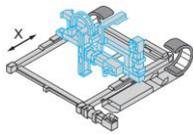


Control'X

Dossier technique



Control'X

Notice de mise en service



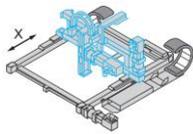
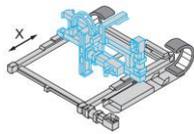


Table des matières

| | |
|----------------------------------------------------|----|
| 1) Caractéristiques techniques..... | 3 |
| 1.1) Contenu du colis et manutention | 3 |
| 1.2) Caractéristiques..... | 4 |
| 1.3) Fin de vie du produit | 4 |
| 2) Déclaration de conformité CE | 5 |
| 3) Conditions d'utilisation | 6 |
| 4) Installation | 6 |
| 4.1) Montage-réglage..... | 6 |
| 4.2) Montage de la carte NI PCIe..... | 7 |
| 4.3) Connexions | 8 |
| 4.4) Installation logicielle | 9 |
| 4.5) Premiers essais..... | 10 |
| 5) Consignes de sécurité..... | 16 |
| 6) Garantie..... | 16 |
| 7) Entretien et Maintenance de premier niveau..... | 17 |
| 7.1) Entretien..... | 17 |
| 7.2) Maintenance de premier niveau | 17 |



1) Caractéristiques techniques

Nom : Control'X

Type : CPGE3500



1.1) Contenu du colis et manutention

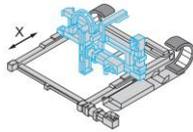
Le système est livré sur une palette (dimension 120cm x 80cm) dans un carton (dimension 105cm x 65cm x 53cm) pour un poids de 50Kg environ

Dans le carton sont placés les éléments suivants :

- Le système sur châssis
- Un câble de communication National Instrument (NI SHC-68-68-EPM)
- Un PC complet avec tous les logiciels préinstallés (**EN OPTION mais conseillé**)
- Une carte d'acquisition National Instrument (NI PCIe 6321) à connecter dans son propre PC si l'option PC n'est pas commandée
- Un ressort
- Un câble secteur
- La documentation d'accompagnement
- La notice de mise en service
- Le certificat CE

Cet ensemble est fragile et doit être manipulé avec précaution. Vous devez conserver l'emballage qui vous sera utile pour tout retour de matériel. Tout emballage qui ne sera pas d'origine sera remplacé et facturé lors du retour du matériel.

La manutention de Control'X doit se faire impérativement par deux personnes.



1.2) Caractéristiques

Alimentation 220 V / 50 Hz, consommation inférieure à 2 A.

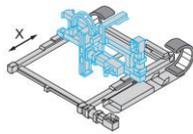
Interface de mesure informatique via câble National Instrument et PC sous Windows XP service pack 3 ou ultérieur.

Spécification thermique : 0-40° en fonctionnement.

Bruit aérien < 70 dB(A) au poste de travail.

1.3) Fin de vie du produit

En fin de vie le produit devra être recyclé il sera soit renvoyé à DMS soit confié à une entreprise qualifiée.



2) Déclaration de conformité CE

DECLARATION DE CONFORMITE CE



Société DMS
Aeroparc St Martin du Touch
12 rue de Caulet
31300 - TOULOUSE
FRANCE
Téléphone : + 33 (0)5 62 88 72 72
Télécopie : + 33 (0)5 62 88 72 79

La Société DMS, déclare ci-après que :

La machine référencée ci-dessous :

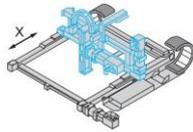
Nom : Control'X
Type : CPGE3500
Numéro de série :
Fonction : Maquette didactique

Est conforme aux dispositions pertinentes de l'annexe 1 de la directive "machines" (directive 2006/42/CE) et aux législations nationales la transposant (Décret no 2008-1156 du 7 novembre 2008).

Sous réserve de son utilisation dans le respect des recommandations de la notice d'instruction qui lui est jointe.

Fait à Toulouse, le 14 octobre 2015

Nom : DUBOUE **Signature**
Prénom : Jean-Paul
Position : Responsable industriel
Signataire et détenteur du dossier technique



3) Conditions d'utilisation

Ce système permet aux élèves de réaliser des activités pédagogiques. Lors de son utilisation, une seule personne manipule le système à la fois. Le système ne doit pas fonctionner sans surveillance de son opérateur.

La cartérisation ne doit en aucun cas être retirée. Aucun objet ne doit être introduit dans l'enceinte lors du fonctionnement.

4) Installation

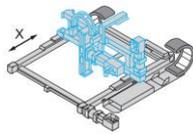
La zone choisie pour l'installation du système doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Table présentant une surface d'accueil plane **rigide et stable** d'au moins 900 mm × 500 mm
- Environnement suffisamment libérée pour assurer un espace dégagé en périphérie du système
- Zone bénéficiant d'un éclairage ambiant normal (au moins 300 lux).

4.1) Montage-réglage

Le système vous est livré monté.

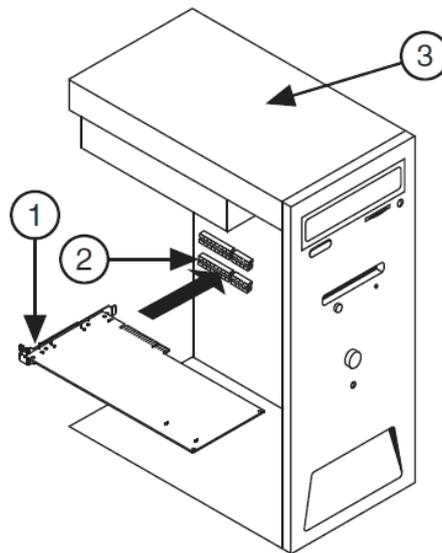
Les pieds sont réglables. S'assurer que les 4 pieds sont en contact avec le plan d'appui.



4.2) Montage de la carte NI PCIe

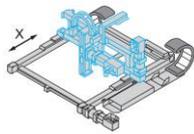
Effectuez les étapes suivantes pour installer la carte d'acquisition de données :

- a) Mettez l'ordinateur hors tension et débranchez-le.
- b) Ouvrez le boîtier de votre ordinateur et/ou retirez le cache de l'emplacement d'extension.
- c) Touchez une partie métallique de l'ordinateur pour décharger l'électricité statique.



Installation d'une carte PCI/PCI Express : (1) carte d'acquisition de données PCI Express, (2) emplacement système PCI Express, et (3) ordinateur PC doté d'un emplacement PCI Express

- d) Insérez la carte dans l'emplacement système PCI Express. Faites-la bouger doucement sans forcer, pour qu'elle se mette complètement en place. Pour obtenir des directives supplémentaires, reportez-vous à ni.com/pciexpress/f.
- e) Fixez le support de fixation de la carte au rail du panneau arrière de l'ordinateur.



4.3) Connexions

Deux éléments sont à connecter :

- Un câble secteur qui se connecte entre Control'X et le réseau électrique 220 V.
- Un câble de connexion blindé NI SHC 68-68 EPM qui se connecte sur la carte NI du PC d'une part et sur le coté droit de Control'X d'autre part

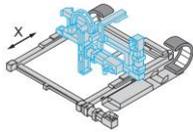
| Connexion coté PC | Connexion coté Control'X |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Câble de connexion : Extrémité VHDCI 68 points</p> |  <p>Câble de connexion : Extrémité SCSI 2 68 points</p> |
|  <p>Carte NI PCIe 6321</p> |  <p>Control'X</p> |

Avertissement



Ne jamais débrancher à chaud le câble qui relie l'ordinateur et Control'X : Si vous devez le débrancher faites-le :

- Ordinateur éteint
- Control'X hors tension



4.4) Installation logicielle

L'ordinateur qui pilote Control'X doit avoir les caractéristiques minimales suivantes :

- Double cœur et 2 Go de ram minimum avec Windows XP service pack 3 ou ultérieur
- Port PCI express

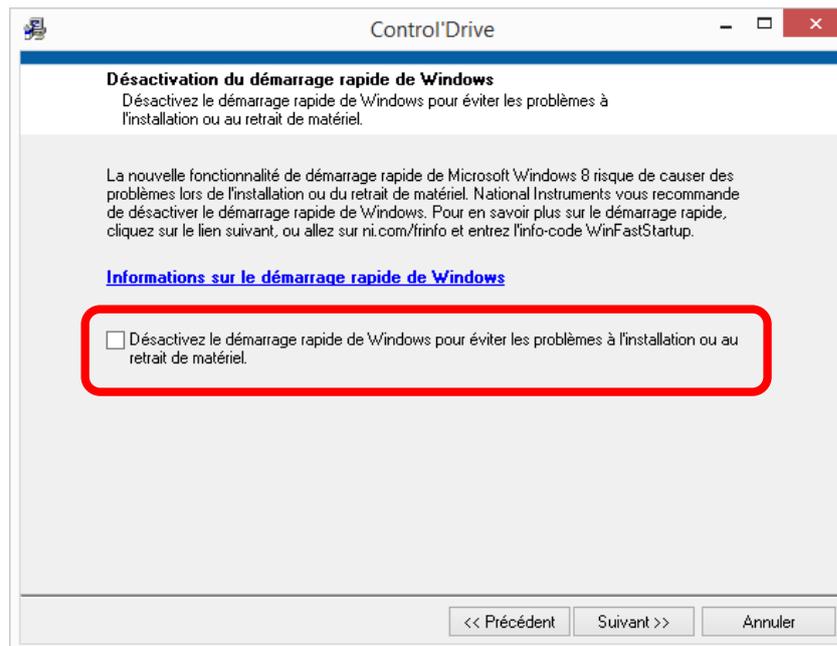
Le logiciel de pilotage privilégié de Control'X se nomme Control'Drive.

Il se trouve sur le DVD :

...\Logiciel de pilotage Control'Drive\Installeur Control'Drive\setup.exe

Il s'agit d'un installeur, il suffit de suivre les indications qui s'affichent à l'écran.

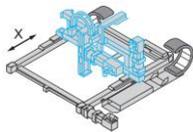
Si le message ci-dessous apparaît, décocher la case "Désactiver le démarrage rapide de Windows..."



Nota : En cas de réinstallation logicielle, il n'est pas nécessaire de désinstaller la version précédente.

Control'X peut aussi se piloter de façon 100 % ouverte sous Matlab Simulink. Pour cela il faut avoir installé Matlab-Simulink et les trois toolbox suivantes :

- Matlab coder
- Simulink coder
- Simulink desktop real-time

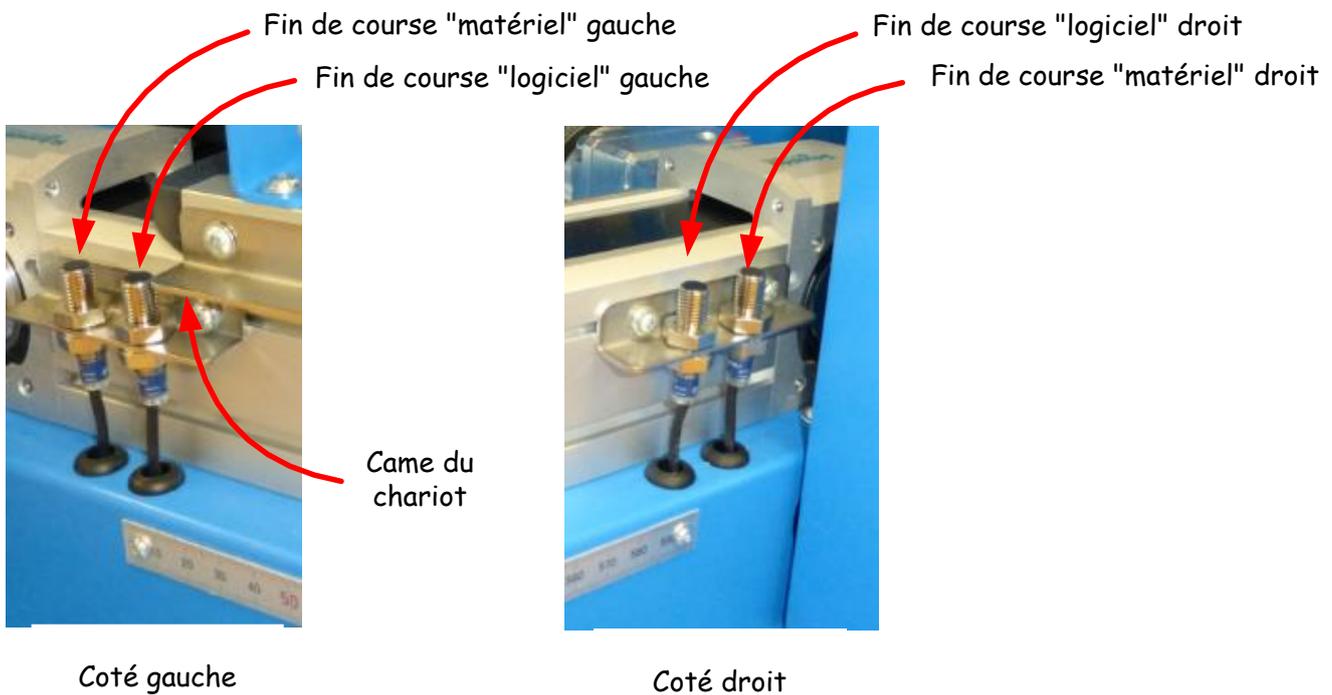


4.5) Premiers essais

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

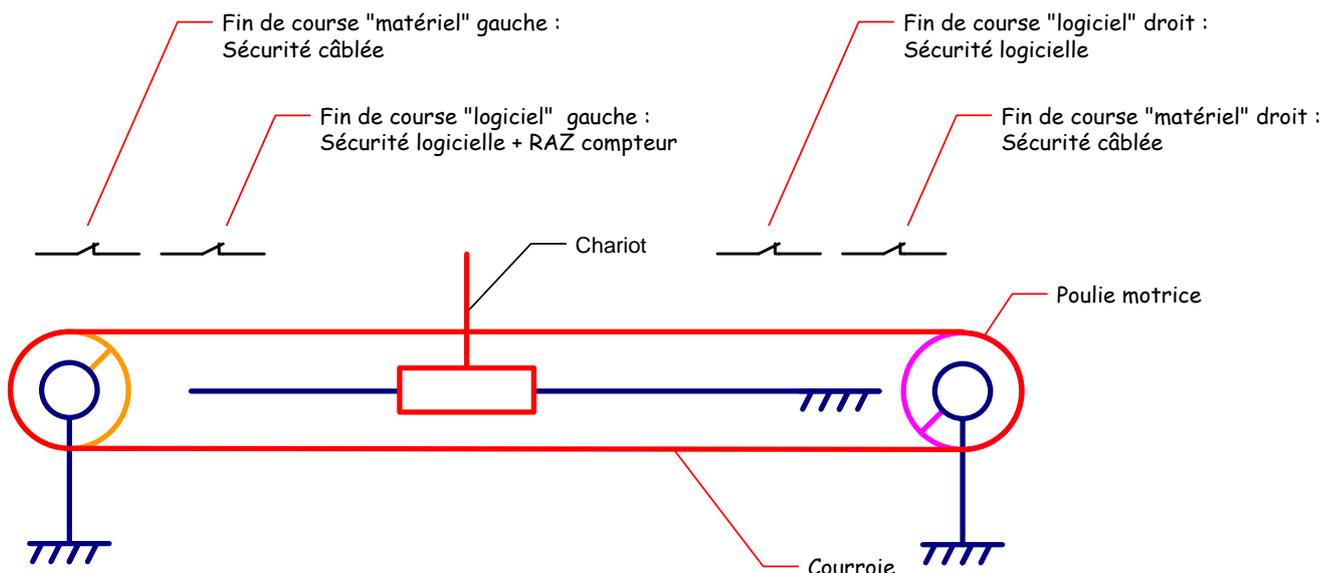
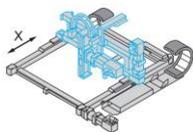


- 4.5.2) Vérifier que la came du chariot ne recouvre pas l'un des deux capteurs de fin de course "matériels" : ni gauche, ni droit. Si cela devait être le cas, déplacer à la main le chariot vers l'intérieur de façon à découvrir ce capteur de fin de course :

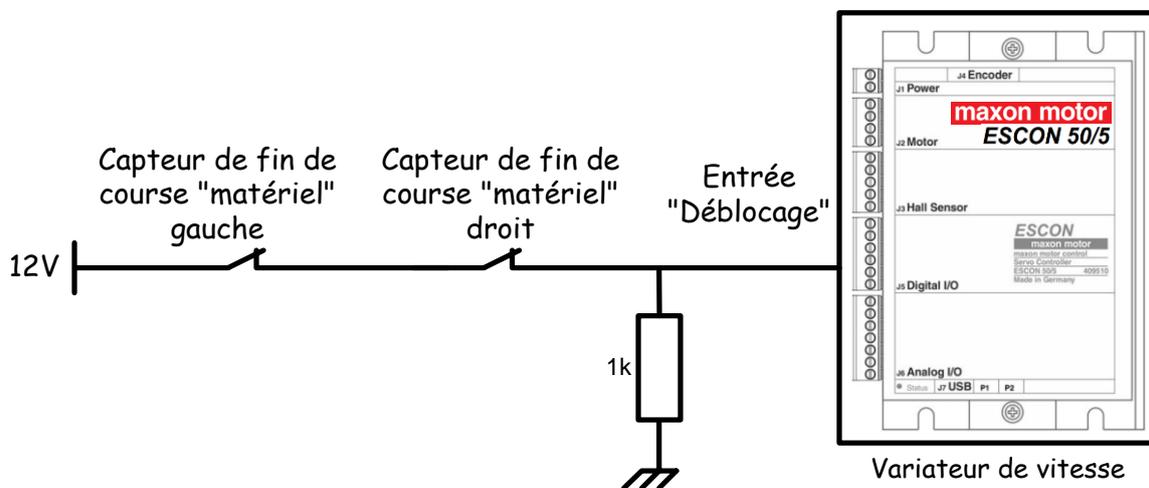


Coté gauche

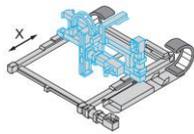
Coté droit



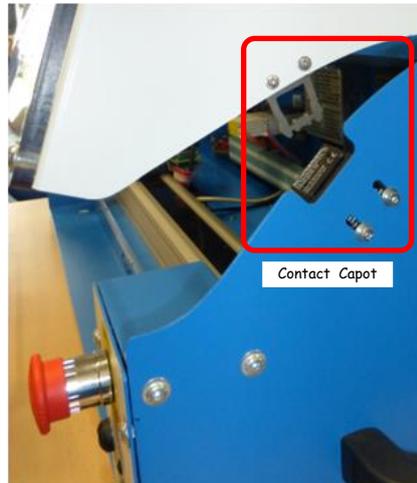
Les deux capteurs de fin de course "matériels" sont câblés en série pour attaquer l'entrée "Déblocage" du variateur de vitesse. En cas d'activation de l'un de ces deux capteurs, l'étage de sortie du variateur est déconnecté. Seule une remise en position manuelle du chariot hors des capteurs de fin de course "matériels" permettra d'alimenter à nouveau le moteur.



Les capteurs de fin de course "matériels" ne sont susceptibles d'être recouvert qu'en cas de problème logiciel pendant le pilotage.



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



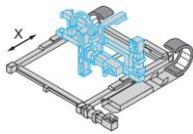
4.5.4) Sur le pupitre, déverrouiller l'arrêt d'urgence puis appuyer sur le bouton poussoir "Armer système" : Un relais autoalimenté colle et la diode verte "Variateur prêt" s'allume.



Au fond du carter, les diodes de tous les composants doivent s'allumer : diode verte allumée en continu.

- Alimentation de puissance : tension de 42 V présente en sortie





- Relais de sécurité Finder : système armé (Relais autoalimenté)



- Alimentation de commande : tensions de -12, +12 et +5V présentes en sortie

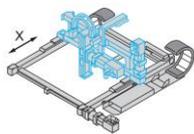


- Variateur de vitesse (interface de puissance) : étage de sortie activé

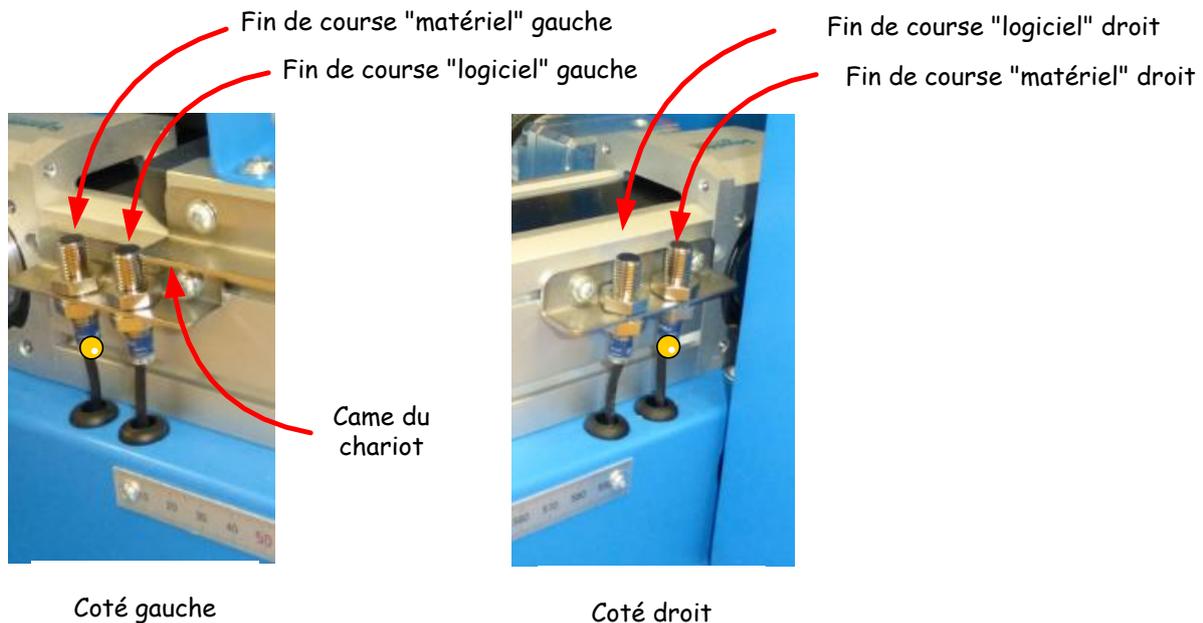


Si cette diode verte clignote, c'est qu'à priori, l'étage de puissance du variateur est déconnecté parce que le chariot est sur un capteur de fin de course "matériel".

Voir dans la section "Maintenance de premier niveau" à la fin de ce document les fonctions des diodes du variateur.



- Les diodes des deux capteurs de fin de course "matériels" doivent être allumées



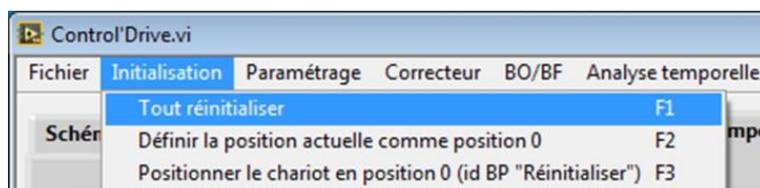
4.5.5) Lancer maintenant le logiciel Control'Drive :

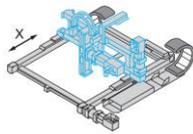


Sauf s'il ne l'est déjà, le chariot de Control'X doit s'initialiser à gauche sur le capteur de fin de course "logiciel".

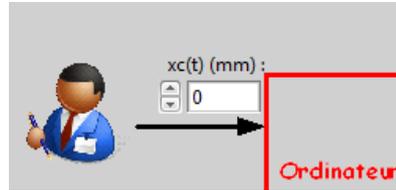


Il est préférable de mettre l'axe sous tension avant de lancer ControlDrive. Sinon la remise en condition initiale (chariot à gauche) ne sera pas effectuée et il faudra la faire manuellement :

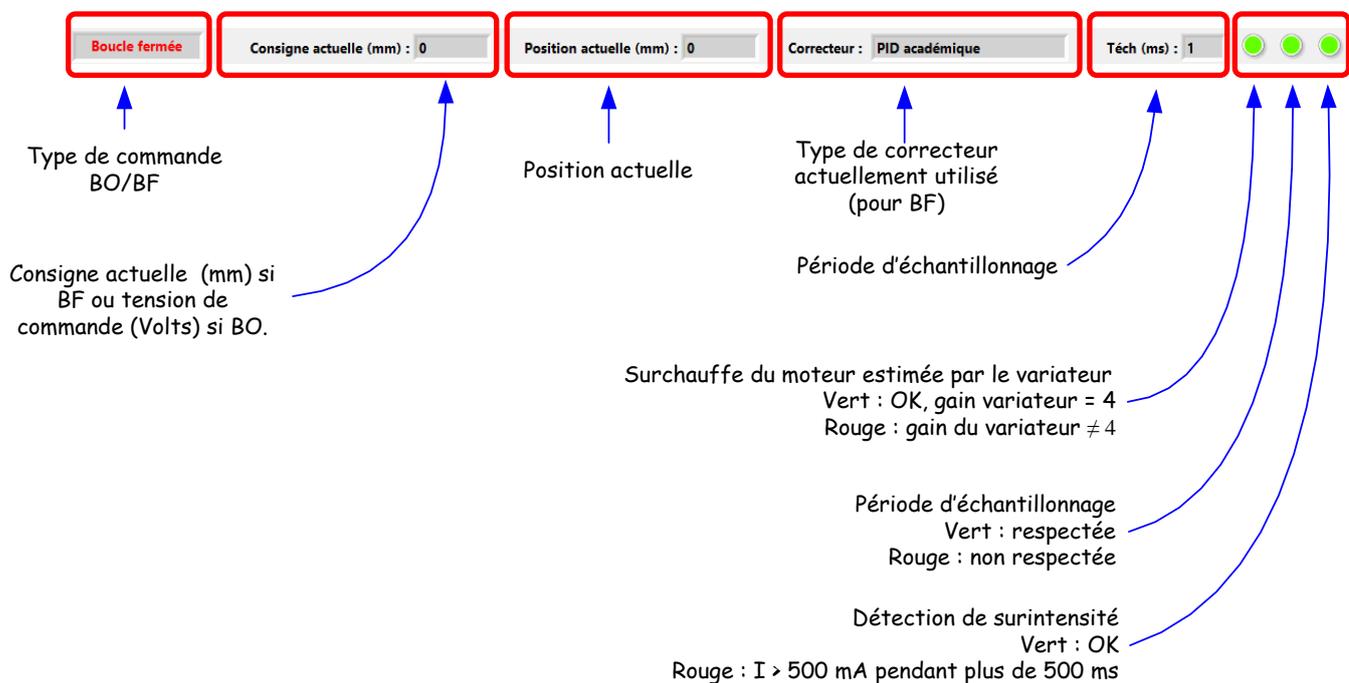




Pilotez le système avec différents échelons d'amplitude 50 mm. Pour cela, agir sur les petites flèches "haut" et "bas" de la commande ci-dessous ou saisir une valeur numérique dans le champ blanc et valider par entrée.



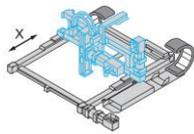
On peut observer fréquemment la barre d'état en bas de Control'Drive qui regroupe les informations essentielles relatives à l'état de Control'X :



2.5.1) Mettre fin à une session de travail :

- Quitter Control'Drive
- Appuyer sur le bouton d'arrêt d'urgence
- Eteindre l'alimentation générale au dos du carter

Le fonctionnement de Control'X est maintenant validé. La suite logique de la découverte du système est le TP 0 : TP corrigé écrit pour les professeurs pour une découverte rapide de Control'X et du logiciel Control'Drive.



5) Consignes de sécurité

Bien que le système ne présente pas de risque majeur, il s'agit cependant d'une machine alimentée en courant alternatif 220 V dans laquelle des organes se déplacent. Il existe donc un minimum de consignes à respecter pour s'affranchir de tout risque.

S'assurer que l'espace est dégagé sur une zone de 1 mètre sur le pourtour du système.

Ne pas nettoyer ou intervenir sur la machine sans avoir débranché la prise secteur.

Sauf autorisation ponctuelle, tout démontage sur la machine est interdit.

6) Garantie

Tout matériel défectueux sera retourné à DMS dans son emballage d'origine frais de transport et assurance payés par le client, après accord du support technique D.M.S. L'emballage doit être conservé à l'abri dans un endroit sec.

DMS ne peut en aucun cas être tenu responsable des équipements lors de leur transport du client aux ateliers.

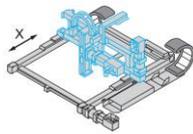
DMS s'engage à remédier au défaut constaté dans les meilleurs délais, soit par réparation, soit par remplacement du matériel.

Seuls les frais de réexpédition et de réparation (ou remplacement) sont à la charge de DMS.

L'intervention de DMS au titre de sa garantie ne fera pas courir une nouvelle période de garantie.

La garantie consiste dans le cadre du remplacement et (ou) la réparation à nos frais, pièces et mains d'œuvre, de tous matériels (et logiciels) défectueux selon les modalités suivantes :

- Durée de la garantie : 12 mois à partir de la date de livraison
- Exercice de la garantie : DMS s'engage à remédier aux éventuels défauts constatés dans les meilleurs délais ; toute réparation sera accompagnée d'un rapport d'expertise. Les frais occasionnés par les opérations de garantie seront à la charge de DMS
- Défectuosités hors garantie :
 - Une utilisation abusive pour laquelle le système n'est pas prévu dans la notice d'instruction.
 - Une modification apportée au système sans l'accord du constructeur.
 - Une négligence ou une action de maintenance inappropriée.



7) Entretien et Maintenance de premier niveau

7.1) Entretien

Avant toute intervention sur le système, il vous faut :

- Vous assurer qu'il n'y a personne autour du système.
- Couper l'alimentation : retirer la prise secteur.

Afin de maintenir le niveau de sécurité du système, les pièces changées devront être identiques aux pièces d'origine. Pour toute référence contacter le service SAV de DMS soit par téléphone au 05-62-88-72-72 soit par mail à l'adresse controlx@dmseducation.com

Tous les mois passer un chiffon sec qui ne peluche pas sur l'ensemble du système.

7.2) Maintenance de premier niveau

Avec une utilisation normale du système aucune pièce ne devrait être à changer pour des raisons d'usure.

| Problème rencontré | Causes possibles | Solutions |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Après appui sur le bouton du pupitre "Armer système", la diode verte du relais de sécurité ne s'allume pas. | Pas d'alimentation secteur | Basculer l'interrupteur général de mise sous tension au dos de Control'X sur la position 1 |
| | Fusible général fondu | Changer le fusible (2A F, 5 x20 mm) (à coté de l'interrupteur général) |
| | Le bouton d'arrêt d'urgence est enfoncé | Déverrouiller l'arrêt d'urgence |
| | Le capot de Control'X n'est pas fermé | Fermer le capot |
| La diode verte de l'alimentation de puissance ne s'allume pas. | Protection thermique activée Fusible de l'alimentation fondu | Attendre que l'alimentation refroidisse Changer le fusible |
| La diode verte de l'alimentation de commande ne s'allume pas. | Fusible de l'alimentation fondu | Changer le fusible |
| La diode verte "Variateur prêt" du pupitre ne s'allume pas. | Problème de variateur : le variateur n'est pas dans un état déclaré "Prêt" | Voir les codes couleur ci-après |
| La diode du variateur de vitesse clignote lentement en vert | Le chariot est sur ses capteurs de fin de course "matériels" : le variateur est prêt mais dans un état dit "bloqué", son étage de sortie est déconnecté. | Déplacer à la main le chariot de façon à lui faire quitter les capteurs de fin de course "matériels" |
| La diode du variateur de vitesse clignote rapidement en vert, est rouge ou clignote en rouge. | Problème de variateur | Voir les codes couleur ci-après |

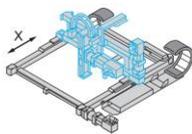


Schéma de câblage général de Control'X

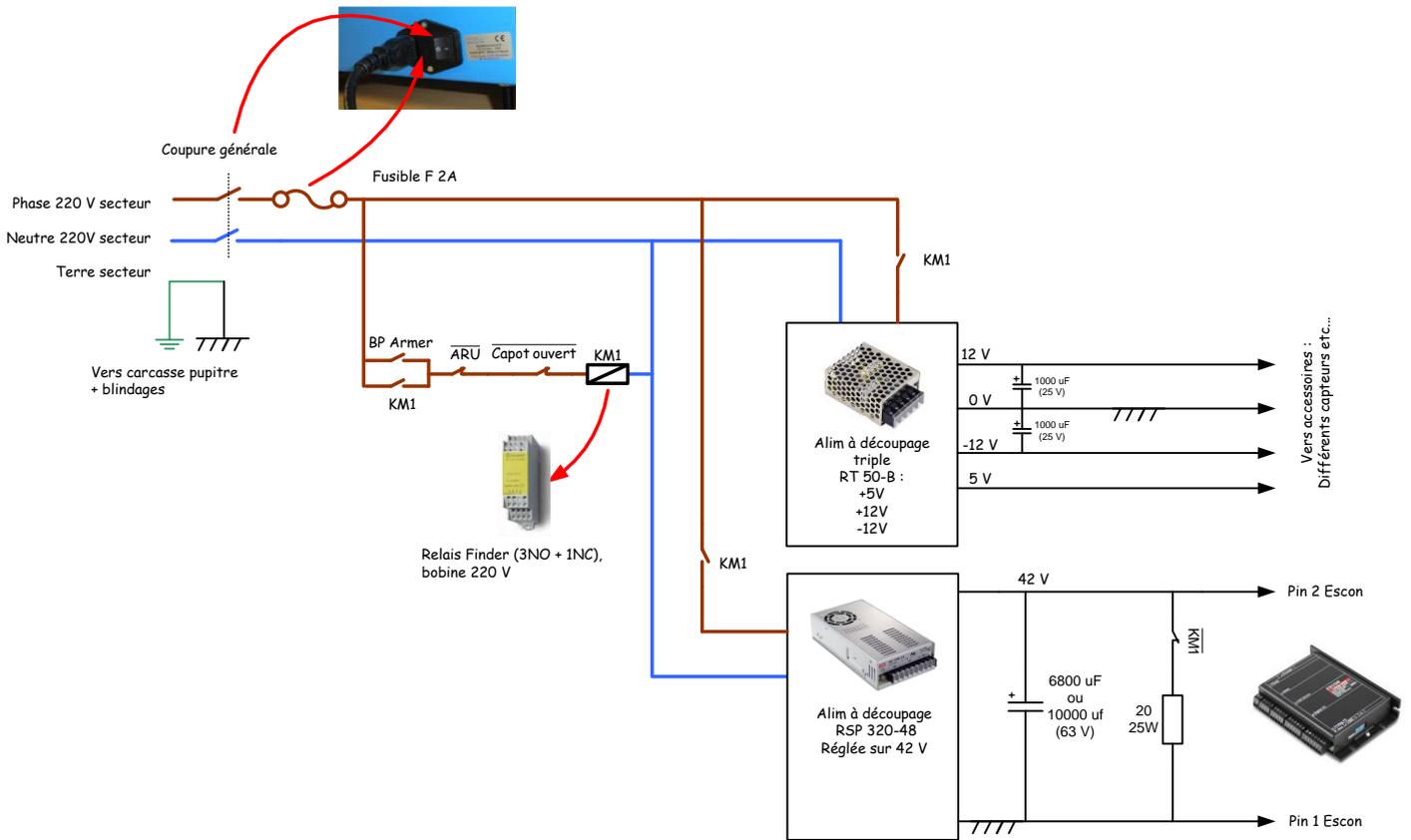
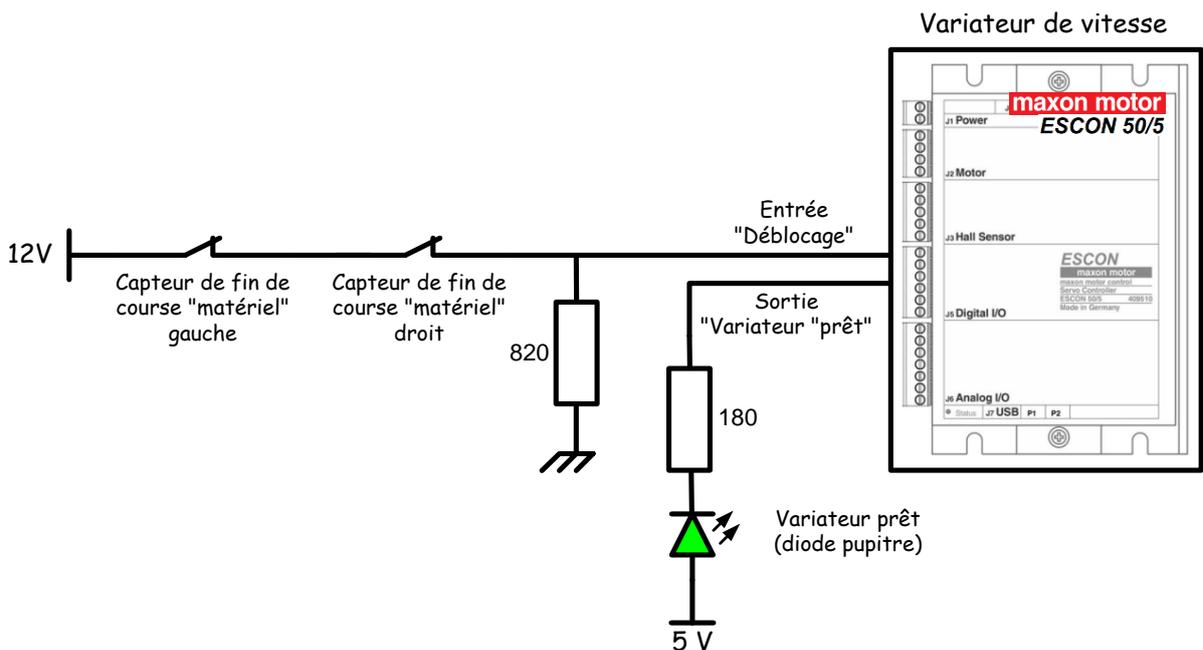
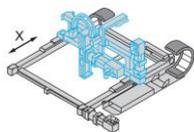
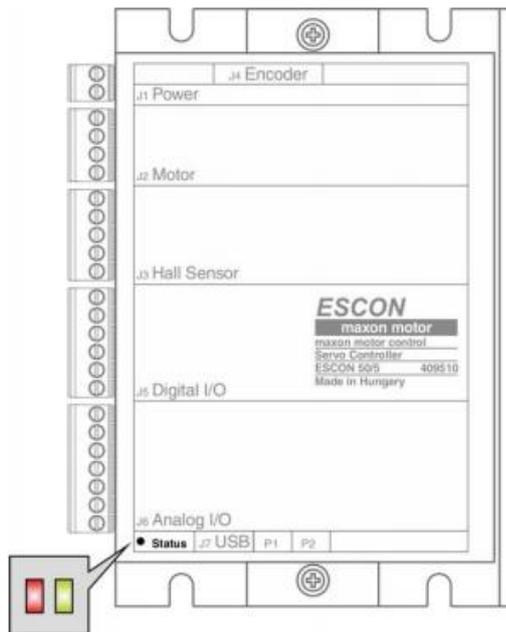


Schéma de câblage des sécurités "matérielles"





Codes couleur propres au variateur :

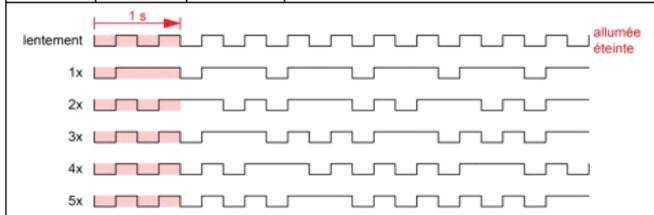


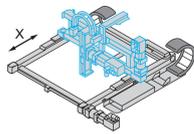
| LED | | État/Défaut | |
|--------------------|---------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verte | Rouge | | |
| éteinte | éteinte | INIT | |
| clignote lentement | éteinte | BLOCAJE | |
| allumée | éteinte | DÉBLOCAJE | |
| 2x | éteinte | ARRÊT; IMMOBILISATION | |
| éteinte | 1x | ERREUR | <ul style="list-style-type: none"> +Vcc Erreur surtension +Vcc Erreur sous-tension +5 VDC Erreur sous-tension |
| éteinte | 2x | ERREUR | <ul style="list-style-type: none"> Erreur surcharge thermique Erreur courant de surcharge Erreur protection contre les surcharges de l'étage de puissance |
| éteinte | 3x | ERREUR | <ul style="list-style-type: none"> Erreur codeur rupture de câble Erreur codeur polarité Erreur génératrice DC rupture de câble Erreur génératrice DC polarité |
| éteinte | 4x | ERREUR | Erreur valeur de consigne MLI hors plage admise |
| éteinte | 5x | ERREUR | <ul style="list-style-type: none"> Erreur logique de commutation capteur à effet Hall Erreur séquence de commutation capteur à effet Hall Erreur fréquence capteur à effet Hall excessive |
| éteinte | allumée | ERREUR | <ul style="list-style-type: none"> Erreur Auto Tuning identification Erreur interne de logiciel |

Chariot sur ses capteurs de fin de course matériels

Etat "normal" : variateur "prêt" et "débloqué"

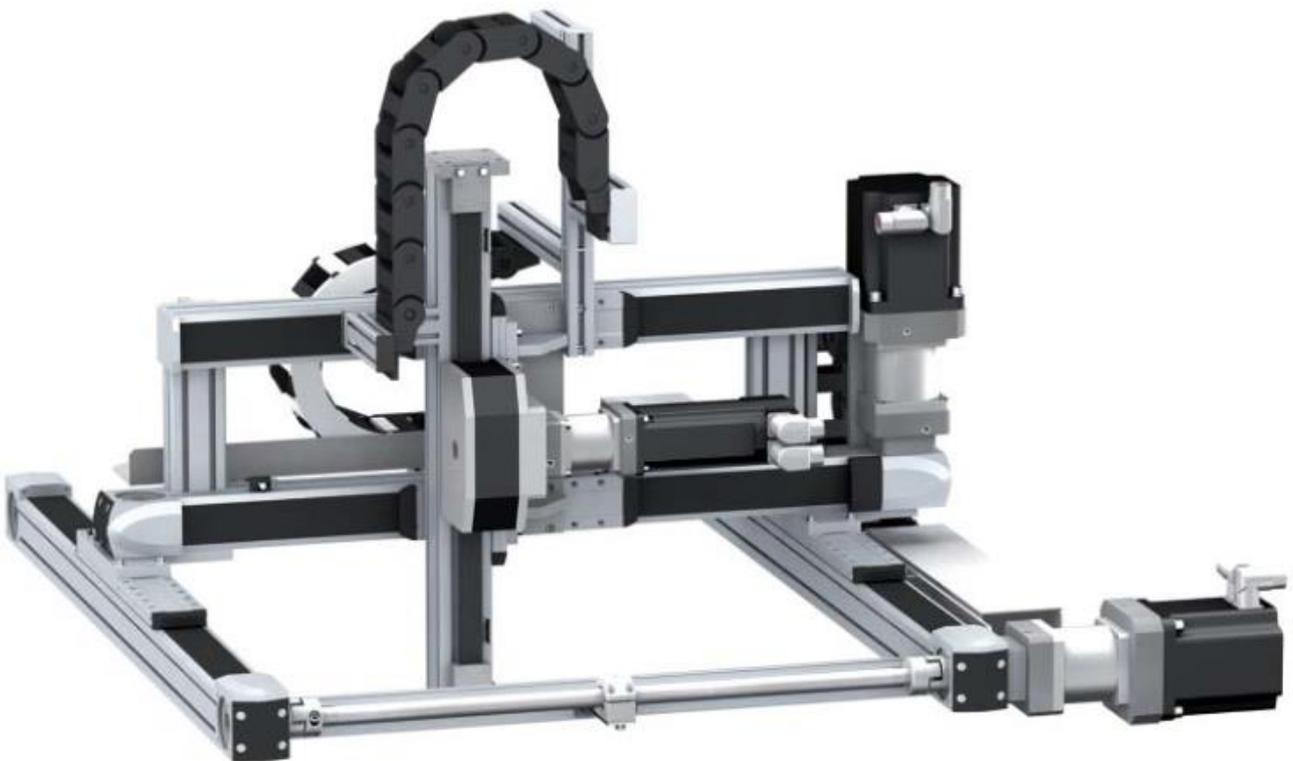
Tableau 3-22 LED – Interprétation des affichages d'état





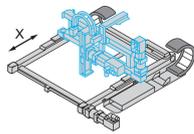
Control'**X**

Présentation du produit industriel



Ctrl + clic pour suivre un lien

| | |
|--------------------------------------------------------|--------|
| Présentation | page 2 |
| Cahier des charges fonctionnel | page 6 |
| Diagrammes SysML du produit industriel | page 7 |

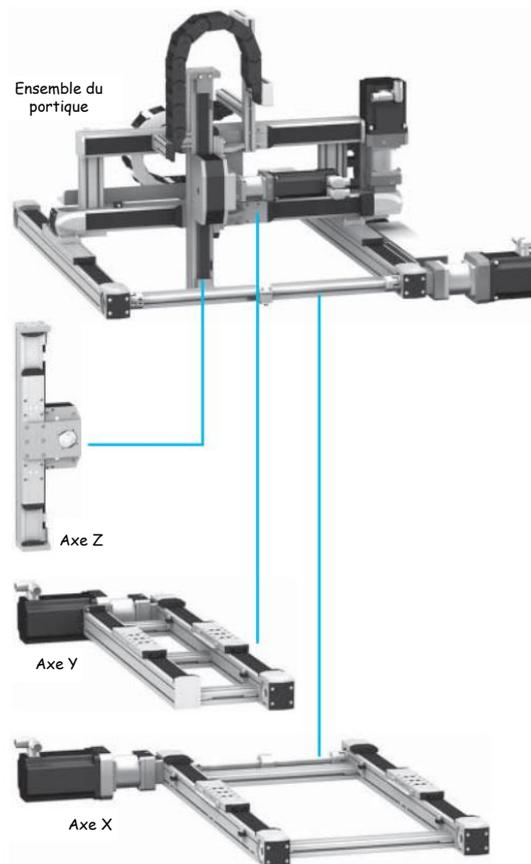


Présentation

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

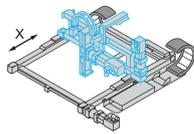
Le système industriel duquel est extrait Control'X est un robot portique 3 axes Lexium Max R du constructeur Schneider Electric. Ce robot portique est constitué :

- 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 Lexium CAS 3 assurant un déplacement selon la direction Z.

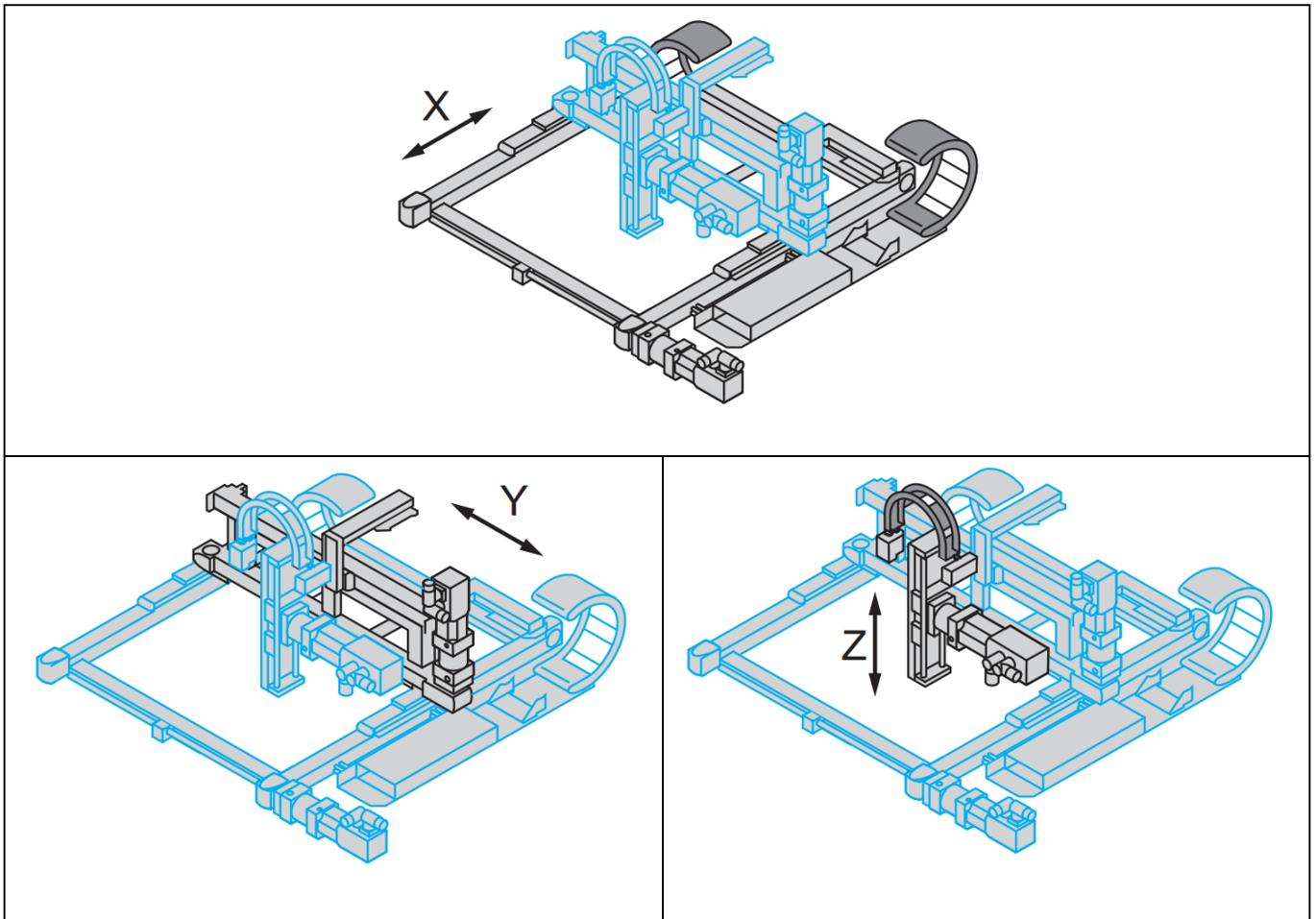
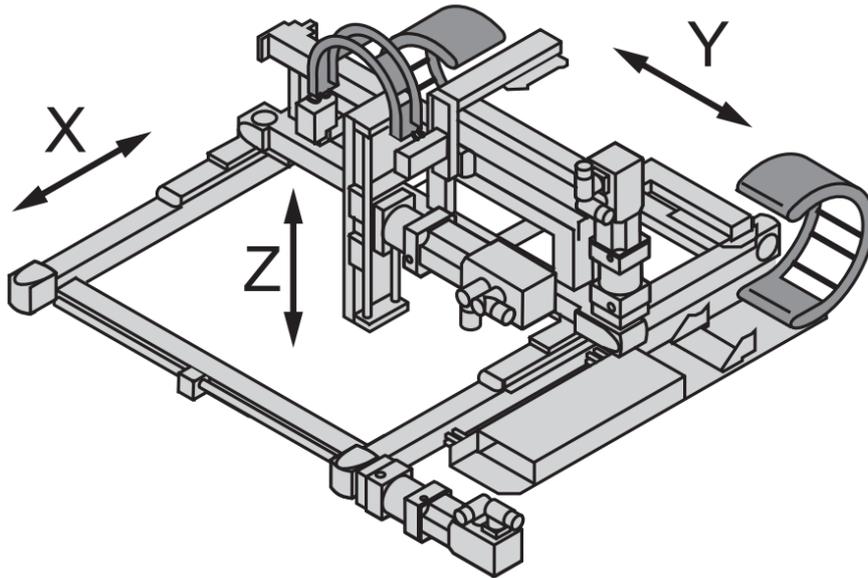


Ce robot portique permet d'apporter une solution fiable pour la manipulation de charges sur de longues distances : selon le modèle, des charges jusqu'à 50 kg peuvent être déplacées jusqu'à 5500 mm en X, 1500 mm en Y et 1200 mm en Z. L'entraînement de chaque axe est assuré par courroie crantée. Les guidages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

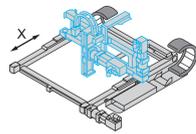
Ces robots portiques, commercialisés préassemblés, offrent différentes options de configuration pour chaque axe dont la longueur, le choix entre différentes tailles et types de profilés, le choix entre différents types de guidages ...



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

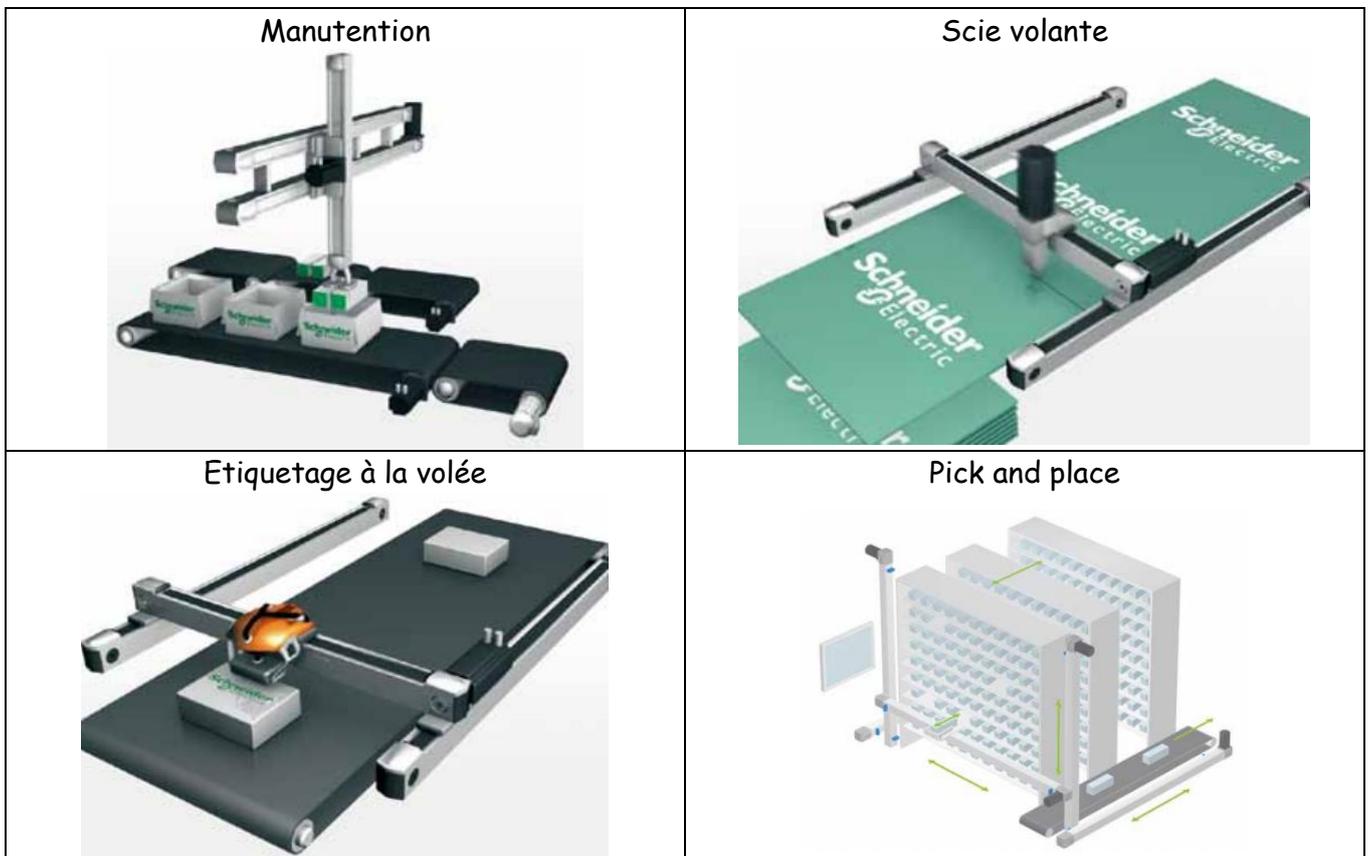


Vues des 3 axes X, Y et Z

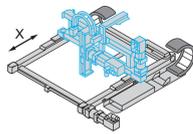


Vue de l'armoire de commande

Les applications typiques de ces portiques relèvent du "pick and place", de la manutention, de la palettisation, du tri, de l'inspection/mesure de pièces, de l'étiquetage...



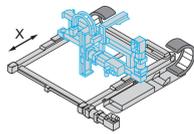
Applications typiques



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.

Le moteur est souvent en prise directe avec la poulie motrice ou, s'il y a un réducteur, le rapport de réduction est généralement faible.



Cahier des charges fonctionnel

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Les exigences propres aux opérations de "pick and place" concernent la cadence et la précision de positionnement.

On présente ci-dessous un cahier des charges typique dans le contexte d'utilisation qu'est le placement de composants électroniques :

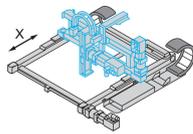
| Fonctions | Critères | Niveaux | Flexibilité |
|----------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|
| Permettre de positionner un composant électronique | Cadence de pose | 3000 composants à l'heure | mini |
| | Précision (Répétabilité) | ± 0.1 mm | maxi |
| | Course en X | 300 mm | ± 10 mm |

Le cahier des charges précédent est le cahier des charges orienté client, il peut être retraduit dans le domaine du concepteur de la machine : Cela permet en particulier de donner naissance à un cahier des charges orienté "élève" qui peut être dégradé à loisir selon les objectifs pédagogiques visés.

On pourra commencer par exemple certains TP avec un cahier des charges peu contraignant du type ci-dessous :

| Fonctions | Critères | | Niveaux |
|-------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Permettre de positionner une pièce. | C1 | Système asymptotiquement stable | |
| | C2 | Amortissement caractérisé par une marge de gain et une marge de phase dans le domaine fréquentiel ou encore par un premier dépassement dans le domaine temporel. | $M_G > 10$ dB $M_\varphi > 45^\circ$ $D_1 < 25\%$ |
| | C3 | Rapidité caractérisée par une pulsation de coupure à 0dB de la boucle ouverte dans le domaine fréquentiel ou encore par son temps de réponse à 5 % dans le domaine temporel. | $\omega_{co-0dB} > 15$ rad/s $T_{5\%} < 500$ ms |
| | C4 | Précision caractérisée par son écart statique (écart permanent pour une entrée en échelon) | $\varepsilon_S < 0.5$ mm |

Un dépassement de 25% est sans nul doute très supérieur à ce qui est attendu dans le contexte décrit.



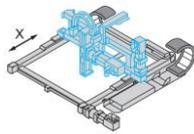
Diagrammes SysML du produit réel

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

L'axe linéaire étudié ici est utilisé dans l'industrie pour réaliser des opérations de "pick and place". Il s'agit d'opérations au cours desquelles une pièce, en cours de fabrication, doit être déplacée le plus rapidement possible entre deux postes d'assemblage.

La frontière d'isolement du système étudié comprend tout le système présenté, il englobe tous les éléments de la chaîne d'énergie et de la chaîne d'information.

Ici, à venir, les diagrammes SysML du produit industriel



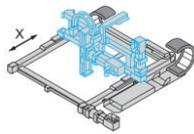
Control'X

Présentation du produit didactique



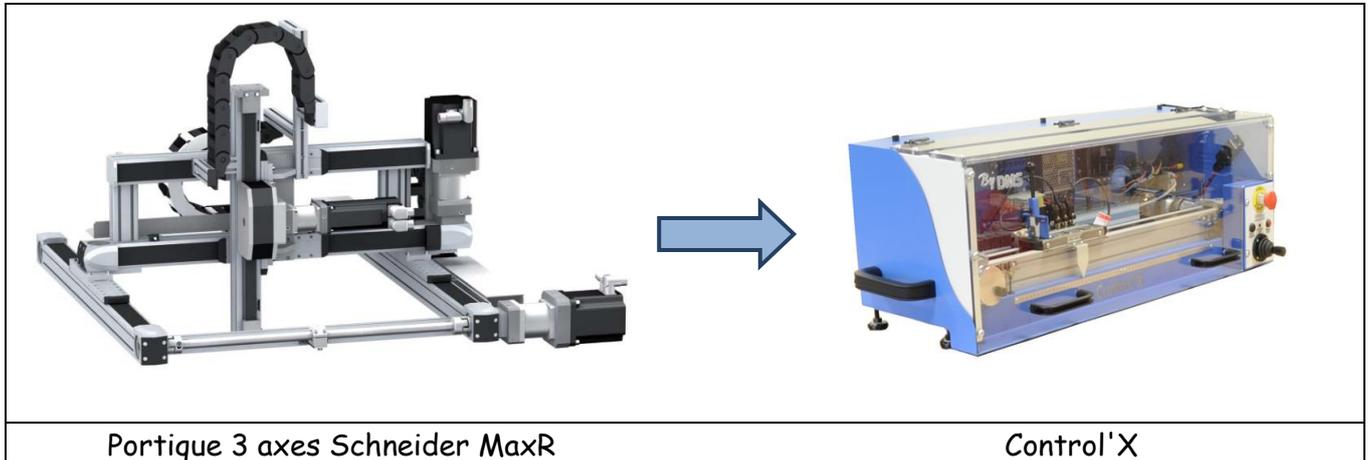
Ctrl + clic pour suivre un lien

| | |
|-------------------------------------------------------|---------|
| Du produit réel au produit didactique | Page 2 |
| Présentation de la chaîne asservie | Page 6 |
| Chaîne fonctionnelle | Page 11 |
| Diagrammes SysML de Control'X | Page 12 |
| Les écarts autour de Control'X | Page 16 |



Du produit réel au produit didactique

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



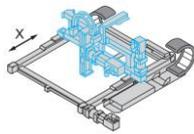
L'axe linéaire étudié ici est utilisé dans l'industrie pour réaliser des opérations de "pick and place". Il s'agit d'opérations au cours desquelles une pièce doit être positionnée avec rapidité et précision d'un poste à un autre.

Dans ce contexte d'utilisation, la particularité mécanique de Control'X tient au fait que les efforts extérieurs exercés sur l'axe sont nuls : le moteur sert uniquement à vaincre les efforts inertiels et les résistances passives internes au mécanisme. Le moteur est souvent en prise directe avec la poulie motrice ou, s'il y a un réducteur, le rapport de réduction est généralement faible.

L'axe linéaire commercialisé par DMS est une version didactique de l'axe industriel commercialisé par l'industriel Schneider. Il est en tout point identique à celui utilisé dans l'industrie en ce qui concerne sa partie mécanique : réducteur, poulies-courroie, chariot, guidages.

Schneider, ne commercialise plus de moteur à courant continu à balais mais seulement des moteurs à courant continu sans balais. Ces moteurs brushless sont dans l'industrie en train de supplanter les moteurs à balais. Ils sont pilotés par des variateurs de vitesse spécifiques (série Lexium chez Schneider). Dans ces technologies brushless, le couple {variateur + moteur} n'est guère dissociable. Pour des questions de performance, chaque composant est en effet conçu de façon interdépendante.

Les variateurs de vitesse de chez Schneider, s'ils sont très perfectionnés, ne se prêtent pas tellement à une utilisation pédagogique, notamment dans le cadre des programmes de sciences industrielle pour l'ingénieur des classes préparatoires aux grandes écoles.



En effet, ces variateurs embarquent des boucles internes (courant, vitesse, position parfois) avec un correcteur spécifique, des fréquences d'échantillonnage spécifiques, des saturations spécifiques pour chacune des boucles. Les sécurités mises en place sont très nombreuses : on rencontre souvent des seuils d'intensité programmable, des rampes de vitesse, des protections thermiques évoluées...

Les algorithmes mis en œuvre sont fortement non linéaire et rarement documentés de façon exhaustive.

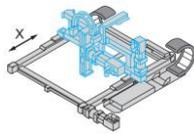
Chaque algorithme faisant partie de la recette métier de l'industriel, les différentes fonctions sont exposées mais les données qui y sont relatives ne sont pas communiquées (algorithmes précis de pilotage, gains des correcteurs utilisés par exemple...)



L'industriel qui achète un axe recherche avant tout un produit performant et n'est pas forcément intéressé par toutes les finesses du fonctionnement interne du couple {variateur + moteur}. A un niveau pédagogique, c'est presque l'inverse, on cherche avant tout à savoir ce qui est fait, ce qui se cache au niveau des algorithmes de pilotage.

Un variateur trop évolué comme ceux de chez Schneider, ne peut être vu que comme une "boite noire". Les possibilités de modélisation du couple {variateur + moteur} s'en trouvent fortement affectées. La modélisation sous forme d'un modèle de connaissance notamment n'est tout simplement guère envisageable.

Pour des raisons pédagogiques, DMS a fait le choix d'utiliser un moteur à courant continu à balais et s'est tourné vers le constructeur japonais Sanyo Denki pour l'excellente qualité de ses moteurs (conçus et fabriqués au Japon). Leurs fiches techniques sont très bien documentées ce qui représente un avantage non négligeable lorsqu'il s'agira de mettre en place des modèles de connaissance.

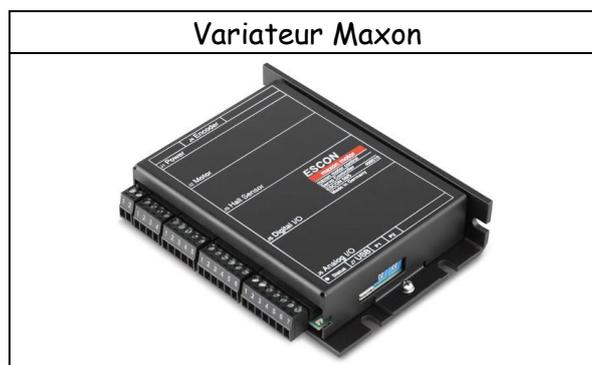


Le moteur est alimenté non pas par un variateur de chez Sanyo pour les mêmes raisons que celles déjà évoquées avec Schneider : variateur très performant mais de type "boite noire" en ce qui concerne son fonctionnement et donc sa modélisation.

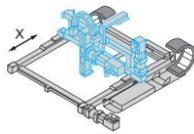


Dans le cas d'un moteur à balais, le couple {variateur + moteur} ne forme plus forcément un couple indissociable et c'est un variateur du fabricant suisse Maxon qui est utilisé.

Ce variateur que Maxon nomme un servo-variateur est architecturé de façon à autoriser un bouclage interne en courant et/ou en vitesse (d'où le nom servo-contrôleur). Il est cependant réglé ici simplement en amplificateur de tension de gain pur. Le gros avantage de ce variateur est que son mode de fonctionnement est entièrement paramétrable ainsi que toutes les sécurités qu'il embarque. Sa modélisation pourra alors se faire dans de bonnes conditions.



Sur la version didactique, de nombreux capteurs ont été ajoutés mais le seul indispensable à l'asservissement de l'axe dans son contexte d'origine est l'encodeur incrémental monté en bout d'arbre moteur. Notamment, la règle magnétique qui permet de mesurer directement la position du chariot est mise en place uniquement pour des raisons pédagogiques. On pourrait se demander en effet pourquoi Control'X est asservi en position linéaire sur la base d'une mesure de position angulaire de l'arbre de son moteur alors qu'une règle magnétique est présente sur le chariot.

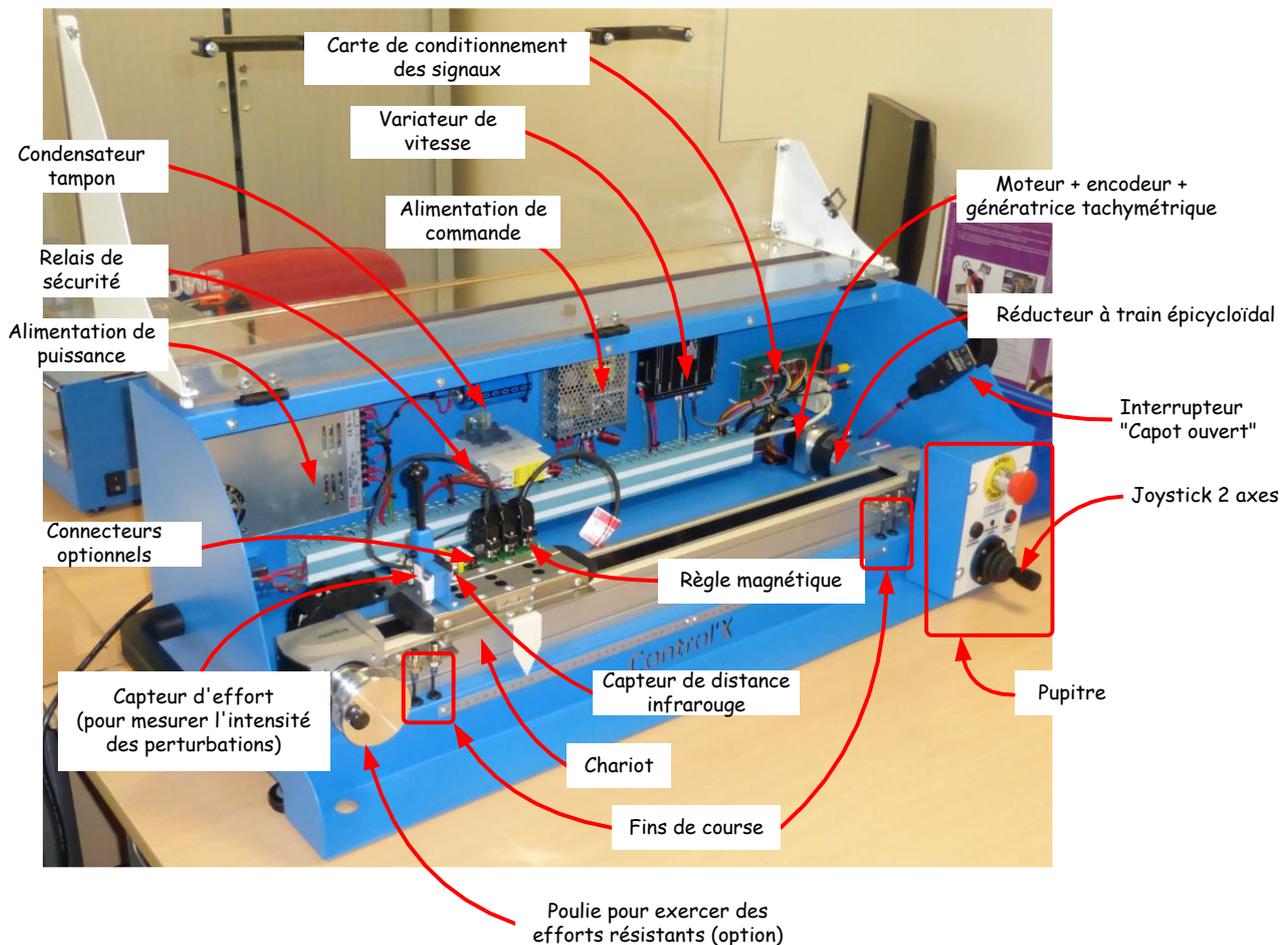


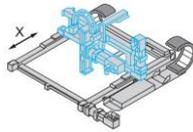
La règle magnétique permettra d'estimer les défauts de positionnement liés notamment à la déformabilité de la courroie et au jeu du réducteur. Elle permettra de caractériser la transformation géométrique de la chaîne de transmission de puissance.

Parmi les capteurs présents pour des raisons pédagogiques, on trouve :

- Capteur de tension en sortie de carte de commande (entrée de variateur)
- Capteur de tension moteur
- Capteur d'intensité moteur
- Génératrice tachymétrique montée en bout d'arbre moteur
- Capteur d'efforts exercés sur le chariot
- Règle magnétique
- Capteur de tension pour signaux optionnels (encodeur supplémentaire, accéléromètre, capteur de distance infrarouge)

Enfin dans sa version didactique, la partie logicielle n'est pas celle utilisée initialement par l'industriel qui généralement dispose d'un logiciel propriétaire développé spécifiquement pour une application.





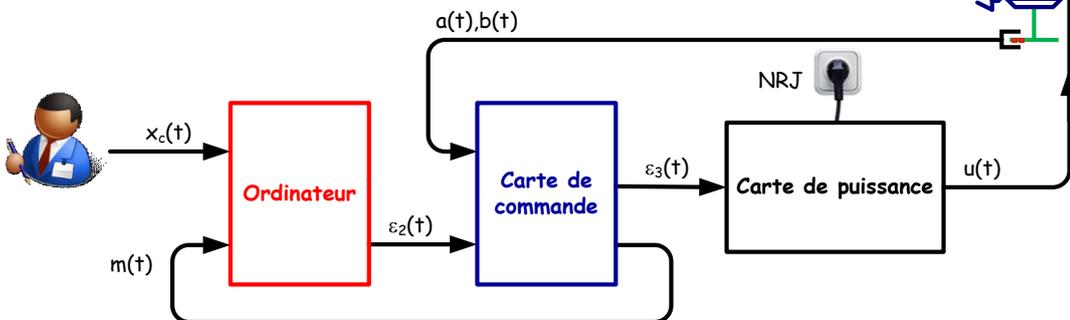
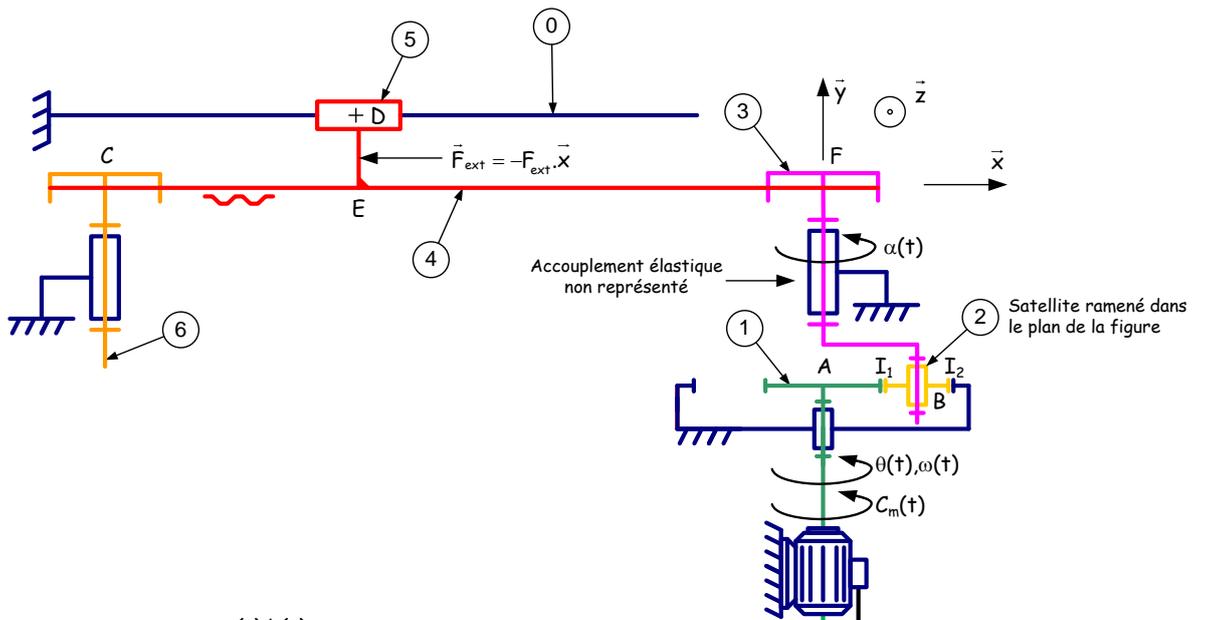
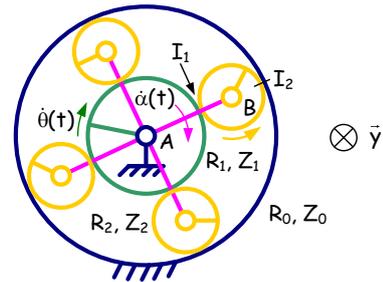
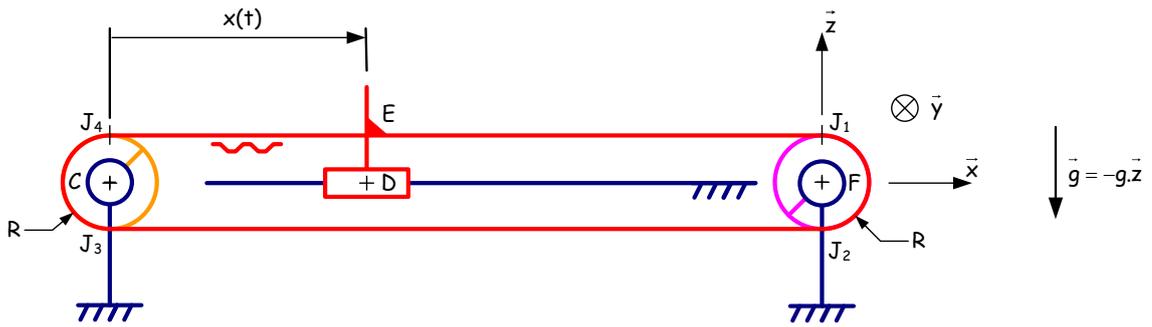
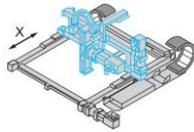
Présentation de la chaîne asservie

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

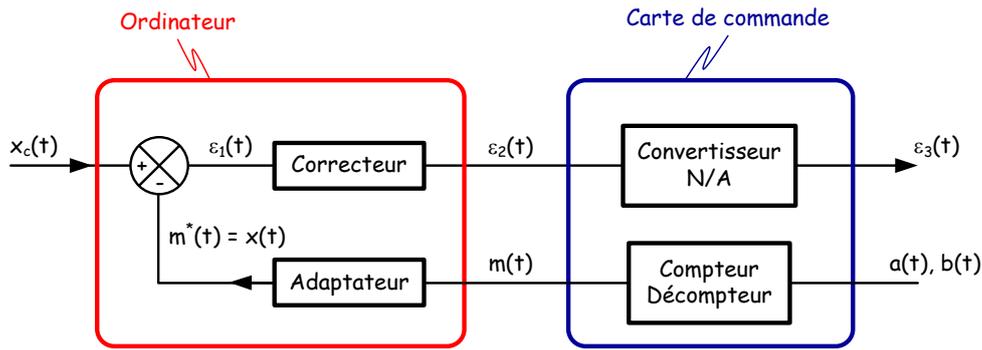
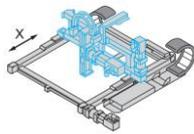
Les schémas ci-après présentent l'architecture de Control'X :

Control'X est un axe linéaire asservi en position. Il repose principalement sur les éléments matériels suivants :

- Un PC qui fait tourner un logiciel de commande d'axe nommé Control'Drive
- Une carte de commande
- Une carte de puissance
- L'axe proprement dit : moteur, réducteur, poulies-courroie, chariot et codeur incrémental



Organisation générale



Zoom sur les fonctions remplies par l'ordinateur et la carte de commande

Le schéma ci-dessous met en évidence l'organisation structurelle et fonctionnelle des différents composants nécessaires à la mise en œuvre de l'asservissement de position.

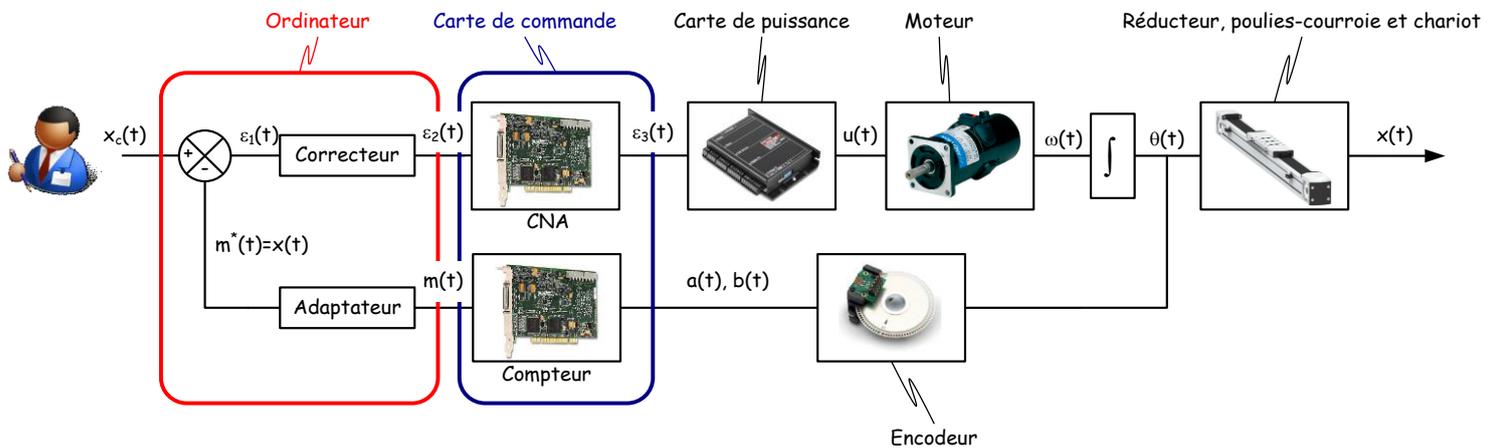


Schéma bloc de l'asservissement

Fonction de la carte de commande :

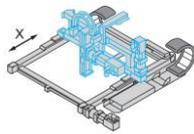
Coté acquisition :

- Acquérir les deux signaux $a(t)$ et $b(t)$ en quadrature de phase venant du codeur incrémental.
- Compter ou décompter les impulsions $a(t)$ et $b(t)$ reçues pour élaborer un signal numérique $m(t)$ en incréments image de la position linéaire $x(t)$ du chariot.
- Transmettre le résultat de ce comptage $m(t)$ à l'ordinateur.

Coté génération

- Recevoir le signal "écart corrigé" $\epsilon_2(t)$ provenant de l'ordinateur
- Elaborer la tension analogique $\epsilon_3(t)$ par conversion numérique analogique de $\epsilon_2(t)$

Nota : La carte de commande ne se comporte qu'en interface entre le PC et la partie mécanique : ce n'est pas elle qui effectue les calculs de commande d'axe (adaptation, soustraction, correction).



Fonction de l'ordinateur :

- Acquérir la consigne $x_c(t)$ de l'utilisateur (entrée directement en mm par l'utilisateur).
- Adapter le signal de mesure $m(t)$ en incréments en signal $m^*(t) = x(t)$ en mm : c'est l'équivalent du bloc adaptateur que l'on rencontre souvent devant le soustracteur. Plutôt que d'adapter la consigne, c'est ici la mesure qui est adaptée.
- Soustraire le signal $m^*(t) = x(t)$ au signal de consigne $x_c(t)$ pour obtenir l'écart $\varepsilon_1(t)$
- Appliquer un algorithme de correction pour transformer l'écart $\varepsilon_1(t)$ en écart corrigé $\varepsilon_2(t)$

Fonction de la carte de puissance :

La carte utilisée ici est un servo-amplificateur qui peut intégrer en interne une boucle de courant (avec un correcteur PI) et/ou une boucle de vitesse (aussi avec correcteur PI). Ici cette carte n'est utilisée qu'en mode "variateur de vitesse" : les boucles internes de courant et de vitesse sont désactivées. Le terme "servo" n'est donc plus tellement justifié dans notre application.

La carte de puissance est configurée en gain pur entre le signal $\varepsilon_3(t)$ et $u(t)$: $u(t) = B.\varepsilon_3(t)$

On travaille en boucle fermée avec les signaux suivants dans les unités indiquées :

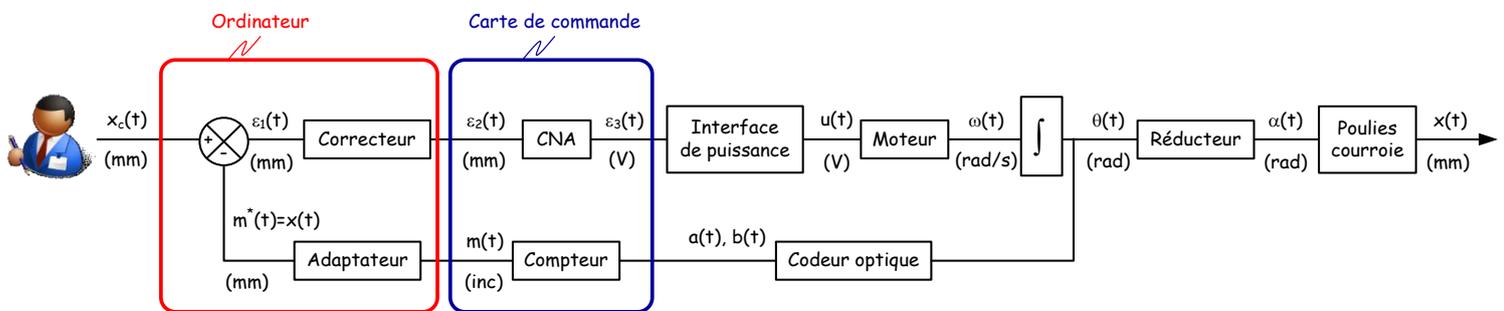
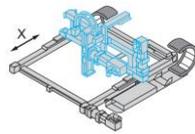


Schéma bloc de l'asservissement en boucle fermée

| Signaux | Unités |
|------------------------------------------------------|--------------------------|
| $m(t)$ | incréments |
| $\varepsilon_3(t), u(t)$ | volts |
| $\omega(t)$ | rad/s |
| $\theta(t), \alpha(t)$ | rad |
| $x(t)$ | mm (réels) |
| $x_c(t), m^*(t), \varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ | mm (dans l'ordinateur *) |

Signaux et unités en boucle fermée



(*) On pourrait aussi prendre le point de vue de considérer que le signal $\varepsilon_2(t)$ est en volts. Dans tous les cas, on est dans l'ordinateur, les signaux sont ici codés en virgule flottante sur 8 octets (IEEE 64 bits). Il n'y a pas d'unités, on pourrait parler en bits ou en incréments mais on choisira ici de tout exprimer en mm ou encore dans toute autre unité que l'on veut bien imaginer et qui nous permettra de faciliter l'analyse des signaux (des %, des rapports cycliques, des volts, des mm, des incréments...).

Le codage de l'information en virgule flottante sur 64 bits peut paraître exagérément précis mais ce n'est pas un facteur limitant la période d'échantillonnage de Control' Drive.

Lorsqu'on se placera en boucle ouverte, ce sera plus pratique de considérer que $x_c(t) = \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t)$ et de considérer que ces trois signaux identiques sont des volts :

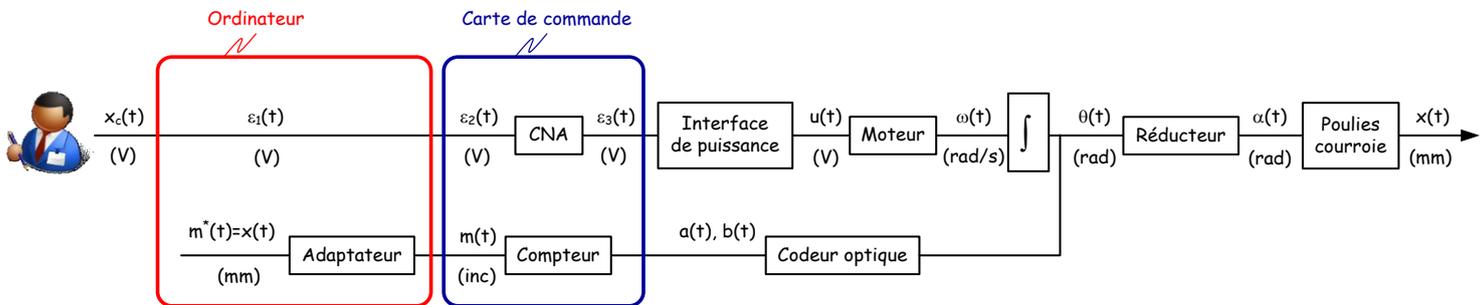
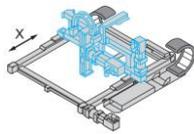


Schéma bloc de l'asservissement en boucle ouverte

| Signaux | Unités |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $m(t)$ | incréments |
| $x_c(t), \varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \varepsilon_3(t), u(t)$ | volts |
| $\omega(t)$ | rad/s |
| $\theta(t), \alpha(t)$ | rad |
| $x(t)$ | mm (réels) |
| $m^*(t)$ | mm (dans l'ordinateur) |

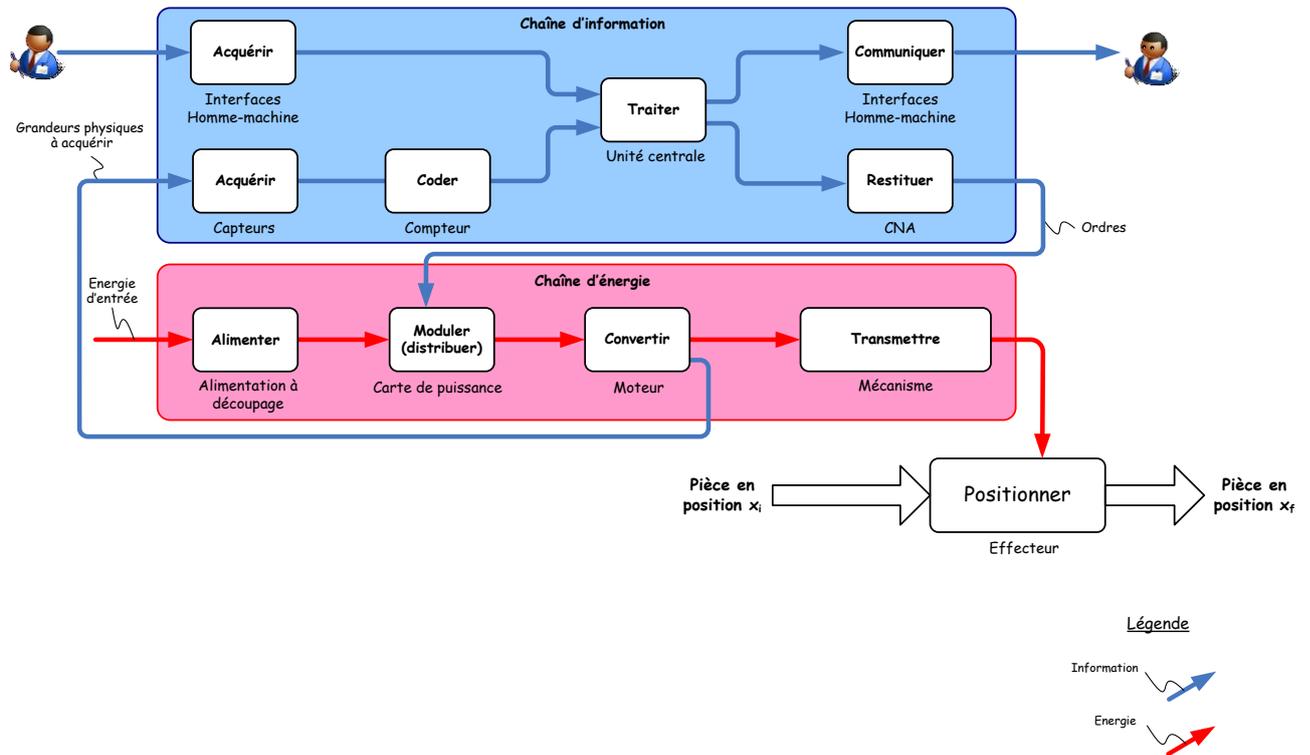
Signaux et unités en boucle ouverte



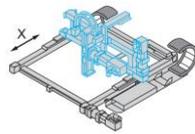
Chaîne fonctionnelle

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Le schéma de la chaîne fonctionnelle résume l'ensemble de ce qui a été dit :



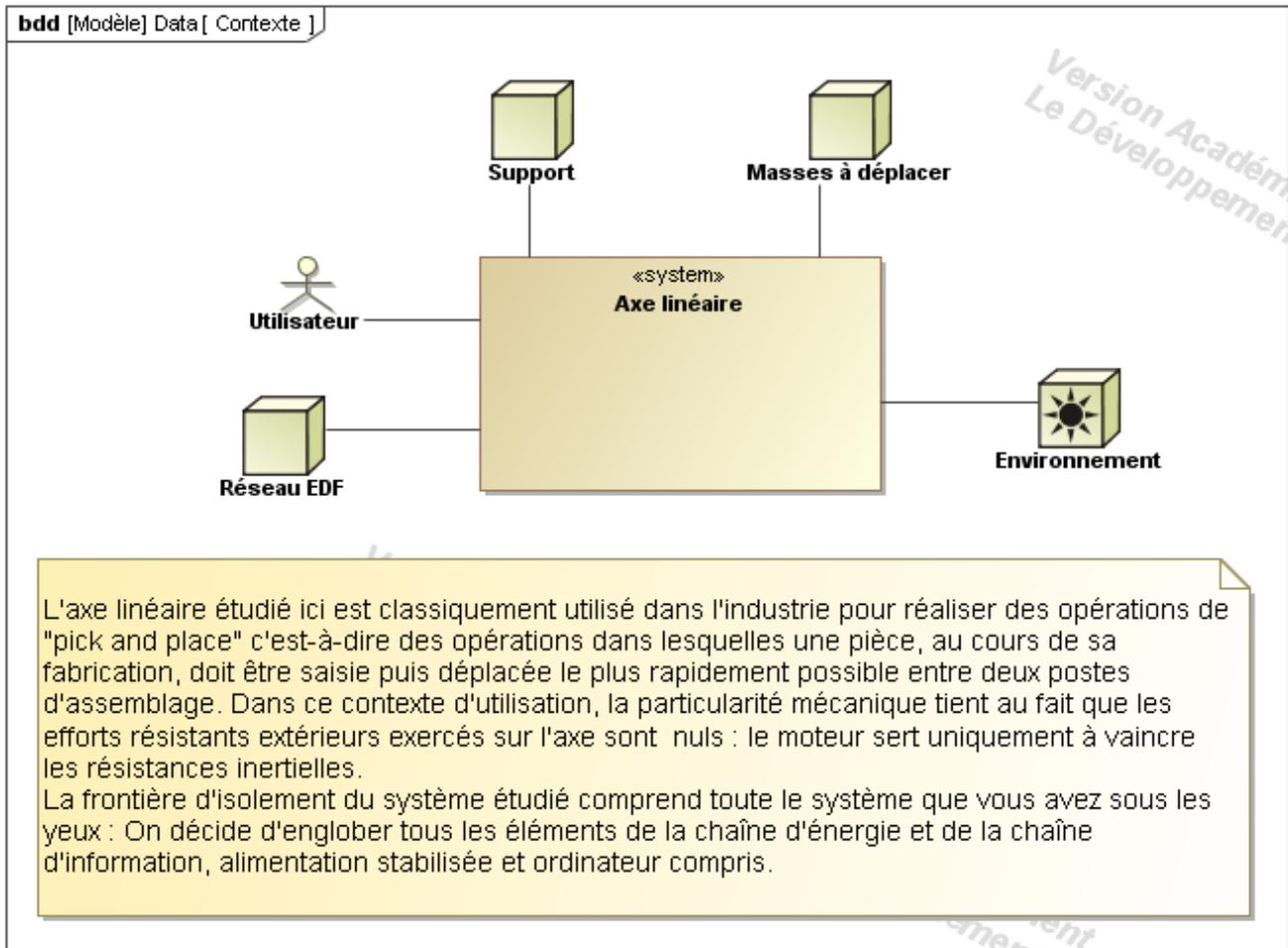
Chaîne fonctionnelle

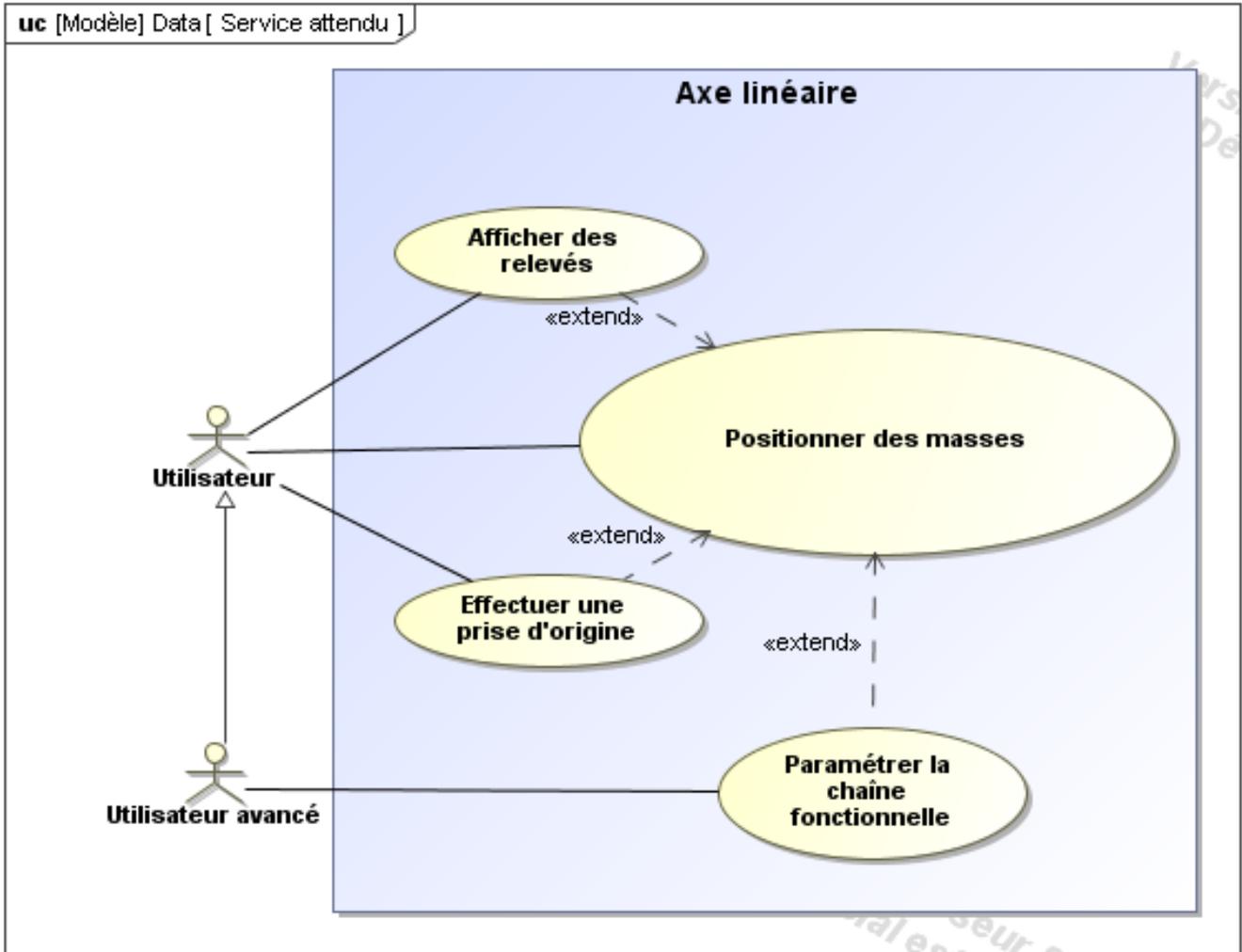
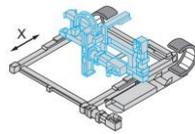


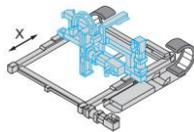
Diagrammes SysML de Control'X

(...et non pas du système industriel d'origine)

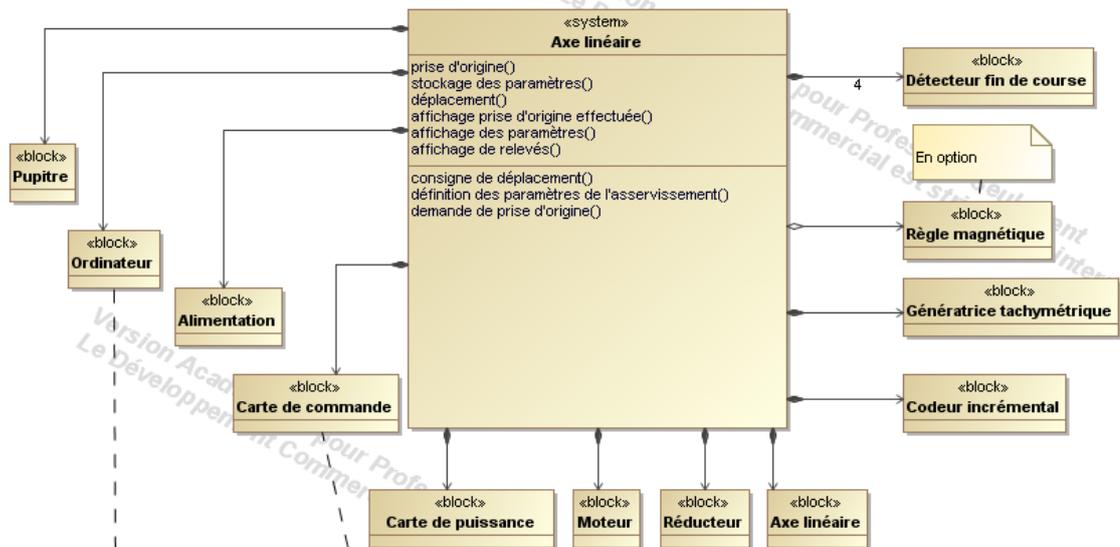
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)







bdd [Modèle] Data [Structure]

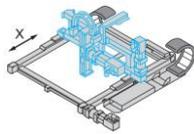


L'ordinateur remplit lui les fonctions suivantes :

- Convertir le signal de mesure $m1(t)$ en incréments en signal $m2(t)$ en mm : c'est l'équivalent du bloc adaptateur que l'on rencontre souvent devant le soustracteur. Plutôt que d'adapter la consigne, c'est ici la mesure qui est adaptée.
- Soustraire le signal de mesure $m2(t)$ au signal de consigne $xc(t)$ pour obtenir l'écart $eps1(t)$
- Appliquer un algorithme de correction (proportionnelle pour l'instant) pour transformer l'écart $eps1(t)$ en écart corrigé $eps2(t)$

La carte de commande remplit les fonctions suivantes :

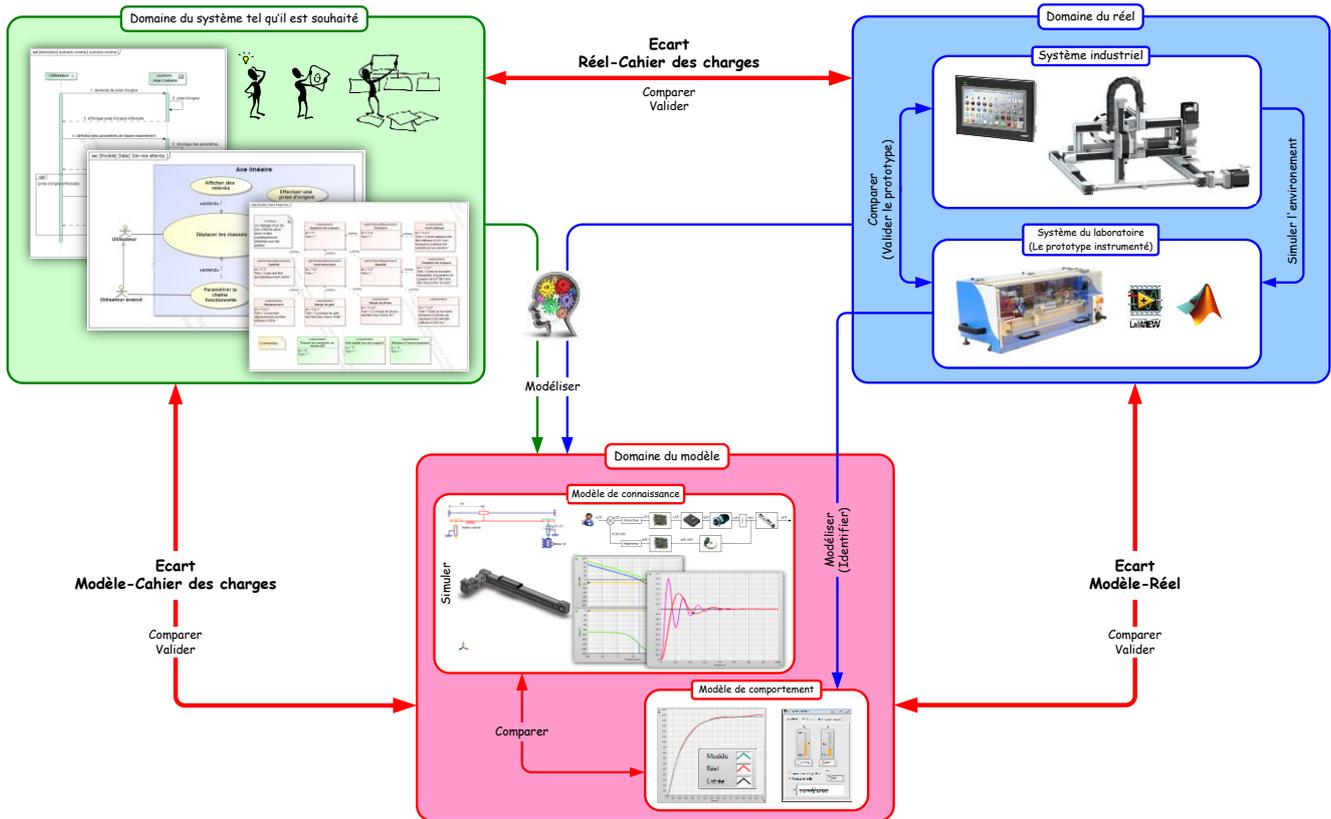
- Faire l'acquisition des deux signaux $a(t)$ et $b(t)$ en quadrature de phase venant du codeur incrémental.
- Décoder et compter les impulsions $a(t)$ et $b(t)$ reçues pour élaborer un signal numérique $m1(t)$ en incréments image de la position linéaire du chariot
- Transmettre ce signal de comptage $m1(t)$ à l'ordinateur
- Recevoir le signal "écart corrigé" $eps2(t)$ provenant de l'ordinateur
- Elaborer la tension analogique $eps3(t)$ par Conversion Numérique Analogique (CNA) de $eps2(t)$

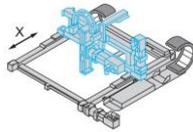


Les écarts autour de Control'X

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

La figure ci-dessous permet de visualiser les différents écarts observables.





