

---

**DE L'INTERET D'UNE COMMANDE EN BOUCLE FERMEE**

---

---

**PROBLEMATIQUE**

---

**Quelle stratégie de pilotage pour positionner le chariot de façon automatique, rapide et précise ?**

Après différentes stratégies de pilotage en boucle ouverte puis en boucle fermée, on cherche dans ce TP à mettre très progressivement en évidence l'intérêt d'un asservissement reposant sur le classique couple {soustracteur + correcteur}.

---

**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**

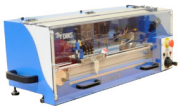
**ANALYSTES  
EXPERIMENTATEURS**

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.

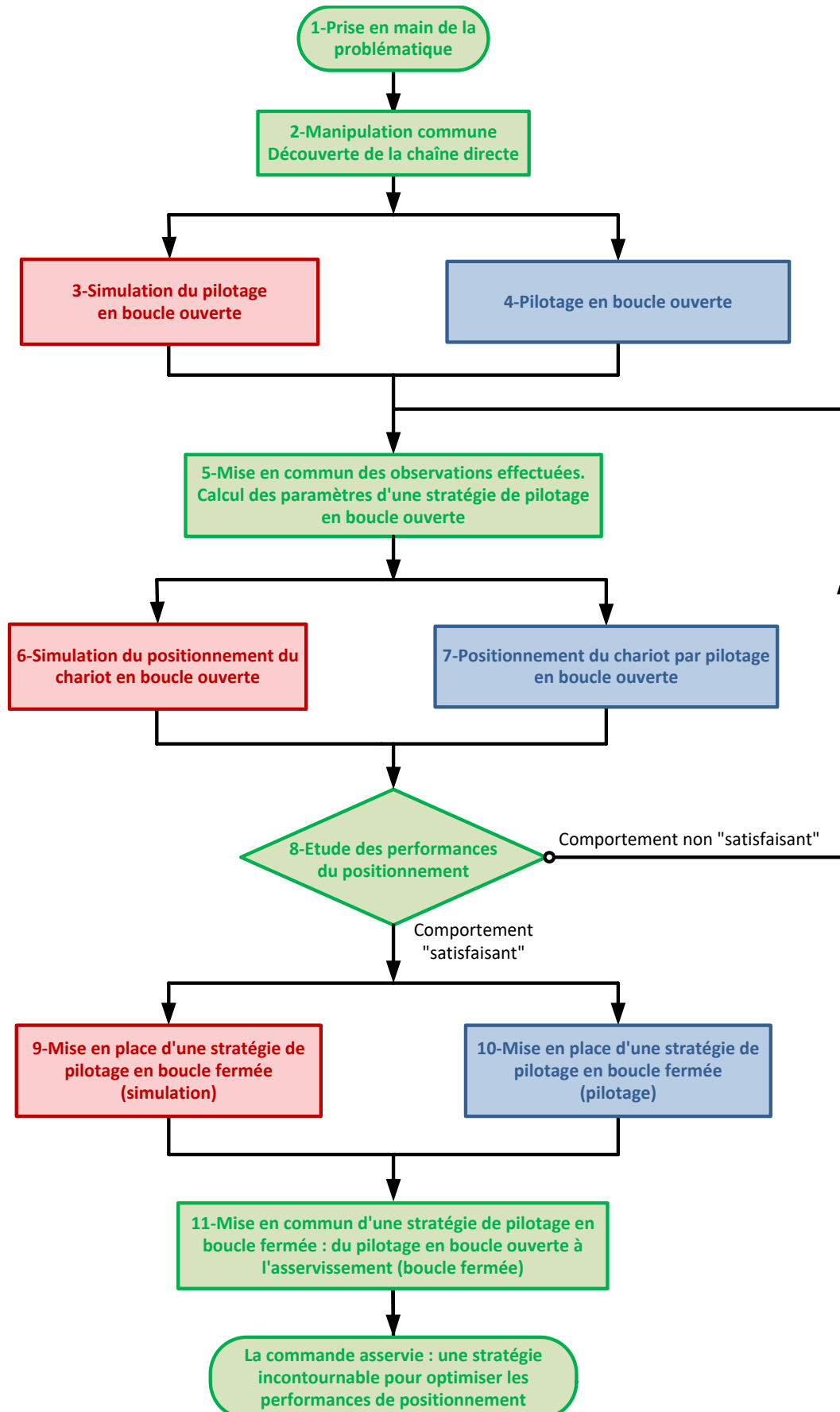
Pour la présentation, chaque groupe dispose de 10 à 12 minutes de présentation puis 10 minutes de questions et remarques. Le temps de parole doit être réparti. Chacune des présentations sera réalisée en utilisant PowerPoint ou Open Office.

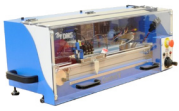
Dans le questionnaire qui suit, un certain nombre de réponses sont attendues de façon implicite, elles servent de guide pour mener à bien la démarche entreprise et n'appellent pas nécessairement de réponse écrite. D'autres questions devront faire l'objet d'une réponse au moment de la présentation.

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



## SCENARIO DU TP





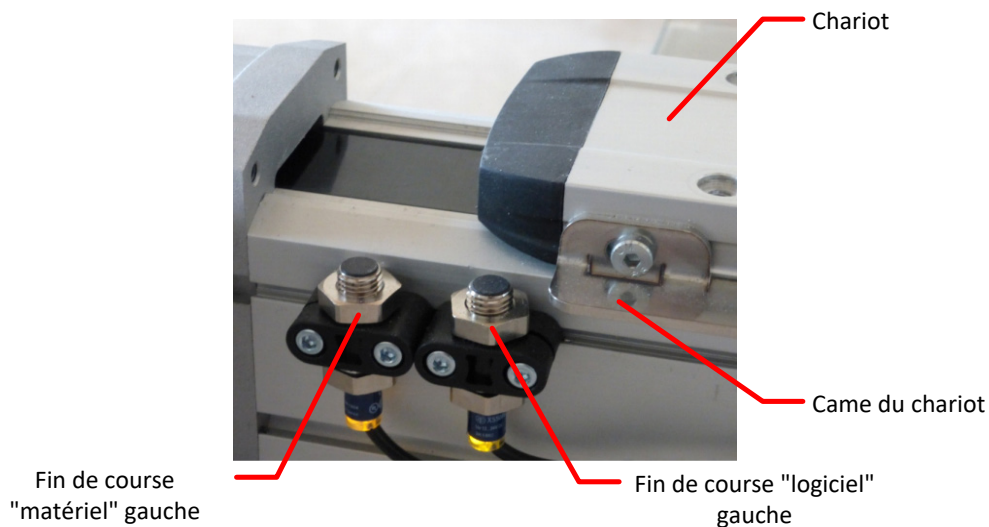
## TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique

