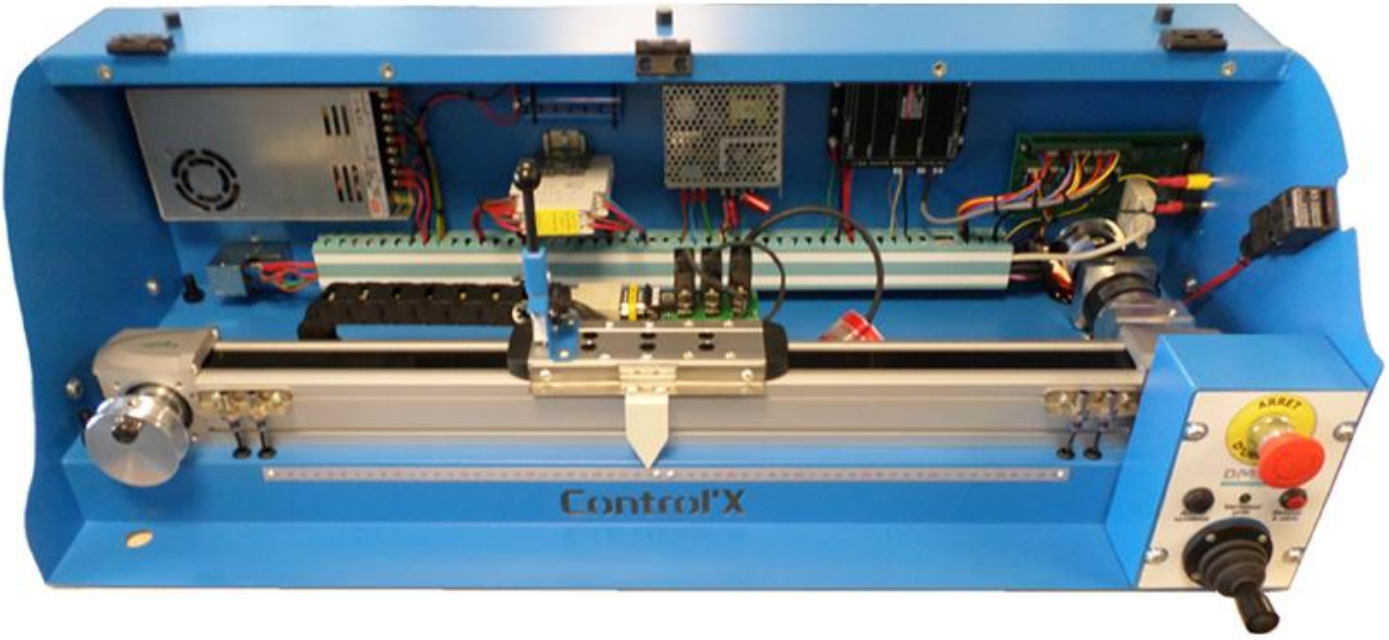
Travaux Pratiques – ASSERVISSEMENT
Control'X

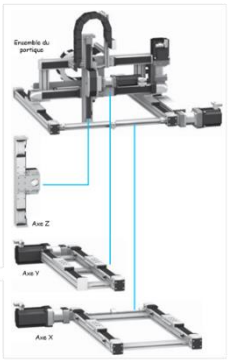


Objectifs du TP

Modéliser le comportement du Control'X et valider ce modèle par comparaison des performances simulées et des performances définies par le cahier des charges. Etudier l'influence d'un correcteur à avance de phase et d'un correcteur Proportionnel Intégral sur les performances du système.

1 – Mise en situation et description

Le système industriel dont est extrait Control'X est un robot portique 3 axes Lexium Max R du constructeur Schneider Electric. Ce robot portique est constitué :

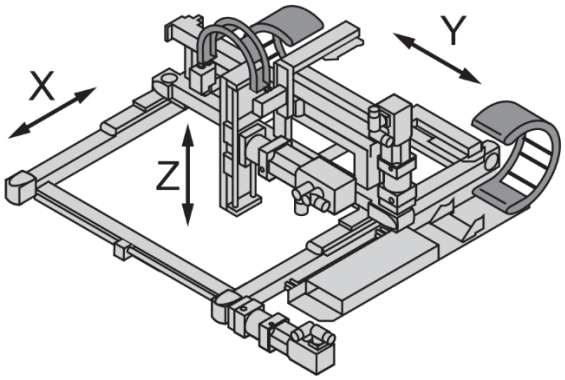


- D'un axe portique double Lexium MAX S assurant un déplacement selon la direction X.
- D'un axe portique double Lexium MAX H assurant un déplacement selon la direction Y.
- D'un axe Cantilever Lexium CAS 4 ou CAS 3 assurant un déplacement selon la direction Z.