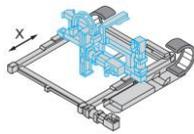
Control'X

Les sécurités de Control'X



Ctrl + clic pour suivre un lien

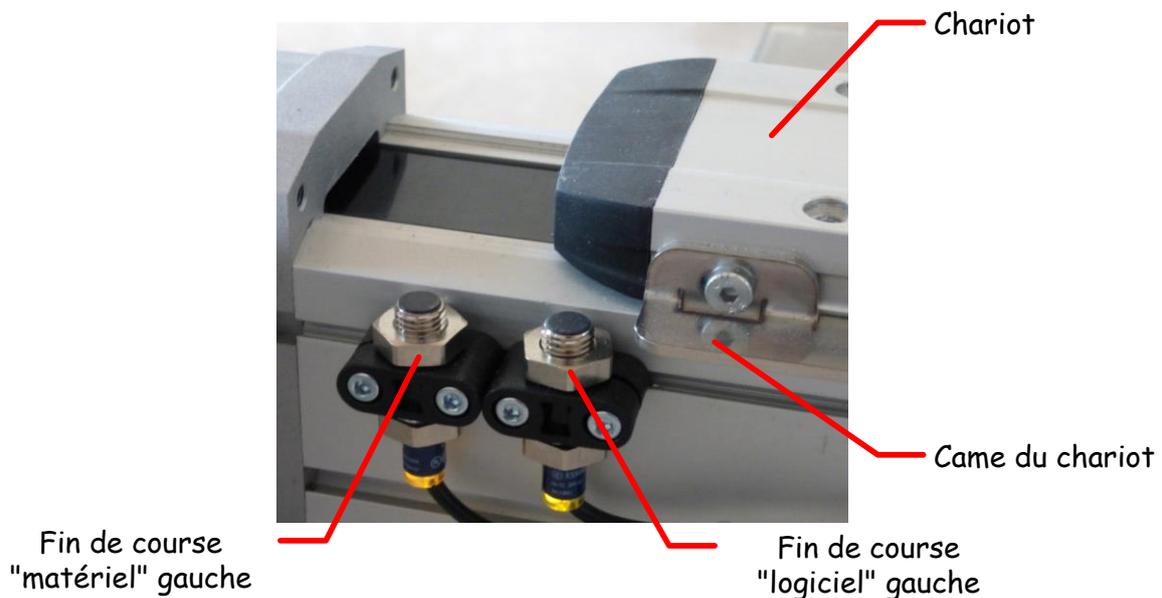
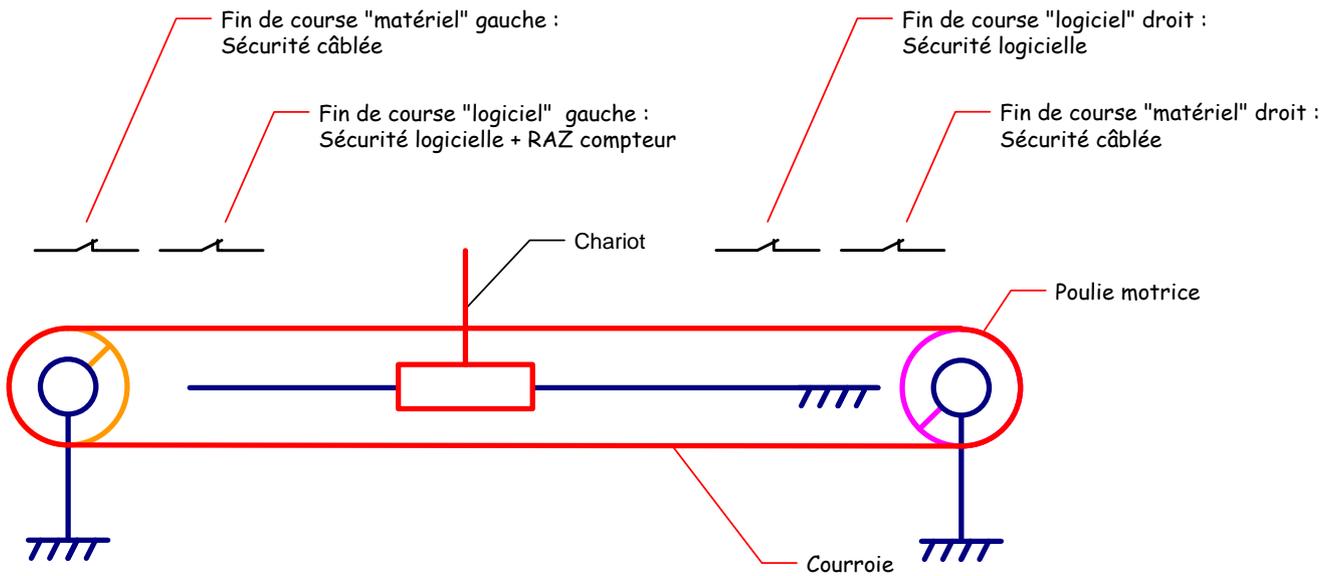
| | |
|----------------------------------------------------------------------|--------|
| Sécurités matérielles de Control'X | page 2 |
| Sécurités logicielles de l'alimentation de puissance | page 4 |
| Sécurités logicielles de la carte de puissance | page 4 |
| Sécurités logicielles sous Control'Drive | page 5 |
| Sécurités logicielles sous Matlab-Simulink | page 7 |

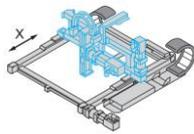


Sécurités matérielles de Control'X

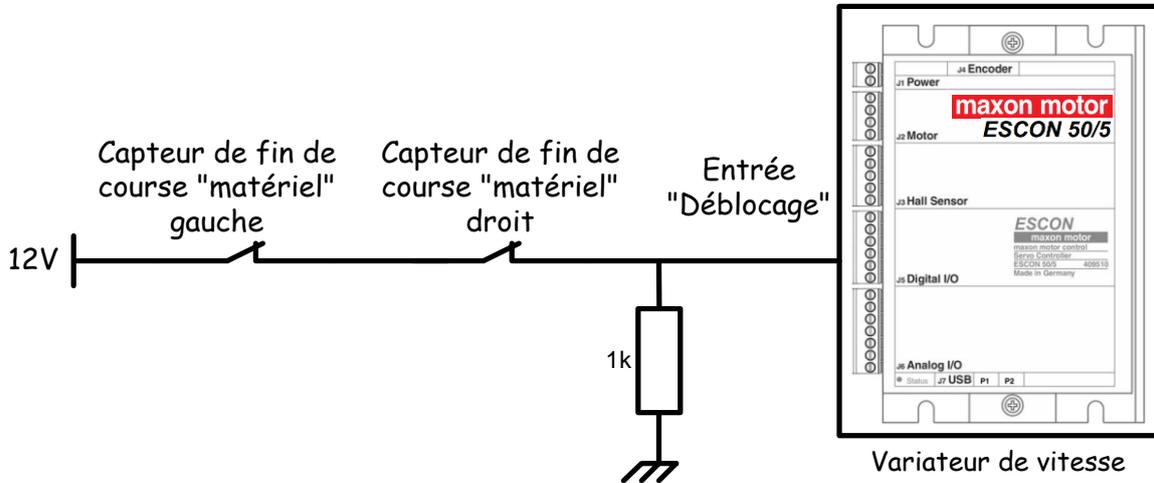
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Control'X est muni de 4 capteurs de fin de course inductifs : deux capteurs de fin de course "matériels" et deux capteurs de fin de course "logiciels".



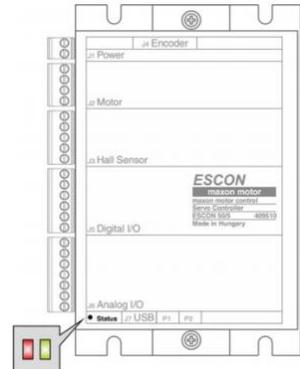


Les deux capteurs de fin de course "matériels" sont câblés en série pour attaquer l'entrée "Déblocage" du variateur de vitesse.

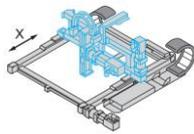


En cas d'activation de l'un de ces capteurs, l'étage de sortie du variateur est déconnecté. La diode verte du variateur qui était allumée en continu se met à clignoter.

Seule une remise en position manuelle du chariot hors de ces fins de course permet d'alimenter à nouveau le moteur.



Les capteurs de fin de course "matériels" ne sont susceptibles d'être recouvert qu'en cas de problème logiciel pendant le pilotage.



Sécurités logicielles de l'alimentation de puissance

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

L'alimentation de puissance est protégée contre les surtensions sur sa sortie, les surcharges (jusqu'à 135 % de sa puissance nominale) et les températures trop élevées.

En cas d'anomalie, l'étage de sortie est déconnecté. Ce dernier est reconnecté automatiquement après disparition de la cause qui a conduit à sa coupure.

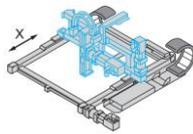
Sécurités logicielles de la carte de puissance

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

La carte de puissance embarque plusieurs sécurités :

- Limitation du courant de pointe réglée à 9 A (la carte pourrait autoriser jusqu'à 15 A).
- Limitation du courant en continu à 5A (le moteur ne supporte que 2.2 A en régime permanent).
- Limitation de la température estimée du bobinage du moteur. Cela arrive par exemple quelquefois lorsqu'un essai de réponse harmonique automatique trop long est lancé. Il suffit dans ce cas de laisser refroidir le moteur quelques instants puis de reprendre l'essai interrompu.

Lorsqu'une limitation intervient, la tension en sortie du pont en H chute entraînant une chute de l'intensité dans le moteur. Le fonctionnement revient à la normale lorsque la cause à l'origine de la limitation disparaît.



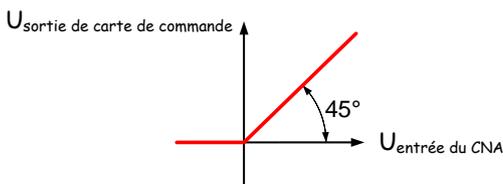
Sécurités logicielles sous Control'Drive

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Control'Drive intègre une sécurité logicielle qui empêche le chariot de se retrouver sur un capteur de fin de course "matériel". A chaque période d'échantillonnage Control'Drive vient tester la présence éventuelle sur un fin de course "logiciel". Si tel est le cas la tension moteur qui tendrait à faire avancer le chariot au-delà du capteur atteint est saturée à une valeur nulle. Le chariot ne peut alors que quitter la butée et repartir en sens inverse.

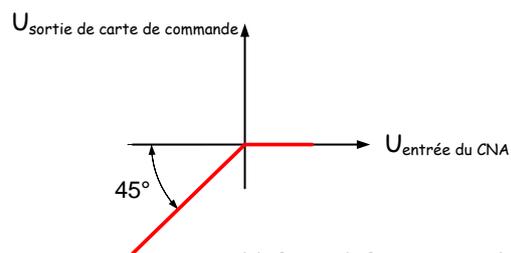


Butée gauche atteinte ?

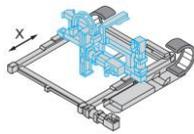


$U > 0$: tension qui tend à faire partir le chariot à droite c'est-à-dire à lui faire quitter la butée gauche

Butée droite atteinte ?



$U < 0$: tension qui tend à faire à faire partir le chariot à gauche c'est-à-dire à lui faire quitter la butée droite



Control'Drive intègre aussi une sécurité qui limite les surintensités prolongées : Si une intensité supérieure à 5 A est observée pendant plus de 500 ms, la tension du moteur est annulée pendant 5 s.

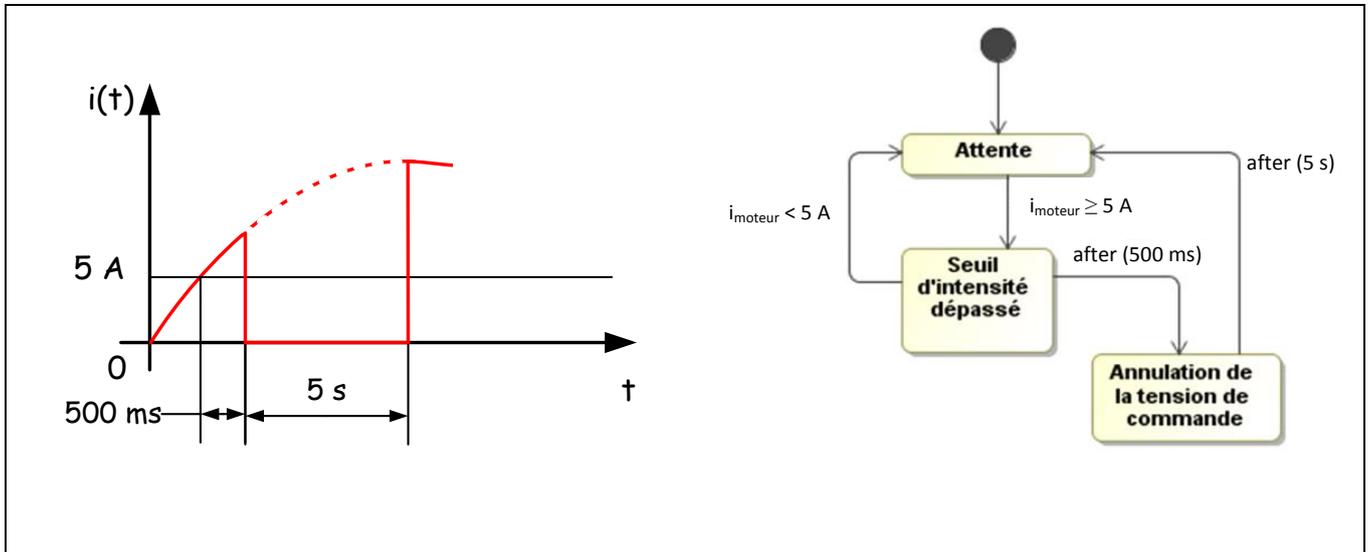
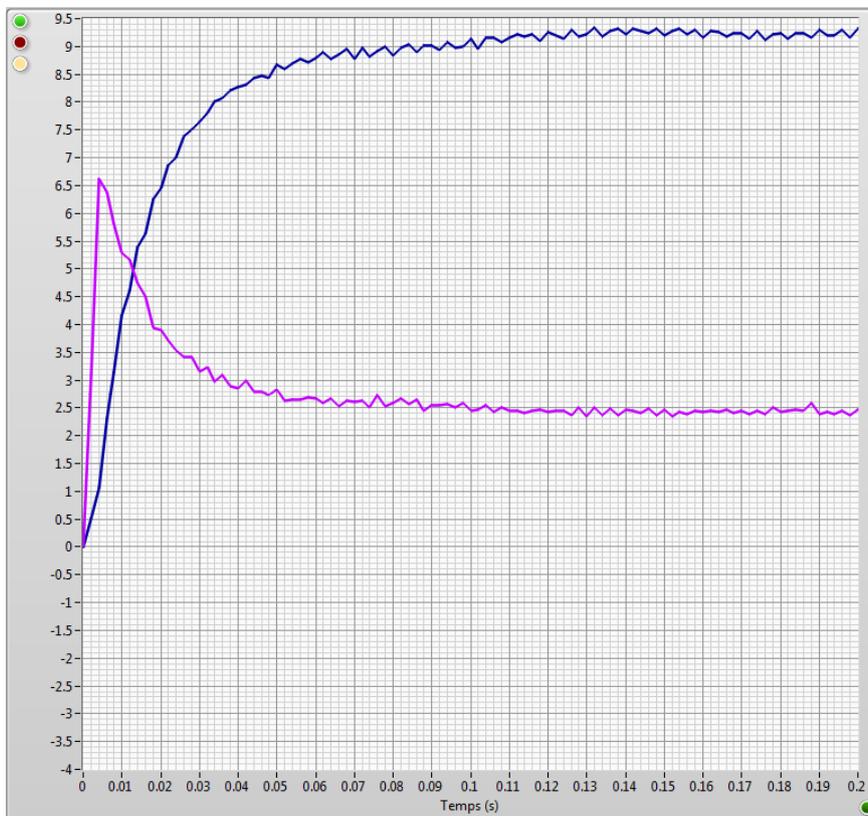
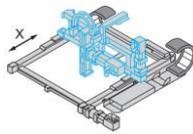


Figure 1

N.B. : Une surintensité lors d'un essai assez contraignant dure moins de 20 ms : Ci-dessous un essai en boucle ouverte sous 40 V de tension moteur (c'est la tension maxi au bornes du moteur).



En rose l'intensité (A), en bleu la vitesse du chariot (mm/s divisés par 100) :
Le pic d'intensité dure très peu de temps



Sécurités logicielles sous Matlab-Simulink

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Le bloc de tension de sortie utilisé sous Simulink intègre la même sécurité que sous Control'Drive lorsque le chariot se retrouve sur l'un des capteurs de fin de course "logiciels" : toute valeur de tension moteur qui tendrait à faire se déplacer le chariot au-delà de ce capteur est saturée à une valeur nulle.



Il ne faut pas reconfigurer ce bloc ou tenter de s'en passer.

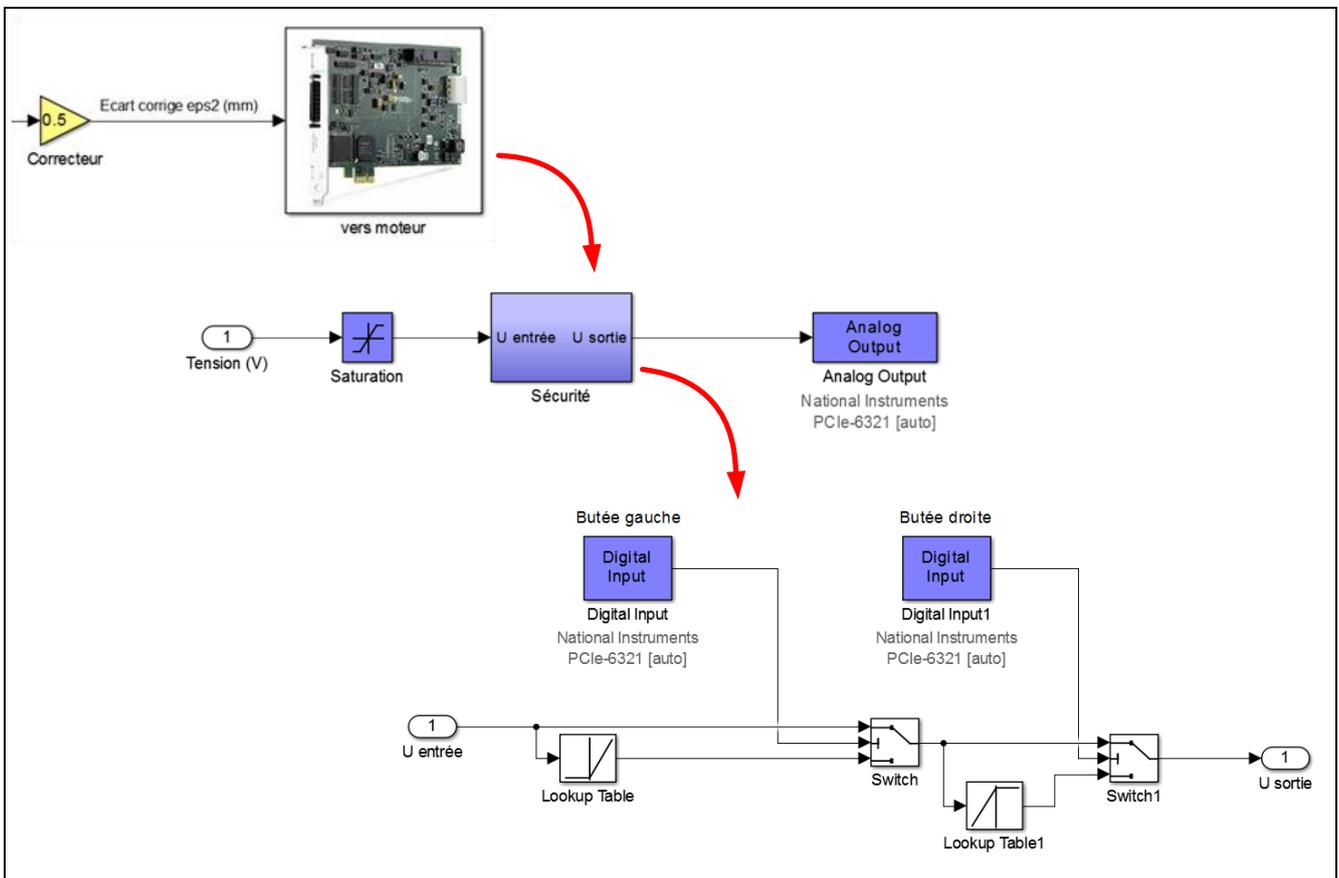
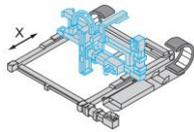


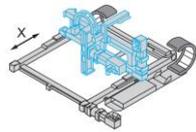
Figure 2



Control'X

TPO pour professeur
TP corrigé pour prise en main rapide





Control'X

Optimiser les performances de positionnement

Problématique : Comment optimiser les performances de positionnement d'une pièce ?

L'étude se décompose en plusieurs étapes :

- Compréhension du mode d'asservissement
- Modélisation du comportement
- Identification du comportement en boucle ouverte
- Bouclage réel - modèle : Validation d'un modèle linéaire de boucle ouverte puis de boucle fermée
- Exploitation du modèle pour optimiser les performances de positionnement : calage d'un correcteur à avance de phase

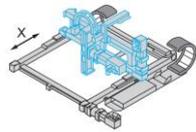
Découvrir Control'X

On cherche dans cette partie à s'approprier le fonctionnement de l'axe.

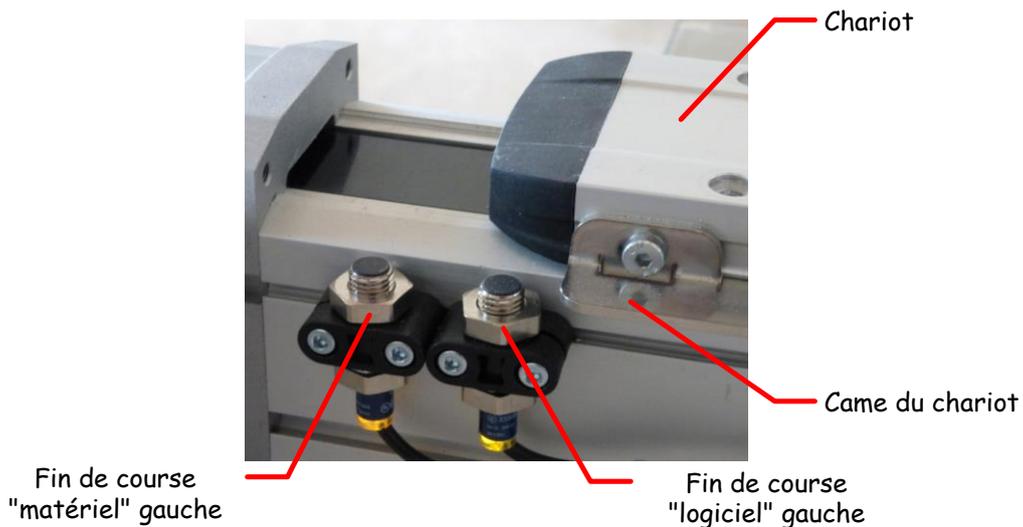
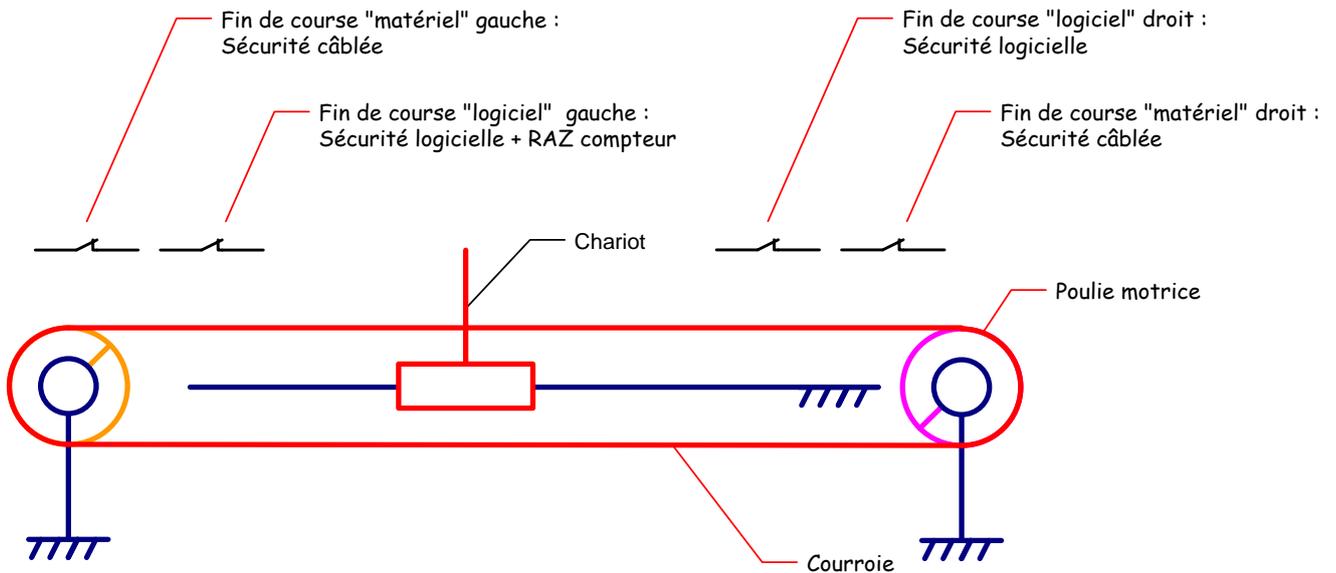
Prise en main matérielle :

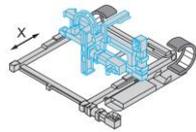
- Mettre sous tension Control'X : pour cela, basculer l'interrupteur situé au dos du carter sur la position 1 :



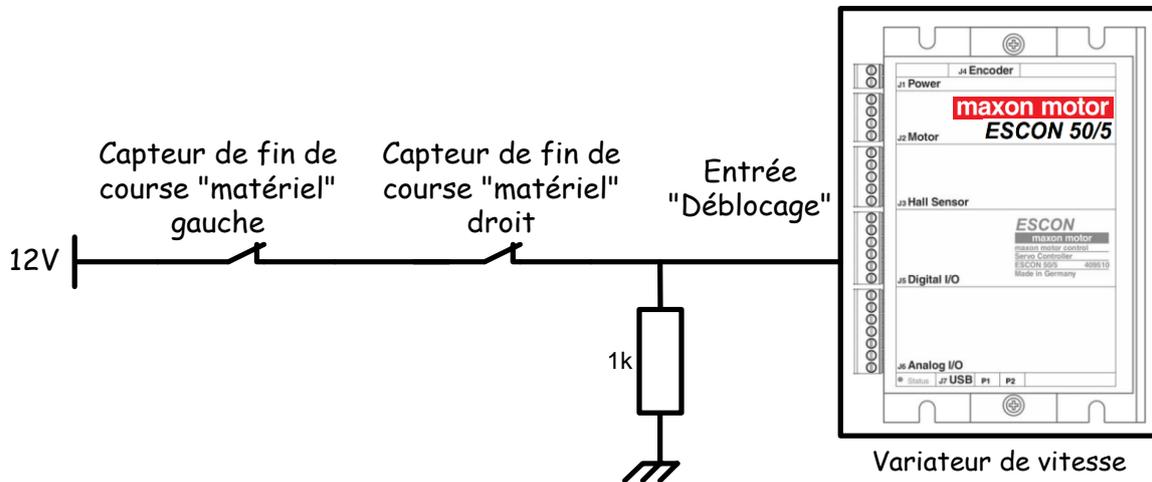


- Vérifier que la came du chariot ne recouvre pas l'un des deux capteurs de fin de course "matériels" : ni gauche, ni droit. Si cela devait être le cas, déplacer à la main le chariot vers l'intérieur de façon à découvrir ces capteurs de fin de course :



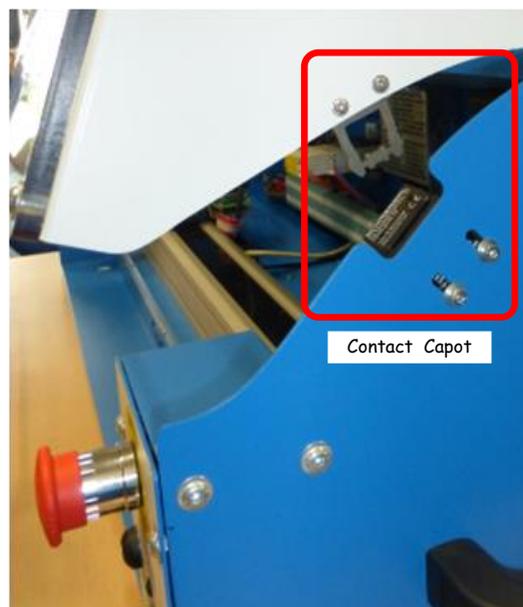


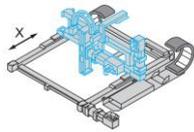
Les deux capteurs de fin de course "matériels" sont câblés en série pour attaquer l'entrée "Déblocage" du variateur de vitesse. En cas d'activation de l'un de ces deux capteurs, l'étage de sortie du variateur est déconnecté. Seule une remise en position manuelle du chariot hors des capteurs de fin de course "matériels" permet d'alimenter à nouveau le moteur.



Les capteurs de fin de course "matériels" ne sont susceptibles d'être recouvert qu'en cas de problème logiciel pendant le pilotage.

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





- 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.



Au fond du carter, les diodes de tous les composants doivent s'allumer :

- ✓ Alimentation de puissance : Tension de 42 V présente en sortie

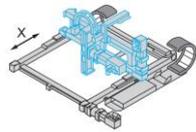


- ✓ Relais de sécurité Finder : Système armé (Relais autoalimenté)



- ✓ Alimentation de commande : Tensions de -12, +12 et +5V présentes en sortie



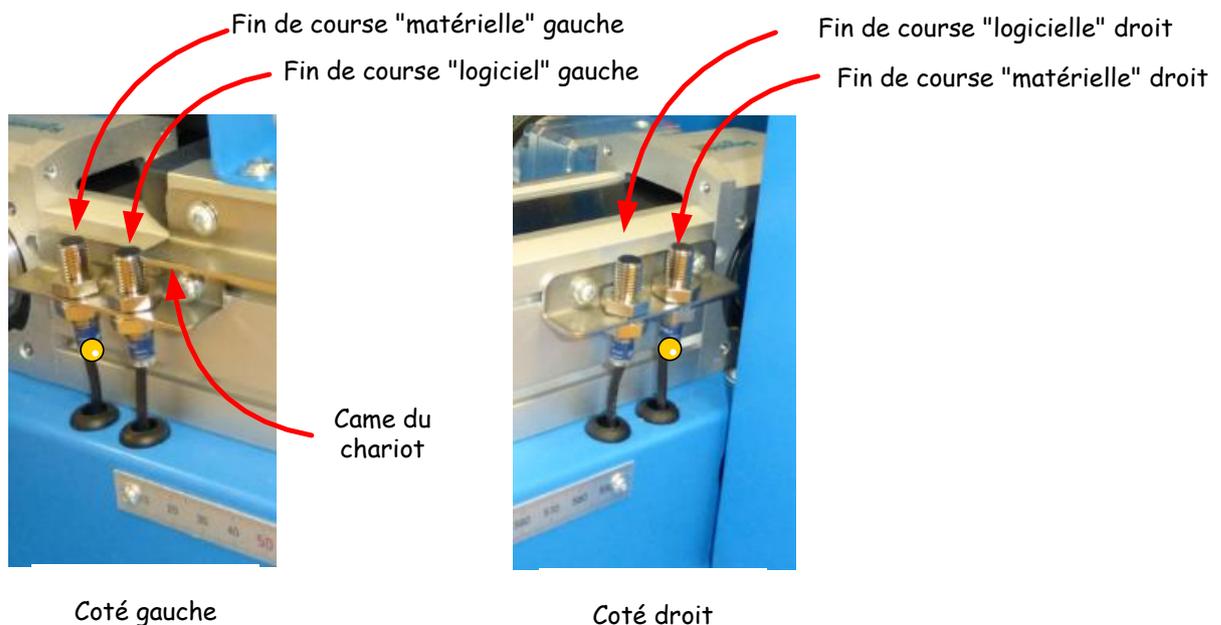


- ✓ Variateur de vitesse (interface de puissance) : Etage de sortie activé



Si la diode verte du variateur clignote, c'est qu'à priori, l'étage de puissance du variateur est déconnecté parce que le chariot est sur l'un des deux capteurs de fin de course "matériels".

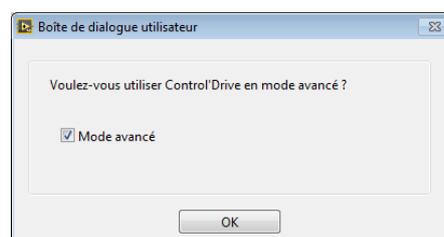
- ✓ Les diodes des deux capteurs de fin de course "matériels" doivent être allumées

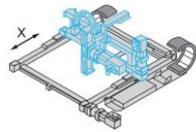


- Lancer maintenant le logiciel Control'Drive :



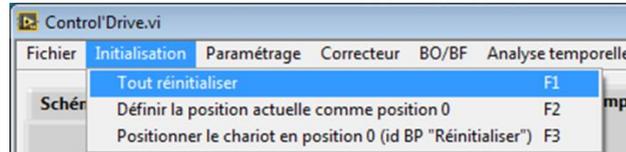
- Choisir le mode avancé de Control'Drive :



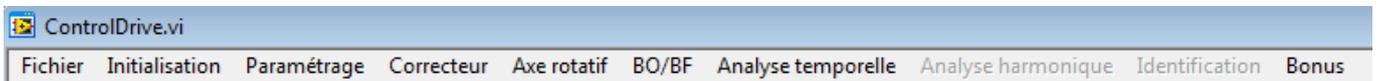


Sauf s'il ne l'est déjà, le chariot de Control'X doit s'initialiser à gauche sur le capteur de fin de course "logiciel".

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 :



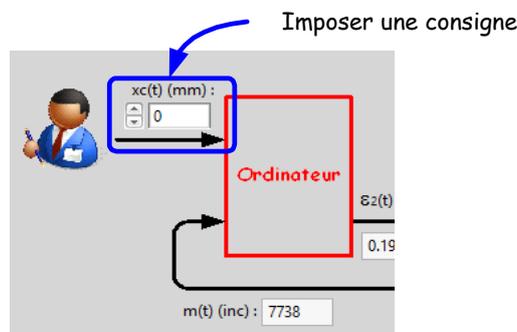
...et un onglet désigne un bandeau du type :

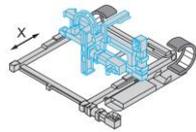


Le TP peut maintenant commencer : On se placera pour débiter successivement sur les onglets "Schéma structurel", "Schéma fonctionnel" et "Schéma bloc".

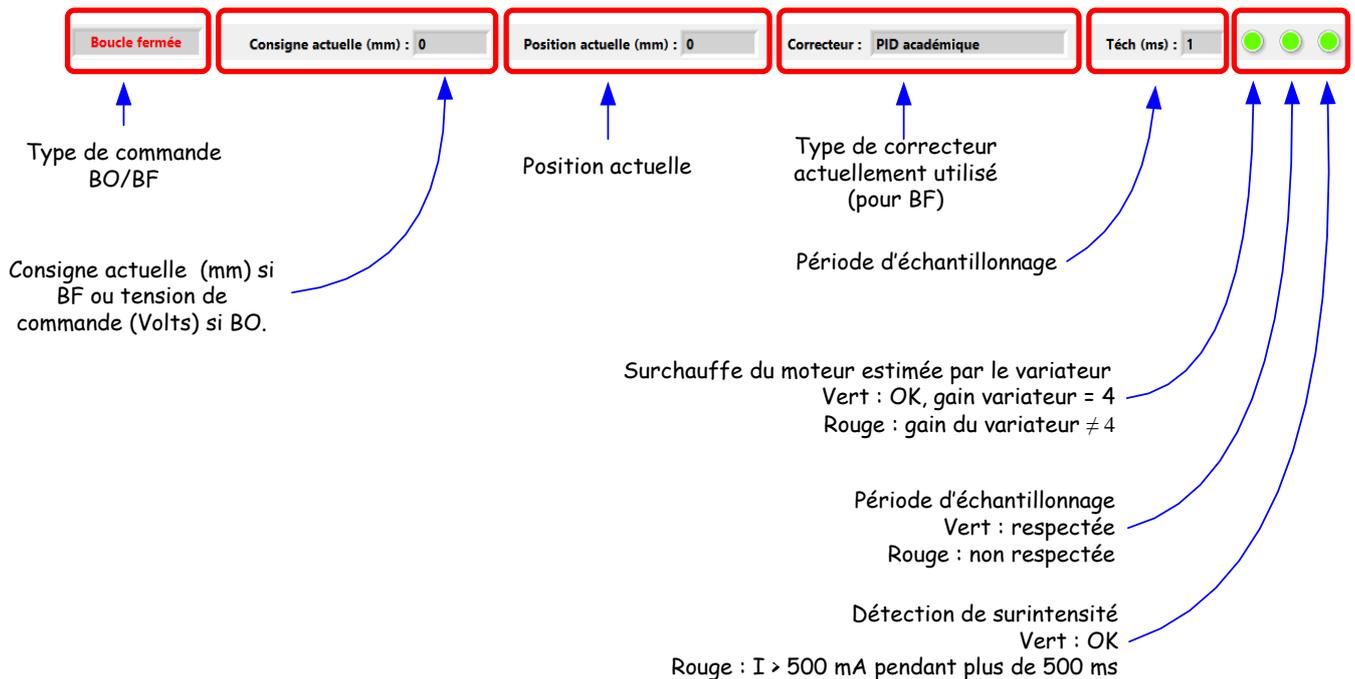
Vérifiez que vous êtes en boucle fermée (Menu "BO/BF") et que le gain du correcteur vaut 0.1 (Menu "Correcteur", onglet "PID académique") puis pilotez le système avec différents échelons d'amplitude 50 mm. Pour cela, il y a plusieurs possibilités :

- Avec les flèches "haut" et "bas" (pas de 50 mm en boucle fermée, 0.5 V en BO)
- En saisissant une valeur au clavier
- En positionnant le curseur de souris à droite de la valeur numérique à modifier et par scrolling (molette centrale de la souris)





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

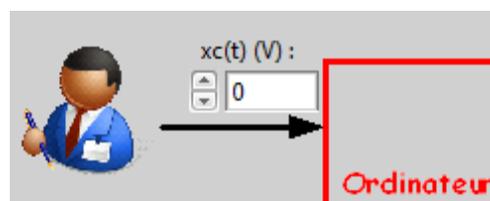


A travers la rainure sur la partie supérieure du plexiglas de Control'X, exercer des perturbations à la main sur le chariot. Observer le comportement du système.

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

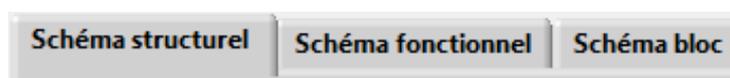
A tout instant on peut repositionner le chariot à son origine en appuyant sur le bouton "Réinitialiser" du pupitre ou en cliquant sur "Positionner le chariot en position 0" du menu "Initialisation".

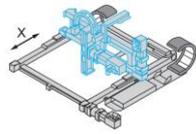
Se placer maintenant en boucle ouverte (Menu "BO/BF"), piloter le système avec différents échelons de tension par pas de 0.5 V :



Observer et commenter le comportement observé.

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

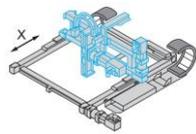




REPONSE

En boucle fermée, le système semble peu dynamique et l'écart assez important.

En boucle ouverte, il faut une tension minimale pour que le chariot commence à se déplacer. On verra que cette tension de seuil provient des frottements secs et est à l'origine de l'écart statique observé.



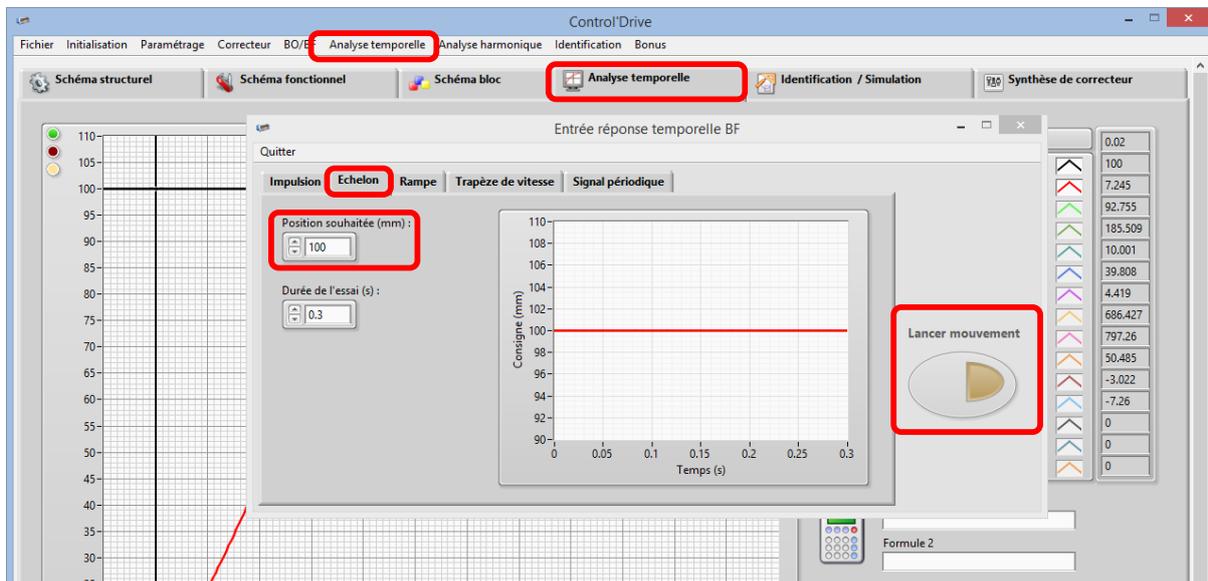
Validation du cahier des charges

On cherche dans cette partie à valider le cahier des charges ci-dessous :

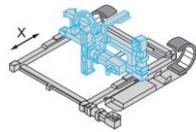
| Exigence | Critères | | Niveaux |
|-----------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Permettre à l'utilisateur de positionner une pièce | C1 | Systeme asymptotiquement stable | |
| | C2 | Amortissement caracterisé par le premier depassement. | $D_1 < 25\%$ |
| | C3 | Rapidity caracterisée par le temps de réponse à 5 %. | $T_{5\%} < 500 \text{ ms}$ |
| | C4 | Précision caracterisée 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" :



Observer l'allure de la réponse indicielle.



On présente ci-dessous quelques fonctions de visualisation communes à tous les graphes de Control'Drive :

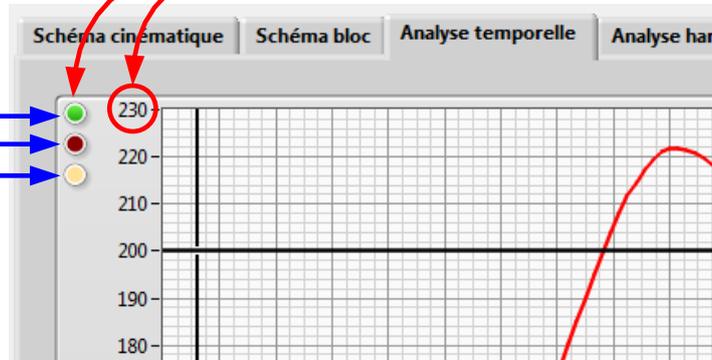
Double cliquer pour modifier l'échelle (mode échelle manuelle - diode verte éteinte)

Options d'affichage :

Echelle auto/manu

Tracé segment

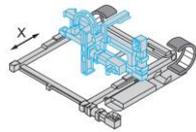
Affichage points de mesure



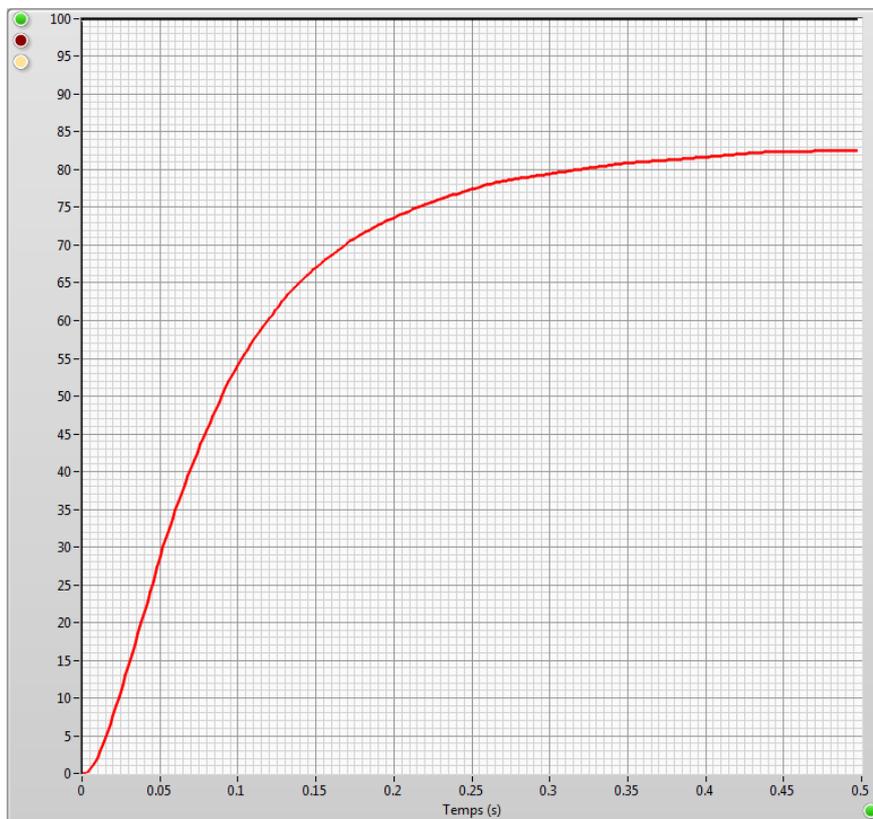
Déplacer le curseur (en mode "curseur" seulement)

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| | | |
| <p>Mode curseur : permet de déplacer le curseur le long d'une courbe ou de sauter de courbe en courbe.</p> | <p>Mode zoom : permet de sélectionner le type de zoom : seulement si les échelles ne sont pas en mode automatique (diodes vertes)</p> | <p>Mode panoramique : permet de faire glisser la zone observée</p> |

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



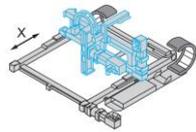
REPONSE



Les critères caractérisant le régime transitoire sont tous respectés : stabilité, amortissement, rapidité.

Le critère caractérisant le régime permanent n'est pas respecté puisque l'écart atteint presque 18 mm alors qu'on impose un écart statique de 0.5 mm.

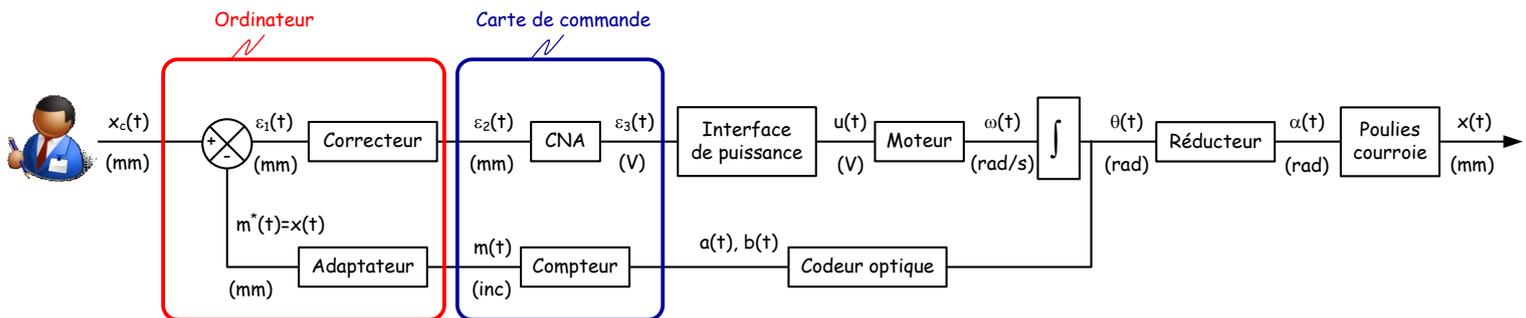
→ Le cahier des charges n'est pas validé



Modélisation

On cherche ici à prévoir le comportement de l'asservissement et notamment l'influence du correcteur. Le but étant de concevoir un correcteur permettant de satisfaire tous les critères du cahier des charges.

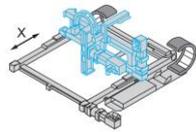
On étudie l'asservissement de position linéaire représenté par le schéma ci-dessous :



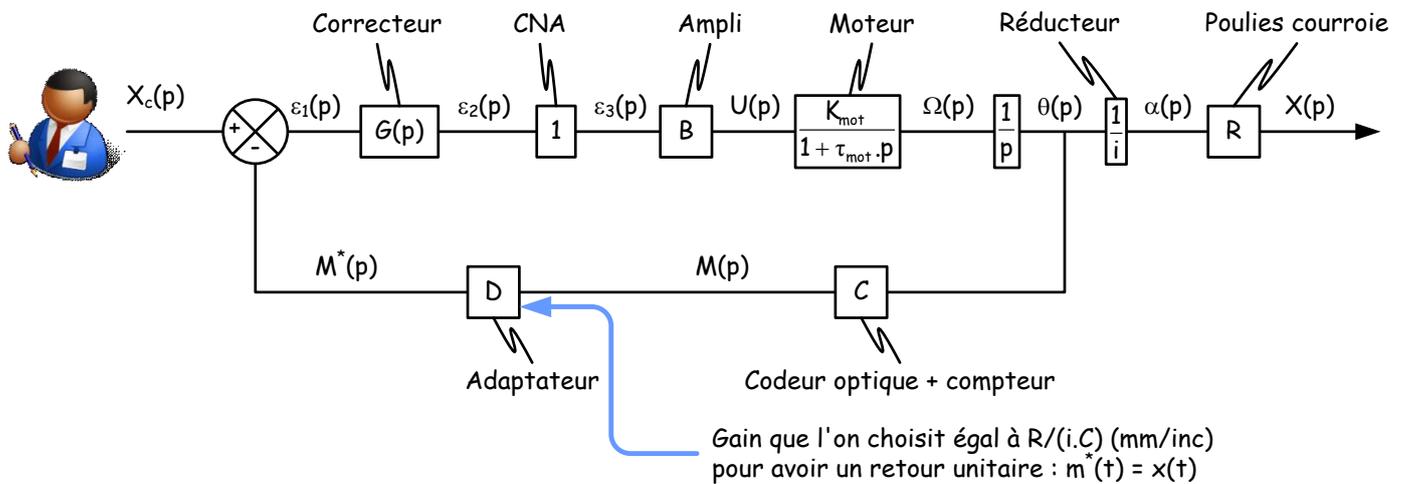
On travaille donc avec les signaux suivants dans les unités indiquées

| Signaux | Unités |
|------------------------------------------------------|------------------------|
| $m(t)$ | incréments |
| $\varepsilon_3(t), u(t)$ | volts |
| $\omega(t)$ | rad/s |
| $\theta(t), \alpha(t)$ | rad |
| $v(t)$ | mm/s |
| $x(t)$ | mm (réels) |
| $x_c(t), m^*(t), \varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ | mm (dans l'ordinateur) |

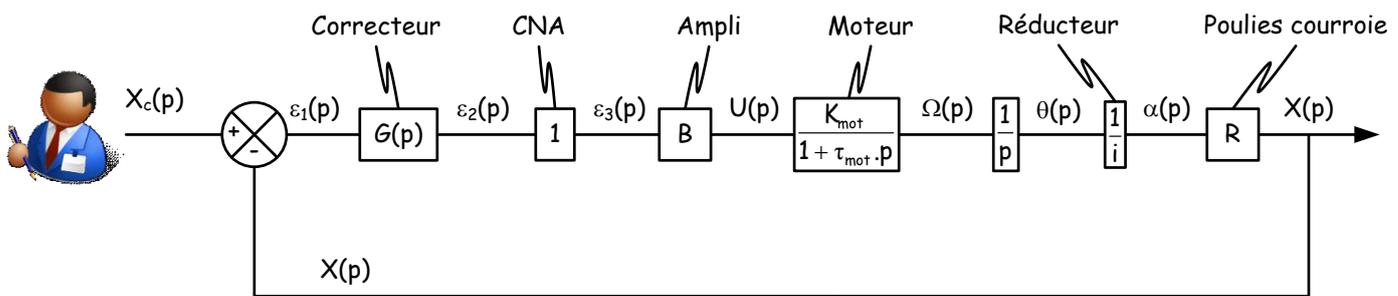
Le gain du CNA est de 1. On peut aussi prendre le point de vue de considérer que le signal $\varepsilon_2(t)$ est en volts. Quel que soit le point de vue choisi, dans l'ordinateur, il n'y a pas d'unité ou alors celles qu'on veut bien imaginer pour faciliter notre compréhension.



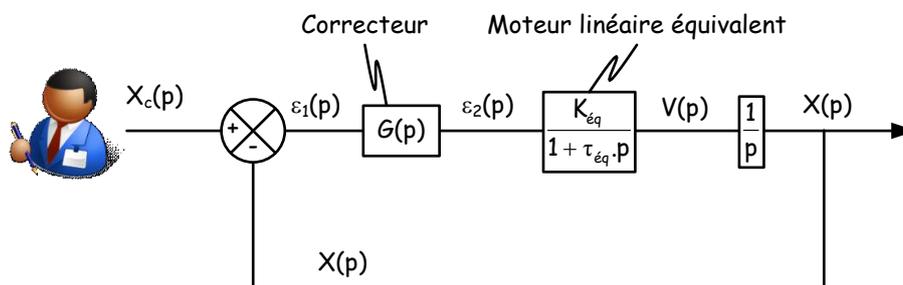
On donne les éléments de modélisation ci-dessous :



Compte tenu du choix du gain D, on obtient alors le schéma à retour unitaire :



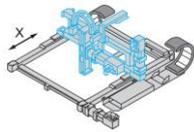
En regroupant tous les blocs de la chaîne directe mis à part le correcteur, on obtient un "moteur linéaire équivalent" : Moteur alimenté par la tension $\varepsilon_2(t)$ et générant la vitesse linéaire $v(t)$ (ou la position linéaire $x(t)$ selon le point de vue).



En commençant à travailler avec un correcteur proportionnel $G(p) = G$, on a :

$$H_{bo}(p) = \frac{G.K_{ék}}{p.(1 + \tau_{ék}.p)} \text{ où } K_{ék} = \frac{B.K_{mot}.R}{i} \text{ et } \tau_{ék} = \tau_{mot}$$

La boucle ouverte est de classe 1 et a un gain de boucle, $K_{BO} = G.K_{ék} = G.B.K_{mot}.R$



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

où $\begin{cases} K_{bf} = 1 \\ \zeta_{bf} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{G \cdot K_{\acute{e}q} \cdot \tau_{mot}}} \\ \omega_{nbf} = \sqrt{\frac{G \cdot K_{\acute{e}q}}{\tau_{mot}}} \end{cases}$

En raisonnant sur le modèle de boucle ouverte ou sur le modèle de boucle fermée, prévoir les performances de l'asservissement en termes de stabilité, amortissement, rapidité et précision.

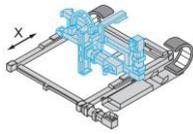
REPONSE

En raisonnant sur la boucle ouverte, on peut effectuer les prévisions suivantes :

| 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 (qui est toujours stable). |
| 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. |

En raisonnant sur la boucle fermée, on peut effectuer les mêmes prévisions :

| 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 indicielles. (Raisonnement valable car retour est unitaire) |



Expérimentation – Analyse qualitative

On cherche dans cette partie à valider 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 G que l'on choisira parmi $\{0.1, 0.5, 1, 3\}$.

Lancer des consignes en échelon et observez le comportement du système réel. Le modèle permet-il de prévoir **qualitativement** les tendances observées sur le système réel ? Discuter.

Penser à utiliser le bouton poussoir "Réinitialiser" du pupitre qui permet de repositionner le chariot à son origine entre deux essais.

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 ?

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

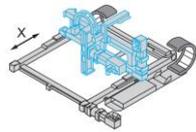
REPONSE

Le modèle permet de prévoir les tendances en termes de rapidité et d'amortissement mais pas en termes de précision.

Le modèle mis en place laisse penser que le système est précis pour des entrées en échelon or il n'en n'est rien. En effet, il y a dans le système des frottements secs ou des résistances au roulement. Ces résistances ramenées sur l'arbre du moteur se comportent comme un couple perturbateur. Ce couple n'ayant pas été pris en compte dans le modèle, la théorie ne permet pas de prévoir son effet. On aurait pu modéliser ces perturbations en faisant intervenir un couple résistant (perturbateur) sur le bloc "moteur". Manifestement, les perturbations ne sont pas forcément négligeables.

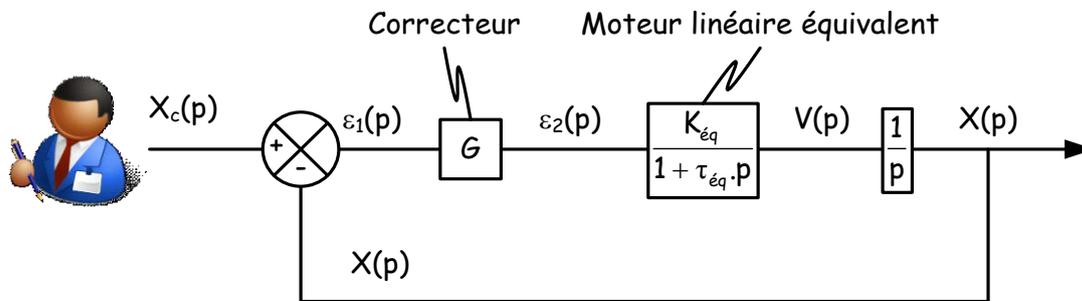
En régime permanent (en réponse indicielle), ces perturbations sont constantes alors qu'elles changent éventuellement de signe en régime transitoire.

Il n'y a pas d'intégration en amont de ces perturbations constantes donc le système ne les rejette pas : l'écart vis à vis de ces perturbations n'est pas nul. On sait par contre que la précision augmente avec l'augmentation du gain en amont de la perturbation, donc en particulier avec l'augmentation de G : plus le gain G est grand plus la perturbation va être rejetée et plus la précision va s'améliorer (... et plus le modèle collera).

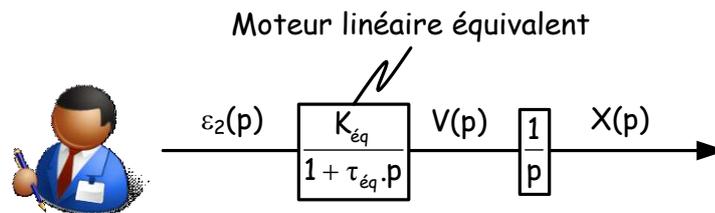


Expérimentation - Analyse quantitative

On cherche dans cette partie à identifier les valeurs des paramètres manquants $K_{\text{éq}}$ et $\tau_{\text{éq}}$. Ces paramètres sont en effet les deux seuls paramètres nécessaires pour alimenter le modèle mis en place.



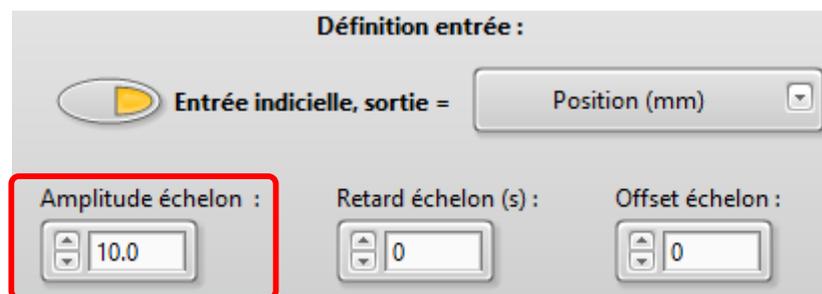
Pour déterminer ces deux paramètres, on va procéder à une identification sur la base de la réponse indicielle en boucle ouverte du moteur linéaire équivalent.

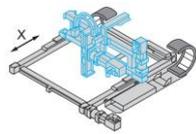


On se place maintenant en boucle ouverte (Menu "BO/BF"). Après avoir réinitialisé le système (Menu "Initialisation", "Tout réinitialiser") lancer un échelon $\varepsilon_2(t)$ de 10 V d'amplitude (Menu "Analyse temporelle", "Définir entrée").

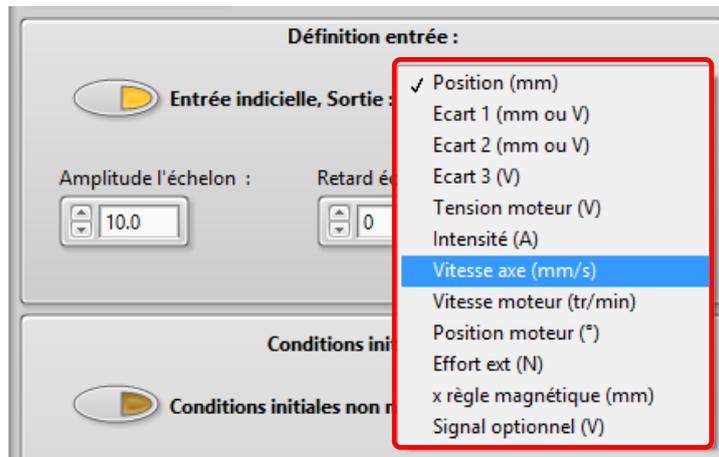
Utiliser ensuite l'onglet "Identification" pour mettre en place un modèle de comportement du moteur linéaire équivalent. L'essai temporel en mémoire (à priori le dernier essai effectué) est rapatrié dans cet onglet.

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

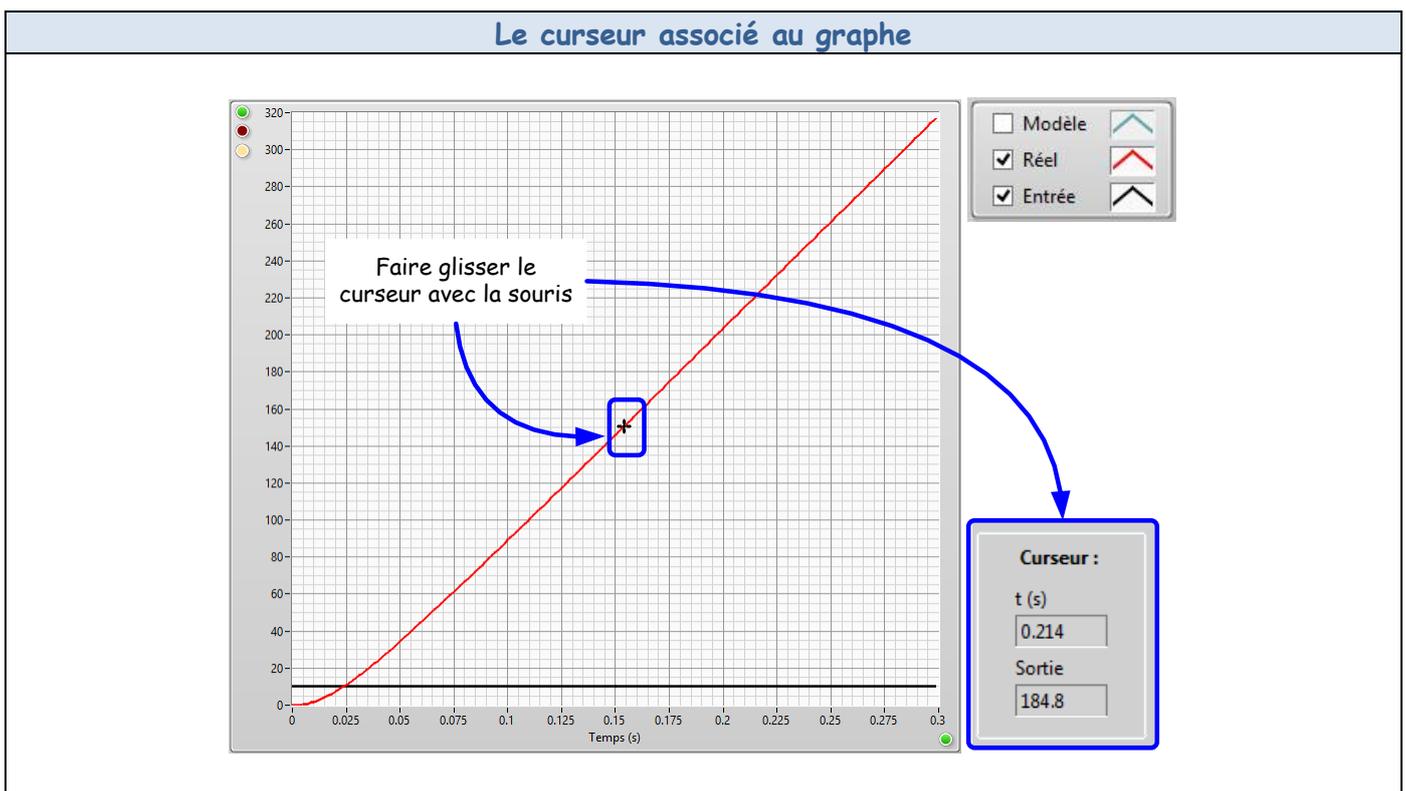


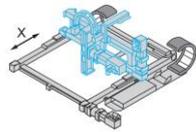


Choisir une identification sur la base de la position ou de la vitesse de l'axe :

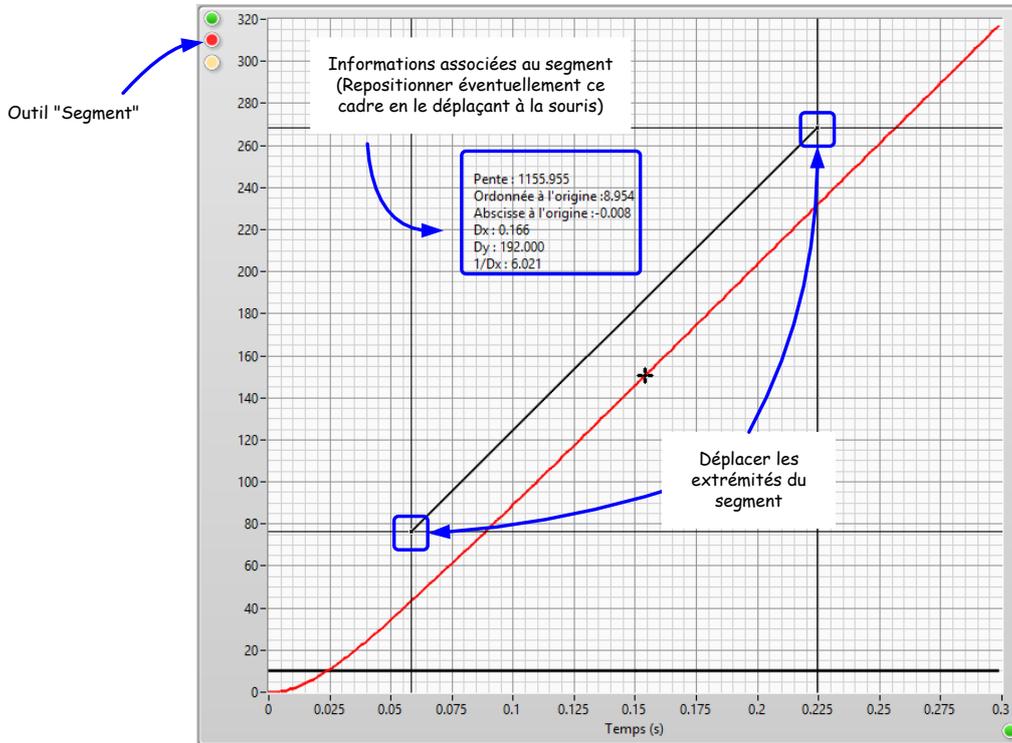


On peut pour l'identification utiliser trois types d'outils :





Le segment associé au graphe



La palette de commande "FT identification"

FT identification.vi

1° Ordre 2° Ordre Ordre quelconque

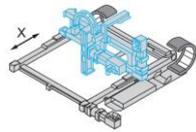
K τ (ms)

200- 1000-
10- 100-
1- 10-
0.1- 1-
11.7 20

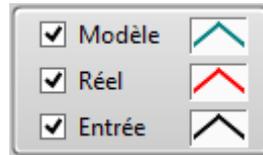
Rajouter un intégrateur
 Rajouter un pôle

FT : $\frac{11.7}{s(1 + 0.02s)}$

Faire bouger les glissières ou modifier les valeurs numériques



Il faut bien sûr pour cette dernière fonctionnalité que le modèle correspondant soit visible :



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

Relever la valeur finale atteinte et la constante de temps du système (éventuellement du seul mode dominant retenu).

On a réalisé le même type d'essai avec les tensions indiquées dans le tableau ci-dessous :

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

Dépouiller les résultats de ce tableau et tracer notamment la courbe donnant la vitesse stabilisée V_∞ (en mm/s) en fonction de la tension appliquée ε_2 (en volts) : $V_\infty = V_\infty(\varepsilon_2)$.

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

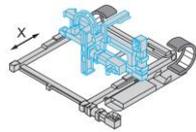
Que retenir pour les paramètres $K_{\text{éq}}$ et $\tau_{\text{éq}}$?

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

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

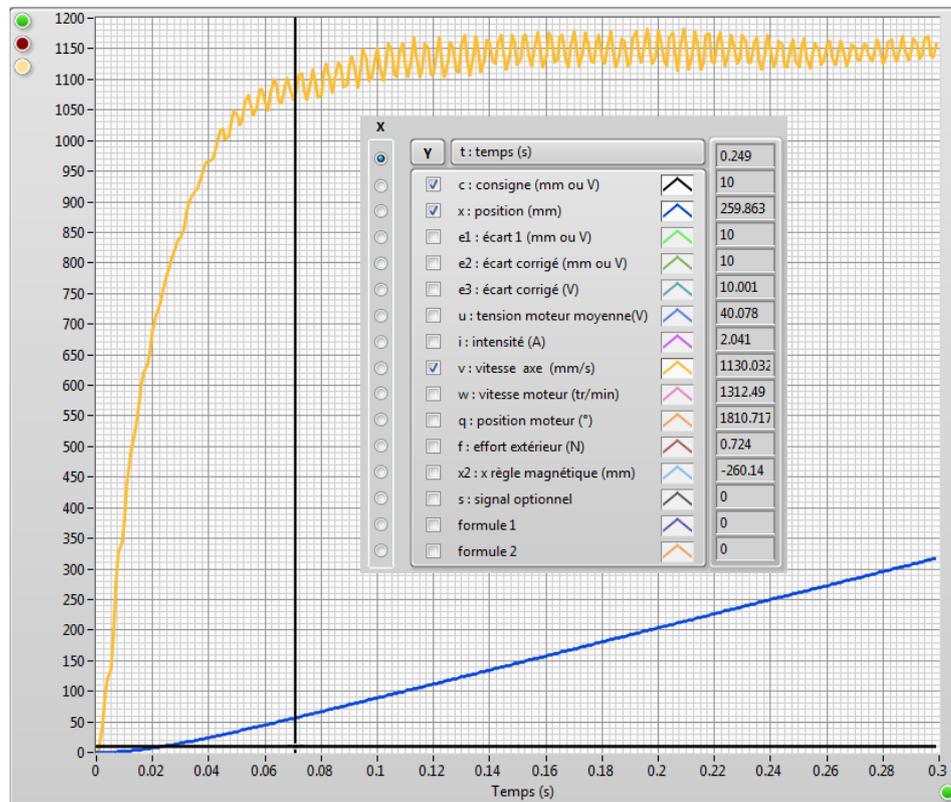
On pourra introduire la tension de saturation V_{sat} que l'on calculera

Quelle peut être l'origine physique de cette saturation ?



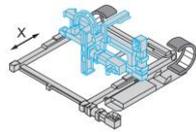
REPONSE

On peut réaliser une identification basée sur la réponse en vitesse. Le modèle attendu est alors un premier ordre : modèle du premier ordre qui semble tout à fait convenir.



On trouve alors : $V_{\infty} = 1140 \text{ mm/s}$ et $\tau_{\text{éq}} = 22 \text{ ms}$

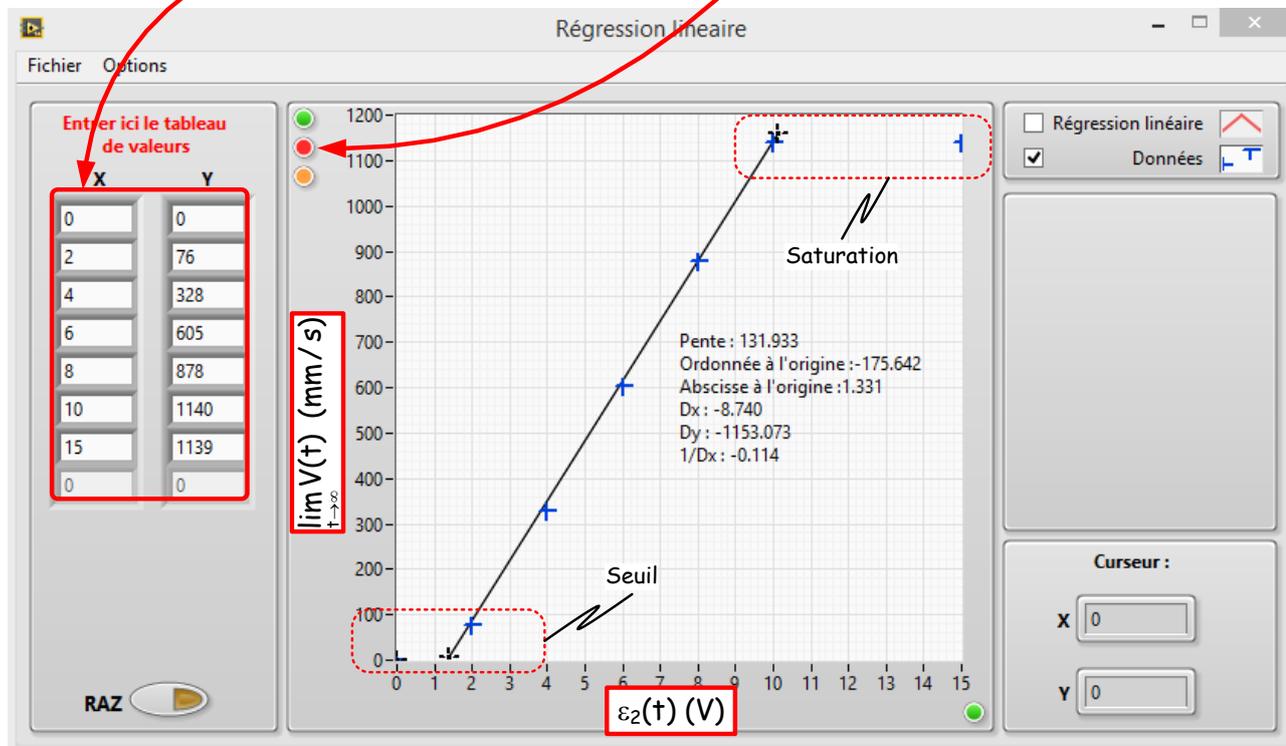
En utilisant le menu "Bonus", "Régression linéaire", on obtient une courbe de type ci-dessous qui met bien en évidence deux non linéarités : Une saturation à $V_{\text{sat}} = \pm 10 \text{ V}$ et une tension de seuil ou tension de démarrage du moteur $u_{\text{seuil}} \approx 1.5 \text{ V}$.



REPONSE

Renseigner le tableau couple de points par couple de points

Outil "Segment"



On peut retenir les paramètres suivants :

$$K_{\text{éq}} = 132 \text{ (mm/s)/V}$$

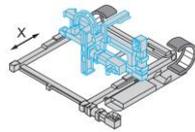
$$\tau_{\text{éq}} = 22 \text{ ms}$$

$$u_{\text{seuil}} = 1.5 \text{ V}$$

$$V_{\text{sat}} = 10 \text{ V}$$

La tension de seuil correspond à ce qui avait pu être observé en début de TP et provient physiquement de la présence de frottements secs ou de résistances au roulement dans le mécanisme. Les résistances au roulement se modélisent finalement de la même façon que les frottements secs : il faut un effort moteur suffisant pour réussir à vaincre ces résistances et commencer à initier le mouvement.

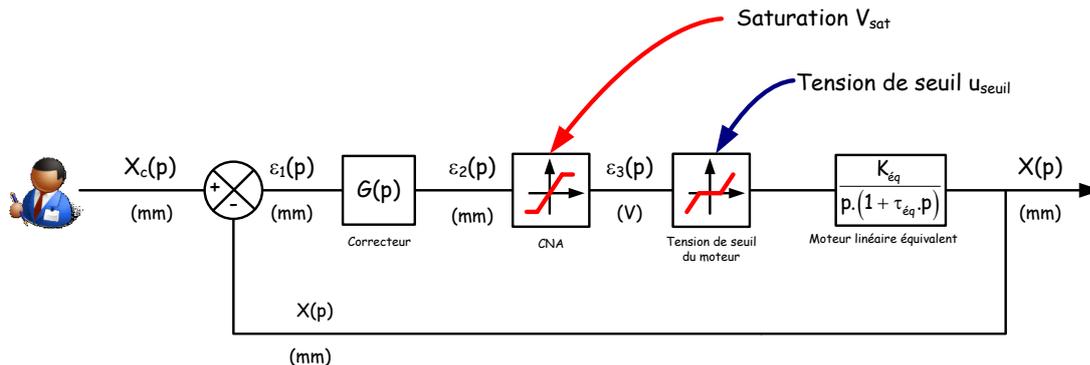
Cette tension de seuil justifie le protocole expérimental suivi : si on avait estimé le gain $K_{\text{éq}}$ en divisant la vitesse finale atteinte par la tension appliquée, on aurait obtenu autant de gains statiques que d'essais effectués. Ce sont des erreurs de dépouillement intéressantes à faire avec les étudiants pour mettre en évidence que la tension de seuil (ou le frottement sec) casse la linéarité du comportement.



REPONSE

Cette tension de seuil explique en particulier qu'un écart $\varepsilon_1(t)$ (mm) non nul génère une tension moteur $\varepsilon_2(t)$ (volts) non nulle qui peut ne pas suffire à entraîner le moteur.

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

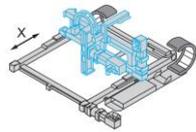


Si on se place dans le cadre d'une correction proportionnelle de gain $G(p) = G$ avec une entrée indicielle d'amplitude x_c , ce modèle permet d'expliquer en particulier que la tension de seuil u_{seuil} est susceptible de générer des écarts de position maxi $\varepsilon_{1 \text{ statique max}} = \frac{u_{seuil}}{G}$.

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 $\varepsilon_{1 \text{ statique}}$ est faible.

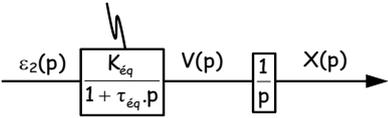
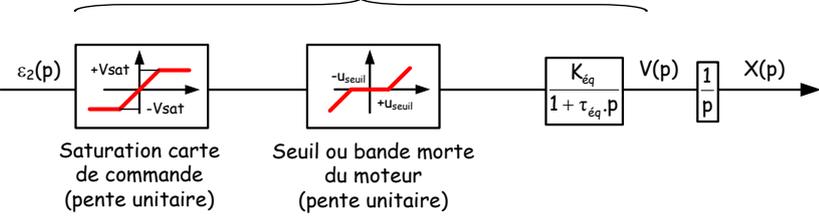
Par contre, quelle que soit la tension $\varepsilon_2(t)$ appliquée, toutes les valeurs de $\tau_{\varepsilon q}$ sont approximativement similaires : $\tau_{\varepsilon q} \approx 22 \text{ ms}$. Cela se démontre : en présence de perturbations constantes, la constante de temps du moteur linéaire équivalent n'est pas affectée.

La tension de saturation provient elle de la carte de commande qui a un gain de 1 mais présente une saturation à $\pm 10 \text{ V}$.



REPONSE

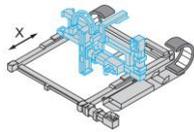
Le comportement étant manifestement non linéaire, il faut à ce stade faire un choix :

| | | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Modèle linéaire (Saturation et seuil non pris en compte)</p> | <p>Moteur linéaire équivalent</p>  | <p>$K_{ég} = 132$ (mm/s)/V $\tau_{ég} = 22$ ms</p> |
| <p>Modèle non linéaire (avec seuil et saturation)</p> | <p>Moteur linéaire équivalent</p>  <p>Saturation carte de commande (pente unitaire)</p> <p>Seuil ou bande morte du moteur (pente unitaire)</p> | <p>$K_{ég} = 132$ (mm/s)/V $\tau_{ég} = 22$ ms $U_{seuil} = 2$ V $V_{sat} = 10$ V</p> |

Le modèle linéaire sera plus facile à manipuler (résolution manuelle notamment) et permettra de caler un correcteur par les méthodes usuelles. Les prévisions faites sur la base de ce modèle seront bien sûr moins précises que celle basées sur le modèle non linéaire.

Ce modèle de boucle ouverte sera tout à fait exploitable cependant si on prend soin d'effectuer des essais qui permettent d'éviter la saturation et si on choisit un gain de correcteur qui rejette suffisamment bien les perturbations (à partir de $G = 1$ au moins)

Le modèle non linéaire, plus proche de la réalité, ne permettra pas de caler de correcteur par les méthodes vues dans le cours de SLCI. Les non linéarités évoquées ne sont d'ailleurs pas linéarisables en tout point de fonctionnement (là où les tangentes sur les courbes de tension de seuil et de saturation subissent des discontinuités).



Analyse en boucle fermée

Le modèle de boucle ouverte ayant été mis en place, on va maintenant l'utiliser pour exploiter le modèle de boucle fermée. On se place dans un premier temps dans le cadre d'un correcteur proportionnel de gain $G(p) = G$.

On choisira les gains G du correcteur parmi $\{0.1, 0.5, 1, 3\}$

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

Préliminaire :

En considérant le modèle de boucle ouverte $H_{bo}(p) = \frac{G.K_{\acute{e}q}}{p.(1 + \tau_{\acute{e}q}.p)} = \frac{132.G}{p.(1 + 0.022.p)}$, le modèle linéaire

de boucle fermée s'écrit $H_{bf}(p) = \frac{X(p)}{X_c(p)} = \frac{K_{bf}}{1 + \frac{2.\zeta_{bf}}{\omega_{nbf}}.p + \frac{p^2}{\omega_{nbf}^2}}$.

On peut alors calculer les coefficients caractéristiques de ce 2nd ordre pour les deux valeurs suivantes du gain G du correcteur :

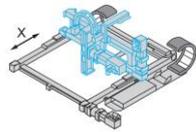
| $G = 0.5$ | $G = 1$ |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $K_{bf} = 1$ | $K_{bf} = 1$ |
| $\zeta_{bf} = 0.42$ | $\zeta_{bf} = 0.29$ |
| $\omega_{nbf} = 55 \text{ rad/s}$ | $\omega_{nbf} = 78 \text{ rad/s}$ |

Repositionner le chariot en appuyant sur le bouton "Réinitialiser" du pupitre et choisir un pilotage en boucle fermée (menu "BO/BF")

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

On analyse maintenant dans l'onglet "Identification / Simulation", "Temporelle linéaire" si le modèle linéaire de boucle fermée qui vient d'être mis en place reflète correctement le comportement du système réel ?

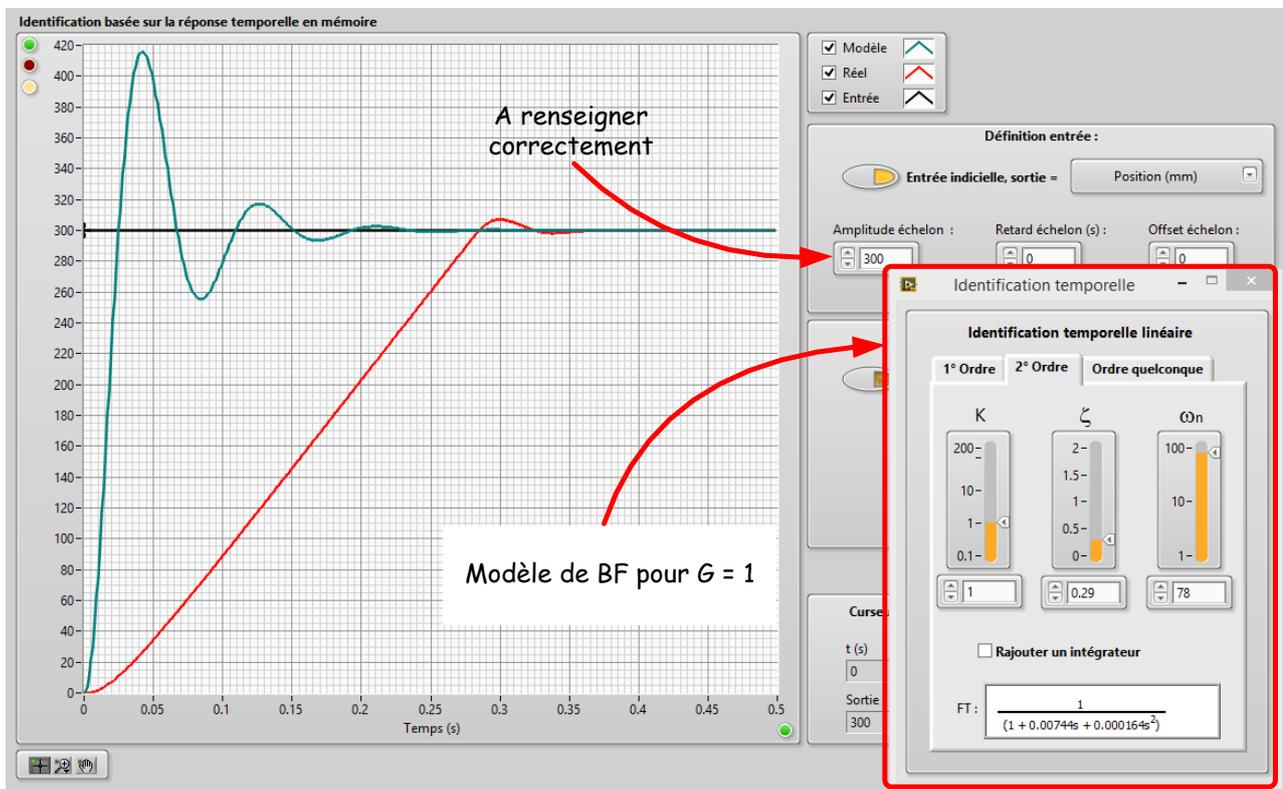
Le modèle de boucle fermée colle-t-il ? Que se passe-t-il ? L'allure de la courbe de position réelle est-elle conforme à ce que prévoit un modèle de boucle fermée du second ordre ? Interpréter.

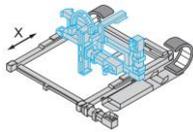


REPONSE

Avec une amplitude d'échelon de 300 mm et un gain $G = 1$, le système sature jusqu'à ce que la position atteigne 290 mm. C'est seulement à partir de cette position que l'écart $\varepsilon_2(t)$ devient inférieur à 10 mm et donc $\varepsilon_3(t)$ inférieur à 10 V.

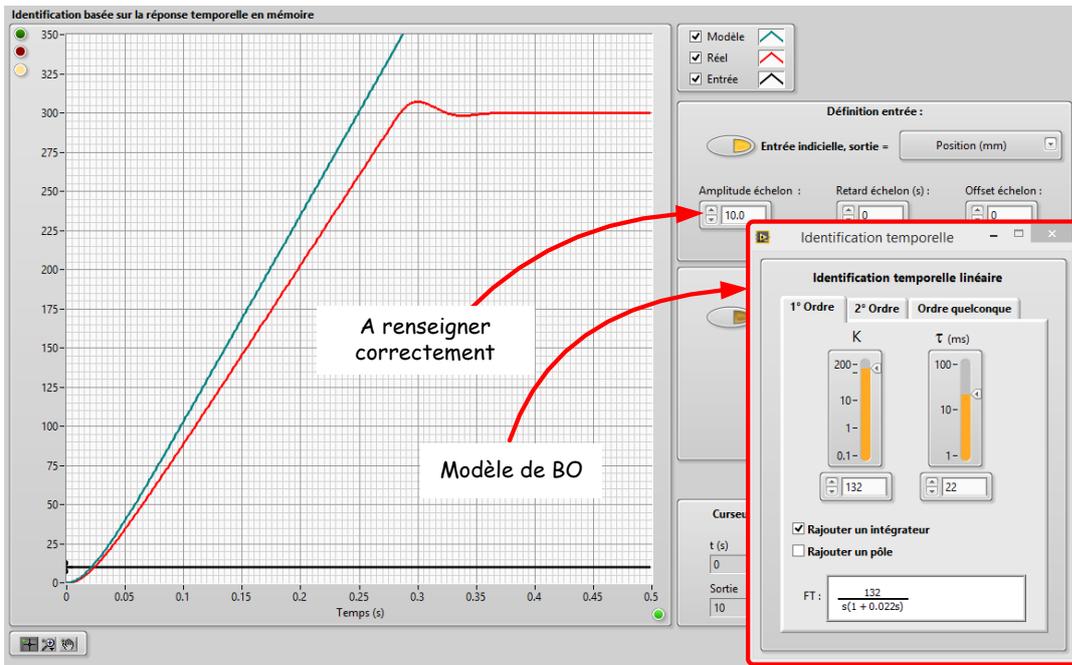
Sur un essai qui dure donc environ 0.4 secondes, la carte de commande sature pendant près de 0.28 secondes c'est-à-dire à peu près tout le temps. Pendant ces 0.28 secondes, la tension d'alimentation $\varepsilon_2(t)$ du moteur linéaire équivalent vaut 10 V et tout se passe donc comme si le système était commandé en boucle ouverte : le modèle linéaire de boucle fermée (2nd ordre) ne peut pas convenir.





