", sous onglet "Temporelle non linéaire" pour comparer les différentes réponses : Position souhaitée, simulée linéaire, non linéaire et position réelle.

2) Calage du correcteur proportionnel intégral

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

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

Justifier le choix d'un correcteur de type PI en analysant notamment le critère de précision qui impose un rejet de perturbation suffisant.



ANALYSTES MODELISATEURS : calage de trois types de correcteur

On procédera en deux étapes :

Etape 1 : Commencer par choisir le gain K de façon à satisfaire les critères $C1$, $C2$ et $C3$.

Etape 2 : Choisir la constante de temps T_i de façon à ce que le déphasage apporté par ce correcteur ne modifie que peu la marge de phase et la pulsation de coupure à 0dB de la boucle ouverte corrigée par le gain K (celui de l'étape 1). On choisit pour cela T_i de façon à ce qu'il y ait au moins une décade entre la pulsation $1/T_i$ et la pulsation ω_{co-0dB} de l'étape 1.

Faire exécuter un essai de réponse indicielle de 100mm sur la base de ce correcteur et dépouiller les résultats de la même façon qu'auparavant.

3) Calage du correcteur à retard de phase

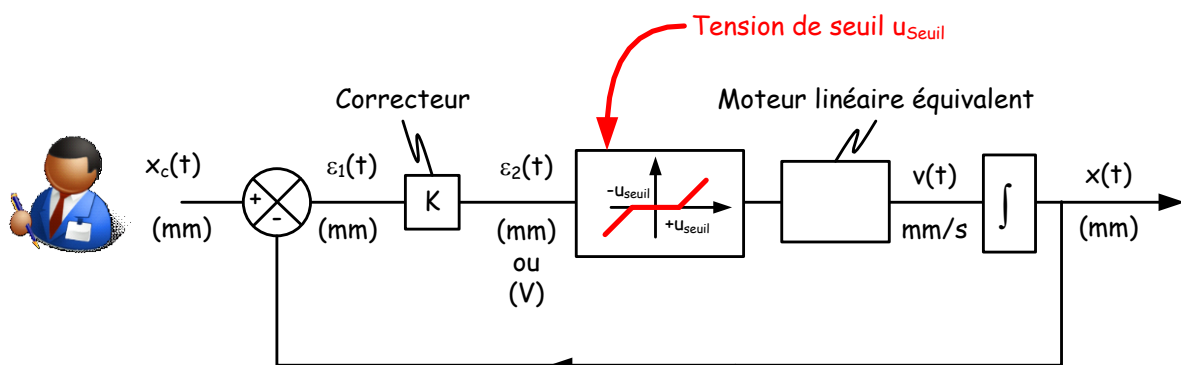
Ouvrir la fenêtre de correcteurs (Menu "Correcteur") et choisir un correcteur à "Retard de phase, action I"

$$G(p) = K.b. \frac{1 + \tau.p}{1 + b.\tau.p} \text{ où } b > 1$$

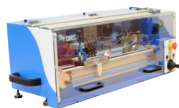
On procédera en quatre étapes :

Etape 1 : On commencera par choisir K de façon à respecter les critères $C1$, $C2$ et $C3$.

Etape 2 : On choisira ensuite la valeur de b de façon à respecter $C4$ compte tenu de la tension de seuil u_{seuil} .



Etape 3 : Choisir la constante de temps τ de façon à ce que le déphasage apporté par ce correcteur ne modifie que peu la marge de phase et la pulsation de coupure à 0dB de la boucle ouverte corrigée par le gain K (celui de l'étape 1). On choisit pour cela τ de façon à ce qu'il y ait au moins une décade entre la pulsation $1/\tau$ et la pulsation ω_{co-0dB} de l'étape 1.



ANALYSTES MODELISATEURS : calage de trois types de correcteur

Faire exécuter un essai de réponse indicielle de 100mm sur la base de ce correcteur et dépouiller les résultats de la même façon qu'auparavant.

TOUTE L'EQUIPE : validation cahier des charges

Faire le point sur les activités menées au cours de ce TP



FICHE DE FORMALISATION

| Savoir-faire | Je saurais refaire sans aide | Je saurais refaire avec de l'aide | Je ne saurais pas refaire |
|---|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Choisir un type de correcteur adapté aux exigences du cahier des charges | | | |

| Connaissances | Je saurais refaire sans aide | Je saurais refaire avec de l'aide | Je ne saurais pas refaire |
|---|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Concevoir Correction d'un système asservi | | | |