Ce robot portique permet d'apporter une solution fiable pour la manipulation de charges sur de longues distances : selon le modèle, des charges jusqu'à 50 kg peuvent être déplacées jusqu'à 5500 mm en X, 1500 mm en Y et 1200 mm en Z. L'entraînement de chaque axe est assuré par courroie crantée. Les guidages des chariots se font au choix par galets ou billes à recirculation.

Ces robots portiques, commercialisés préassemblés, offrent différentes options de configuration pour chaque axe dont la longueur, le choix entre différentes tailles et types de profilés, le choix entre différents types de guidages …

Schneider Electric propose une offre globale constituée des portiques, de nombreux éléments de motorisation, des servovariateurs associés ainsi que des contôleurs de mouvement.



L'application choisie pour contextualiser Control'X et celle du "pick and place" dans le domaine du placement de composants électroniques. Il s'agit d'un processus de précision consistant à positionner des composants électroniques sur des circuits imprimés. Le cœur de la machine est un portique 3 axes avec moteurs et servovariateurs pour obtenir des mouvements hautement dynamiques et une précision maximale.

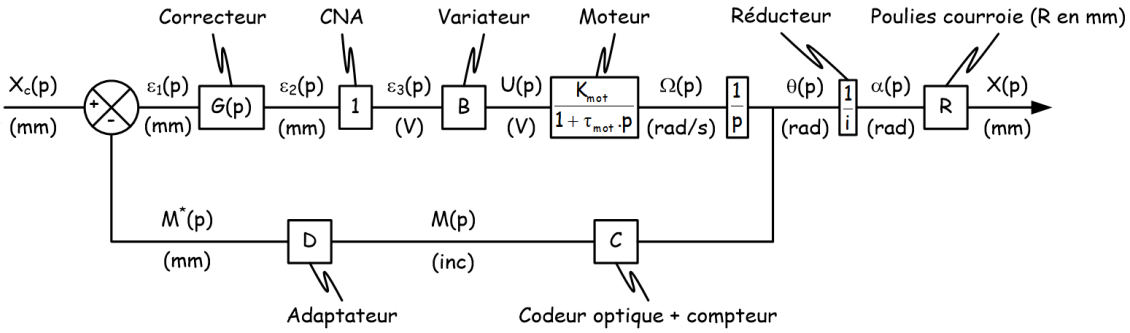
Dans ce contexte d'utilisation, la particularité mécanique tient au fait que les efforts résistants extérieurs exercés sur l'axe sont nuls : le moteur sert uniquement à vaincre les efforts inertiels ainsi que les résistances passives.

2 – Modélisation du système

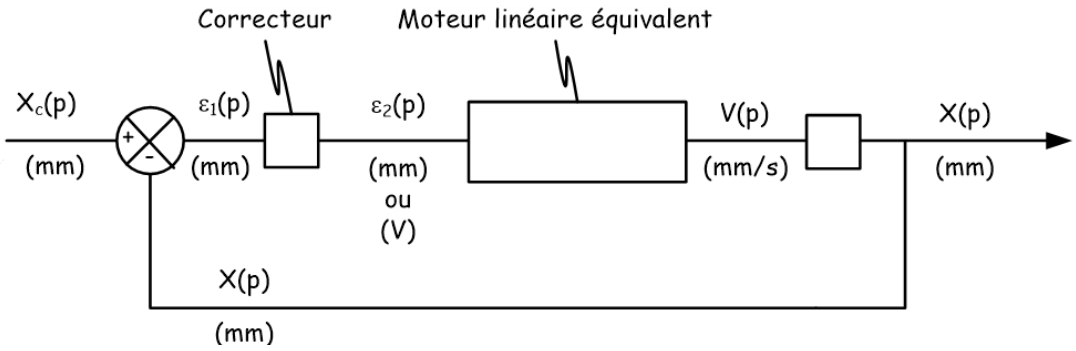
Réaliser en utilisant le **DOSSIER RESSOURCES** une analyse temporelle en Boucle Fermée pour un échelon de 100 mm et un gain de correcteur de 0,1.