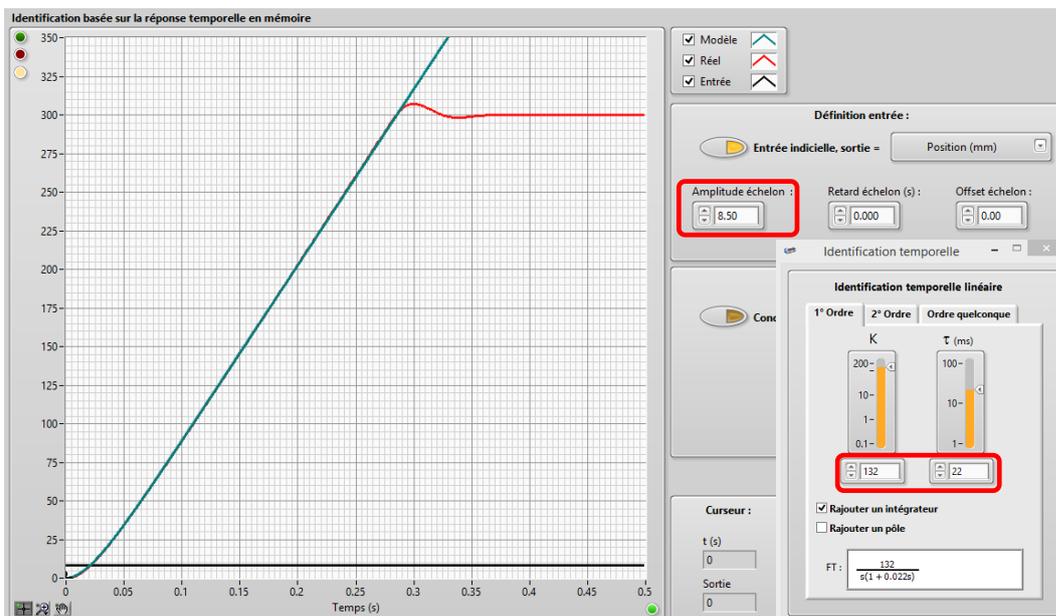
REPONSE

Cela peut être intéressant ici d'essayer de faire coller le modèle linéaire de boucle ouverte (1^{er} ordre intégré) sur les 0.28 premières secondes de l'essai : modèle qui ne collera qu'approximativement à cause de la tension de seuil non prise en compte dans ce modèle linéaire.

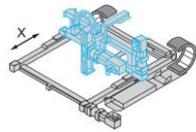


Comparaison modèle-réel pendant la phase de saturation

Compte tenu de la tension de seuil de 1.5 V, si l'amplitude de l'échelon d'entrée vaut 8.5 V et non plus 10 V, le modèle colle parfaitement :



Comparaison modèle-réel pendant la phase de saturation avec prise en compte de la tension de seuil

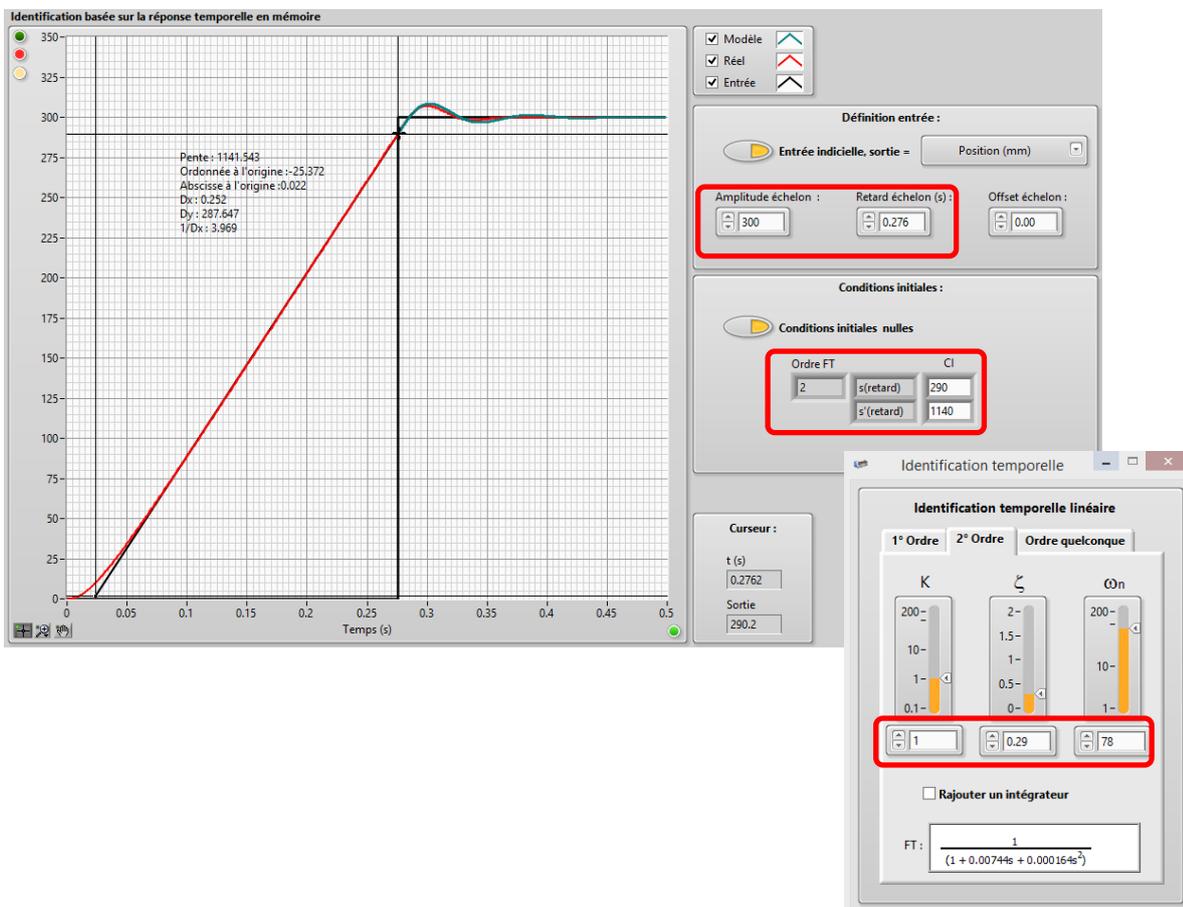


REPONSE

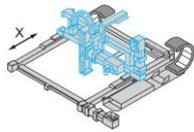
Une fois que le modèle ne sature plus (à partir de 0.28 s), la principale source d'écart entre le modèle et le réel provient de la tension de seuil. Cette tension de seuil prend son origine, on l'a déjà dit, dans les frottements secs internes du mécanisme et ce sont donc ces frottements secs qui cassent la linéarité du comportement. Ces frottements secs peuvent cependant être considérés comme des perturbations : tantôt positives, tantôt négatives (mais toujours résistantes).

Ces perturbations sont bien rejetées lorsque les gains situés en amont sont importants et notamment lorsque le gain G du correcteur est grand ($G > 1$). Elles ont alors un effet limité sur le comportement de l'asservissement et peuvent ne pas être prise en compte : le modèle devient alors un modèle du second ordre tout à fait classique (linéaire).

On met en évidence ci-dessous qu'un modèle du second ordre colle très bien sur le comportement réel mais uniquement sur la phase où il n'y a plus saturation... **et avec des conditions initiales non nulles** : position : celle à partir de laquelle il n'y a plus de saturation (290 mm), vitesse, la vitesse finale atteinte sous 40 V de tension d'alimentation du moteur (1140 mm/s), retard de l'échelon 0.276 s environ :



Identification sur la phase où il n'y a plus de saturation : 2^o ordre classique mais retardé et sous conditions initiales non nulles



REPONSE

Le calage de correcteur qui va être effectué sur le modèle linéaire donnera de bons résultats même si on sait que ce modèle linéaire peut très mal refléter le comportement temporel de la boucle fermée. En effet, tout ce qui concerne la dynamique de mise en position sera convenablement prévu : les termes en sinus de pulsation $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ amortis par une exponentielle du type $e^{\zeta \omega_n t}$ porteront beaucoup d'information. Par exemple la position des pôles de la boucle fermée contiennent toute l'information qui permet de caractériser le régime transitoire : temps de montée, temps de réponse à 5%, dépassements, pulsation propre non amortie, bande passante à - 3 dB...

On a remarqué que la carte de commande présentait une saturation de sa tension de sortie à ± 10 V. Que doit valoir le produit de l'amplitude x_c de l'échelon par le gain G pour être certain d'éviter toute saturation.

REPONSE

Il faut $|G \cdot x_c| \leq 10$. En effet, à l'instant initial, $\varepsilon_2(0^+) = G \cdot x_c$. En réponse indicielle, s'il n'y a pas saturation à l'instant initial, il n'y aura pas saturation plus tard non plus : l'écart $\varepsilon_2(t)$ est globalement décroissant en valeur absolue.

Essayer alors par exemple avec $\begin{cases} G = 0.5 \text{ et } x_c = 20 \\ G = 1 \text{ et } x_c = 10 \end{cases}$

Le modèle colle-t-il ?

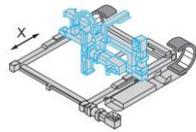
Expliquer les écarts observés. Où prennent-ils leur origine ?

REPONSE

Le modèle colle beaucoup mieux mais il reste encore la non linéarité liée à la tension de seuil dont on ne peut pas se débarrasser (contrairement à la saturation). Toutefois, comme on a pu le voir, pour des valeurs de gain suffisamment grandes (disons $G \geq 1$), les perturbations sont correctement rejetées et le modèle colle relativement bien.

On va maintenant faire évoluer le modèle en rajoutant les deux non linéarités observées lors de l'identification de la boucle ouverte.

On travaille maintenant dans l'onglet "Identification / Simulation" sous onglet "Temporelle non linéaire".



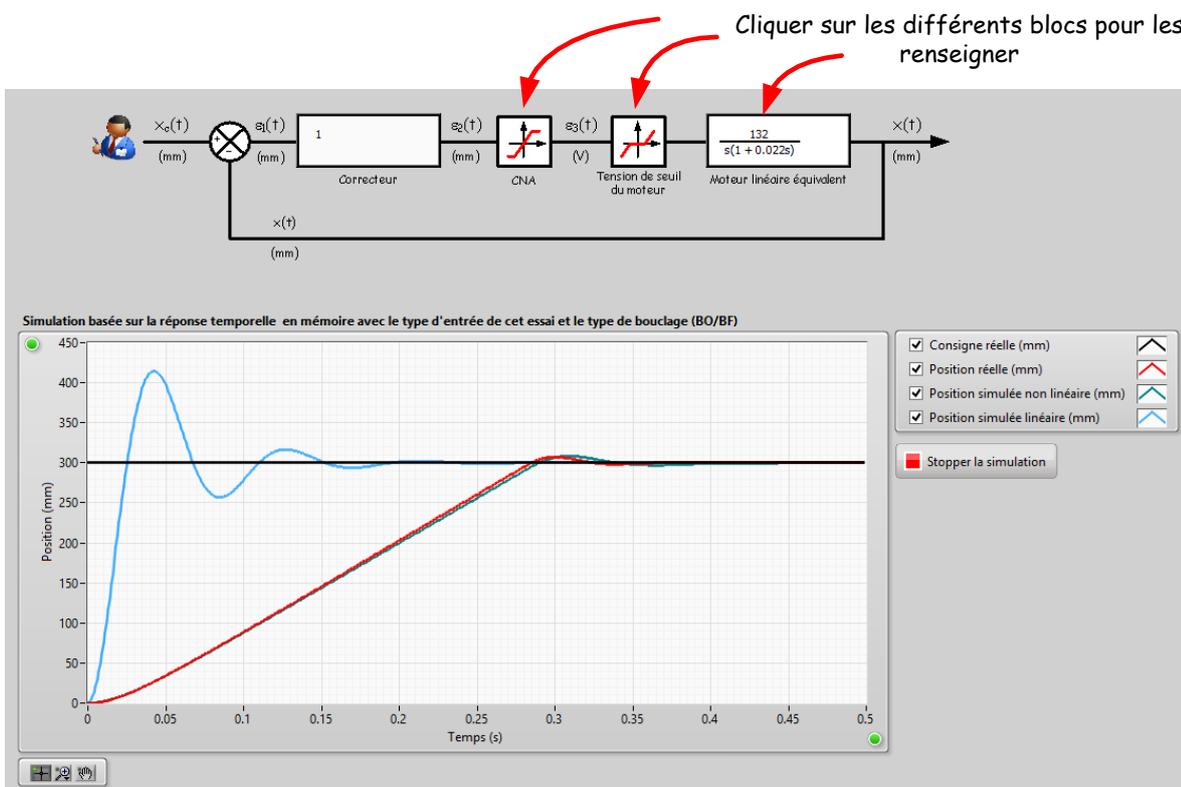
Rajouter la tension de seuil u_{seuil} du moteur linéaire équivalent et la saturation V_{sat} à ± 10 V

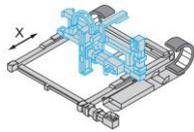
Le modèle colle-t-il lorsque $G.x_c \leq 10$?

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

REPONSE

Le modèle non linéaire colle très bien quelles que soient les conditions de l'essai : amplitude de l'échelon, gain de correcteur ou même d'autres types d'entrées ou de correcteurs :





Optimisation des performances : Calage d'un correcteur à avance de phase par exemple

On cherche maintenant à caler un correcteur qui permet de satisfaire toutes les exigences 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**.

Les critères C2 et C3 du cahier des charges sont convertis dans le domaine fréquentiel, les critères C1 et C4 demeurent inchangés :

| Exigence | Critères | | Niveaux |
|----------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Permettre à l'utilisateur de positionner une pièce | C1 | Système asymptotiquement stable | |
| | C2 | Amortissement caractérisé par la marge de gain et la marge de phase. | $M_G > 10$ dB $M_\varphi > 45^\circ$ |
| | C3 | Rapidité caractérisée par la pulsation de coupure à 0dB de la boucle ouverte | $\omega_{co-0dB} > 15$ rad/s |
| | C4 | Précision caractérisée par l'écart statique (écart permanent pour une entrée en échelon) | $\varepsilon_S < 0.5$ mm |



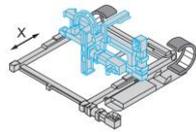
Pour ces approximations, on pourra consulter le cours d'automatique pour CPGE dans le dossier ressources ou dans le menu "Bonus", "Cours d'automatique".

Amortissement : pour un système dont le comportement en boucle fermée est du "type 2° ordre", pour des gains de boucle suffisamment élevés, on a $D_1(\%) = 25\% \Leftrightarrow \xi_{bf} = 0.4$ et $\xi_{bf} \approx \frac{M_\varphi}{100}$

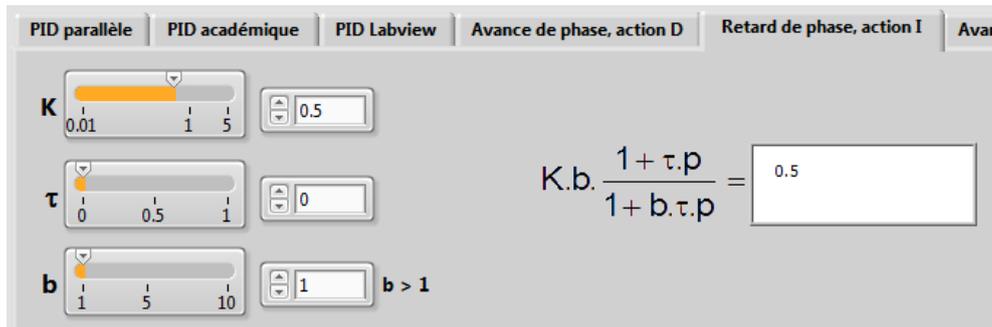
Rapidité : pour un système dont le comportement en boucle fermée est du "type 2° ordre", pour des coefficients d'amortissement $\xi_{bf} \leq 0.7$, on a $T_{5\%} \approx \frac{3}{\xi_{bf} \cdot \omega_{n\,bf}}$ et $BP_{-3\,dB} \approx \omega_{n\,bf}$.

Pour le calage du correcteur, on utilise alors le modèle linéaire mis en place. Quels que soient les résultats précédents, on suppose que la boucle ouverte non corrigée ($G = 1$) peut se modéliser par :

$$H_{bo}(p) = \frac{B \cdot K_{mot} \cdot R}{p \cdot (1 + \tau_{mot} \cdot p)} = \frac{K_{\acute{e}q}}{p \cdot (1 + \tau_{\acute{e}q} \cdot p)} = \frac{130}{p \cdot (1 + 0.02 \cdot p)}$$



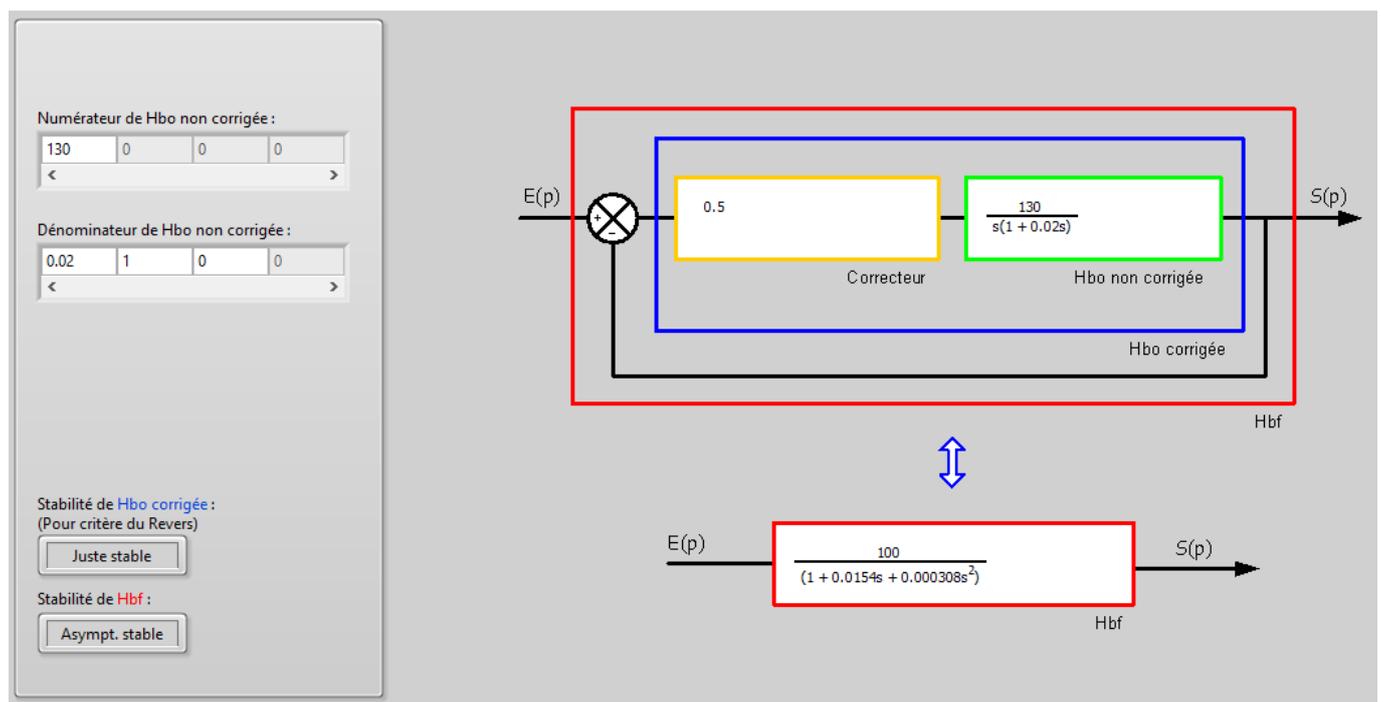
Ouvrir la fenêtre de correcteurs (Menu "Correcteur") et choisir un correcteur à "Avance de phase, action D"



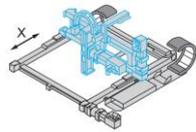
Pour le calage du correcteur, on utilisera l'onglet "Synthèse de correcteur".

On parcourra alors les sous-menus :

- ✓ "Modèle linéaire" pour spécifier le modèle linéaire choisi :

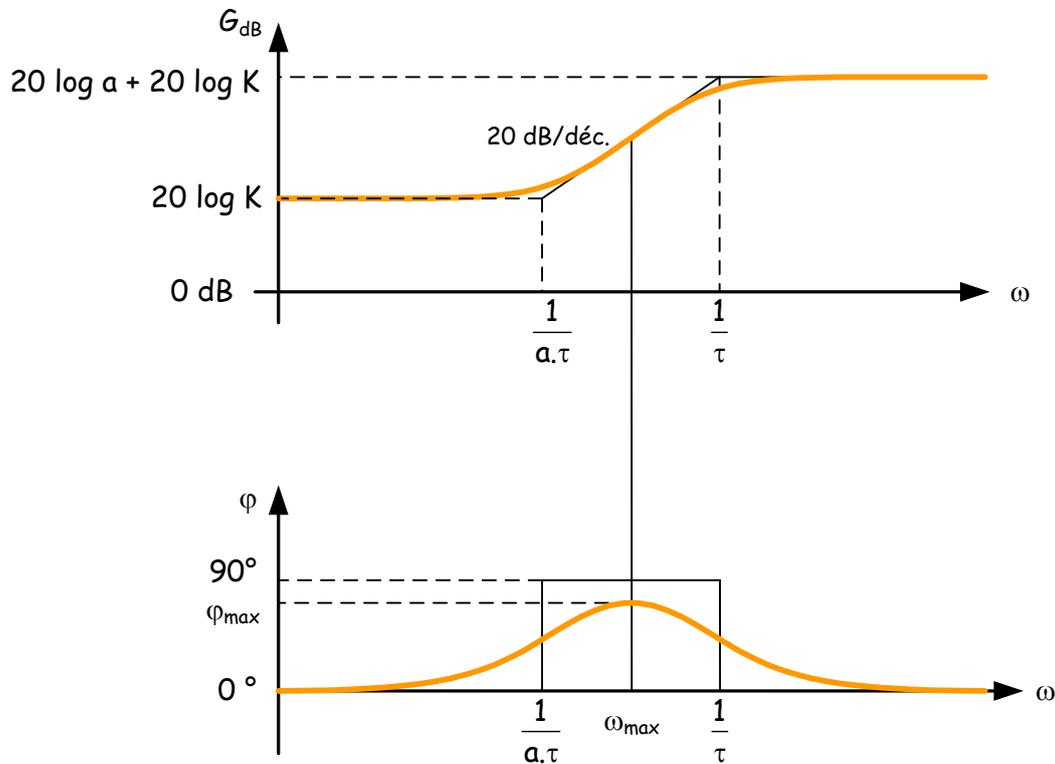


- ✓ "Aspect temporel linéaire" pour visualiser les réponses temporelles avec ou sans correction
- ✓ "Aspect fréquentiel linéaire" pour caler le correcteur
- ✓ "Aspect temporel non linéaire" pour visualiser les réponses temporelles sur la base du modèle non linéaire mis en place



On cherche par exemple à caler un correcteur à avance de phase $G(p) = K \frac{1 + a \cdot \tau \cdot p}{1 + \tau \cdot p}$ (avec $a > 1$)

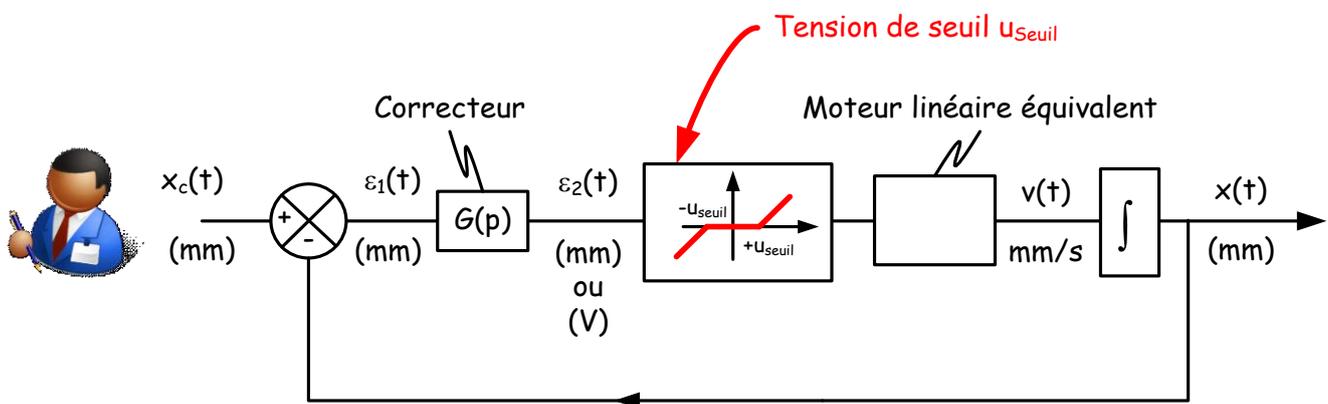
Rappel du diagramme de Bode de ce correcteur :

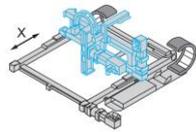


On procédera en quatre étapes :

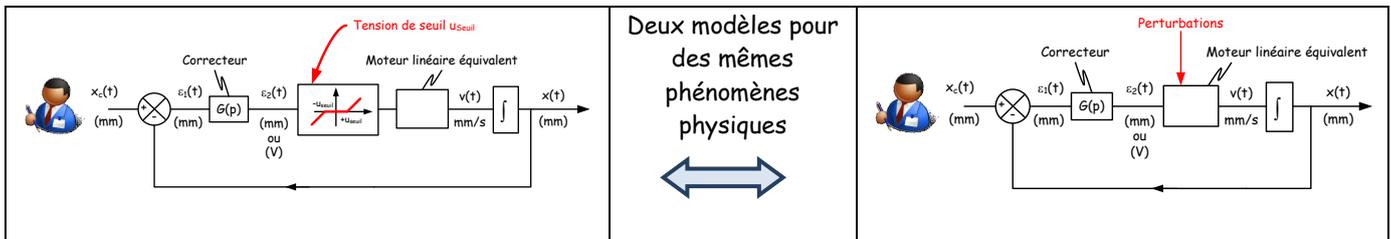
Etape 1 : On commencera par choisir K de façon à respecter le critère C4 compte tenu de la tension de seuil u_{seuil} .

Indice : En raisonnant très simplement sur le schéma bloc ci-dessous, indiquer l'écart statique $\epsilon_{1 \text{ stat}}$ 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.



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.

REPONSE

Etape 1 :

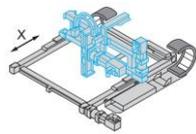
Compte tenu de $u_{seuil} \approx 1.5 \text{ V}$, il faut un gain basse fréquence K de correcteur tel que

$$\frac{u_{seuil}}{K} \leq \varepsilon_{1 \text{ statique max}}. \text{ Il faut donc } K \geq \frac{u_{seuil}}{\varepsilon_{1 \text{ statique max}}} \text{ c'est-à-dire } K \geq 3.$$

Etape 2 :

Avec $K = 3$, la marge de phase vaut 20.3 : c'est trop peu, il manque 25° de phase. C'est au correcteur d'apporter la phase manquante. La marge de gain elle est infinie.

Il faut donc choisir a de façon à apporter la phase $\varphi_{max} = 25^\circ$ souhaitée : $a = \frac{1 + \sin \varphi_{max}}{1 - \sin \varphi_{max}}$.



REPONSE

Le calcul peut être effectué avec les outils intégrés de Control'Drive :

Choisir la valeur de a qui apporte 25 ° de phase

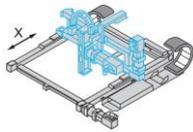
On trouve $a \approx 2.5$

Etape 3 :

Il faut ensuite choisir la constante de temps τ de telle façon que la phase soit apportée au "bon endroit".

Choisir la valeur de τ qui apporte la phase au bon endroit

On trouve $\tau \approx 0.0035$ s



REPONSE

Etape 4 :

On aura alors une pulsation de coupure à 0 dB d'environ 170 rad/s ce qui est bien supérieur à l'exigence du cahier des charges (15 rad/s)

Hbo corrigée

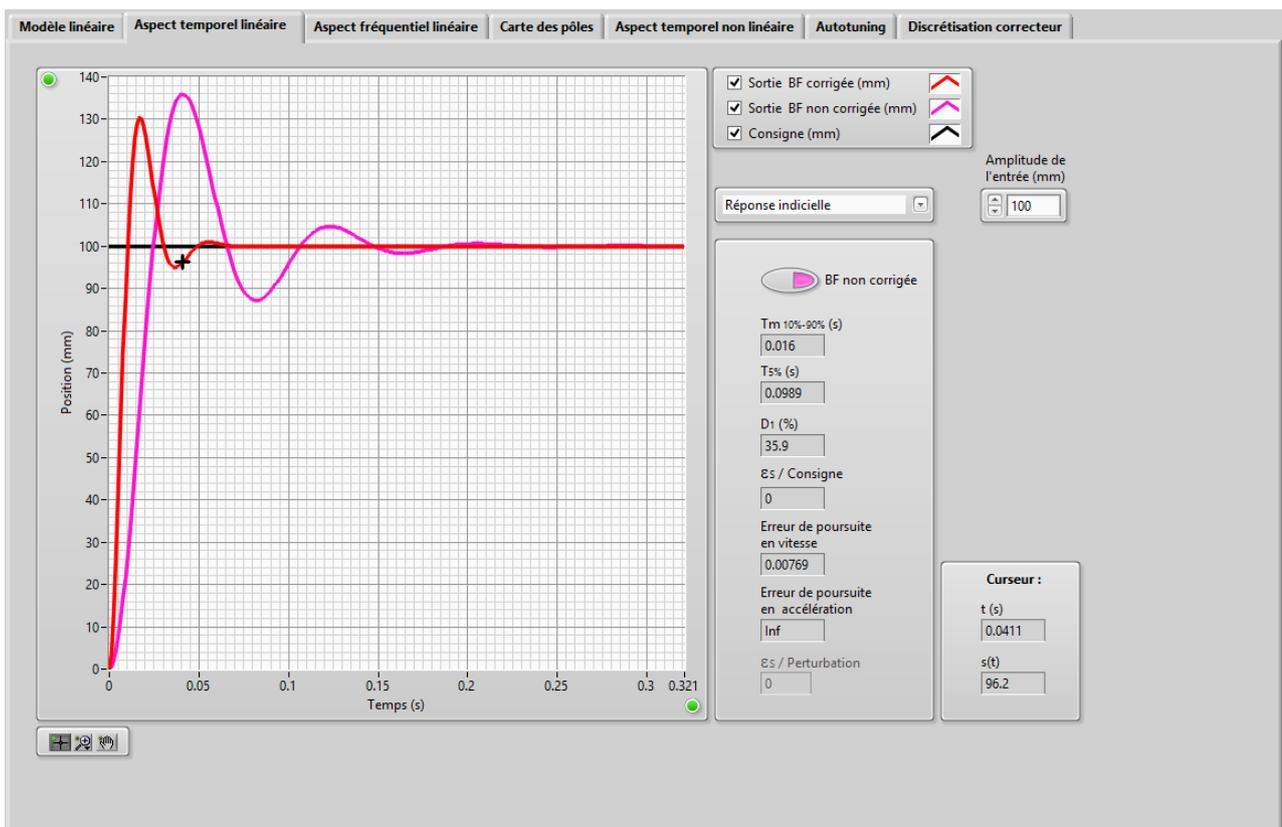
Pulsation de coupure à 0 dB (rad/s) : 170

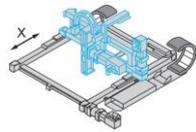
Pulsation à la phase -180° (rad/s) : NaN

Marge de gain (dB) : Inf

Marge de phase (°) : 41.8

Dans l'onglet "Aspect temporel linéaire", on peut observer la réponse temporelle avant correction (en rose) et après correction (en rouge).



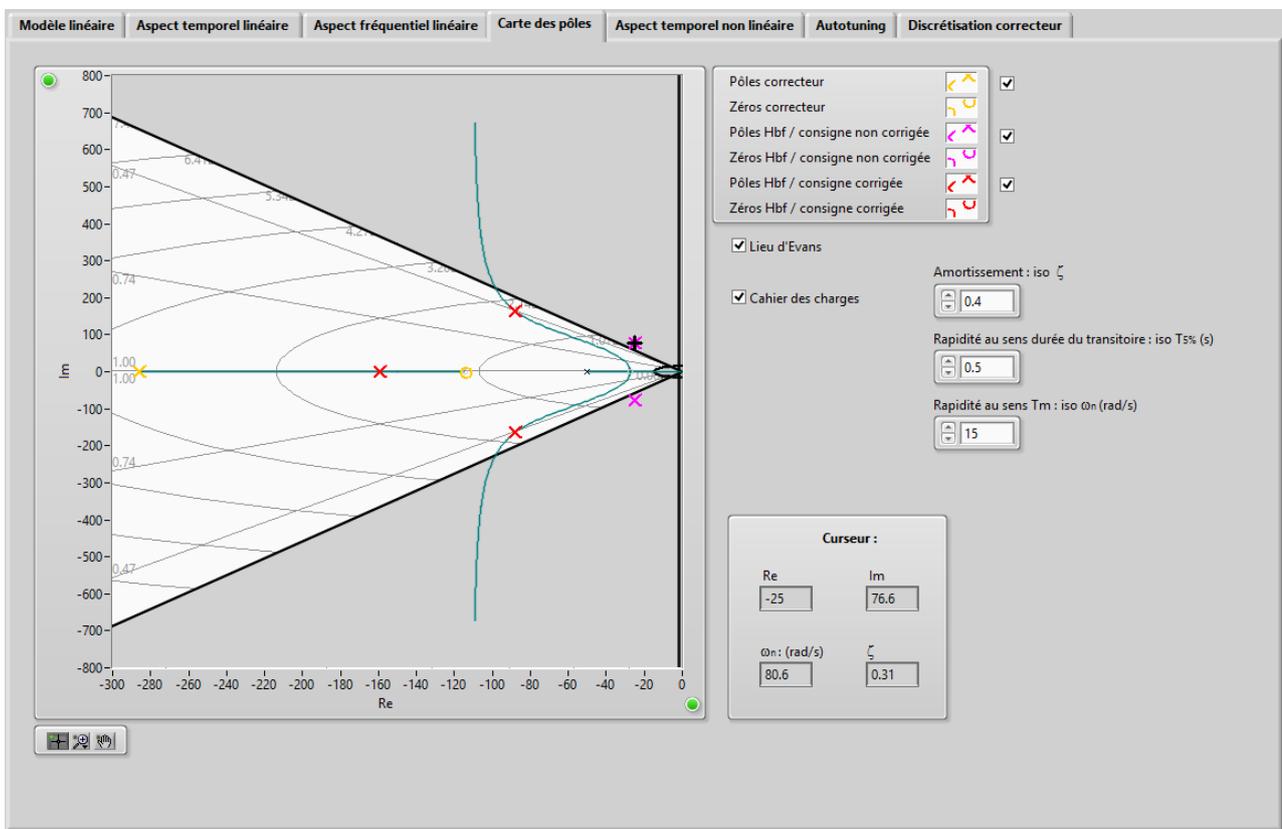


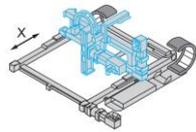
REPONSE

Dans l'onglet "Carte des pôles", on peut observer les pôles et les zéros de la boucle fermée avant correction (en rose) et après correction (en rouge).

On peut notamment observer la position des pôles par rapport aux lignes iso ξ (demi droites) et aux lignes iso ω_n (demi cercles)

Le cahier des charges peut aussi être visualisé.

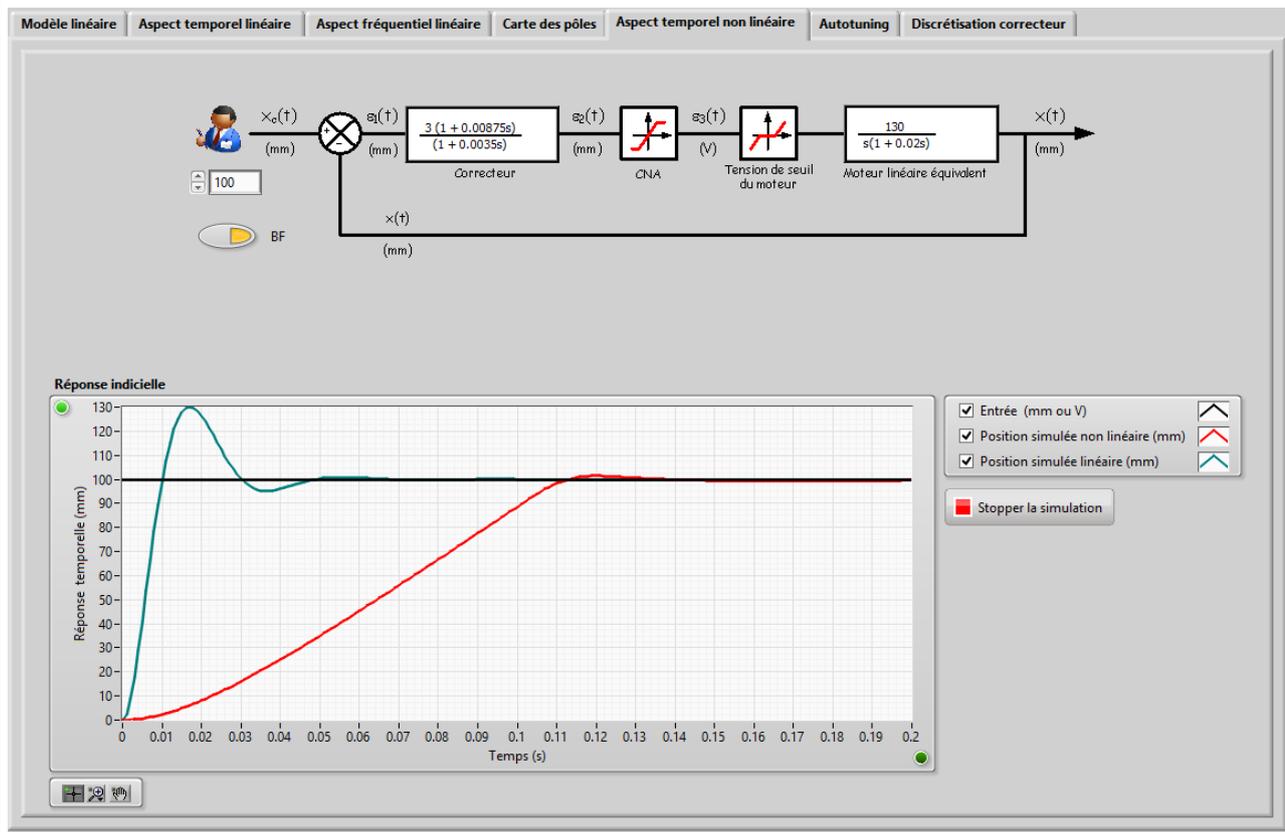


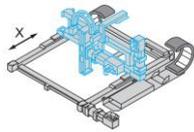


REPONSE

Dans l'onglet "Aspect temporel non linéaire", on peut observer la réponse indicielle sur la base du modèle linéaire et non linéaire.

Cliquer sur les blocs "CNA" et "Tension de seuil" pour les renseigner.





Validation du correcteur choisi

Retourner sur les onglets de pilotage : "Schéma bloc" par exemple ou "Analyse temporelle".

Dès que l'on quitte l'onglet "Synthèse correcteur", Control'X est à nouveau asservi avec le correcteur qui vient d'être calé (si le pilotage se fait en boucle fermée).

Imposer des consignes en échelon de 50 mm d'amplitude par exemple dans l'onglet "schéma bloc".

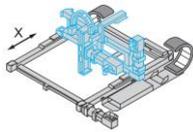
Imposer une consigne en échelon de 100 mm d'amplitude dans l'onglet "Analyse temporelle". Visualiser la réponse temporelle obtenue.

Le cahier des charges est-il respecté ? Discuter.

On peut éventuellement retourner dans l'onglet "Identification / Simulation", "Temporelle non linéaire" pour observer que le modèle non linéaire colle parfaitement au comportement réel observé.

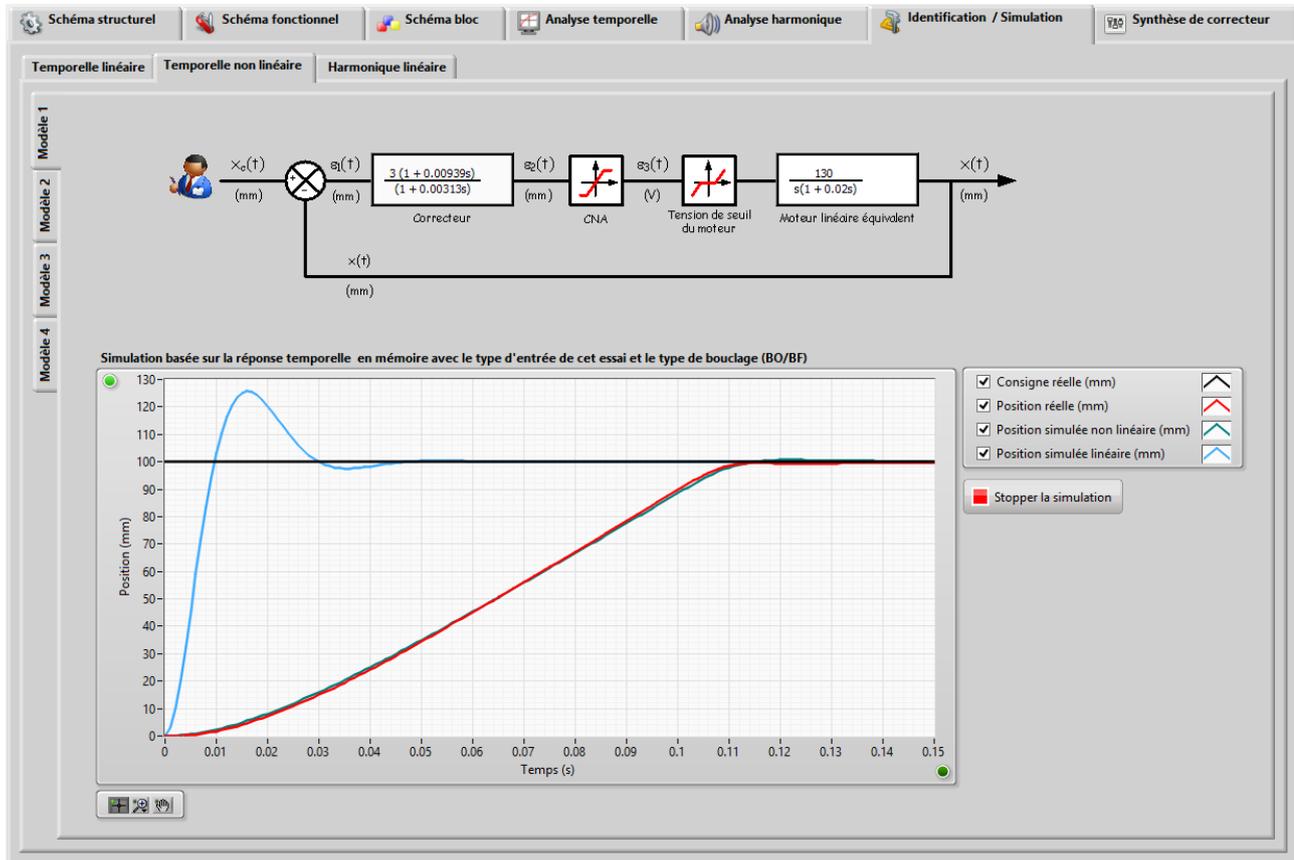
On peut dans cet onglet observer en particulier les trois écarts :

- Souhaité - Modèle
- Modèle - Réel
- Souhaité - Réel



REPONSE

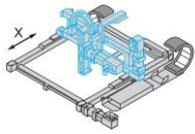
Les quatre critères du cahier des charges sont parfaitement respectés.



Les trois écarts : le souhaité, le réel et le modèle linéaire ou non linéaire

On peut modifier le type de consigne par exemple pour vérifier que le modèle colle très bien quel que soit le type d'entrée.

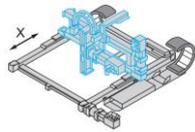
Le comportement étant fortement non linéaire, la course demandée influe fortement sur la durée de positionnement. On peut vérifier aisément que même pour la course maxi du chariot (environ 450 mm), le cahier des charges est respecté.



Control'X

Prise en main rapide du logiciel Control'Drive



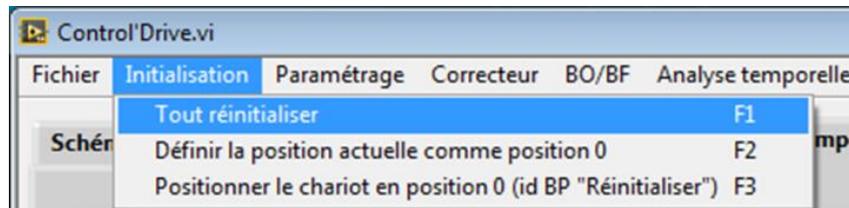


Control'Drive est le nom du logiciel de pilotage et de simulation de Control'X.

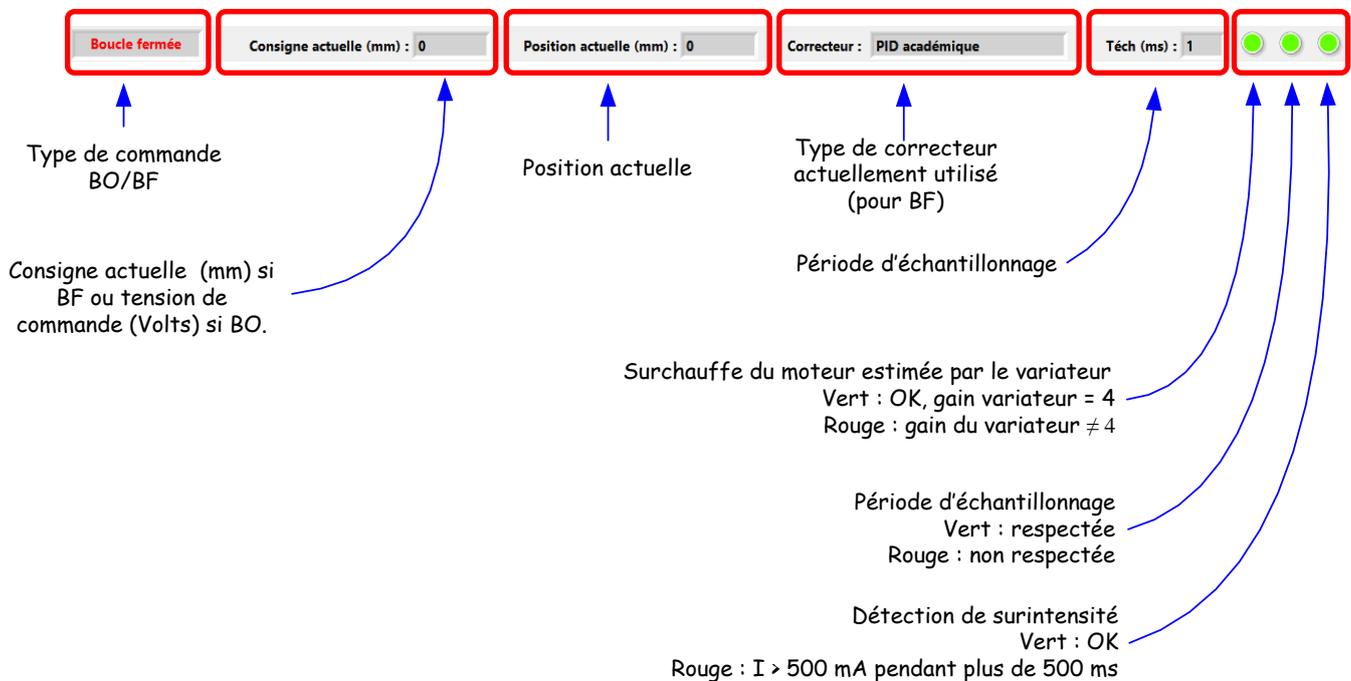
Démarrer le logiciel en double cliquant sur l'icône du bureau :

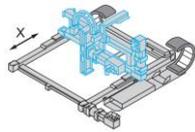


Il est préférable de mettre l'axe sous tension avant de lancer Control'Drive. Sinon la remise en condition initiale (chariot à gauche) ne sera pas effectuée et il faudra la faire manuellement :



Un coup d'œil régulier sur la barre d'état vous permettra de savoir où vous en êtes :

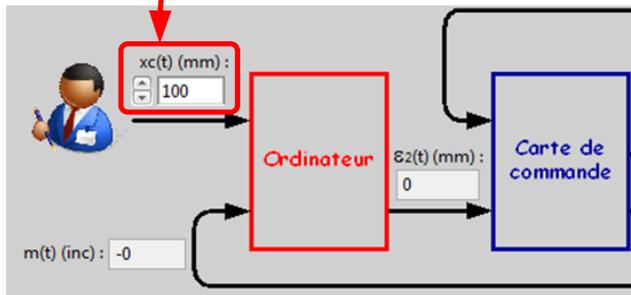




Onglet "Schéma structurel" par exemple

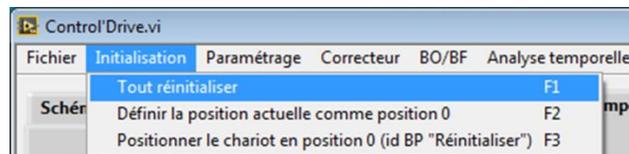
Modifier la valeur de la consigne :

- Avec les flèches (pas de 50 mm en BF, 0.5 V en BO)
- En saisissant une valeur au clavier
- En positionnant le curseur de souris à droite de la valeur numérique à modifier et par scrolling (molette centrale de la souris)

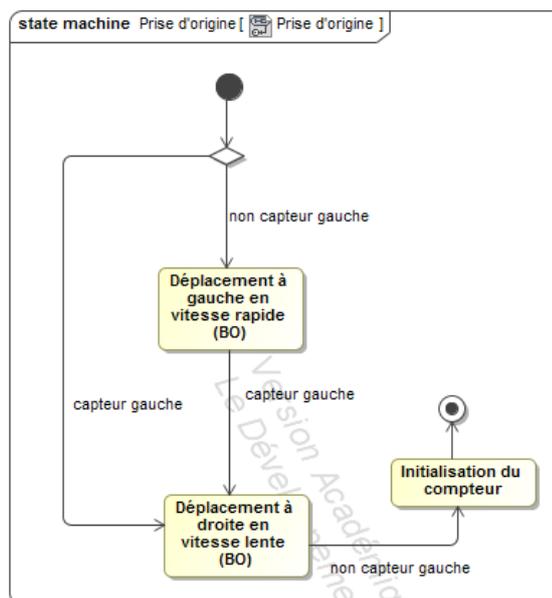


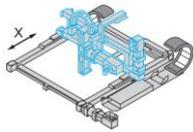
Vous pouvez à tout instant :

- Utiliser une des trois fonctions de réinitialisation :



- Le menu "Tout réinitialiser" permet d'effectuer une réinitialisation sur le capteur de fin de course "logiciel" gauche selon l'algorithme ci-dessous :





- Le menu "Définir la position actuelle comme position 0" permet d'effectuer un 0 relatif à la position actuelle
- Le menu "Positionner le chariot en position 0 "Home" permet de revenir au 0 relatif selon un pilotage en boucle fermé selon un trapèze de vitesse avec un correcteur PID bien calé. La précision du positionnement dépend donc de la précision de l'asservissement avec ce correcteur PID.

- Modifier le type de correcteur (Menu "Correcteur" si vous l'avez perdu)

Double cliquer pour redéfinir les bornes au besoin

Correcteur.vi

PID parallèle | PID académique | PID Labview | Avance de phase, action D | Retard de phase, action I | Avance - Retard | Linéaire quelconque | Coupe bande

K: 0.01 | 0.1 | 1 | 10 | 0.2

Ti: 0 | 0.1 | 0.2 | 0

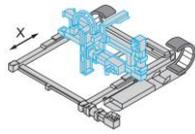
Td: 0 | 0.025 | 0.05 | 0

Ti=4*Td

FT propre

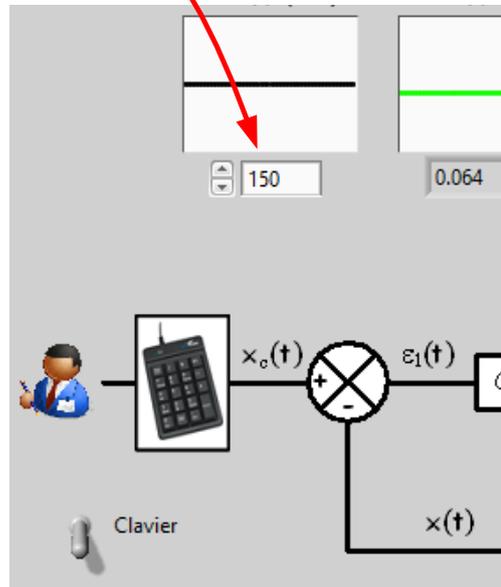
$$K \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p \right) = 0.2$$

- Exercer des perturbations sur le chariot pour constater que l'asservissement est bien en fonction. Cela permet aussi de cerner les performances en rejet de perturbation du correcteur choisi.

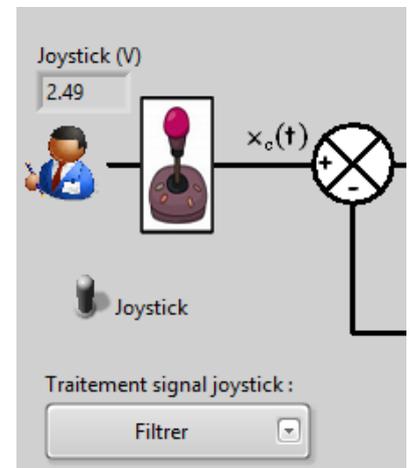


Onglet "Schéma bloc" par exemple

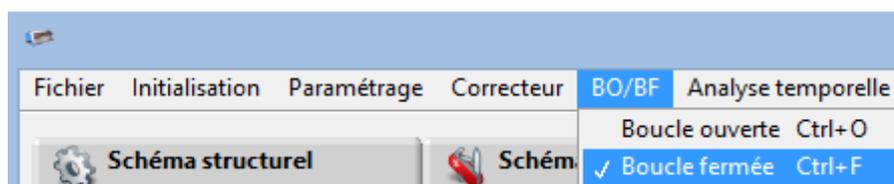
Vous pouvez ici aussi imposer une consigne au clavier

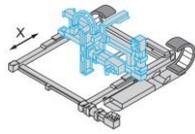


... Ou au joystick



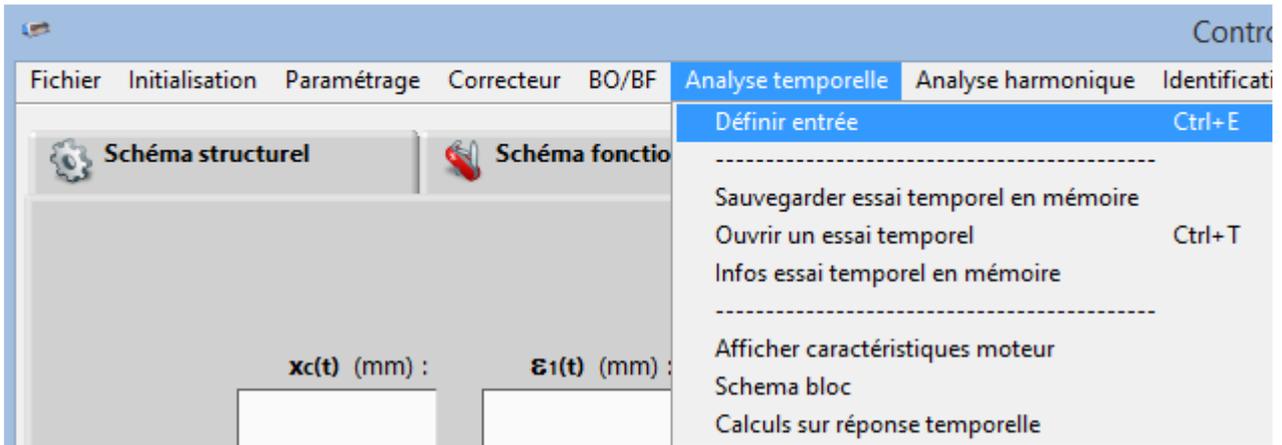
Vous pouvez passer à tout instant d'une commande en BO à une commande en BF :



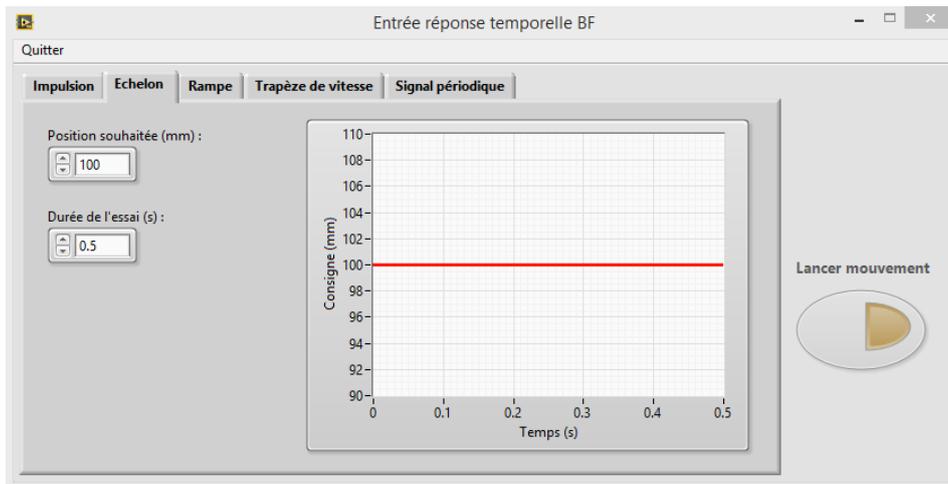


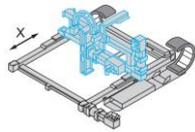
Onglet "Analyse temporelle"

Pour lancer un pilotage temporel utiliser le menu "Analyse temporelle" puis "Définir une entrée"



Sélectionner alors le type d'entrée et cliquer sur "Lancer Mouvement"

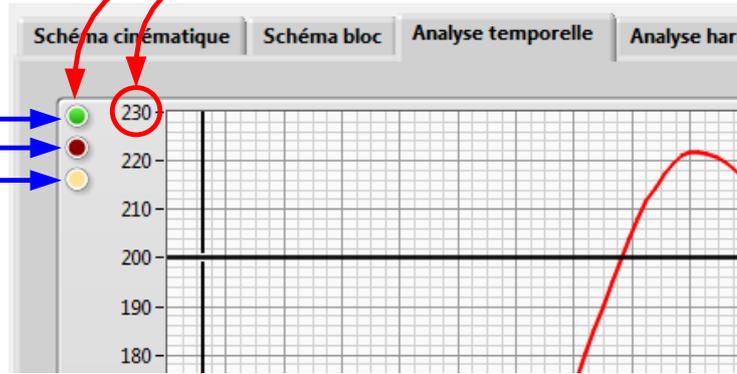




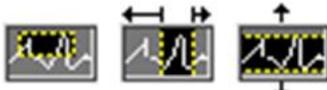
Double cliquer pour modifier l'échelle (en mode échelle manuelle - diode verte éteinte)

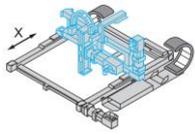
Options d'affichage :

- Echelle auto/manu 
- Tracé segment 
- Affichage points de mesure 



Déplacer le curseur (en mode "curseur" seulement)

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |   |  |
| <p>Mode curseur : permet de déplacer le curseur le long d'une courbe ou de sauter de courbe en courbe.</p> | <p>Mode zoom : permet de sélectionner le type de zoom : seulement si les échelles ne sont pas en mode automatique</p> | <p>Mode panoramique : permet de faire glisser la zone observée</p> |



Choix du signal en abscisse

Choix des signaux en ordonnée

X

Y t : temps (s)

- c : consigne (mm ou V) 
- x : position (mm) 
- e1 : écart 1 (mm ou V) 
- e2 : écart corrigé (mm ou V) 
- e3 : écart corrigé (V) 
- u : tension moteur moyenne(V) 
- i : intensité (A) 
- v : vitesse axe (mm/s) 
- w : vitesse moteur (tr/min) 
- q : position moteur (°) 
- f : effort extérieur (N) 
- x2 : x règle magnétique (mm) 
- s : signal optionnel 
- formule 1 
- formule 2 

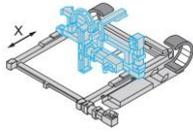
0
100
0
100
200
-0.002
0.009
0.012
0.031
0.036
0
-0.025
0
0
0

Formule 1
Formule 2

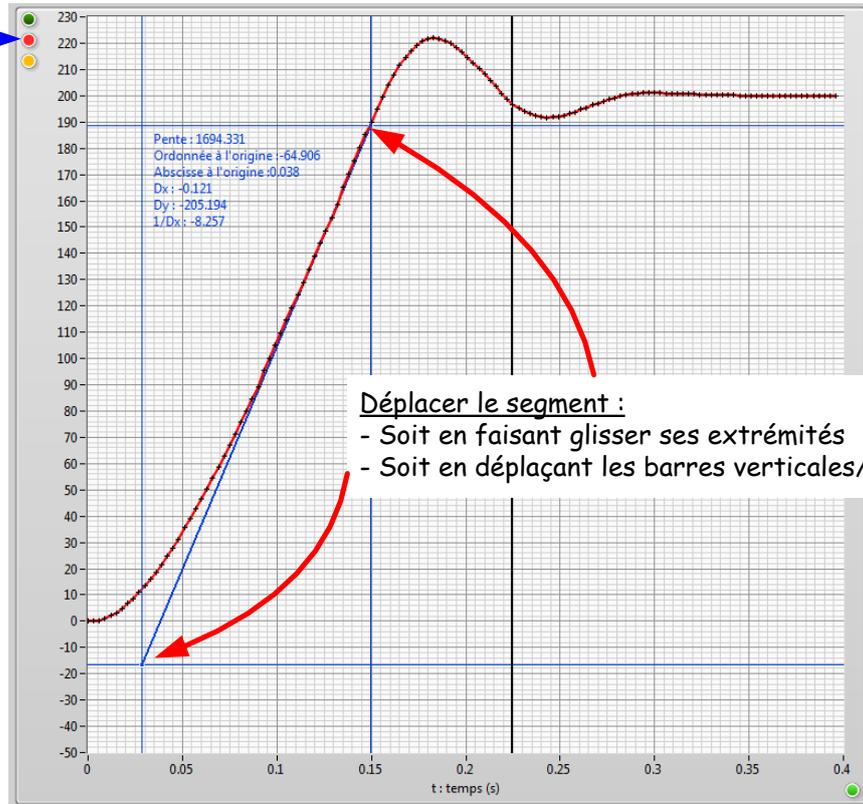
Déplacer le curseur pour obtenir les valeurs correspondantes

Saisissez une formule en utilisant les opérateurs mathématiques classiques : +, -, *, /, cos, sqrt...

Convertisseur d'unités

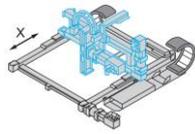


Mode tracé segment →



Déplacer le segment :

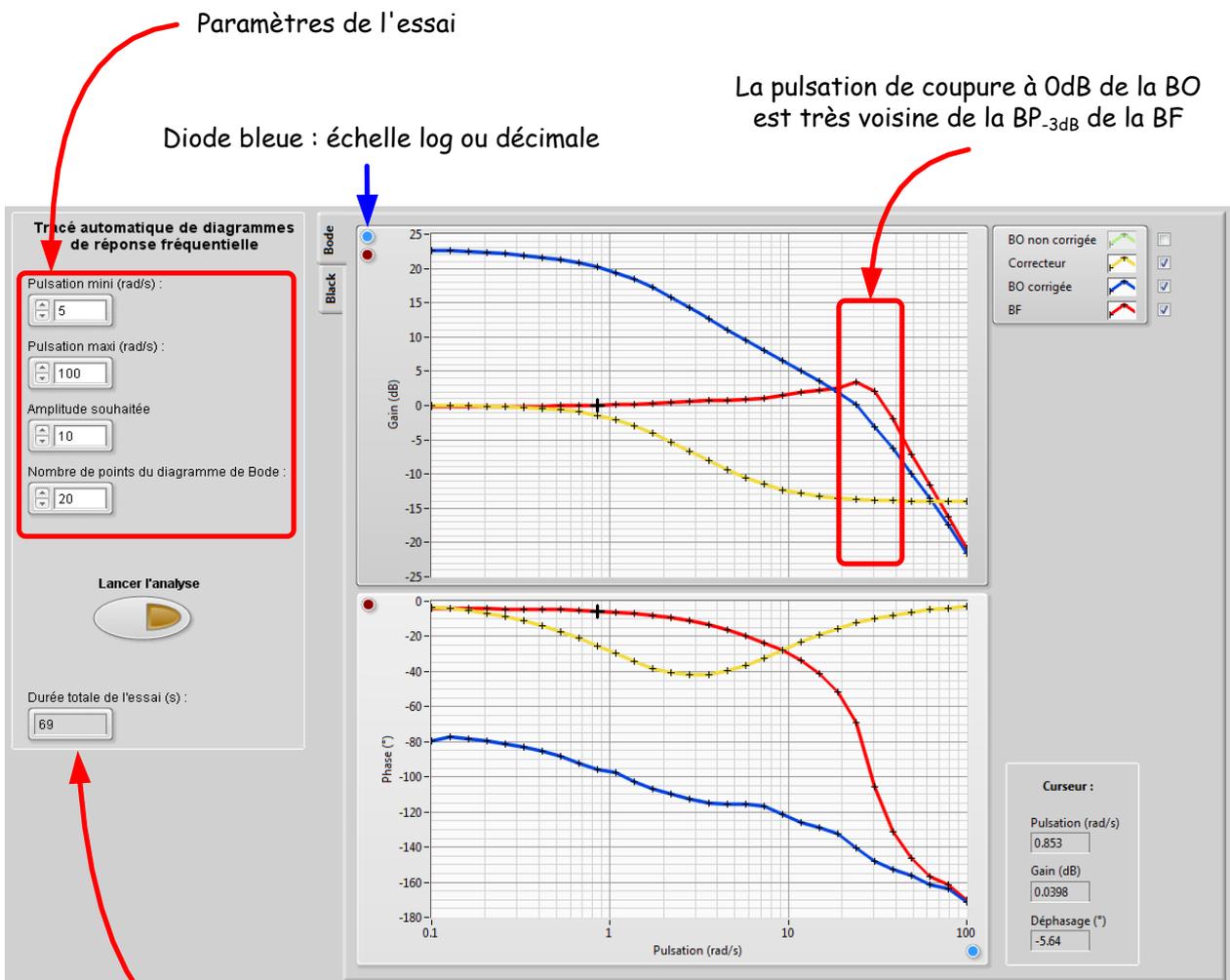
- Soit en faisant glisser ses extrémités
- Soit en déplaçant les barres verticales/horizontales



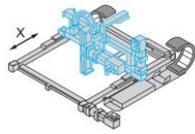
Onglet "Analyse harmonique"

Vous pouvez lancer une analyse harmonique en boucle ouverte ou boucle fermée :

- En boucle ouverte, l'amplitude est exprimée en volts
 - En boucle fermée, l'amplitude est exprimée en mm.
- Le comportement du correcteur, de la BO corrigée et non corrigée va aussi être analysé de façon transparente : cela fonctionne particulièrement bien pour des correcteurs proportionnels.



Attention avec des pulsations d'excitations faibles, la durée de l'essai peut devenir importante.

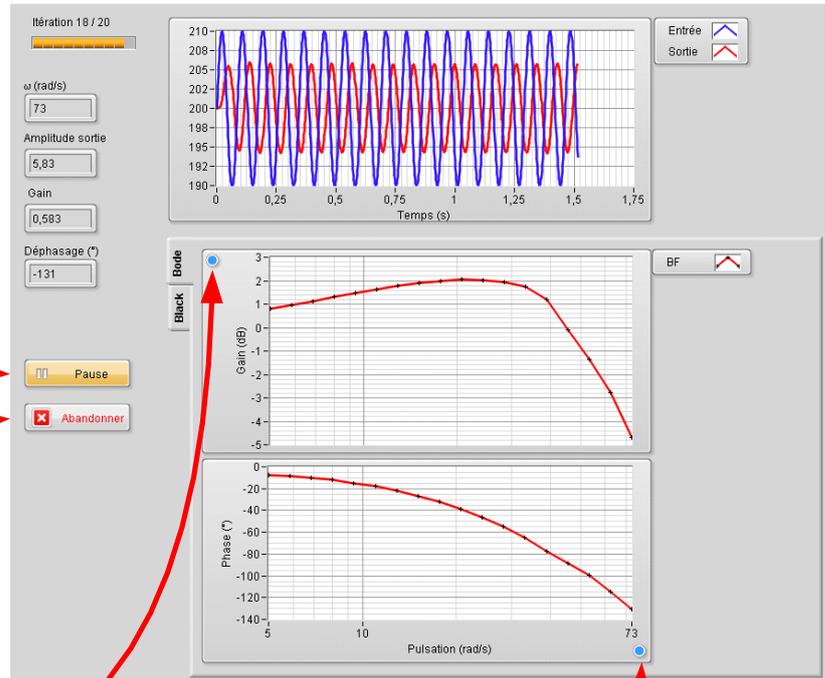


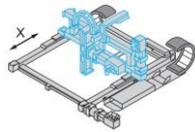
Mettre en pause après l'essai en cours

Abandonner après l'essai en cours

Echelle en dB ou en décimal
(pour justifier l'intérêt de l'échelle en dB)

Echelle en log ou en décimal
(pour justifier l'intérêt de l'échelle en log)





Onglet "Identification"

Dans cet onglet, on peut procéder à l'identification d'une réponse temporelle ou harmonique.

L'identification est faite sur la base des résultats en mémoire il s'agit :

- Soit de la réponse en mémoire au lancement de Control'Drive
- Soit du dernier essai temporel/harmonique effectué
- Soit du dernier essai temporel/harmonique chargé depuis un fichier de sauvegarde

The screenshot shows the 'Identification' window in Control'Drive. The main graph displays 'Identification basée sur la réponse temporelle en mémoire' with a red curve (measured response) and a blue curve (model fit). A text box points to the graph with the text: "L'outil tracé segment permet de mesurer rapidement de nombreuses caractéristiques sur la réponse." Another text box points to the 'Identification' menu in the software's main menu, stating: "Menu 'Identification', 'Fenêtre d'identification' si vous avez perdu cette fenêtre".

The parameter definition panel on the right shows:

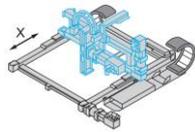
- Modèle:
- Réel:
- Entrée:
- Définition entrée: Entrée indicielle, sortie = Position (mm)
- Amplitude échelon: 100
- Retard échelon (s): 0
- Offset échelon: 0

The 'Identification temporelle linéaire' panel shows:

- 1^{er} Ordre: K = 200
- 2^e Ordre: ζ = 0.64707
- Ordre quelconque: ω_n = 32
- Rajouter un intégrateur:
- FT:
$$\frac{1}{(1 + 0.0404s + 0.000977s^2)}$$

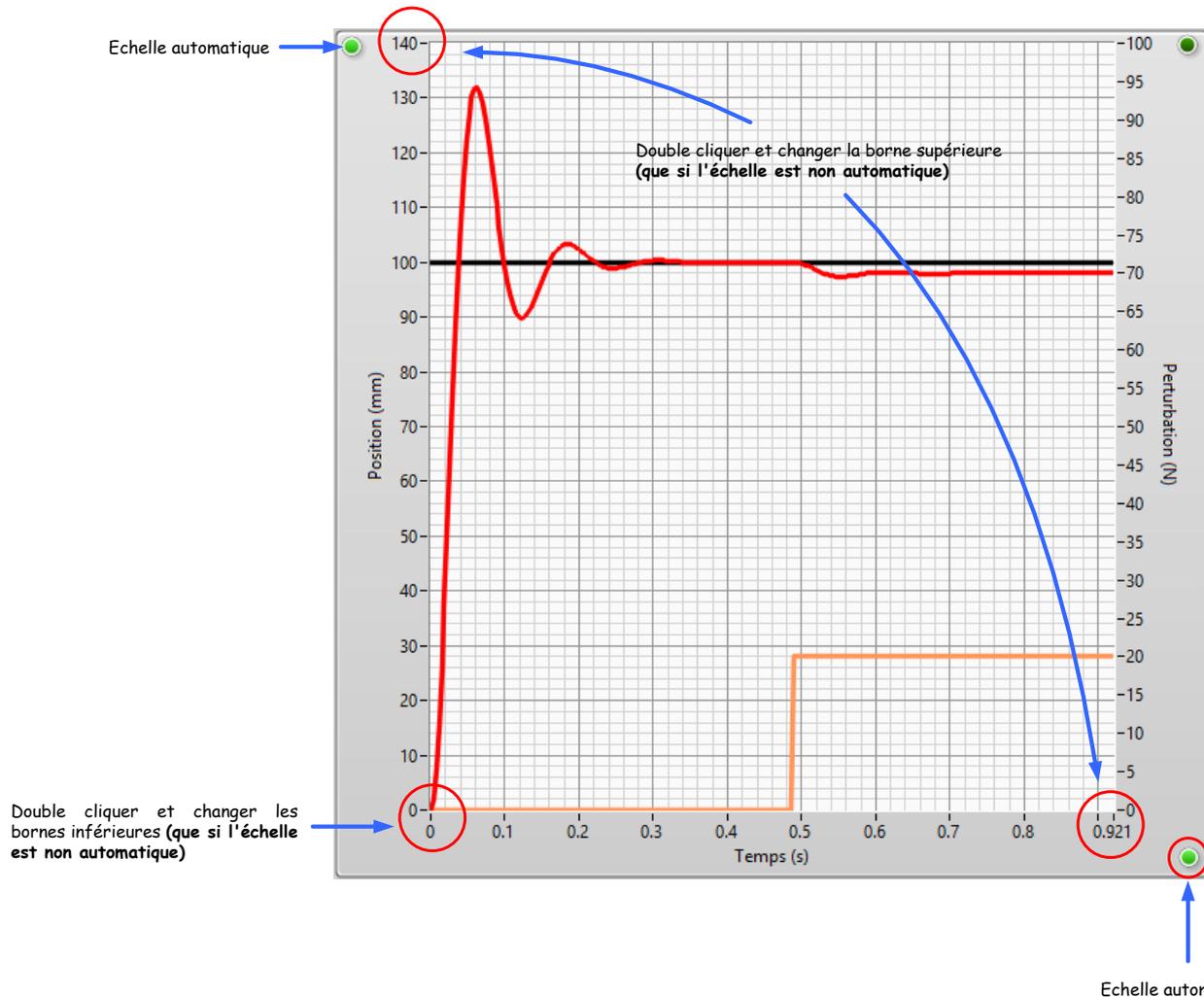
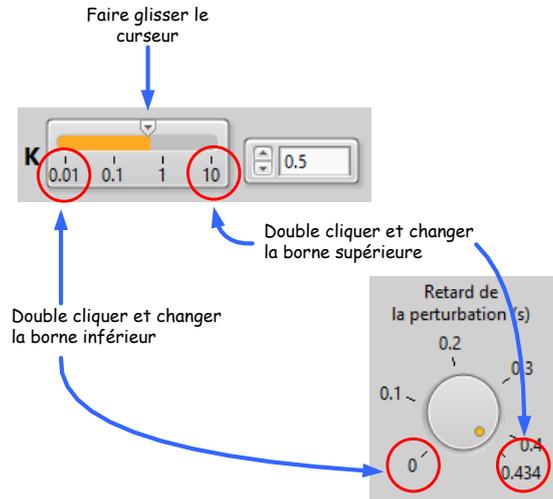
The status bar at the bottom shows: Boucle fermée, Consigne actuelle (mm) : 150, Position actuelle (mm) : 99.936, Correcteur : PID académique, Téch (ms) : 1.

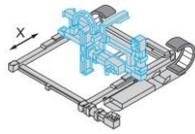
Control'Drive
 Identification Bonus
 Fenêtre d'identification temporelle linéaire
 Fenêtre d'identification harmonique
 Options identification non linéaire



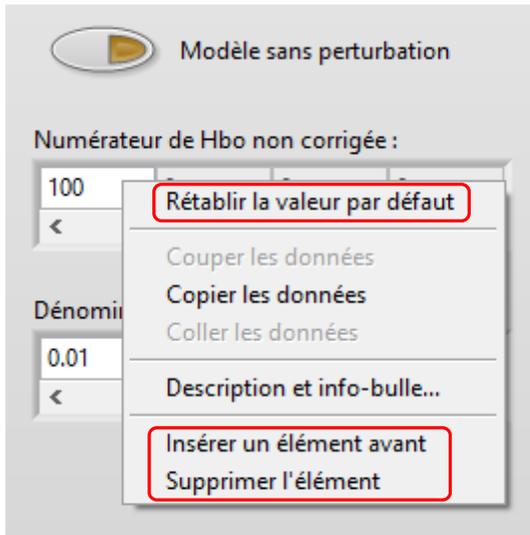
Conseils pour les non utilisateurs de LabVIEW

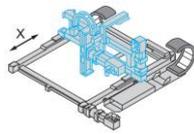
Toutes les commandes (curseurs, boutons rotatifs) ont des bornes prédéfinies mais toutes sont modifiables.





Pensez au menu contextuel
(bouton droit de la souris)



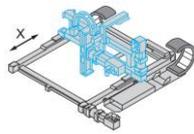


Control'X

Ctrl + clic pour suivre un lien

Prise en main de Control'Drive





Présentation générale

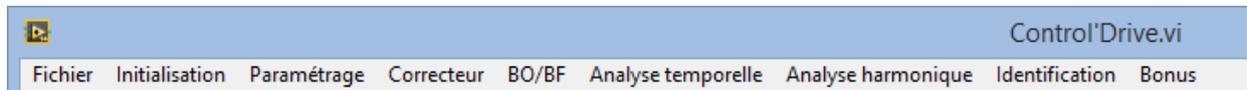
[Ctrl + clic pour aller à la présentation générale](#)

Onglets

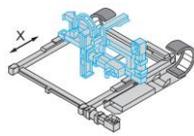


| | |
|----------------------------------------------------|---------|
| Onglets | page 2 |
| <u>Schéma structurel</u> | page 8 |
| <u>Schéma fonctionnel</u> | page 10 |
| <u>Schéma bloc</u> | page 11 |
| <u>Analyse temporelle</u> | page 14 |
| <u>Analyse harmonique</u> | page 22 |
| <u>Identification / Simulation</u> | page 25 |
| <u>Synthèse correcteur</u> | page 35 |

Menus



| | |
|--------------------------------------------------|---------|
| Menus | page 55 |
| <u>Fichier</u> | page 56 |
| <u>Initialisation</u> | page 57 |
| <u>Paramétrage</u> | page 59 |
| <u>Correcteur</u> | page 67 |
| <u>BO/BF</u> | page 75 |
| <u>Analyse temporelle</u> | page 76 |
| <u>Analyse harmonique</u> | page 87 |
| <u>Identification/Simulation</u> | page 91 |
| <u>Bonus</u> | page 95 |



Présentation générale

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Control'Drive est le logiciel de pilotage et de simulation de Control'X.

Lancer Control'Drive en cliquant sur l'icône ci-contre :

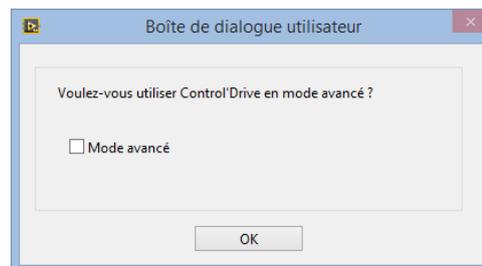


Control'Drive

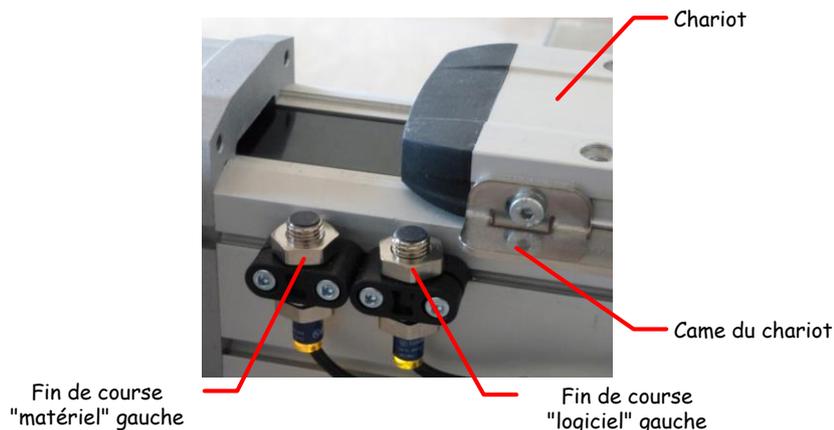
Au démarrage, Control'Drive propose une utilisation selon deux modes :

Mode par défaut : Seules les fonctions de base du logiciel sont accessibles

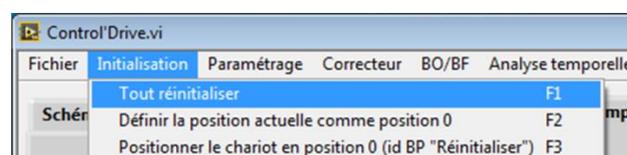
Mode avancé : Toutes les fonctions sont accessibles

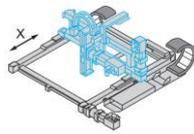


Sauf s'il ne l'est déjà, le chariot de Control'X doit s'initialiser à gauche sur le fin de course "logiciel".

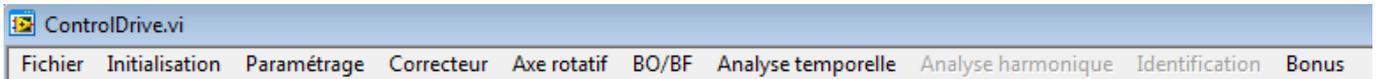


Si Control'Drive a été lancé avant d'armer Control'X, effectuer une réinitialisation en utilisant la fonction "Tout réinitialiser" du menu "Initialisation" :





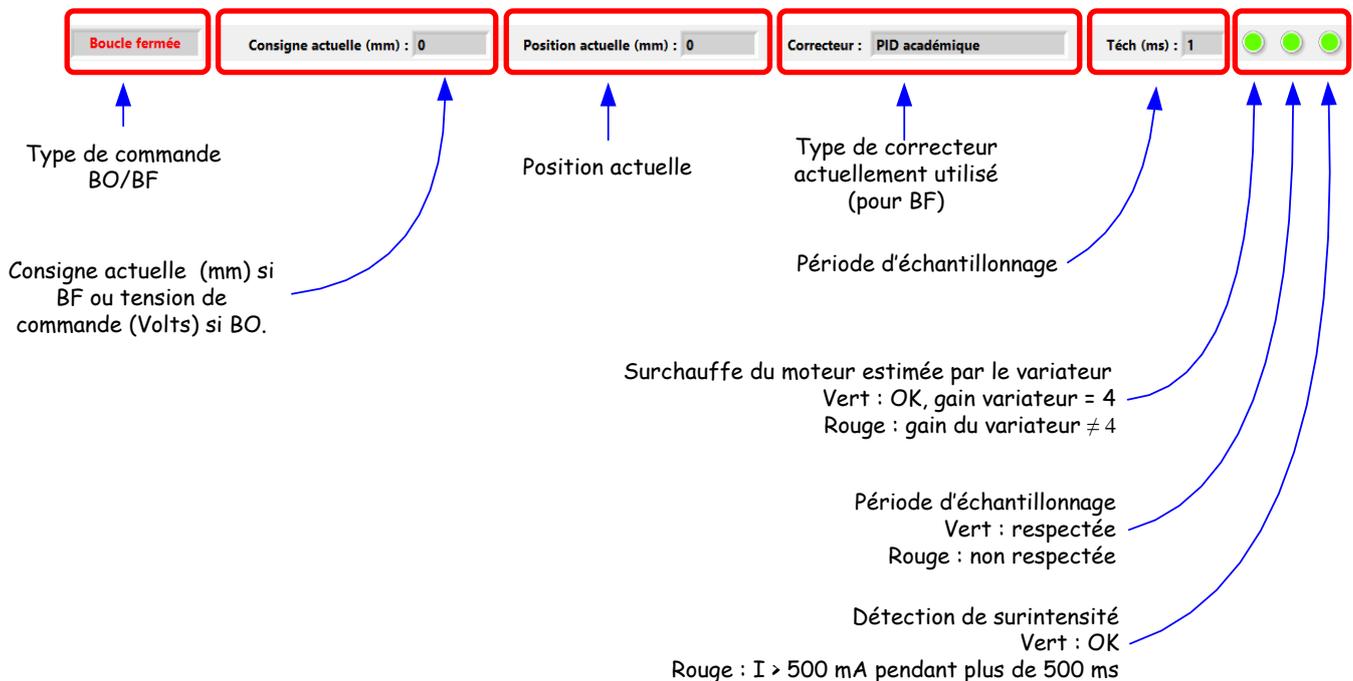
Dans ce qui suit un menu désigne un bandeau situé en haut d'une fenêtre du type :

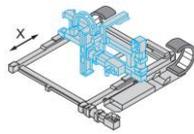


Un onglet désigne un bandeau du type :



La barre d'état située au bas de la fenêtre principale donne accès en un coup d'œil à l'état du système :





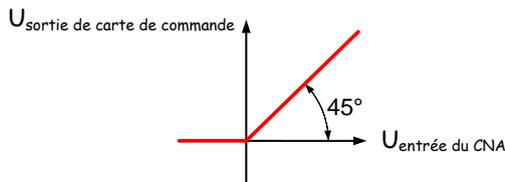
Sécurités logicielles sous Control'Drive

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Control'Drive intègre une sécurité logicielle qui empêche le chariot de se retrouver en butée "matérielle". A chaque période d'échantillonnage Control'Drive vient tester la présence éventuelle sur une butée logicielle. Si tel est le cas la tension d'alimentation du moteur qui tendrait à faire avancer le chariot au-delà de la butée logicielle atteinte est saturé à une valeur nulle. Le chariot ne peut alors que quitter la butée et repartir en sens inverse.

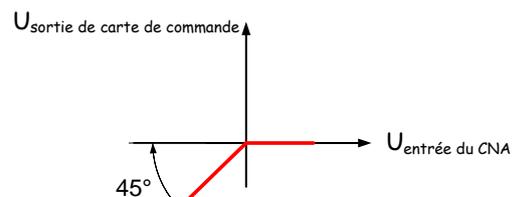


Butée gauche atteinte ?

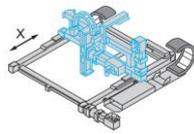


$U > 0$: tension qui tend à faire partir le chariot à droite c'est-à-dire à lui faire quitter la butée gauche

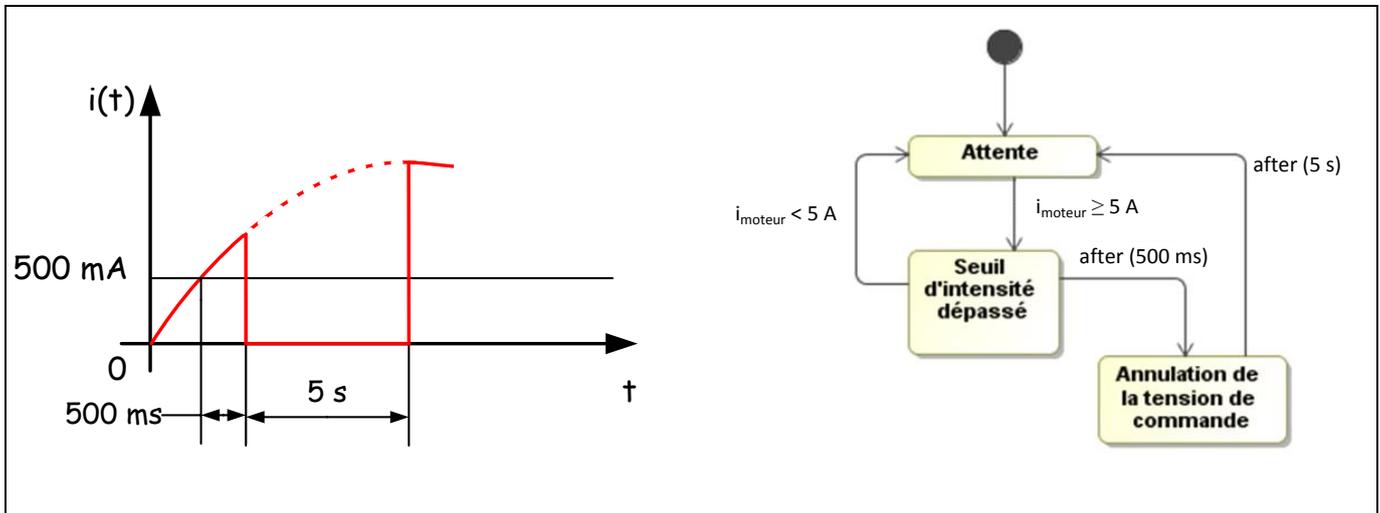
Butée droite atteinte ?



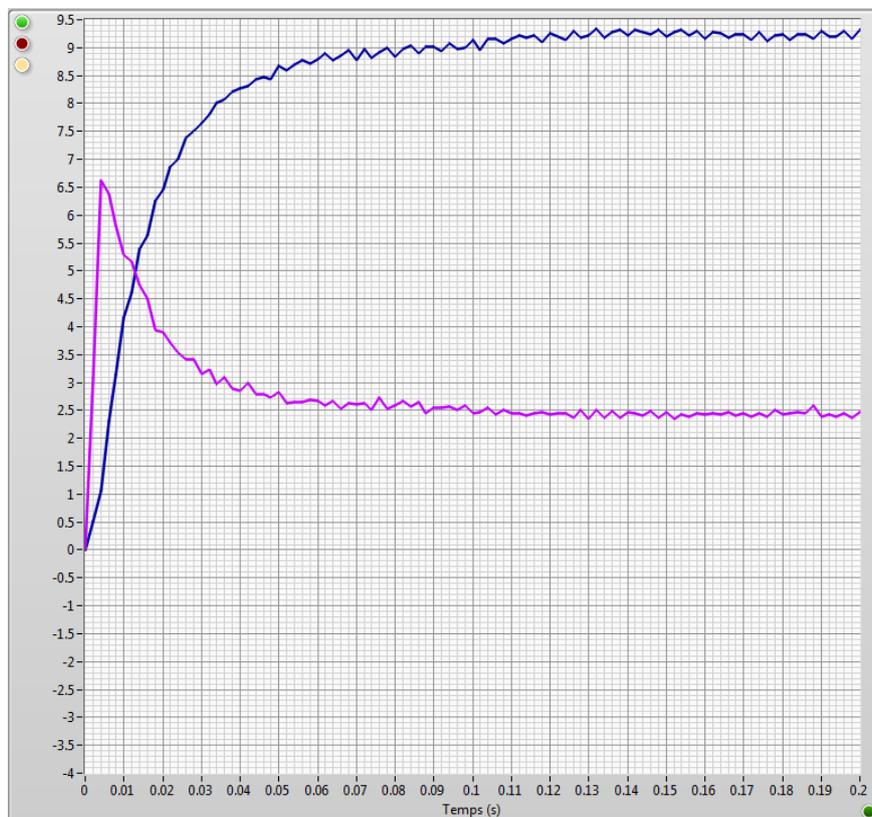
$U < 0$: tension qui tend à faire à faire partir le chariot à gauche c'est-à-dire à lui faire quitter la butée droite



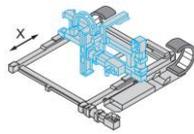
Control'Drive intègre aussi une sécurité qui limite les surintensités prolongées : Si une intensité supérieure à 5 A est observée pendant plus de 500 ms, la tension du moteur est annulée pendant 5 s.



N.B. : Une surintensité lors d'un essai assez contraignant dure moins de 20 ms : ci-dessous un essai en boucle ouverte sous 40 V de tension moteur (c'est la tension maxi au bornes du moteur).



En rose l'intensité (A), en bleu la vitesse du chariot (mm/s divisés par 100) :
Le pic d'intensité dure très peu de temps

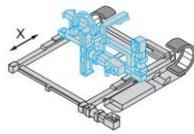


Onglets

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



| Onglets | |
|----------------------------------------------------|---------|
| <u>Schéma structurel</u> | page 8 |
| <u>Schéma fonctionnel</u> | page 10 |
| <u>Schéma bloc</u> | page 11 |
| <u>Analyse temporelle</u> | page 14 |
| <u>Analyse harmonique</u> | page 22 |
| <u>Identification / Simulation</u> | page 25 |
| <u>Synthèse correcteur</u> | page 35 |



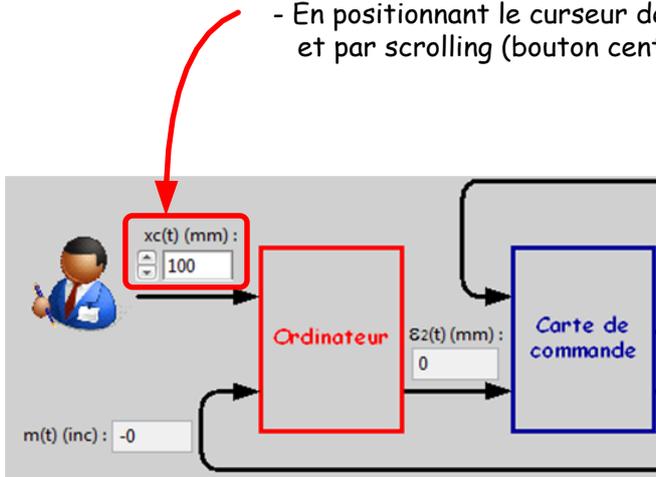
Onglet "Schéma structurel"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Il s'agit d'un onglet de découverte de Control'X.

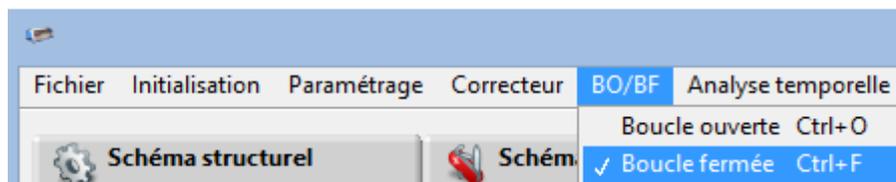
Modifier la valeur de la consigne :

- Avec les flèches (pas de 50 mm en BF, 0.5 V en BO)
- En saisissant une valeur au clavier
- En positionnant le curseur de souris à droite de la valeur numérique à modifier et par scrolling (bouton central de la souris)

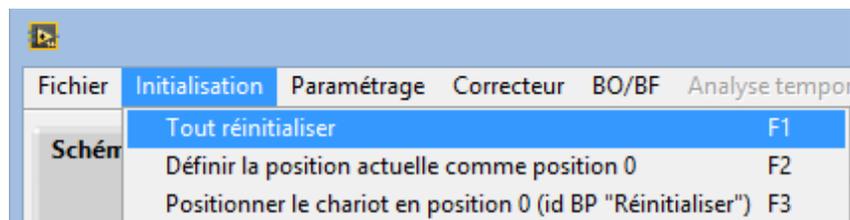


On peut dans cet onglet comme dans la plupart des onglets :

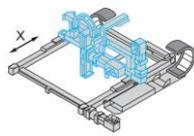
- Spécifier une commande en boucle ouverte ou fermée



- Utiliser une des trois fonctions de réinitialisation :

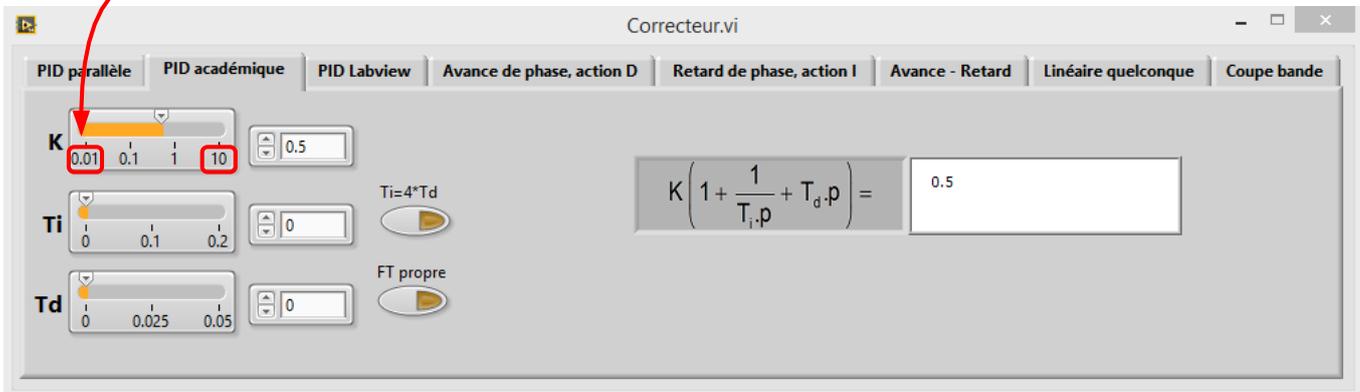


- Exercer des perturbations sur le chariot pour constater que l'asservissement est bien en fonction. Cela permet aussi de cerner les performances en rejet de perturbation du correcteur choisi.