### Prise en main matérielle de Control'X

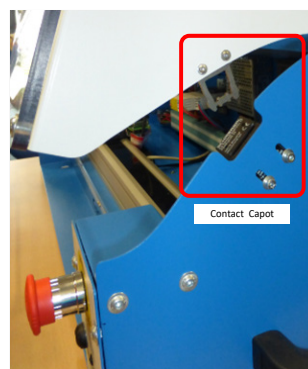
- Mettre sous tension Control'X : pour cela, basculer l'interrupteur situé au dos du carter sur la position 1 :

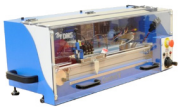


- Vérifier que la came du chariot de Control'X ne recouvre pas les capteurs de fin de course "matériels". Si cela devait être le cas, déplacer à la main le chariot vers le centre de façon à découvrir ces deux capteurs :



- 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 autoalimenté colle et la diode verte "variateur prêt" s'allume.



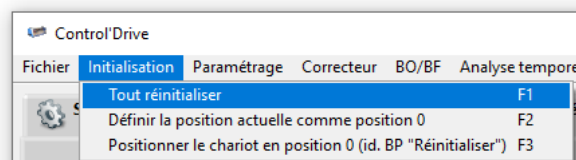
- Lancer maintenant le logiciel Control'Drive :



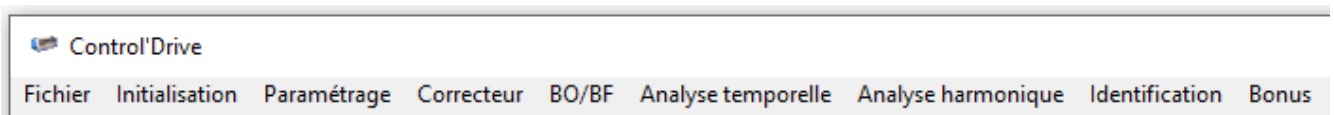
Control'Drive

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 :

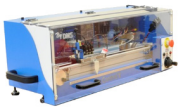


Un onglet désigne un bandeau du type :



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 :

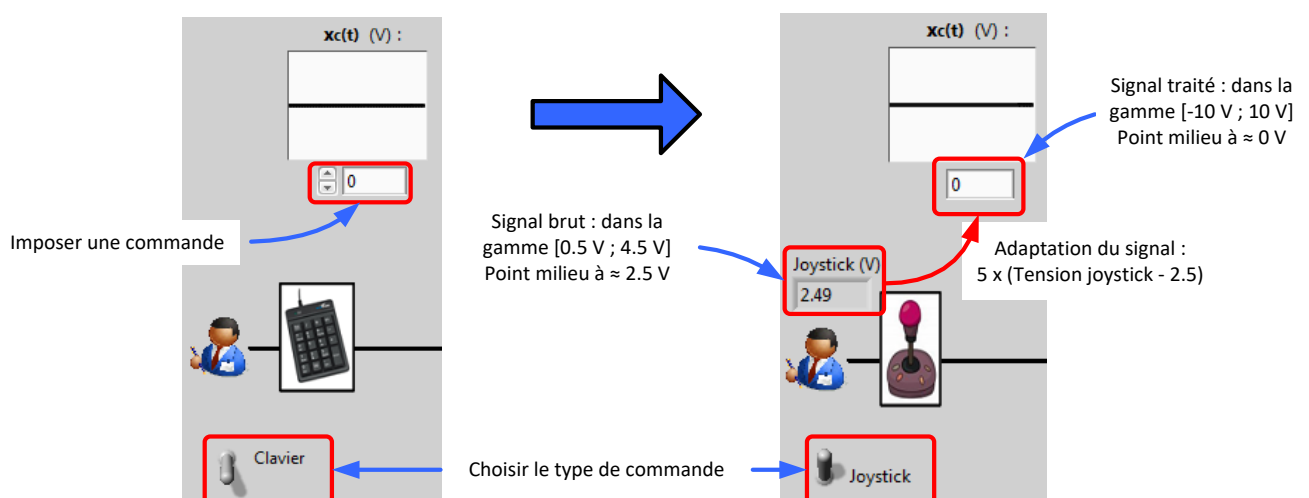


**TOUTE L'EQUIPE : prise en main de la problématique**

Le TP peut maintenant commencer. Se placer en boucle ouverte (Menu "BO/BF") et découvrir les trois premiers onglets : "Schéma structurel", "Schéma fonctionnel" et "Schéma bloc".

Survoler les différentes zones de l'écran avec la souris pour découvrir l'architecture de la chaîne fonctionnelle.