Les différents critères du cahier des charges sont-ils respectés ? Justifier.

On travaille avec la modélisation sous schéma-bloc suivante :



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 :

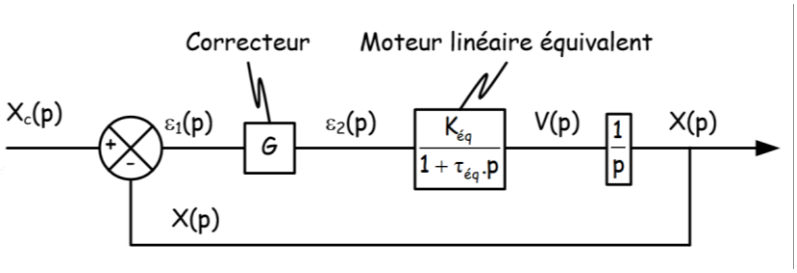


On considère pour commencer un correcteur proportionnel $G(p) = G$.

Calculer analytiquement la fonction de transfert en boucle ouverte ainsi corrigée. La mettre sous la forme $H_{BO}(p) = \frac{G.K_{éq}}{p.(1+\tau_{éq}.p)}$ où l'on précisera les expressions de $K_{éq}$ et $\tau_{éq}$.

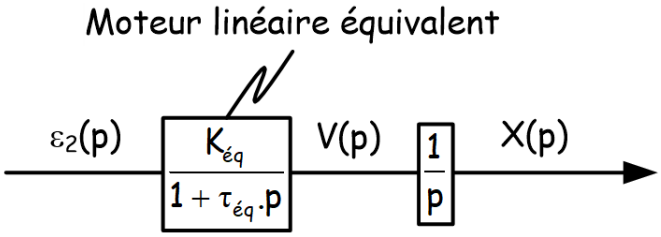
Déterminer la fonction transfert globale du système et la mettre sous forme canonique.

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 $K_{éq}$ et $\tau_{éq}$.

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



Faire un essai en Boucle Ouverte (voir **DOSSIER RESSOURCES**) avec en entrée un échelon $\varepsilon_2(t)$ de 10 V d'amplitude.

Remarque : Penser à réinitialiser le système avant l'essai.

Analyser la courbe obtenue et déterminer graphiquement les valeurs de $K_{éq}$ et $\tau_{éq}$.

3 – Amélioration du modèle

Le modèle retenu précédemment ne modélise pas fidèlement le comportement réel du système. On se propose ici d'améliorer le modèle en prenant en compte la saturation en tension du hacheur et la tension seuil du moteur à courant continu.

Détermination de la tension de seuil et de la tension de saturation

Mesurer en Boucle Ouverte, pour plusieurs valeurs d'entrée $\varepsilon_2(t)$ (0, 2, 4,6, 8, 10 et 15 V), la valeur de la vitesse finale atteinte par le système.

Tracer la courbe de la vitesse finale atteinte par le système en fonction des différentes valeurs d'entrée $\varepsilon_2(t)$.

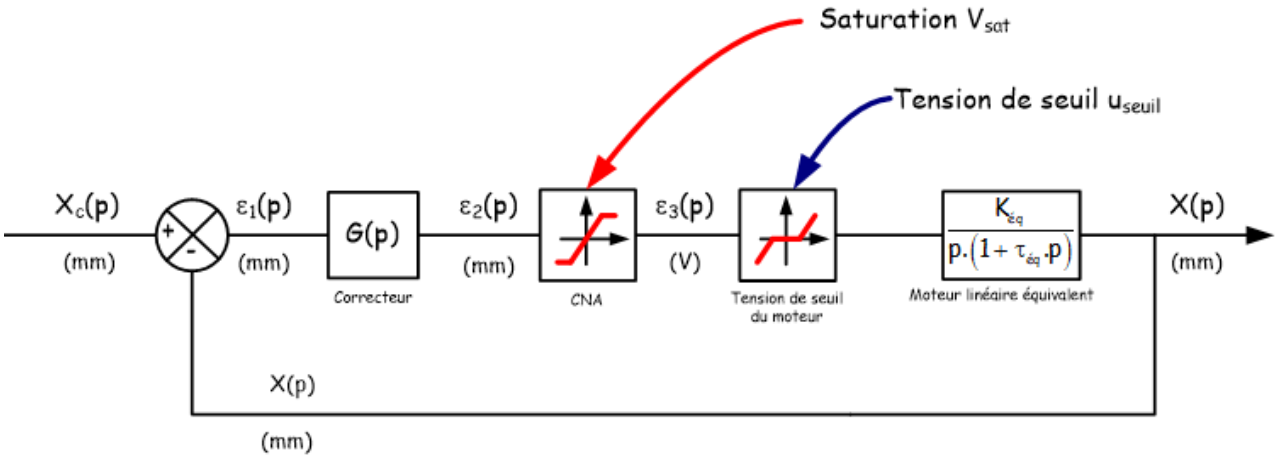
Analyser la courbe et déterminer la tension de seuil U_{seuil} ainsi que la tension de saturation V_{sat}.