- Modifier le type de correcteur (Menu "Correcteur" si vous l'avez perdu)

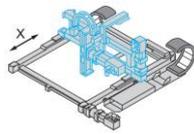
Double cliquer pour redéfinir les bornes au besoin



- Survoler les différents blocs pour visualiser une photo et obtenir de l'information sur l'organe en question

$\theta(t) (\text{°}) : 696.35$
 $\omega(t) (\text{tr/min}) : -0.55$
 $C_m(t) (\text{N.m}) : 0.02$
 $u(t) (\text{V}) : 0.71$
 $i(t) (\text{A}) : 0.12$

Moteur à courant continu 110 W de puissance nominale : 0,34 N.m à 3000tr/min,



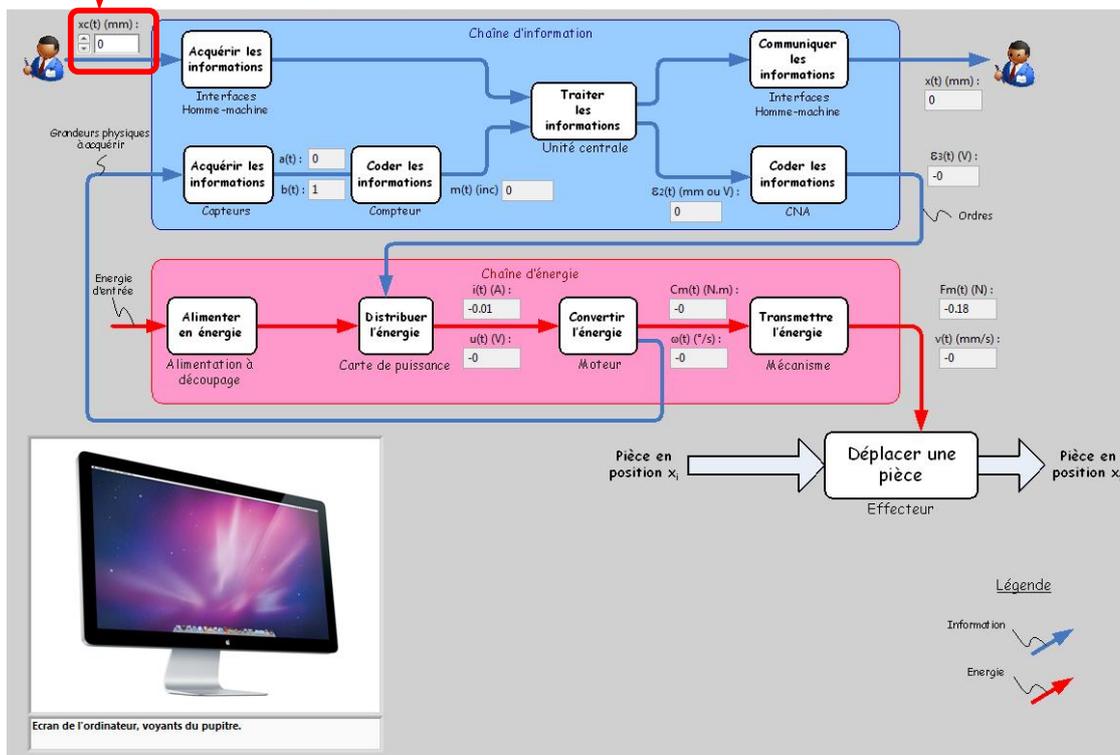
Onglet "Schéma fonctionnel"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

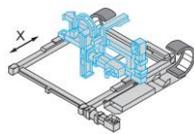
Cet onglet permet de découvrir la chaîne fonctionnelle mais de façon dynamique et interactive.

Modifier la valeur de la consigne :

- Avec les flèches (pas de 50 mm en BF, 0.5V en BO)
- En saisissant une valeur au clavier
- En positionnant le curseur de souris à droite de la valeur numérique à modifier et par scrolling (bouton central de la souris)



Les mêmes possibilités que celles offertes dans l'onglet "Schéma bloc" sont offertes.

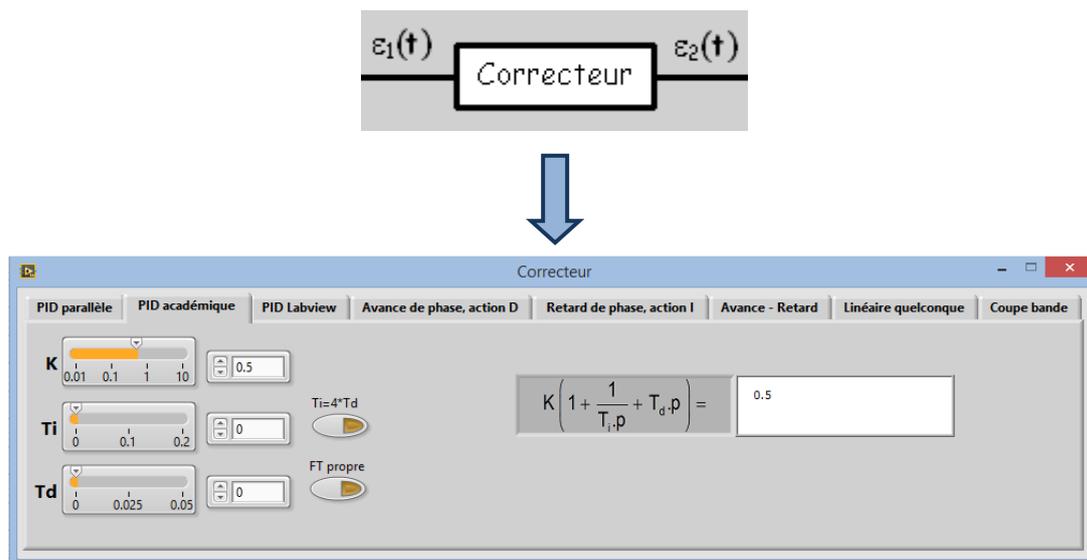


Onglet "Schéma bloc"

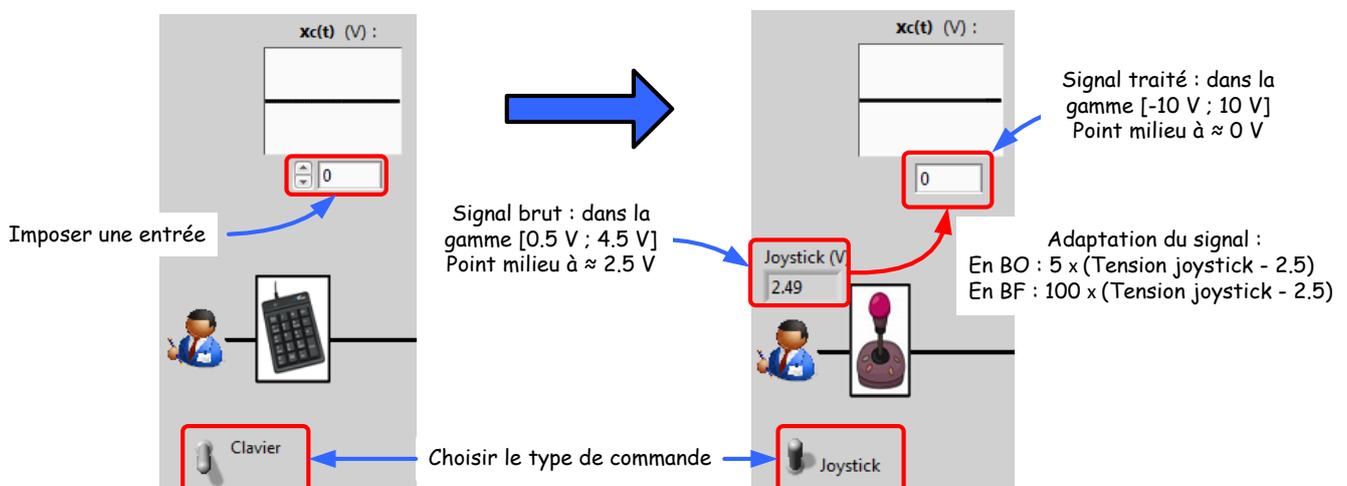
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

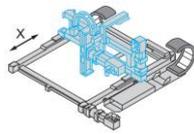
Cet onglet permet de rentrer plus en détail dans la structure de l'asservissement. On eut y piloter Control'X soit au clavier, soit au joystick.

Dans cet onglet comme dans bien d'autres, un clic de souris sur le bloc "Correcteur" permet d'afficher la fenêtre de correcteurs :

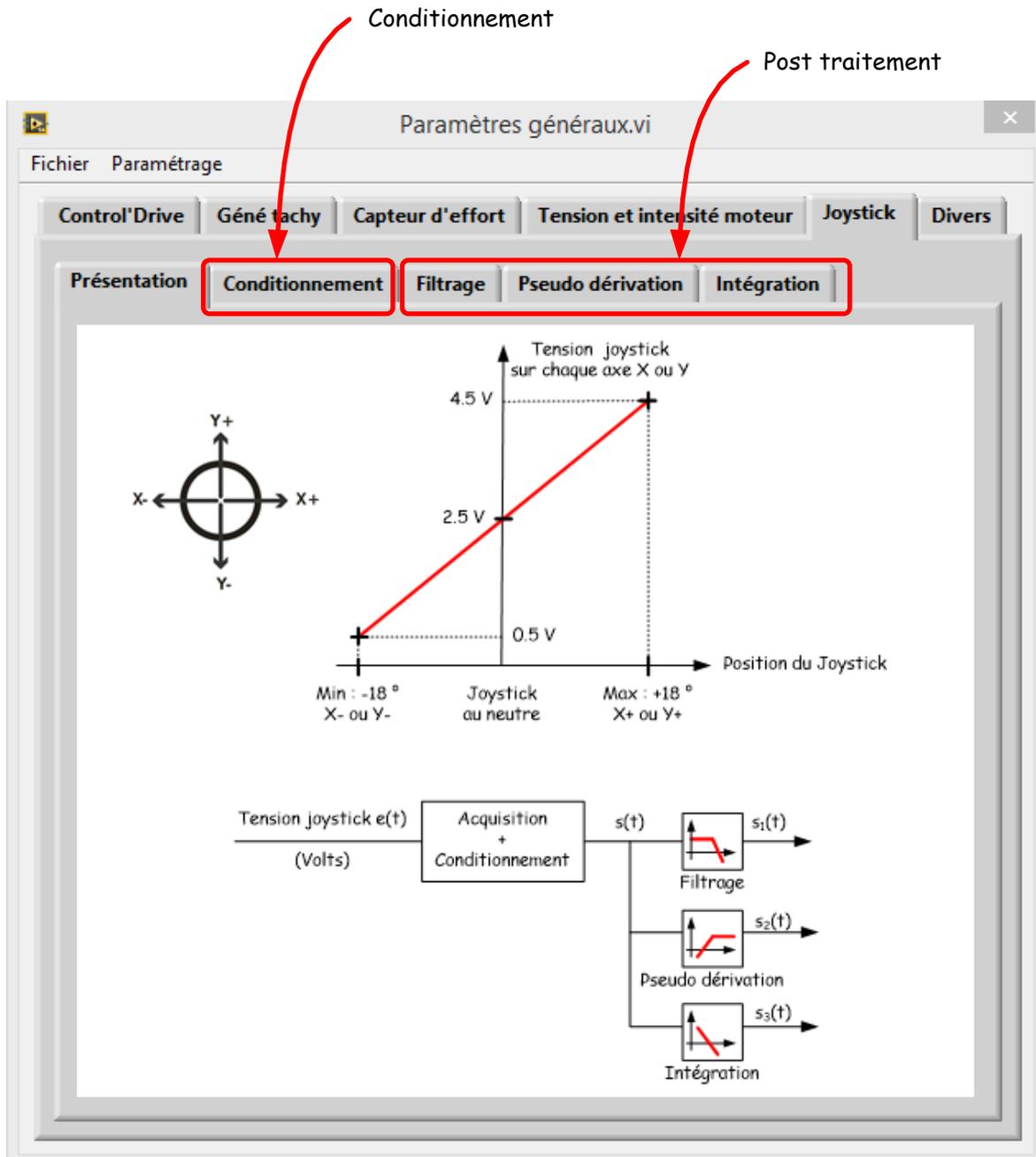


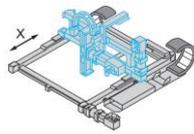
Le pilotage au joystick en boucle ouverte en particulier permet de justifier l'intérêt de l'asservissement de position.





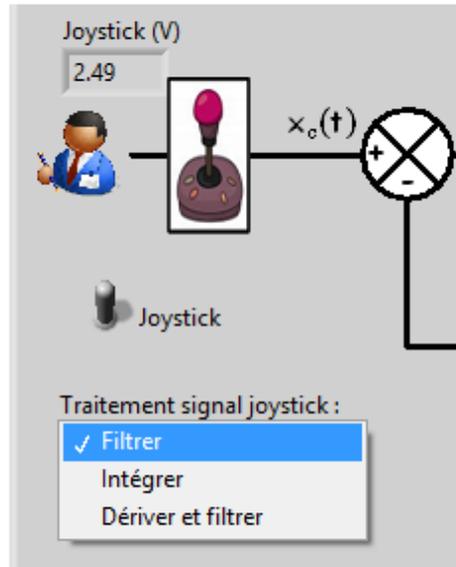
Le signal du joystick subit dans tous les cas un conditionnement : menu "Paramétrage", "Professeur" ou "Elève" puis "Joystick" :



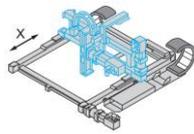


Après le conditionnement, un post traitement à choisir parmi les trois proposés est effectué :

- Filtrage (filtre passe bas d'ordre 1 de gain statique unité)
- Dérivation et filtrage
- Intégration



- L'intégration du signal permet, en boucle fermée, de retrouver un comportement de l'axe similaire à celui observable en boucle ouverte : la vitesse devient, en régime permanent, image de la position du joystick.
- La dérivation du signal permet, en boucle ouverte, de retrouver un comportement de l'axe similaire à celui observable en boucle fermée : la position devient, en régime permanent, image de la position du joystick.

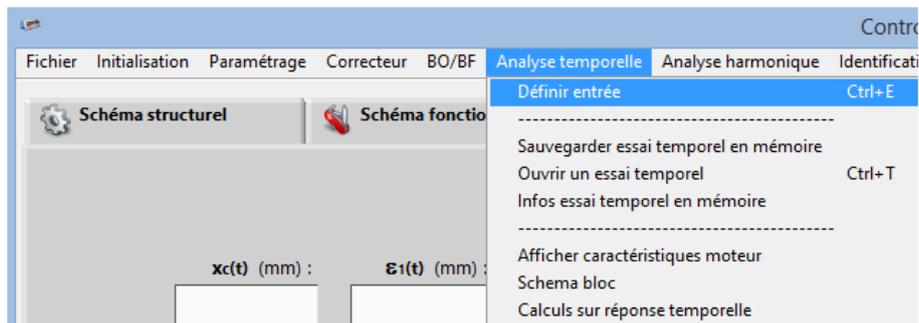


Onglet "Analyse temporelle"

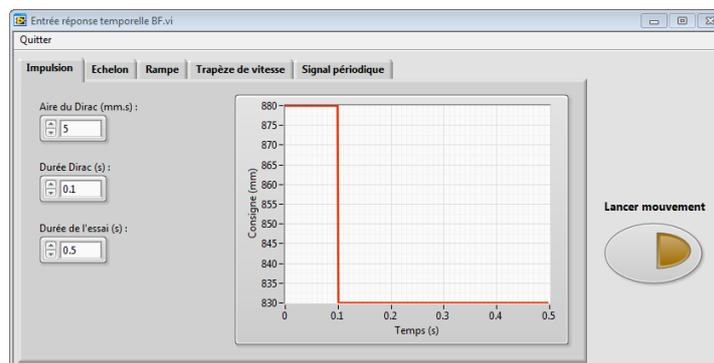
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Cet onglet est dédié à l'analyse temporelle du comportement de Control'X

Pour lancer un pilotage temporel utiliser le menu "Analyse temporelle" puis "Définir une entrée"

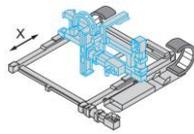


Sélectionner alors le type d'entrée et cliquer sur "Lancer Mouvement"



Les signaux temporels analysés sont les suivants :

- c : consigne (mm ou V)
- x : position (mm)
- e1 : écart 1 (mm ou V)
- e2 : écart corrigé (mm ou V)
- e3 : écart corrigé (V)
- u : tension moteur moyenne(V)
- i : intensité (A)
- v : vitesse axe (mm/s)
- w : vitesse moteur (tr/min)
- q : position moteur (°)
- f : effort extérieur (N)
- x2 : x règle magnétique (mm)
- s : signal optionnel

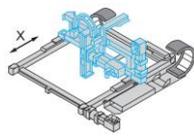


| Signal | Mnémonique | Moyen de mesure | Capteur |
|------------------|------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Consigne | c | Mesurée en interne de l'ordinateur, | |
| Position | x | Signal élaboré à partir de la position angulaire du moteur (q) | Pas de capteur |
| Ecart 1 | e1 | Mesuré en interne de l'ordinateur | |
| Ecart 2 | e2 | Mesuré en interne de l'ordinateur | |
| Ecart 3 | e3 | CAN de la carte de commande | |
| Tension moteur | u | CAN de la carte de commande | Electronique de conditionnement de la tension aux bornes du moteur. Il s'agit en fait de la valeur moyenne de la tension moteur, cette dernière étant elle un signal PWM à 53.6 kHz |
| Intensité moteur | i | CAN de la carte de commande | Le variateur de vitesse génère une tension image de l'intensité moteur |
| Vitesse axe | v | Signal élaboré à partir de la vitesse angulaire du moteur (w) | Pas de capteur |
| Vitesse moteur | w | CAN de la carte de commande | Génératrice tachymétrique montée sur l'arbre moteur |
| Position moteur | q | Compteur de la carte de commande | Codeur incrémental monté sur l'arbre moteur |
| Effort extérieur | f | CAN de la carte de commande | Capteur d'effort |
| Position | x2 | Compteur de la carte de commande | Règle magnétique montée sur l'axe (Codeur incrémental) |
| Signal optionnel | s | Compteur ou CAN de la carte de commande selon le signal choisi | Codeur incrémental, capteur de distance Sharp ou accéléromètre X (voir menu "Paramétrage" dans ce document) |

Tous les signaux sont des signaux effectivement mesurés sauf :

- Le signal "x : position" qui est calculé à partir de la position angulaire de l'arbre moteur q (codeur incrémental monté sur l'arbre moteur).
- Le signal "v : vitesse axe" qui est calculé à partir de la vitesse angulaire de l'arbre moteur w (génératrice tachymétrique montée sur l'arbre moteur).

Nota : Le seul capteur utilisé dans le contexte industriel d'origine est le codeur incrémental monté sur l'arbre moteur (mnémonique q). C'est pour cette raison que l'asservissement de Control'X repose sur la mesure de l'angle moteur (signal q d'où l'on estime x) et non pas la mesure issue de la règle magnétique (signal $x2$).



Déplacer le curseur pour obtenir les valeurs correspondantes

Choix des signaux à observer en ordonnées

Choix du signal en abscisse

Seules grandeurs qui ne sont pas mesurées mais calculées

Convertisseur d'unité (cliquer sur la calculatrice)

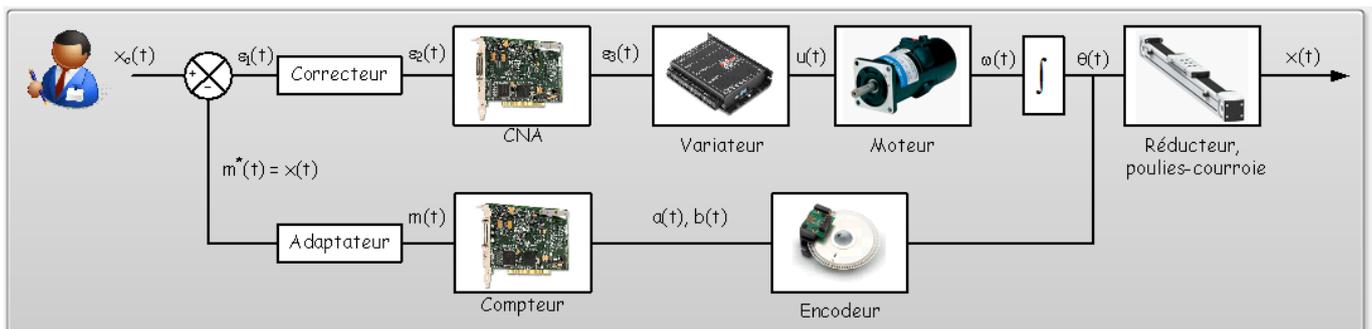
Saisissez une formule en utilisant : les opérateurs mathématiques classiques : +, -, *, /, cos, sqrt...
v2 pour la vitesse de l'axe calculée à partir de la règle magnétique

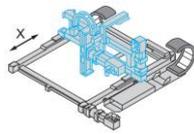
| Y | t : temps (s) | 0.02 |
|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | c : consigne (mm ou V) | 300 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | x : position (mm) | 7.323 |
| <input type="checkbox"/> | e1 : écart 1 (mm ou V) | 292.677 |
| <input type="checkbox"/> | e2 : écart corrigé (mm ou V) | 292.677 |
| <input type="checkbox"/> | e3 : écart corrigé (V) | 10 |
| <input type="checkbox"/> | u : tension moteur moyenne(V) | 39.931 |
| <input type="checkbox"/> | i : intensité (A) | 4.418 |
| <input type="checkbox"/> | v : vitesse axe (mm/s) | 681.882 |
| <input type="checkbox"/> | w : vitesse moteur (tr/min) | 791.981 |
| <input type="checkbox"/> | q : position moteur (°) | 51.025 |
| <input type="checkbox"/> | f : effort extérieur (N) | -3.011 |
| <input type="checkbox"/> | x2 : x règle magnétique (mm) | -7.37 |
| <input type="checkbox"/> | s : signal optionnel | 0 |
| <input type="checkbox"/> | formule 1 | 176.413 |
| <input type="checkbox"/> | formule 2 | -638.562 |

Formule 1: $u \cdot i$

Formule 2: $v2$

Il est souvent utile lorsque l'on découvre Control'Drive d'afficher le schéma-bloc dans une zone de l'écran pour bien interpréter les différents signaux : Menu "Analyse temporelle", "Schéma bloc"



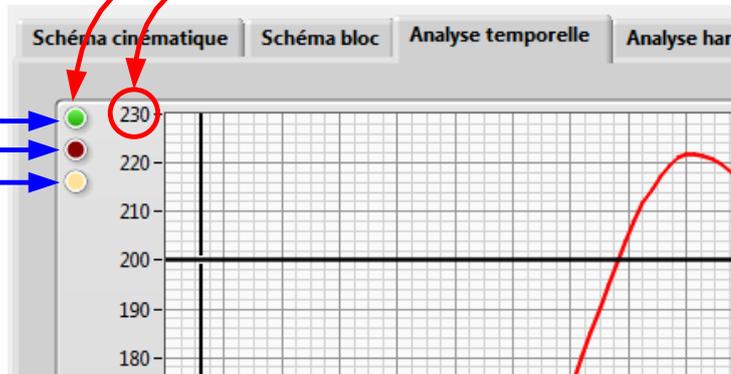


Fonctions associées au graphe :

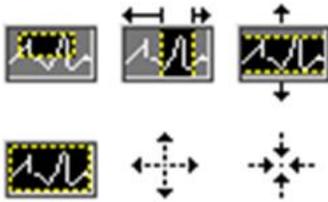
Double cliquer pour modifier l'échelle (mode échelle manuelle : diode verte éteinte)

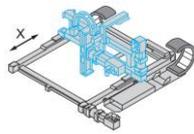
Options d'affichage :

- Echelle auto/manu 
- Tracé segment 
- Mode d'affichage 

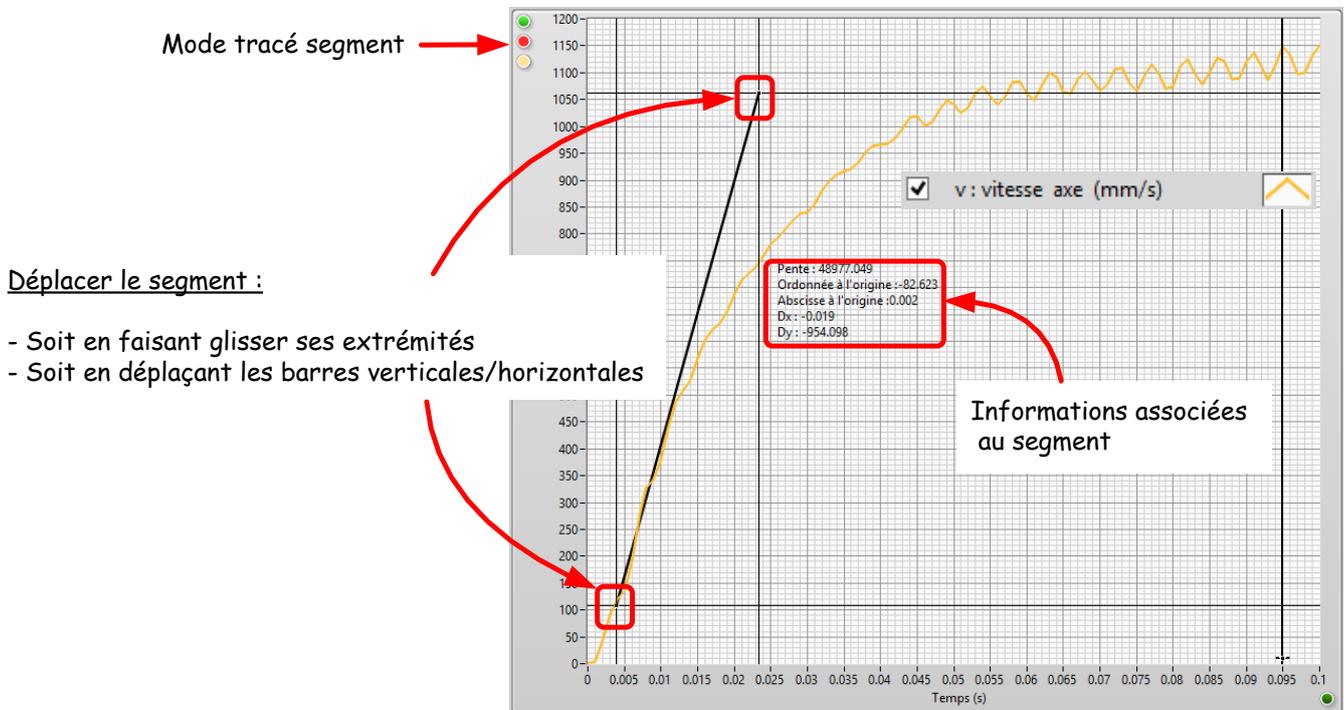


Déplacer le curseur (en mode "curseur")

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| <p>Mode curseur : permet de déplacer le curseur le long d'une courbe ou de sauter de courbe en courbe.</p> | <p>Mode zoom : permet de sélectionner le type de zoom : seulement si les échelles ne sont pas en mode automatique (diodes vertes)</p> | <p>Mode panoramique : permet de faire glisser la zone observée</p> |

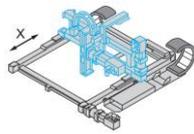


L'outil "segment" est très utile pour effectuer des mesures sur une courbe donnée : Accélération, temps de montée, pseudo période, constante de temps...



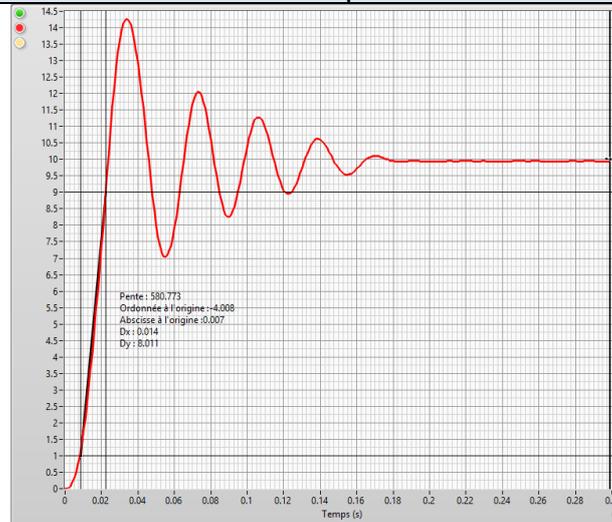
Mode curseur pour mesurer ici une accélération (48 m/s^2) sur la courbe de vitesse

Nota : Le cadre des quelques informations associées au segment ont une position qui dépend de l'une des extrémités du segment. Pour que ce cadre soit visible, il faut généralement le repositionner à l'endroit souhaité en effectuant un glissé-déposé avec la souris.

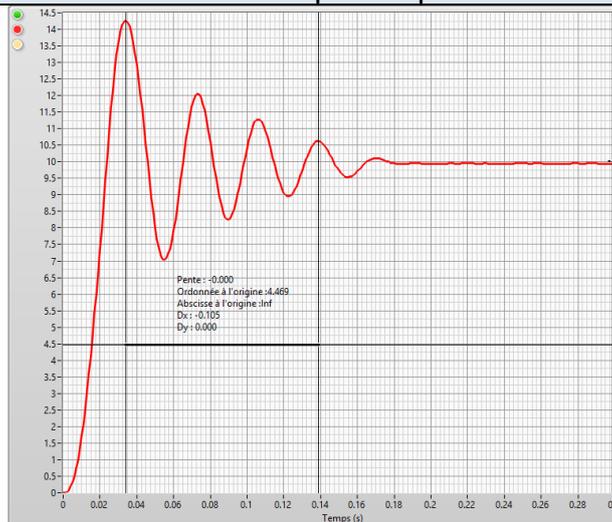


Autres exemples d'utilisation du segment

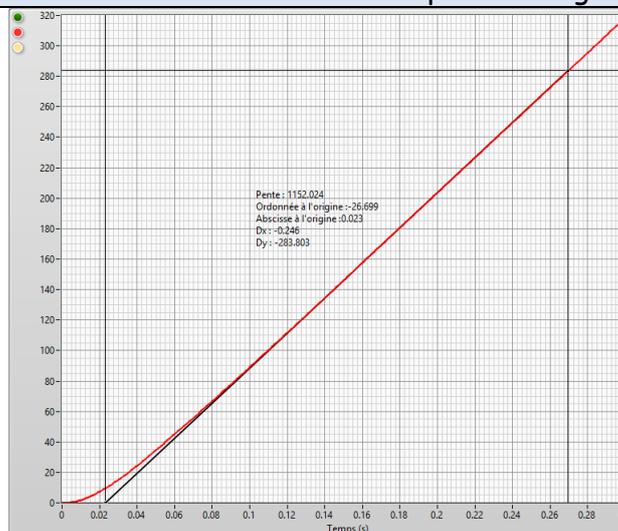
Mesure d'un temps de montée

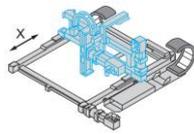


Mesure d'une pseudo période



Identification d'une constante de temps ou d'un gain statique





Le convertisseur de signaux permet d'obtenir rapidement des signaux lorsqu'on ne souhaite pas perdre de temps à effectuer des conversions d'unité ou lorsqu'on n'a pas en tête les certaines grandeurs propres à Control'X (rayon de poulie, constante de couple...)



Signal à élaborer à partir des mesures de base

Unité du signal élaboré

Formule à saisir dans le champ formule 1 ou formule 2

Convertisseur de signaux

| Signal à obtenir | Unité | Formule à saisir |
|-----------------------------------------|-------|------------------|
| Couple moteur | N.m | 0.21*i |
| Couple moteur ramené sur le chariot | N | 25.5*i |
| Vitesse moteur | rad/s | w/9.55 |
| Puissance électrique | W | u*i |
| Puissance mécanique | W | i*w/45.5 |
| Position moteur | rad | q/57.32 |
| Position moteur | tour | q/360 |
| Rendement moteur | % | 2.2*w/u |
| Effort ressort | N | 0.57*x + offset |
| Force extérieures ramenée sur le moteur | N.m | f/121.6 |
| Force extérieure convertie en intensité | A | f/25.5 |

OK

Méthode de calcul des différentes grandeurs :

$$C_{\text{moteur}} = k_c \cdot i$$

$$F_{\text{motrice}} = C_{\text{moteur}} \cdot \frac{i}{R}$$

$$P_{\text{électrique}} = u \cdot i$$

$$P_{\text{mécanique}} = C_{\text{moteur}} \cdot \omega_{\text{moteur}}$$

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}}}$$

$$F_{\text{ressort}} = k_{\text{ressort}} \cdot x + \text{cste}$$

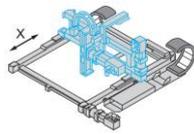
$$C_{\text{ext}} = F_{\text{ext}} \cdot \frac{R}{i}$$

$$i_{\text{ext}} = \frac{C_{\text{ext}}}{k_c} = \frac{F_{\text{ext}} \cdot R}{k_c \cdot i}$$

où $k_c = 0.21 \text{ N.m/A}$, $i = 3$, $R = 0.02467 \text{ m}$, $k_{\text{ressort}} = 0.55 \text{ N/mm}$



Certaines conversions sont soumises à hypothèses ou à discussion. Libre à chacun de renseigner ce que bon lui semble dans le champ "Formule 1" ou "Formule 2".

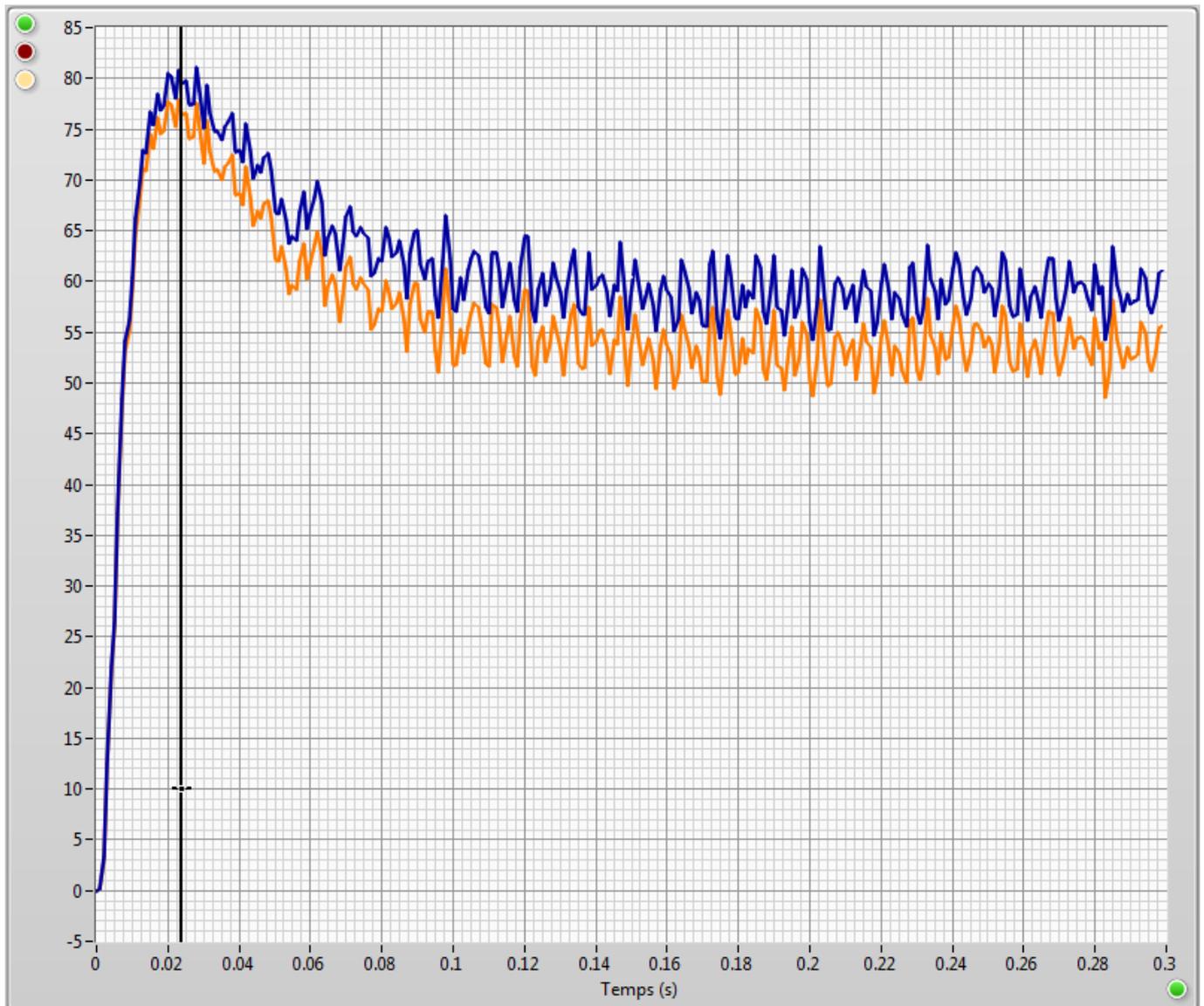


Ci-dessous par exemple les tracés de la puissance mécanique comme indiqué dans le tableau de conversion et cette même puissance mais diminuée de la puissance perdue par les frottements internes au moteur : environ 7 watts sont perdus par frottements en régime permanent.

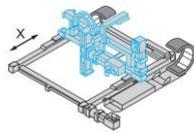


Formule 1

Formule 2



Puissances mécaniques avec et sans prise en compte des frottements internes du moteur



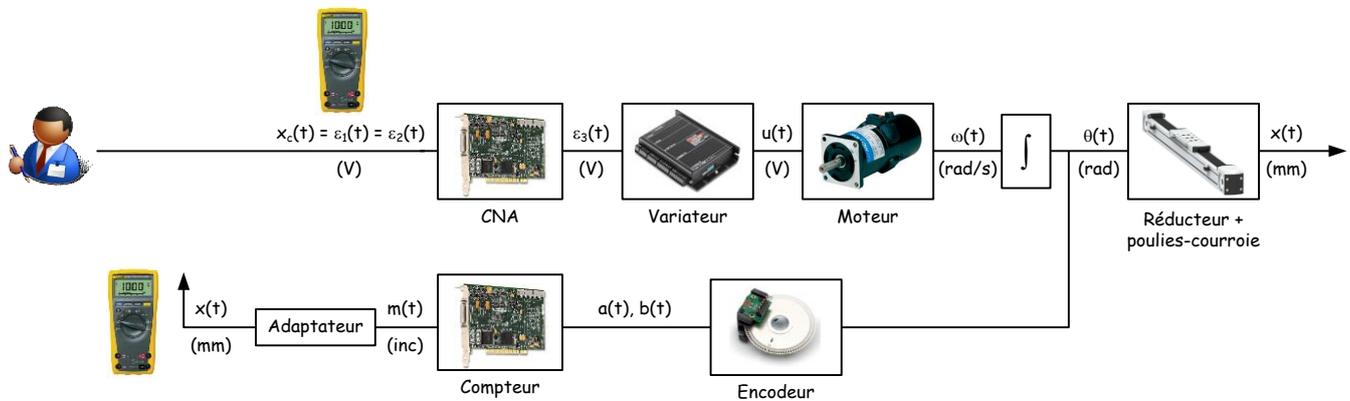
Onglet "Analyse harmonique"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

On peut lancer une analyse harmonique en boucle ouverte ou en boucle fermée : Les tracés fréquentiels sont obtenus automatiquement.

Essai en boucle ouverte :

Les signaux temporels analysés sont $x_c(t) = \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t)$ en entrée d'une part et $x(t)$ en sortie d'autre part. L'amplitude du signal sinusoïdal exciteur est exprimée en Volts.

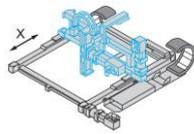


Essai en boucle fermée :

Les signaux temporels analysés sont $x_c(t)$ d'une part et $x(t)$ d'autre part. Mais les signaux $\varepsilon_1(t)$ et $\varepsilon_2(t)$ sont aussi analysés. Cela permet de tracer non seulement le diagramme fréquentiel de la boucle fermée mais aussi les diagrammes fréquentiels du correcteur seul, de la boucle ouverte corrigée et de la boucle ouverte non corrigée.

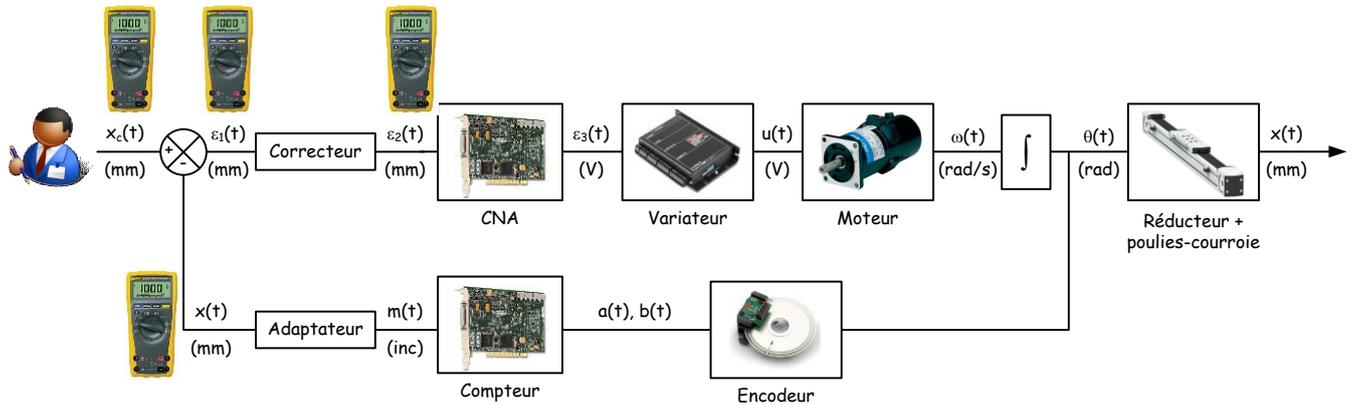
| Analyse du déphasage et du gain des signaux | Pour tracer le diagramme fréquentiel de : |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $x_c(t)$ en entrée $x(t)$ en sortie | Boucle fermée |
| $\varepsilon_1(t)$ en entrée $\varepsilon_2(t)$ en sortie | Correcteur |
| $\varepsilon_2(t)$ en entrée $x(t)$ en sortie | Boucle ouverte non corrigée |
| $\varepsilon_1(t)$ en entrée $x(t)$ en sortie | Boucle ouverte corrigée |

L'essai est bien effectué en boucle fermée mais donne aussi accès au comportement en boucle ouverte : cela fonctionne particulièrement bien pour des correcteurs proportionnels.



Pour obtenir un tracé fréquentiel de la boucle ouverte de la meilleure qualité possible, il vaut mieux effectuer un essai en boucle ouverte.

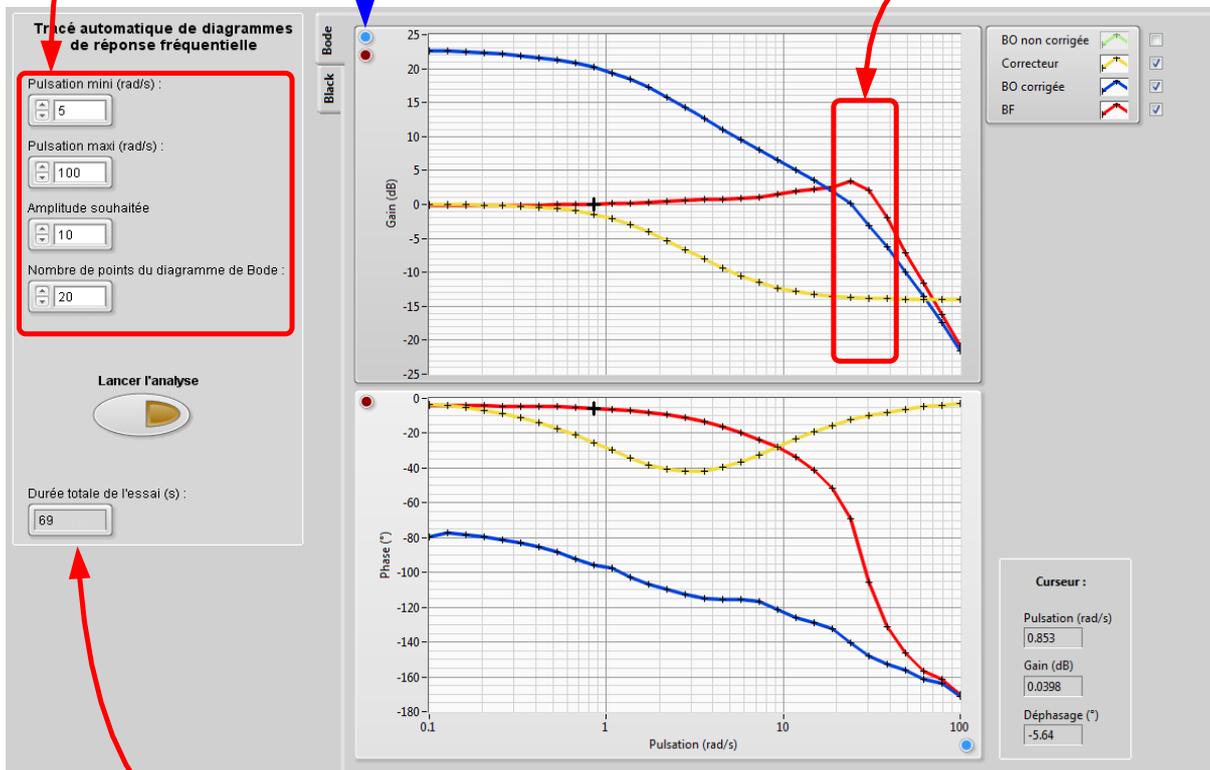
L'amplitude du signal sinusoïdal excitateur est exprimée en mm



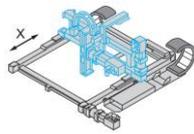
Paramètres de l'essai

Diode bleue : échelle log ou décimale

La pulsation de coupure à 0dB de la BO est très voisine de la BP_{-3dB} de la BF



Attention avec des pulsations d'excitations faibles, la durée de l'essai peut devenir importante.

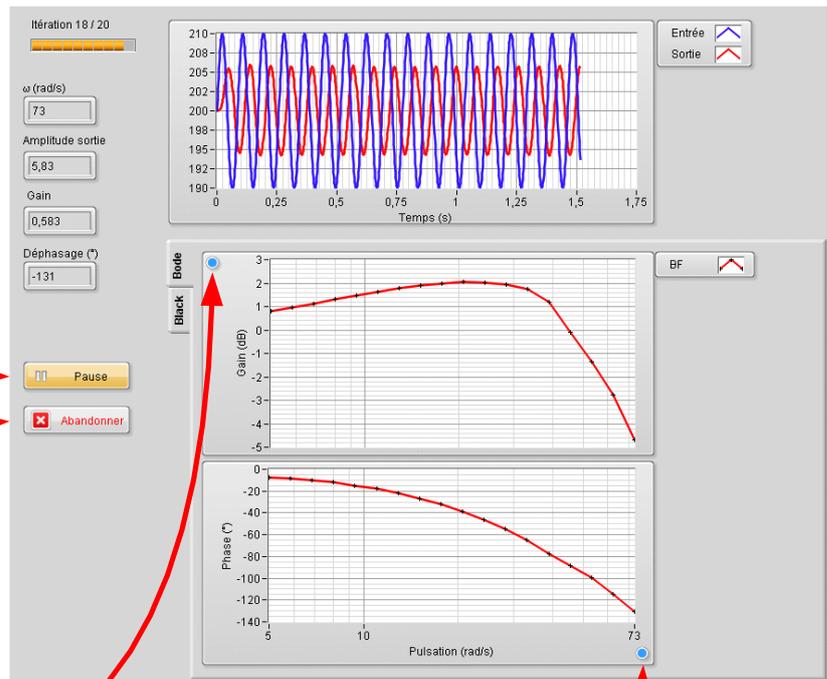


A chaque itération, on peut visualiser le signal temporel d'entrée (bleu) et le signal temporel de sortie (rouge).

Dès que le régime permanent est atteint, le gain et le déphasage sont estimés et un point est ajouté au diagramme fréquentiel (Bode au Black).

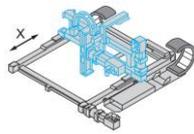
Mettre en pause après l'essai en cours

Abandonner après l'essai en cours



Echelle en dB ou en décimal
(pour justifier l'intérêt de l'échelle en dB)

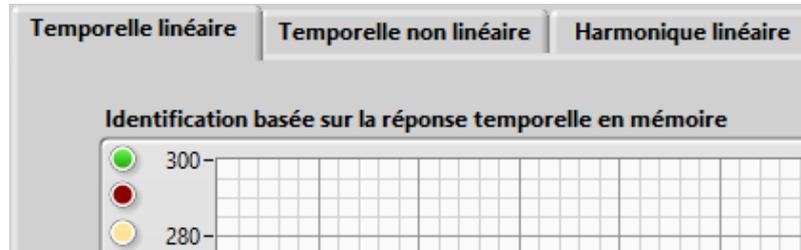
Echelle en log ou en décimal
(pour justifier l'intérêt de l'échelle en log)



Onglet "Identification / Simulation"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Dans cet onglet, on peut procéder à l'identification d'une réponse temporelle ou harmonique.



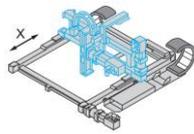
L'identification est faite sur la base des résultats en mémoire il s'agit :

Soit de la réponse en mémoire au lancement de Control'Drive

Soit du dernier essai temporel/harmonique effectué

Soit du dernier essai temporel/harmonique chargé depuis un fichier de sauvegarde

| Sous onglets |
|-----------------------------------------|
| Temporelle linéaire |
| Temporelle non linéaire |
| Harmonique (linéaire) |



Sous onglet "Identification / Simulation", "Temporelle linéaire"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Identification / Simulation"

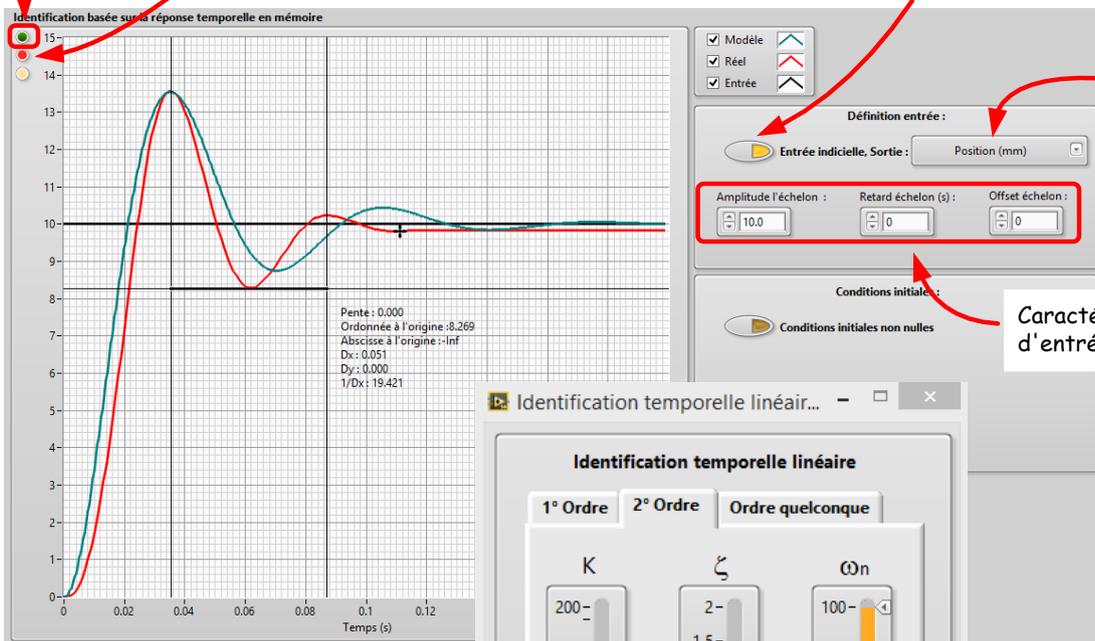
Bloquer l'échelle assez rapidement pour que la réponse simulée n'impose pas sa propre échelle

L'outil tracé segment permet de mesurer rapidement de nombreuses caractéristiques sur la réponse.

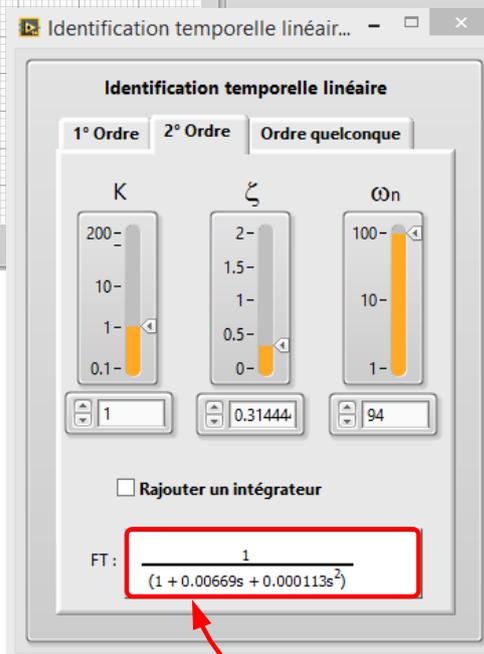
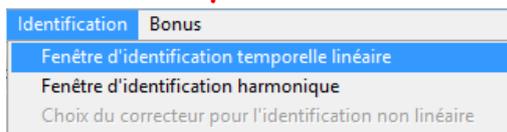
Entrée indicielle ou réelle

Choix du signal à identifier

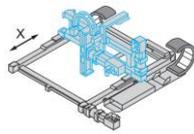
Caractéristiques du signal d'entrée (si échelon)



Menu "Identification", "Fenêtre d'identification temporelle" si la fenêtre a été fermée



Modèle envisagé

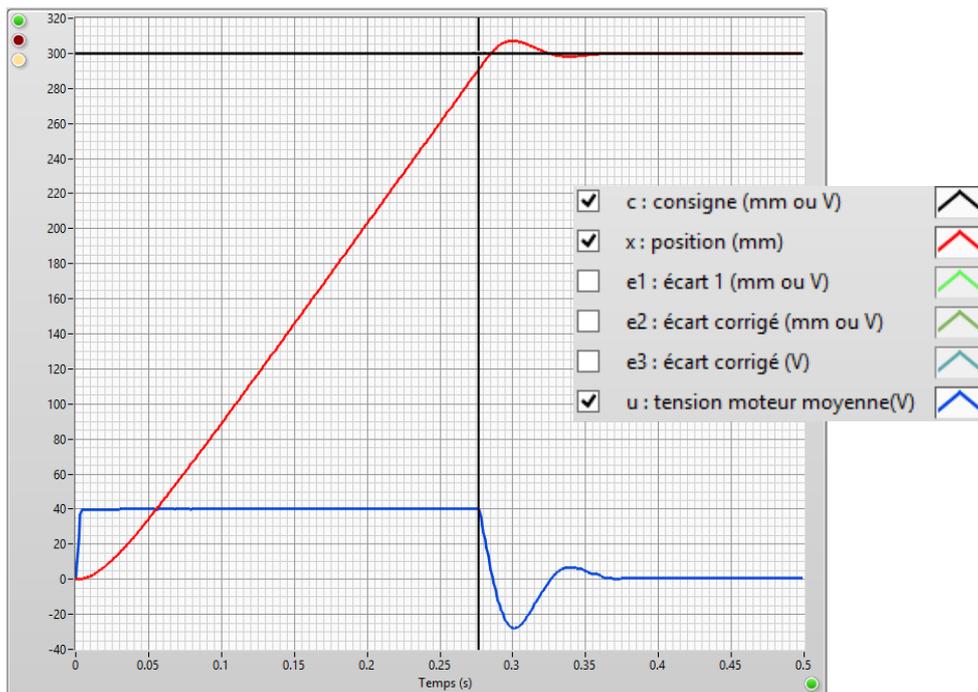


L'identification d'un comportement par un modèle linéaire peut assez rapidement se révéler illusoire si le système subit des phénomènes non linéaires importants. Rappelons que les deux principales non linéarités sont la saturation de la carte de commande à ± 10 V et les frottements secs. Il est souvent intéressant de vérifier avant l'identification que la saturation de la carte de commande n'a pas duré trop longtemps.

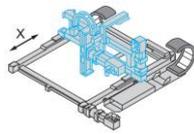
Nota : Le bouton poussoir "Entrée indiciale, sortie :'" permet d'imposer une entrée qui n'est pas forcément celle correspondant à l'entrée réelle.



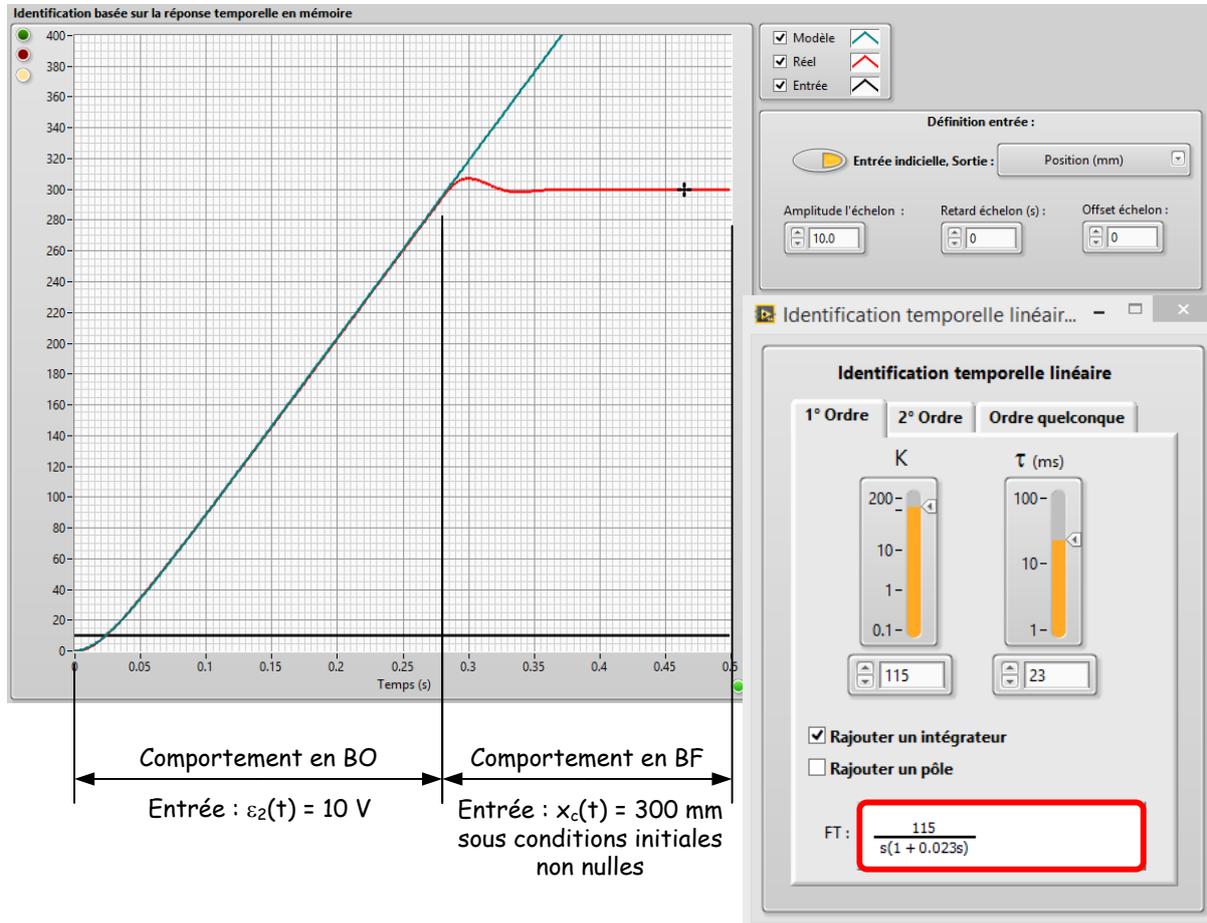
Prenons l'exemple d'un essai de réponse indiciale de 300 mm avec un correcteur proportionnel de gain 1. Le système sature très longtemps : tant que la sortie n'a pas atteint 290 mm. Tout se passe alors sur cet intervalle de temps comme si le système était alimenté sous $\varepsilon_2(t) = 10$ V, c'est à dire que tout se passe comme si le système était alors en boucle ouverte.



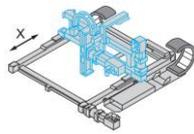
Le système a effectivement saturé pendant très longtemps (277 ms sur les 350 ms que dure l'essai)



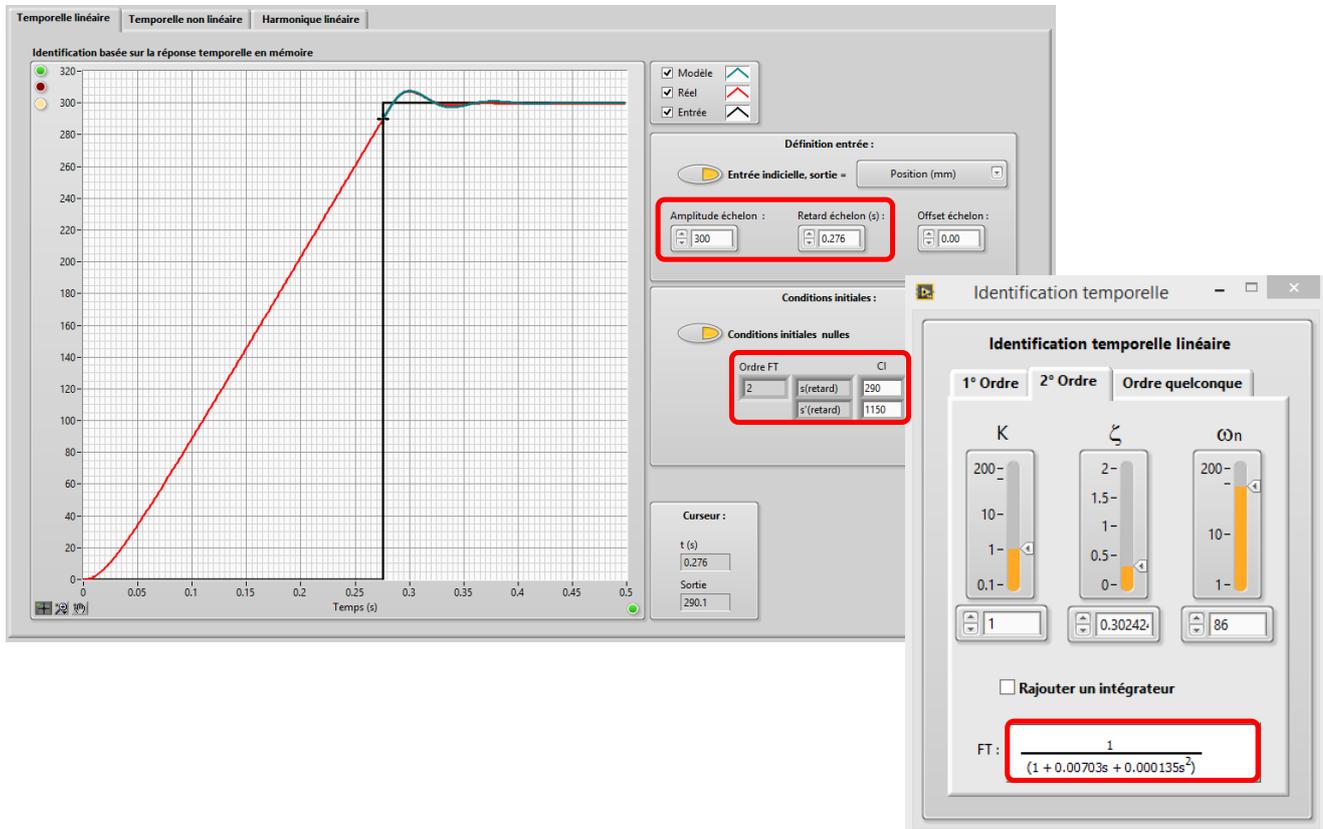
L'identification doit alors se faire avec une entrée valant 10 V et non pas 300 mm.



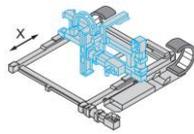
Réponse indicielle de 300 mm, gain de correcteur de 1
C'est le comportement en boucle ouverte qui doit être en fait identifié aux premiers instants.



Après la période de saturation, une identification de la boucle fermée est possible...mais sous conditions initiales non nulles :



Réponse indicielle de 300 mm, gain de correcteur de 1
Modèle linéaire à partir de l'instant où il n'y a plus saturation



Sous onglet "Identification / Simulation", "Temporelle non linéaire"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Identification / Simulation"](#)

Dans cet onglet, quatre modèles courants sont proposés. Il peut être utile de lire le document "Eléments de modélisation" pour bien cerner l'esprit dans lequel sont construits ces modèles.

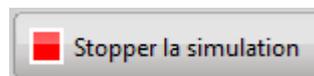
Les simulations sont lancées en boucle pour permettre des modifications à la volée des différents paramètres. La durée de simulation est choisie par défaut automatiquement de façon à pouvoir observer les phénomènes intéressants :

- C'est la durée de l'expérimentation en mode échelle des X automatique (diode verte allumée)
- C'est la durée correspondant au maximum de l'échelle des X en mode échelle manuelle (diode verte éteinte).

Dans tous les cas, la durée de simulation est limitée à 2 secondes.

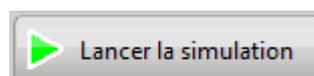
Le solveur est un solveur à pas fixe de type Runge-Kutta.

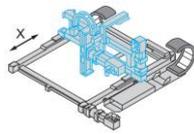
Selon les valeurs numériques entrées (notamment des valeurs très éloignées de l'ordre de grandeur attendu) la simulation peut être longue et l'interaction avec l'utilisateur est alors dégradée. On peut alors mettre fin à la simulation en cours en cliquant sur l'icône :



La simulation est aussi stoppée automatiquement lorsque le solveur rencontre une erreur : certaines fonctions de transfert non causales par exemple.

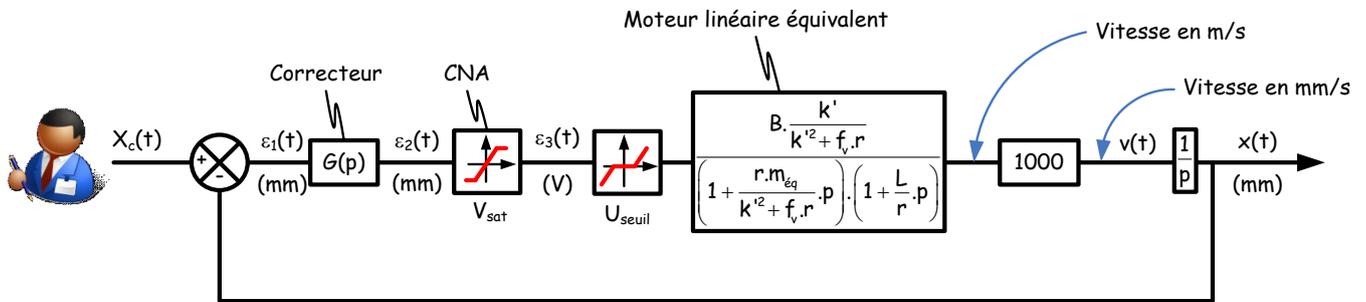
Une fois la simulation stoppée, il faut certainement revoir l'ordre de grandeur de certains paramètres ou rendre causales certaines fonctions de transfert puis relancer la simulation :



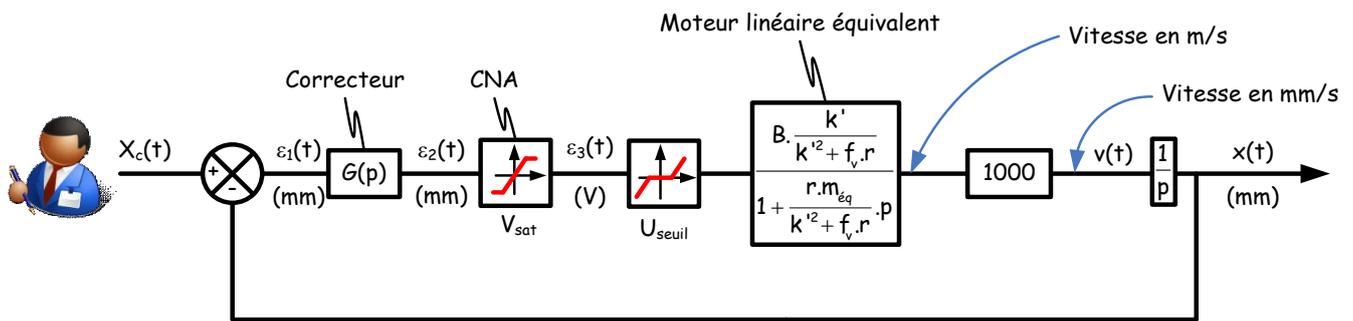


On présente très succinctement ci-dessous quatre types de modèles que l'on peut envisager :

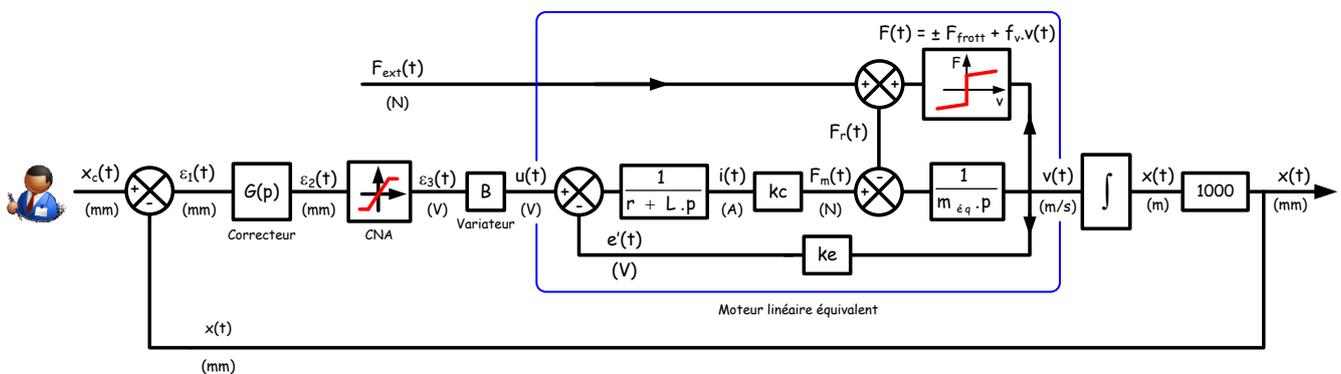
Modèle 1 : Saturation éventuelle de la carte de commande et frottements secs modélisés par une tension de seuil.

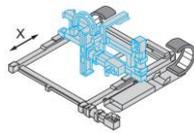


ou plus simplement

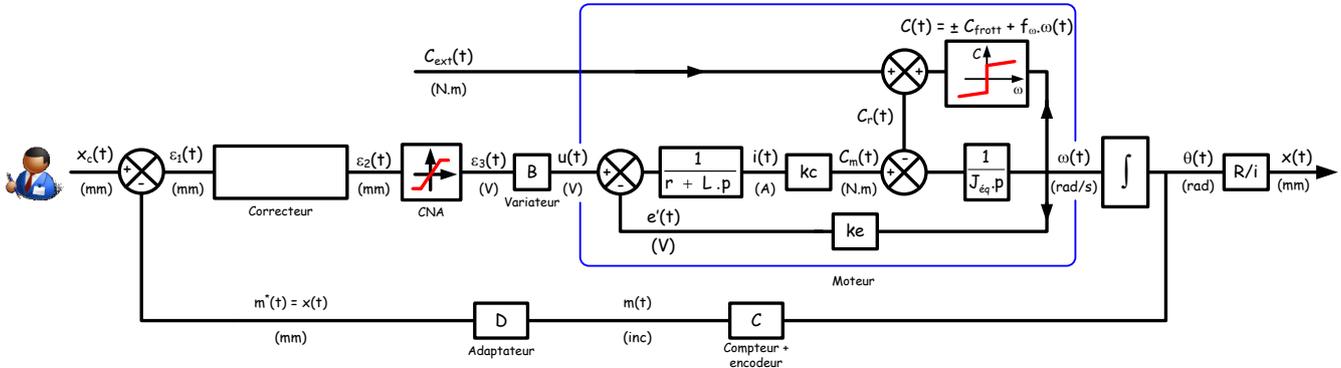


Modèle 2 :



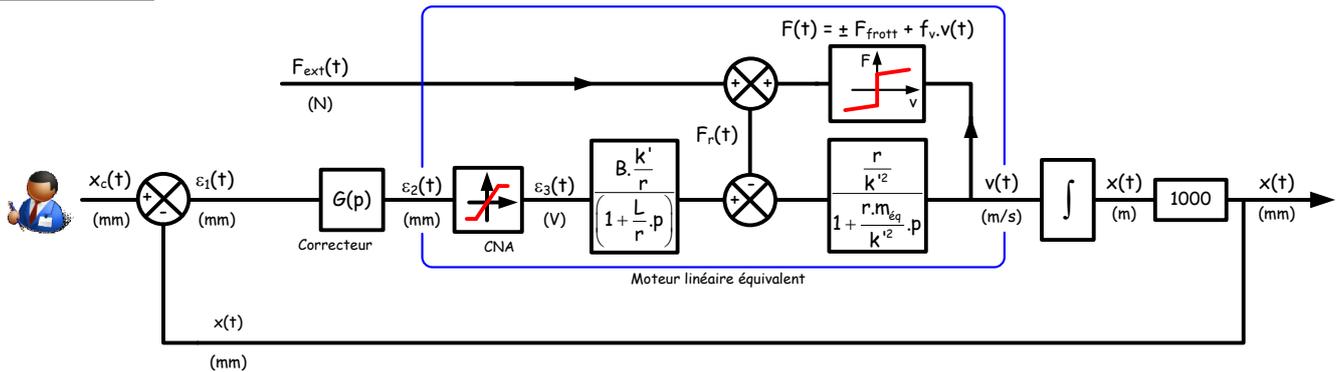


Modèle 3 :

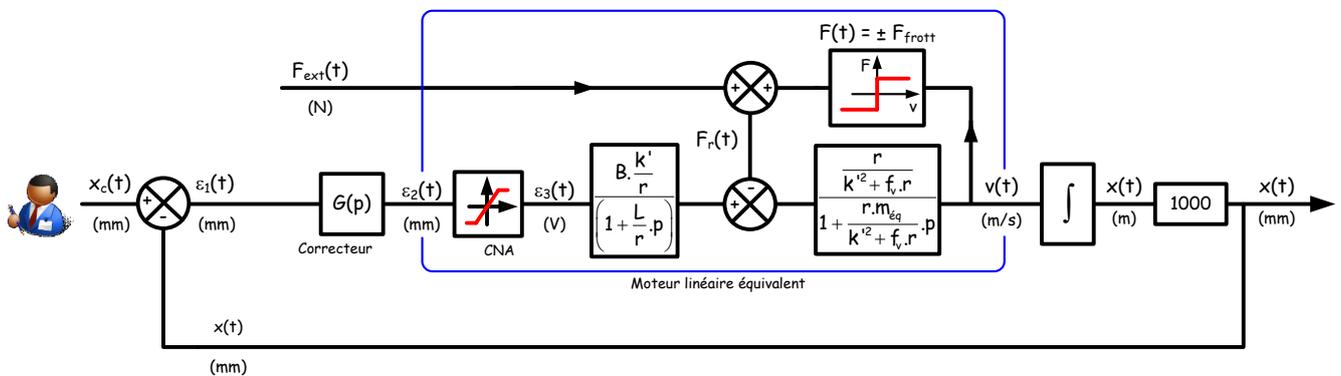


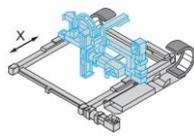
Dans ce modèle, le rayon R devra être renseigné en mm.

Modèle 4 :



ou





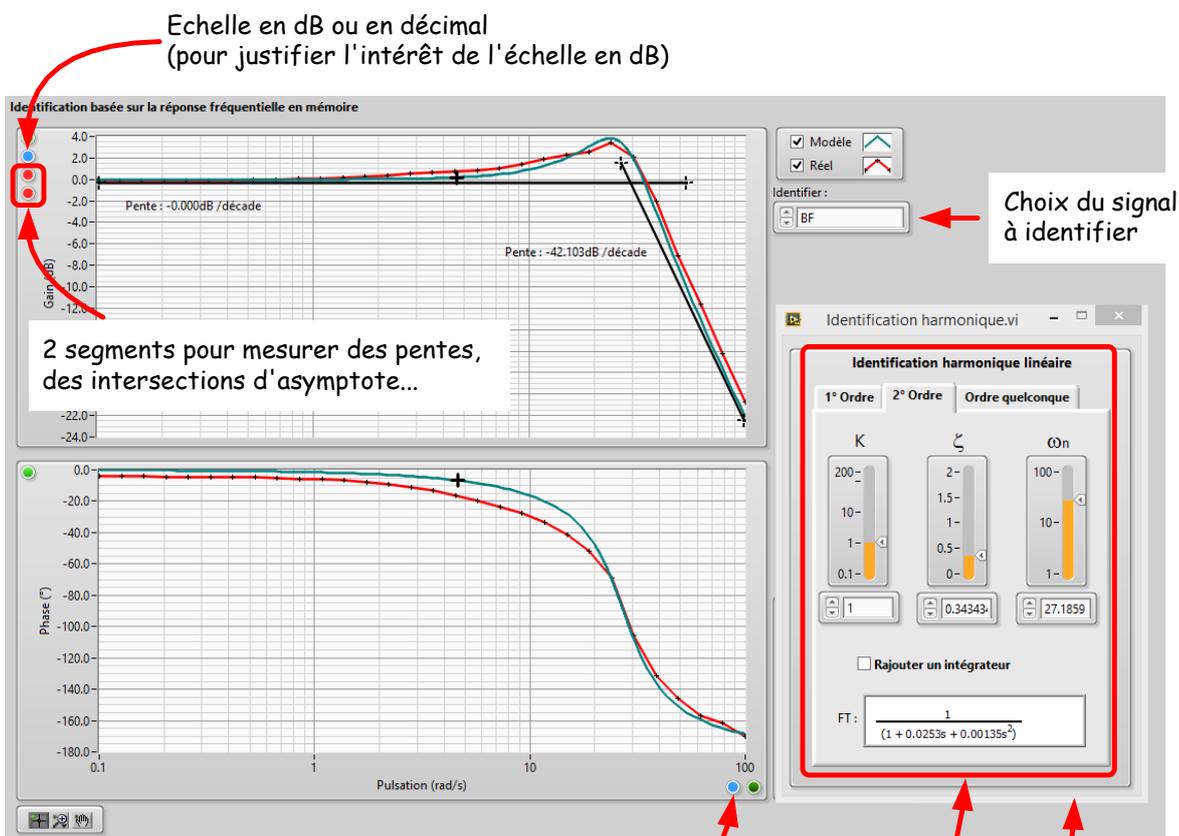
Sous onglet "Identification / Simulation", "Harmonique linéaire"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Identification / Simulation"

Il s'agit d'un onglet dans lequel on procède à l'identification d'une réponse harmonique.

Il faut avoir préalablement lancé une campagne de mesure (Onglet "Analyse harmonique") ou charger en mémoire les résultats d'une campagne de mesure (Menu "Analyse harmonique", "Ouvrir un essai fréquentiel").



Echelle en dB ou en décimal
(pour justifier l'intérêt de l'échelle en dB)

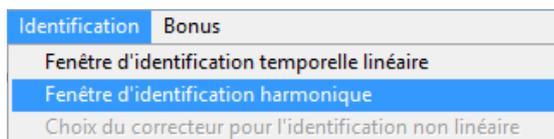
2 segments pour mesurer des pentes,
des intersections d'asymptote...

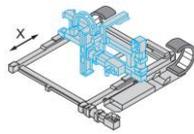
Choix du signal
à identifier

Echelle en log ou en décimal
(pour justifier l'intérêt de l'échelle en log)

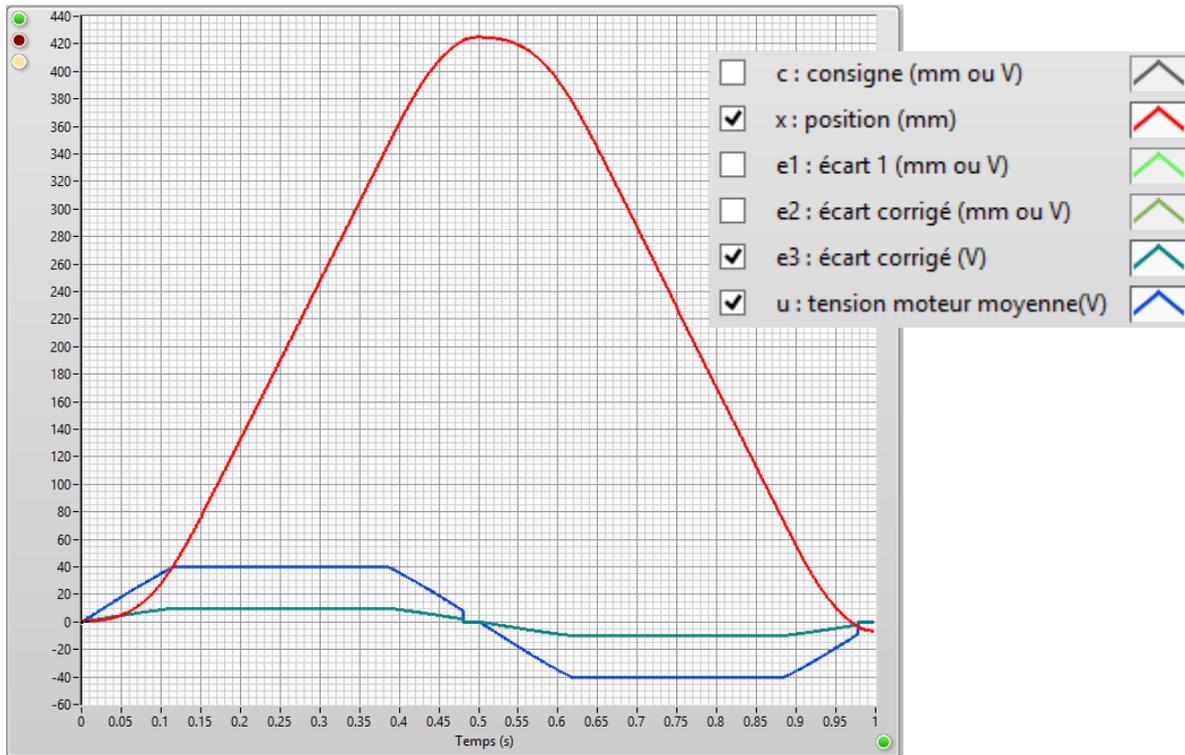
Modèle envisagé

Menu "Identification", "Fenêtre
d'identification harmonique" si
vous avez fermé cette fenêtre

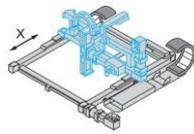




L'identification d'un comportement par un modèle linéaire peut assez rapidement se révéler illusoire si le système subit des phénomènes non linéaires importants. Rappelons que la principale non linéarité est la saturation de la carte de commande à ± 10 V. Il est souvent intéressant de vérifier avant l'identification que la saturation de la carte de commande n'a pas duré trop longtemps ou mieux de lancer un essai avec des paramètres d'amplitude et de fréquence tels que toute saturation soit évitée.



Essai en boucle ouverte : une jolie arche de sinus...mais avec une forte saturation du moteur à ± 40 V (ou de la carte de commande à ± 10 V)



Onglet "Synthèse correcteur"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

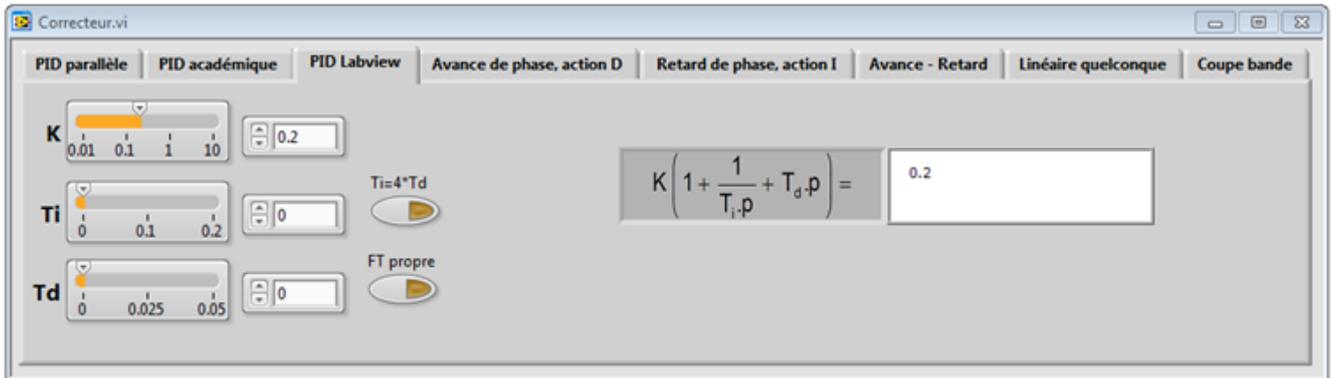
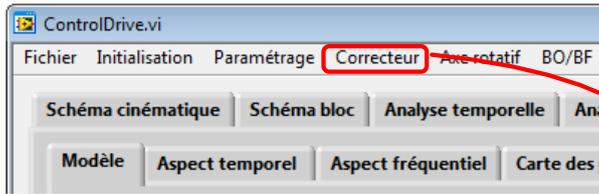
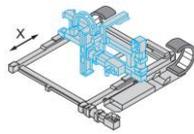
| Sous onglets | |
|-----------------------------------------------------|---------|
| <u>Modèle linéaire</u> | page 37 |
| <u>Aspect temporel linéaire</u> | page 40 |
| <u>Aspect fréquentiel linéaire</u> | page 41 |
| <u>Carte des pôles</u> | page 43 |
| <u>Aspect temporel non linéaire</u> | page 45 |
| <u>Autotuning</u> | page 51 |
| <u>Discrétisation correcteur</u> | page 54 |

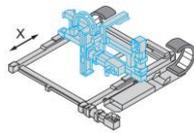
Dans cet onglet une tension nulle est envoyée au moteur pour éviter les conséquences d'un calage de correcteur hasardeux. L'asservissement sera à nouveau remis en fonction dès la sortie de cet onglet.

On donne le code couleur utilisé dans tous les sous-onglets de "Synthèse correcteur" :

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Rose |  | Réponse de la boucle fermée non corrigée |
| Rouge |  | Réponse de la boucle fermée corrigée |
| Vert |  | Boucle ouverte non corrigée (càd avec correcteur unité) |
| Jaune |  | Correcteur |
| Bleu |  | Boucle ouverte corrigée |

Dans tous les sous-onglets de "Synthèse correcteur", il est intéressant d'avoir la fenêtre du choix de correcteur à portée de main : Menu "Correcteur"





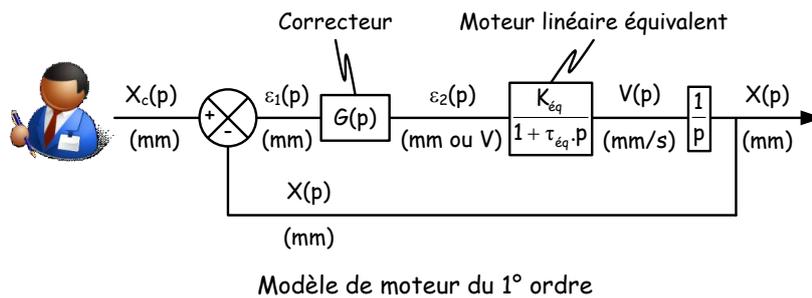
Sous onglet "Synthèse correcteur", "Modèle linéaire"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

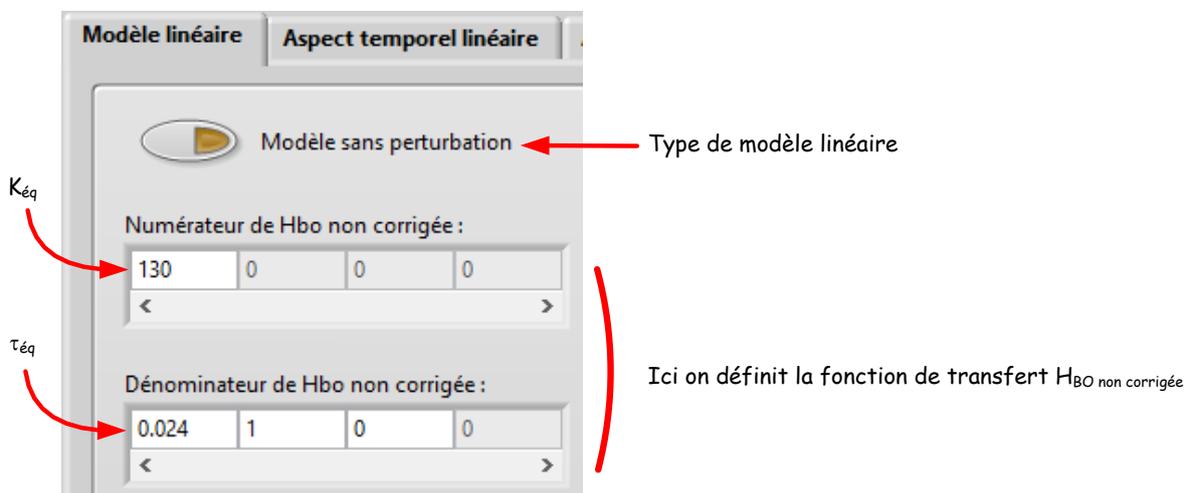
[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Synthèse correcteur"](#)

Dans cet onglet il faut définir le modèle de boucle ouverte non corrigée avec ou sans perturbation.

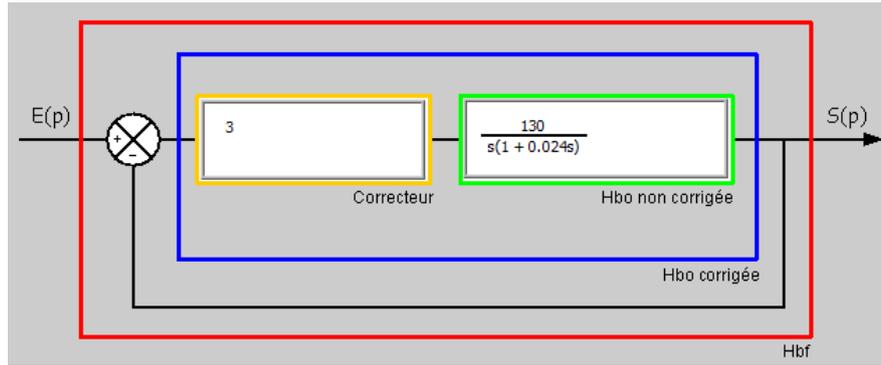
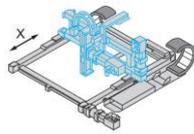
Avec un modèle non perturbé on attend un modèle linéaire du type :



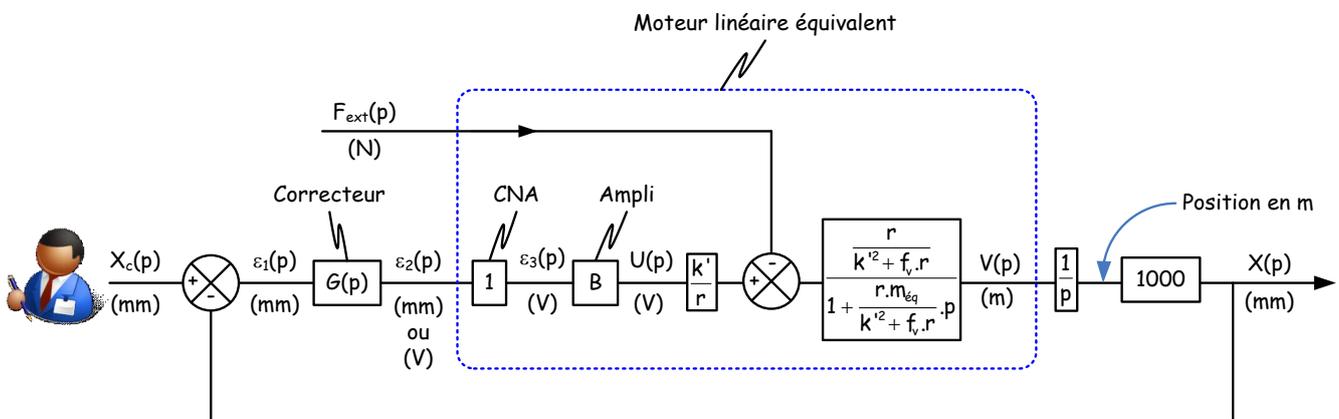
On a alors $H_{bo \text{ non corrigée}}(p) = \frac{X(p)}{\varepsilon_2(p)} = \frac{K_{eq}}{p \cdot (1 + \tau_{eq} \cdot p)}$ et on doit renseigner le numérateur et le dénominateur comme ceci :



Les coefficients sont entrés dans l'ordre des puissances décroissantes. Pensez à utiliser le menu contextuel (bouton droit de la souris).

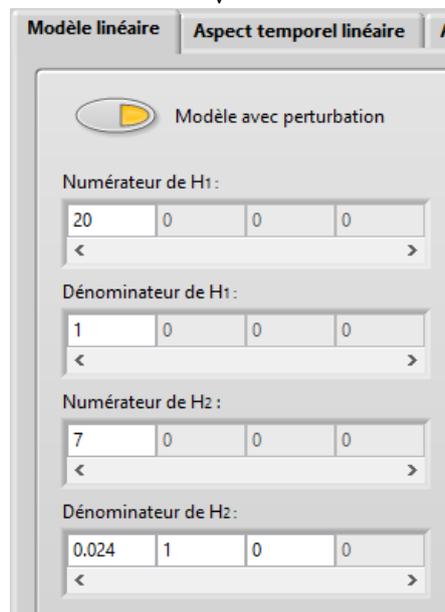


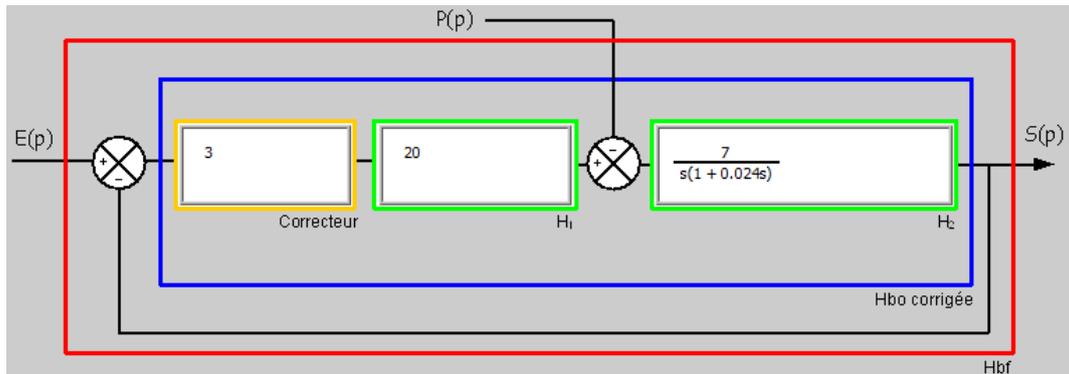
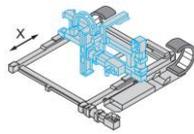
Avec un modèle perturbé on attend un modèle linéaire du type :



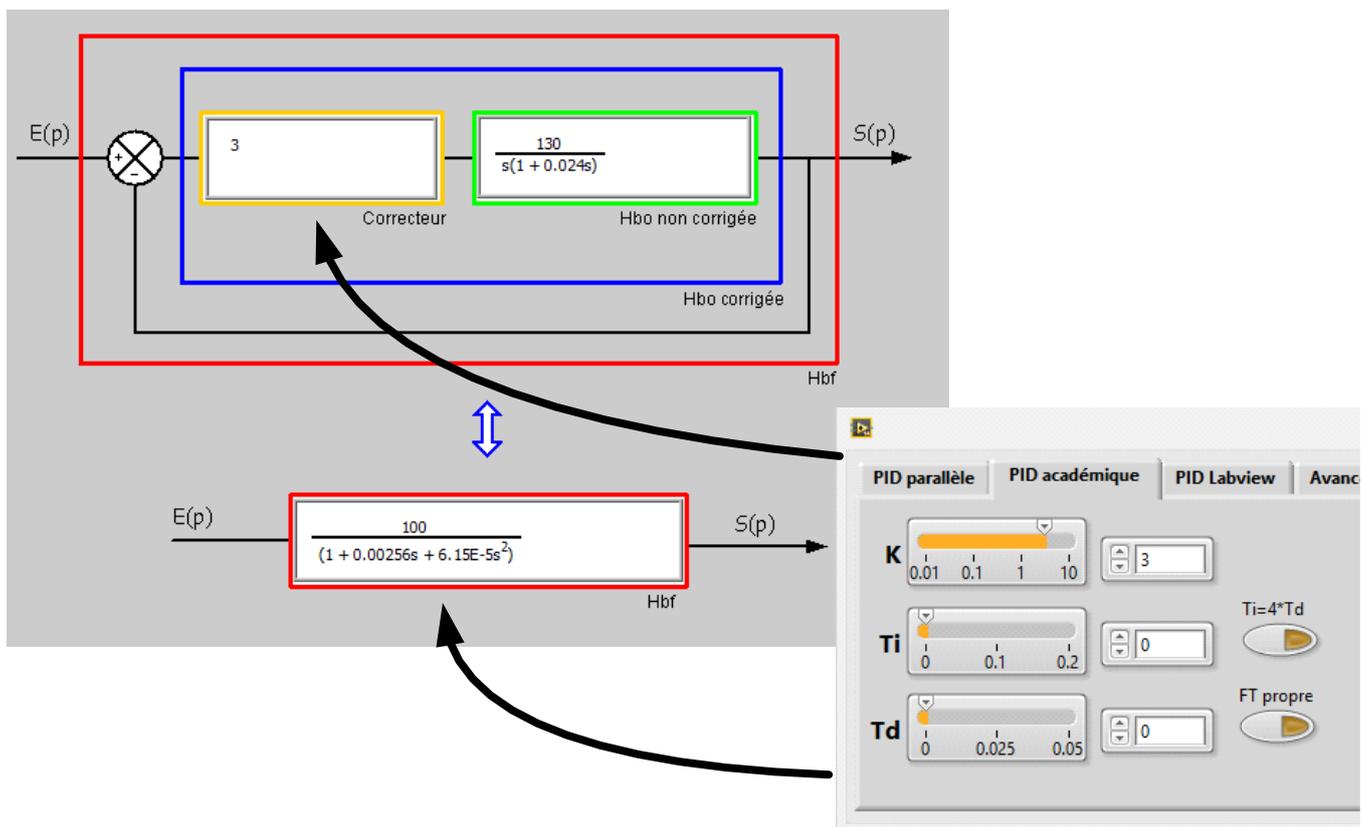
Modèle de moteur avec inductance non prise en compte et frottement visqueux

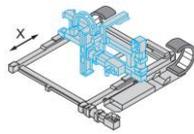
On a alors $H_1(p) = \frac{B.k'}{r}$ et $H_2(p) = 1000 \cdot \frac{r}{k'^2 + f_v.r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{r.m_{eq}}{k'^2 + f_v.r} \cdot p}$ et il faut renseigner les blocs H_1 et H_2 :





On peut d'ores et déjà modifier le correcteur pour visualiser son effet sur les différentes fonctions de transfert.