Se placer dans l'onglet "Schéma bloc" puis pilotez le système avec différents échelons de tension. Le pilotage peut s'effectuer soit au clavier soit au joystick :



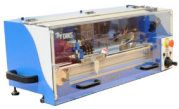
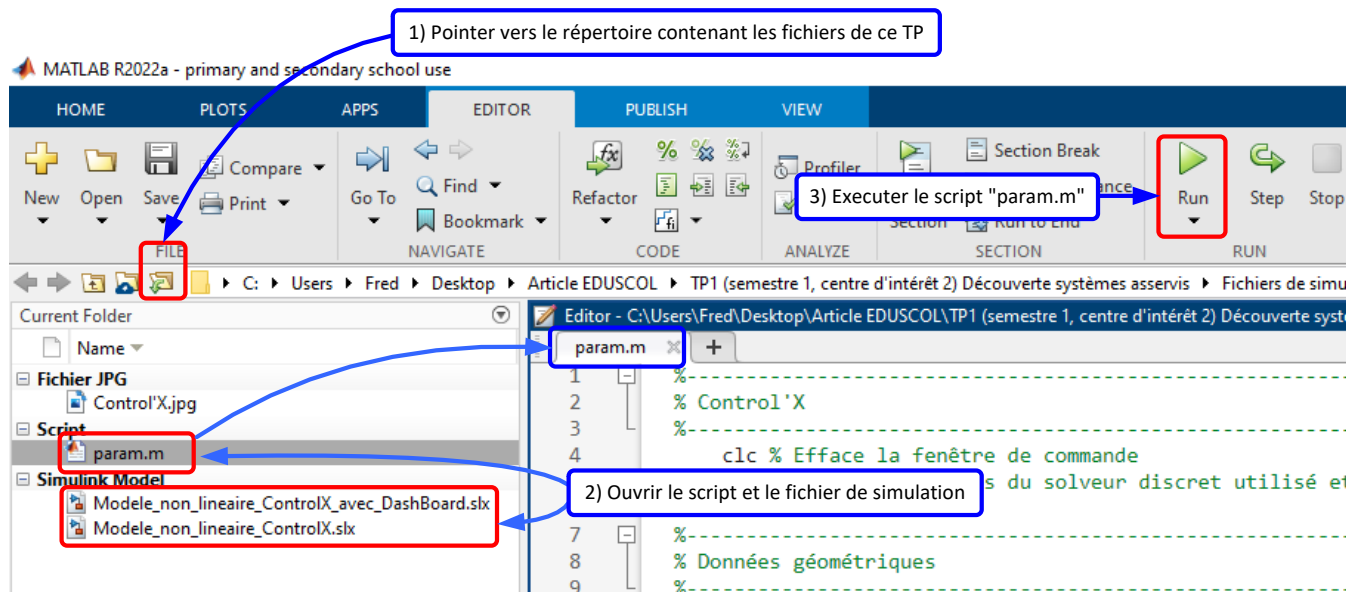
Observer le comportement du système. Essayer d'atteindre la position 300 mm par exemple avec une précision de l'ordre du mm.

On cherche maintenant à mettre en place une stratégie de commande permettant d'atteindre automatiquement, rapidement et précisément une position donnée : par exemple  $300 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  tout au long du TP.

**ANALYSTES MODELISATEURS : simulation du pilotage en boucle ouverte**

Lancer Matlab-Simulink, sélectionner le chemin de travail de ce TP puis :

- ouvrir et lancer le fichier "param.m"
- ouvrir le fichier "Modele\_non\_lineaire\_ControlX.slx"

**ANALYSTES MODELISATEURS : simulation du pilotage en boucle ouverte**

Nota : une solution plus simple consiste à double cliquer directement depuis l'explorateur Windows sur le fichier Matlab ou Simulink. Le répertoire de travail est alors automatiquement sélectionné.

Le pilotage s'effectue dans un premier temps en imposant des tensions  $\varepsilon_2(t)$  : basculer l'interrupteur "Manual switch" entre les entrées 1 et 2 ou modifier la valeur numérique de l'une ou l'autre des deux entrées. Observer l'évolution de la vitesse  $v(t)$  et de la position  $x(t)$  du chariot.

Quelle tension  $\varepsilon_2(t)$  doit-on appliquer une fois que la position  $x(t)$  est stabilisée à la valeur souhaitée ? Imposer des perturbations (environ 50 N) grâce à l'entrée "Force perturbatrice" : le chariot reste-t-il dans sa position ?

**ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : pilotage en boucle ouverte**

On cherche à obtenir un positionnement à 300 mm du chariot  $\pm 1$  mm par pilotage au joystick en boucle ouverte.

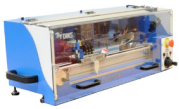
Réinitialiser la position du chariot (bouton rouge "Réinitialiser" sur le pupitre)

Comment manœuvrer le joystick pour atteindre 300 mm ? Y a-t-il plusieurs possibilités, plusieurs stratégies pour arriver à cette position. Quelle doit être la position du joystick une fois la position souhaitée atteinte.

Que se passe-t-il si des perturbations (d'intensité suffisante) sont exercées à la main sur le chariot une fois positionné ?

Estimer très grossièrement la durée qui a été nécessaire pour atteindre 300 mm  $\pm 1$  mm (regarder la position exacte dans la barre d'état de Control'Drive).

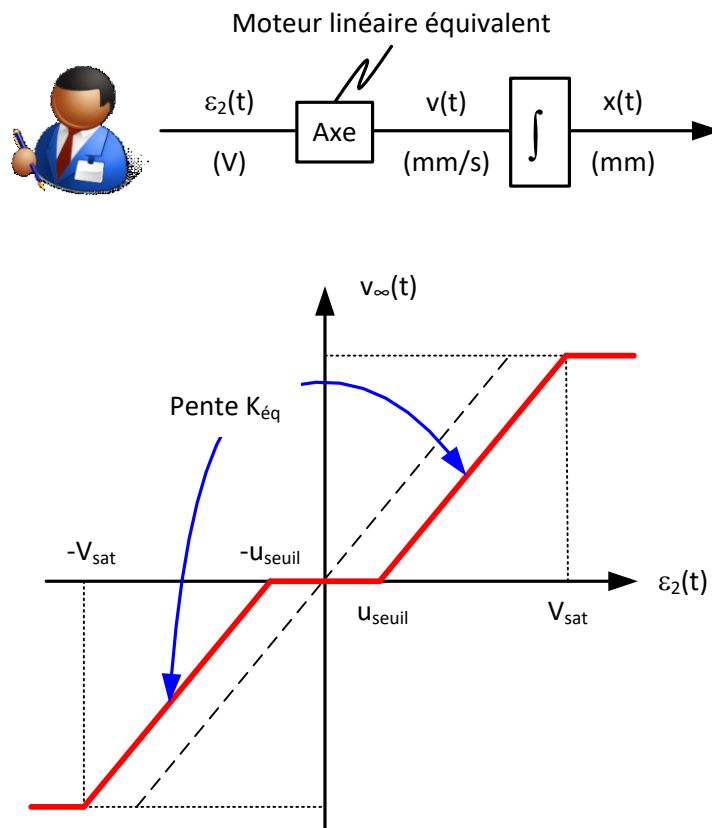
Pour information, Control'X piloté de façon efficace, permet d'atteindre 300 mm  $\pm 15$   $\mu$ m en 250 ms. Etes-vous capable de faire mieux ?