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 ?

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 du 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 useuil est susceptible de générer des écarts de position maxi $\varepsilon_{1\ statique\ max} = \frac{U_{seuil}}{G}$.

En effet, lorsque le régime permanent est atteint, c'est-à-dire lorsque le moteur ne tourne plus, on a $\varepsilon_2(t) = \varepsilon_3(t) \in [-U_{seuil}, U_{seuil}]$ donc $\varepsilon_1(t) \in [-\frac{U_{seuil}}{G}, \frac{U_{seuil}}{G}]$. 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 $\varepsilon_{1\ statique}$ est faible.

4 – Validation du modèle

Modèle en Boucle Ouverte

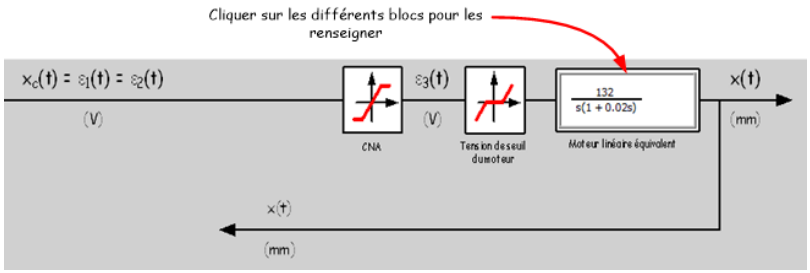
Le modèle de boucle ouverte ayant été mis en place, on va maintenant le valider.

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}. On choisira un temps de mesure de 0,3 s.

Choisir un pilotage en boucle ouverte (voir **DOSSIER RESSOURCES**) et réinitialiser la position du chariot. Réaliser les essais précédents pour les différentes valeurs d'entrée de $\varepsilon_2(t)$.

Se placer 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.

Remarque : 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 V.



Analyser les courbes obtenues

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.

Modèle en Boucle Fermée

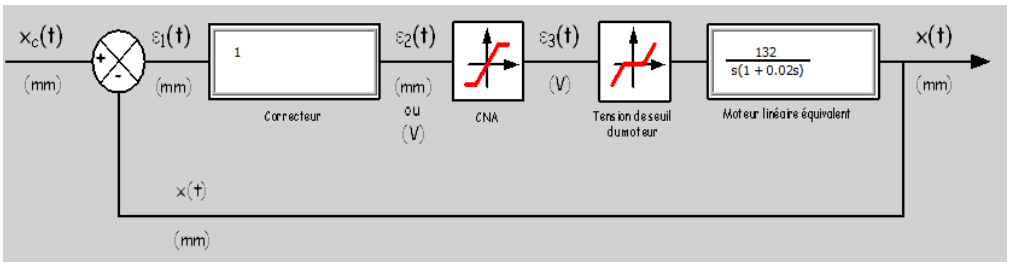
Le modèle non linéaire de boucle ouverte étant validé, il sera exploité pour prévoir le comportement de la boucle fermée qui en découle.

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.

Piloter le système en boucle fermée (voir **DOSSIER RESSOURCES**) pour réaliser un premier essai avec une amplitude d'échelon de 0 à 300 mm et un gain $G = 1$. On choisira un temps de mesure de 0,4 s.