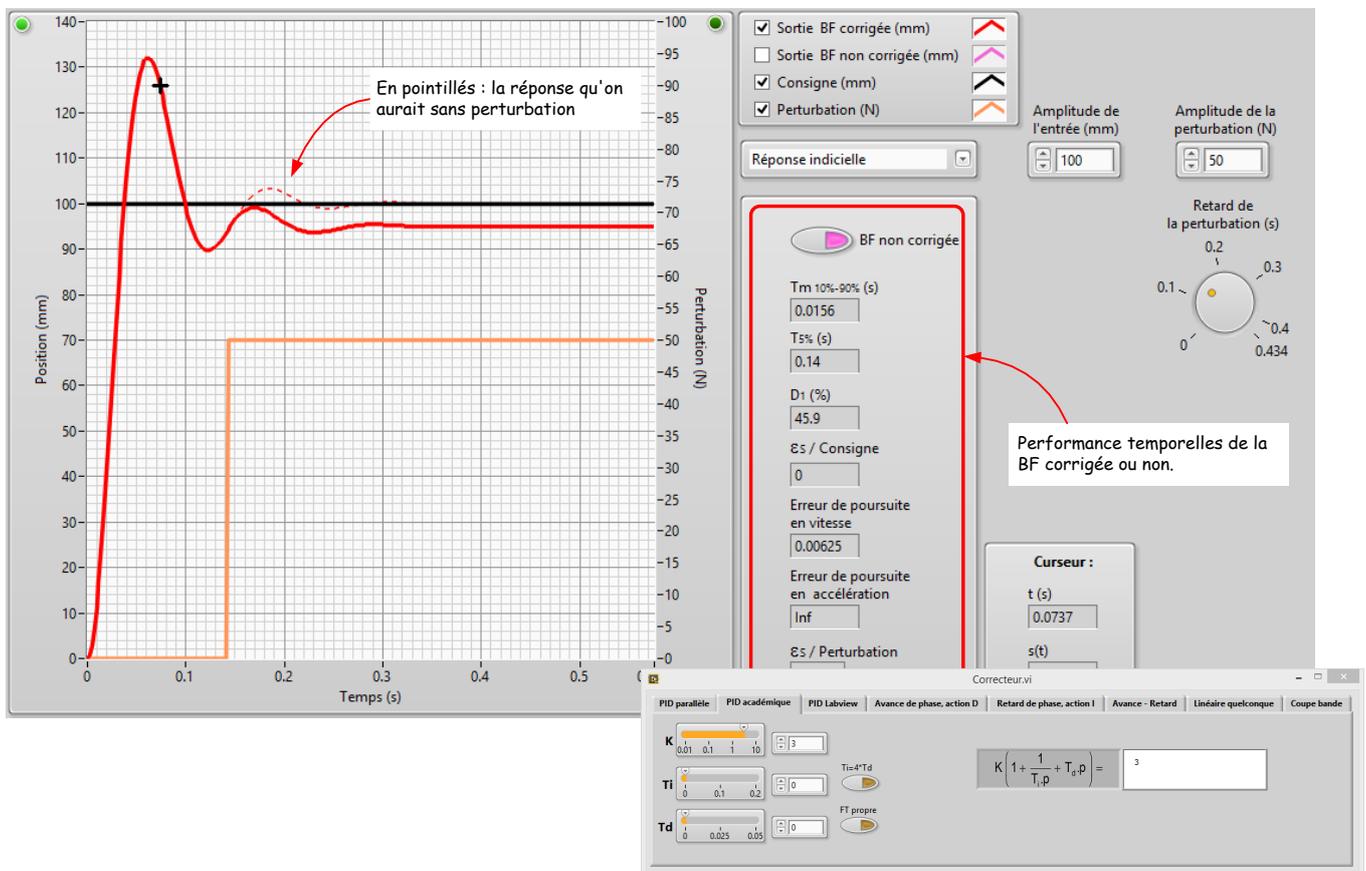
Sous onglet "Synthèse correcteur", "Aspect temporel linéaire"

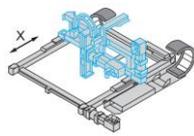
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Synthèse correcteur"](#)

On peut observer dans cet onglet la réponse temporelle (indicielle, rampe etc...) du système en boucle fermée corrigée et en boucle fermée non corrigée.

On peut là aussi modifier le correcteur pour visualiser son effet sur les différentes réponses.





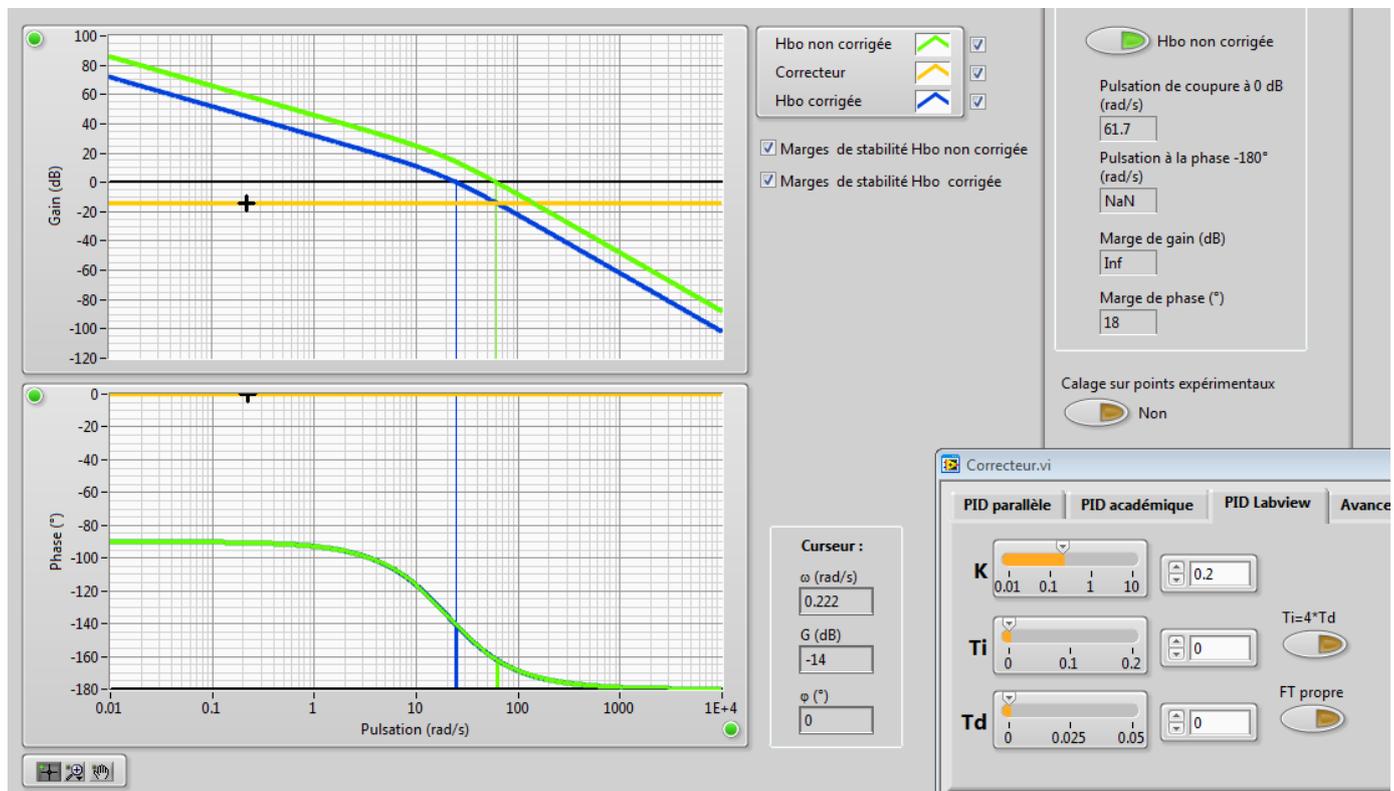
Sous onglet "Synthèse correcteur", "Aspect fréquentiel linéaire"

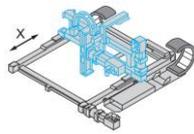
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Synthèse correcteur"](#)

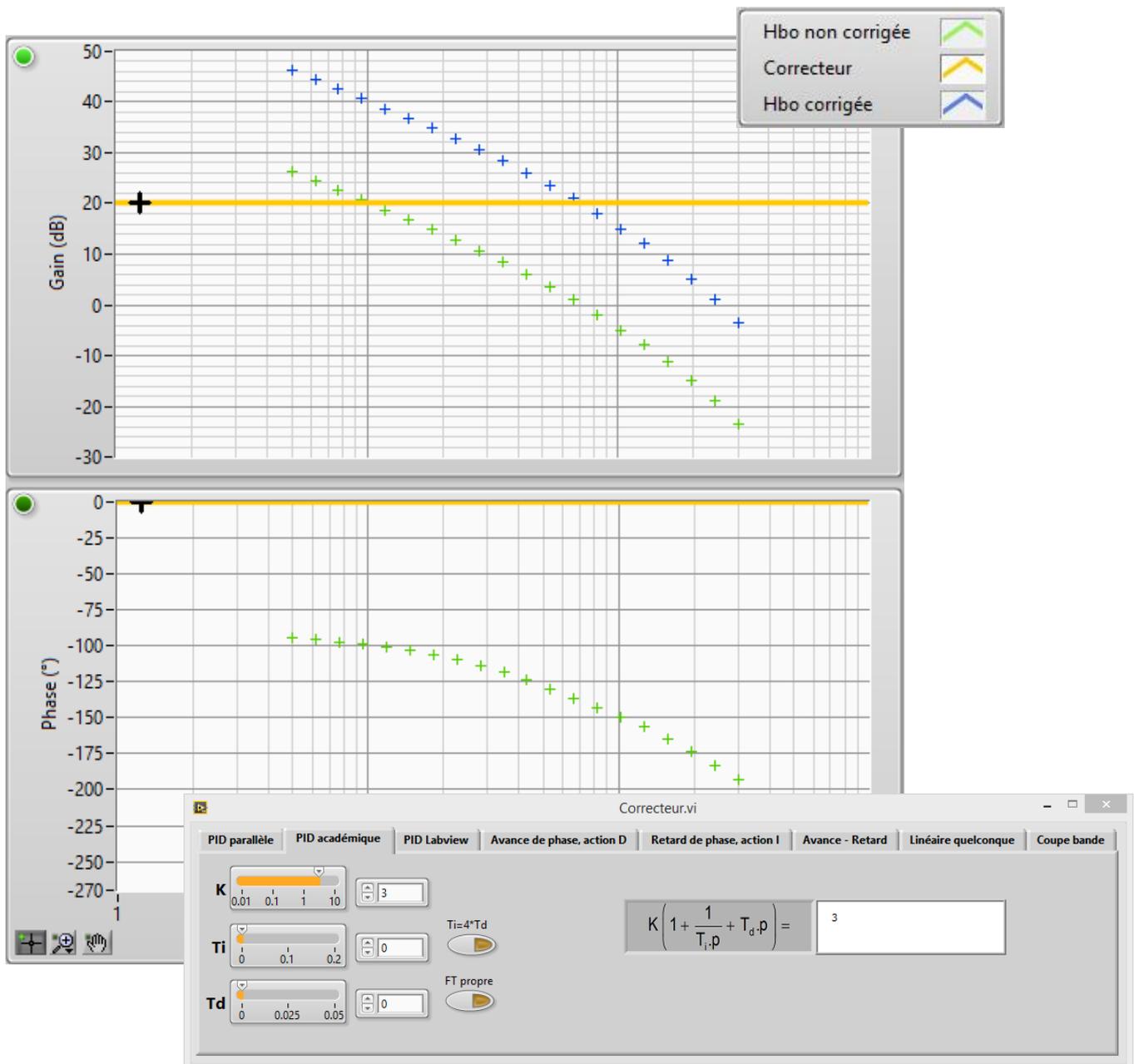
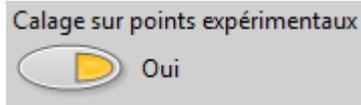
On observe dans cet onglet la réponse harmonique de la boucle ouverte non corrigée, du correcteur et de la boucle ouverte corrigée.

On peut se fixer un cahier des charges dans le domaine fréquentiel et ainsi caler un correcteur grâce à des considérations du type : marge de phase, de gain, nb d'intégrateur de la boucle ouverte, pulsation de coupure à 0 dB.

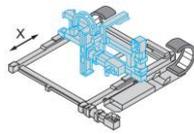




Si un essai fréquentiel est chargé en mémoire, la commande "Calage sur point expérimentaux" offre des possibilités de calage de correcteur sans même avoir à poser de modèle. Il faut pour cela un essai en boucle ouverte de qualité : large plage de fréquence sans qu'il y ait eu, pour aucune des fréquences de l'essai, de saturation de la carte de commande.



On peut alors choisir le correcteur en lisant la marge de phase, la marge de gain, le gain basse fréquence et la pulsation de coupure à 0 dB.



Sous onglet "Synthèse correcteur", "Carte des pôles"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

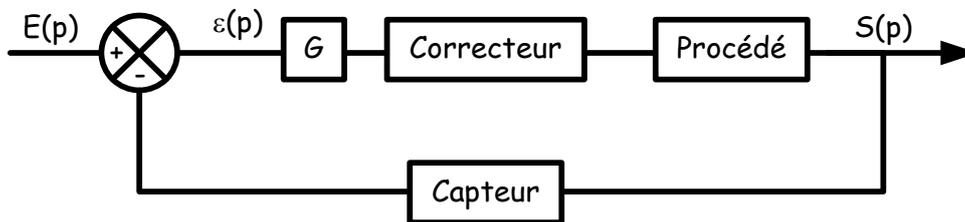
[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Synthèse correcteur"](#)

On peut ici observer le lieu des pôles et des zéros de la boucle fermée corrigée et non corrigée.

On peut aussi observer le lieu d'Evans.

Rappel : Lieu d'Evans

Soit le système asservi suivant :

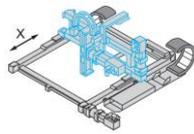


Le lieu d'Evans est le lieu des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée lorsque le gain G varie dans l'intervalle $[0, +\infty[$

Lorsqu'on utilise par exemple :

- Un correcteur du type $K(1 + \frac{1}{T_i.p} + T_d.p)$: on ne modifie donc pas le lieu d'Evans en modifiant le gain K (K joue le même rôle que G).
- Un correcteur du type $P + \frac{I}{p} + D.p$: on modifie la forme du lieu en modifiant la valeur de P (P ne joue pas le même rôle que G). Le calage du correcteur devient délicat par cette méthode.

Un correcteur de type "PID LabVIEW" ou "PID académique" est ainsi beaucoup plus adapté lorsqu'on cherche à caler un correcteur en utilisant le lieu d'Evans qu'un correcteur "PID parallèle".

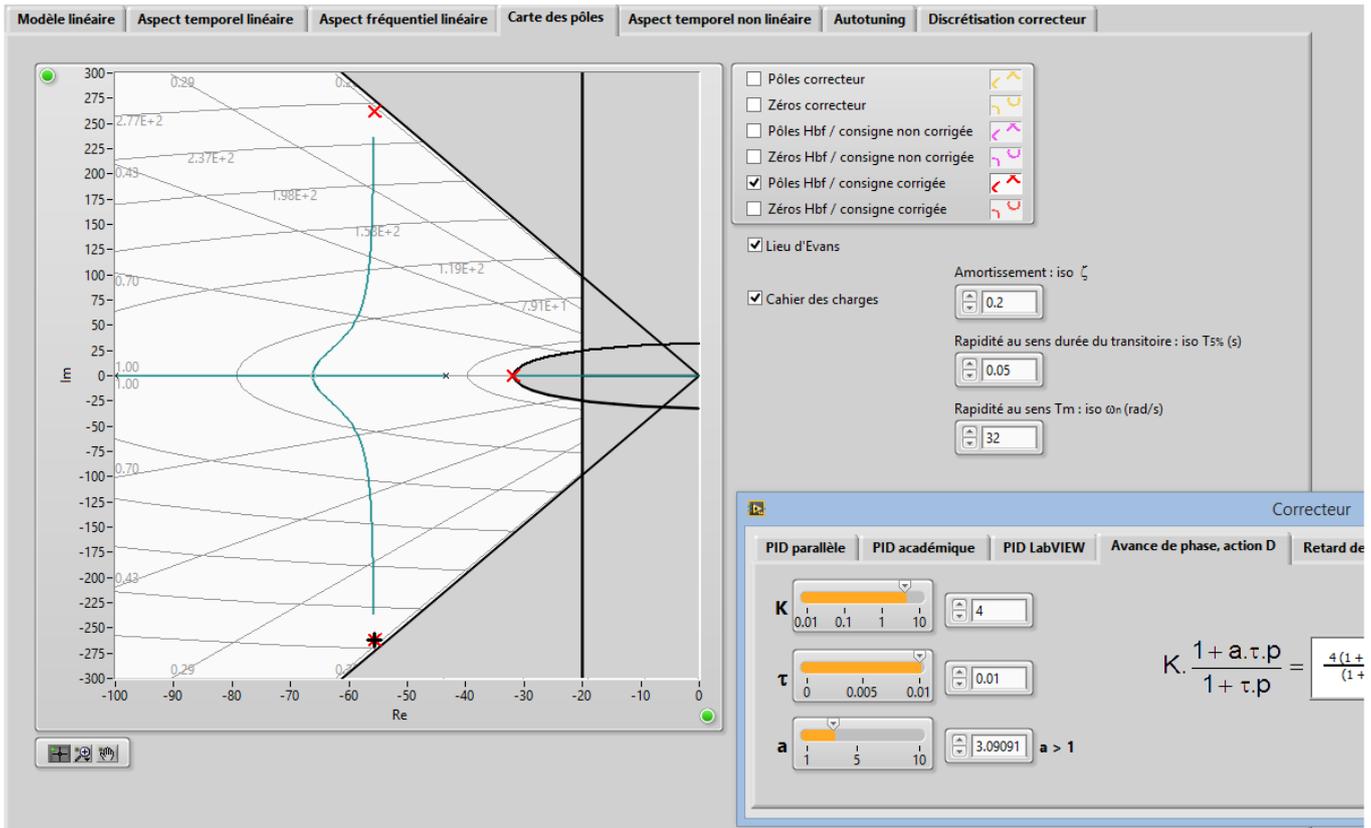


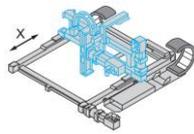
Enfin, dans cet onglet, on peut se fixer un cahier des charges dans le domaine du lieu des pôles et ainsi caler un correcteur grâce à des considérations du type : iso ζ , iso ω_n , T_m , $T_{5\%}$.

Critère d'amortissement : ζ

Critère mixte rapidité + amortissement : $T_{5\%}$

Critère de rapidité pure (au sens vivacité) : ω_n





Sous onglet "Synthèse correcteur", "Aspect temporel non linéaire"

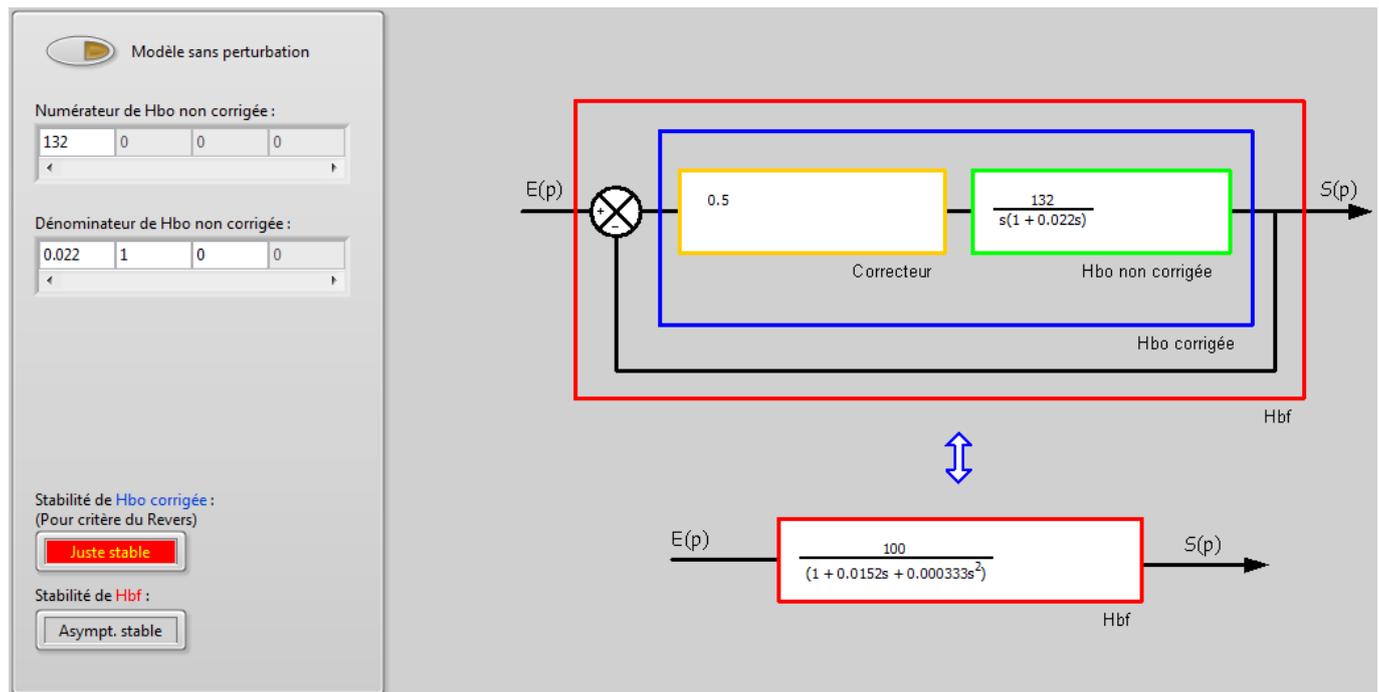
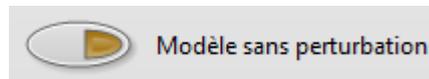
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

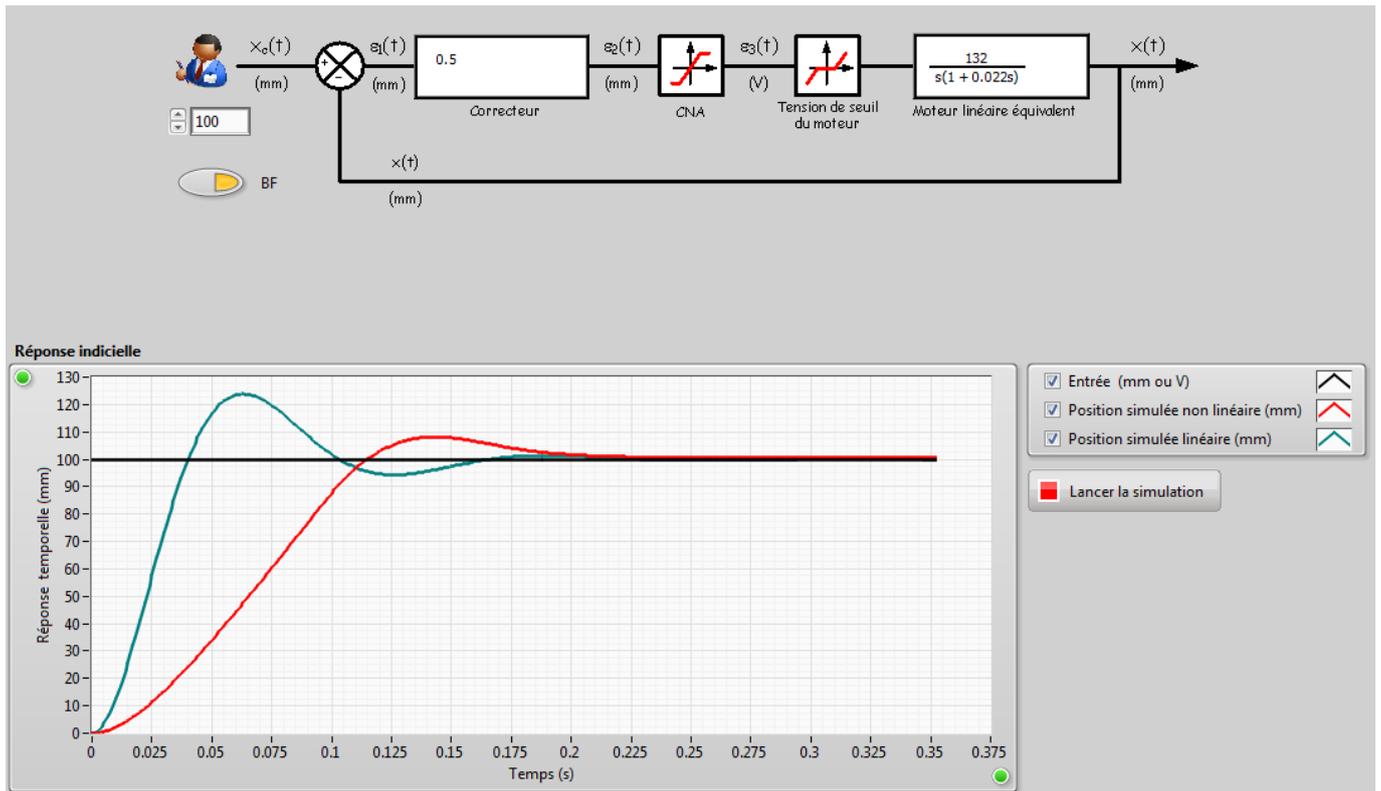
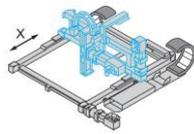
[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Synthèse correcteur"](#)

Il s'agit ici d'un modèle non linéaire très simple mais qui cependant reflète très bien le comportement de Control'X : la saturation de la carte de commande est prise en compte et les frottements secs sont modélisés par une tension de seuil (voir le fichier "Eléments de modélisation" pour de plus amples détails sur la justification de ce type de modèle).

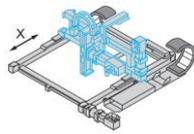
Il faut cliquer sur chacun des blocs pour définir ses caractéristiques.
Le modèle étant non linéaire, le comportement dépend de l'amplitude de l'entrée.

Modèle sans perturbation :

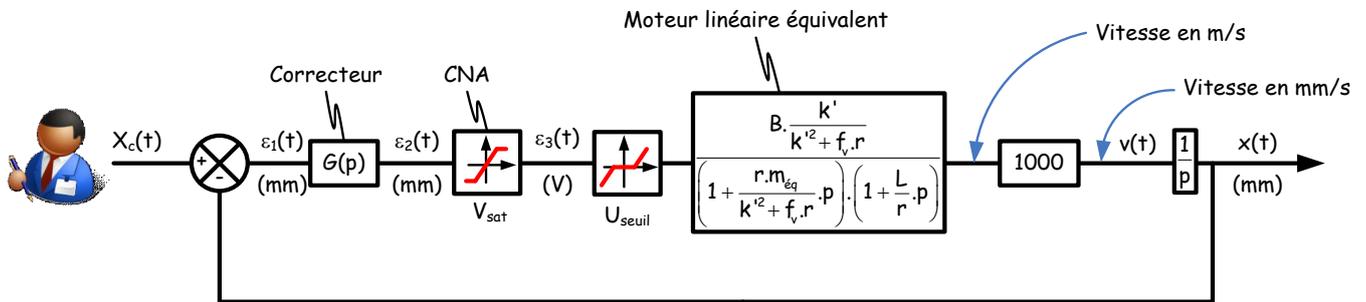




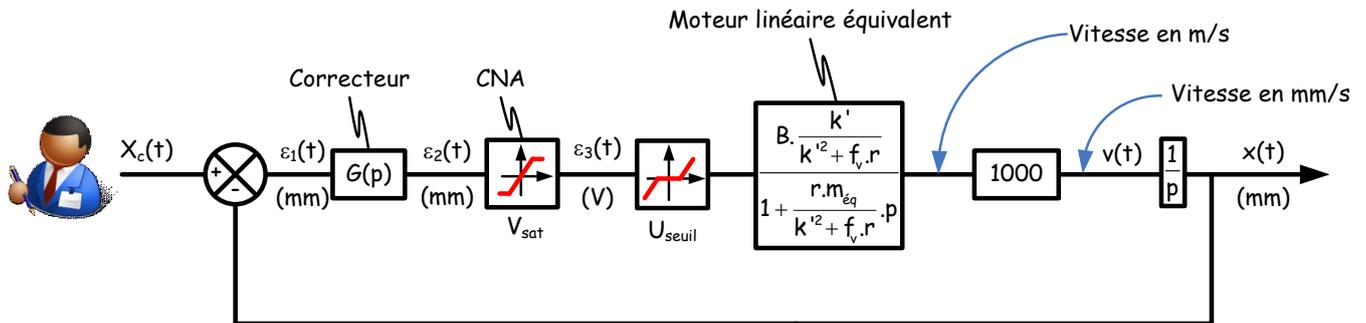
Modèle non linéaire associé au modèle linéaire sans perturbation
(Les perturbations de type frottement secs sont modélisées par la tension de seuil $u_{seuil} = 1.5 \text{ V}$)



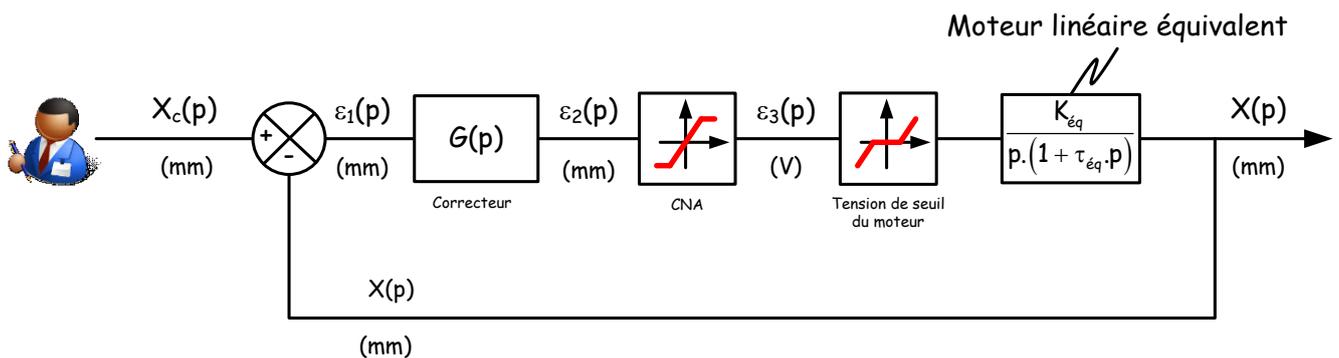
Dans cet onglet on attend un modèle par exemple du type :



ou

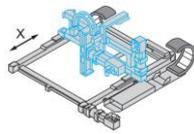


ou



Les simulations sont lancées en boucle pour permettre des modifications à la volée des différents paramètres. La durée de simulation est choisie par défaut automatiquement de façon à pouvoir observer les phénomènes intéressants :

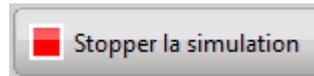
- C'est la durée de l'expérimentation en mode échelle des X automatique (diode verte allumée)
- C'est la durée correspondant au maximum de l'échelle des X en mode échelle manuelle (diode verte éteinte).



Dans tous les cas, la durée de simulation est limitée à 2 secondes.

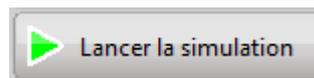
Le solveur est un solveur à pas fixe de type Runge-Kutta.

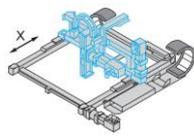
Selon les valeurs numériques entrées (notamment des valeurs très éloignées de l'ordre de grandeur attendu) la simulation peut être longue et l'interaction avec l'utilisateur est alors dégradée. On peut alors mettre fin à la simulation en cours en cliquant sur l'icône :



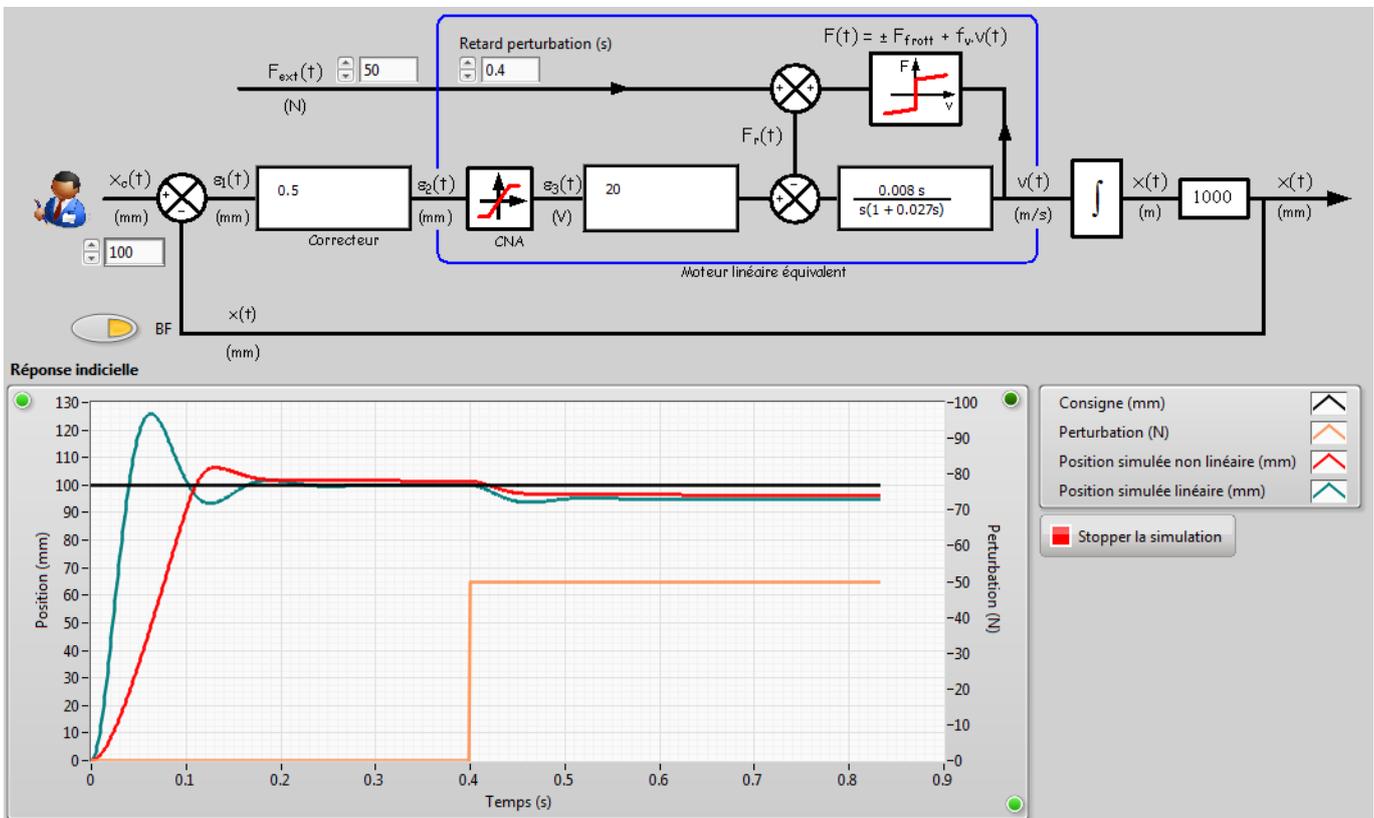
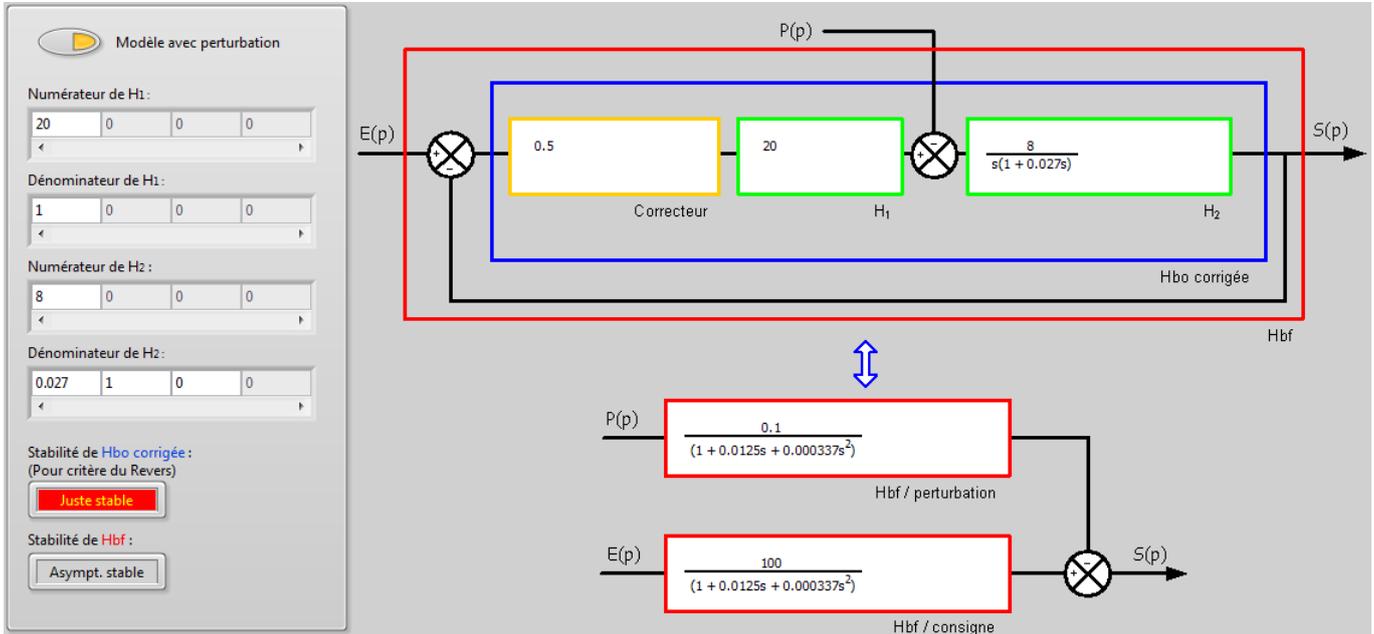
La simulation est aussi stoppée automatiquement lorsque le solveur rencontre une erreur : certaines fonctions de transfert non causales par exemple.

Une fois la simulation stoppée, il faut certainement revoir l'ordre de grandeur de certains paramètres ou rendre causales certaines fonctions de transfert puis relancer la simulation :

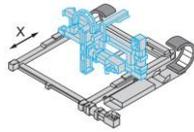




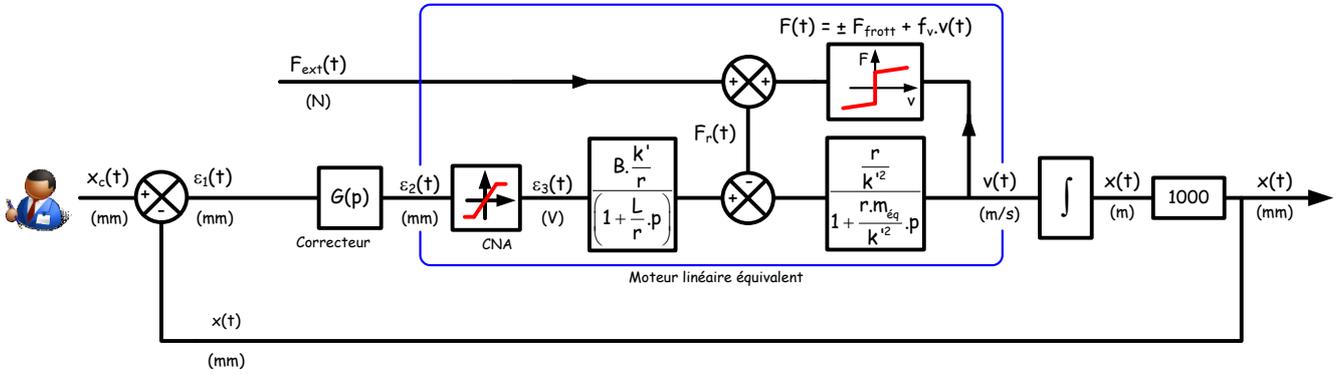
Modèle avec perturbation :

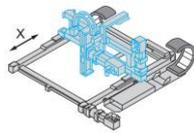


Modèle non linéaire associé au modèle linéaire avec perturbation



Dans cet onglet on attend un modèle par exemple du type :





Sous onglet "Synthèse correcteur", "Autotuning"

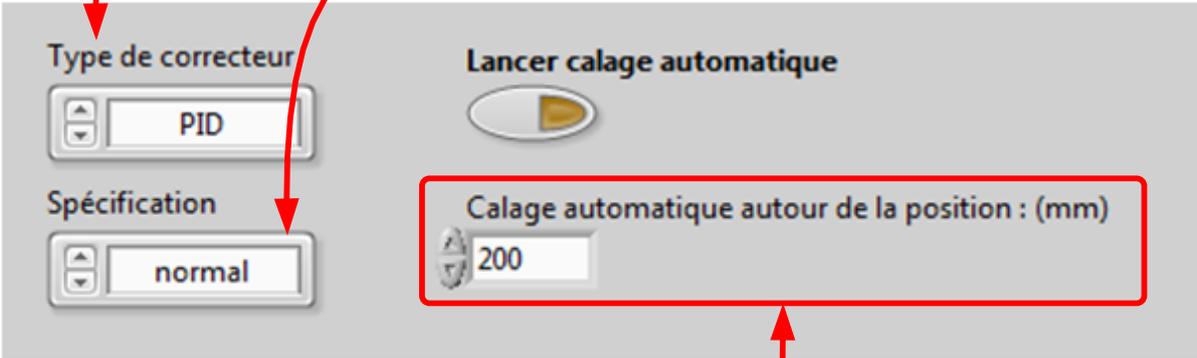
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Synthèse correcteur"](#)

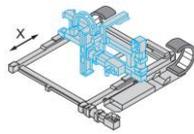
Cet onglet permet de caler un correcteur automatiquement. La méthode utilisée consiste à exciter le système en boucle fermée par des entrées rectangulaires et à appliquer un algorithme de Ziegler et Nichols pour déterminer les paramètres du correcteur. Voir la documentation LabVIEW "PID toolkit User Manual.pdf" dans "...\Control'X\Dossier ressources\Doc Labview".

Choix du type de correcteur à caler : P, PI, PID

Choix de la robustesse : normal, slow, fast
(Compromis amortissement-rapidité)



Choix du point de fonctionnement

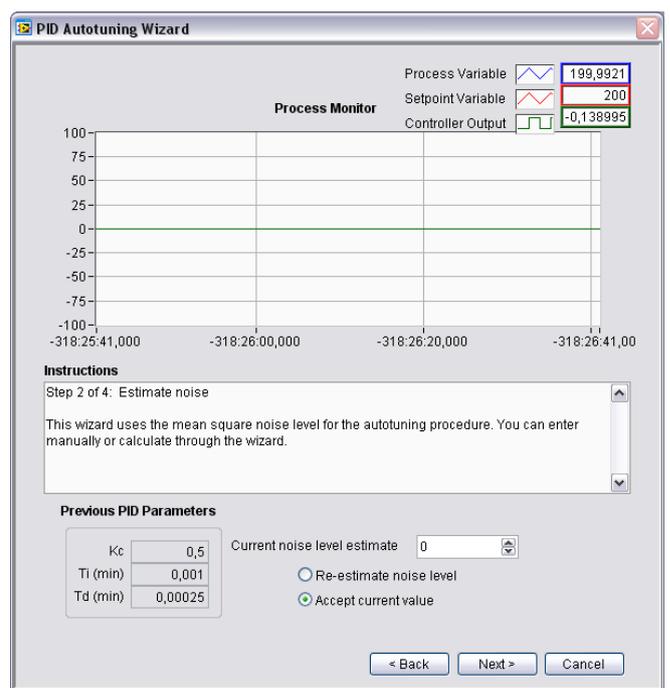
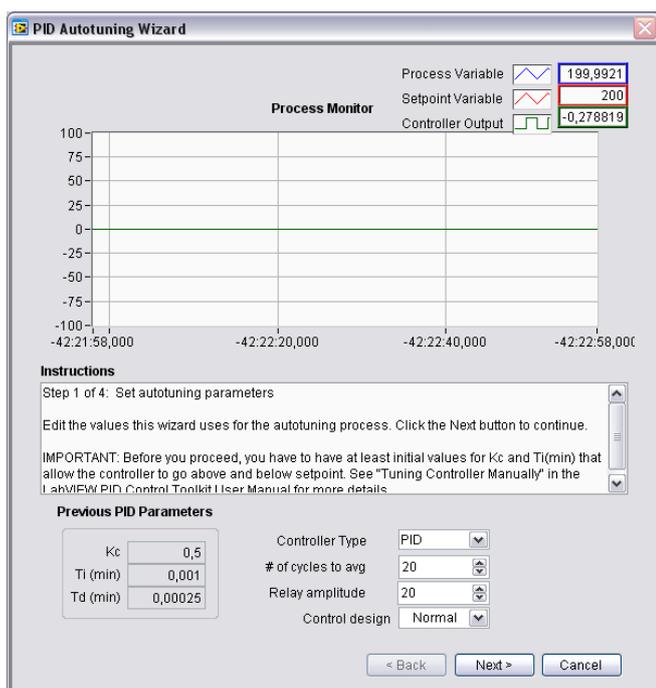


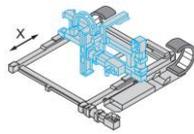
Etape 1 : définition des paramètres de l'essai

Les paramètres définis par défaut sont généralement satisfaisants : gain du correcteur, nb de cycles d'excitation, amplitude du cycle (Relay amplitude). **L'amplitude d'excitation doit être telle que compte tenu du gain du correcteur, il n'y ait pas saturation (à ±10V).**

Etape 2 : mesure du bruit de mesure

Compte tenu du capteur utilisé (codeur incrémental), le bruit de mesure mesuré est nul : Cliquer sur "Accept current value"

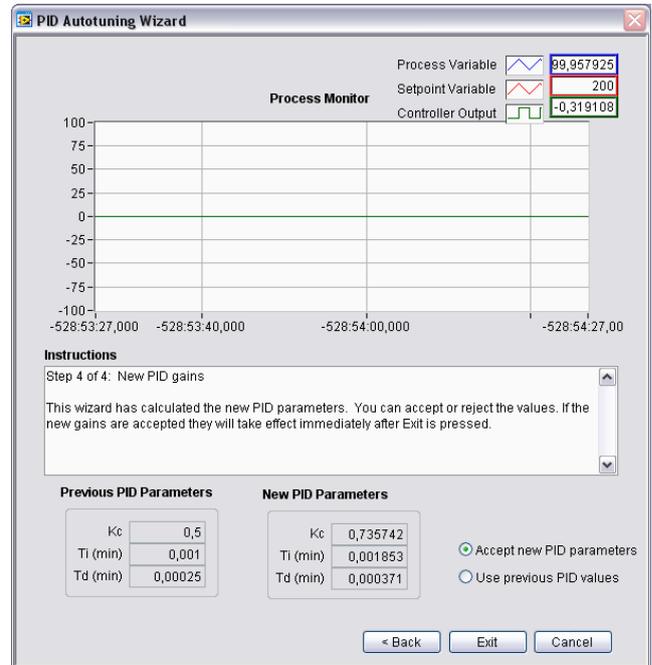
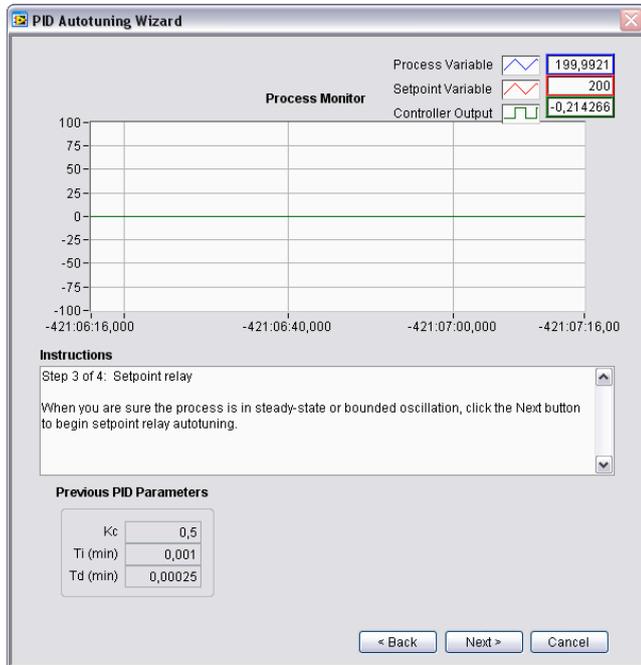




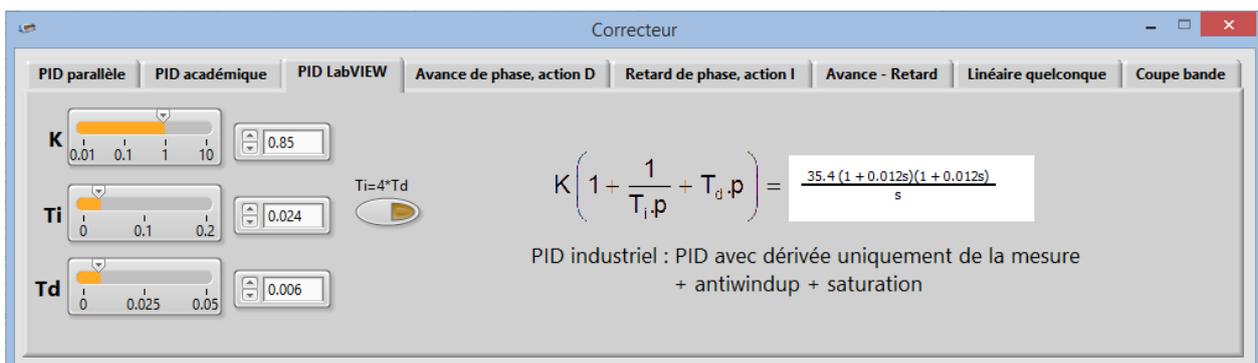
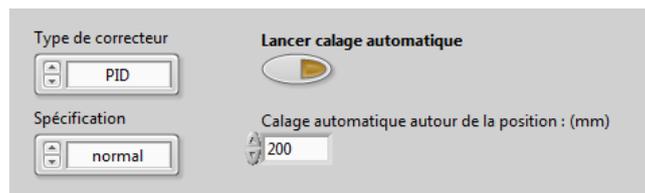
Etape 3 : autotuning

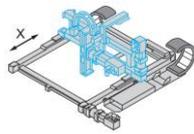
Etape 4 : résultats de l'autotuning

Si vous cliquez sur "Accept new PID parameters" les gains vont être transférés vers le correcteur "PID LabVIEW" de Control'Drive.



Si vous acceptez les nouveaux paramètres, les gains du correcteur seront automatiquement transférés vers le correcteur "PID LabVIEW" : la fenêtre de ce correcteur s'ouvre.





Sous onglet "Synthèse correcteur", "Discrétisation correcteur"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir à l'onglet "Synthèse correcteur"](#)

Dans cet onglet on peut comparer la réponse indicielle d'un système sur la base de la théorie des systèmes continus et sur celle des systèmes échantillonnés (utilisation de la transformée en z).

Lorsque la période d'échantillonnage est correctement choisie (1 ms par défaut), on peut justifier le fait que l'on peut prévoir les performances de l'asservissement en utilisant la théorie des systèmes continus alors que la commande est numérique (échantillonnée).

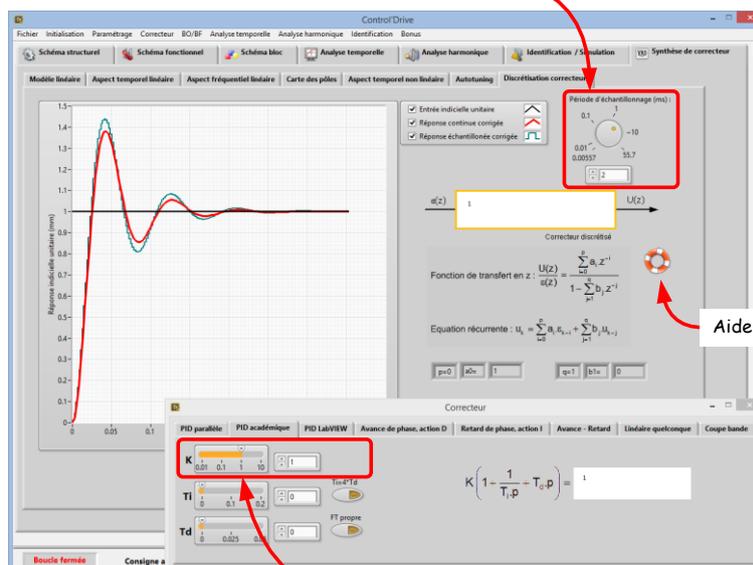
On peut par exemple augmenter la période d'échantillonnage et observer la dégradation de l'amortissement voire l'instabilité du système ainsi échantillonné.

On peut alors modifier les gains du correcteur (le terme proportionnel notamment) et observer les modifications de la réponse échantillonnée.

Pour une période d'échantillonnage élevée (30ms par exemple), on peut diminuer le gain proportionnel du correcteur pour retrouver un amortissement correct mais aussi observer que la rapidité est alors fortement dégradée.

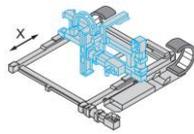
La méthode de l'équivalence p-z utilisée est celle de Tustin (aussi appelée bilinéaire ou trapèze)

Choisir le période d'échantillonnage



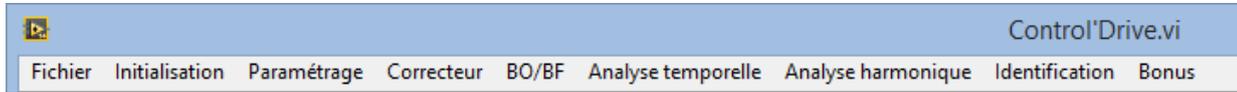
Modifier le gain du correcteur

N.B. : Dans cet onglet, la fonction de transfert du correcteur doit être causale (ou propre) : degré du numérateur inférieur ou égal au degré du dénominateur.

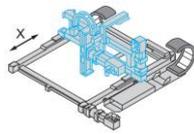


Menus

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



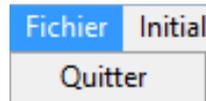
| Menus | |
|--------------------------------------------------|---------|
| <u>Fichier</u> | page 56 |
| <u>Initialisation</u> | page 57 |
| <u>Paramétrage</u> | page 59 |
| <u>Correcteur</u> | page 67 |
| <u>BO/BF</u> | page 75 |
| <u>Analyse temporelle</u> | page 76 |
| <u>Analyse harmonique</u> | page 87 |
| <u>Identification/Simulation</u> | page 91 |
| <u>Bonus</u> | page 95 |



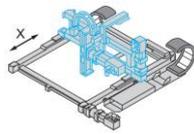
Menu "Fichier"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Ctrl + clic pour revenir aux menus



Quitter : pour quitter Control'Drive. Ne sauve aucun résultat.



Menu "Initialisation"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

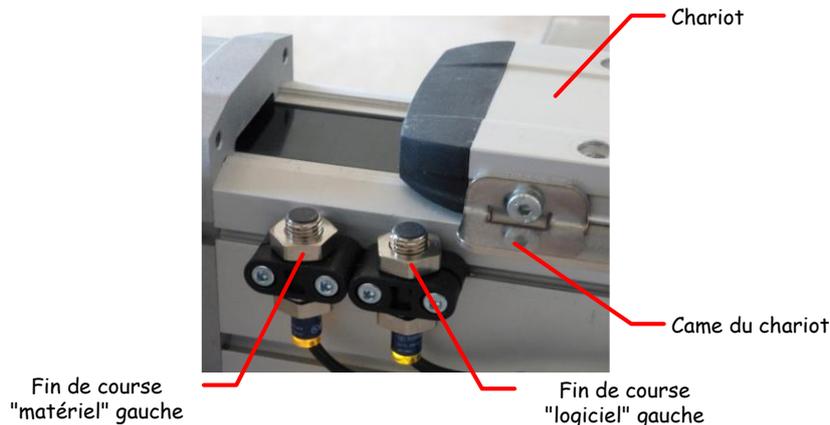
[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)

| Initialisation | Paramétrage | Correcteur | BO/BF | Analyse temporelle |
|--------------------------------------------------------------|-------------|------------|-------|--------------------|
| Tout réinitialiser | | | | F1 |
| Définir la position actuelle comme position 0 | | | | F2 |
| Positionner le chariot en position 0 (id BP "Réinitialiser") | | | | F3 |

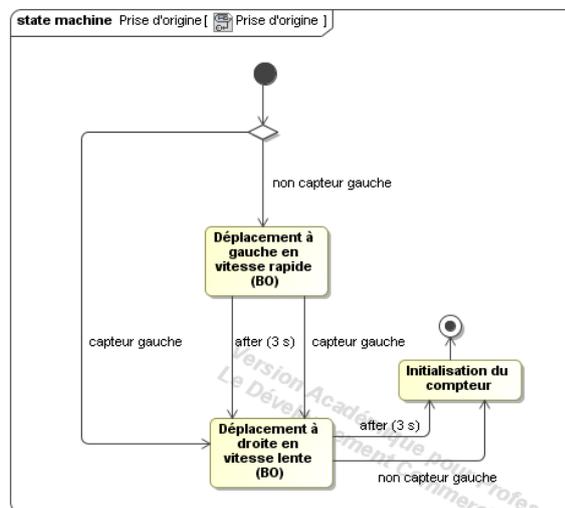
Menu "Tout réinitialiser"

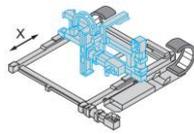
Permet d'effectuer une réinitialisation sur le capteur de fin de course logiciel gauche. Cette réinitialisation est identique à celle qui est effectuée au lancement de Control'Drive.

La fenêtre de Control'Drive doit avoir le focus (fenêtre active) pour que le raccourci F1 soit actif



Cette réinitialisation est faite selon l'algorithme ci-dessous :





Menu " Définir la position actuelle comme position 0"

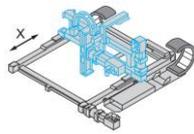
Permet d'effectuer un 0 relatif à partir de la position actuelle.

La fenêtre de Control'Drive doit avoir le focus (fenêtre active) pour que le raccourci F2 soit actif

Menu " Positionner le chariot en position 0"

Permet de revenir au 0 relatif avec un pilotage en boucle fermée reposant sur un correcteur bien calé.

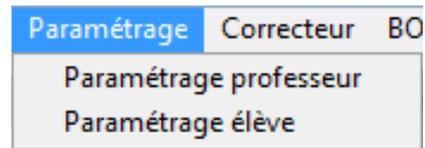
La fenêtre de Control'Drive doit avoir le focus (fenêtre active) pour que le raccourci F3 soit actif.



Menu "Paramétrage"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)



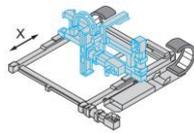
Menu "Paramétrage professeur"

Permet d'accéder à la fenêtre de paramétrage avec tous les droits. Par défaut le mot de passe est vierge.

Dans ce mode, tous les paramètres du menu sont modifiables et le fichier de configuration est accessible en lecture et écriture. Les nouveaux paramètres peuvent donc écraser les anciens définitivement.

Menu "Paramétrage élève"

Permet d'accéder à la fenêtre de paramétrage avec des droits restreints. Dans ce mode notamment, le fichier de configuration est accessible en lecture uniquement.

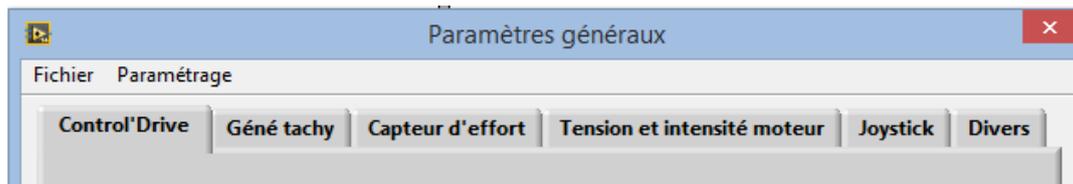


Fenêtre "Paramètres généraux"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)

Onglet "Control'Drive"



Période d'échantillonnage :

La valeur mini est de 1 ms. On peut modifier cette valeur pour mettre en évidence l'effet de l'échantillonnage sur les performances de l'asservissement (dégradation de l'amortissement). Cette valeur est prise en compte immédiatement.

Vitesse de retour à gauche (V) :

Utilisé pendant la phase de réinitialisation sur le capteur de fin de course "logicielle" gauche.

Vitesse de retour à droite (V) :

Utilisé pendant la phase de réinitialisation sur le capteur de fin de course "logicielle" gauche.

Constante de couple :

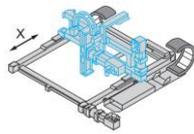
Utilisée pour l'affichage du couple moteur dans certains onglets et du couple moteur ramenée sur le chariot (force motrice).

Onglet "Géné tachy"

Le gain de la génératrice tachymétrique est annoncé par le constructeur SANYO comme valant $7 \text{ V} / (1000 \text{ tr/min}) \pm 10 \%$.

La génératrice a un comportement linéaire et bien sûr son offset est nul : génératrice à l'arrêt, la tension délivrée est nulle. Seul son gain est à régler, c'est ce que permet de faire cet onglet.

Le signal de référence servant à calibrer le gain de la génératrice tachymétrique est le signal de vitesse angulaire de l'arbre moteur élaboré par dérivation discrète de la position angulaire issue du codeur incrémental monté dans l'axe du moteur.

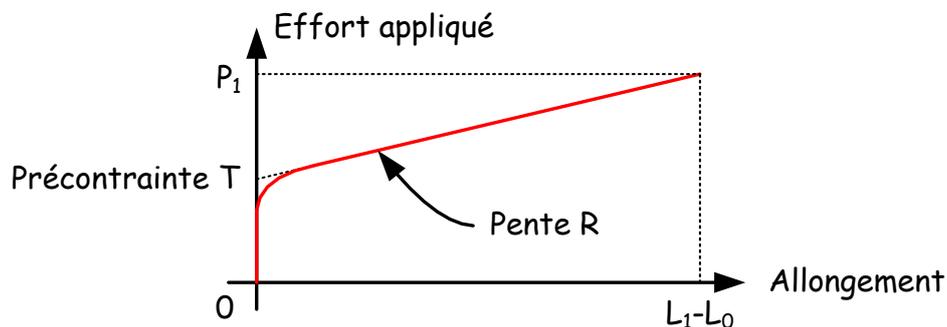


Onglet "Capteur d'effort"

Le capteur d'effort a un comportement linéaire. Il est donc nécessaire de régler son gain et son offset.

Le signal de référence servant à calibrer le gain du capteur d'effort est le ressort dont la raideur est supposée être connue. De la précision de cette raideur va dépendre la précision du gain du capteur d'effort.

On présente ci-dessous les caractéristiques du ressort :



| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|---------------------------------|---------|-------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| Longueur libre | L_0 | mm | 290 | |
| Longueur de l'extension maximum | L_1 | mm | 465 | Avant déformation plastique |
| Charge à L_1 | P_1 | N | 117.45 | |
| Tension initiale | T | N | 17.85 | Le ressort est à spires jointives, il est légèrement précontraint |
| Raideur | R | N/mm | 0.57 | |

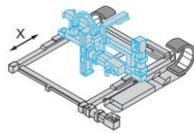
Onglet "Tension et intensité moteur"

Le variateur de vitesse est réglé (numériquement) en gain pur de valeur 4 : $U_{moyenne}(t) = 4 \cdot \varepsilon_3(t)$.

La tension moteur moyenne est donc censée valoir 4 fois la tension en sortie de carte de commande. Sur la carte de conditionnement de signaux, un montage électronique permet d'élaborer un signal dans la gamme [-10V, 10V] proportionnel à la tension moteur moyenne qui se trouve elle dans la gamme [-40V, 40V].

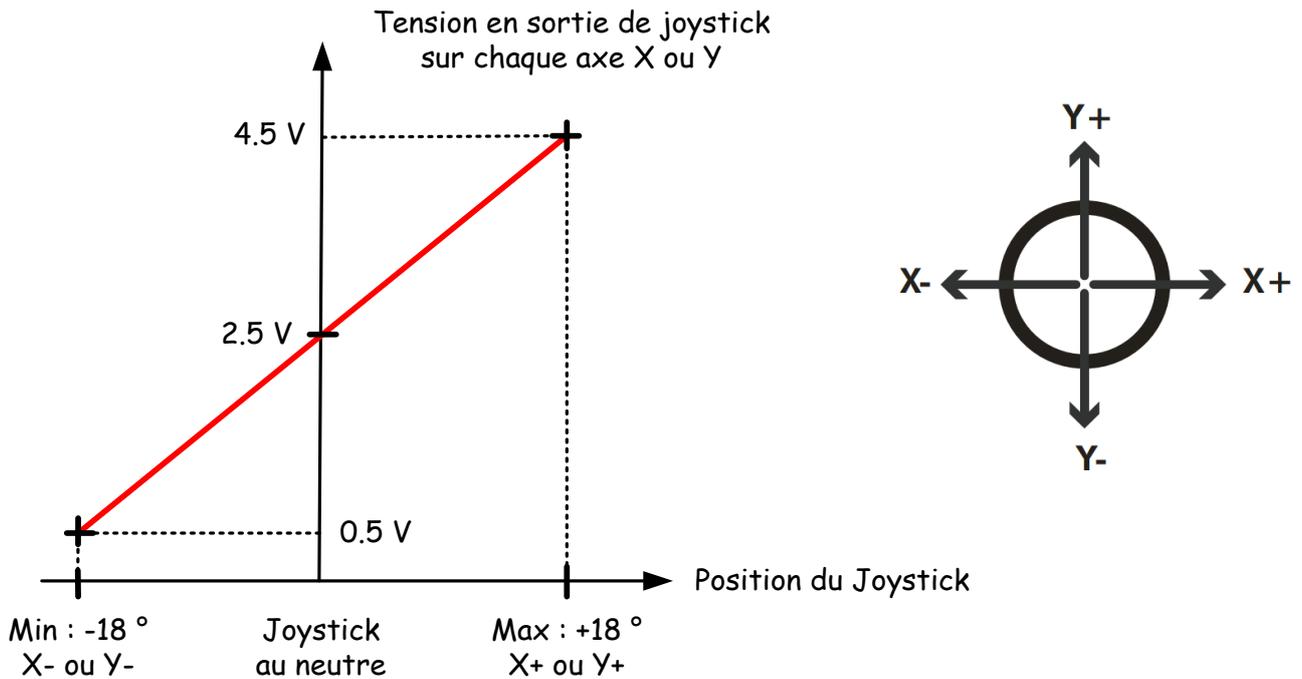
Le signal de référence permettant le réglage du gain de mesure de la tension moyenne est donc la tension $\varepsilon_3(t)$

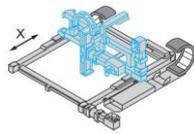
Le variateur de vitesse permet aussi de mesurer le courant moteur. Ce dernier fournit une tension proportionnelle à l'intensité moteur. Le réglage (numérique) effectué est de 4 V pour 9 A soit un gain de 2.25 V / A. Cette valeur est a priori indé réglable.



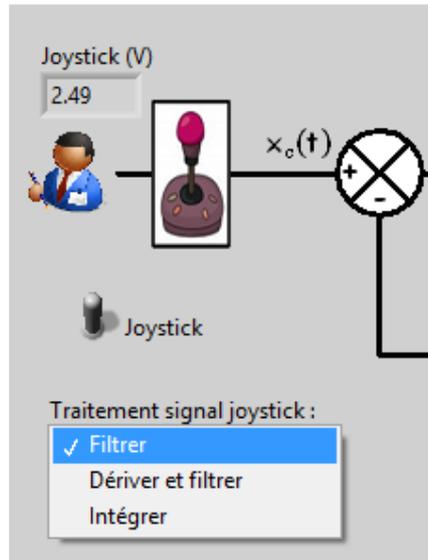
Onglet "Joystick"

Le joystick utilisé est un joystick 2 axes sans contact à technologie à effet Hall. Son comportement se rapproche toutefois d'un simple joystick à potentiomètre alimenté en 0, +5V.

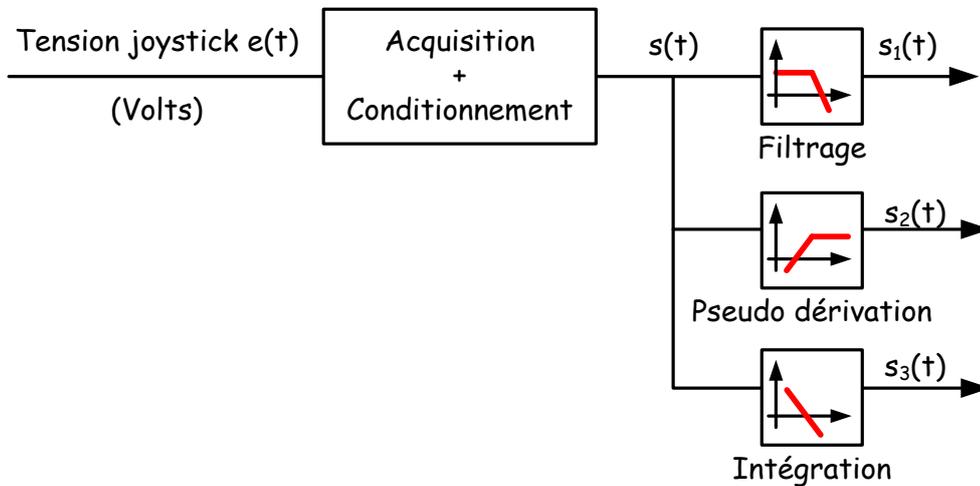




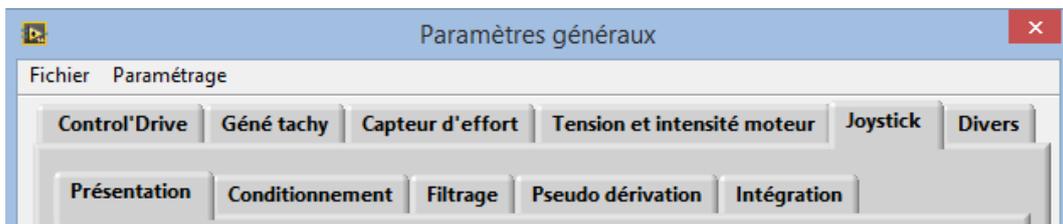
Le joystick est utilisé dans le menu "Schéma bloc" de Control'Drive :

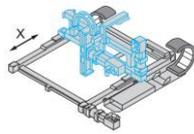


Le signal $e(t)$ issu du joystick subit un conditionnement puis un post-traitement à choisir parmi : filtrage, pseudo dérivation ou intégration.



Les sous onglets de l'onglet "joystick" permettent de définir les différents paramètres associés au conditionnement et aux post-traitements :





Onglet "Divers"

Mot de passe professeur :

Ce champ est accessible seulement en mode "professeur". Par défaut, il n'y a pas de mot de passe. Si le mot de passe venait à être perdu, il peut être retrouvé en ouvrant le fichier texte "config.txt" qui se trouve dans le répertoire contenant l'application Control'Drive, sous répertoire "data".

Choix signal optionnel :

Permet d'affecter l'un des trois signaux suivants au signal nommé "signal optionnel" dans l'onglet "Analyse temporelle" de Control'Drive.

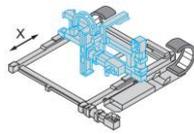
| | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | c : consigne (mm ou V) | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | x : position (mm) | |
| <input type="checkbox"/> | e1 : écart 1 (mm ou V) | |
| <input type="checkbox"/> | e2 : écart corrigé (mm ou V) | |
| <input type="checkbox"/> | e3 : écart corrigé (V) | |
| <input type="checkbox"/> | u : tension moteur moyenne(V) | |
| <input type="checkbox"/> | i : intensité (A) | |
| <input type="checkbox"/> | v : vitesse axe (mm/s) | |
| <input type="checkbox"/> | w : vitesse moteur (tr/min) | |
| <input type="checkbox"/> | q : position moteur (°) | |
| <input type="checkbox"/> | f : effort extérieur (N) | |
| <input type="checkbox"/> | x2 : x règle magnétique (mm) | |
| <input type="checkbox"/> | s : signal optionnel | |
| <input type="checkbox"/> | formule 1 | |
| <input type="checkbox"/> | formule 2 | |

- Codeur incrémental supplémentaire

| Voie | N° de PIN carte NI | Voie NI | Fonction alternative NI | Indice Matlab- Simulink | Attribution | Observations |
|------|-----------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------|
| P1.5 | 6 | 5 | CTR3-A | 14 | Canal A codeur supp. | Option |
| P1.6 | 5 | 6 | CTR3-Z | 15 | Canal Z codeur supp. | Option |

L'information est renvoyée en degrés.

Nota : Le croisement des n° de PIN 5 et 6 et des voies NI 6 et 5 n'est pas une erreur !



- Accéléromètre x

| Voie | N° de PIN carte NI | Voie NI | Indice Matlab- Simulink | Attribution | Observations |
|-------------|-----------------------|------------|-------------------------------|-----------------|--------------|
| AI14 | 58 | 14 | 15 | Accéléromètre X | Option |

L'information est renvoyée en volts.

- Capteur Sharp

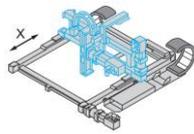
| Voie | N° de PIN carte NI | Voie NI | Indice Matlab- Simulink | Attribution | Observations |
|------------|-----------------------|------------|-------------------------------|-------------------|--------------|
| AI6 | 25 | 6 | 7 | Capteur IR Scharp | Option |

L'information est renvoyée en volts.

Les trois signaux sont enregistrés comme tous les autres lors d'un essai temporel en boucle ouverte ou fermée mais seul l'un des trois est observable sous Control'Drive à un instant donné.

Le choix du signal optionnel dans la fenêtre de paramétrage est pris en compte immédiatement.

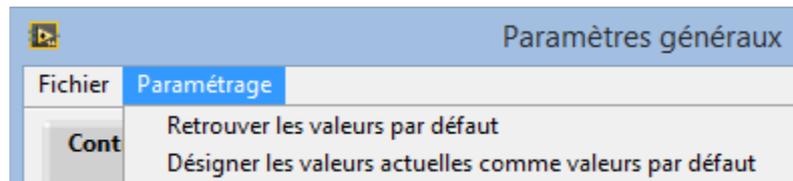
Après un essai temporel, la modification du champ "Choix signal optionnel" permet éventuellement d'observer tour à tour les trois signaux optionnels.



Menu "Fichier"

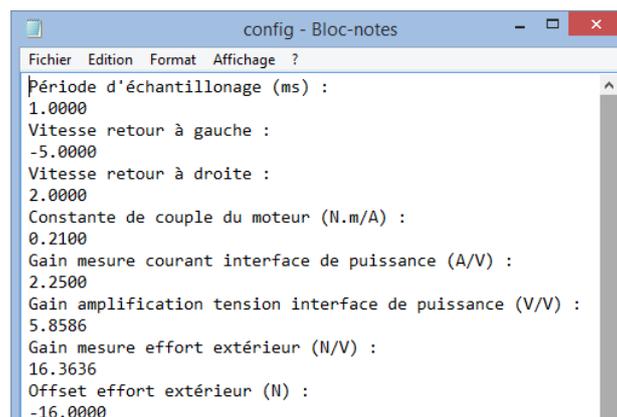
Quitter : Permet de quitter la fenêtre de paramétrage sans rien sauver

Menu "Paramétrage"



Tous les paramètres sont sauves dans un fichier nommé "config.txt" situé dans le répertoire d'installation de Control'Drive, sous répertoire "data".

Ce fichier est un fichier texte. Il peut être ouvert dans le bloc-notes Windows par exemple pour observer les différents paramètres mais il est plus ergonomique (et surtout moins risqué) d'utiliser les fonctions de paramétrage intégrées de Control'Drive pour le modifier.



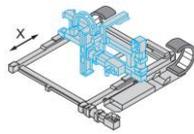
- En mode "élève", le fichier "config.txt" est en lecture seule. Tous les paramètres non-critiques peuvent être modifiés.
- En mode "professeur", le fichier "config.txt" est cette fois ouvert en lecture/écriture. Tous les paramètres sont modifiables et peuvent être aussi sauvegardés.

Retrouver les valeurs par défaut :

Récupère les valeurs par défaut par lecture du fichier "config.txt".

Désigner les valeurs actuelles comme valeurs par défaut :

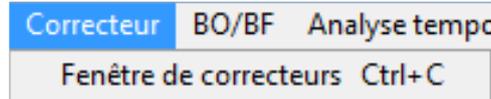
Enregistre tous les paramètres par écriture dans le fichier "config.txt". Les anciennes valeurs sont écrasées. Ce menu n'est accessible qu'en mode "professeur".



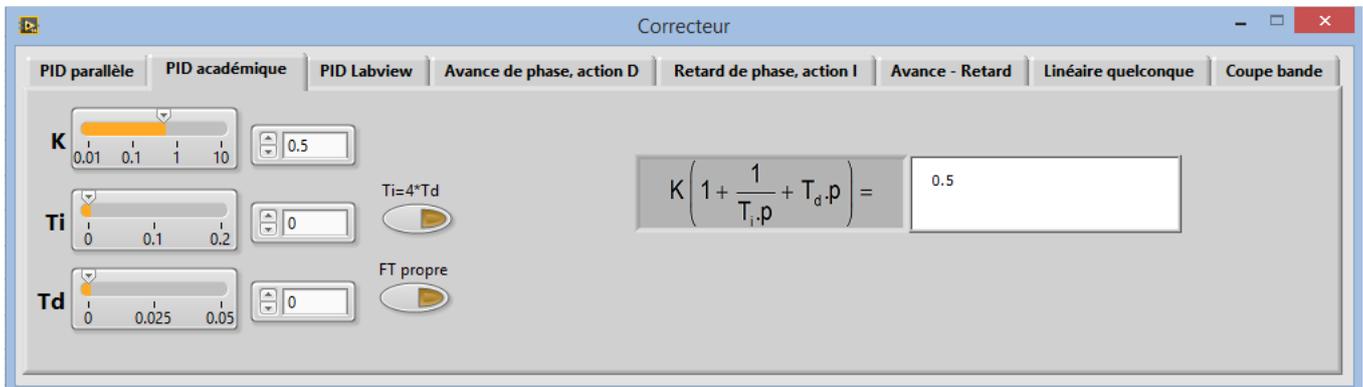
Menu "Correcteur"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

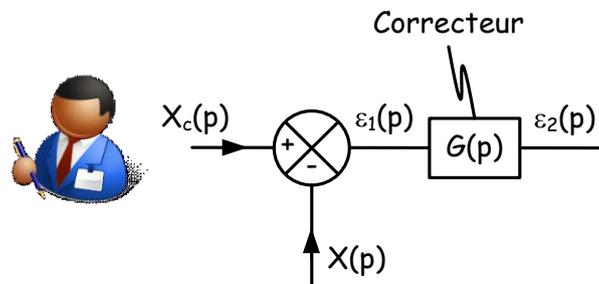
[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)



Ce menu permet d'ouvrir la fenêtre de correcteurs :



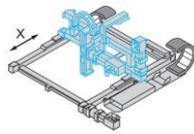
Le correcteur élabore le signal $\varepsilon_2(t)$ à partir du signal $\varepsilon_1(t)$:



Les signaux sont codés en virgule flottante sur 8 octets (IEEE 64 bits).

Les correcteurs se classent en deux catégories :

- Tous les correcteurs autres que le PID LabVIEW
- Le PID LabVIEW

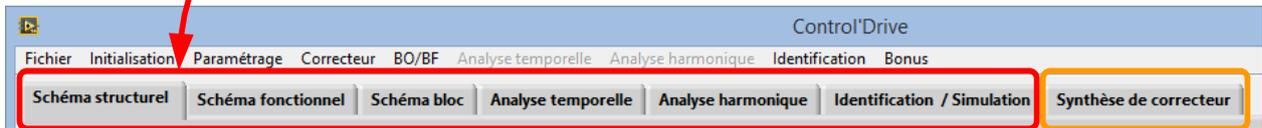


Correcteurs autres que le PID LabVIEW

Dans tous les onglets dans lesquels Control'X est asservi, la fonction de transfert du correcteur choisi doit être causale : (degré du numérateur ≤ degré du dénominateur). Il s'agit des onglets autres que "Synthèse correcteur". Lorsque le pilotage s'effectue en boucle ouverte, ce n'est toutefois pas nécessaire.

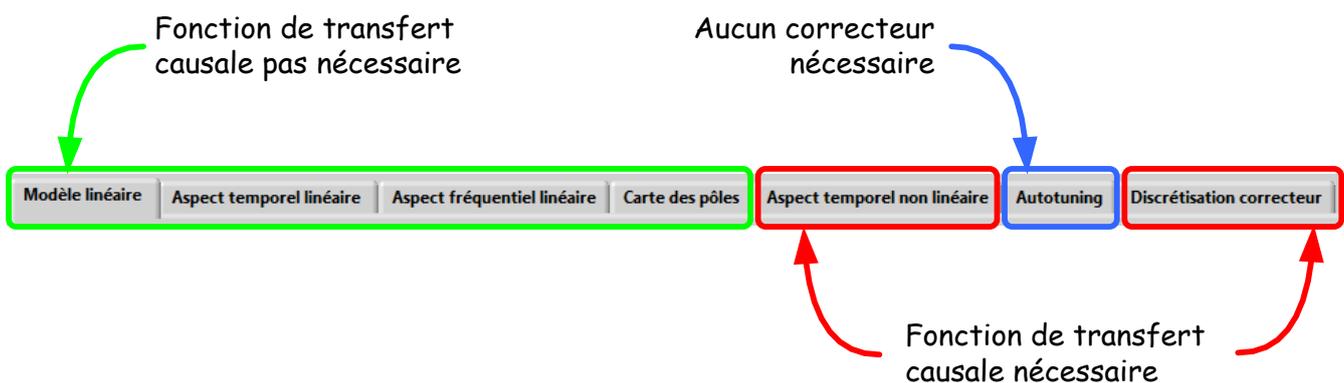
Dans un certain nombre de sous onglets de "Synthèse correcteur", ce n'est pas forcément nécessaire non plus parce que les opérations effectuées ne nécessitent pas de calcul de transformée en z.

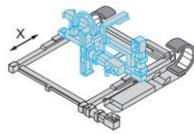
Onglets dans lesquels Control'X est asservi :
Choisir une fonction de transfert du correcteur causale



Onglets dans lesquels Control'X n'est pas asservi :
Fonction de transfert causale du correcteur pas nécessaire dans tous les sous onglets

Cas des sous onglets de "Synthèse correcteur" :



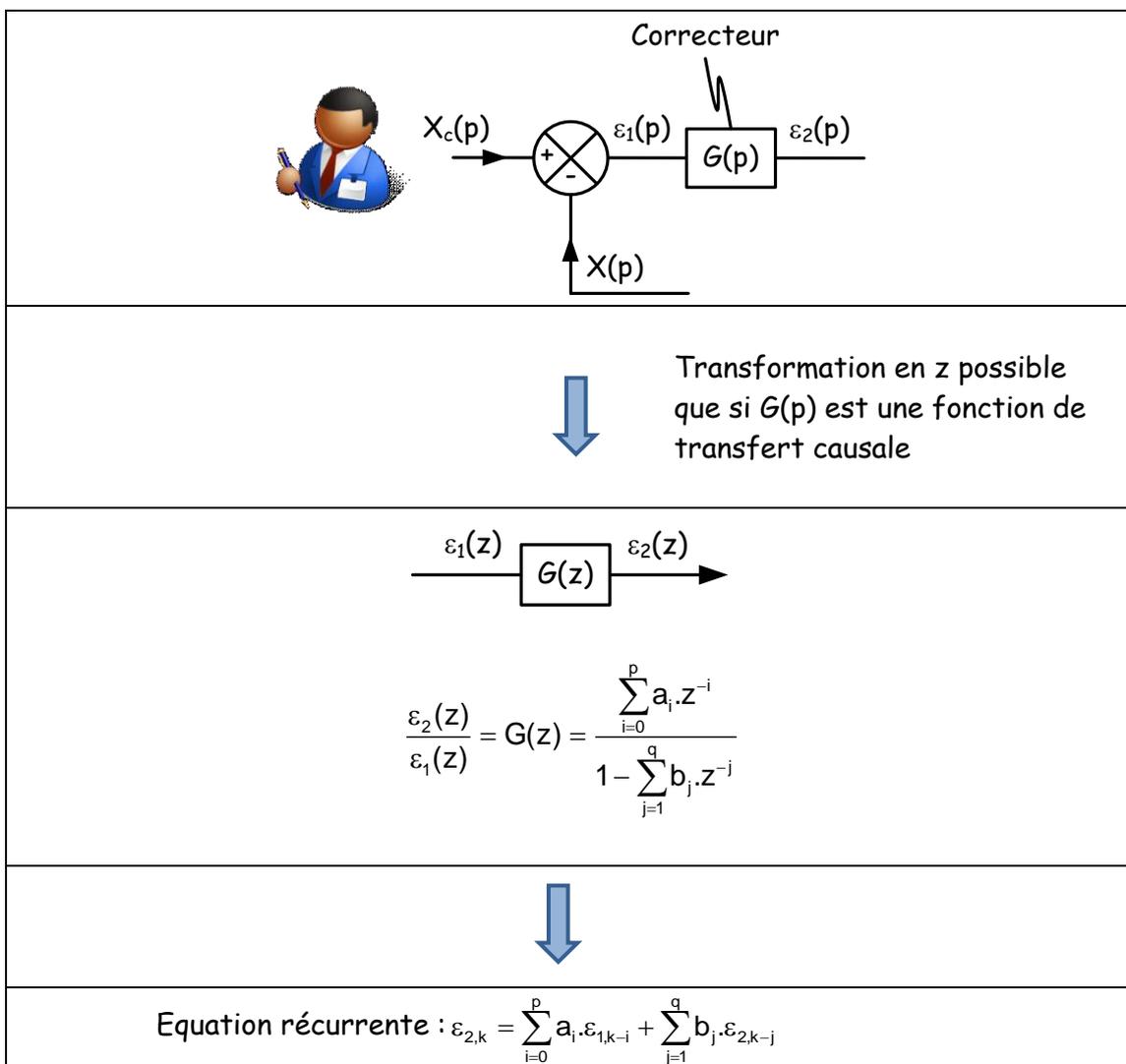


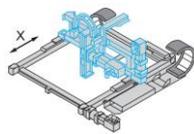
Asservissement de Control'X :

Si la fonction de transfert du correcteur est causale, la fonction de transfert en z est calculée à partir de sa fonction de transfert en p.

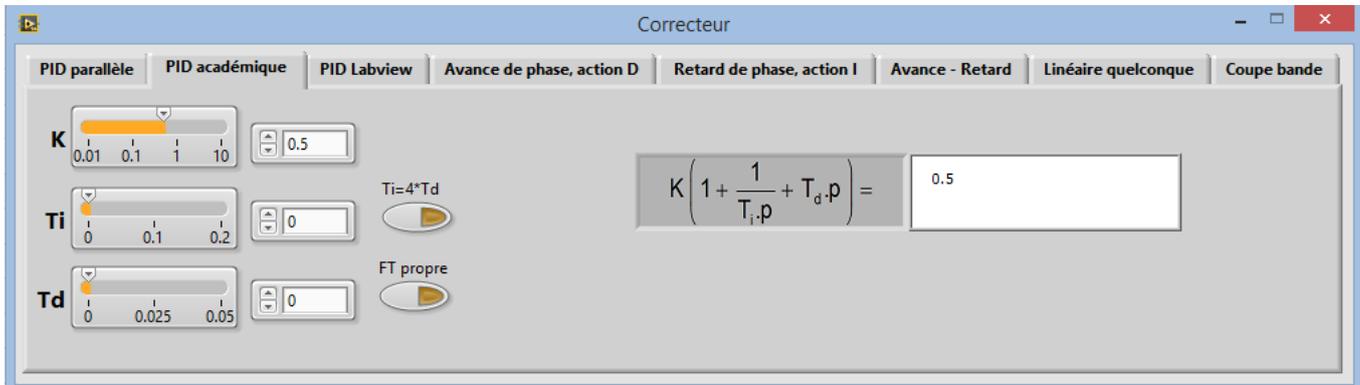
L'équation récurrente est ensuite obtenue à partir de cette fonction de transfert en z. C'est cette équation récurrente qui est utilisée pour calculer l'écart corrigé $\varepsilon_2(t)$ à partir de l'écart $\varepsilon_1(t)$. Control'X peut alors être asservi.

Si la fonction de transfert n'est pas causale, un message d'erreur s'affiche. En attendant que l'utilisateur choisisse une fonction de transfert causale, c'est la dernière fonction de transfert causale qui est utilisée pour asservir.



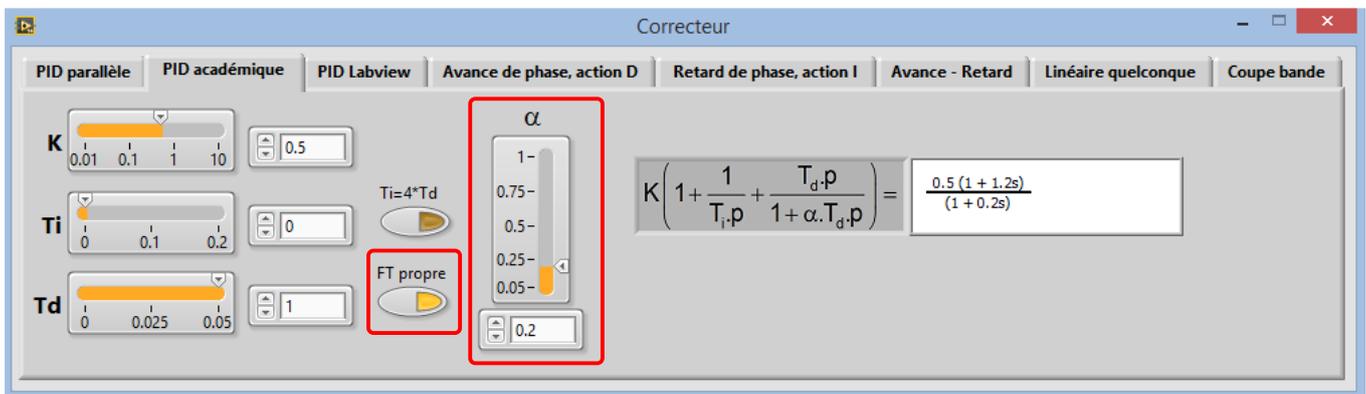


Quelques précisions sur les correcteurs : Exemple sur le PID académique

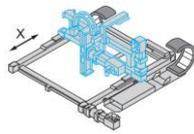


Remarque : Une valeur de T_i nulle correspond en fait à l'absence de terme intégrateur : $T_i = \infty$

- Dans les onglets dans lesquels une fonction de transfert causale est nécessaire, lorsqu'un terme dérivateur est utilisé il faut cocher l'option "FT propre". Cela permet de transformer le terme dérivateur en pseudo dérivateur et ainsi d'obtenir une fonction de transfert causale. Il faut ensuite ajuster la valeur de α . La valeur de α doit être choisi de façon à ce que la cassure pour la pulsation $\frac{1}{\alpha \cdot T_d}$ soit suffisamment importante pour ne pas dégrader les performances du correcteur choisi.



Lorsque la fonction de transfert du correcteur n'a pas besoin d'être causale (certains onglets de "Synthèse correcteur"), on peut quand même cocher l'option "FT propre" pour transformer le terme dérivateur en pseudo-dérivateur et observer les conséquences sur la dynamique de positionnement.



- Option $T_i = 4.T_d$

Cocher l'option $T_i = 4.T_d$ permet de passer d'un PID à trois degrés de liberté à un PID à deux degrés de liberté en plaçant un zéro double plutôt que deux zéros distincts.

En effet, soit le correcteur $K(1 + \frac{1}{T_i.p} + T_d.p) = \frac{K}{T_i.p}(1 + T_i.p + T_d.T_i.p^2)$

Ce correcteur est un correcteur à 3 degrés de liberté : le triplet (K, T_i, T_d) .

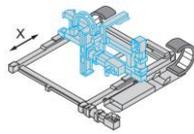
Le calage de ce correcteur n'est pas évident, ni dans le domaine fréquentiel, ni dans le lieu des pôles.

En raisonnant en termes de placement de pôles, c'est un correcteur qui permet de placer un pôle nul (augmentation de la classe) et deux zéros.

Il n'y a pas de raison apparente de vouloir placer deux zéros distincts. Lorsque $T_i = 4.T_d$, les deux zéros deviennent un zéro double. Le correcteur est alors un correcteur à 2 degrés de liberté qui est bien plus facile à caler. Ses bénéfices n'en sont pas moins intéressants.

Si $T_i = 4.T_d$, on a $\frac{K}{T_i.p}(1 + T_i.p + T_d.T_i.p^2) = \frac{K}{T_i.p}(1 + 4.T_d.p + 4.T_d^2.p^2) = \frac{K}{T_i.p}(1 + 2.T_d.p)$

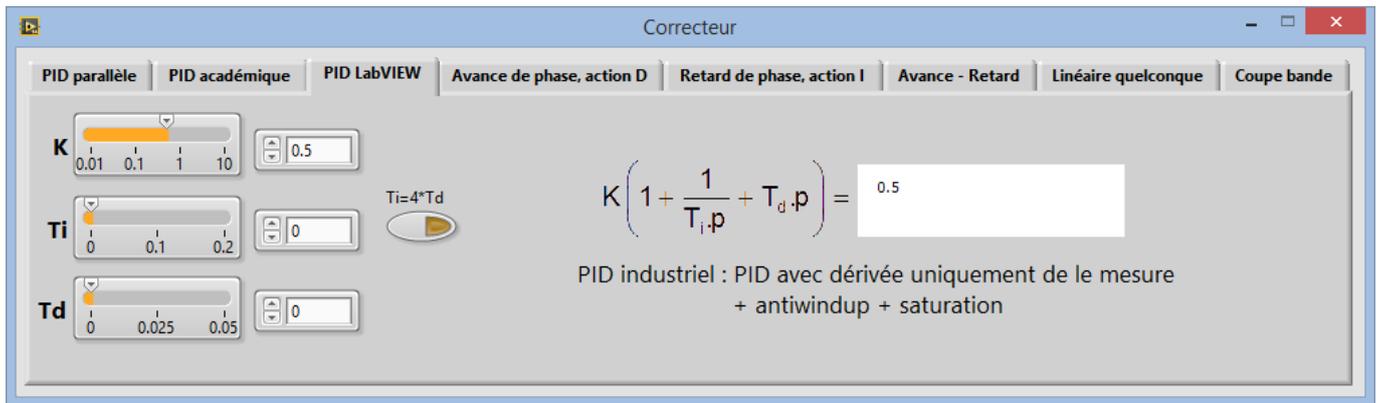
Ce correcteur permet donc bien de placer un pôle nul et un zéro double de valeur $\frac{-1}{2.T_d}$



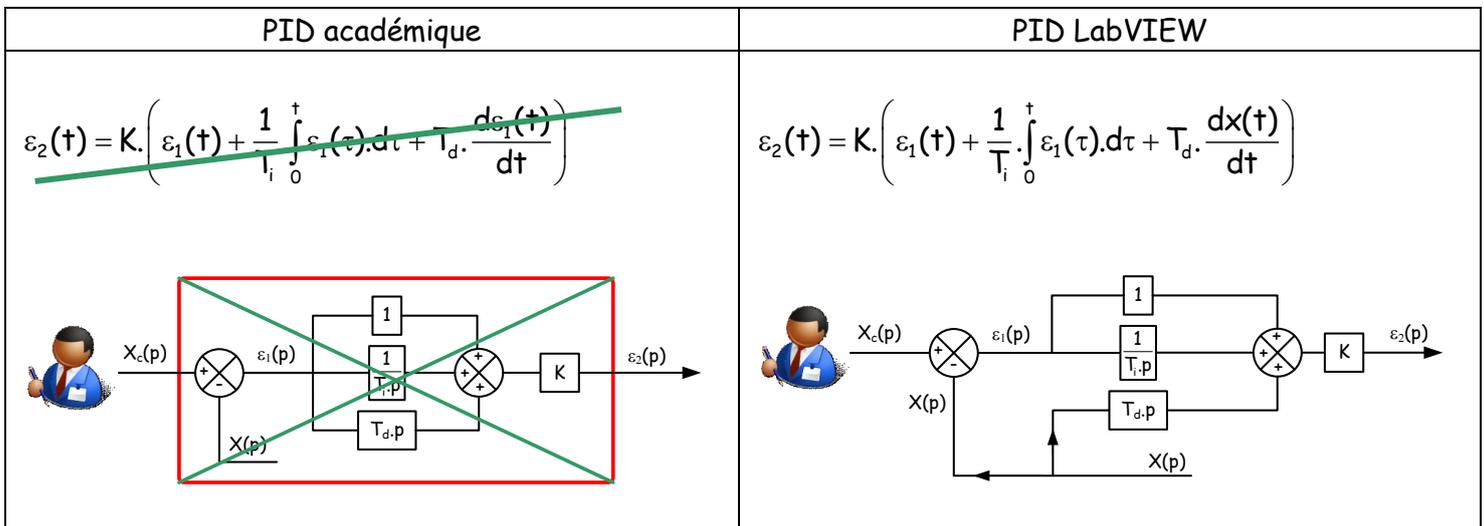
Correcteur PID LabVIEW

Le correcteur PID LabVIEW est un correcteur industriel dont le cœur est un PID académique classique (linéaire) mais qui embarque un certain nombre de variantes ou de non linéarités pour améliorer les performances de l'asservissement :

- Terme dérivateur uniquement sur la mesure et non pas sur l'écart
- Effet antiwindup
- Saturation

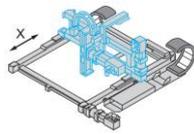


La dérivée ne concerne pas l'écart $\varepsilon_1(t)$ mais la mesure $x(t)$:



La correction n'est donc pas exactement celle dictée par la fonction de transfert affichée car précisément, il n'y a pas de fonction de transfert qui lie $\varepsilon_1(p)$ et $\varepsilon_2(p)$.