TOUTE L'EQUIPE : mise en place d'une stratégie de pilotage

Faire le point sur les comportements observés.

On donne les trois modèles de comportement suivants pour l'ensemble des composants de la chaîne directe de Control'X :

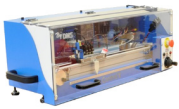


**Modèle 1 :** moteur sans dynamique : pour une tension d'alimentation constante donnée  $\varepsilon_2(t)$ , la vitesse  $V_\infty(t)$  est atteinte immédiatement. Tension de seuil  $u_{\text{seuil}}$  négligée. Tension de saturation  $V_{\text{sat}}$  prise en compte.

**Modèle 2 :** moteur sans dynamique. Tension de seuil  $u_{\text{seuil}}$  et tension de saturation  $V_{\text{sat}}$  prises en compte.

**Modèle 3 :** (en fin de TP s'il reste du temps) : dynamique du moteur prise en compte : système caractérisé par une équation différentielle du premier ordre du type :  $\tau_{\text{éq}} \cdot \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = K_{\text{éq}} \cdot \varepsilon_2(t)$ . Tension de seuil  $u_{\text{seuil}}$  et tension de saturation  $V_{\text{sat}}$  prises en compte.

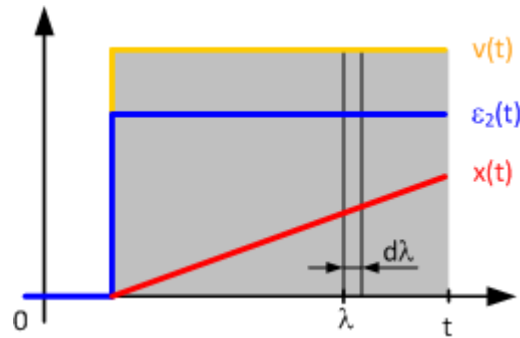
Valeurs numériques pour les 3 modèles			
$V_{\text{sat}} = 10 \text{ V}$	$u_{\text{seuil}} = 1.5 \text{ V}$	$K_{\text{éq}} = 132 \text{ (mm/s)/V}$	$\tau_{\text{éq}} = 22 \text{ ms}$



## TOUTE L'EQUIPE : mise en place d'une stratégie de pilotage

**Travail préliminaire :** montrer que dans le cas du modèle 2 (le modèle 1 se déduit du modèle 2), la position obtenue (sous CI nulle) correspond à l'intégrale de la tension d'alimentation  $\varepsilon_2(t)$  appliquée :

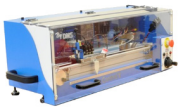
$$x(t) = K_{\text{eq}} \cdot \int_{\lambda=0}^{\lambda=t} [\varepsilon_2(\lambda) - u_{\text{seuil}}] \cdot d\lambda \quad \text{si } \varepsilon_2(t) \in [-V_{\text{sat}}, V_{\text{sat}}]$$



On cherche maintenant à piloter le système, toujours en boucle ouverte, mais en imposant un signal  $\varepsilon_2(t)$  calculé (programmé) de façon à ce que le chariot se positionne à 300 mm. Exploiter les modèles 1 et 2 pour calculer la durée pendant laquelle il est nécessaire d'appliquer la tension constante  $\varepsilon_2(t)$  pour que le chariot se positionne à 300 mm.

Tension constante $\varepsilon_2(t)$	Durée nécessaire T (s) pour parcourir 300 mm	
	Modèle 1	Modèle 2
4V		
7V		
10 V		



**ANALYSTES MODELISATEURS : simulation du positionnement du chariot en BO**

Sous Simulink, utiliser les blocs du cadre "Blocs à utiliser pour piloter Control'X en BO". Renseigner les valeurs numériques des différents blocs et piloter le système.

Le chariot se stabilise-t-il effectivement à 300 mm, pourquoi ?

Imposer des perturbations (environ 50 N), observer le comportement du système.

Evaluer la durée et la distance d'arrêt : comment pourrait-on tenir compte de l'une ou l'autre de ces deux grandeurs pour élaborer la tension d'entrée  $\varepsilon_2(t)$  ?

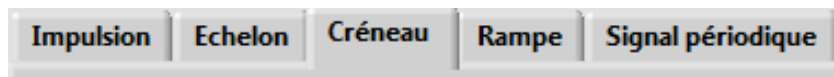
**ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : positionnement du chariot par pilotage en BO**

On travaille maintenant dans l'onglet "Analyse temporelle". Générer des entrées de tension  $\varepsilon_2(t)$  en échelon : menu "Analyse temporelle", "Définir entrée".

Imposer des tensions de 4, 7 et 10 V. Observer le comportement du système. Qu'est-ce qui ne va pas ?

Réinitialiser la position du chariot entre chaque essai : bouton rouge "Réinitialiser" sur le pupitre.

Imposer maintenant les créneaux de tension  $\varepsilon_2(t)$  précédemment calculés (onglet "Créneau" de la palette d'entrées) et observer le comportement du système.

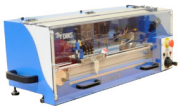


Une fois le chariot positionné, que se passe-t-il si des perturbations (d'intensité suffisantes) lui sont exercées ?

Evaluer la durée et la distance d'arrêt : comment pourrait-on tenir compte de l'une ou l'autre de ces deux grandeurs pour élaborer la tension d'entrée  $\varepsilon_2(t)$  ?