Remarque : Penser à réinitialiser le système avant l'essai.



Analyser les courbes obtenues et valider le modèle non linéaire de boucle fermée en utilisant l'onglet « Identification / Simulation ».

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

5 – Amélioration des performances avec différents correcteurs

Correcteur proportionnel

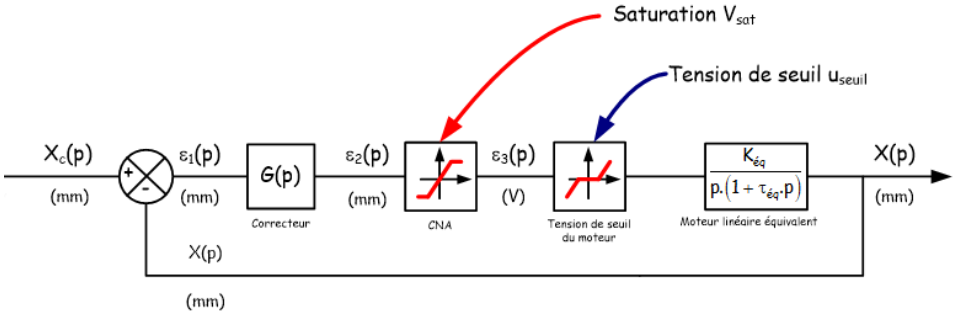
Pour améliorer le système précédent vis-à-vis des exigences du cahier des charges, des correcteurs seront utiliser. Pour régler ces correcteurs, plusieurs méthodes sont envisageables :

- 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 : Elle 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.



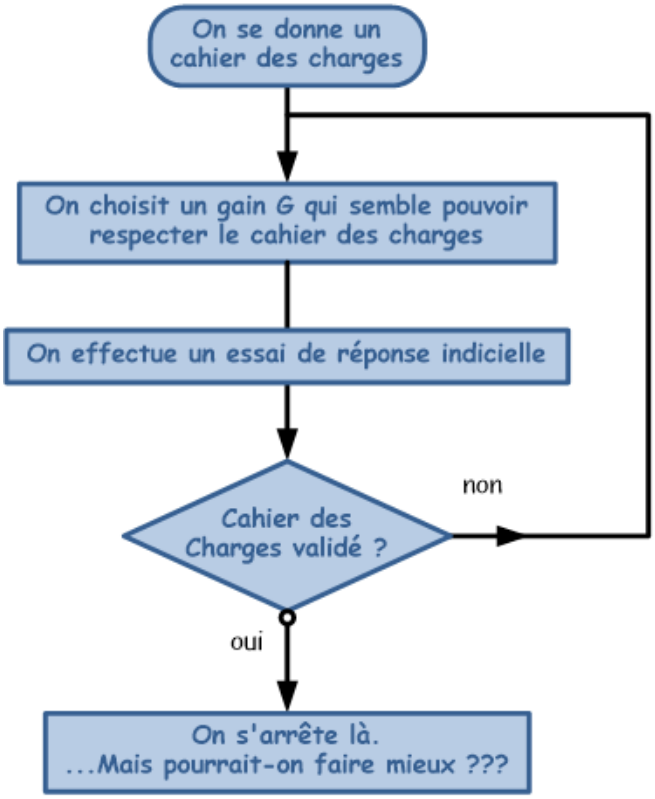
D'après le modèle mis en place, analyser **qualitativement** l'influence du gain G sur les performances de l'asservissement en termes de :

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

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"