Nota : pour des entrées constantes, cette stratégie de dérivation ne change rien.



Sur la base de l'équation continue $\varepsilon_2(t) = K \cdot \left(\varepsilon_1(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon_1(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{dx(t)}{dt} \right)$, une étape de discrétisation est mise en œuvre :

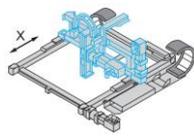
| | Equation continue | Equation discrétisée |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Terme proportionnel | $\varepsilon_2(t) = K \cdot \varepsilon_1(t)$ | $\varepsilon_{2,k} = K \cdot \varepsilon_{1,k}$ |
| Terme intégral | $\varepsilon_2(t) = \frac{K}{T_i} \cdot \int_0^t \varepsilon_1(\tau) \cdot d\tau$ | $\varepsilon_{2,k} = \frac{K}{T_i} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{\varepsilon_{1,k} + \varepsilon_{1,k-1}}{2} \cdot T_{éch}$: Méthode des trapèzes |
| Terme dérivé | $\varepsilon_2(t) = K \cdot T_d \cdot \frac{dx(t)}{dt}$ | $\varepsilon_{2,k} = -K \cdot T_d \cdot \frac{x_k - x_{k-1}}{T_{éch}}$: Méthode des rectangles (Euler explicite) : réalisation causale. |

Compte tenu du schéma de calcul utilisé, l'asservissement peut très bien être effectué avec une forme non causale du terme dérivateur.

De plus, le PID LabVIEW entre dans le cadre d'un algorithme de correction plus complexe qui casse la linéarité :

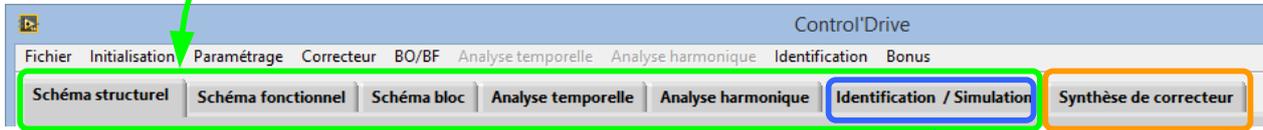
- Implémentation d'un anti-windup associé au terme intégral
- Implémentation d'une saturation à $\pm 10V$

Pour de plus amples détails sur le PID LabVIEW, voir la documentation LabVIEW "PID toolkit User Manual.pdf" dans "...\Control'X\Dossier ressources\Doc Labview"



Onglets généraux :

Onglets dans lesquels Control'X est asservi :
Fonction de transfert causale du correcteur non nécessaire
Le comportement exact du PID LabVIEW est pris en compte

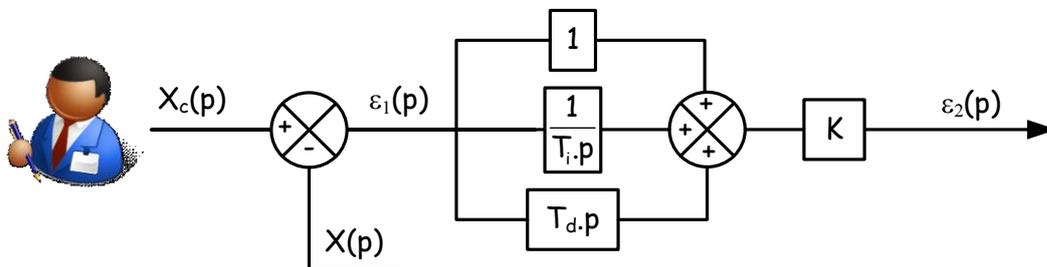


PID LabVIEW non supporté dans la simulation non linéaire

Onglets dans lesquels Control'X n'est pas asservi :
Le PID LabVIEW est remplacé par le PID académique
Fonction de transfert causale du correcteur nécessaire dans deux sous onglets

Sous onglets de "Synthèse correcteur" :

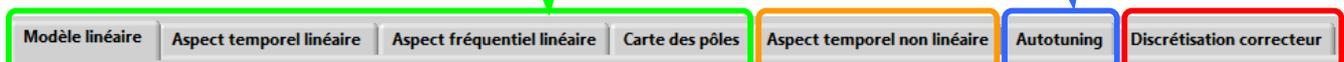
Dans "Synthèse correcteur", une fonction de transfert reliant $\varepsilon_1(p)$ et $\varepsilon_2(p)$ est nécessaire. Le PID LabVIEW est remplacé par le PID académique : Seule la partie linéaire du PID LabVIEW est considérée et le terme dérivé concerne bien l'écart et non pas la mesure.



$$\varepsilon_2(t) = K \cdot \left(\varepsilon_1(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t \varepsilon_1(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{d\varepsilon_1(t)}{dt} \right)$$

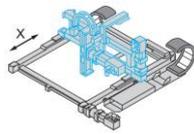
Fonction de transfert causale non nécessaire

Aucun correcteur nécessaire



PID LabVIEW non supporté

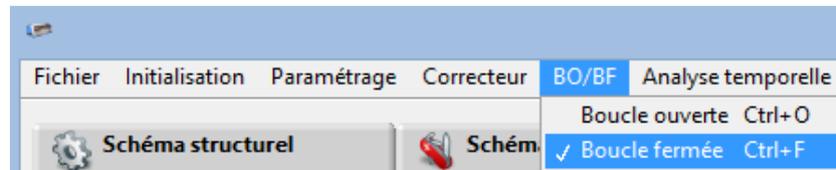
Fonction de transfert causale nécessaire



Menu "BO / BF"

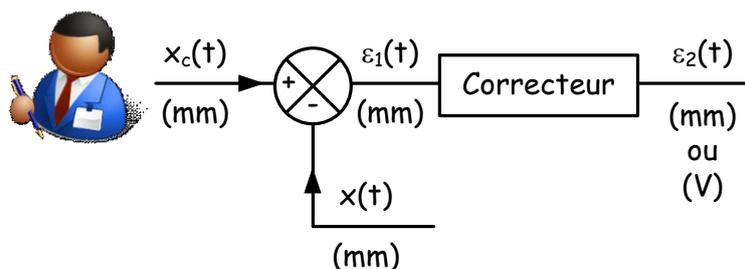
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)



Ce menu permet de choisir le mode de pilotage : boucle fermée ou boucle ouverte.

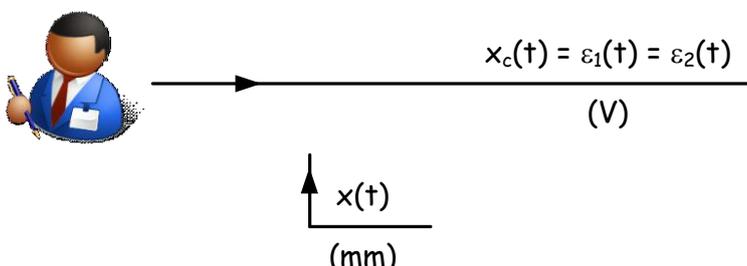
Menu "Boucle fermée"



Tous ces signaux sont des signaux numériques et se trouvent dans la mémoire de l'ordinateur, ils sont codés en virgule flottante. Il n'y a pas d'unités ... sauf celles que l'on veut bien imaginer.

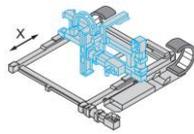
Le signal $\varepsilon_2(t)$ est indiqué en mm ou V : c'est à l'appréciation de chacun...

Menu "Boucle ouverte"



Il n'y a plus ni soustraction ni correction mais les signaux existent toujours au niveau du cœur de l'asservissement dans la mémoire de l'ordinateur.

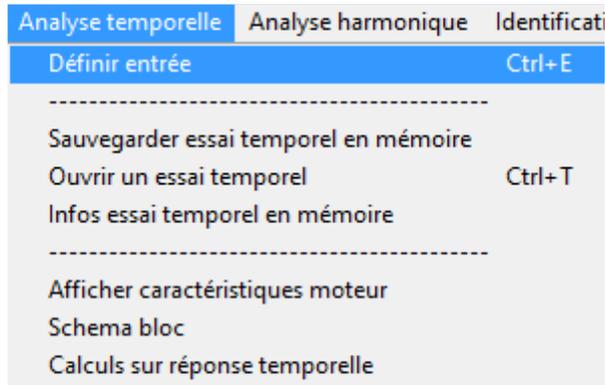
L'unité est plutôt le volt pour $x_c(t)$, $\varepsilon_1(t)$ et $\varepsilon_2(t)$.



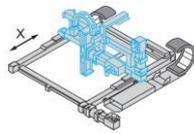
Menu "Analyse temporelle"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)



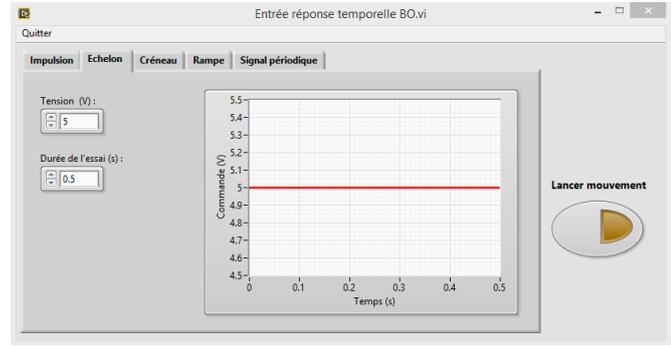
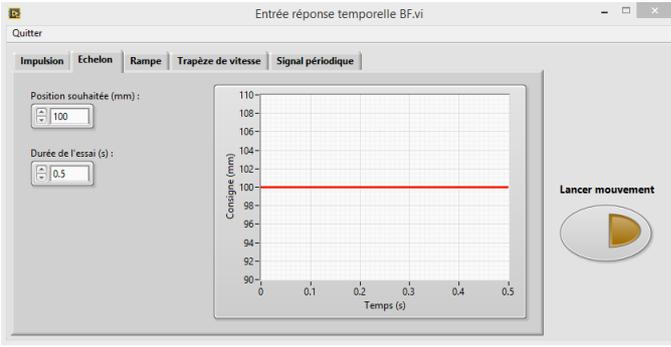
| Menu "Analyse temporelle" | |
|--------------------------------------------------------------|---------|
| <u>Définir entrée</u> | page 77 |
| <u>Sauvegarder essai temporel en mémoire</u> | page 78 |
| <u>Ouvrir un essai temporel</u> | page 82 |
| <u>Infos essai temporel en mémoire</u> | page 82 |
| <u>Afficher caractéristiques moteur</u> | page 83 |
| <u>Schéma bloc</u> | page 84 |
| <u>Calculs sur réponse temporelle</u> | page 85 |



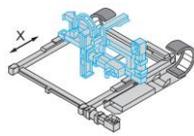
Menu "Définir entrée"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)
[Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse temporelle"](#)

Ce menu permet d'imposer des sollicitations à Control'X selon deux modes : boucle ouverte ou boucle fermée :

| Pilotage en boucle ouverte | Pilotage en boucle fermée |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |

Pour certaines entrées, la durée de l'essai est prolongée de 0.2 s pour qu' un régime permanent ait le temps de s'installer.



Menu "Sauvegarder essai temporel en mémoire"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse temporelle"

Une réponse temporelle peut être sauvegardée dans un fichier texte. Le séparateur est la tabulation et le séparateur décimal le point : **Il peut être utile de configurer Windows pour que le séparateur décimal soit le point et non pas la virgule (options régionales).**

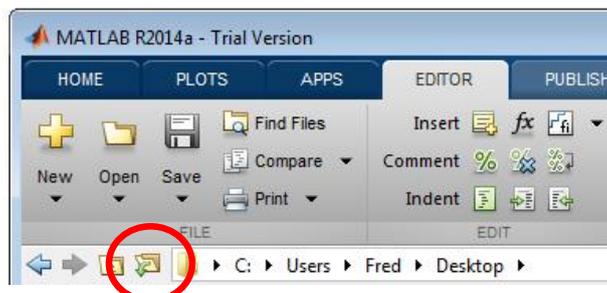
Lors des sauvegardes, il est pratique d'ajouter l'extension ".txt" au nom du fichier. Le bloc-notes Windows pourra alors ouvrir le fichier par double-clic. On pourra par exemple avoir accès aux informations des lignes d'en-tête.

Exemple :

Le format utilisé est le format texte. Il est compatible avec

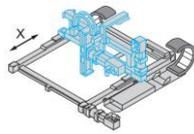
- Excel
- Matlab à condition de supprimer les lignes d'en-tête. (Avec le bloc-notes Windows par exemple ou directement sous Matlab)

Commencer sous Matlab par inclure le chemin du répertoire contenant le fichier à importer dans le "path" de Matlab :



Saisir ensuite la commande "load nom_fichier.txt"

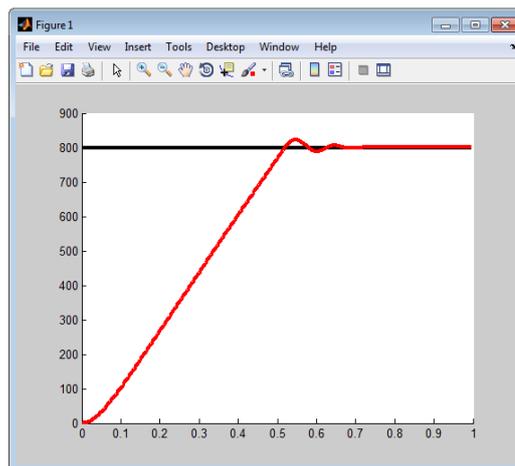
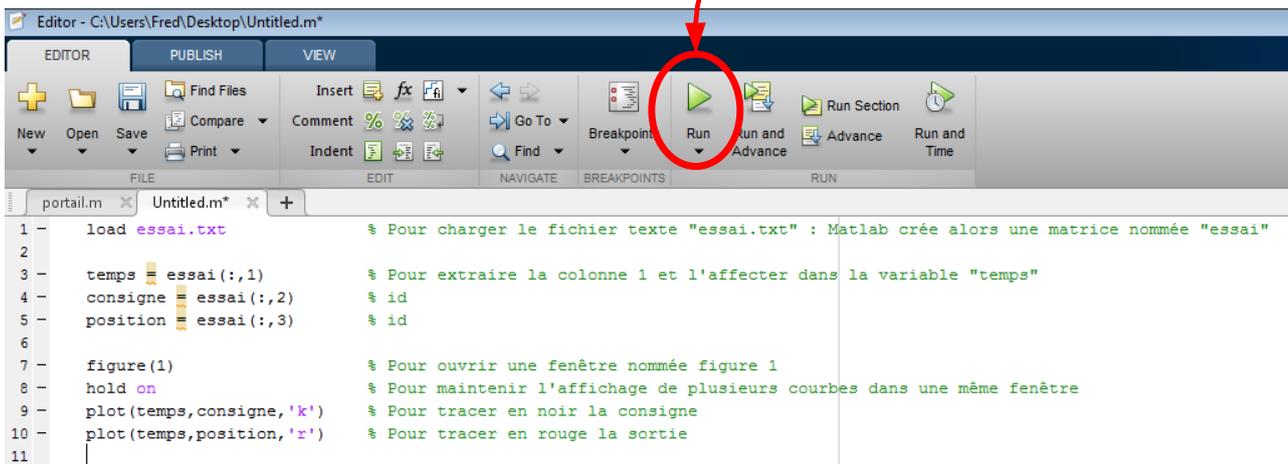
Matlab crée une matrice nom_fichier contenant les données.



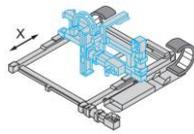
Si le nom de fichier texte contient des blancs, ils sont remplacés par des underscores "_" dans le nom de la matrice Matlab.

Saisir les instructions suivantes pour procéder à un traitement élémentaire : soit une à une sur la ligne de commande ou dans un petit script .m :

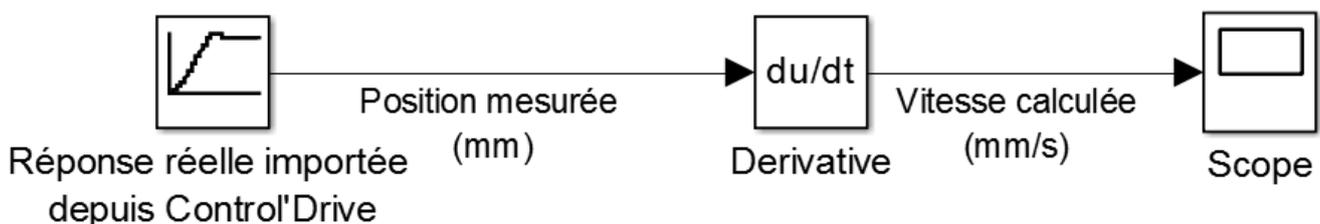
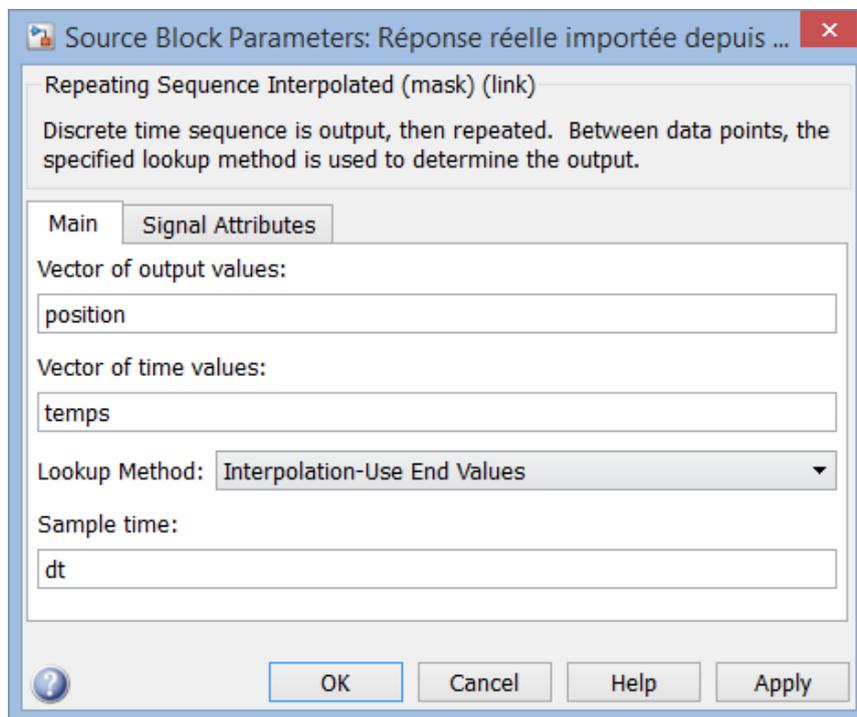
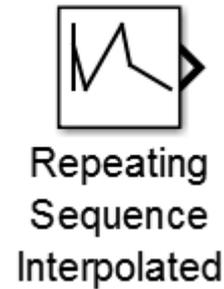
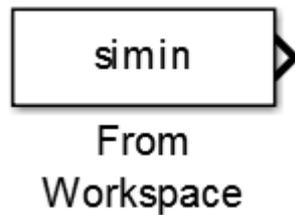
Pour lancer l'exécution du script



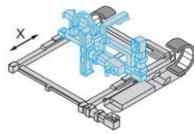
Les résultats, une fois rapatriés sous Matlab, ou sous Simulink peuvent subir un traitement numérique pour mettre en évidence l'intérêt d'un filtre par exemple.



Pour rapatrier une série de valeurs sous Simulink, après avoir réalisé les opérations précédentes, on peut utiliser le bloc "From Workspace" ou "Repeating sequence interpolated" par exemple :



Le calcul d'une vitesse par dérivation bruite énormément le signal, il vaut mieux lui préférer une pseudo dérivation

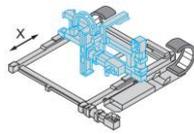


Nota :

Une bibliothèque d'exemple est disponible dans le sous-répertoire "Différents essais" du répertoire dans lequel Control'Drive est installé. Attention les essais sont propres à chaque axe. Des petites différences de comportement existent entre les différents Control'X.

Cette bibliothèque est particulièrement utile pour le travail en îlot, pour les séances de synthèse ou pour éclairer un point du cours lorsqu'on n'a pas Control'X dans sa salle de cours. On peut alors se contenter d'utiliser Control'Drive en mode hors ligne c'est-à-dire non connecté à Control'X et de charger les fichiers qui permettent d'éclairer tel ou tel point du cours.

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------|
|  Harmo BF w=0.1_100 retard K=0.2 t=0.15 b=5 amp... | 12/11/2014 23:15 | Document texte | 4 Ko |
|  Harmo BF w=0.1_200 PI P=0.5 I=2 amp=20.txt | 12/11/2014 23:16 | Document texte | 4 Ko |
|  Harmo BF w=0.05_200 retard K=0.2 t=0.15 b=25 am... | 12/11/2014 23:24 | Document texte | 4 Ko |
|  Harmo BO K=0.5 amp=10.txt | 12/11/2014 23:19 | Document texte | 4 Ko |
|  Harmo par défaut.txt | 11/11/2014 22:41 | Document texte | 4 Ko |
|  Tempo BF 10 mm G=1.txt | 12/11/2014 09:43 | Document texte | 29 Ko |
|  Tempo BF 100 mm G=0.2.txt | 12/11/2014 09:39 | Document texte | 31 Ko |
|  Tempo BF 100 mm G=0.5.txt | 12/11/2014 09:41 | Document texte | 30 Ko |



Menu "Ouvrir un essai temporel"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse temporelle"](#)

Permet de charger un fichier contenant les résultats d'un essai temporel en mémoire.

Il peut être utile de configurer Windows pour que le séparateur décimal soit le point et non pas la virgule (dans les options régionales).

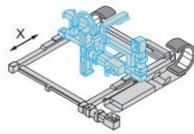
Menu "Infos essai temporel en mémoire "

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse temporelle"](#)

Cet outil permet de se remémorer le type d'essai temporel en mémoire :

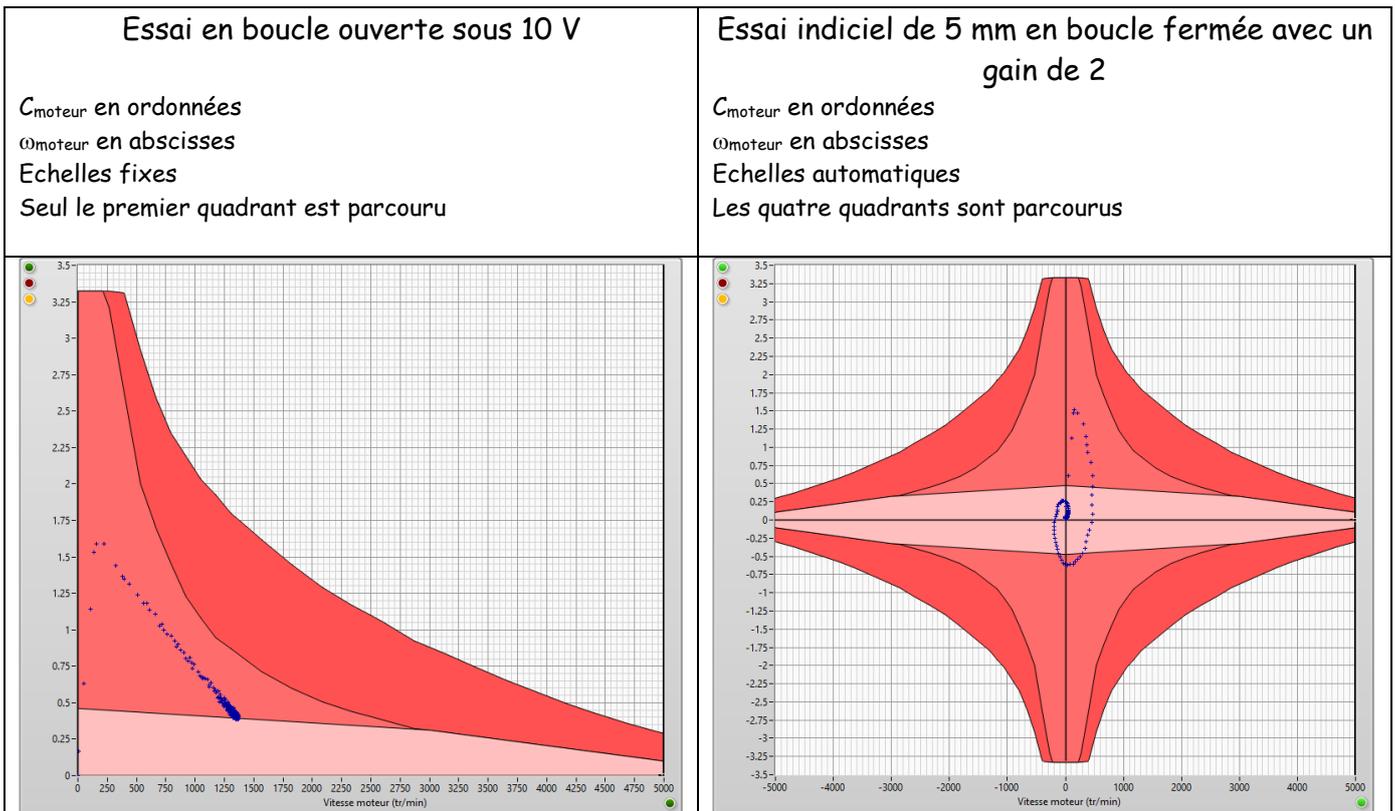


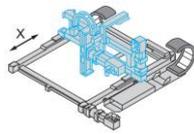


Menu "Afficher caractéristiques moteur"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire
Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse temporelle"

Ce menu permet de tracer les couples de points (C_{moteur} , ω_{moteur}) au cours de l'essai temporel en mémoire. Les échelles sont ajustées automatiquement et les différents domaines de fonctionnement du moteur sont tracés.

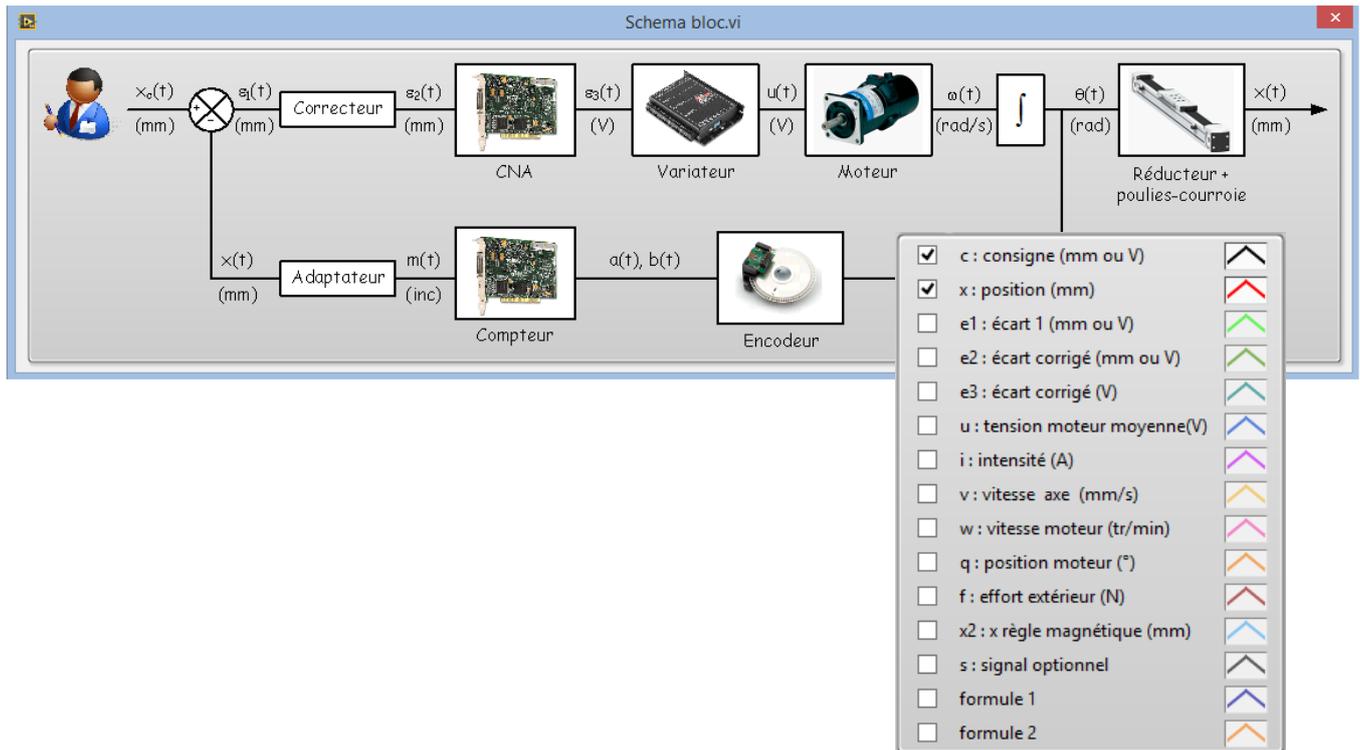


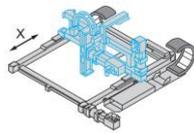


Menu "Schéma bloc"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)
[Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse temporelle"](#)

Cet outil permet de se remémorer la signification des différents signaux du menu "Analyse temporelle".



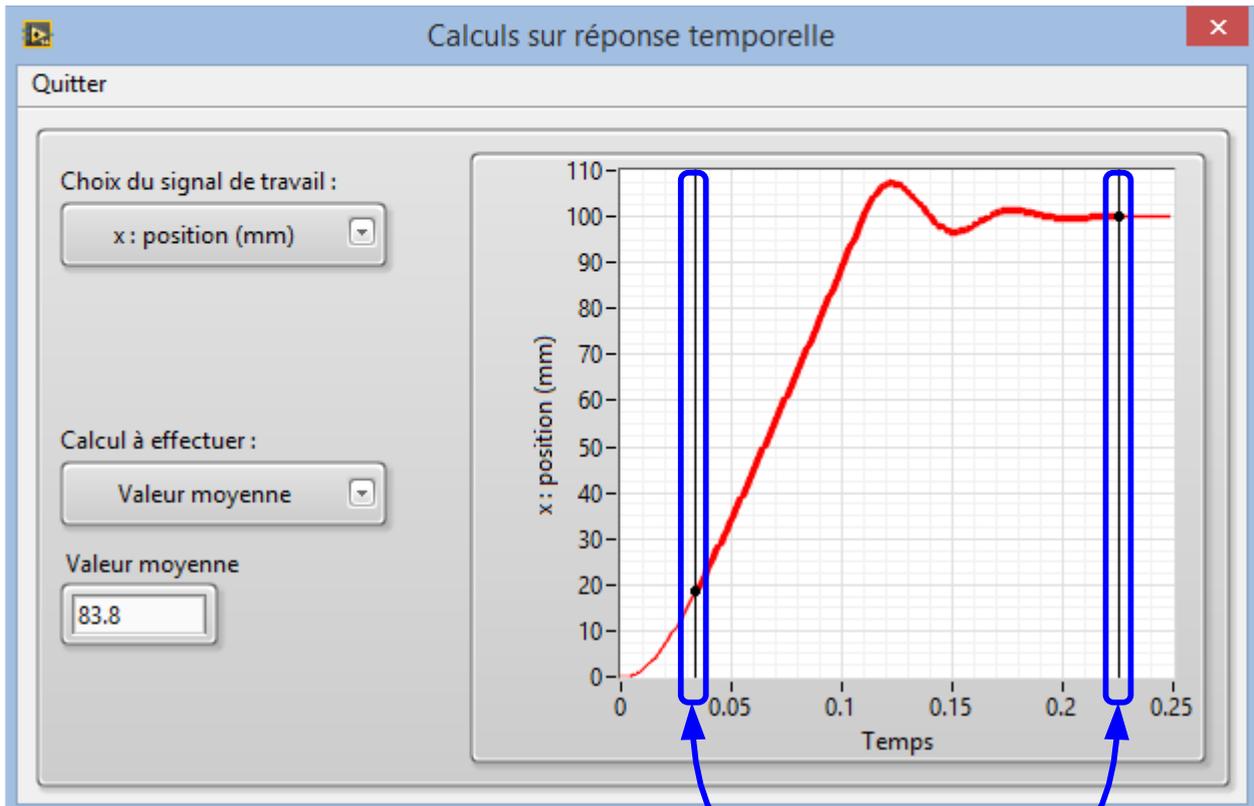


Menu "Calculs sur réponse temporelle"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse temporelle"](#)

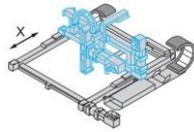
La fenêtre qui s'ouvre permet d'effectuer un certain nombre de calculs sur les signaux de l'essai temporel en cours :



Déplacer les curseurs verticaux pour définir la plage d'étude

Les calculs possibles sont les suivants :

- Valeur moyenne
- Valeur absolue moyenne
- ✓ Valeur quadratique moyenne
- Valeur mini
- Valeur maxi
- Intégrale
- Intégrale de la valeur absolue
- Intégrale quadratique



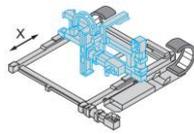
En particulier sur une durée $T_f - T_i$, on peut effectuer les opérations ci-dessous sur le signal $s(t)$:

- L'intégrale : $\int_{t=T_i}^{t=T_f} s(t).dt$
- L'intégrale de la valeur absolue : $\int_{t=T_i}^{t=T_f} |s(t)|.dt$
- L'intégrale de la valeur quadratique : $\int_{t=T_i}^{t=T_f} s^2(t).dt$
- La valeur moyenne : $\frac{1}{T_f - T_i} \cdot \int_{t=T_i}^{t=T_f} s(t).dt$
- La valeur absolue moyenne : $\frac{1}{T_f - T_i} \cdot \int_{t=T_i}^{t=T_f} |s(t)|.dt$
- La valeur quadratique moyenne (ou valeur efficace ou RMS) : $\sqrt{\frac{1}{T_f - T_i} \cdot \int_{t=T_i}^{t=T_f} s^2(t).dt}$

La valeur RMS par exemple peut être très intéressante appliquée à l'intensité pour évaluer l'échauffement du moteur. Cette valeur RMS peut aussi directement être appliquée au couple moteur pour obtenir le couple thermique équivalent.

L'intégrale de la valeur quadratique ou la valeur RMS appliquée au signal $\varepsilon_1(t)$ peut être intéressante pour quantifier l'ensemble des écarts dynamiques. Cela devient un bon critère pour quantifier la précision d'un système asservi. Le méthode de Sartorius par exemple peut être mise

en évidence sur $\int_{t=T_i}^{t=T_f} \varepsilon_1^2(t).dt$.



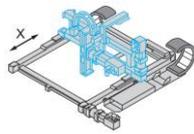
Menu "Analyse harmonique"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)

| | | |
|------------------------------------------|----------------|-------|
| Analyse harmonique | Identification | Bonus |
| Sauvegarder essai fréquentiel en mémoire | | |
| Ouvrir un essai fréquentiel | | |
| Infos essai harmonique en mémoire | | |

| |
|-----------------------------------------------------------------|
| Menu "Analyse harmonique" |
| <u>Sauvegarder essai fréquentiel en mémoire</u> |
| <u>Ouvrir un essai fréquentiel</u> |
| <u>Infos essai harmonique en mémoire</u> |



Menu "Sauvegarder essai fréquentiel en mémoire"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse harmonique"

Une réponse fréquentielle peut être sauvegardée dans un fichier texte. Le séparateur est la tabulation le séparateur décimal le point : **Il peut être utile de configurer Windows pour que le séparateur décimal soit le point et non pas la virgule (options régionales).**

Lors des sauvegardes, il est pratique d'ajouter l'extension ".txt" au nom du fichier. Le bloc-notes Windows pourra alors ouvrir le fichier par double-clic. On pourra par exemple avoir accès aux informations des lignes d'en-tête.

Exemple :

Harmo BF w=0.05_200 retard K=0.2 t=0.15 b=25 amp=20 - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

Essai fréquentiel en BF

Correcteur Retard de phase
Numérateur : 0.200000
Dénominateur : 1.000000

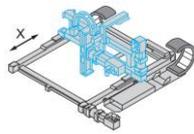
Pulsation mini (rad/s) : 0.0500
Pulsation maxi (rad/s) : 200.0000
Amplitude d'excitation (mm) : 20

Période d'échantillonnage (ms) : 2.0

| Pulsation (rad/s) | Gain BO/BF | Phase BO/BF (°) | Gain BO corrigée | Phase BO corrigée (°) | Gain BO non corrigée | Phase BO non corrigée (°) | Gain correcteur | Phase correcteur (°) |
|-------------------|------------|-----------------|------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|-----------------|----------------------|
| 0.050000 | 0.995931 | -0.988685 | 55.745309 | -79.069044 | 11.345539 | -68.888311 | 4.913412 | -10.180733 |
| 0.066555 | 0.996324 | -1.036116 | 52.997476 | -80.024314 | 10.926176 | -65.679931 | 4.850506 | -14.344383 |
| 0.088591 | 0.997270 | -1.117468 | 50.703579 | -83.270048 | 10.685604 | -65.650986 | 4.745036 | -17.619062 |
| 0.117923 | 0.998695 | -1.183404 | 48.172510 | -87.193267 | 10.534108 | -64.330943 | 4.573003 | -22.862324 |
| 0.156966 | 1.000427 | -1.285017 | 44.460338 | -92.160136 | 10.316518 | -62.991012 | 4.309627 | -29.169125 |
| 0.208937 | 1.003201 | -1.419397 | 39.916942 | -97.982663 | 10.138741 | -61.902824 | 3.937071 | -36.079839 |
| 0.278115 | 1.006886 | -1.635810 | 34.456101 | -104.347818 | 9.950980 | -60.536869 | 3.462584 | -43.810949 |
| 0.370197 | 1.012053 | -1.907803 | 28.476874 | -110.250060 | 9.732703 | -59.256292 | 2.925896 | -50.993768 |
| 0.492767 | 1.018901 | -2.311697 | 22.821544 | -116.183053 | 9.569204 | -58.717351 | 2.384895 | -57.465702 |
| 0.655920 | 1.027704 | -2.862601 | 17.774689 | -119.965975 | 9.399418 | -57.650358 | 1.891041 | -62.315617 |
| 0.873091 | 1.038868 | -3.704373 | 13.700925 | -122.317563 | 9.308402 | -56.708357 | 1.471888 | -65.609206 |
| 1.162167 | 1.052711 | -4.801951 | 10.488027 | -123.767315 | 9.249267 | -56.467018 | 1.133931 | -67.300298 |

Le format utilisé est le format texte. Il est compatible avec

- Excel
- Matlab à condition de supprimer les 14 lignes d'en-tête. (Avec le bloc-notes Windows par exemple ou directement sous Matlab)



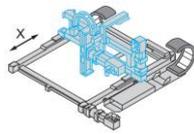
Menu "Ouvrir un essai fréquentiel"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse harmonique"

Permet de charger un fichier contenant les résultats d'un essai fréquentiel en mémoire.

Il peut être utile de configurer Windows pour que le séparateur décimal soit le point et non pas la virgule (dans les options régionales).

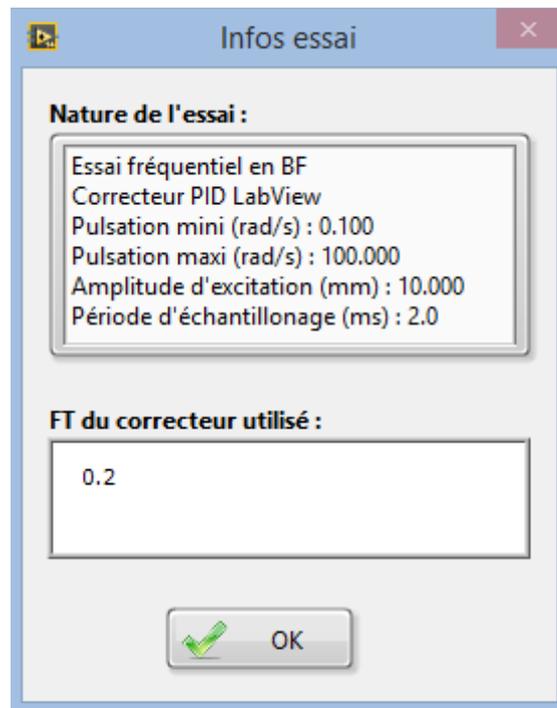


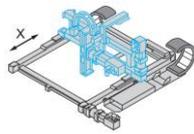
Menu "Infos essai harmonique en mémoire"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir au menu "Analyse harmonique"](#)

Cet outil permet de se remémorer le type d'essai temporel en mémoire :





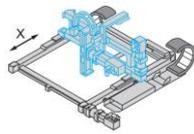
Menu "Identification / Simulation"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)

| | |
|----------------------------------------------|--------------|
| Identification | Bonus |
| Fenêtre d'identification temporelle linéaire | |
| Fenêtre d'identification harmonique | |
| Options identification non linéaire | |

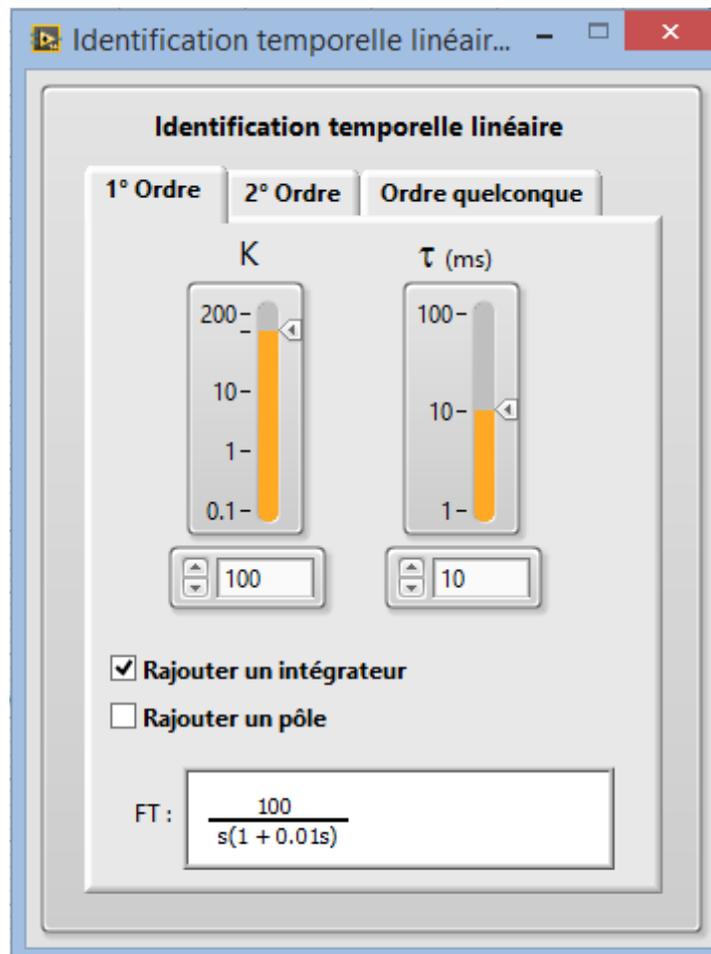
| |
|---------------------------------------------------------------------|
| Menu "Identification" |
| <u>Fenêtre d'identification temporelle linéaire</u> |
| <u>Fenêtre d'identification harmonique</u> |
| <u>Options identification non linéaire</u> |

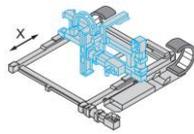


Menu "Fenêtre d'identification temporelle linéaire"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Ctrl + clic pour revenir au menu "Identification/Simulation"

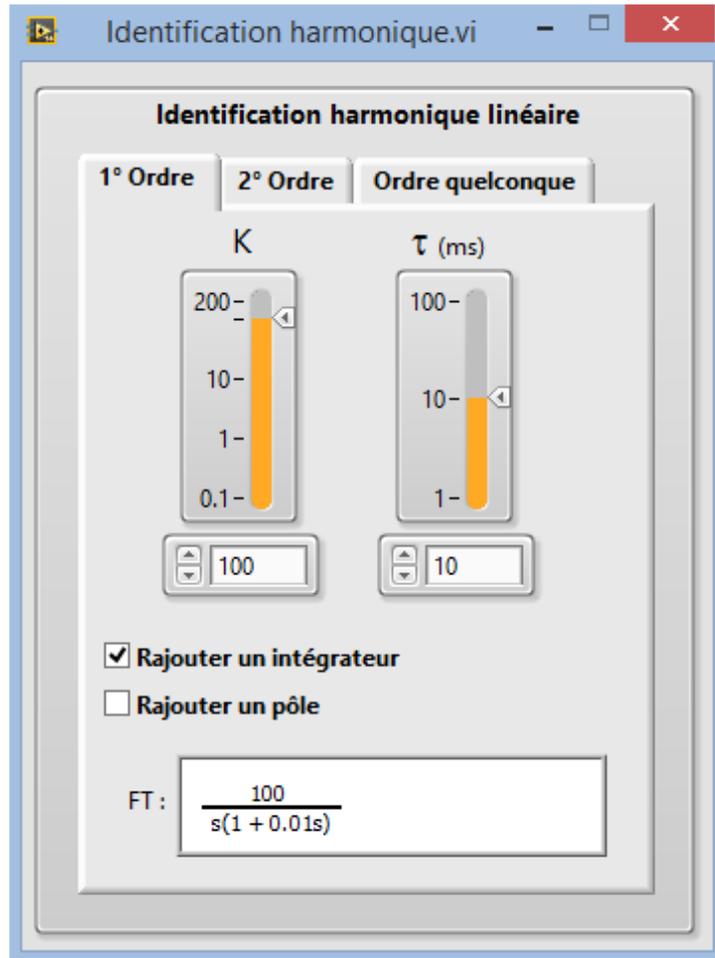


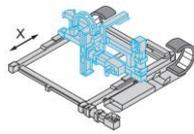


Menu "Fenêtre d'identification temporelle linéaire"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir au menu "Identification/Simulation"](#)



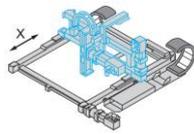


Menu "Option identification non linéaire"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir au menu "Identification/Simulation"](#)

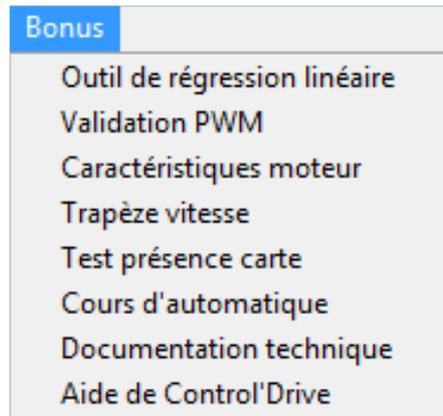
Menu non encore implémenté



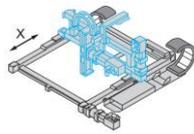
Menu "Bonus"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

[Ctrl + clic pour revenir aux menus](#)



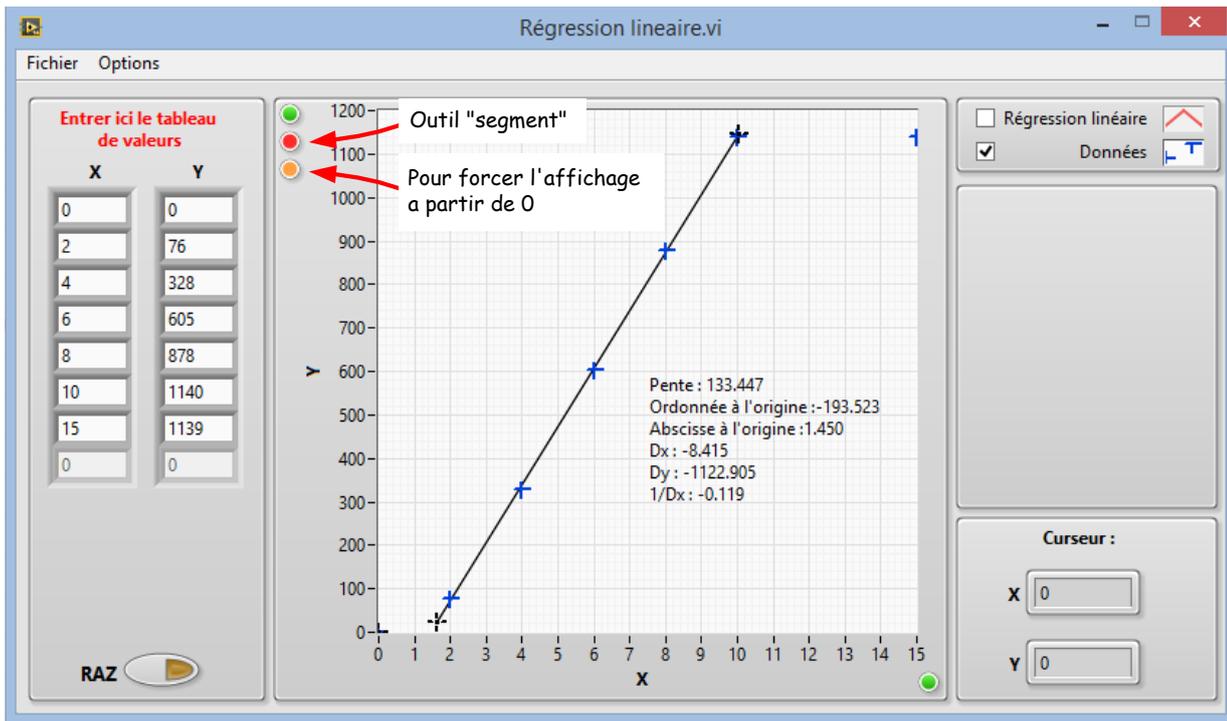
| Menu "Bonus" | |
|-----------------------------------------------------|----------|
| <u>Outil de régression linéaire</u> | page 96 |
| <u>Validation PWM</u> | page 97 |
| <u>Caractéristiques moteur</u> | page 106 |
| <u>Trapèze vitesse</u> | page 110 |
| <u>Test présence carte</u> | page 111 |
| <u>Cours d'automatique</u> | page 112 |
| <u>Documentation technique</u> | page 112 |
| <u>Aide de Control'Drive</u> | page 112 |



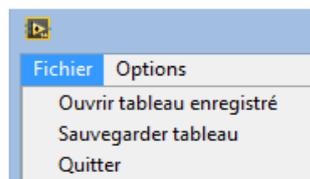
Menu "Outil de régression linéaire"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire
Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"

Ce menu permet de dépouiller des valeurs issues d'une campagne de mesure :

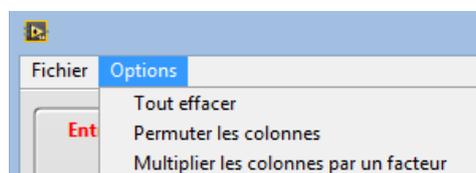


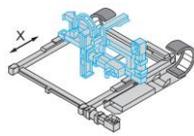
Le menu "Fichier" propose notamment d'ouvrir ou de sauvegarder des données dans un fichier texte.



Le menu "Option" permet d'effacer le tableau de valeurs X et Y, de permuter les colonnes ou de multiplier les colonnes par un facteur.

Cette dernière fonctionnalité peut être utile dans des situations où l'on a besoin par exemple d'afficher une grandeur dans une autre unité ou lorsqu'on veut par exemple convertir une grandeur en une autre : l'intensité moteur en couple moteur par exemple.





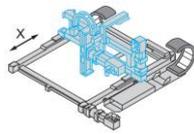
Menu "Validation PWM"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire
Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"

Ce menu permet de comprendre et de justifier le choix d'un signal PWM pour alimenter le moteur. Les deux critères principaux pris en compte sont l'ondulation de vitesse et l'ondulation de courant.

Deux fenêtres s'ouvrent :

- La fenêtre "PWM" permet de découvrir le comportement du moteur alimenté par un signal PWM.
- La fenêtre "Paramètres" permet de renseigner les caractéristiques de la tension d'alimentation (tension PWM) et du moteur (2 modèles). **Tous ces paramètres peuvent être modifiés à tout instant pour visualiser les conséquences sur l'un des graphes de "PWM".**



Fenêtre "Paramètres"

Tension d'alimentation

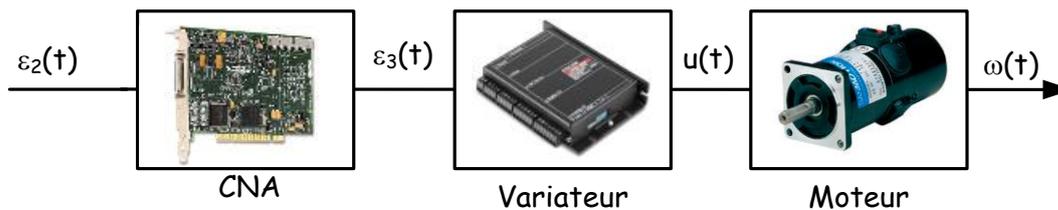
Tension d'alimentation

Amplitude A (V)

Fréquence f (Hz)

Rapport cyclique α (%)

Nota : Le moteur de Control'X est alimenté sous une tension PWM d'amplitude 40 V et de fréquence 53.6 kHz. Le rapport cyclique dépend de la tension moyenne à obtenir.

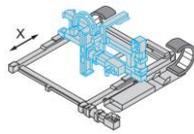


On a la correspondance (linéaire) suivante entre la tension $\varepsilon_2(t)$, le rapport cyclique $\alpha(t)$ et la tension moyenne $u_{moyenne}(t)$:

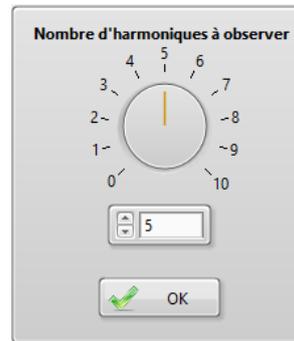
$$\begin{aligned} \varepsilon_2(t) = 0 \text{ V} &\rightarrow \alpha(t) = 0 \text{ et } u_{moyenne}(t) = 0 \text{ V} \\ \varepsilon_2(t) = 10 \text{ V} &\rightarrow \alpha(t) \approx 1 \text{ et } u_{moyenne}(t) = 40 \text{ V} \end{aligned}$$

La tension $u(t)$ est un signal PWM est décomposé en série de Fourier :

$$u(t) = \alpha \cdot A + 2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(i \cdot \alpha \cdot \pi)}{i \cdot \alpha \cdot \pi} \cdot \cos(i \cdot \omega \cdot t)$$



Le nombre i d'harmonique à observer et réglable dans le menu "Nombre d'harmonique à observer"



Modèle de moteur

Deux modèles sont proposés :

Moteur

Modèle 1 **Modèle 2**

Gain statique (SI)

Constante de temps (s)

FT $\Omega(p) / U(p)$:

$$\frac{0.04}{(1 + 0.022s)}$$

Moteur

Modèle 1 **Modèle 2**

Inductance L (H) Négliger L

Résistance r (Ω)

Inertie (SI)

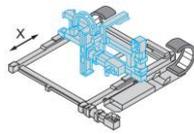
Constante du moteur k (SI)

FT $\Omega(p) / U(p)$:

$$\frac{0.0392}{(1 + 0.000616s)(1 + 0.0225s)}$$

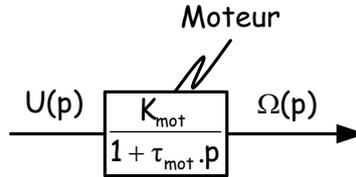
FT $I(p) / U(p)$:

$$\frac{0.00769 \text{ s}}{(1 + 0.000616s)(1 + 0.0225s)}$$



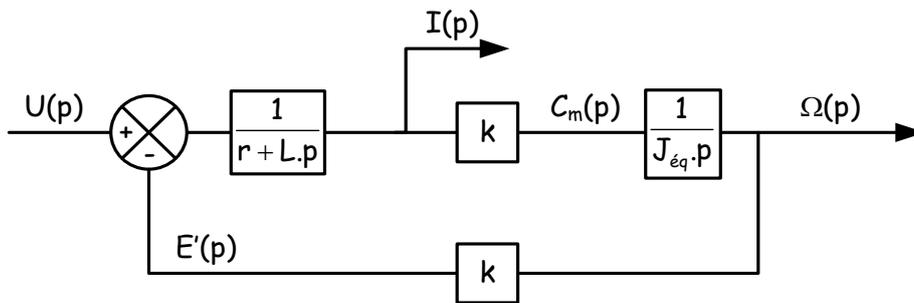
Les modèles sont les suivants :

Modèle 1 : linéaire non perturbé sans prise en compte de l'inductance, sans entrer dans le détail du moteur (la valeur du courant n'est donc pas accessible).



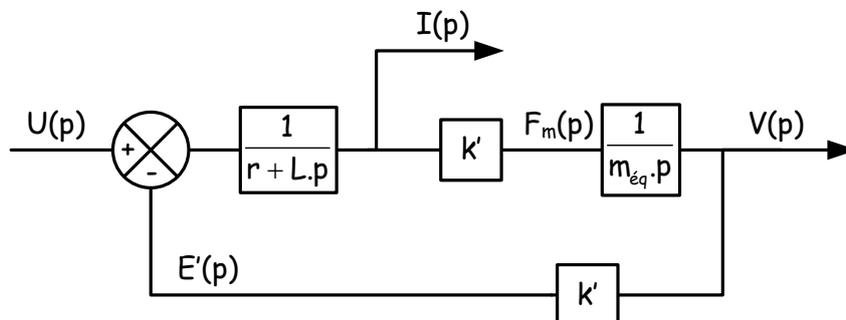
Valeurs numériques de Control'X : $K_{mot} = (16 \text{ rad/s})/V$ et $\tau_{mot} = 22 \text{ ms}$

Modèle 2 : linéaire non perturbé avec prise en compte éventuelle de l'inductance et détail du moteur (la valeur du courant est donc accessible).

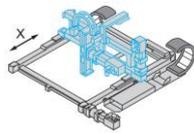


Valeurs numériques de Control'X : $r = 5.1 \Omega$, $L = 0.003 \text{ H}$, $J_{\acute{e}q} = 2.15 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$, $k = 0.21 \text{ (N.m)/A}$

On peut aussi utiliser le paramètre $k' = \frac{k \cdot i}{R}$ pour travailler sur le moteur linéaire équivalent :

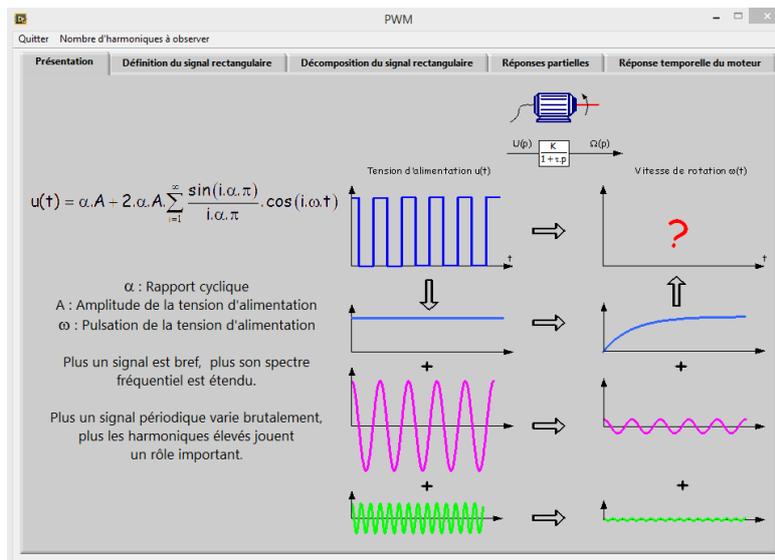


Valeurs numériques de Control'X : $r = 5.1 \Omega$, $L = 0.003 \text{ H}$, $m_{\acute{e}q} = 3.2 \text{ kg}$, $k' = 25.5 \text{ N/A}$

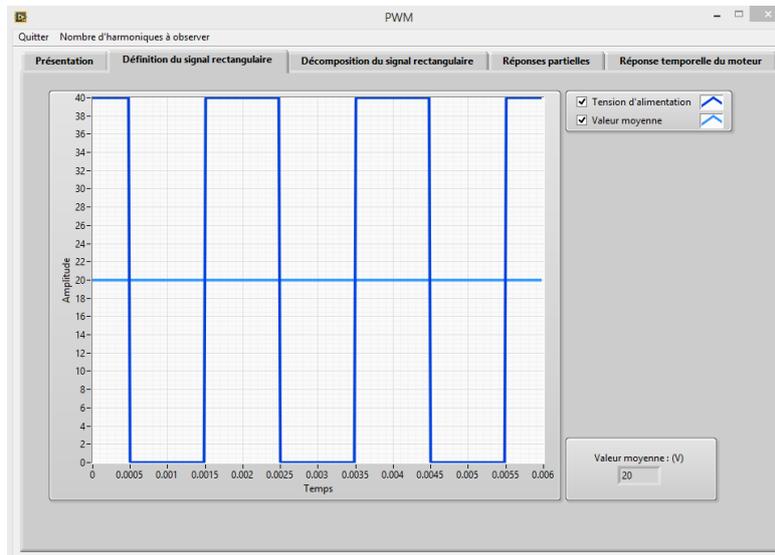


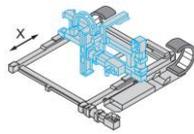
Fenêtre "PWM"

Onglet "présentation" : pour expliquer que l'on cherche à prévoir la réponse temporelle en vitesse du moteur CC lorsqu'un signal PWM lui est appliqué. Les seules réponses faciles à connaître étant les réponses partielles aux différents termes sinusoidaux de la décomposition en série de Fourier du signal PWM.

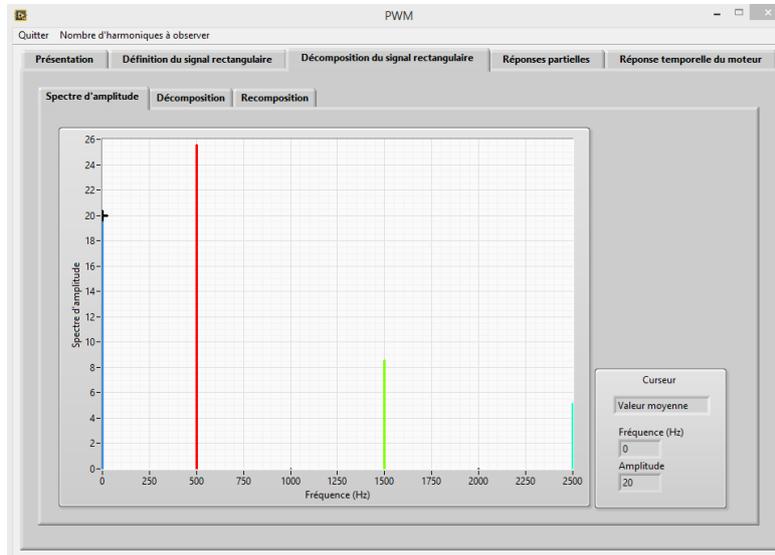


Onglet "Définition du signal rectangulaire" : pour expliquer ce qu'est un signal PWM. Modifier le rapport cyclique et la fréquence du PWM pour observer l'allure du signal.

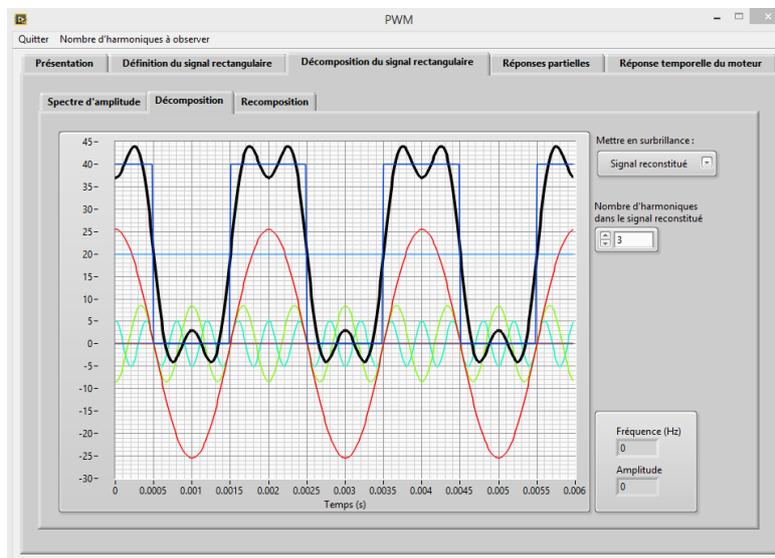




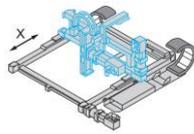
Onglet " Décomposition du signal rectangulaire " : pour analyser les termes de la décomposition en série de Fourier du signal PWM d'un point de vue fréquentiel et temporel.



Spectre d'amplitude du signal PWM
Faire varier les paramètres de la tension d'alimentation par exemple

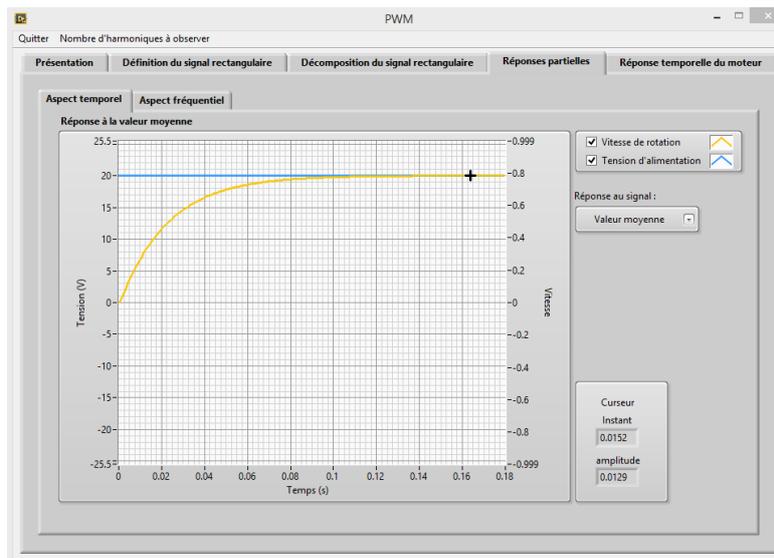


Signal en cours de reconstitution



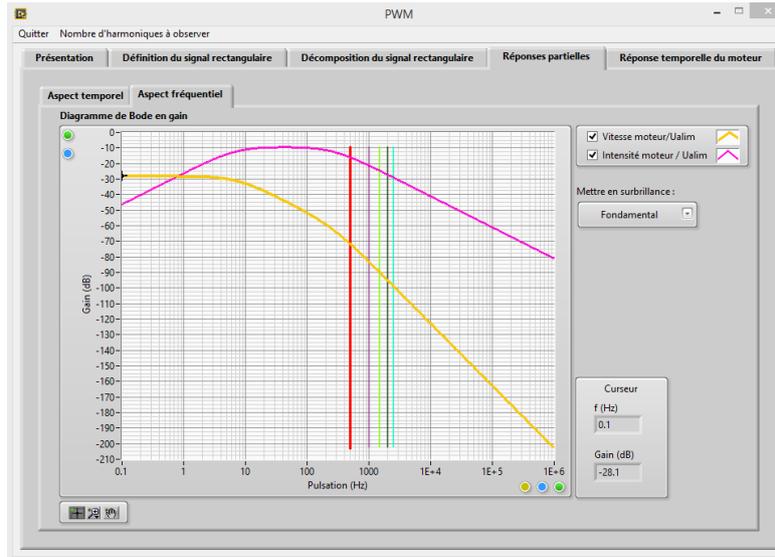
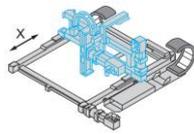
Signal reconstitué

Onglet : " Réponses partielles" : pour observer les réponses partielles temporelles et fréquentielles du moteur au signal PWM d'entrée.



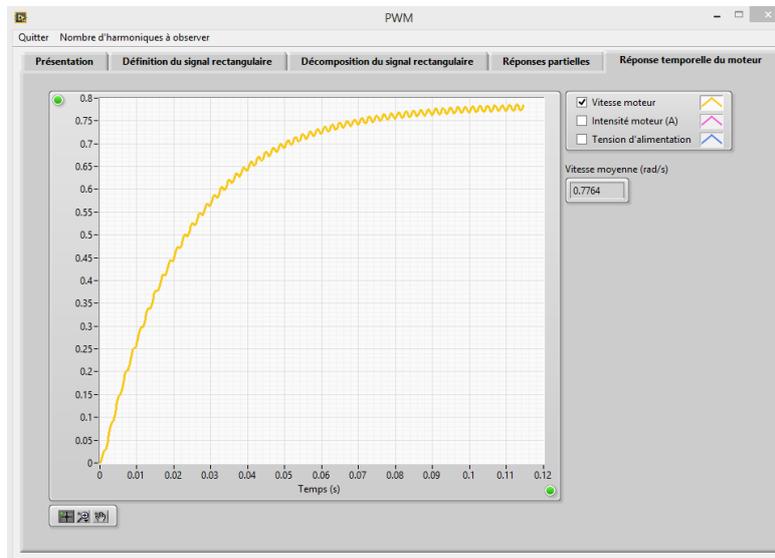
Réponse temporelle à la valeur moyenne

Nota : Les échelles sont fixes pour observer des amplitudes comparables entre un harmonique et le suivant.

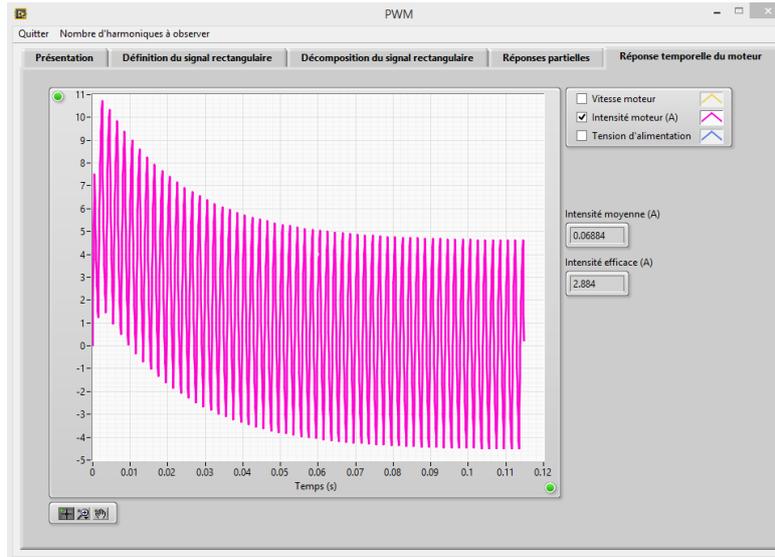
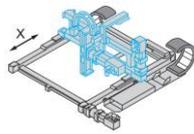


Réponse fréquentielle en vitesse ou en courant

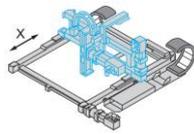
Onolet "Réponse temporelle du moteur" : pour observer la réponse temporelle du moteur au signal PWM : réponse en vitesse et en courant.



Réponse temporelle en vitesse au signal PWM



Réponse temporelle en courant au signal PWM

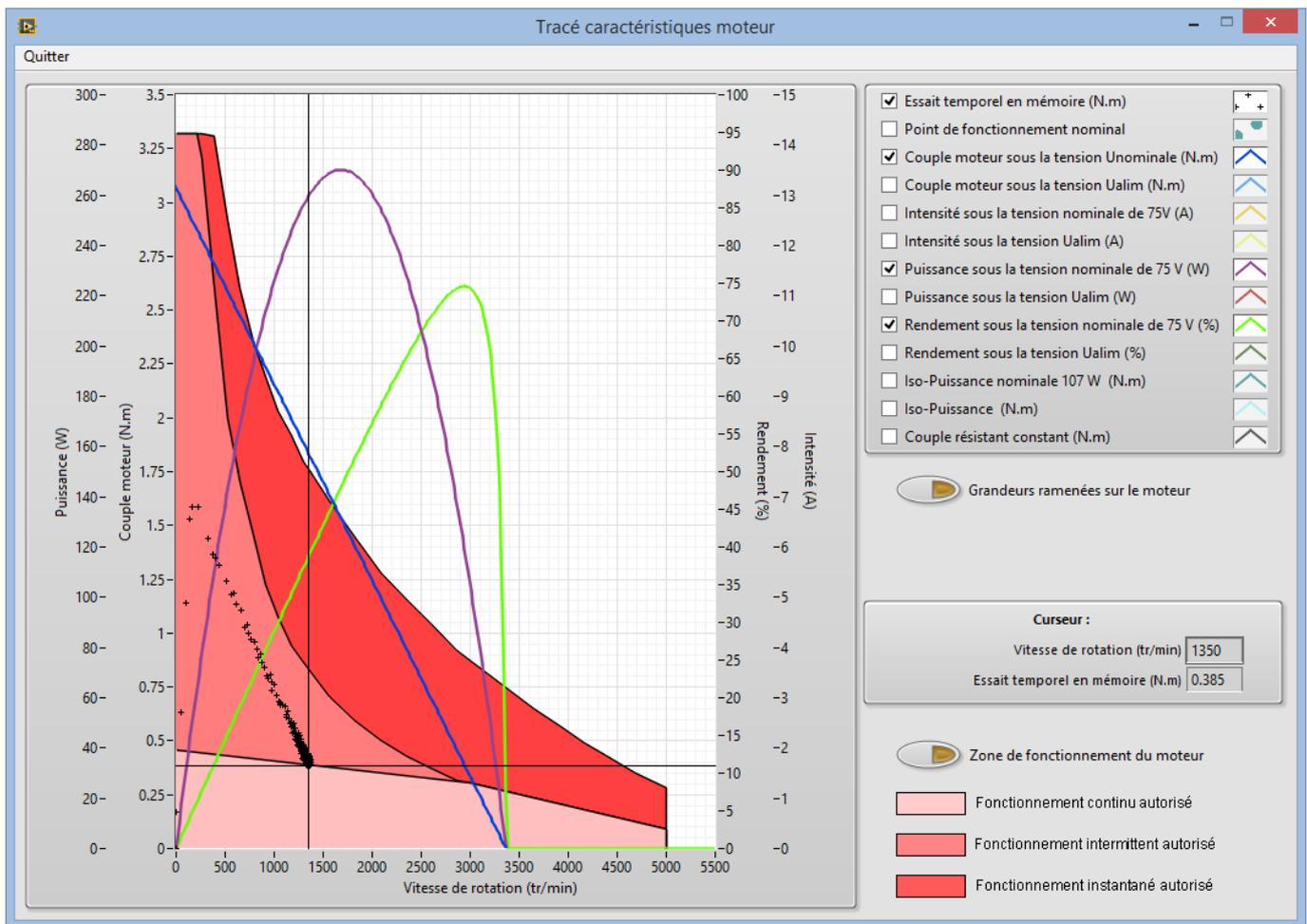


Menu "Caractéristiques moteur"

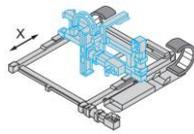
Ctrl + clic pour revenir au sommaire
Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"

Ce menu permet d'illustrer la notion de courbe caractéristique du moteur, de point de fonctionnement, de puissance, d'iso puissance, de rendement.

L'analyse se limite au premier quadrant ($C_{\text{moteur}} \geq 0$ et $\omega_{\text{moteur}} \geq 0$) ou ($F_{\text{moteur}} \geq 0$ et $v_{\text{moteur}} \geq 0$)

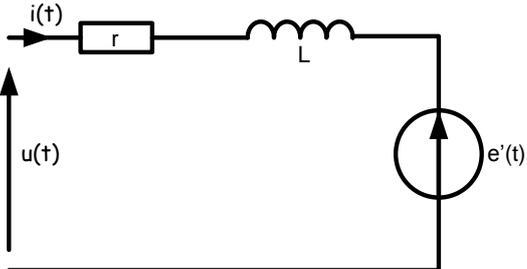
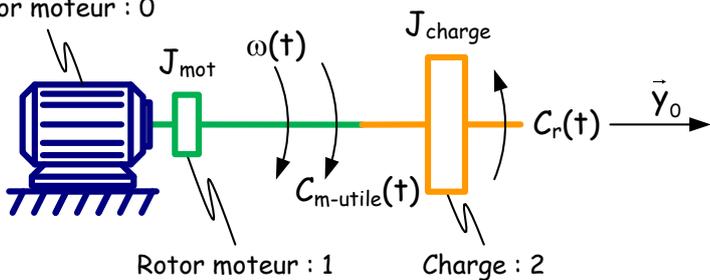
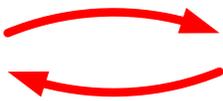


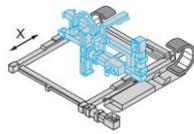
Essai en boucle ouverte sous une tension moteur de 40V



Modèle de moteur utilisé :

Le tracé de la courbe caractéristique du moteur est la courbe du couple moteur utile $C_{m\text{-utile}}$ (le couple disponible en sortie de moteur) en fonction de sa vitesse ω . Elle est tracée à partir du modèle suivant **en se plaçant en régime permanent** : $\omega(t) = \text{cste}$.

| Schéma électrique équivalent | Schéma mécanique équivalent |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p style="text-align: center;"><u>Equation électrique :</u></p> $u(t) = r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e'(t)$ |  <p style="text-align: center;"><u>Paramétrage :</u></p> $\bar{C}_{(\text{moteur} \rightarrow \text{rotor})} = C_m(t) \cdot \vec{y}_0 : \text{couple électromagnétique}$ $\bar{C}_{(\text{moteur-utile} \rightarrow \text{charge})} = C_{m\text{-utile}}(t) \cdot \vec{y}_0 : \text{couple moteur utile (le couple propre à entraîner la charge)}$ $\bar{C}_{(\text{ext} \rightarrow \text{charge})} = - C_r(t) \cdot \vec{y}_0$ $\bar{\Omega}_{1/0} = \omega(t) \cdot \vec{y}_0$ <p style="text-align: center;"><u>Equations dynamiques :</u></p> $C_{m\text{-utile}}(t) = C_m(t) \mp C_{\text{frott-moteur}} - f_{\omega\text{-moteur}} \cdot \omega(t) - J_{\text{mot}} \cdot \dot{\omega}(t) \text{ ou}$ $C_{m\text{-utile}}(t) - C_r(t) = J_{\text{charge}} \cdot \dot{\omega}(t)$ |
| <p>Couplages électro-mécaniques</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Domaine électrique</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Domaine mécanique</p> </div> </div> $C_m(t) = k_c \cdot i(t)$ $e'(t) = k_e \cdot \omega(t)$ | |



Les valeurs de r , L , k_c , k_e , $C_{\text{frott-moteur}}$ et $f_{\omega\text{-moteur}}$ sont celles données dans le catalogue constructeur du moteur :

| Grandeur | Valeur constructeur |
|----------------------------|----------------------------------------------|
| r | 5.1Ω |
| L | $3.2 \times 10^{-3} \text{ H}$ |
| k_c | 0.21 (N.m)/A |
| k_e | 0.2083 V/(rad/s) |
| $C_{\text{frott-moteur}}$ | 0.022 N.m |
| $f_{\omega\text{-moteur}}$ | $0.124 \times 10^{-3} \text{ (N.m)/(rad/s)}$ |

Sous une tension d'alimentation U_{alim} constante on obtient, en régime permanent, les grandeurs suivantes : couple moteur utile, intensité moteur, puissance mécanique moteur, rendement moteur :

$$\begin{cases} C_{m\text{-utile}} = \frac{k_c \cdot U_{\text{alim}}}{r} \mp C_{\text{frott-moteur}} - \left(f_{\omega\text{-moteur}} + \frac{k_c \cdot k_e}{r} \right) \cdot \omega \\ i = \frac{U_{\text{alim}} - k_e \cdot \omega}{r} \\ P_{\text{méca}} = C_{m\text{-utile}} \cdot \omega = \left(\frac{k_c \cdot U_{\text{alim}}}{r} \mp C_{\text{frott-moteur}} \right) \cdot \omega - \left(f_{\omega\text{-moteur}} + \frac{k_c \cdot k_e}{r} \right) \cdot \omega^2 \\ \eta = 100 \cdot \frac{C_{m\text{-utile}} \cdot \omega}{U_{\text{alim}} \cdot i} = 100 \cdot \left[\frac{k_c \cdot \omega}{U_{\text{alim}}} - \frac{(\pm C_{\text{frott-moteur}} + f_{\omega\text{-moteur}} \cdot \omega) \cdot r \cdot \omega}{U_{\text{alim}} \cdot (U_{\text{alim}} - k_e \cdot \omega)} \right] \end{cases}$$

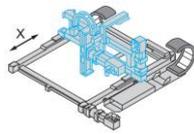
La tension d'alimentation nominale du moteur est de 75 V

A propos du grandeurs issues de l'essai temporel en mémoire :

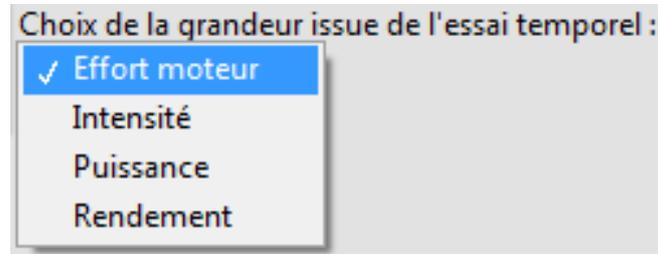
Les résultats de l'essai temporel en mémoire peuvent être rapatriés.



On rappelle qu'un essai temporel archivé peut être chargé en mémoire à tout instant (Menu "Analyse temporelle", "Ouvrir un essai temporel" de Control'Drive).



On peut alors tracer une des grandeurs suivantes :



Le couple moteur utile, la puissance et le rendement moteur issu de l'essai temporel en mémoire sont calculés à partir des grandeurs mesurées : i , U_{alim} et ω selon les formules :

$$\begin{cases} C_{m-utile} = k_c \cdot i - C_{frott-moteur} - f_{\omega-moteur} \cdot \omega \\ P_{méca} = C_{m-utile} \cdot \omega \\ \eta = 100 \cdot \frac{C_{m-utile} \cdot \omega}{U_{alim} \cdot i} \end{cases}$$

Ces grandeurs tiennent compte des frottements internes au moteur (valeurs du frottement sec $C_{frott-moteur}$ et du coefficient de frottements visqueux $f_{\omega-moteur}$ annoncés par le constructeur du moteur) mais pas du moment dynamique du rotor moteur.



Il faut se méfier de certaines interprétations car les grandeurs rapatriées depuis l'essai temporel en mémoire ne sont pas toutes mesurées en régime permanent.

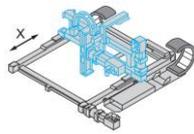
Toutes les grandeurs peuvent être observées en se plaçant du côté du chariot :



Les conversions suivantes sont alors utilisées :

$$v_m = \frac{R}{i} \cdot \omega \text{ et } F_m = \frac{i}{R} \cdot C_m$$

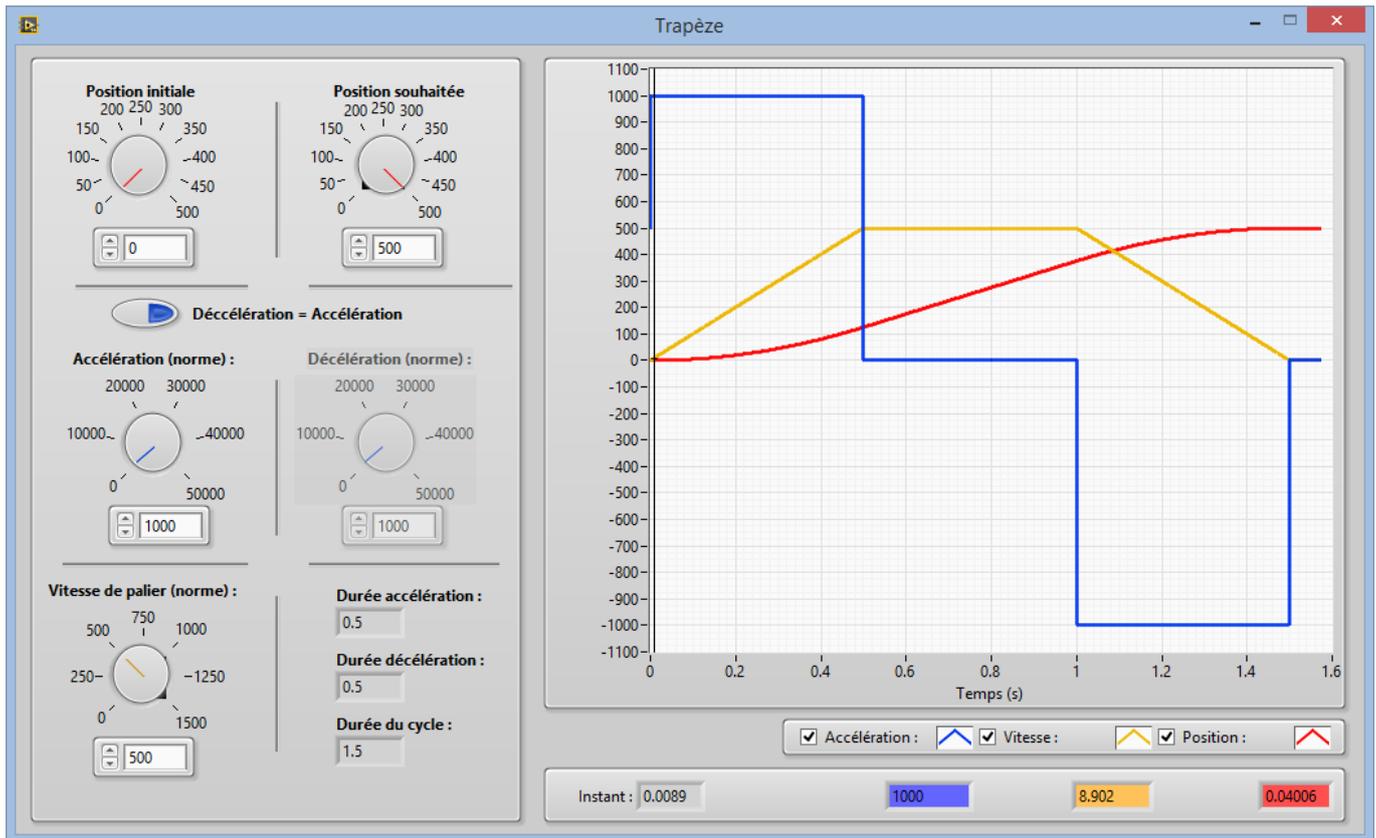
où R est le rayon primitif des poulies crantées et i le rapport de réduction.

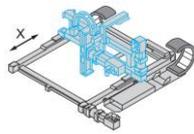


Menu "Trapèze vitesse"

Ctrl + clic pour revenir au sommaire
Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"

Ce menu permet d'effectuer des calculs de durées de cycle sur des pilotages de type trapèze de vitesse.

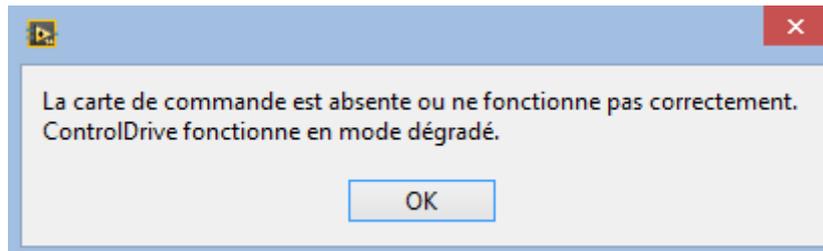


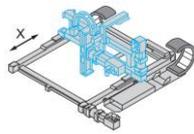


Menu "Test présence carte"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)
[Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"](#)

Cette fonction permet de tester la présence de la carte de commande et son bon fonctionnement. Cette fonction est utile pour diagnostiquer un éventuel problème matériel.





Menu "Cours d'automatique"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)
[Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"](#)

Il s'agit d'un cours d'automatique au format pdf.

Menu "Documentation technique"

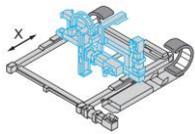
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)
[Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"](#)

Il s'agit de la documentation de Control'X au format pdf.

Menu "Aide de Control'Drive"

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)
[Ctrl + clic pour revenir au menu "Bonus"](#)

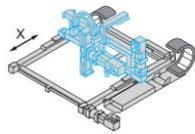
Il s'agit de ce présent document (Notice de Control'Drive) au format pdf.



Control'X

Troobleshooting Control'Drive





Définition du n° de carte National instrument

Lancer l'application NI Max de National Instrument :



Ni Max est une application destinée à vérifier la présence des carte NI connectées à votre ordinateur et de tester leur bon état de fonctionnement.

Cet utilitaire peut être particulièrement utile en phase de débogage pour valider le fonctionnement du matériel connecté aux voies d'entrée/sortie des cartes National Instrument.

Effectuer un reset de la carte NI

Base de connaissance NI : 4GA9TOQA

What is the Process For Resetting the MAX Database?

Primary Software: Utility Software>>Measurement & Automation Explorer

Primary Software Version: 4.4

Primary Software Fixed Version: 4.4

Secondary Software: N/A

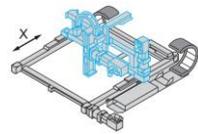
Problem:

What is the process for resetting the Measurement & Automation Explorer (MAX) database?

Solution:

MAX maintains a backup copy of the database file which can be used to restore the database to a known state. Resetting MAX configuration data will remove the database file and replace it with the default. This tool can be helpful in rare cases of database corruption. It can also be helpful in cases where the database is not corrupted, but has entered a strange state. In those cases, resetting the database may be beneficial in returning the system to normal operation.

Note: MAX Database corruptions are rare but may be caused when a system reboots without being properly shut down due to a power loss or a system crash. If this problem occurs after installing a newer version of MAX, verify that you have already performed a reboot of your PC before attempting to reset the database.



Note: Use caution, as this procedure will delete all configuration data stored in MAX including DAQmx Tasks, DAQmx Global Virtual Channels, custom scales, and device configuration.

- If you have custom scales and would like to back up before attempting this repair, please see [KnowledgeBase 4XQAJPBQ: Why Can't I Export My Custom Scales In the MAX Export Configuration Wizard?](#) before proceeding.
- If you want to back up your DAQmx Tasks, DAQmx Channels, or devices, refer to [KnowledgeBase 2GJJ9SY1: Export/Import \(Save\) the System Configuration in Measurement & Automation Explorer \(MAX\)](#) prior to resetting your MAX Database.

For MAX version 5.0 and newer

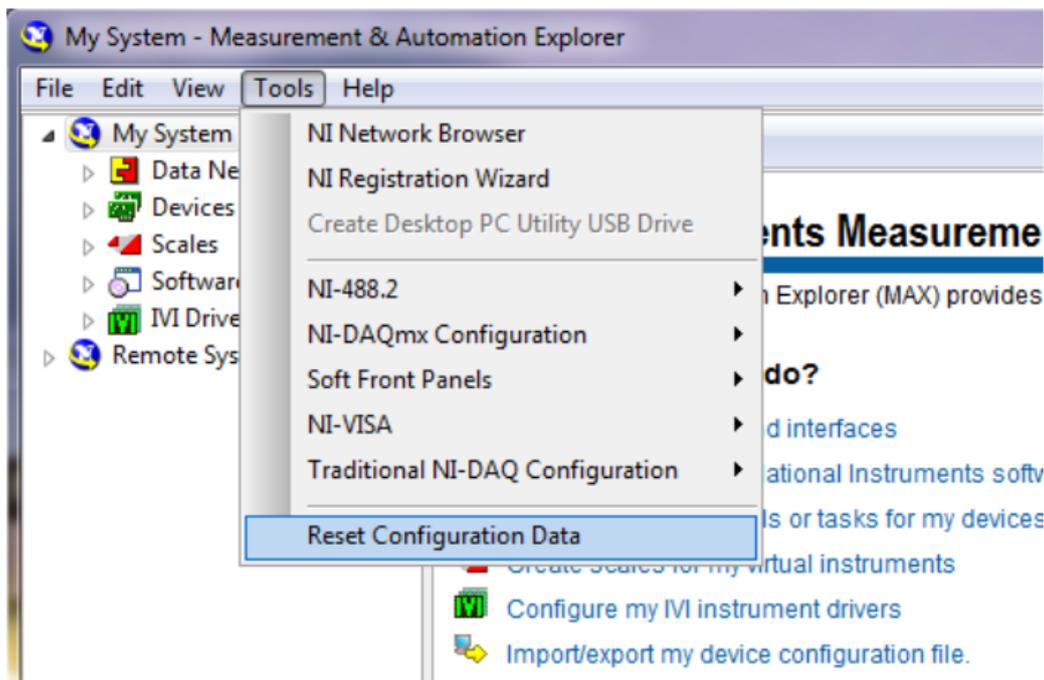
Starting in version 5.0, there is a new reset configuration data utility available from within MAX. This utility allows you to automatically restore the MAX database back to default. If you have MAX version 5.0 or later installed, use this option by completing the following steps.

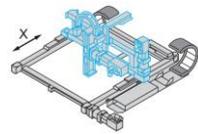
For MAX version 5.0 and newer

Starting in version 5.0, there is a new reset configuration data utility available from within MAX. This utility allows you to automatically restore the MAX database back to default. If you have MAX version 5.0 or later installed, use this option by completing the following steps.

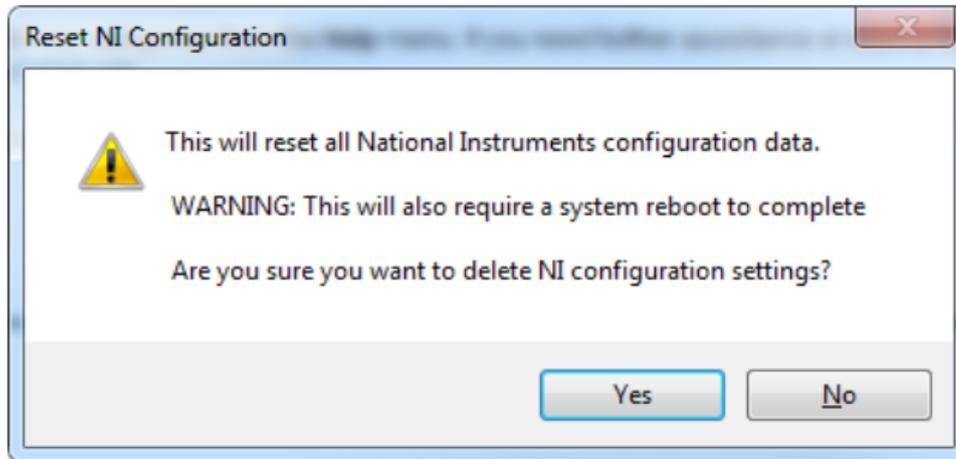
Steps to use the reset configuration data utility in MAX:

1. From within MAX, select **Tools » Reset Configuration Data**.



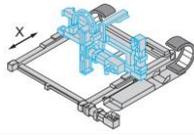


2. Make sure to save any unsaved progress from any open programs. When prompted with the following dialog box, select **Yes** to restart your computer.



3. After your system restarts, the MAX database will be set to default.

Note: If the you are unable to open MAX to reset the configuration data, then the data can be reset outside of MAX by using the ResetNIConfig Tool as described in [KnowledgeBase 65DGDNBM: Using the ResetNIConfig Tool with MAX 5.0 and Higher](#).