On peut à ce stade tenter d'imposer d'autres types d'entrées pour que le chariot se stabilise à 300 mm : entrée en sinus par exemple pourvu que l'aire du signal d'entrée soit bien choisie (choisir en particulier une demi-période).

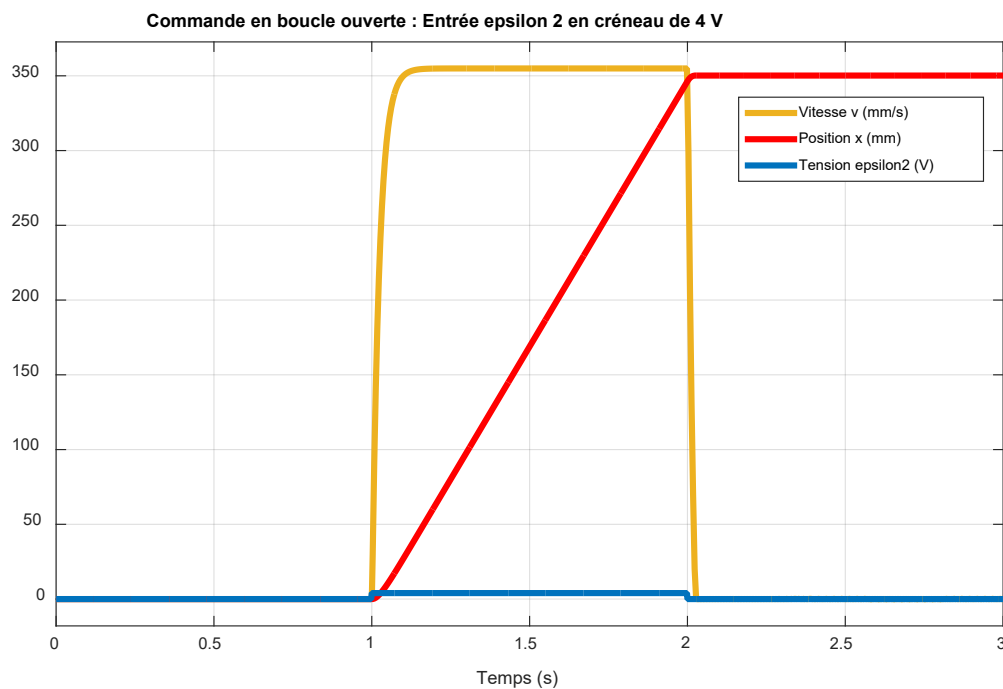
N.B. : l'aire sous tendue par une demi arche de sinus de type  $A \cdot \sin \omega \cdot t$  vaut  $2 \cdot A / \omega$ .

**TOUTE L'EQUIPE : performances du positionnement**

Que se passe-t-il si le modèle ne reflète pas correctement la réalité ou si les valeurs numériques du modèle sont mal choisies ?

Pourrait-on calculer l'évolution de la tension  $\varepsilon_2(t)$  à appliquer compte tenu des perturbations qui par définition sont non prévisibles ?

La dynamique de mise en mouvement du moteur a été négligée. Cela a-t-il une grosse influence sur la distance parcourue. Interpréter physiquement pour cela les courbes ci-dessous : la distance parcourue (courbe rouge) est l'aire sous tendue par la courbe de vitesse (courbe jaune).

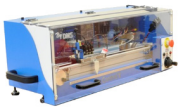


Les constats précédents nous amènent à imaginer un mode de commande de l'axe de type automatique. Un mode de commande où le pilotage se ferait non plus en imposant une entrée en volts (la commande) mais directement la position souhaitée en mm (la consigne), le système calculant lui-même la tension  $\varepsilon_2(t)$  à appliquer pour aller au but dans les meilleures conditions.

Un tel système s'appelle un système asservi : du latin "servus", l'esclave. C'est un système dont la sortie (l'esclave) est censée suivre la consigne (le maître) en toutes circonstances.

Le but étant de positionner le chariot le plus rapidement possible, le plus précisément possible et ce malgré la présence d'éventuelles perturbations. La cerise sur le gâteau serait que les performances de positionnement n'aient pas (ou peu) à dépendre de :

- la finesse d'un quelconque modèle mis en place. C'était loin d'être le cas jusqu'à présent.
- la modification éventuelle au cours du temps de certains paramètres caractéristiques du système (frottements dans le mécanisme par exemple)



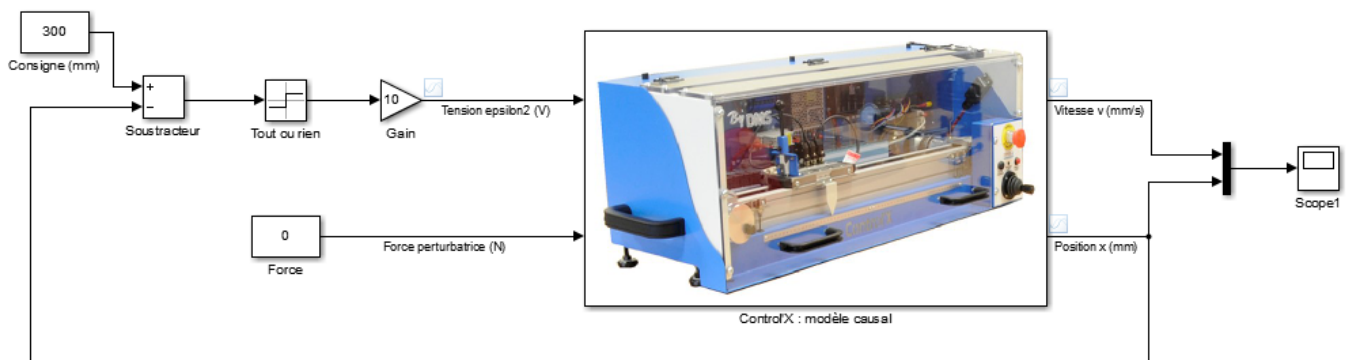
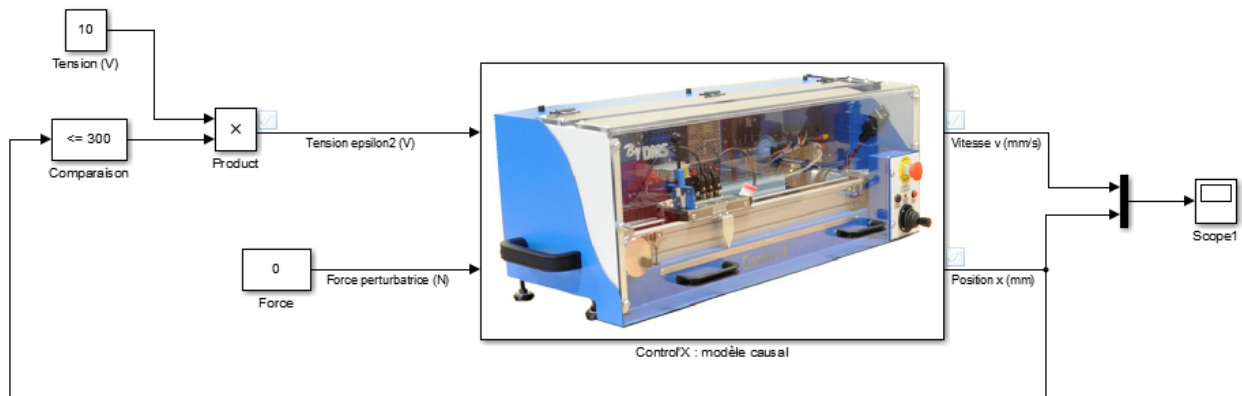
## ANALYSTES MODELISATEURS : simulation d'une stratégie de pilotage en boucle fermée