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



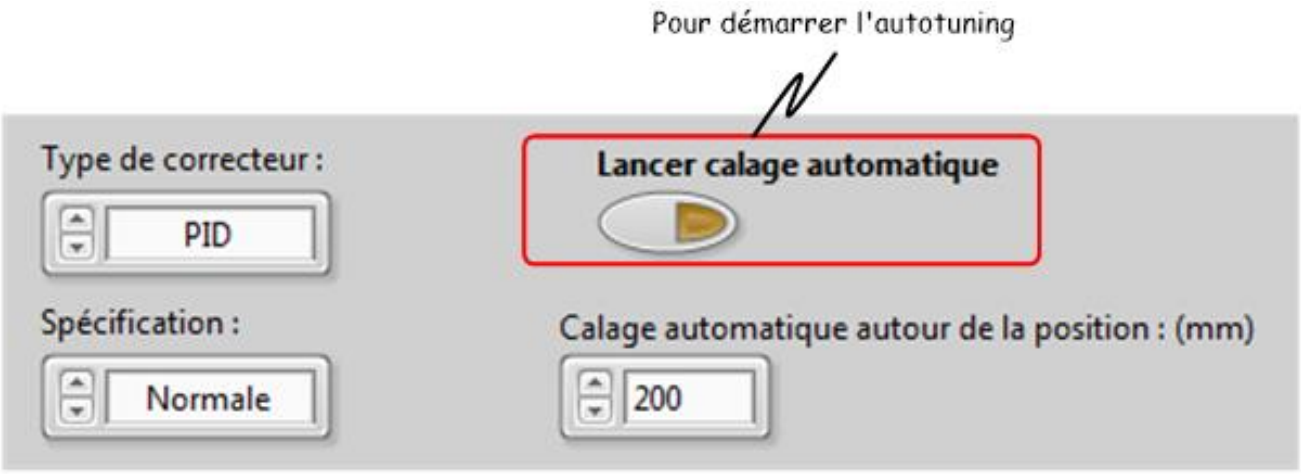
Une fois un correcteur proportionnel jugé satisfaisant, exercer des perturbations à la main sur le chariot, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre et laisser revenir le chariot doucement vers sa position d'équilibre.

Le critère C4 (précision) est-il toujours validé ? Analyser finement le rôle de la tension de seuil dans le rejet de perturbation.

Remarque : On rappelle 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 $\varepsilon_{1\ statique\ max} = \frac{U_{seuil}}{G}$ en valeur absolue.

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 puisqu'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.

Mise en place de 2 types de correction

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.**

<u>Remarque :</u> Il est possible de lancer une analyse fréquentielle si besoin en suivant les indications dans le menu « Analyse Harmonique ».

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.	$M_G > 10$ dB $M\varphi > 45$ °
	C3	Rapidité caractérisée par la pulsation de coupure à 0dB de la boucle ouverte	$\omega_{co\text{-}0dB} > 15$ rad/s

Deux correcteurs permettant de satisfaire le cahier des charges seront étudiés :

- Un correcteur à avance de phase
- Un correcteur proportionnel intégral

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.

Calage du correcteur à avance de phase

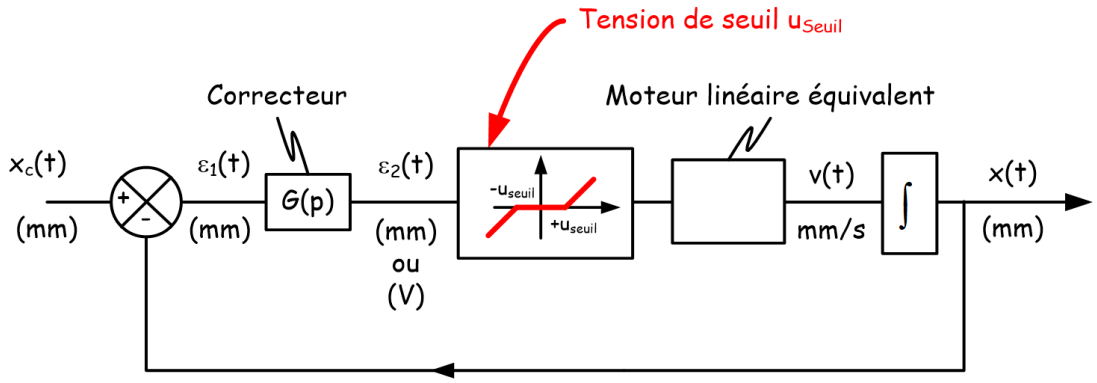
Ouvrir la fenêtre de correcteurs (Menu "Correcteur") et choisir un correcteur à "Avance de phase, action D" :