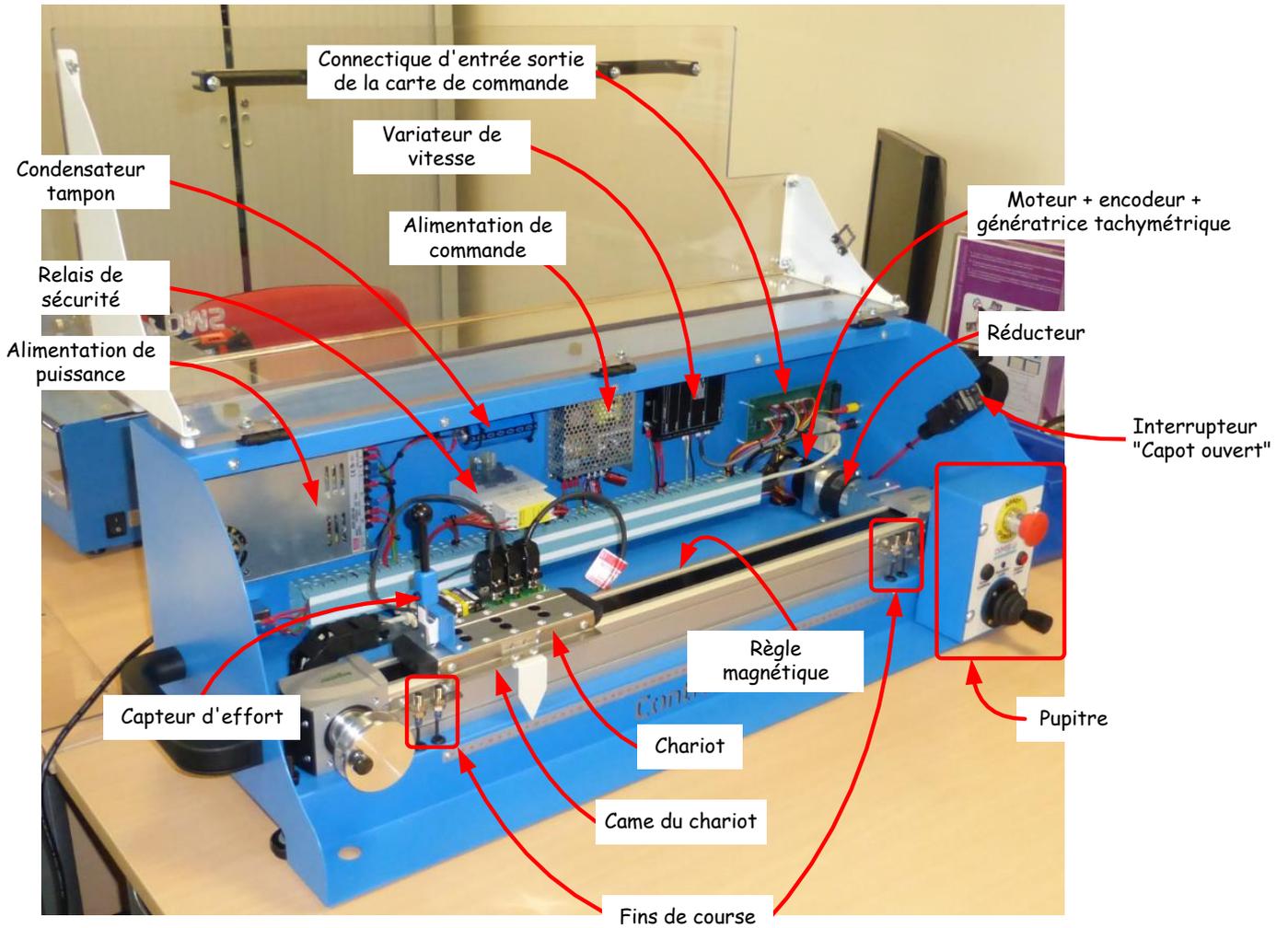
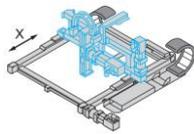
Control'X

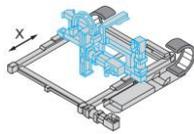
Caractéristiques techniques



Toutes les données techniques des pages qui suivent sont tirées des documents constructeurs disponibles dans le répertoire "[Dossier technique/Documents constructeur](#)".

Ces données techniques sont suffisantes pour analyser l'ensemble des comportements observés sur Control'X mais les informations constructeur sont évidemment plus exhaustives.

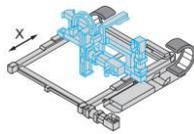


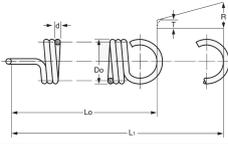
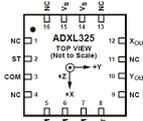


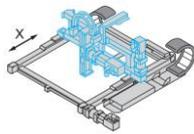
Sommaire

Ctrl + clic pour suivre un lien

| | | | |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Moteur Sanyo T511-T012-EL8 |  | page 5 | Document constructeur  |
| Génératrice tachymétrique |  | page 9 | Document constructeur  |
| Codeur incrémental |  | page 10 | Document constructeur  |
| Réducteur |  | page 11 | Document constructeur  |
| Joint d'accouplement |  | page 12 | Document constructeur  |
| Poulie crantée |  | page 14 | Document constructeur  |
| Courroie crantée |  | page 15 | Document constructeur  |
| Axe |  | page 16 | Document constructeur  |
| Carte de puissance (Servo Variateur) |  | page 17 | Document constructeur  |
| Carte de commande |  | page 18 | Document constructeur  |



| | | | |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <u>Alimentation de puissance</u> |  | page 23 | Document constructeur  |
| <u>Joystick</u> |  | page 24 | Document constructeur  |
| <u>Cartes de conditionnement DMS</u> |  | page 25 | |
| <u>Régle magnétique</u> |  | page 30 | Document constructeur  |
| <u>Capteur d'effort</u> |  | page 31 | Document constructeur  |
| <u>Capteur de distance</u> |  | page 32 | Document constructeur  |
| <u>Ressort</u> |  | page 34 | Document constructeur  |
| <u>Accéléromètre</u> |  | page 35 | Document constructeur  |



Moteur Sanyo T511-T012-EL8

Caractéristiques moteur fournies par le constructeur

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

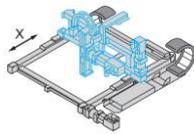
| Caractéristique | Température | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|------------------------------------------|-------------|---------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|
| Puissance nominale | ** | P_{nom} | W | 110 | |
| Tension nominale | ** | U_{nom} | V | 75 | |
| Couple nominal | ** | C_{nom} | N.m | 0.34 | |
| Courant nominal | ** | I_{nom} | A | 2.0 | |
| Vitesse nominale | ** | ω_{nom} | tr/min | 3000 | soit 314 rad/s |
| Couple maxi en continu | ** | C_{cont} | N.m | 0.42 | |
| Couple maxi instantané | ** | C_{max} | N.m | 3.4 | |
| Courant maxi en continu | ** | I_{cont} | A | 2.2 | |
| Courant maxi instantané | ** | I_{max} | A | 18 | |
| Vitesse maximale | | | tr/min | 5000 | soit 523 rad/s |
| Couple de friction | * | $C_{frott-moteur}$ | N.m | 0.022 | |
| Accélération maxi instantanée | ** | | rad/s ² | 91.9×10^3 | |
| Coefficient de frottement visqueux | * | $f_{\omega-moteur}$ | N.m/min | 0.013×10^{-3} | soit $0.124e-3$ N.m/(rad/s) |
| Constante de couple | * | k ou k_c | N.m/A | 0.21 | |
| Constante de force contre électromotrice | * | k ou k_e | V/min | 21.8×10^{-3} | soit $0.2083V/(rad/s)$ |
| Moment d'inertie du rotor | * | J_{mot} | kg.m ² | 0.037×10^{-3} | |
| Résistance d'induit | * | r | Ω | 5.1 | |
| Inductance d'induit | * | L | mH | 3.2 | |
| Constante de temps mécanique | * | $\tau_{méca}$ | ms | 4.3 | |
| Constante de temps électrique | * | $\tau_{élec}$ | ms | 0.63 | |
| Constante de temps thermique | ** | | min | 30 | |
| Résistance thermique | ** | | K/W | 2.4 | |
| Température limite | ** | | °C | 105 | |

* Valeur numérique correspondant à une température ambiante de 25°C

** Valeur numérique correspondant à la température maxi de 105 °C



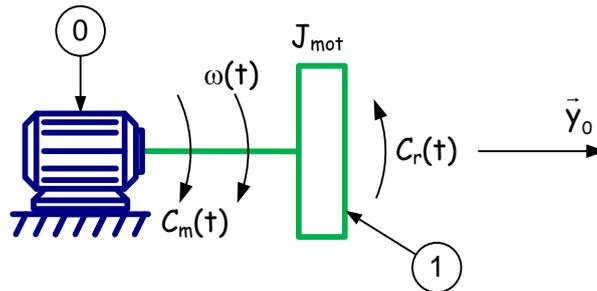
Un dépassement de l'intensité maxi de 18 A peut entraîner une démagnétisation irréversible des aimants permanents.



Caractéristiques sous la tension nominale de 75 V rajoutées à celles données par le constructeur : Calculées à partir d'un modèle avec frottements secs et visqueux du moteur seul

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Modèle utilisé :



Equation de mouvement :

$$C_{m\text{-utile}}(t) - C_r(t) = J_{\text{éq.}} \dot{\omega}(t) \text{ où } C_{m\text{-utile}} = k_c \cdot i - f_{\omega\text{-moteur}} \cdot \omega - C_{\text{frott-moteur}} - J_{\text{mot.}} \dot{\omega}(t)$$

Equation électrique :

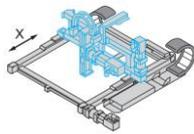
$$u(t) = r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e'(t)$$

Equations électromécaniques :

$$C_m(t) = k_c \cdot i(t) \text{ et } e'(t) = k_e \cdot \omega(t)$$

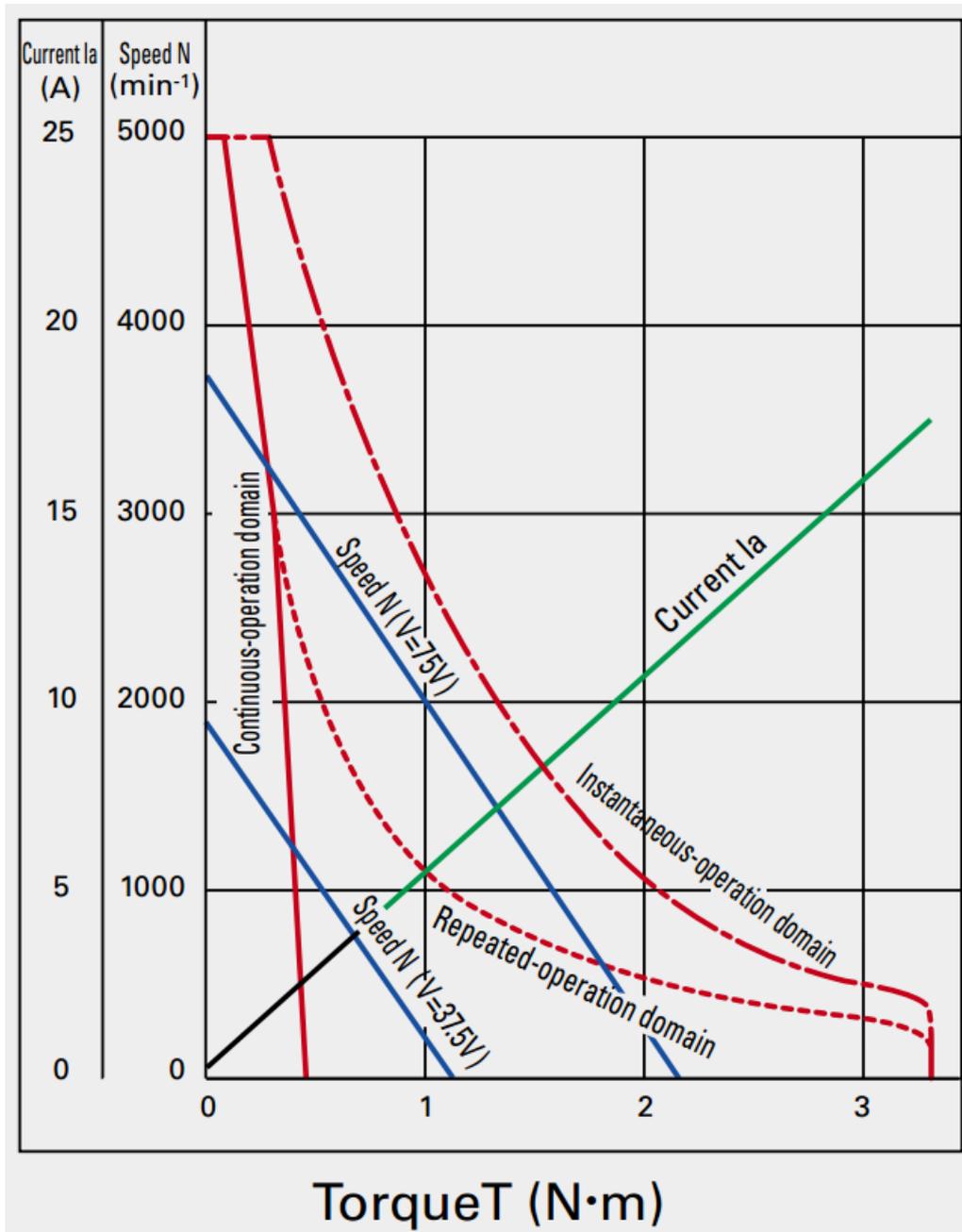
On trouve alors les valeurs suivantes :

| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|----------------------|-----------------------|--------|--------|----------------|
| Vitesse à vide | ω_{max} | tr/min | 3361 | soit 352 rad/s |
| Courant arbre bloqué | i_{max} | A | 14.7 | |
| Courant à vide | i_{vide} | A | 0.31 | |
| Courant nominal | i_{nom} | A | 1.88 | |
| Couple arbre bloqué | C_{max} | N.m | 3.07 | |
| Puissance nominale | P_{nom} | W | 107 | |
| Puissance maxi | P_{max} | W | 270 | |
| Rendement maxi | η_{max} | % | 75 | |



Courbes caractéristiques du moteur fournies par le constructeur

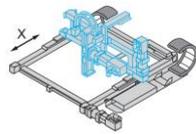
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



Les deux courbes bleues sont manifestement fausses !

Elles ne correspondent pas à certaines valeurs indiquées par le constructeur ou calculées à partir d'un modèle présenté (avec ou sans frottements secs ou visqueux) comme :

- Le point de fonctionnement nominal
- La vitesse à vide
- Le couple de démarrage
- La pente de chacune de ces deux droites



Les courbes correctes sont disponibles dans le fichier Matlab suivant :

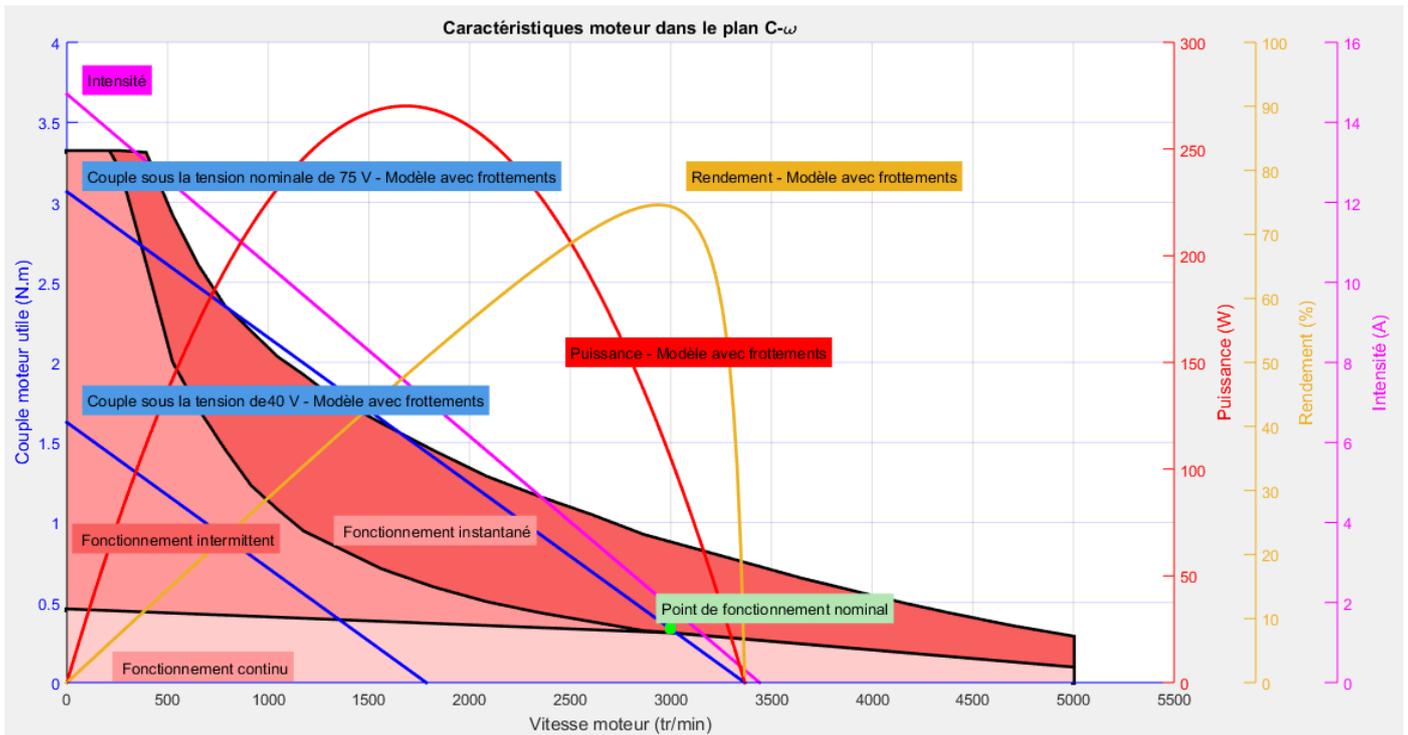
Control'X\Dossier technique\Modèles\Tous modèles Matlab-Simulink\Moteur_seul_couple_vitesse.m

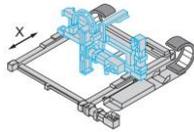
Pour des raisons pédagogiques, la vitesse est en abscisses et le couple moteur utile en ordonnées

Toutes les courbes sont sélectionnables une à une :

| | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figure 1 | Différents domaines de fonctionnement |
| Figure 2 | Courbe caractéristique moteur, modèle avec frottement sec et visqueux, tension alimentation $U_{nominale} = 75\text{ V}$ |
| Figure 3 | Courbe caractéristique moteur, modèle sans frottement, tension alimentation $U_{nominale}$ |
| Figure 4 | Courbe caractéristique moteur, modèle avec frottement sec et visqueux, tension d'alimentation U_{alim} |
| Figure 5 | Intensité |
| Figure 6 | Puissance, modèle avec frottement sec et visqueux |
| Figure 7 | Puissance, modèle sans frottement |
| Figure 8 | Rendement, modèle avec frottement sec et visqueux |
| Figure 9 | Rendement, modèle sans frottement |
| Figure 10 | Iso puissance nominale 107 W |
| Figure 11 | Iso puissances |
| Figure 12 | Points de fonctionnement nominal |
| Figure 13 | Quelques points de fonctionnement particuliers |

La courbe du couple moteur utile $C_{m-utile}$ en fonction de sa vitesse ω constante peut être tracée à partir du modèle suivant en se plaçant en régime permanent : $\omega(t) = cste$.





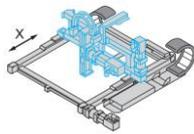
Génératrice tachymétrique Sanyo

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

| Caractéristique | Température | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|------------------------------|-------------|---------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| Tension de sortie par tr/min | * | k_g | V/(tr/min) | $7 \times 10^{-3} \pm 10\%$ | soit 7 V/(1000tr/min) 0.0669 V/(rad/s) |
| Ondulation effective (rms) | * | | % | 1 | |
| Ondulation crête à crête | * | | % | 3 | |
| Linéarité | * | | % | 1 | |
| Résistance aux bornes | * | | Ω | 26 | |
| Inductance aux bornes | * | | mH | 4.1 | |
| Résistance de charge mini | * | | k Ω | 10 | |
| Moment d'inertie du rotor | | J_g | kg.m ² | 0.012×10^{-3} | |

* Valeur numérique correspondant à une température ambiante de 25°C

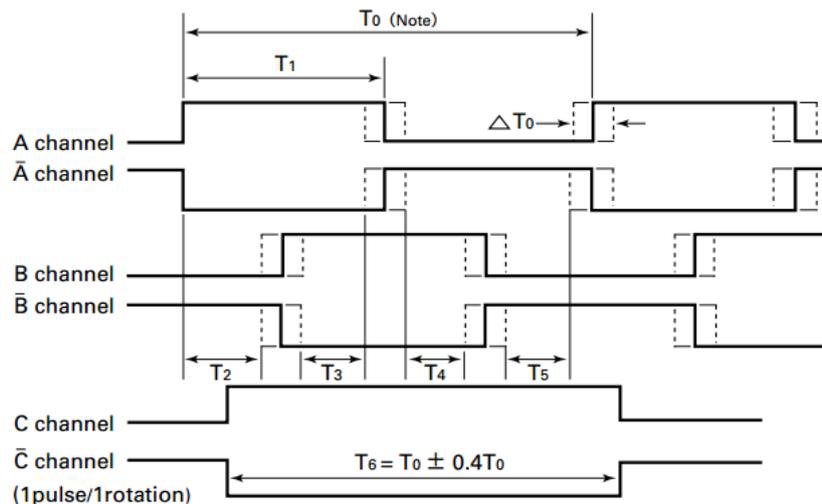
* * Valeur numérique correspondant à la température maxi de 105 °C



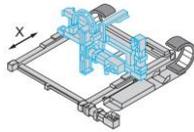
Codeur incrémental Sanyo

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Nombre d'impulsions par tour | n | | 1000 | |
| Circuiterie de sortie | | | Line driver | |
| Nombre de canaux | | | 3 | |
| Tension d'entrée | | V DC | +5 ±10% | |
| Intensité consommée | | mA | 160 max | |
| Tensions de sortie | | V | V _{OH} = 2.4 min V _{OL} = 0.54 max à I _o = 20 mA | |
| Courant de sortie | | mA | 20 max | |
| Réponse en fréquence | | kHz | 0 à 300 | |
| Rapport cyclique des impulsions | | | T ₁ = 1/2.T ₀ ± 1/8.T ₀ | |
| Différence de phase | | | T ₂ à T ₅ = 1/4.T ₀ ± 1/8.T ₀ | Quadrature |
| Couplage | | | (T _{0 max} - T _{0 min})/T ₀ < 0.08 | |
| Température de travail | | °C | -10 à + 85 | |
| Élément électroluminescent émetteur | | | Diode infrarouge | |
| Élément électroluminescent récepteur | | | Photodiode | |
| Moment d'inertie | J _e | kg.m ² | 8×10 ⁻⁸ | |

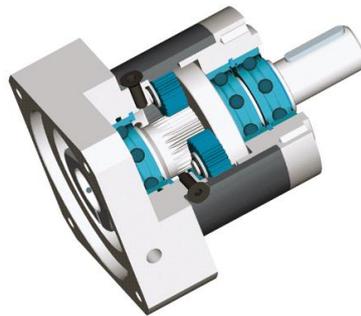


Notice)*T₀ is the average value of each cycle during one encoder rotation at a constant speed.
T₀ : 360-degree electrical angle.

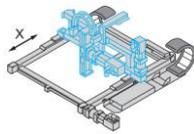


Réducteur Neugart PLE 60

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

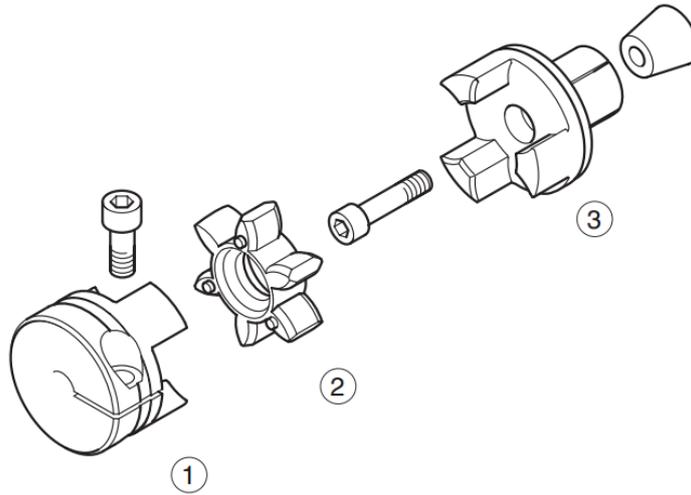


| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|----------------------------------|----------------|--------------------|-----------|-----------------------------------------------------|
| Nombre d'étage | | | 1 | Train épicycloïdal |
| Rapport de réduction | 1/i | | 1/3 | ($\omega_{\text{sortie}}/\omega_{\text{entrée}}$) |
| Couple de sortie nominal | | N.m | 28 | |
| Couple de sortie max | | N.m | 45 | |
| Couple d'urgence | | N.m | 66 | Autorisé 1000 fois |
| Jeu angulaire | | arcmin | < 10 | Ramené sur la sortie (à priori) |
| Vitesse d'entrée max | | tr/min | 13000 | |
| F _R max pour 300000 h | | N | 340 | |
| F _A max pour 300000 h | | N | 450 | |
| F _R max | | N | 700 | |
| F _A max | | N | 800 | |
| Rigidité en torsion | | N.m/arcmin | 2.3 | 7.907×10 ³ N.m/rad |
| Masse | | kg | 0.9 | |
| Moment d'inertie | J _r | kg.cm ² | 0.135 | 0.135.10 ⁻⁴ : ramené sur l'entrée |
| Rendement | | % | 97 | |
| Durée de vie | | h | 30000 | |
| Température de fonctionnement | | °C | -25 à +90 | |



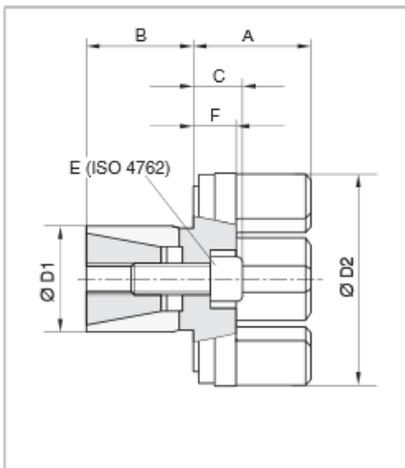
Joint d'accouplement

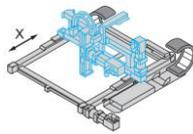
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

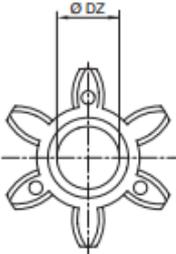


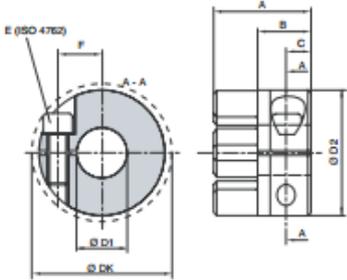
| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|---------------------------------|---------|-------------------|-----------------------|--------------|
| Type | | | | |
| Couple maxi transmissible | | | | |
| Moment d'inertie | J_a | kg.m ² | 2.53×10^{-5} | |
| Raideur en torsion | | | | |
| Raideur en flexion | | | | |
| Raideur en cisaillement | | | | |
| Raideur en traction compression | | | | |

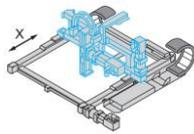
| For axis ... | | | PAS41 | PAS42 | PAS43 | PAS44 |
|---------------------|-----------|-------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| Moment of inertia | J | kgcm ² | 0.009 | 0.09 | 0.32 | 0.77 |
| Max. torque | M_{max} | Nm | 7.7 | 35.7 | 82 | 182 |
| Screw ISO 4762 | E | | M4 | M6 | M8 | M10 |
| Wrench size | | mm | 3 | 5 | 6 | 8 |
| Tightening torque | | Nm (lb-in) | 2.9 (25.67) | 10 (88.51) | 25 (221.27) | 49 (433.69) |
| | A | mm | 16 | 22 | 24 | 25.5 |
| Installation length | B | mm | 14 | 20 | 30 | 36 |
| | C | mm | 7 | 8 | 12 | 13 |
| Expanding hub h9 | D1 | mm | 10 | 20 | 25 | 35 |
| | D2 | mm | 25 | 40 | 55 | 65 |
| | F | mm | 5 | 8 | 8 | 8 |





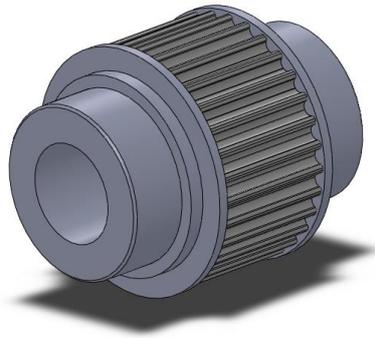
| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|  | For axis ... | | PAS41 | PAS42 | PAS43 | PAS44 |
| | Shore hardness | | 98 Sh A | 98 Sh A | 98 Sh A | 98 Sh A |
| | Color | | Red | Red | Red | Red |
| | Max. torque | M_{max} Nm | 18 | 34 | 120 | 320 |
| | Nominal torque | M_N Nm | 7 | 17 | 60 | 160 |
| | Moment of inertia | J kgcm ² | 0.001 | 0.013 | 0.067 | 0.15 |
| | Diameter | DZ mm | 9 | 14 | 20 | 25 |

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|  | For axis ... | | PAS41 | PAS42 | PAS43 | PAS44 |
| | Moment of inertia | J kgcm ² | 0.015 | 0.15 | 0.55 | 1.22 |
| | Screw ISO 4762 | E | M3 | M6 | M6 | M8 |
| | Wrench size | mm | 2.5 | 5 | 5 | 6 |
| | Tightening torque | Nm (lb-in) | 1.9 (16.82) | 14 (123.91) | 14 (123.91) | 35 (309.78) |
| | Hub length | A mm | 22 | 31 | 36 | 39 |
| | Hole depth | B mm | 11 | 17 | 20 | 21 |
| | Distance between centers | C mm | 5 | 8 | 10 | 9 |
| | Inside diameter H7 | D1 mm | 1) | 1) | 1) | 1) |
| | | D2 mm | 25 | 40 | 55 | 65 |
| | Outside diameter | DK mm | 25.8 | 45 | 57.5 | 73 |
| | | F mm | 8 | 14 | 20 | 25 |

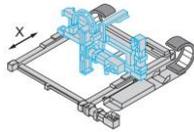


Poulies crantées

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

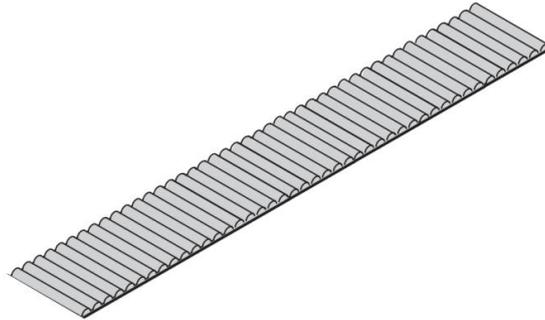


| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|-------------------------|---------|-------------------|---------------------|----------------------------------------|
| Type | | | | 25 HTD 5M |
| Largeur | | mm | 25 | |
| Pas | p^* | mm | 5 | |
| Nombre de dents | Z | | 31 | |
| Rayon primitif | R | mm | 24.67 | Avance de 155 mm/tour |
| Avance par tour | a | mm | 155 | |
| Moment d'inertie | J_p | kg.m ² | $4.2 \cdot 10^{-5}$ | Calculé avec SolidWorks (aluminium) |



Courroie

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

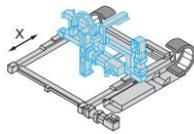


| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|--------------------------------|-------------|-------|---------------------|--------------|
| Type | | | | 25 HTD 5M |
| Largeur | | mm | 25 | |
| Pas | p^* | mm | 5 | |
| Longueur primitive de courroie | l_c | mm | 1670 | |
| Masse linéique | λ_c | kg/m | 0.096 | |
| Masse | m_c | kg | 0.16 | |
| Raideur spécifique | r_s | N | 0.572×10^6 | * |
| Tension recommandée | | N | [570, 710] | |

* En notant k_c la raideur (N/m) d'une longueur l (m) de courroie, la raideur spécifique r_s (N) est le produit

$$r_s = k_c \cdot l$$

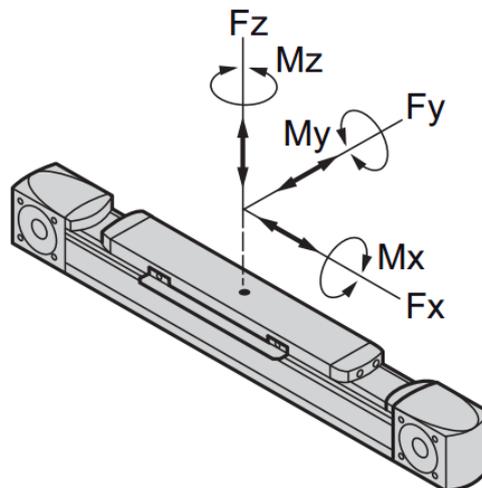
La raideur k_c (N/m) d'une longueur l (m) de courroie vaut donc : $k_c = \frac{r_s}{l}$



Axe Schneider PAS 42 B

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

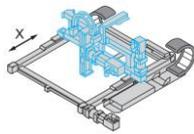
| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|-------------------------------|---------|------------------|--------|---------------------------------------------|
| Type de guidage du chariot | | | | A galets sur roulements* |
| Masse du chariot | M | kg | 0.9 | 1.74 kg avec tous les accessoires montés ** |
| Charge typique | | kg | 12 | |
| Vitesse maxi | | m/s | 8 | |
| Accélération maxi | | m/s ² | 20 | |
| Couple d'entraînement maxi | | N.m | 20 | |
| Force d'entraînement maxi | | N | 800 | |
| Force maxi selon Y | | N | 660 | |
| Force maxi selon Z | | N | 430 | |
| Couple maxi selon X | | N.m | 9 | |
| Couple maxi selon Y | | N.m | 18 | |
| Couple maxi selon Z | | N.m | 28 | |
| Course utile | | mm | 450 | |
| Répétabilité | | mm | ±0.05 | |
| Section transversale | | mm | 60×60 | |
| Durée de vie | | km | 30000 | |
| Masse de l'axe à course nulle | | kg | 7.5 | |
| Masse par mètre de course | | kg | 5.6 | |



* Roulements de poulie crantée : 6907 LU : Φ 35-55-10

** Chariot + accessoires + ensemble capteur d'effort (ci-contre)



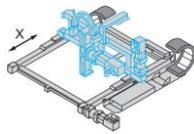


Variateur de vitesse Maxon ESCON 50/5

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|---------------------------------------------------------|-----------------|-------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Tension nominale de service | V _{cc} | V | [10, 50] | Réglée à 40.8 V |
| Tension maximum de sortie | | V | 0.98.V _{cc} | C'est la tension de saturation : 40 V |
| Courant de sortie max permanent | | A | 5 | |
| Courant de sortie max instantané | | A | 15 | |
| Gain | | B | 4 | Amplificateur de gain pur dans le mode de fonctionnement réglé (variateur de vitesse) |
| Fréquence du PWM | | kHz | 53.6 | |
| Fréquence d'échantillonnage du régulateur de courant PI | | kHz | 53.6 | |
| Fréquence d'échantillonnage du régulateur de vitesse PI | | kHz | 5.36 | |
| Rendement maxi | | % | 95 | |
| Self de lissage intégrée | | μH | 30 | |
| Entrées numériques | | | 2 | |
| Entrées/Sorties numériques | | | 2 | |
| Entrées analogiques | | | 2 | |
| Résolution entrées analogiques | | bits | 12 | |
| Gamme entrées analogiques | | V | [-10, 10] | |
| Sorties analogiques | | | 2 | |
| Résolution sorties analogiques | | bits | 12 | |
| Gamme sorties analogiques | | V | [-4, 4] | |

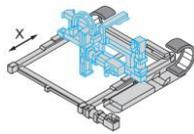


Carte de commande NI PCIe 6321

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



| Caractéristique | Unité | Valeur | Observations |
|----------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Entrées analogiques | | 8 différentielles ou 16 asymétriques | |
| Fréquence max d'échantillonnage | kéch./s | 250 | Pour l'ensemble des voies. (Un seul CAN avec entrées multiplexées) |
| Résolution | bits | 16 | |
| Gamme maximum de tension | V | [-10, 10] | |
| Précision | mV | 2.2 | |
| Gamme maximum de tension | V | [-0.2, 0.2] | |
| Précision | µV | 69 | |
| Nombre de gammes | | 4 | |
| Sortie analogiques | | 2 | |
| Résolution | bits | 16 | |
| Gamme maximum de tension | V | [-10, 10] | C'est la tension de saturation |
| Précision | mV | 3.27 | |
| Taux de rafraîchissement | kéch./s | 900 | Pour une voie. (840 si deux voies) |
| Courant fourni sur une voie | mA | 5 | |
| Entrées /sorties numériques bidirectionnelles | | 24 | |
| Fréquence d'horloge maxi | MHz | 1 | |
| Gamme de tension | V | [0, 5] | |
| Niveaux logiques | | TTL | |
| Compteurs-Timers | | 4 | |
| Fréquence maxi | MHz | 100 | |
| Taille du compteur | bits | 32 | |
| Niveau logique | V | TTL | |



Entrées analogiques :

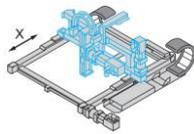
Toutes voies câblées en asymétrie référencées à la masse (RSE : Right Single Ended)

| Voie | N° de PIN carte NI | Voie NI | Indice Matlab- Simulink | Attribution | Observations |
|-------------|-----------------------|------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| AI0 | 68 | 0 | 1 | Axe X Joystick | |
| AI1 | 33 | 1 | 2 | Axe Y Joystick | |
| AI2 | 65 | 2 | 3 | Ecart $\varepsilon_3(t)$ axe X | |
| AI3 | 30 | 3 | 4 | Géné tachy axe X | |
| AI4 | 28 | 4 | 5 | Tension moteur axe X | |
| AI5 | 60 | 5 | 6 | Intensité moteur axe X | |
| AI6 | 25 | 6 | 7 | Capteur IR Scharp | Option |
| AI7 | 57 | 7 | 8 | Gyro Z | Option |
| AI8 | 34 | 8 | 9 | Ecart $\varepsilon_3(t)$ axe α | Option |
| AI9 | 66 | 9 | 10 | Géné tachy axe α | Option |
| AI10 | 31 | 10 | 11 | Tension moteur axe α | Option |
| AI11 | 63 | 11 | 12 | Intensité moteur axe α | Option |
| AI12 | 61 | 12 | 13 | Température moteur axe X | Option |
| AI13 | 26 | 13 | 14 | Effort capteur d'effort | Option |
| AI14 | 58 | 14 | 15 | Accéléromètre X | Option |
| AI15 | 23 | 15 | 16 | Accéléromètre Y | Option |

Masses analogiques AI GND : PIN 56, 24, 59, 27, 29, 64, 32, 67

Sorties analogiques :

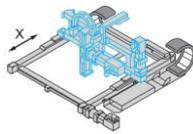
| Voie | N° de PIN carte NI | Voie NI | Indice Matlab- Simulink | Attribution | Observations |
|--------------|-----------------------|------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------|
| A00 | 22 | 0 | 1 | Tension moteur axe X | Vers Escon |
| AOGND | 55 | | | | |
| AO1 | 21 | 1 | 2 | Tension moteur axe α | Option |
| AOGND | 54 | | | | |



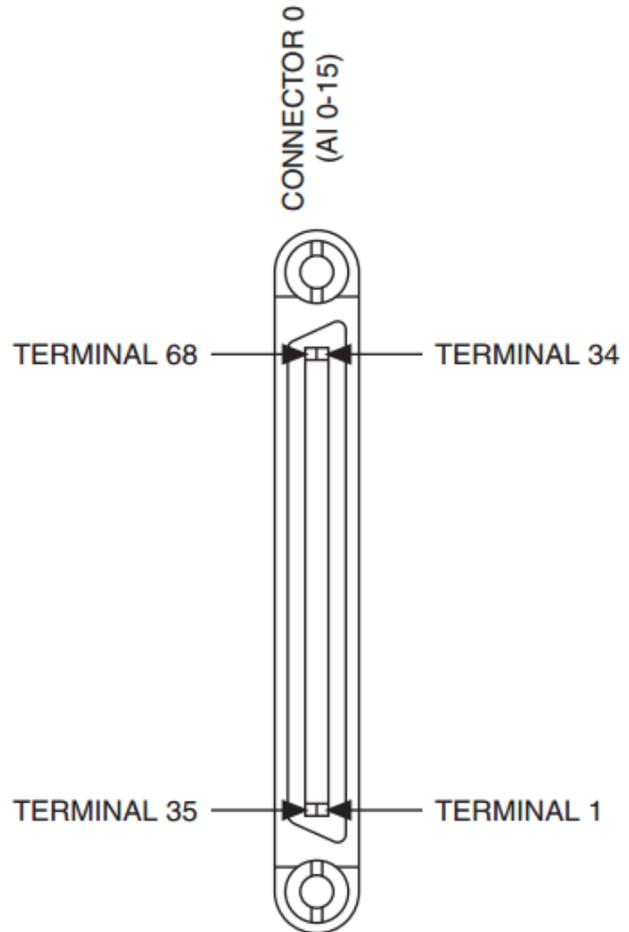
Entrées sorties numériques :

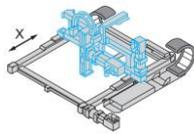
| Voie | N° de PIN carte NI | Voie NI | Fonction alternative NI | Indice Matlab- Simulink | Attribution | Observations |
|------|-----------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|
| P0.0 | 52 | 0 | | 1 | Switch "Home" pupitre | |
| P0.1 | 17 | 1 | | 2 | Fin de course logiciel droit | |
| P0.2 | 49 | 2 | | 3 | Fin de course logiciel gauche | |
| P0.3 | 47 | 3 | | 4 | Canal B encodeur axe X | |
| P0.4 | 19 | 4 | | 5 | Canal A encodeur axe X | |
| P0.5 | 51 | 5 | | 6 | Switch joystick | |
| P0.6 | 16 | 6 | | 7 | Sonde "Probe check" | |
| P0.7 | 48 | 7 | | 8 | N.C. | |
| P1.0 | 11 | 0 | CTR2-A | 9 | Canal A axe α | |
| P1.1 | 10 | 1 | CTR2-Z | 10 | Canal Z axe α | |
| P1.2 | 43 | 2 | CTR2-B | 11 | Canal B axe α | |
| P1.3 | 42 | 3 | CTR1-A | 12 | Canal A règle magnétique | |
| P1.4 | 41 | 4 | CTR1-Z | 13 | Canal Z règle magnétique | |
| P1.5 | 6 | 5 | CTR3-A | 14 | Canal A encodeur supp. | |
| P1.6 | 5 | 6 | CTR3-Z | 15 | Canal Z encodeur supp. | |
| P1.7 | 38 | 7 | CTR3-B | 16 | Canal B encodeur supp. | |
| P2.0 | 37 | 0 | CTR0-A | 17 | Canal A axe X | |
| P2.1 | 3 | 1 | CTR0-Z | 18 | N.C. | |
| P2.2 | 45 | 2 | CTR0-B | 19 | Canal B axe X | |
| P2.3 | 46 | 3 | CTR1-B | 20 | Canal B règle magnétique | |
| P2.4 | 2 | 4 | CTR0-OUT | 21 | PWM | |
| P2.5 | 40 | 5 | CTR1-OUT | 22 | PWM | |
| P2.6 | 1 | 6 | CTR2-OUT | 23 | PWM | |
| P2.7 | 39 | 7 | CTR3-OUT | 24 | PWM | |

Masses logiques DGND : PIN 4, 7, 9, 12, 13, 15, 18, 35, 36, 44, 50 et 53

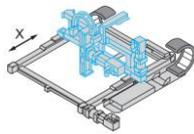


| | | | |
|---------------|----|----|---------------|
| AI 0 (AI 0+) | 68 | 34 | AI 8 (AI 0-) |
| AI GND | 67 | 33 | AI 1 (AI 1+) |
| AI 9 (AI 1-) | 66 | 32 | AI GND |
| AI 2 (AI 2+) | 65 | 31 | AI 10 (AI 2-) |
| AI GND | 64 | 30 | AI 3 (AI 3+) |
| AI 11 (AI 3-) | 63 | 29 | AI GND |
| AI SENSE | 62 | 28 | AI 4 (AI 4+) |
| AI 12 (AI 4-) | 61 | 27 | AI GND |
| AI 5 (AI 5+) | 60 | 26 | AI 13 (AI 5-) |
| AI GND | 59 | 25 | AI 6 (AI 6+) |
| AI 14 (AI 6-) | 58 | 24 | AI GND |
| AI 7 (AI 7+) | 57 | 23 | AI 15 (AI 7-) |
| AI GND | 56 | 22 | AO 0 |
| AO GND | 55 | 21 | AO 1 |
| AO GND | 54 | 20 | NC |
| D GND | 53 | 19 | P0.4 |
| P0.0 | 52 | 18 | D GND |
| P0.5 | 51 | 17 | P0.1 |
| D GND | 50 | 16 | P0.6 |
| P0.2 | 49 | 15 | D GND |
| P0.7 | 48 | 14 | +5 V |
| P0.3 | 47 | 13 | D GND |
| PFI 11/P2.3 | 46 | 12 | D GND |
| PFI 10/P2.2 | 45 | 11 | PFI 0/P1.0 |
| D GND | 44 | 10 | PFI 1/P1.1 |
| PFI 2/P1.2 | 43 | 9 | D GND |
| PFI 3/P1.3 | 42 | 8 | +5 V |
| PFI 4/P1.4 | 41 | 7 | D GND |
| PFI 13/P2.5 | 40 | 6 | PFI 5/P1.5 |
| PFI 15/P2.7 | 39 | 5 | PFI 6/P1.6 |
| PFI 7/P1.7 | 38 | 4 | D GND |
| PFI 8/P2.0 | 37 | 3 | PFI 9/P2.1 |
| D GND | 36 | 2 | PFI 12/P2.4 |
| D GND | 35 | 1 | PFI 14/P2.6 |





| Counter/Timer Signal | Default Connector 0 Pin Number (Name) |
|----------------------|---------------------------------------|
| CTR 0 SRC | 37 (PFI 8) |
| CTR 0 GATE | 3 (PFI 9) |
| CTR 0 AUX | 45 (PFI 10) |
| CTR 0 OUT | 2 (PFI 12) |
| CTR 0 A | 37 (PFI 8) |
| CTR 0 Z | 3 (PFI 9) |
| CTR 0 B | 45 (PFI 10) |
| CTR 1 SRC | 42 (PFI 3) |
| CTR 1 GATE | 41 (PFI 4) |
| CTR 1 AUX | 46 (PFI 11) |
| CTR 1 OUT | 40 (PFI 13) |
| CTR 1 A | 42 (PFI 3) |
| CTR 1 Z | 41 (PFI 4) |
| CTR 1 B | 46 (PFI 11) |
| Counter/Timer Signal | Default Connector 0 Pin Number (Name) |
| CTR 2 SRC | 11 (PFI 0) |
| CTR 2 GATE | 10 (PFI 1) |
| CTR 2 AUX | 43 (PFI 2) |
| CTR 2 OUT | 1 (PFI 14) |
| CTR 2 A | 11 (PFI 0) |
| CTR 2 Z | 10 (PFI 1) |
| CTR 2 B | 43 (PFI 2) |
| CTR 3 SRC | 6 (PFI 5) |
| CTR 3 GATE | 5 (PFI 6) |
| CTR 3 AUX | 38 (PFI 7) |
| CTR 3 OUT | 39 (PFI 15) |
| CTR 3 A | 6 (PFI 5) |
| CTR 3 Z | 5 (PFI 6) |
| CTR 3 B | 38 (PFI 7) |
| FREQ OUT | 1 (PFI 14) |

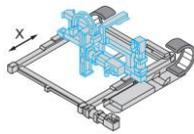


Alimentation de puissance à découpage Mean Well RSP 320-48

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



| Caractéristique | Unité | Valeur | Observations |
|-----------------------------------|-------|--------------|---------------------------------------------|
| Tension d'entrée | V AC | 124-370 | |
| Tension de sortie | V DC | 48 | Réglable entre 41 et 56 V, réglé sur 40.8 V |
| Courant nominal | A | 6.7 | |
| Puissance nominale | W | 321.6 | |
| Ondulation et bruit max | V | 240 mV | |
| Stabilité de la tension de sortie | | ± 1% | |
| Rendement | | 90 % | |
| Surcharge autorisée | | 105 % - 135% | De la puissance nominale |
| Surtension autorisée | V | 58.4 - 68 | |



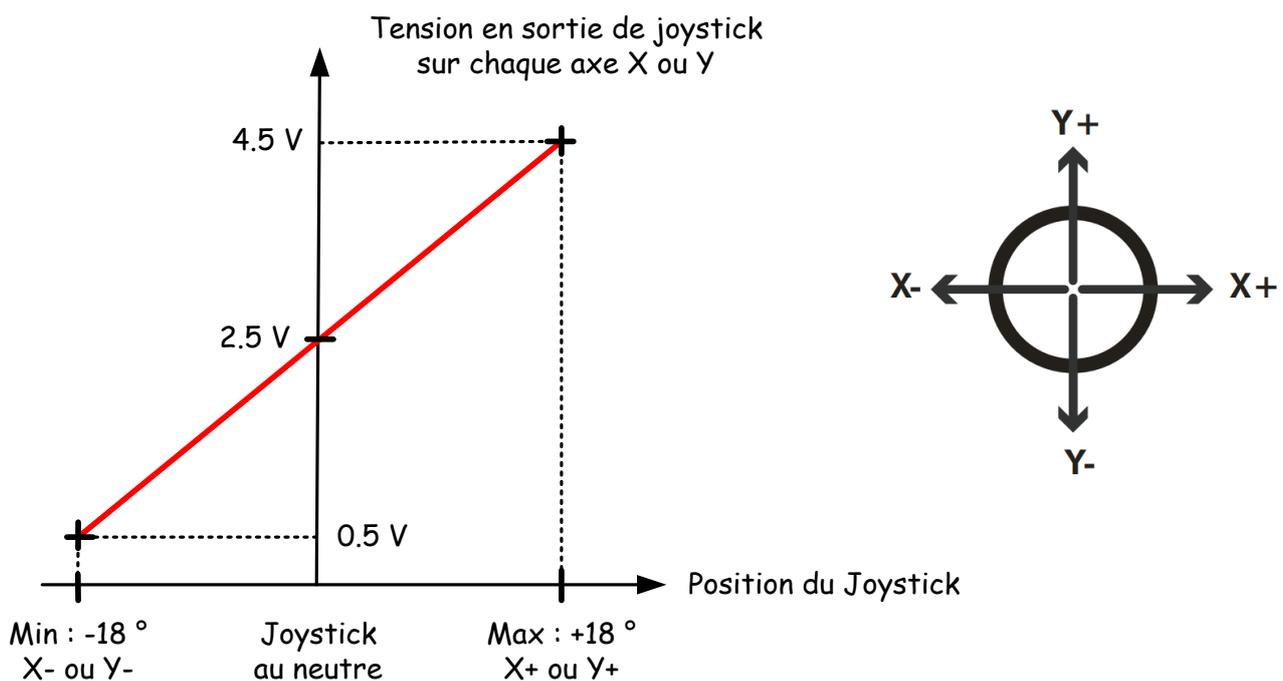
Joystick APEM série 3000

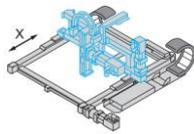
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Le joystick APEM utilisé est un joystick 2 axes sans contact à technologie à effet Hall. Son comportement se rapproche toutefois d'un simple joystick à potentiomètre alimenté en 0, +5V.



| Caractéristique | Unité | Valeur | Observations |
|--------------------------|-------|---------------------------------------------------|--------------|
| Course | ° | 36° | |
| Tension d'alimentation V | V | 5 ± 0.5 | |
| Gain | V | $\pm 40\% \times V = \pm 2$ | |
| Tension au neutre | V | $2.5 \pm 5\% \times \text{Gain}$ 2.5 ± 0.1 | |
| Type de capteur | | | Effet Hall |

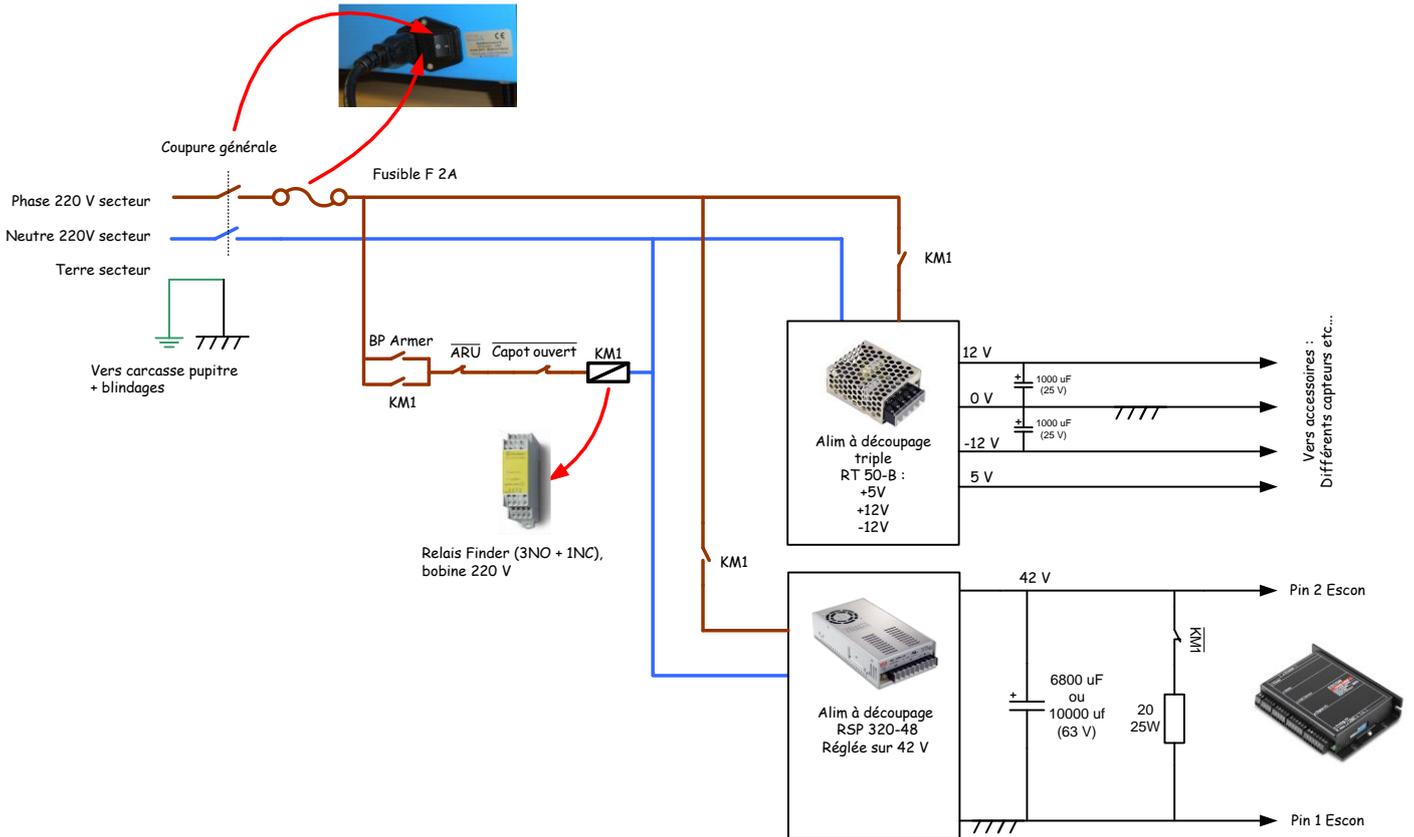




Cartes électroniques DMS

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Schéma des alimentations :



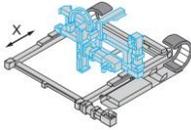
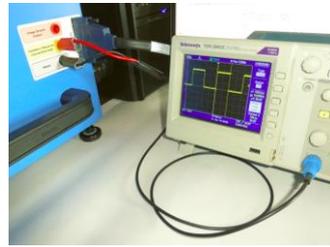
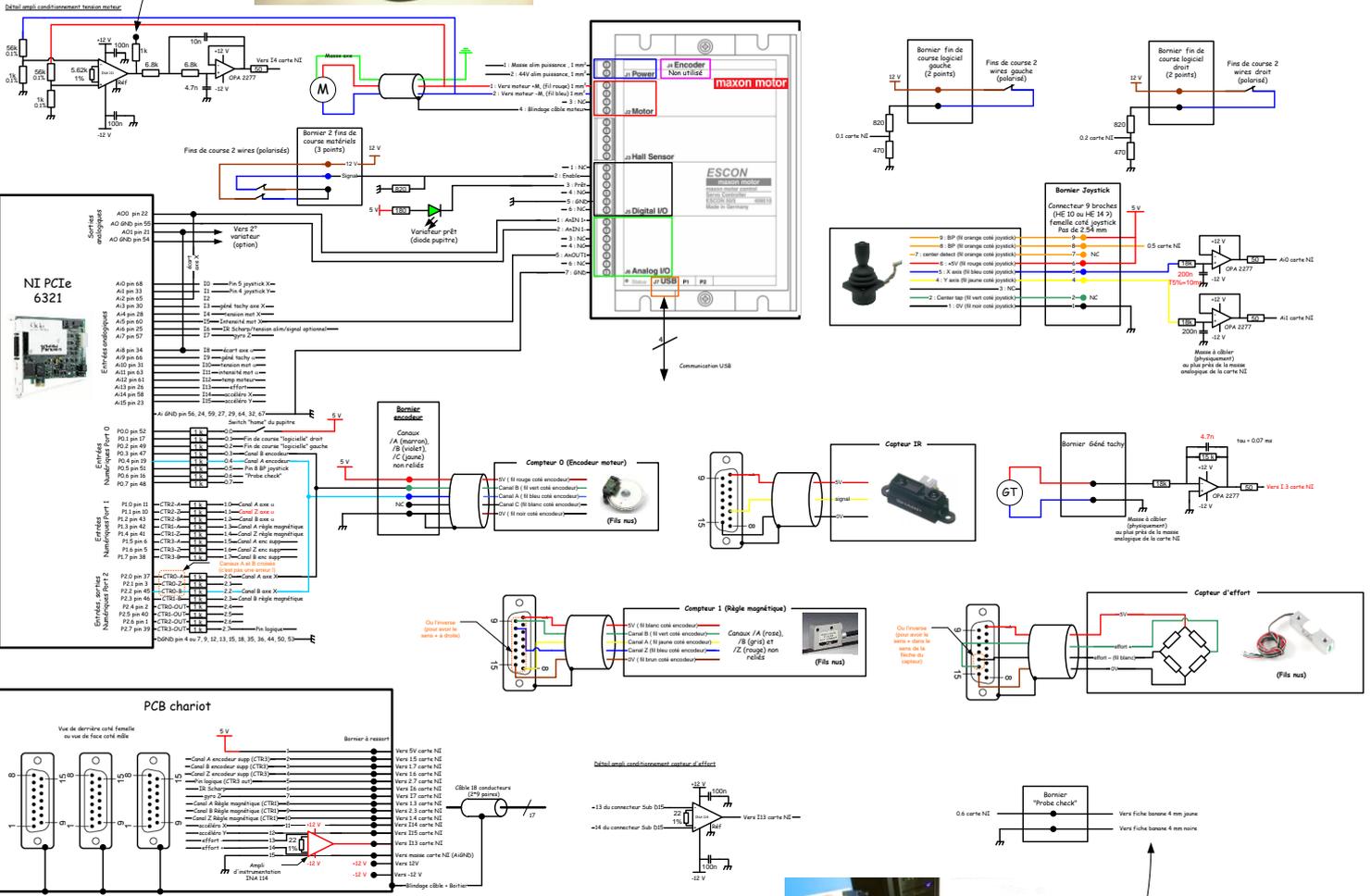
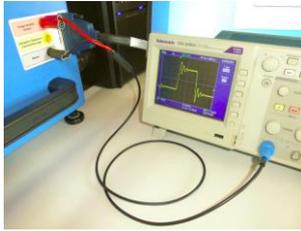
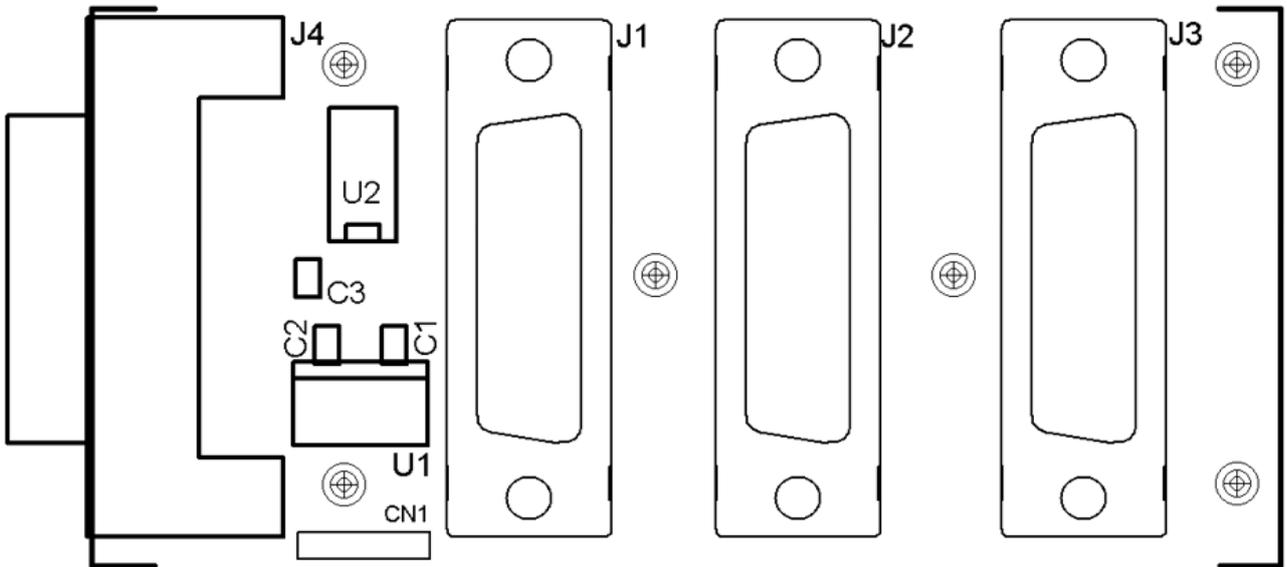
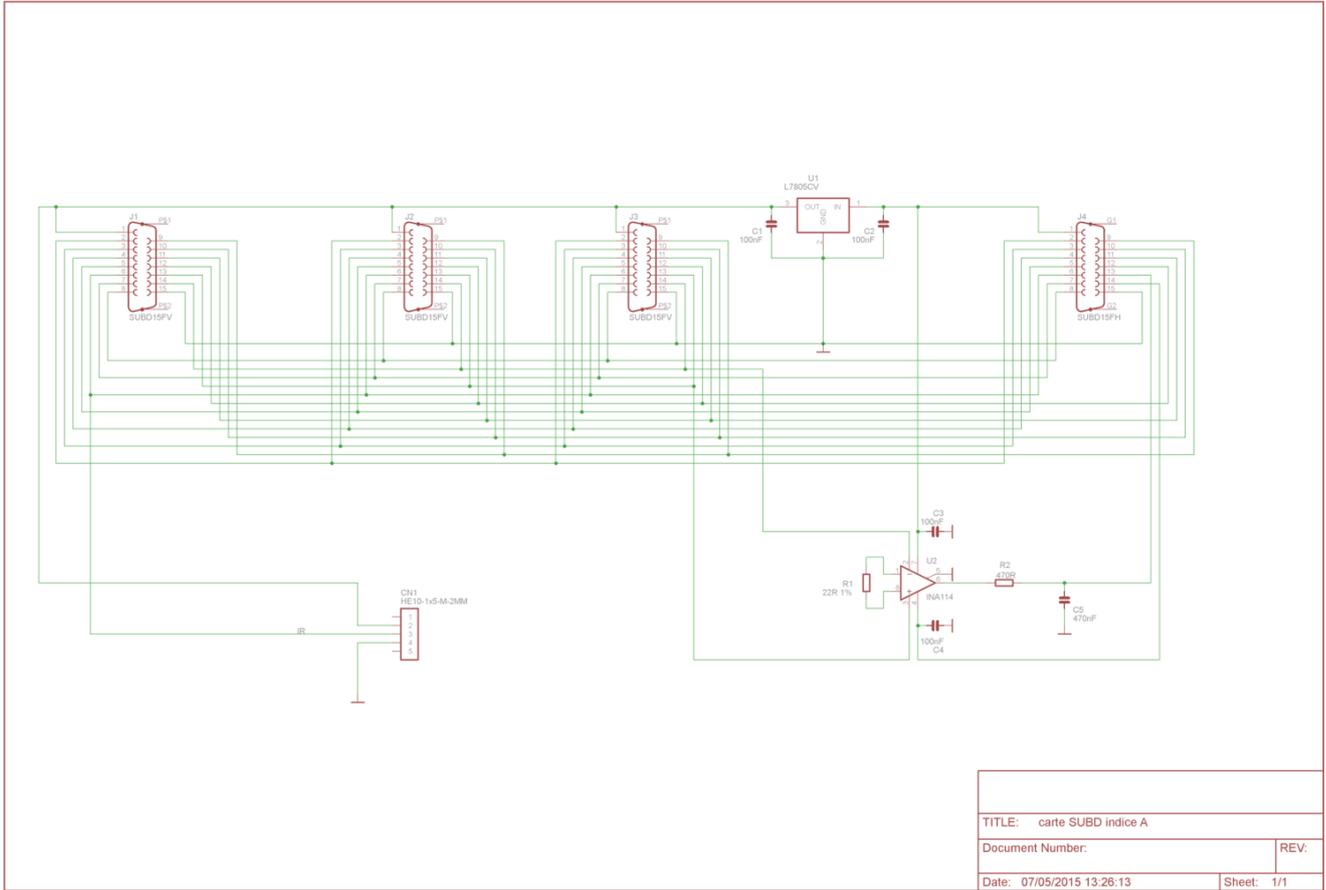
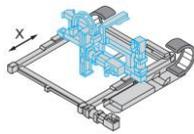
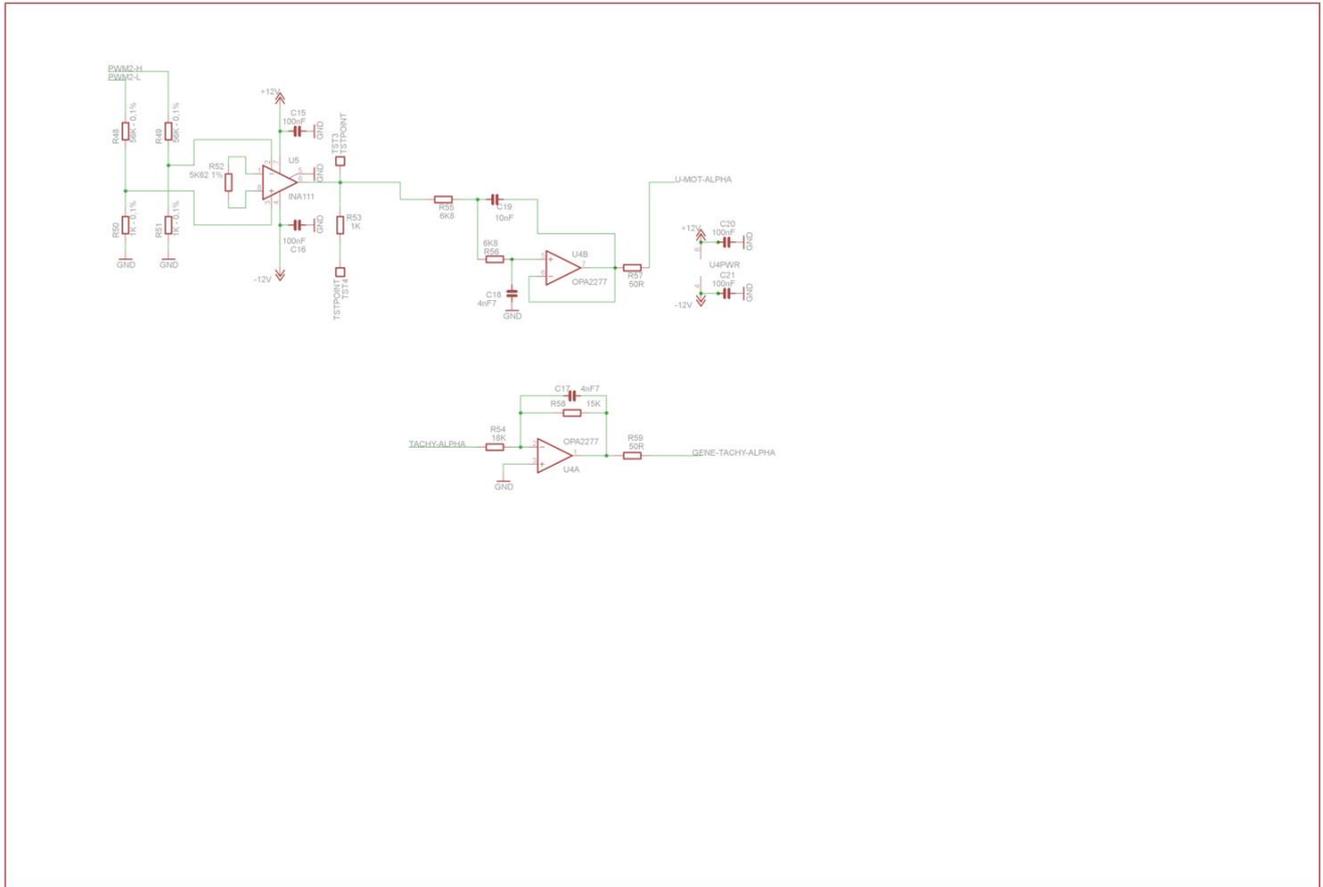
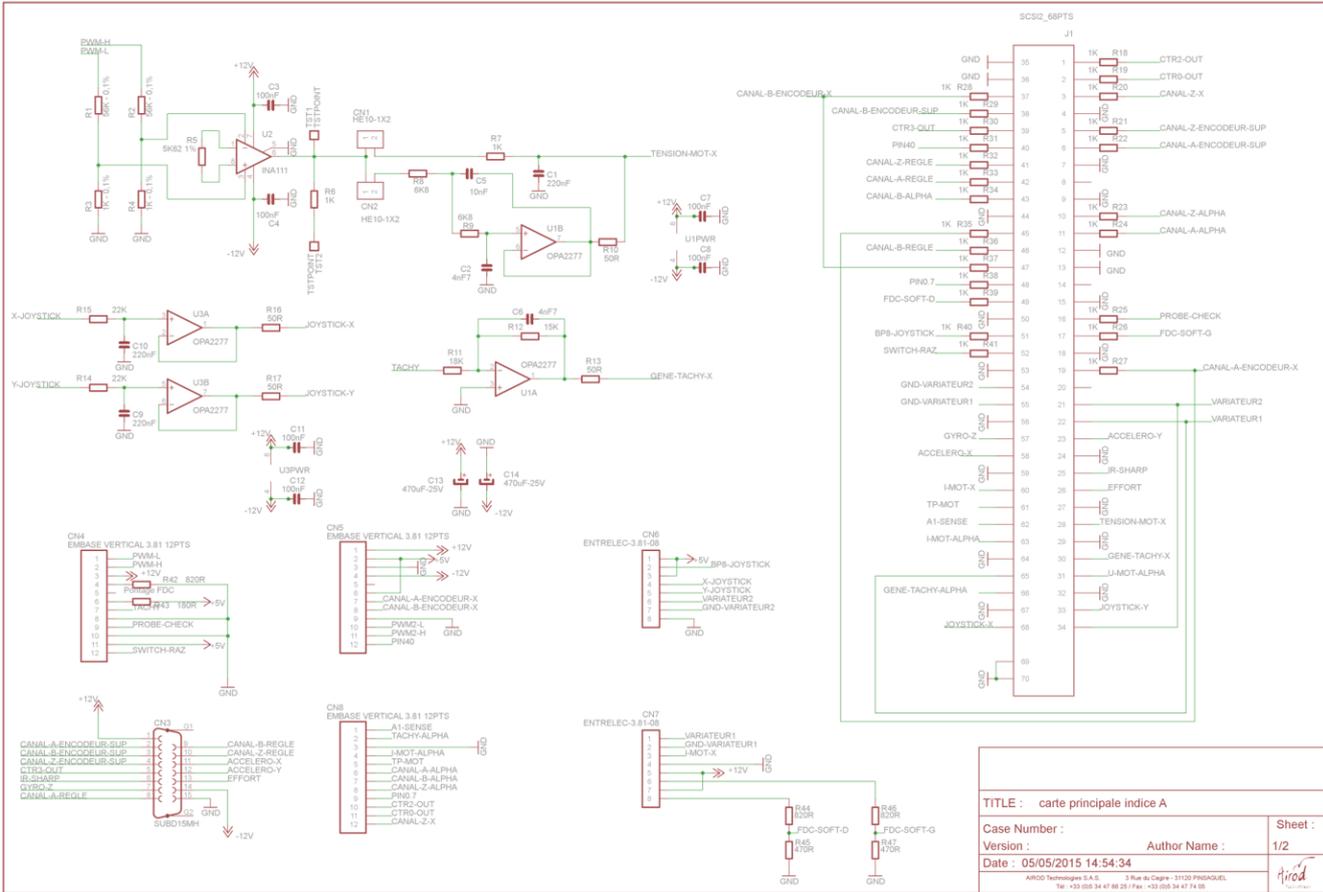
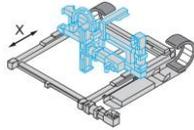
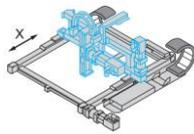


Schéma électronique des cartes de conditionnement de signaux :







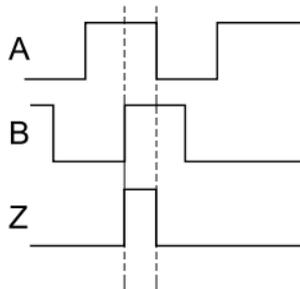
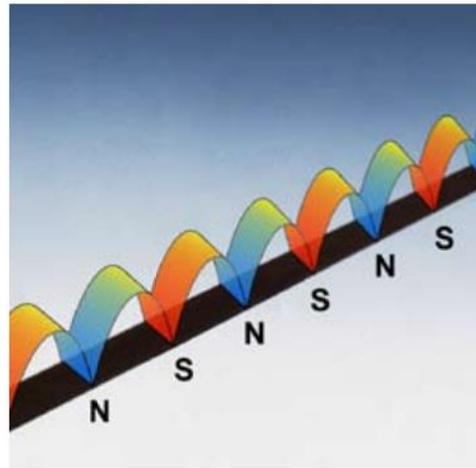


Capteur de position magnétostrictif ASM Posimag PMIS3

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

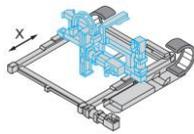
Réf de la tête de lecture : PMIS3-50-10-100KHZ-TTL-Z1-1M-S

Réf de la règle magnétique : PMIB3-50N-Z680-R/340



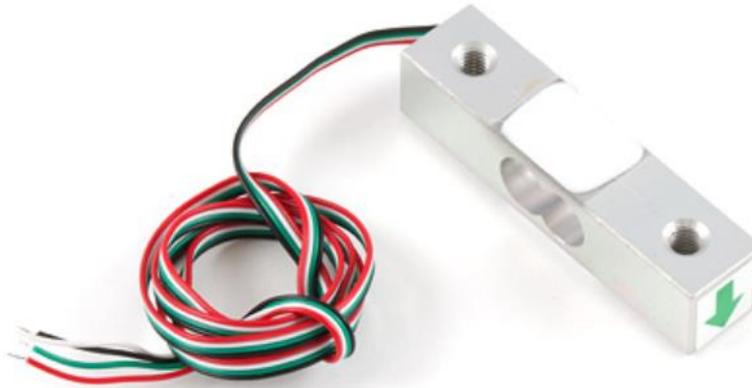
Le canal Z (top 0) est positionné à mi-course du chariot de Control'X et est accessible sur l'entrée P1.4 de la carte NI. (National Instrument).

| Caractéristique | Unité | Valeur | Observations |
|------------------------|-------|---------------|-----------------------------------------------|
| Nombre de canaux | | 3 | A et B en quadrature, Z : top de référence |
| Tension d'alimentation | V DC | 5 | ± 5% |
| Courant à vide | mA | 50-300 | |
| Période magnétique | mm | 5 | |
| Entrefer | mm | 0.1-2 | |
| Résolution | µm | 10 | (avec interpolation ×4) |
| Vitesse max | m/s | 3.2 | avec fréquence de 100 kHz |
| Sorties | | | TTL, RS422 |
| Linéarité | | 30µm ± 40µm/m | |
| Répétabilité | digit | 1 | |



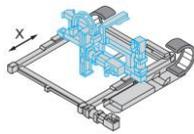
Capteur d'effort

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



| Caractéristique | Unité | Valeur | Observations |
|---------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capacité maxi | kg | 20 | |
| Surcharge maxi | kg | 24 | avant défaillance |
| Répétabilité | g | ± 10 | maxi |
| Non linéarité | g | 10 | maxi |
| Hystérésis | g | 10 | maxi |
| Offset | g | ± 300 | lorsqu'aucun effort n'est appliqué |
| Tension d'alimentation | V DC | 5 | maxi |
| Impédance de sortie | k Ω | 1 | |
| Tension de sortie nominale | mV/V | 1 | 1mV par V de tension d'alimentation sous la charge maxi de 20 kg : Pour une alimentation en 5V, on recueille aux bornes du pont 5mV sous 20 kg. |
| Erreur sur la tension de sortie | μ V/V | ± 150 | |

Le montage en pont de Wheastone et la disposition des jauges de déformation font que le capteur n'est sensible qu'à l'effort de cisaillement subit par la poutre et non au moment de flexion induit par l'effort exercé. L'information recueillie aux bornes du pont ne dépend donc pas du point d'application de la force horizontale exercée.

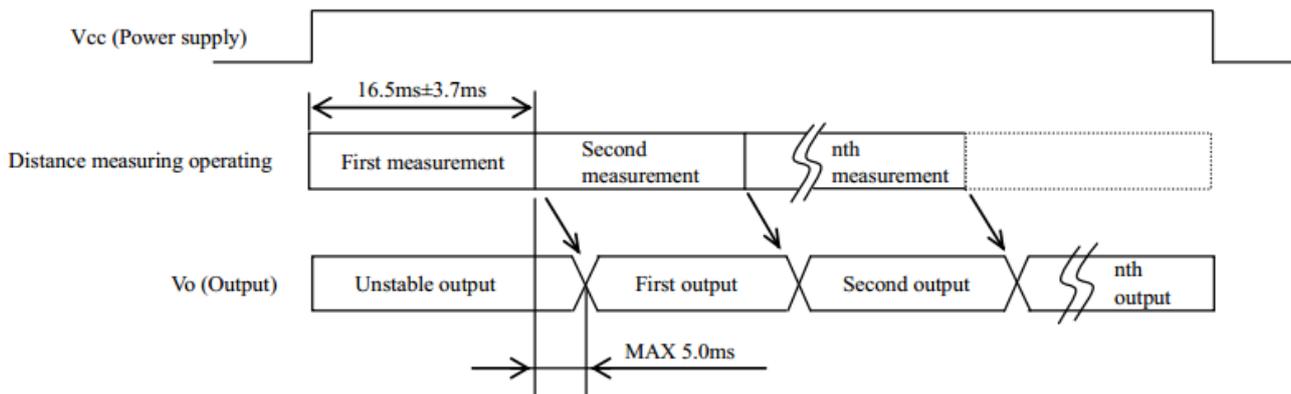


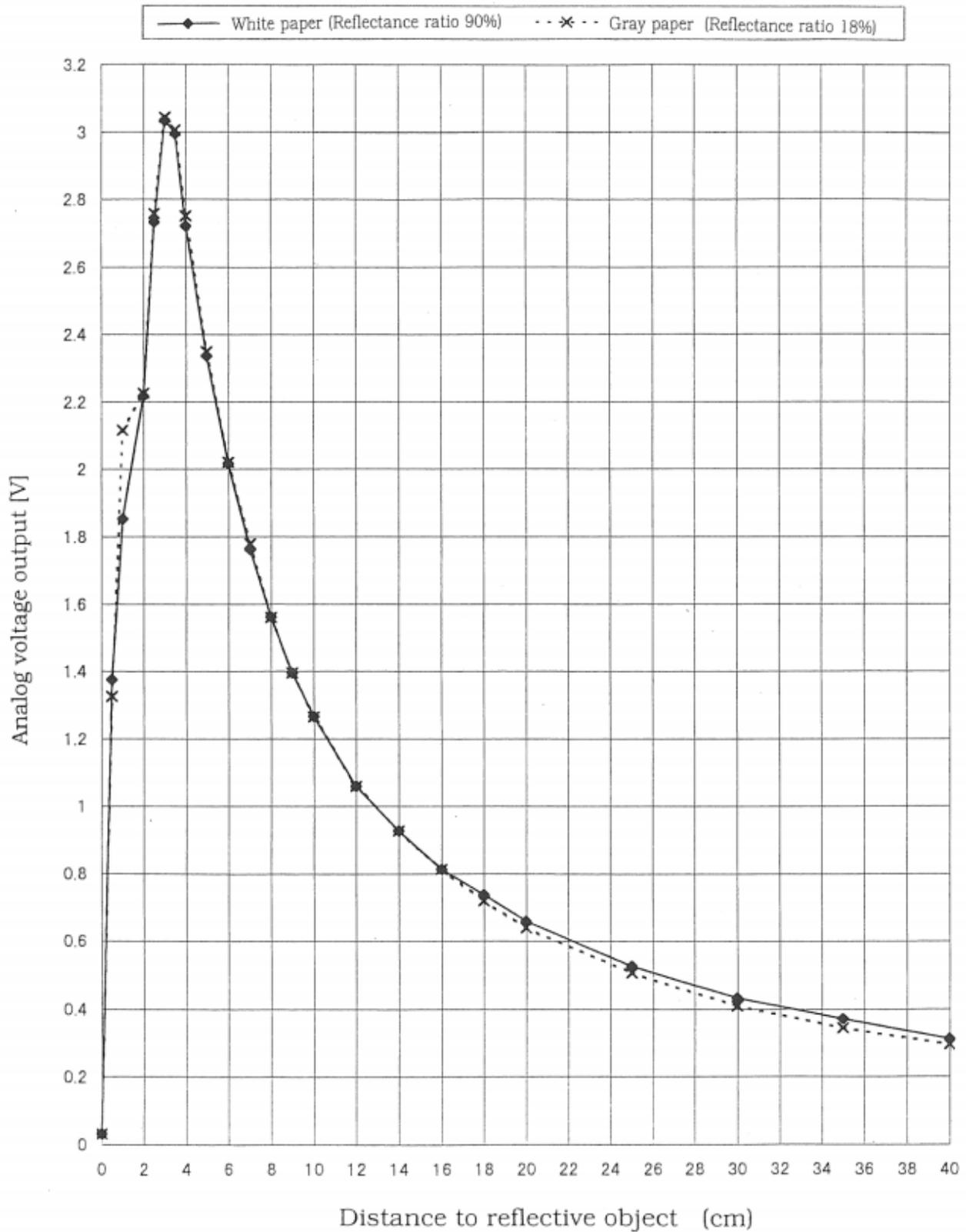
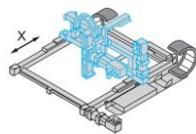
Capteur de distance SHARP GP2Y0A41SK0F

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

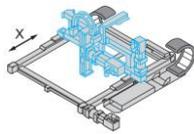


| Caractéristique | Unité | Valeur | Observations |
|-----------------------------|-------|----------------|--------------|
| Technologie | | | Infra-rouge |
| Plage de mesure | cm | 4 - 30 | |
| Alimentation | V DC | 4.5 - 5.5 | |
| Durée de mesure | ms | 16.5 ± 3.7 | |
| Intensité moyenne consommée | mA | 12 | |



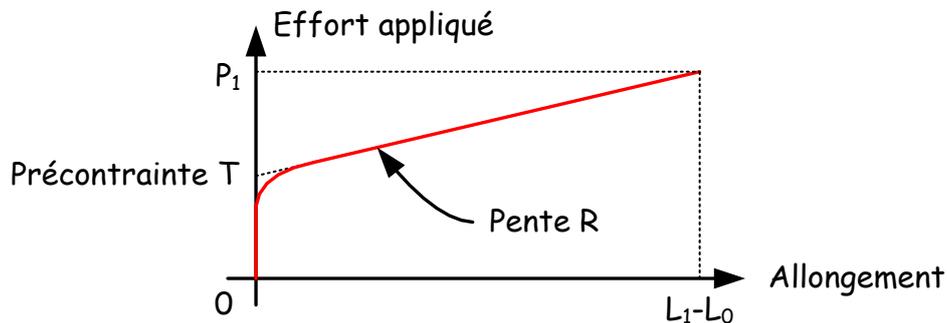
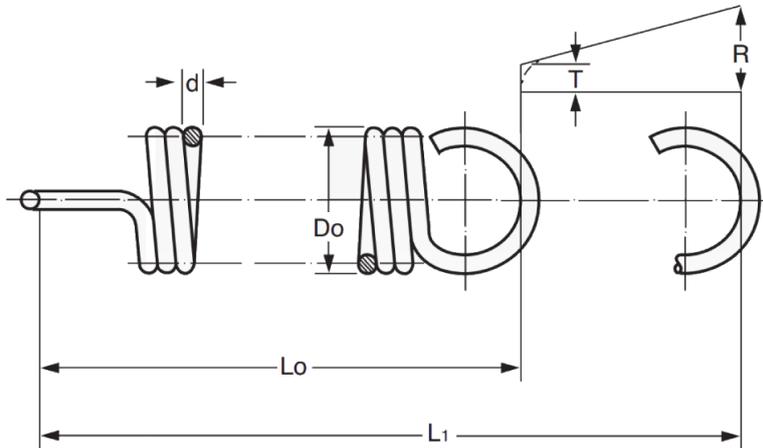


| Distance (mm) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---------------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|
| Tension (V) | 3.05 | 2.7 | 2.35 | 2.02 | 1.76 | 1.55 | 1.4 | 1.27 | 1.06 | 0.92 | 0.8 | 0.72 | 0.65 | 0.52 | 0.43 | 0.37 | 0.3 |



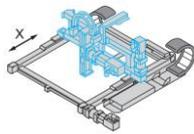
Ressort SPEC T42240

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)



| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|---------------------------------|---------|-------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| Type | | | | Ressort de traction |
| Matériau | | | | Inox |
| Diamètre extérieur | D_0 | mm | 12 | |
| Diamètre du fil | d | mm | 1.8 | |
| Longueur libre | L_0 | mm | 290 | |
| Longueur de l'extension maximum | L_1 | mm | 465 | Avant déformation plastique |
| Charge à L_1 | P_1 | N | 117.45 | |
| Tension initiale | T | N | 17.85 | Le ressort est à spires jointives, il est légèrement précontraint |
| Raideur | R | N/mm | 0.57 | |

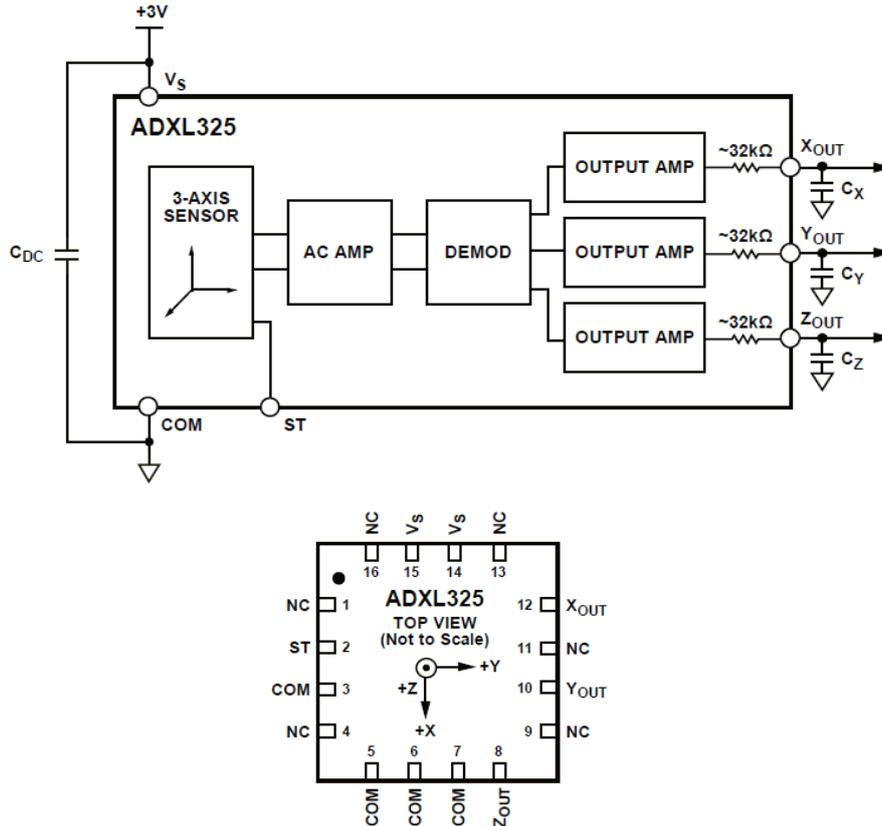
N.B. : La tension initiale est donnée à titre indicatif et peut varier d'un ressort à l'autre.



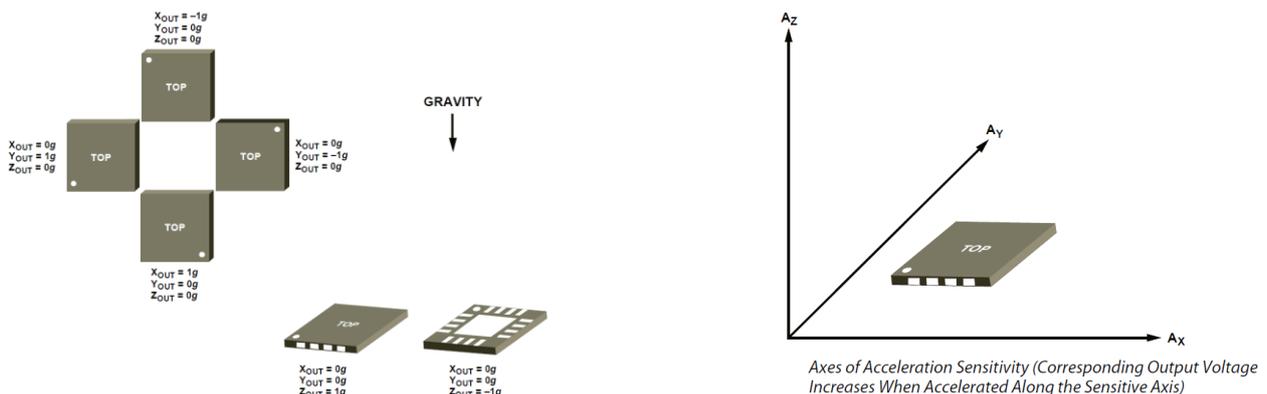
Accéléromètre Analog Device ADXL325

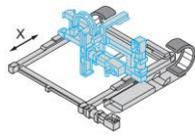
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Cet accéléromètre est monté sur un PCB spécialement crée pour Control'X pour que la dynamique de la mesure soit en adéquation avec la dynamique de l'axe : $C_x = C_y = C_z = 0.01 \mu\text{F}$. La bande passante à -3dB est ainsi de 500 Hz.



| Caractéristique | Symbole | Unité | Valeur | Observations |
|------------------------|---------|-------|----------|------------------|
| Nombre d'axes | | | 3 | |
| Tension d'alimentation | | V | 1.8 à 3 | |
| Gamme | | g | $\pm 5g$ | |
| Sensibilité | | mV/g | 174 | |
| Offset | | V | 1.5 | Tension pour 0 g |



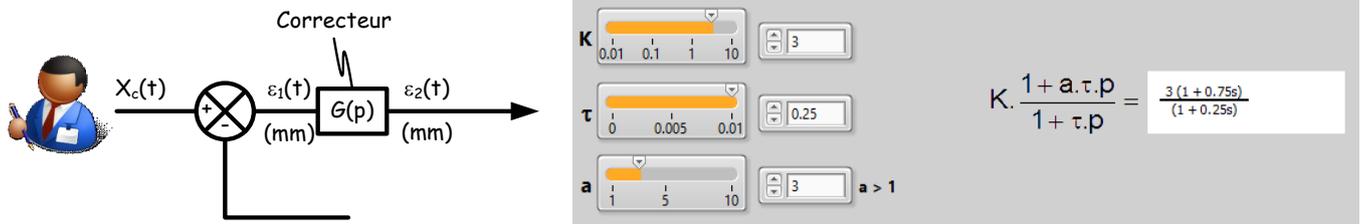


Control'X

Quelques modèles de Control'X

On présente très succinctement quelques types de modèles que l'on peut envisager.

Dans tous les modèles, les valeurs numériques à retenir pour le correcteur sont celles indiquées sous Control'Drive : cela paraît évident mais ce n'est pas si fréquent !

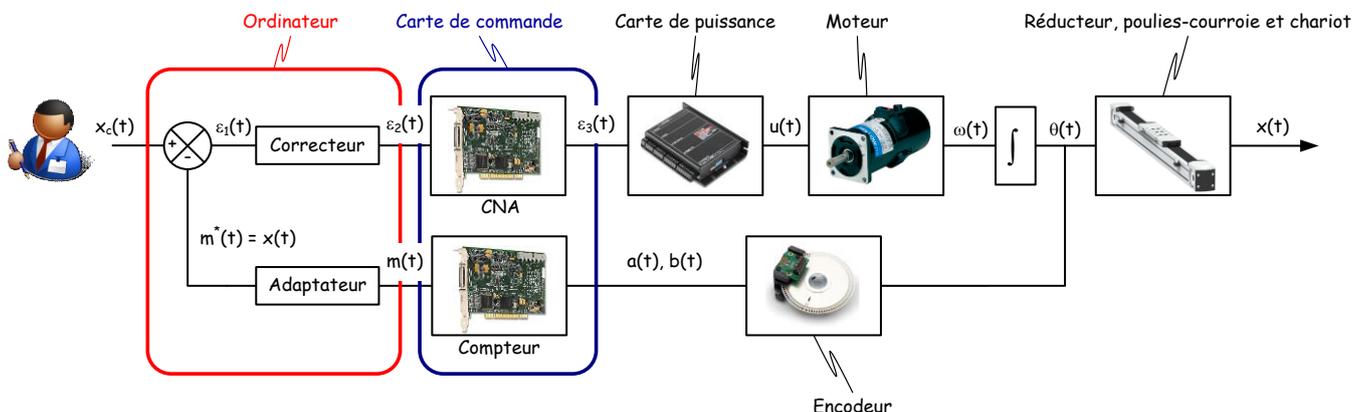


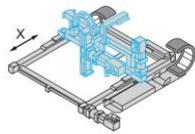
Exemple : si le correcteur à avance de phase ci-dessus est mis en place, les valeurs du correcteur $G(p)$ sont à renseigner dans le modèle comme ceci : $G(p) = \frac{3 \cdot (1 + 0.75 \cdot p)}{1 + 0.25 \cdot p}$

Tous les modèles sont justifiés et détaillés dans le document "6 Éléments de modélisation" du dossier technique.

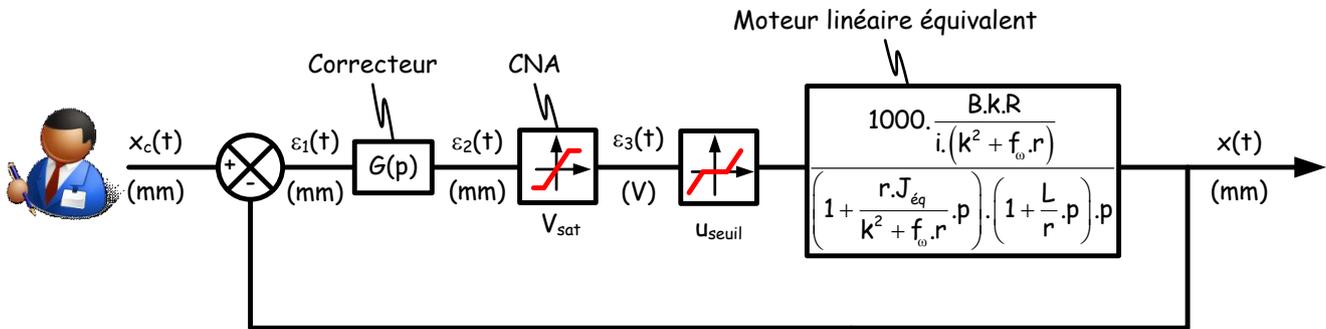
Dans les modèles qui suivent, un moteur linéaire équivalent désigne un moteur dont l'entrée est une tension et la sortie une vitesse linéaire ou une position linéaire selon le point de vue envisagé.