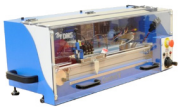
On cherche maintenant à imaginer différentes stratégies de pilotage sous Simulink. Utiliser pour cela les blocs du cadre "Blocs à utiliser pour piloter Control'X en BF". Renseigner les valeurs numériques des différents blocs et piloter le système.

On impose que l'entrée soit la consigne exprimée en mm. On pourra effectuer un bouclage de la sortie sur l'entrée comme illustré ci-après.

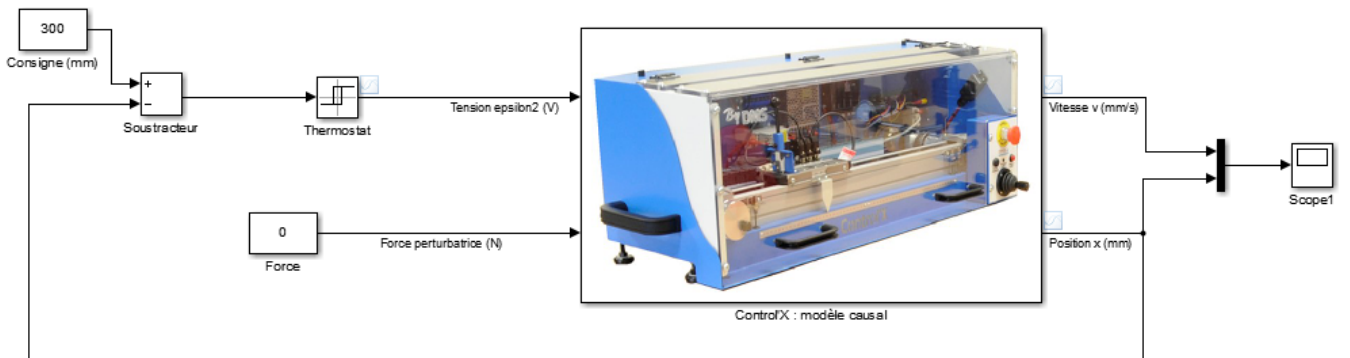
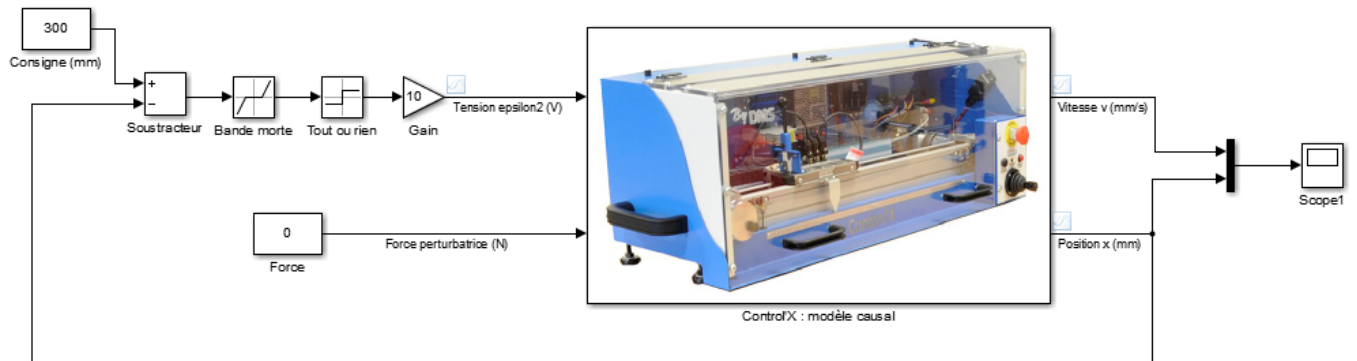
On pourra passer en revue les stratégies suivantes de pilotage en modifiant éventuellement les valeurs des différents paramètres.

On pourra pour chacune des stratégies mettre en place une perturbation (environ 50 N) pour visualiser le comportement de la boucle fermée en "rejet de perturbation".