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

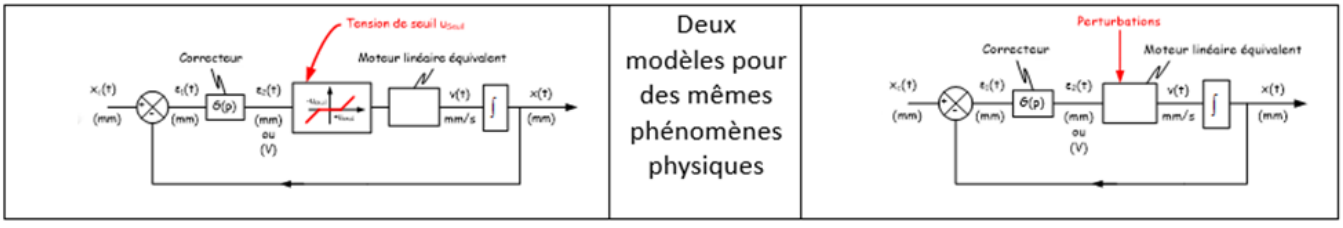
Pour régler le correcteur, on procédera en quatre étapes :

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

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



Remarque : A propos de la 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.



ETAPE 2 Choisir la valeur de a pour respecter les critères C1 et C2.

ETAPE 3 Choisir la constante de temps τ de façon à ce que la phase soit apportée "au bon endroit".

ETAPE 4 Vérifier à postériori que le critère C3 est respecté.

Réaliser un essai de réponse indicielle sur la base de ce correcteur.

Pour cela, suivre la procédure suivante :

- 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 : 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 ".

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

Remarque : 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.

Calage du correcteur Proportionnel Intégral

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

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

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

Pour régler le correcteur, on procédera en deux étapes :

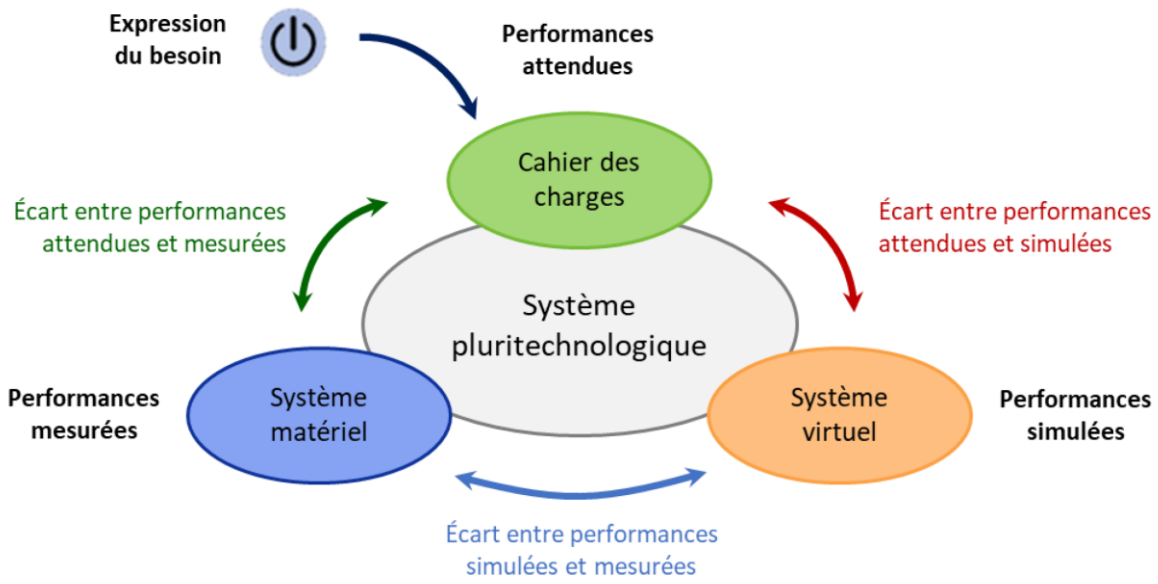
ETAPE 1 Choisir le gain K de façon à satisfaire les critères C1, C2 et C3.

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 0 dB de la boucle ouverte corrigée par le gain K (celui de l'**ETAPE 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'**ETAPE 1**.

Réaliser un essai de réponse indicielle de 100 mm sur la base de ce correcteur. Analyser les résultats de la même façon qu'auparavant.

6 – Validation

L'objectif pour le groupe est de comparer pour les performances de rapidité et de stabilité **avec le correcteur à avance de phase**, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

L'objectif pour le groupe est de comparer pour les performances de rapidité et de stabilité **avec le correcteur Proportionnel Intégral**, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

Quels autres paramètres peut-on modifier pour améliorer les performances de stabilité, de précision et de rapidité du système ?