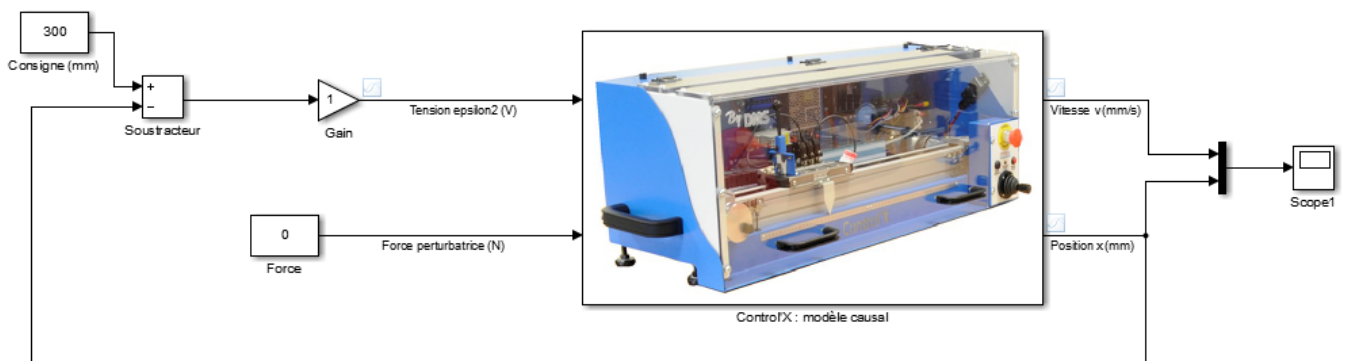


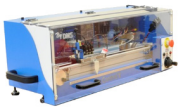


**ANALYSTES MODELISATEURS : simulation d'une stratégie de pilotage en boucle fermée**



Modifier ci-dessous la valeur du gain que l'on prendra parmi {0.1, 1, 2, 5, 10}



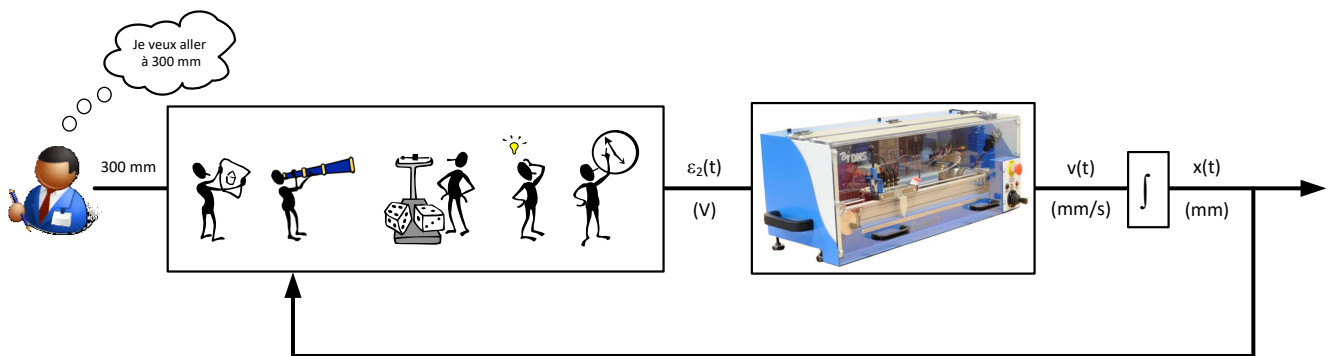
**ANALYSTES EXPERIMENTATEURS : pilotage en boucle fermée**

On continue à piloter Control'X au joystick dans l'onglet "Schéma bloc". Repositionner le chariot à gauche (bouton rouge "Réinitialiser").

Chercher à nouveau à déplacer le chariot de 300mm mais cette fois en analysant finement la façon dont le joystick est déplacé : quels sont les paramètres dont l'opérateur tient compte, quel est le calcul qu'il effectue mentalement, comment agit-t-il sur le joystick ?

Comment modéliser le comportement de l'opérateur, quelle équation mathématique faire coller sur son mode d'action ?

Il faut noter qu'ici, le pilotage se fait en boucle ouverte mais cela dépend du point de vue. Si l'on considère le couple {Opérateur + Control'X}, il s'agit bien d'une commande en boucle fermée.



On détaille les différentes tâches que l'opérateur doit gérer à chaque instant :

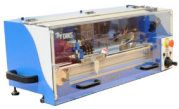
- 1) Il sait où il souhaite positionner le chariot (c'est la consigne, 300 mm)
- 2) Il observe la position réelle du chariot (c'est la mesure)
- 3) Il compare la position souhaitée et la position réelle
- 4) Il Met en place une stratégie de commande
- 5) Il génère la tension de commande  $\varepsilon_2(t)$

On va maintenant piloter Control'X en boucle fermée. Se placer dans l'onglet "Schéma bloc" dans Control'Drive puis choisir un pilotage en boucle fermée (Menu "BO/BF").

La boucle est maintenant fermée par l'utilisation d'un soustracteur et d'un correcteur proportionnel : vérifier que le gain du correcteur proportionnel vaut bien 0.1 (Menu "Correcteur")

Cette structure de pilotage en boucle fermée est celle qui se rapproche le plus du pilotage qui a été effectué au joystick en boucle ouverte. Le pilotage se fait selon un mode dit proportionnel : la tension de commande  $\varepsilon_2(t)$  est proportionnelle à la différence entre la consigne et la mesure. Cette stratégie peut aussi s'énoncer ainsi : "plus on est loin du but, plus on doit imposer une tension importante pour se rapprocher du but"

Imposer maintenant des consignes par pas de 50 mm par exemple. Observer l'évolution de tous les signaux. Exercer des perturbations à la main sur le chariot. Qu'observe-t-on ?

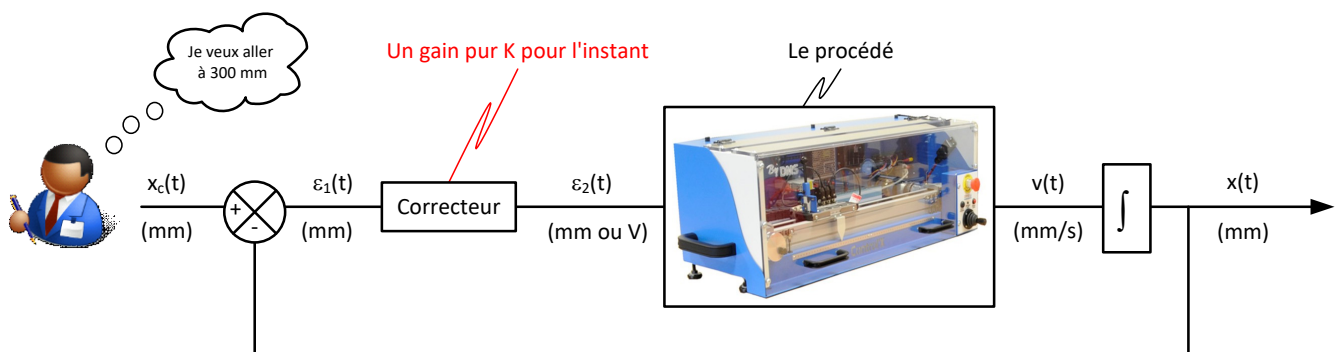


## TOUTE L'EQUIPE : mise en commun

Faire le point sur les comportements observés avec les différentes stratégies de pilotage mises en place. La stratégie la plus utilisée (dans le domaine de la commande d'axe notamment) lorsque l'on souhaite obtenir des performances de premier plan consiste à utiliser une structure de boucle fermée reposant sur un soustracteur suivi d'un correcteur.

Le correcteur que nous avons utilisé est un correcteur proportionnel : pour élaborer la tension de commande  $\varepsilon_2(t)$ , il multiplie l'écart  $\varepsilon_1(t)$  en sortie de soustracteur par un facteur constant  $K$ .

Il existe une multitude d'autres types de correcteurs, certains permettent de tenir compte de tous les écarts passés et de l'écart futur estimé.



**Le correcteur voit :** c'est lui qui observe l'écart  $\varepsilon_1(t)$  entre ce qui est souhaité et ce qui est réellement obtenu.



**Le correcteur pense :** c'est le cerveau de l'asservissement, c'est lui qui prend les décisions.

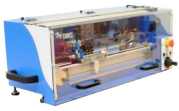


**Le correcteur parle :** c'est lui qui génère la commande  $\varepsilon_2(t)$  à destination du procédé.



**... mais le correcteur ment, il dramatise :** le coefficient  $K$  permet de tricher pour "faire croire" au procédé que l'écart n'est pas ce qu'il est réellement.

Grâce au coefficient  $K$ , le correcteur "fait croire" au procédé que l'écart ne vaut pas  $\varepsilon_1(t)$  mais  $\varepsilon_2(t) = K \cdot \varepsilon_1(t)$ . Si  $K = 5$  par exemple, il "fait croire" au procédé que l'on est 5 fois plus loin du but à atteindre qu'on ne l'est réellement.

**TOUTE L'EQUIPE : mise en commun**

On travaille maintenant dans l'onglet "Analyse temporelle" de Control'Drive. Réinitialiser le chariot et imposer un gain de correcteur de 0.05 (Menu "Correcteur"). Imposer une consigne en échelon de 300 mm d'amplitude : menu "Analyse temporelle", "Définir entrée", onglet "Echelon" puis cliquer sur "Lancer mouvement". Observer le positionnement de façon très qualitative.

Modifier le gain du correcteur que l'on prendra parmi {0.1, 1, 2, 5, 10} et, après avoir réinitialisé la position du chariot (bouton rouge "Réinitialiser"), lancer de nouveaux échelons. Une fois le chariot stabilisé, exercer y des perturbations à la main. Observez le comportement du système.

Il faut remarquer qu'en boucle fermée, à aucun moment, il n'a été nécessaire de faire de la modélisation pour pouvoir asservir la position du chariot. Les performances du positionnement sont par contre affectées par le choix du correcteur et ce correcteur ne se choisit en général pas au hasard. Ce n'est pas la modélisation qui permet d'asservir mais la modélisation par contre va être nécessaire voire indispensable pour nous permettre de choisir un correcteur qui optimise les performances de l'asservissement.

S'il vous reste du temps : analyser et tenter de comprendre la façon dont la position du chariot est technologiquement mesurée avant d'être soustraite à la consigne.

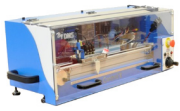
Pour conclure, on cite ici quelques explications extraites d'un cours de commande robuste de Pierre Apkarian, chercheur à l'ONERA :

Rappelons qu'un asservissement a deux fonctions essentielles :

- Façonner la réponse du système asservi pour lui imprimer le comportement désiré
- Maintenir ce comportement face aux aléas et fluctuations qui affectent le système pendant son fonctionnement (rafales de vent pour un avion, usure pour un système mécanique, changement de configuration pour un robot, etc.).

Cette seconde exigence est qualifiée de "robustesse à l'incertitude". Elle revêt une importance critique pour la fiabilité du système asservi. En effet, l'asservissement est typiquement conçu à partir d'un modèle idéalisé et simplifié du système réel. Pour fonctionner correctement, il doit donc être robuste :

- aux imperfections du modèle, c'est-à-dire aux écarts entre le modèle et le système réel
- aux dérives des paramètres physiques
- aux perturbations externes.



---

**FICHE DE FORMALISATION**

---

Cette fiche d'auto-évaluation est à remplir par chacun des étudiants ayant participé à la démarche de projet proposée dans ce TP.

<b>Savoir-faire</b>	<b>Je saurais refaire sans aide</b>	<b>Je saurais refaire avec de l'aide</b>	<b>Je ne saurais pas refaire</b>
<b>Analyser</b> l'architecture fonctionnelle et structurelle			
<b>Identifier</b> les fonctions des différents constituants			
<b>Repérer</b> les constituants dédiés aux fonctions d'un système			
<b>Identifier</b> la structure d'un système asservi : chaîne directe, capteur, commande, consigne, comparateur, correcteur			
<b>Identifier et positionner</b> les perturbations			

<b>Connaissances</b>	<b>Je saurais refaire sans aide</b>	<b>Je saurais refaire avec de l'aide</b>	<b>Je ne saurais pas refaire</b>
<b>Appréhender les analyses fonctionnelle et structurelle</b>			
<b>Architectures fonctionnelle et structurelle :</b> - chaîne directe - système asservi - commande en BO/BF			