La structure de l'asservissement est celle-ci-dessous :





Modèle 1 : Saturation de la carte de commande, frottements secs modélisés par une tension de seuil



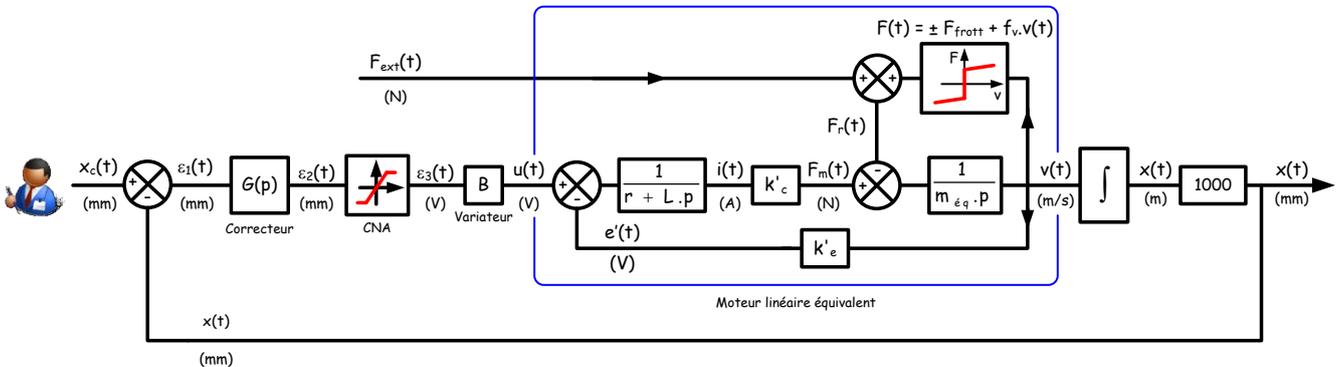
Application numérique :

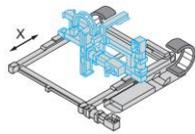
$$\frac{1000 \cdot \frac{B.k.R}{i.(k^2 + f_o.r)}}{\left(1 + \frac{r.J_{\text{eq}}}{k^2 + f_o.r} \cdot p\right) \cdot \left(1 + \frac{L}{r} \cdot p\right) \cdot p} = \frac{136}{(1 + 0.022 \cdot p) \cdot (1 + 6.27 \times 10^{-4} \cdot p)}$$

$V_{\text{sat}} = \pm 10 \text{ V}$

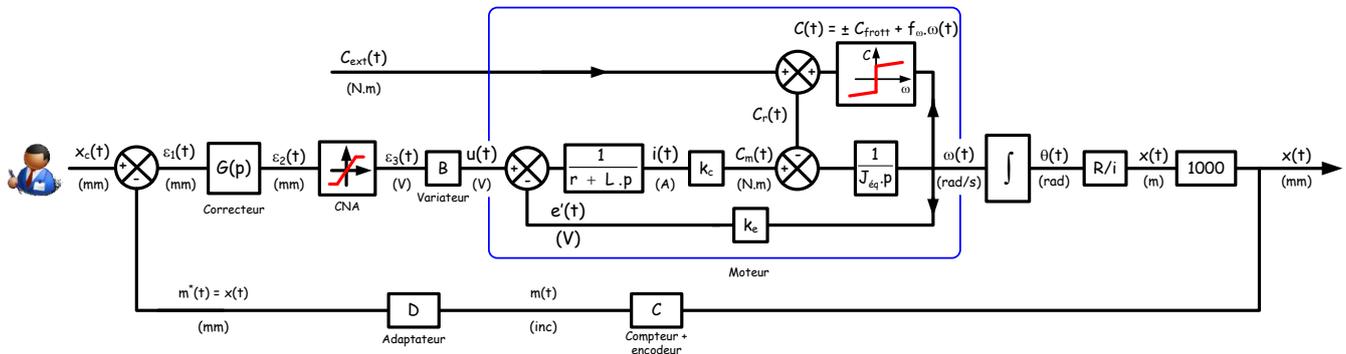
$U_{\text{seuil}} \approx 1.5 \text{ V}$

Modèle 2 : Saturation de la carte de commande, détail du moteur linéaire équivalent, frottements secs et visqueux





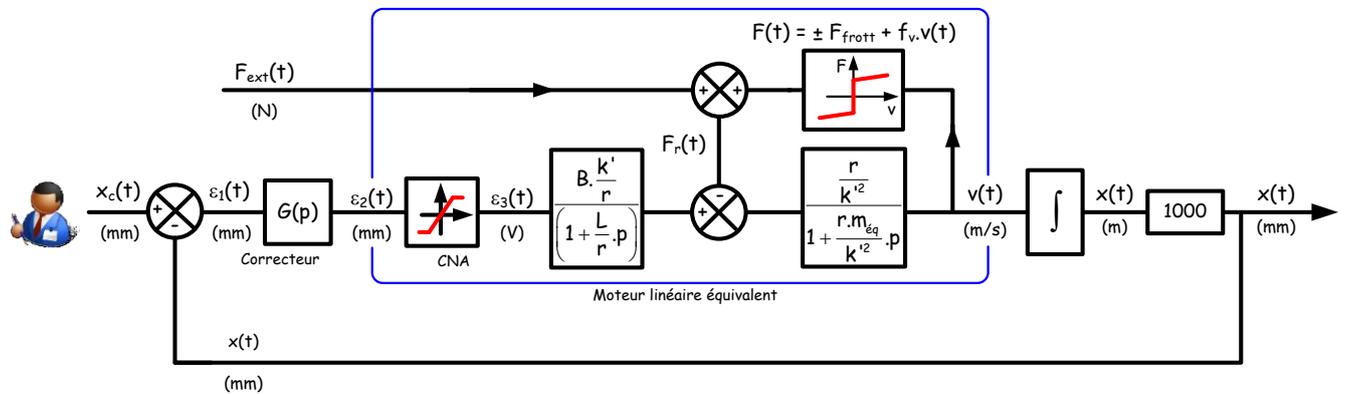
Modèle 3 : Saturation de la carte de commande, détails du moteur, frottements secs et visqueux



Application numérique :

$$\frac{R}{i} = 8.22 \times 10^{-3}$$

Modèle 4 : Saturation de la carte de commande, frottements secs et visqueux, blocs amonts et aval de la perturbation



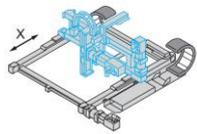
Application numérique :

$$B \cdot \frac{k'}{r} = 19.9$$

$$\frac{L}{r} = 6.27 \times 10^{-4}$$

$$\frac{r}{k'^2} = 7.88 \times 10^{-3}$$

$$\frac{r \cdot m_{eq}}{k'^2} = 0.025$$

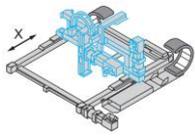


| Grandeur | Paramètre | Valeur | Unité | Observations |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Résistance interne du moteur | r | 5.1 | Ω | |
| Inductance du moteur | L | 3.2×10^{-3} | H | |
| Constante de couple du moteur | k_c | 0.21 | N.m/A | |
| Constante de force contre électromotrice | k_e | 0.2083 | V/(rad/s) | |
| Moyenne des constantes de couple ou de force contre électromotrice | k | 0.21 | N.m/A ou V/(rad/s) | $\frac{k_c + k_e}{2}$ |
| Constante de couple du moteur linéaire équivalent | k'_c | 25.5 | N/A | $k_c \cdot \frac{i}{R}$ |
| Constante de force contre électromotrice du moteur linéaire équivalent | k'_e | 25.3 | V/(m/s) | $k_e \cdot \frac{i}{R}$ |
| Moyenne des constantes de couple ou de force contre électromotrice du moteur linéaire équivalent | k' | 25.5 | N/A ou V/(m/s) | $\frac{k'_c + k'_e}{2}$ |
| Gain en tension de l'interface de puissance | B | 4 | | réglage interne au variateur |
| Rapport de réduction du réducteur | i | 3 | | rapport entrée/sortie |
| Rayon primitif des poulies crantées | R | 24.67×10^{-3} | m | 155 mm/tour |
| Tension de saturation de la carte de commande | V_{sat} | ± 10 | V | gain de la carte : 1 |
| Résolution du couple {codeur incrémental + compteur - décompteur} | C | 636.6 | inc/rad | $\frac{4 \times 1000}{2\pi}$ 1000 points par tour décodé en $\times 4$ |
| Gain de l'adaptateur | D | 0.0129 | mm/inc | $\frac{1000.R}{i.C}$ |

| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| Couple de frottement sec de tout le mécanisme ramené sur le chariot | F_{frott} | ≈ 28 | N | |
| Couple de frottement sec de tout le mécanisme ramené sur le moteur | C_{frott} | ≈ 0.23 | N.m | $\frac{F_{frott} \cdot R}{i}$ |
| Coefficient de frottements visqueux ramenés sur le chariot | f_v | ≈ 20 | N/(m/s) | |
| Coefficient de frottements visqueux ramenés sur le moteur | f_ω | $\approx 1.36 \times 10^{-3}$ | (N.m)/rad/s | $f_v \cdot \frac{R^2}{i^2}$ |
| Tension de seuil du moteur | U_{seuil} | ≈ 1.5 | V | $C_{frott} \cdot \frac{r}{k}$ |

| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Masse équivalente de tout l'équipage mobile ramené sur le chariot | $m_{\text{éq}}$ | 3.2 | kg | |
| Masse équivalente de tout l'équipage mobile ramené sur le moteur | $J_{\text{éq}}$ | 2.15×10^{-4} | kg.m ² | $m_{\text{éq}} \cdot \frac{R^2}{i^2}$ |

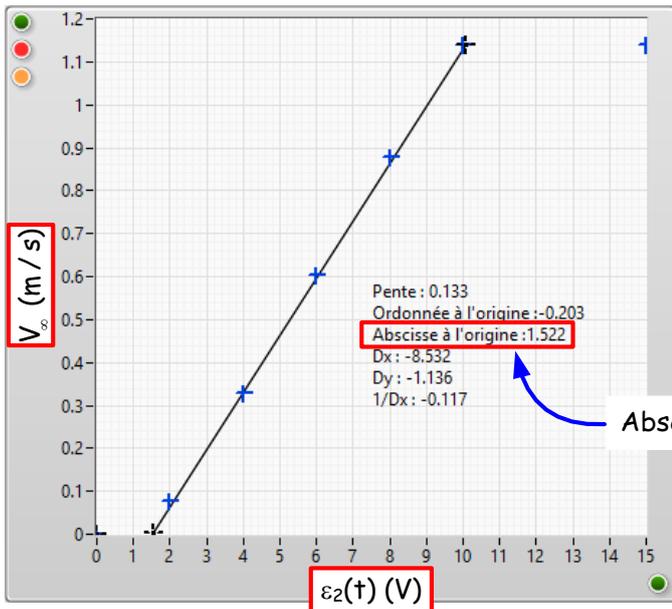
Toutes les valeurs encadrées en orange ne sont pas des caractéristiques annoncées par le constructeur mais sont estimées expérimentalement. En effet elles sont susceptibles de varier d'un axe à l'autre en fonction d'un grand nombre de paramètres dont le principal concerne la tension de précontrainte de la courroie.



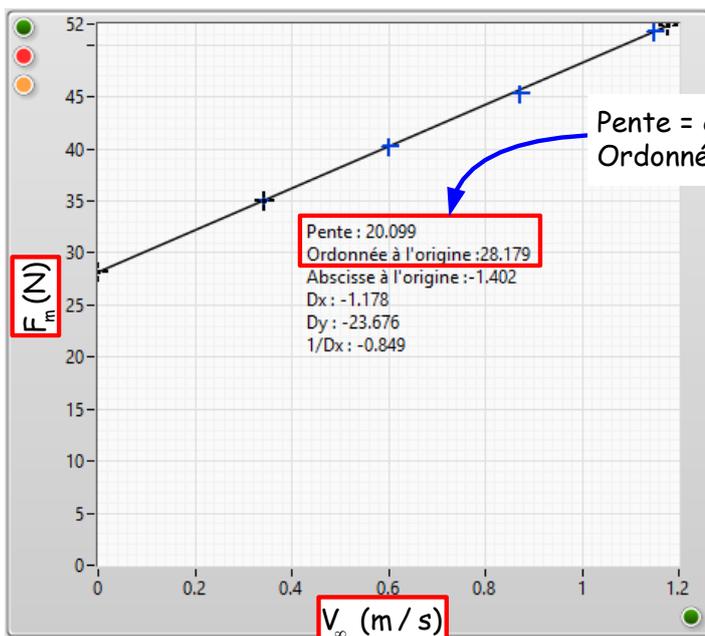
Il faut donc les retrouver par expérimentation pour chaque Control'X : c'est simple et rapide. Lancer la campagne de mesure suivante : essai en BO sous différentes tensions constantes $\varepsilon_2 = 0V, 2V, 4V, 6V, 8V$ et $10V$.

Pour chaque essai relever la vitesse finale atteinte V_∞ , et la force motrice $F_m = k \cdot i = 25.5 \cdot i$ (i est l'intensité moteur)

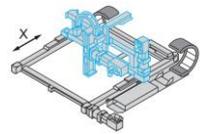
- Tracer $V_\infty = V_\infty(\varepsilon_2)$: l'abscisse à l'origine est la tension de seuil u_{seuil}
- Tracer $F_m = F_m(V_\infty)$: l'ordonnée à l'origine est l'effort de frottement sec et la pente le coefficient de frottement visqueux f_v .



Abscisse à l'origine = tension de seuil u_{seuil}



Pente = coefficient de frottement visqueux f_v
Ordonnée à l'origine = frottement sec F_{frott}



A propos de l'inertie équivalente :

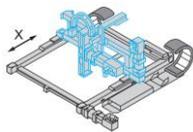
| Pièce | Nb | Inertie ramenée sur le moteur pour 1 élément (kg.m ²) | Inertie ramenée sur une poulie crantée (kg.m ²) | Inertie ramenée sur le chariot (kg) | Origine de la valeur numérique |
|--------------------------------------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Arbre moteur | 1 | 0.037×10 ⁻³ | | | Constructeur |
| Génératrice tachymétrique | 1 | 0.012×10 ⁻³ | | | Constructeur |
| Encodeur incrémental | 1 | 8×10 ⁻⁸ | | | Constructeur |
| Réducteur | 1 | 1.35×10 ⁻⁵ | | | Constructeur |
| Joint d'accouplement | 1 | | 2.53×10 ⁻⁵ | | Constructeur |
| Bagues intérieures de roulement + billes (mvt. épicycloïdal) | 4 | | 4.4×10 ⁻⁵ | | Estimation SolidWorks |
| Poulie crantée | 2 | | 4.2×10 ⁻⁵ | | Estimation SolidWorks |
| Courroie | 1 | | | 0.16 | Constructeur |
| Chariot + guidage (par 4 roulements) | 1 | | | 0.9 | Constructeur |
| Accessoires embarqués sur chariot * | 1 | | | 0.525 | Pesée directe |
| Ensemble capteur d'effort ** | 1 | | | 0.200 | Pesée directe |
| Total de tout ce qui a le mouvement de l'arbre moteur | | 6.26×10 ⁻⁵ | | | |
| Total de tout ce qui a le mouvement de l'arbre de la poulie | | | 2.85×10 ⁻⁴ | | |
| Total de tout ce qui a le mouvement du chariot | | | | 1.74 | |
| Total | | 2.15×10⁻⁴ | 1.9×10⁻³ | 3.18 | |

* support de PCB + PCB + came + flèche blanche + moitié de la masse du câble SubD15 + moitié de la masse de la chaîne porte câble + capteur de règle magnétique + câble + connecteur SubD15



** Equerre, capteur d'effort, poignée en bakélite

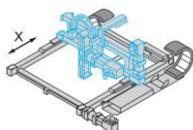




Control'X

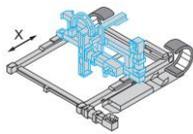
Éléments de modélisation





Ctrl + clic pour suivre un lien

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Structure de Control'X : présentation générale | page 3 |
| Modèle pour commencer : modèle de base | page 9 |
| <p style="text-align: center;">Limites du modèle de base</p> <p style="text-align: center;">Le PC : l'échantillonnage</p> | page 18 |
| Le PC : le codage de l'information | page 19 |
| Le PC : le caractère non temps réel du traitement effectué | page 22 |
| La carte de commande : la saturation | page 24 |
| La carte de commande : la quantification | page 26 |
| La carte de puissance : le PWM | page 28 |
| La carte de puissance : la saturation en tension | page 29 |
| La carte de puissance : la saturation en intensité | page 38 |
| La carte de puissance : la dynamique négligée | page 39 |
| Le moteur : la constante de temps électrique non prise en compte | page 42 |
| Le moteur : les perturbations négligées | page 43 |
| Codeur incrémental : la quantification | page 50 |
| La mécanique : jeu du réducteur, élasticité de l'accouplement et de la courroie | page 56 |
| En résumé : Différences modèle - réel | page 57 |
| Modélisation du moteur seul | page 60 |
| Du schéma bloc du motoréducteur en schéma d'un moteur équivalent | page 63 |
| Modèle mécanique | page 65 |
| Schéma bloc d'un moteur linéaire équivalent | page 72 |
| Modèles plus évolués sur la base du moteur linéaire équivalent : équivalence tension de seuil frottements secs | page 75 |
| Modèles dérivés du modèle de moteur linéaire équivalent : prise en compte de tous les efforts perturbateurs | page 90 |



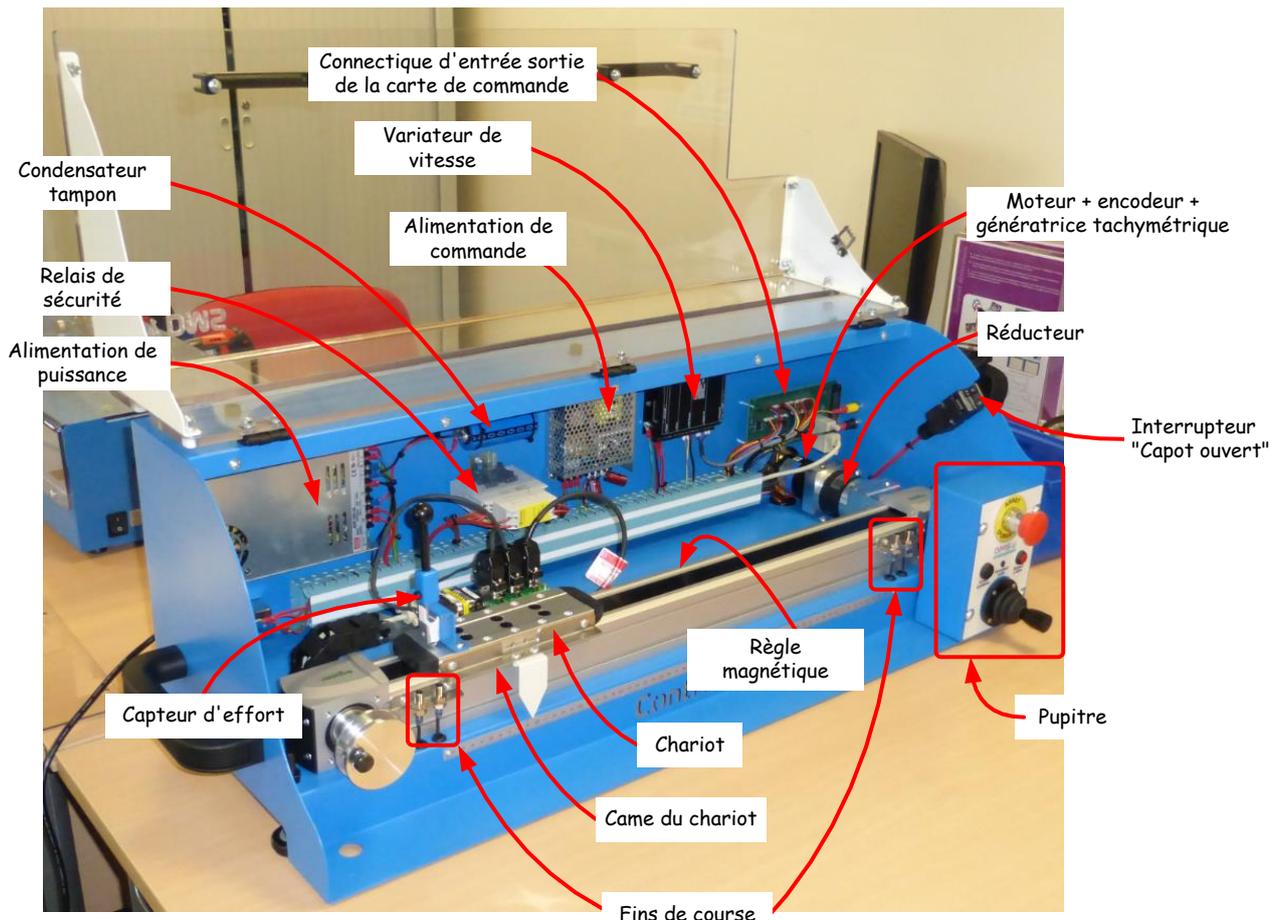
Structure de Control'X

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Les schémas ci-après présentent l'architecture de Control'X :

Control'X est un axe linéaire asservi en position. Il repose principalement sur les éléments matériels suivants :

- Un PC qui fait tourner un logiciel de commande d'axe nommé Control'Drive
- Une carte de commande
- Une carte de puissance
- L'axe proprement dit : moteur, réducteur, poulies-courroie, chariot et codeur incrémental monté sur l'arbre du moteur



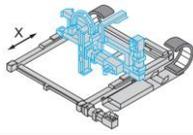
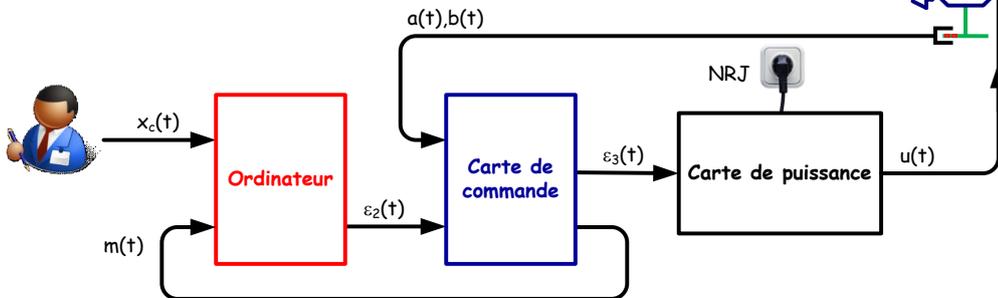
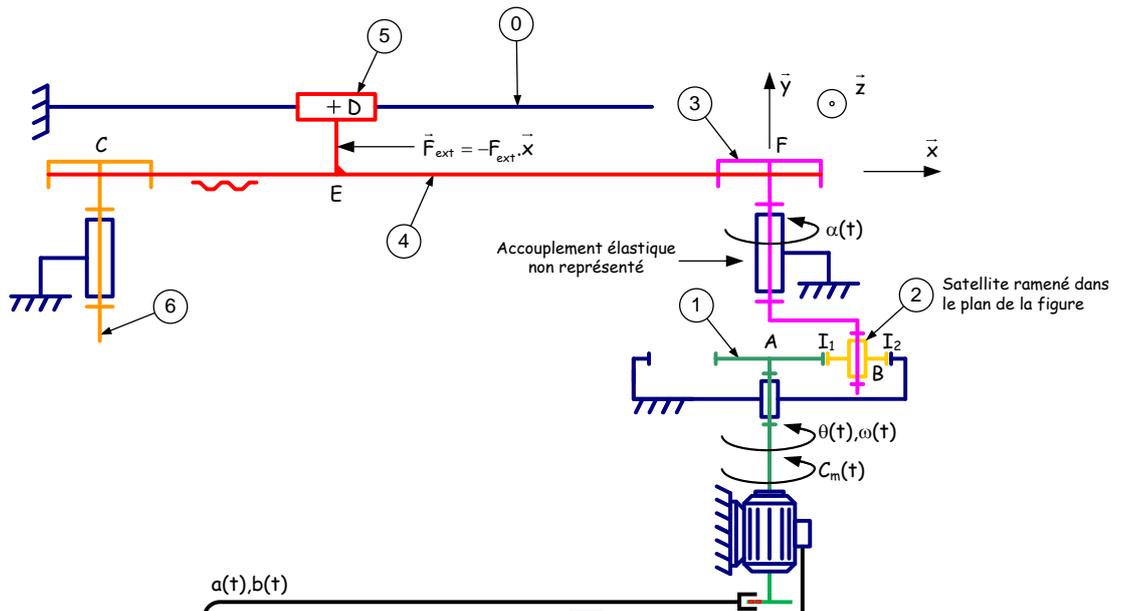
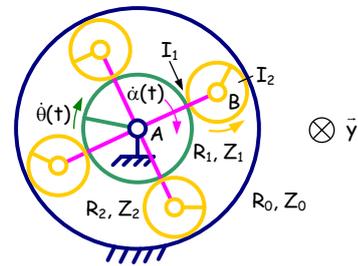
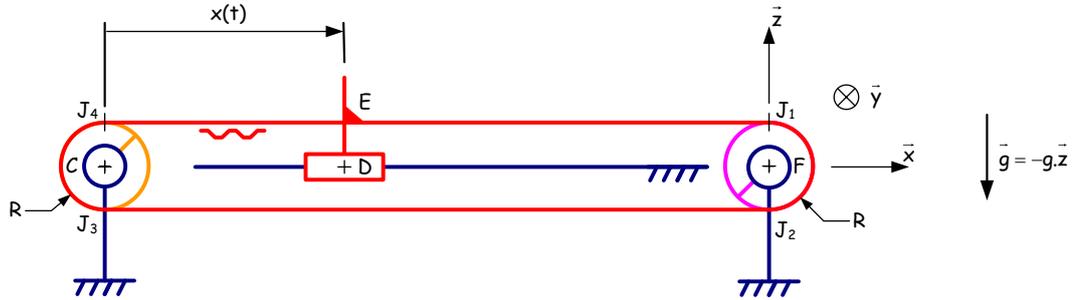
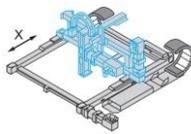
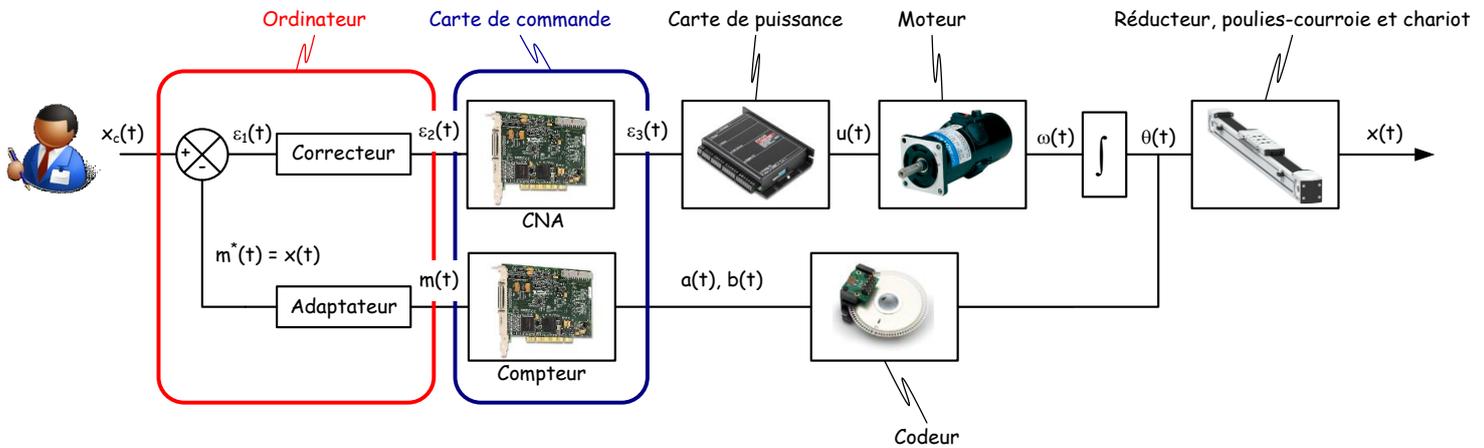


Schéma d'ensemble :





Le schéma ci-dessous met en évidence l'organisation structurelle et fonctionnelle des différents composants nécessaires à la mise en œuvre de l'asservissement de position.



Fonction de la carte de commande :

Coté acquisition :

- Acquérir les deux signaux $a(t)$ et $b(t)$ en quadrature de phase venant du codeur incrémental.
- Compter ou décompter les impulsions $a(t)$ et $b(t)$ reçues pour élaborer un signal numérique $m(t)$ en incréments image de la position linéaire $x(t)$ du chariot.
- Transmettre le résultat de ce comptage $m(t)$ à l'ordinateur.

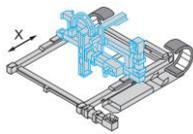
Coté génération

- Recevoir le signal "écart corrigé" $\varepsilon_2(t)$ provenant de l'ordinateur
- Elaborer la tension analogique $\varepsilon_3(t)$ par conversion numérique analogique de $\varepsilon_2(t)$

Nota : La carte de commande ne se comporte qu'en interface entre le PC et la partie mécanique : ce n'est pas elle qui effectue les calculs de commande d'axe (adaptation, soustraction, correction).

Fonction de l'ordinateur :

- Acquérir la consigne $x_c(t)$ de l'utilisateur (entrée directement en mm par l'utilisateur).
- Adapter le signal de mesure $m(t)$ en incréments en signal $m^*(t) = x(t)$ en mm : c'est l'équivalent du bloc adaptateur que l'on rencontre souvent devant le soustracteur. Plutôt que d'adapter la consigne, c'est ici la mesure qui est adaptée.
- Soustraire le signal $m^*(t) = x(t)$ au signal de consigne $x_c(t)$ pour obtenir l'écart $\varepsilon_1(t)$
- Appliquer un algorithme de correction pour transformer l'écart $\varepsilon_1(t)$ en écart corrigé $\varepsilon_2(t)$

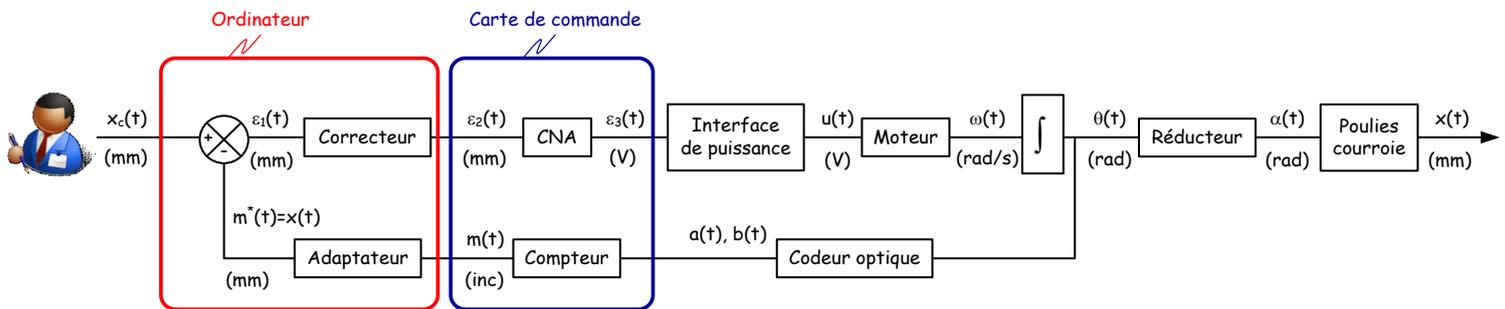


Fonction de la carte de puissance :

La carte utilisée ici est un servo-amplificateur qui peut intégrer en interne une boucle de courant (avec un correcteur PI) et/ou une boucle de vitesse (aussi avec correcteur PI). Ici cette carte n'est utilisée qu'en mode "variateur de vitesse" : les boucles internes de courant et de vitesse sont désactivées. Le terme "servo" n'est donc plus tellement justifié dans notre application. Cette carte de puissance est aussi indifféremment désignée sous les vocables "variateur de vitesse" ou "interface de puissance".

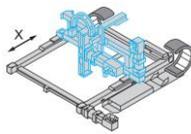
La carte de puissance est configurée en gain pur entre le signal $\varepsilon_3(t)$ et $u(t)$.

On travaille en boucle fermée avec les signaux suivants dans les unités indiquées :

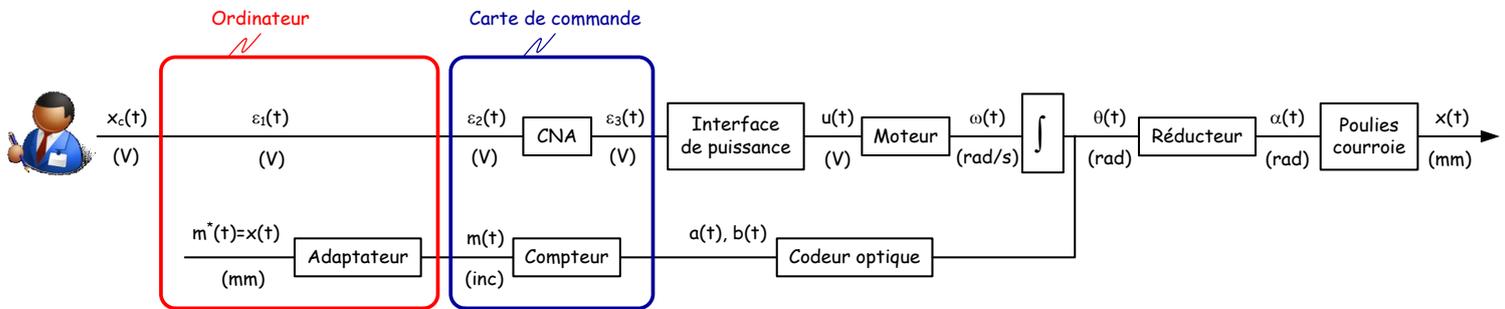


| Signaux | Unités |
|------------------------------------------------------|--------------------------|
| $m(t)$ | incréments |
| $\varepsilon_3(t), u(t)$ | volts |
| $\omega(t)$ | rad/s |
| $\theta(t), \alpha(t)$ | rad |
| $x(t)$ | mm (réels) |
| $x_c(t), m^*(t), \varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ | mm (dans l'ordinateur *) |

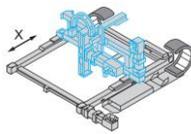
(*) On pourrait aussi prendre le point de vue de considérer que le signal $\varepsilon_2(t)$ est en volts. Dans tous les cas, on est dans l'ordinateur, les signaux sont ici codés en virgule flottante sur 8 octets (IEEE 64 bits). Il n'y a pas d'unités, on pourrait parler en bits ou en incréments mais on choisira ici de tout exprimer en mm ou encore dans toute autre unité que l'on veut bien imaginer et qui nous permettra de faciliter l'analyse des signaux (des %, des rapports cycliques, des volts, des mm, des incréments...).



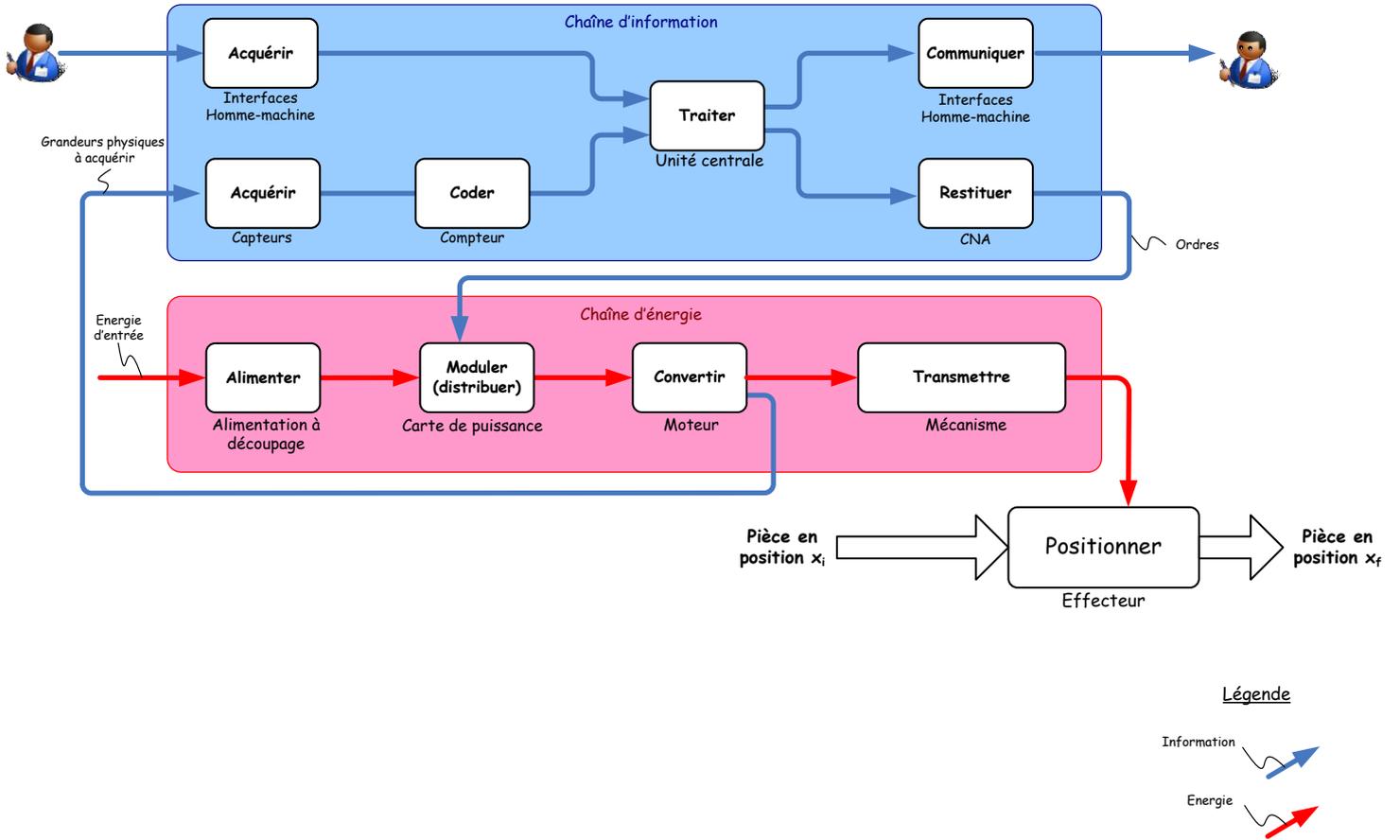
Lorsqu'on se placera en boucle ouverte, ce sera plus pratique de considérer que $x_c(t) = \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t)$ et de considérer que ces trois signaux sont des volts :

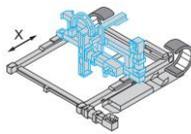


| Signaux | Unités |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $m(t)$ | incréments |
| $x_c(t), \varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \varepsilon_3(t), u(t)$ | volts |
| $\omega(t)$ | rad/s |
| $\theta(t), \alpha(t)$ | rad |
| $x(t)$ | mm (réels) |
| $m^*(t)$ | mm (dans l'ordinateur) |



Le schéma de la chaîne fonctionnelle résume l'ensemble de ce qui a été dit :



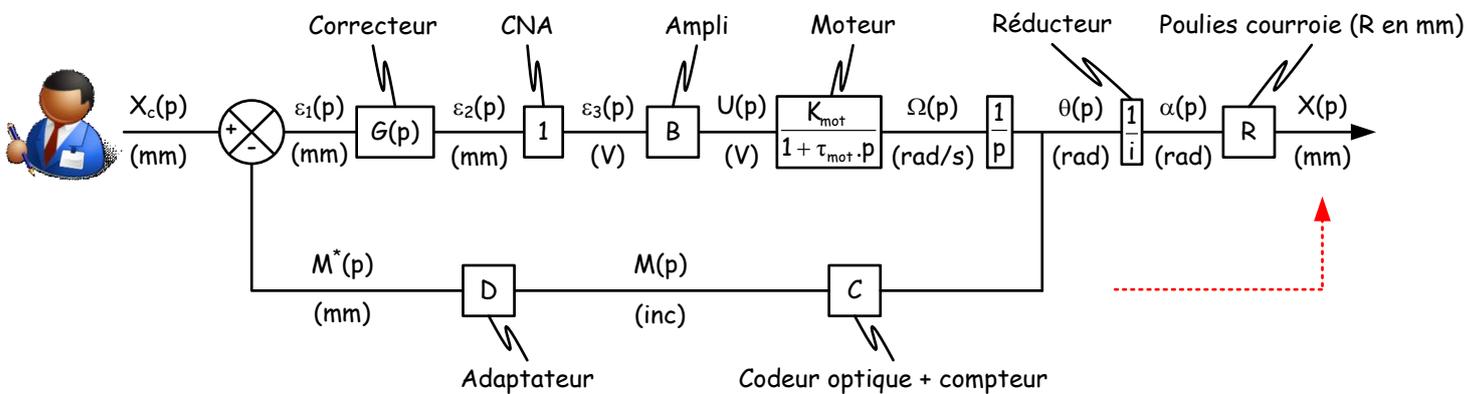


Modèle pour commencer

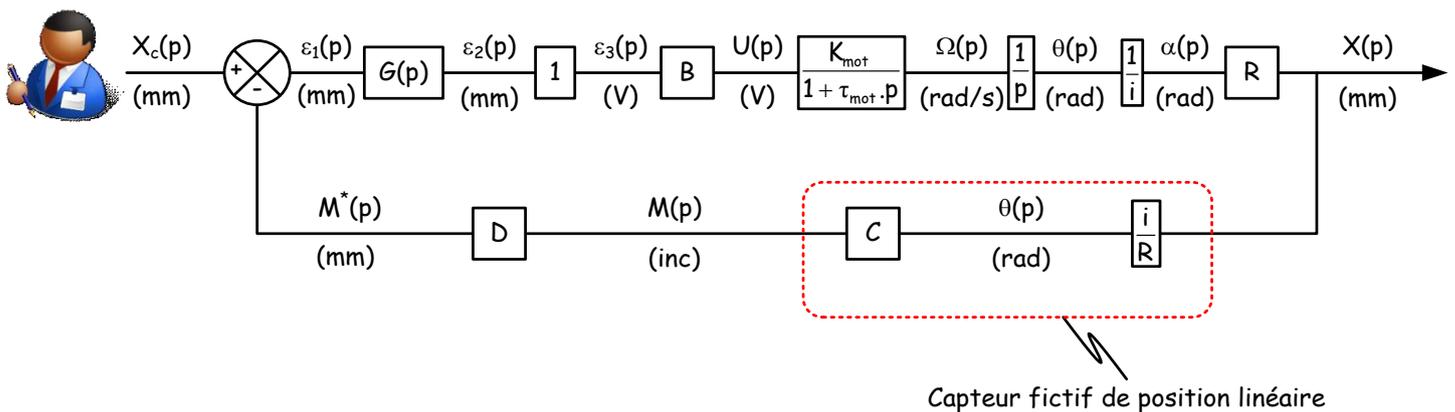
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Hypothèses générales : Modèle linéaire, non perturbé, constante de temps électrique du moteur négligée devant la constante de temps mécanique.

Voici la modélisation servant de point de départ :



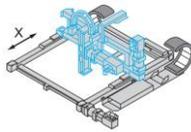
En modifiant le point de piquage du codeur, on obtient le schéma :



Cette transformation fait apparaître un capteur fictif de position linéaire de gain $\frac{iC}{R}$.

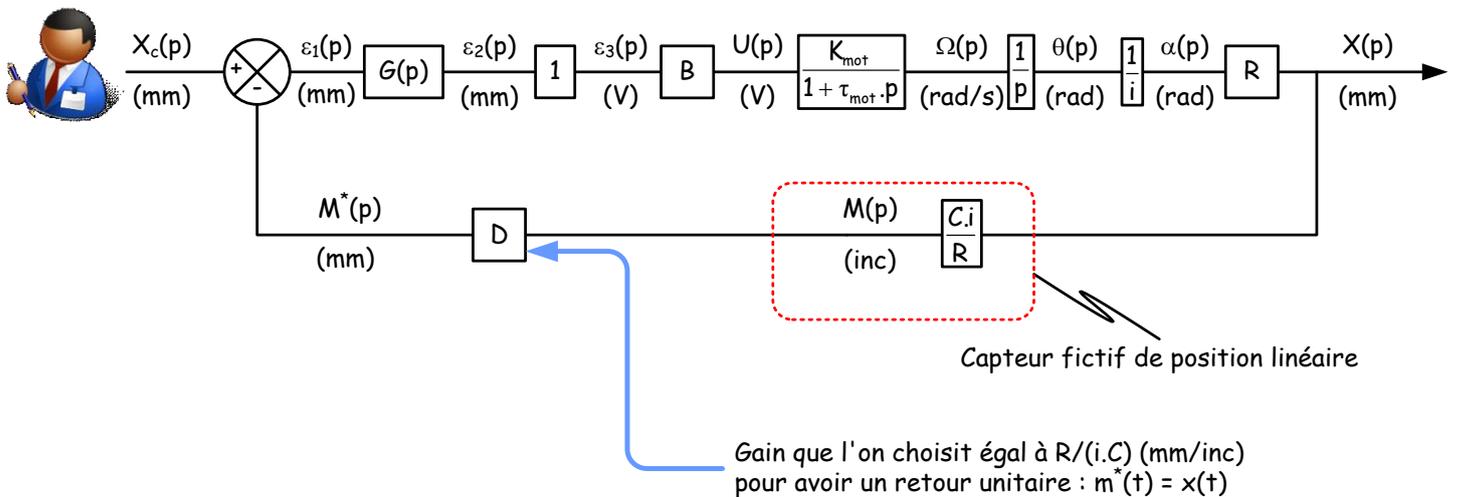
$C = 1000$ points par tour décodé en $\times 4$ (on compte tous les fronts, montants et descendants, des deux canaux A et B du codeur) soit 4000 incréments par tour de moteur ou 637 incréments/rad

Le gain $\frac{iC}{R}$ vaut 77.4 incréments par mm sur Control'X.

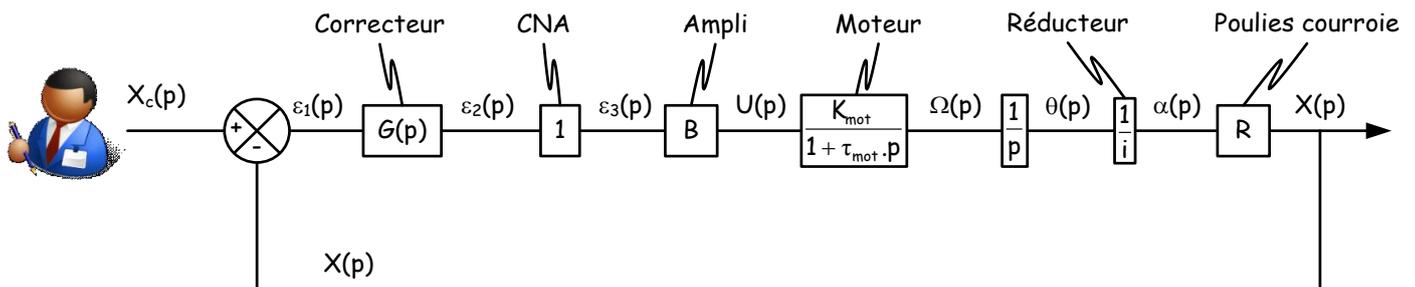


Il suffit maintenant de choisir la valeur du gain D de façon à rendre le retour unitaire : il faut choisir $D = \frac{R}{i.C}$. Cette adaptation est un calcul effectué par le processeur du PC.

Le gain D vaut $12.9 \mu\text{m}$ par incrément sur Control'X : c'est la résolution du capteur ramené sur le chariot.

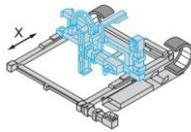


On obtient alors le schéma à retour unitaire :

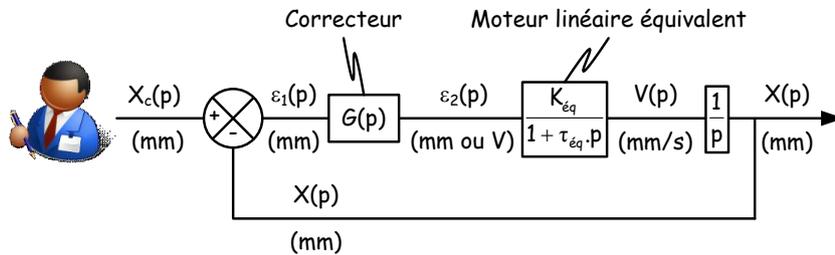


Nota : Le gain C du capteur n'intervenant plus dans la boucle ouverte, il n'aura aucune influence sur le comportement dynamique de l'asservissement. Les gains i et R eux influenceront la dynamique de l'asservissement.

Cela n'aurait pas été le cas si l'adaptateur avait été placé devant le soustracteur.



En regroupant tous les blocs de la chaîne directe mis à part le correcteur, on obtient un "moteur linéaire équivalent" : Son entrée $\varepsilon_2(t)$ est en volts et sa sortie $v(t)$ en mm/s ou $x(t)$ en mm.



En commençant avec un correcteur proportionnel $G(p) = G$, on a :

$$H_{bo}(p) = \frac{X(p)}{\varepsilon_1(p)} = \frac{G \cdot K_{\acute{e}q}}{p \cdot (1 + \tau_{\acute{e}q} \cdot p)} \quad \text{où } K_{\acute{e}q} = \frac{B \cdot K_{\text{mot}} \cdot R}{i} \quad \text{et } \tau_{\acute{e}q} = \tau_{\text{mot}}$$

La boucle ouverte est de classe 1 et a un gain de boucle, $K_{BO} = G \cdot K_{\acute{e}q} = G \cdot \frac{B \cdot K_{\text{mot}} \cdot R}{i}$

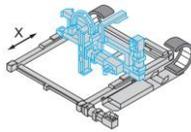
$$\text{On en déduit } H_{bf}(p) = \frac{X(p)}{X_c(p)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{G \cdot K_{\acute{e}q}} \cdot p + \frac{\tau_{\acute{e}q}}{G \cdot K_{\acute{e}q}} \frac{p^2}{\omega_{\text{nbf}}^2}} = \frac{K_{bf}}{1 + \frac{2 \cdot \zeta_{bf}}{\omega_{\text{nbf}}} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_{\text{nbf}}^2}}$$

$$\text{où } \begin{cases} K_{bf} = 1 \\ \zeta_{bf} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{G \cdot K_{\acute{e}q} \cdot \tau_{\text{mot}}}} \\ \omega_{\text{nbf}} = \sqrt{\frac{G \cdot K_{\acute{e}q}}{\tau_{\text{mot}}}} \end{cases}$$

Nota : Le choix de l'unité de $x(t)$ en mm a une conséquence importante sur le gain de boucle ouverte : il le multiplie par 1000. Si l'unité choisie avait été le mètre, ce gain de boucle aurait été 1000 fois plus petit. Avec ce choix d'unité en mm, le gain G du correcteur proportionnel par exemple est à choisir dans l'intervalle [0.1 et 5] selon les performances visées. Pour obtenir le même comportement, ce gain aurait dû être choisi dans l'intervalle [100, 5000] si l'unité de $x(t)$ avait été le mètre.

Avec un gain de correcteur proportionnel $G = 1$, et un gain $B = 4$, on a une tension moteur de 40 V pour 10 mm d'écart avec les unités choisies en mm.

On aurait une tension moteur de 40 mV pour ce même écart de 10 mm = 0.01 m si l'unité de $x(t)$ avait été le mètre. Evidemment le comportement de la boucle fermée n'aurait pas été le même.



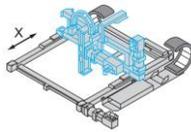
Valeurs numériques pour alimenter le modèle :

- $B = 4$
- $\tau_{\text{mot}} = 22 \text{ ms}$
- $R = 24.67 \text{ mm}$
- $i = 3$
- $K_{\text{mot}} = 4 \text{ (rad/s)/V}$

Application numérique : Il faut laisser R en mm dans les calculs, on trouve :

$$K_{\text{éq}} = 132 \text{ (mm/s)/V}$$
$$\tau_{\text{éq}} = 0.022 \text{ s}$$

Par exemple avec un gain $G = 1$, on a $\left\{ \begin{array}{l} \zeta_{\text{bf}} = 0.3 \\ \omega_{\text{h bf}} = 77 \text{ rad/s} \end{array} \right.$



On donne ci-dessous les diagrammes fréquentiels de la boucle ouverte non corrigée :

$$H_{\text{bo-non corrigée}}(p) = \frac{K_{\text{éq}}}{p \cdot (1 + \tau_{\text{éq}} \cdot p)} = \frac{B \cdot K_{\text{mot}} \cdot R}{i \cdot p \cdot (1 + \tau_{\text{mot}} \cdot p)} = \frac{132}{p \cdot (1 + 0.022 \cdot p)}$$

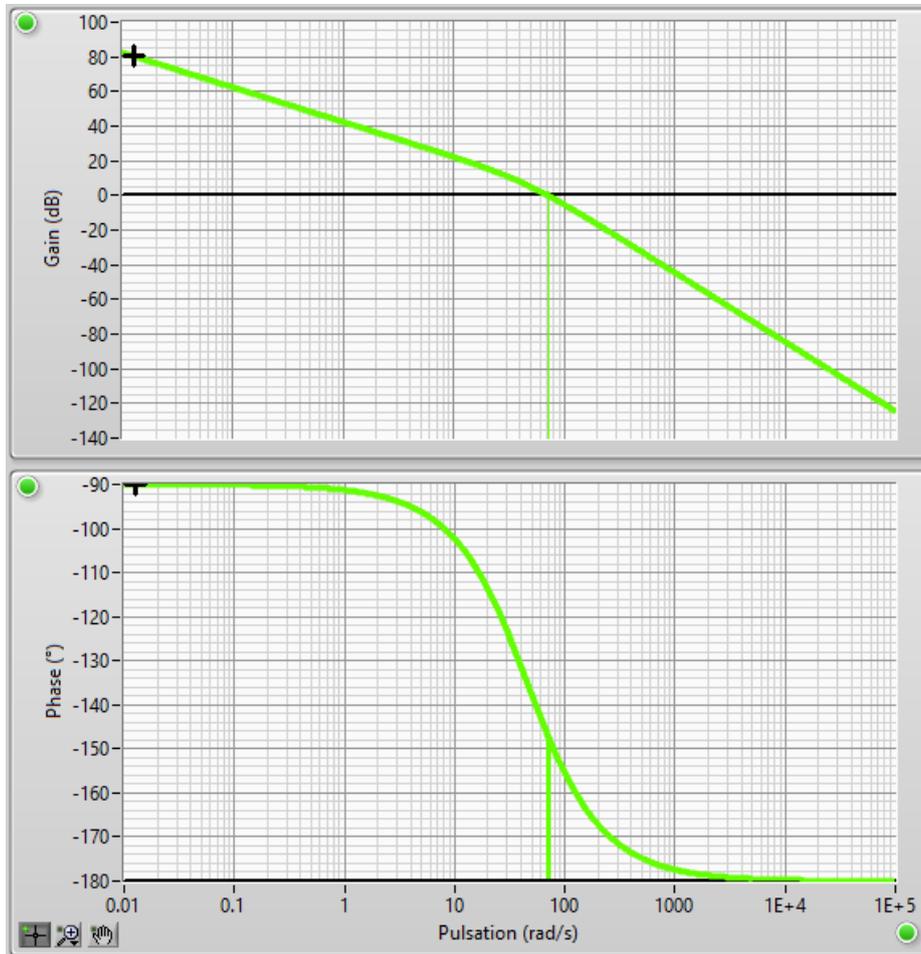


Diagramme de Bode de la boucle ouverte non corrigée

Hbo non corrigée

Pulsation de coupure à 0 dB (rad/s) :

Pulsation à la phase -180° (rad/s) :

Marge de gain (dB) :

Marge de phase (°) :

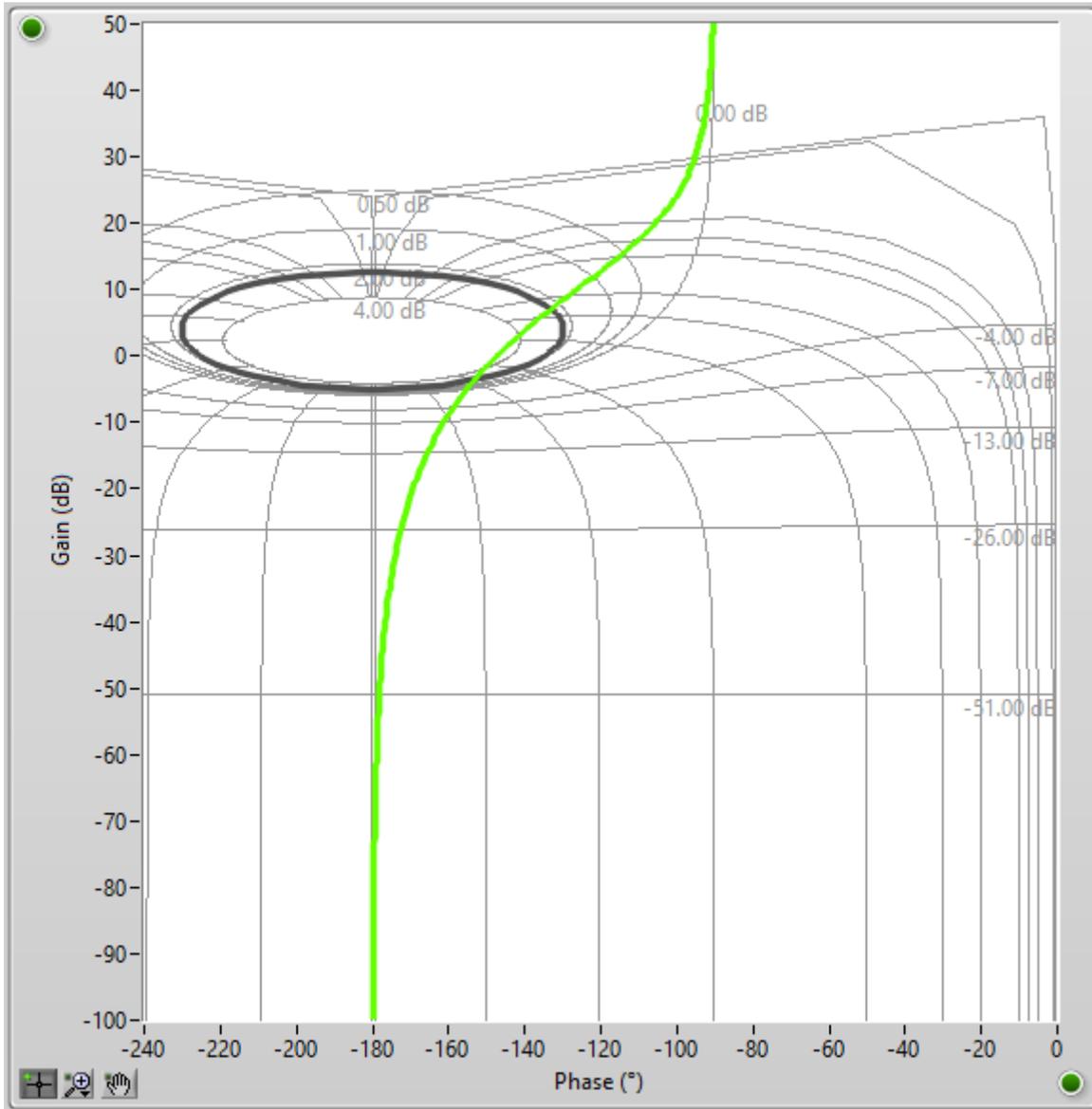
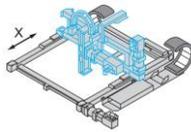


Diagramme de Black de la boucle ouverte non corrigée

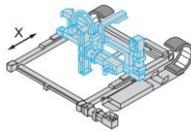
Hbo non corrigée

Pulsation de coupure à 0 dB (rad/s) :

Pulsation à la phase -180° (rad/s) :

Marge de gain (dB) :

Marge de phase (°) :



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

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

| 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 boucle ouverte 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. |

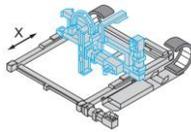
Prévision qualitative du comportement en boucle fermée par analyse de la fonction de transfert en boucle ouverte

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

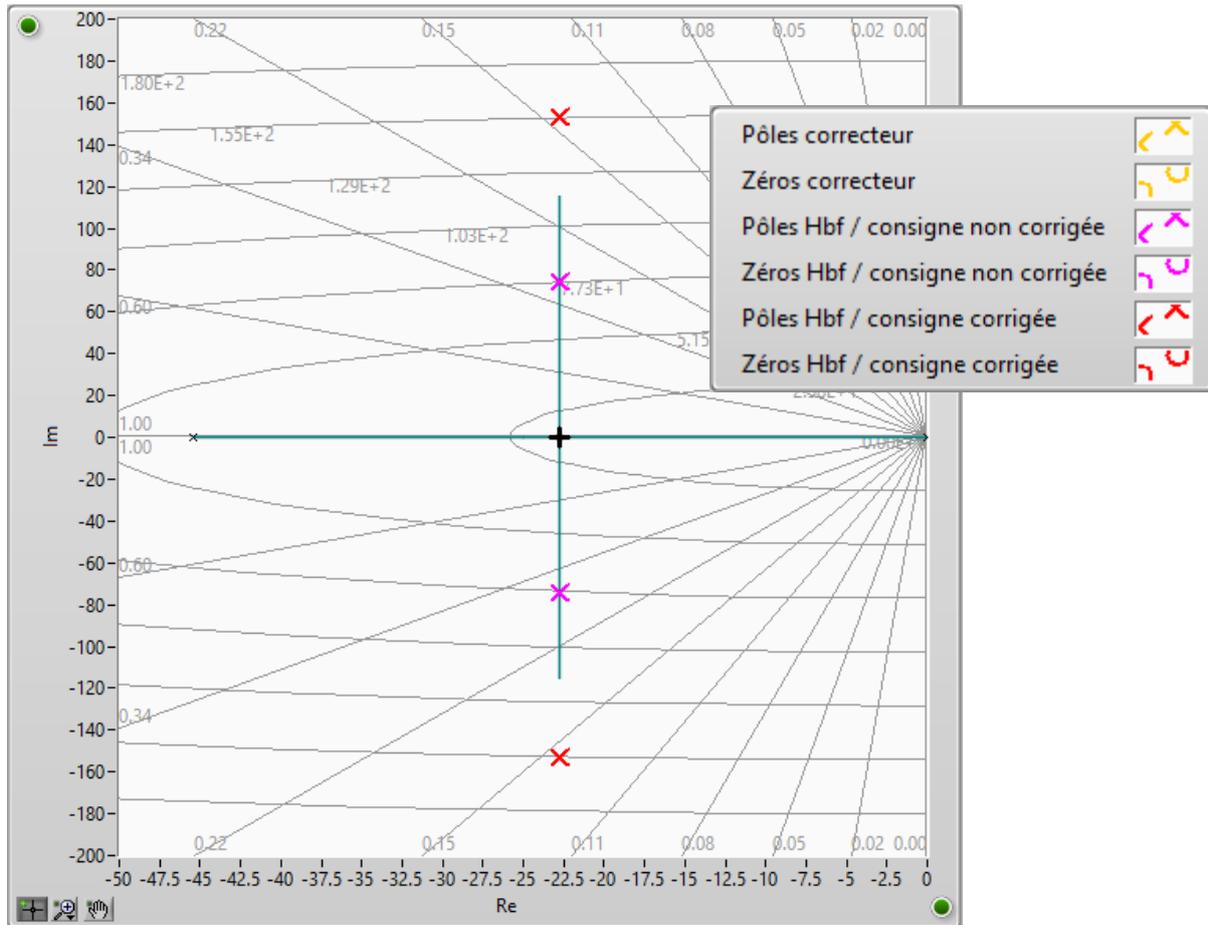
$$H_{bf}(p) = \frac{X(p)}{X_c(p)} = \frac{K_{bf}}{1 + \frac{2 \cdot z_{bf}}{\omega_{nbf}} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_{nbf}^2}} \quad \text{où : } \begin{cases} K_{bf} = 1 \\ \zeta_{bf} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{K_{bo} \cdot \tau_{mot}}} \\ \omega_{nbf} = \sqrt{\frac{K_{bo}}{\tau_{mot}}} \end{cases} \quad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

| 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 indicielles. (Raisonnement valable car retour est unitaire) |

Prévision qualitative du comportement en boucle fermée par analyse de la fonction de transfert en boucle fermée

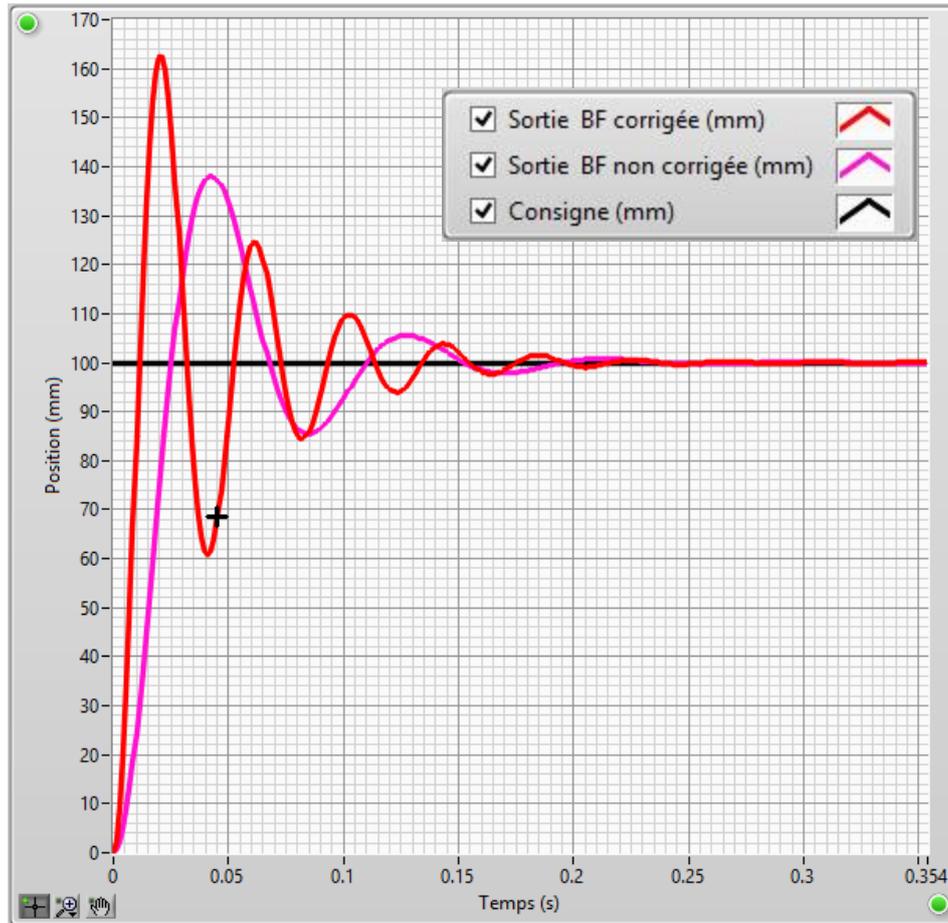
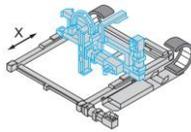


Nota : Lorsque $\zeta_{bf} < 1$ (à partir de $G > 0.09$ avec notre modèle linéaire) les modes du second ordre sont complexes conjugués. La réponse temporelle est alors enveloppée par des exponentielles du type $\pm e^{-\zeta_{bf} \omega_{hbf} \cdot t} = e^{-\frac{1}{2 \cdot \tau_{mot}} \cdot t}$. Le gain G n'apparaissant pas dans ces exponentielles, le temps de réponse à 5 % est donc quasiment indépendant de G . Il vaut environ $6 \cdot \tau_{mot} \approx 132$ ms au maximum. En effet, l'instant auquel les exponentielles enveloppes rentrent dans la bande à $\pm 5\%$ est un majorant du temps de réponse à 5%.



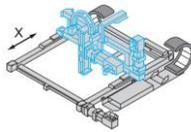
Lieu des pôles de la boucle fermée : En **rose** les pôles de la BF non corrigée ($G = 1$), en **rouge** les pôles de la BF corrigée par un gain $G = 4$, en **vert** le lieu d'Evans.

Les pôles sont sur une même verticale d'abscisse -22.7 : constante de temps associée $\tau = 2 \cdot \tau_{mot} = 1/22.7 = 44$ ms : le transitoire disparaît à 95% en $3 \cdot \tau = 132$ ms.



Réponse indicielle unitaire : En **rose** la réponse de la boucle fermée non corrigée ($G = 1$), en **rouge** la réponse de la boucle fermée corrigée par un gain $G = 4$.

Le temps de réponse à 5% vaut 101 ms pour la boucle fermée non corrigée et 107 ms pour la BF corrigée. Le système corrigé est plus vif et moins amorti comme prévu.



Limites du modèle

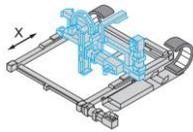
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Avec ce modèle très simple, des écarts modèle-réel interviennent à plusieurs niveaux. On a à priori par ordre d'importance décroissante les justifications suivantes :

- Saturations
- Perturbations négligées
- L'échantillonnage
- Dynamique du variateur de vitesse négligée
- Constante de temps électrique du moteur négligée devant sa constante de temps mécanique
- La quantification
- Le caractère non temps réel du traitement effectué par le PC
- Le PWM

Disons le tout de suite, comme nous allons le voir en conclusion, les deux sources d'écart principales sont :

- La saturation du CNA de la carte de commande à ± 10 V
- Les perturbations négligées : qu'elles soient du type frottements secs ou visqueux

**Écarts modèle-réel : du côté du PC et de la carte de commande**

Non continuité : l'échantillonnage

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

A chaque période d'échantillonnage, le PC envoie une requête à la carte de commande pour qu'elle effectue une conversion analogique numérique. Un bloqueur d'ordre 0 est utilisé en sortie de convertisseur numérique analogique.

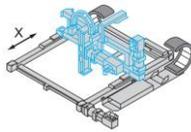
Le modèle mis en place est un modèle continu, alors que le système réel est échantillonné puisque le traitement est effectué à intervalles réguliers par le processeur du PC.

A correcteur donné, un système échantillonné est toujours moins amorti qu'un système continu. La période d'échantillonnage peut en effet être vue comme un retard qui forcément dégrade les marges de stabilité.

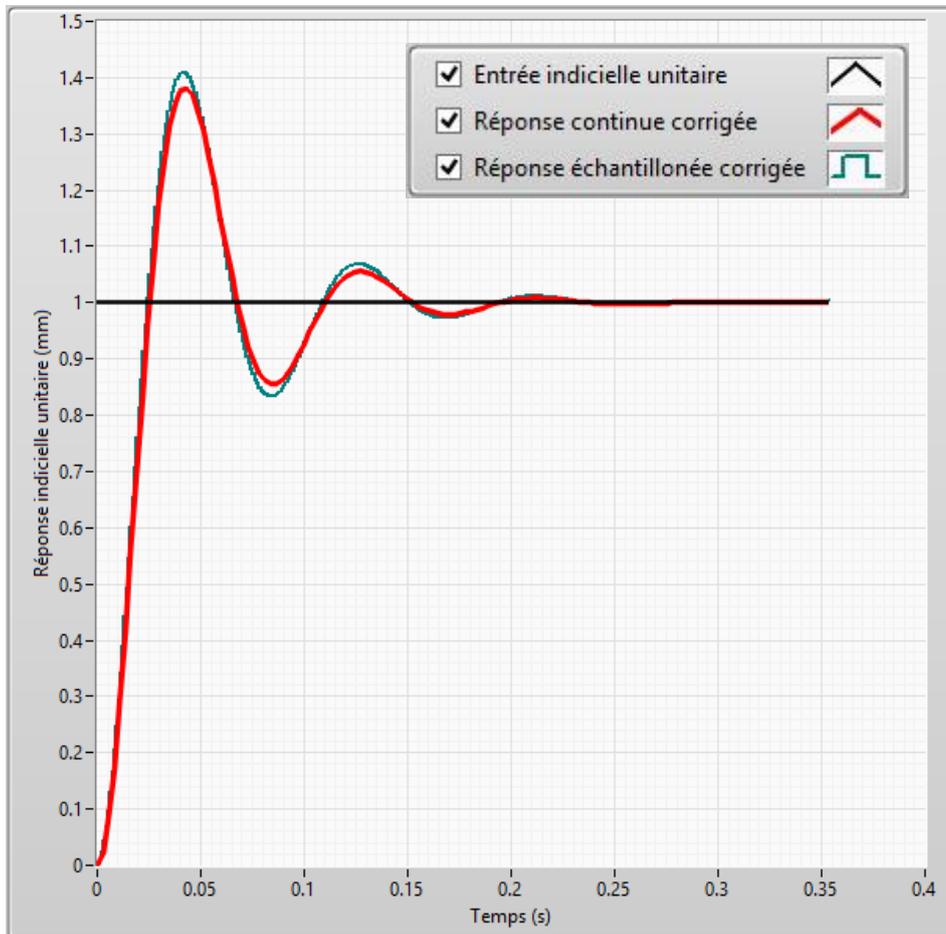
La période d'échantillonnage par défaut de Control'Drive est fixée à 1 ms. Cette période d'échantillonnage est quasiment toujours respectée (Une diode rouge s'allume en bas à droite de la barre d'état lorsque ce n'est pas le cas). Dans les faits, pour une période d'échantillonnage de 1 ms, aucune différence notable dans le comportement n'est à envisager entre le modèle continu et le modèle échantillonné.

Voir sous Control'Drive dans l'onglet "Synthèse correcteur", sous-onglet "Discretisation correcteur" pour traiter ce point de façon exhaustive.

Sous Matlab-Simulink, la période d'échantillonnage peut descendre à 0.05 ms (20 kHz). Par défaut, elle est réglée à 0.1 ms pour pouvoir observer des dynamiques rapides comme l'effet de la constante de temps électrique du moteur. A ces fréquences, l'effet de l'échantillonnage n'a strictement aucune influence sur les signaux observés et les modèles mis en place peuvent clairement être du type continu.

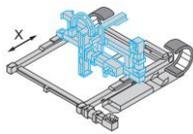


On compare ci-dessous les réponses indicielles unitaires de notre système sur la base d'un modèle continu et d'un modèle échantillonné (transformée en z) :

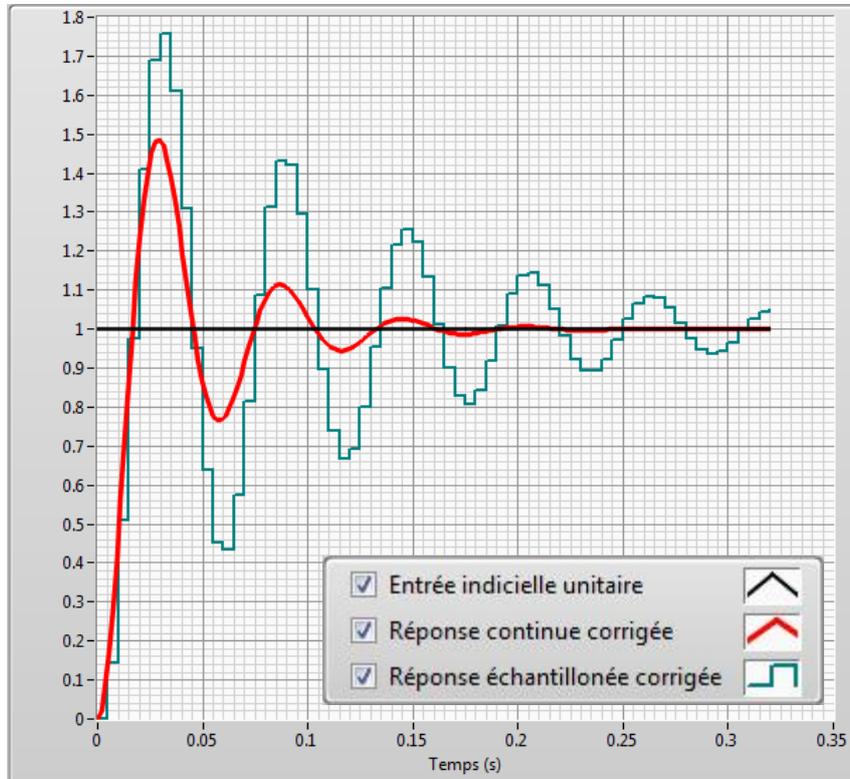


Réponse indicielle théorique avec un modèle continu (rouge) et un modèle échantillonné (vert) pour une période d'échantillonnage de 1 ms et un gain de correcteur $G = 1$.

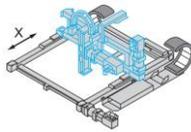
Conclusion : Avec une période d'échantillonnage de 1 ms et un gain de correcteur $G = 1$, l'erreur commise en travaillant sur un modèle continu alors que le système réel est échantillonné semble acceptable.



Avec un gain de correcteur plus important (système plus vif) et une période d'échantillonnage mal choisie, le modèle continu pourra rapidement ne plus donner d'indications valables :



Réponse indicielle théorique avec un modèle continu (rouge) et un modèle échantillonné (vert) pour une période d'échantillonnage de 5 ms et un gain de correcteur $G = 2$.



Ecart modèle-réel : du côté du PC

Codage de l'information

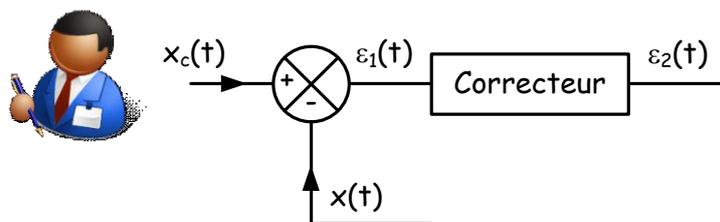
Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Le codage de l'information en virgule flottante sur 64 bits peut paraître exagérément précis mais le temps de calcul qui en découle n'est pas un facteur limitant la période d'échantillonnage de Control'Drive.

La période d'échantillonnage est réglée par défaut à 1 ms sur Control'Drive. C'est la valeur minimale.

Cette période est plutôt limitée non pas par la carte de commande qui autoriserait un échantillonnage jusqu'à 50 kHz mais par la gestion qui en est faite sous le système d'exploitation Windows.

Les signaux ci-dessous sont donc codés en virgule flottante sur 64 bits :



L'explication qui suit est tirée intégralement d'un polycopié de M Vergé, enseignant chercheur en automatique :

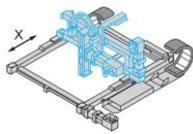
Influence de la représentation des nombres

Tout ordinateur utilise une représentation particulière des nombres. Certains ne travaillent qu'en nombres entiers, d'autres acceptent la représentation des nombres flottants. Plusieurs formats sont classiquement adoptés (norme IEEE) : par exemple un format 32 bits ou un format 64 bits est disponible en langage C. La précision de cette représentation provoque un comportement plus ou moins précis de la programmation du correcteur.

Considérons par exemple le correcteur ayant pour entrée $\epsilon_1(k)$ et pour sortie $\epsilon_2(k)$ à appliquer au bloqueur.

Supposons que l'équation récurrente du correcteur soit $\epsilon_2(k) = -b.\epsilon_2(k) + \epsilon_1(k) + a.\epsilon_1(k-1)$

Traitons deux cas pour l'entrée $\epsilon_1(k) = 1$:

Cas 1 : $a = -0.9999$ et $b = -0.9998996$

En effectuant les calculs sur un calculateur où les nombres sont représentés sur 64 bits, on obtient :

$$\begin{aligned}\varepsilon_2(0) &= 1 \\ \varepsilon_2(1) &= 0.999\ 999\ 6 \\ \varepsilon_2(2) &= 0.999\ 995\ 9 \\ \varepsilon_2(3) &= 0.999\ 995\ 18 \\ \varepsilon_2(4) &= 0.999\ 994\ 17 \\ \varepsilon_2(\infty) &= 0.996 \text{ pour } k \text{ très grand}\end{aligned}$$

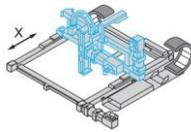
Cas 2 : $a = -0.999$ et $b = -0.9999$

En effectuant les calculs sur un calculateur où les nombres sont représentés sur 16 bits, on obtient :

$$\begin{aligned}\varepsilon_2(0) &= 1 \\ \varepsilon_2(1) &= 1.000\ 9 \\ \varepsilon_2(2) &= 1.001\ 7 \\ \varepsilon_2(3) &= 1.002\ 6 \\ \varepsilon_2(4) &= 1.003\ 5 \\ \varepsilon_2(\infty) &= 10.002 \text{ pour } k \text{ très grand}\end{aligned}$$

On constate donc que les valeurs calculées sont extrêmement différentes. Cette situation se produit chaque fois que les "pôles et zéros" du correcteur sont proche de 1.

L'ordre du correcteur est le rang du retard en ε_2 : dans l'exemple précédent, le correcteur est du premier ordre. Pour un correcteur d'ordre élevé, il est conseillé de l'implanter sous forme d'une somme de correcteurs élémentaires du premier ou du second ordre.



Écarts modèle-réel : du côté du PC

Caractère non temps réel du traitement effectué

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

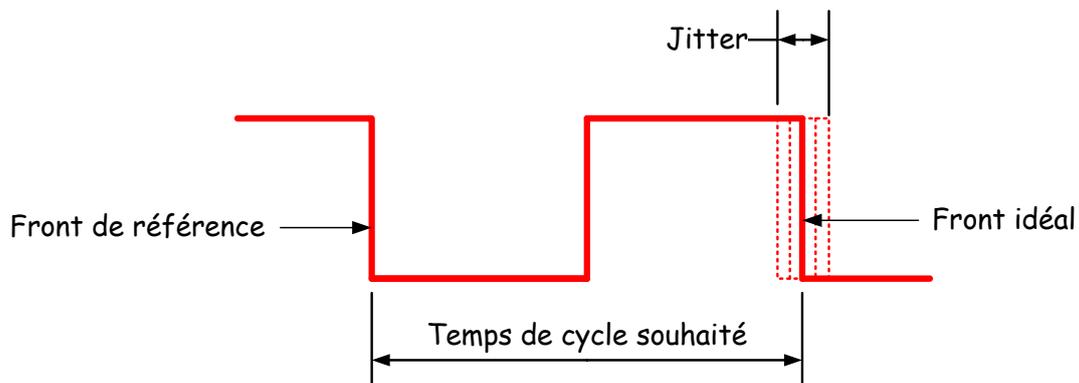
Control'Drive étant un logiciel de commande d'axe tournant dans l'environnement Windows, les calculs effectués peuvent souffrir de problèmes de déterminisme. Une priorité haute est demandée par LabVIEW sur les ressources processeur du PC pour pouvoir effectuer les calculs en temps et en heure. Le but étant d'essayer de respecter la période d'échantillonnage choisie. Mais rien ne peut garantir que Windows n'ira pas par exemple satisfaire une requête de l'antivirus ou une requête du réseau ou toute autre activité. La période d'échantillonnage risque alors de ne plus être satisfaite. Les conséquences pourraient être néfastes au niveau des performances de l'asservissement.

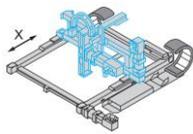
Il faut avoir en mémoire qu'un correcteur numérique (c'est le cas ici) qui utilise des effets dérivé ou intégral utilise des gains dans son équation récurrente qui sont calculés pour une fréquence d'échantillonnage donnée. Le non-respect de la fréquence d'échantillonnage à le même effet que des coefficients d'équation récurrente mal choisis c'est-à-dire le même effet que des gains dérivé et intégral mal choisis bref le même effet qu'un correcteur mal calé. Un pilotage sous un système d'exploitation non temps réel pourrait conduire à des problèmes de comportement dynamique (amortissement insuffisant) ou pire des instabilités.

C'est la raison qui explique que lorsqu'un système à asservir est critique (nucléaire, aéronautique, automobile, usinage etc...), un industriel ne peut pas confier un calcul de commande d'axe à un logiciel qui ne tourne pas sous un système d'exploitation temps réel.

Définissons ici le terme jitter : Le jitter est une fluctuation temporelle : c'est l'écart entre la périodicité réelle d'un signal et la périodicité souhaitée.

Que les calculs soient effectués sous un système d'exploitation temps réel ou non, on aura toujours du jitter. Le propre d'un système d'exploitation temps réel est de garantir un jitter borné.





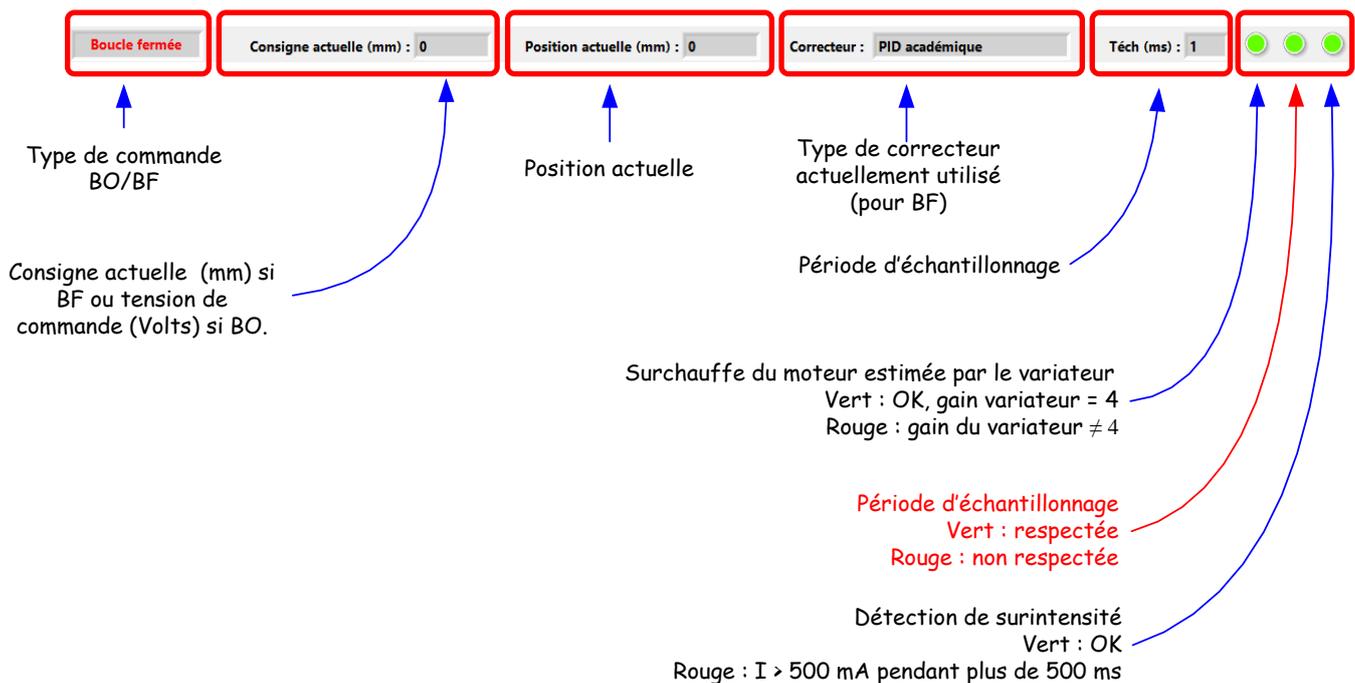
Un jitter borné c'est donc la garantie que chaque tâche sera effectuée à l'instant voulu avec une tolérance donnée.

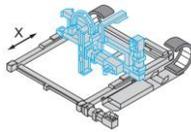
Un pilotage déterministe est un pilotage dont le jitter est borné : le pilotage est aussi qualifié de temps réel déterministe ou plus simplement de temps réel.

Nota : Le terme temps réel n'est pas synonyme de rapidité.

Un pilotage temps réel déterministe sous Windows n'est pas possible, l'OS Windows n'étant pas par nature "temps réel".

Sous Control'Drive, on peut vérifier facilement si la période d'échantillonnage est respectée : si la diode de gauche en bas à droite dans la barre d'état passe du vert au rouge, c'est que la période d'échantillonnage n'est pas respectée. Il faut alors l'augmenter : Menu "Paramètres". En général, une période de 1 ms même sous un PC un peu ancien ne pose pas de problème.



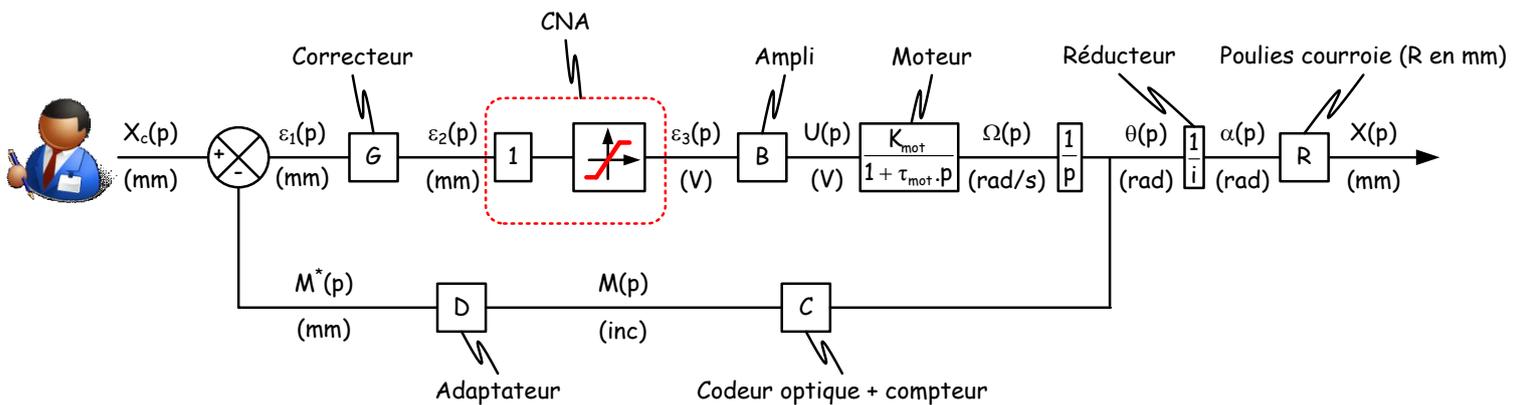
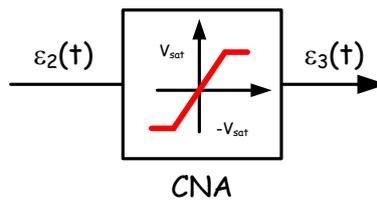


Écarts modèle-réel : du côté de la carte de commande

Non linéarité : Saturation de la tension de sortie

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

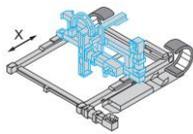
La carte de commande sature à ± 10 V. Cela rompt la linéarité du comportement dès que le signal $\varepsilon_2(t)$ sort de l'intervalle $[-10 \text{ V}, 10 \text{ V}]$.



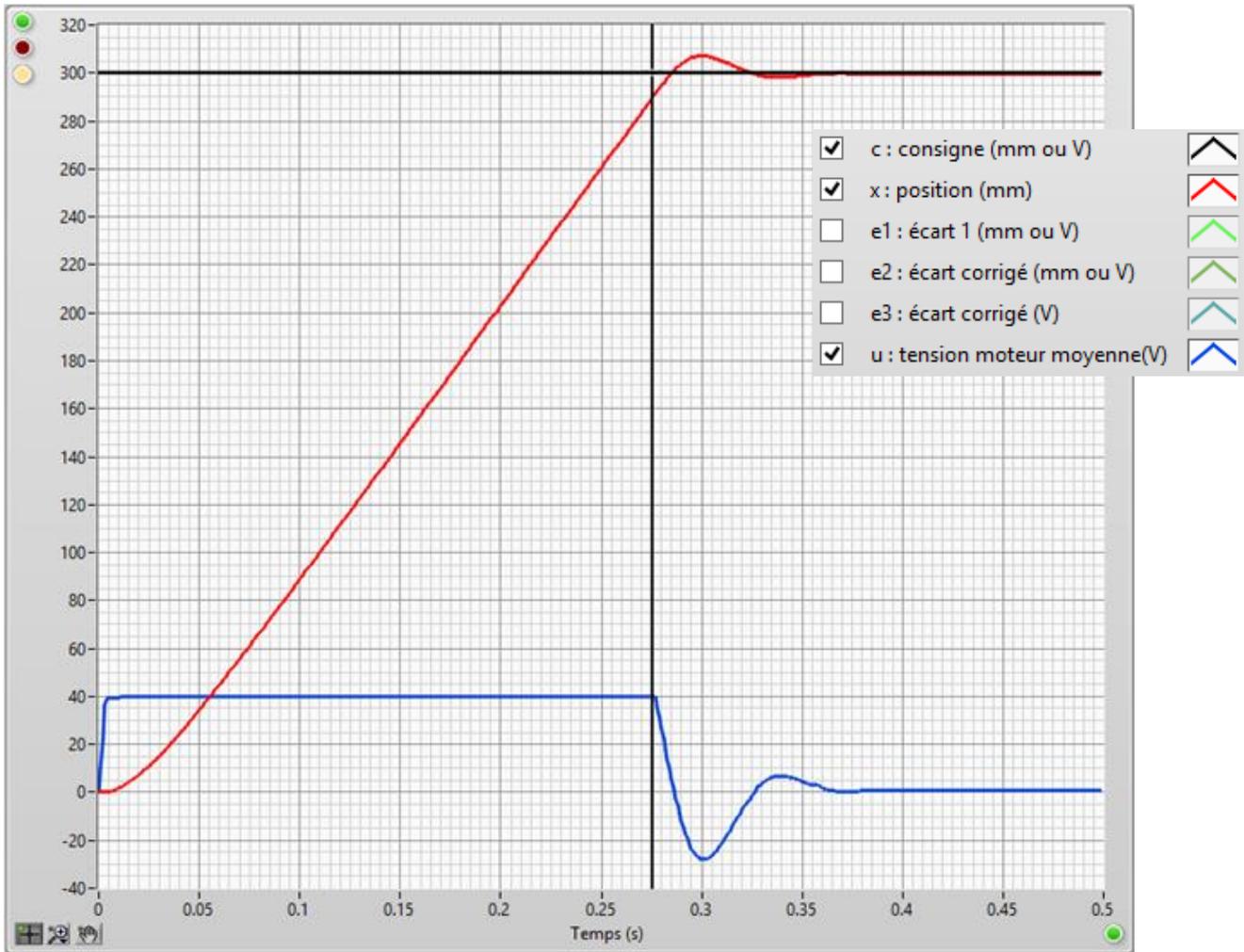
En particulier, lors de l'utilisation d'un correcteur proportionnel de gain G , si l'amplitude Δx_c de l'échelon d'entrée multipliée par ce gain G dépasse 10 V en valeur absolue, la carte de commande sature.

Pour éviter toute saturation (est-ce souhaitable ?) il faut donc choisir des amplitudes d'échelon et des gains G tels que $|G \cdot \Delta x_c| \leq 10$.

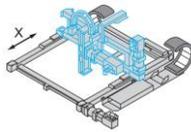
En pratique, il n'y a aucun intérêt sauf pédagogique, à chercher à éviter la saturation. Si le déplacement doit être de 300 mm par exemple, il est clair que l'on ne va pas choisir un correcteur (proportionnel pour faire simple) valant $10/300 \approx 0.03$ alors qu'un "bon" correcteur proportionnel se situe entre 0.5 et 1. Les performances de l'asservissement seraient catastrophiques. La saturation n'est pas forcément un phénomène subi mais doit être vue comme servant à protéger la chaîne d'énergie. Ce qui est certain c'est que la saturation n'arrange pas les affaires du scientifique qui préfère que tous les comportements se modélisent par des relations linéaires.



La saturation peut durer très longtemps : Par exemple avec un gain $G = 1$ et une consigne en échelon de 300 mm, il faudra attendre d'avoir atteint 290 mm pour que le signal $\varepsilon_2(t)$ descende en dessous de 10 mm et que le CNA cesse de saturer. Pendant la saturation, le système se comporte alors exactement comme si il était en boucle ouverte puisque le moteur est alimenté sous 40 V.



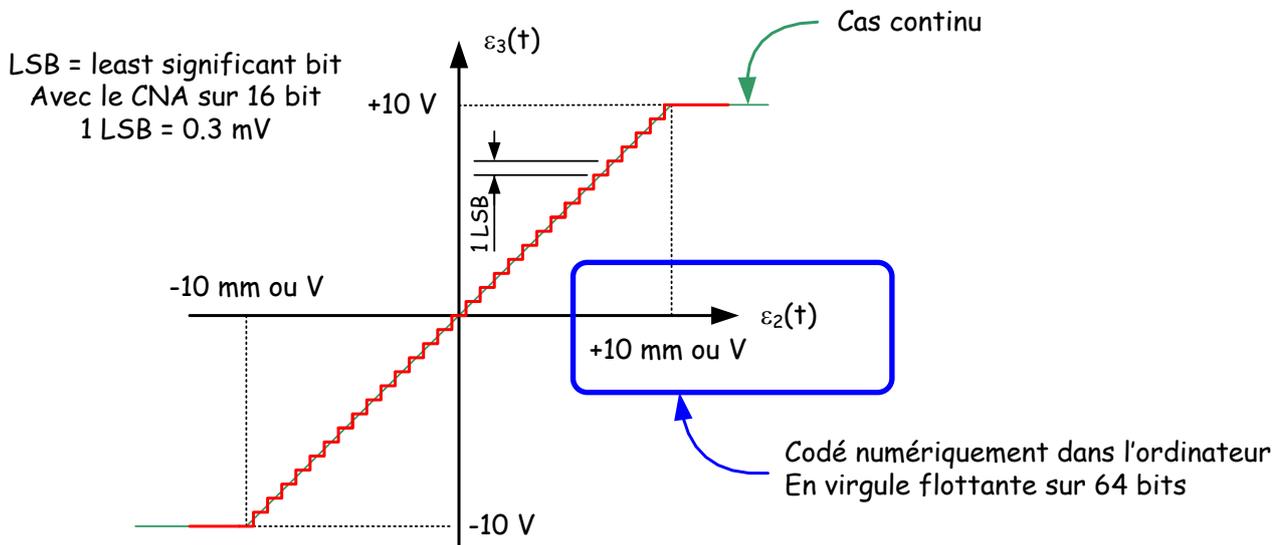
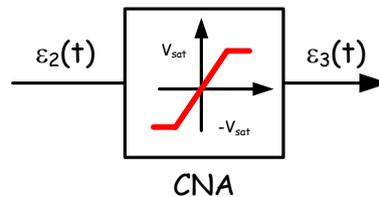
Essai de réponse indicielle avec un échelon de consigne de 300 mm, $G = 1$. Le système sature pendant 276 ms. Peut-on encore modéliser avec un modèle de boucle fermée ?



Écarts modèle-réel : du côté de la carte de commande

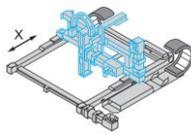
Non continuité : la quantification liée au convertisseur numérique analogique

Ctrl + clic pour revenir au sommaire



La conversion numérique analogique sur 16 bits engendre des écarts de tension de 0.3 mV maximum par rapport au cas continu : c'est tout à fait négligeable.

Le bruit de quantification que cela induit sera très faible. S'il n'est pas filtré par le variateur de vitesse, il le sera par la mécanique de l'axe.

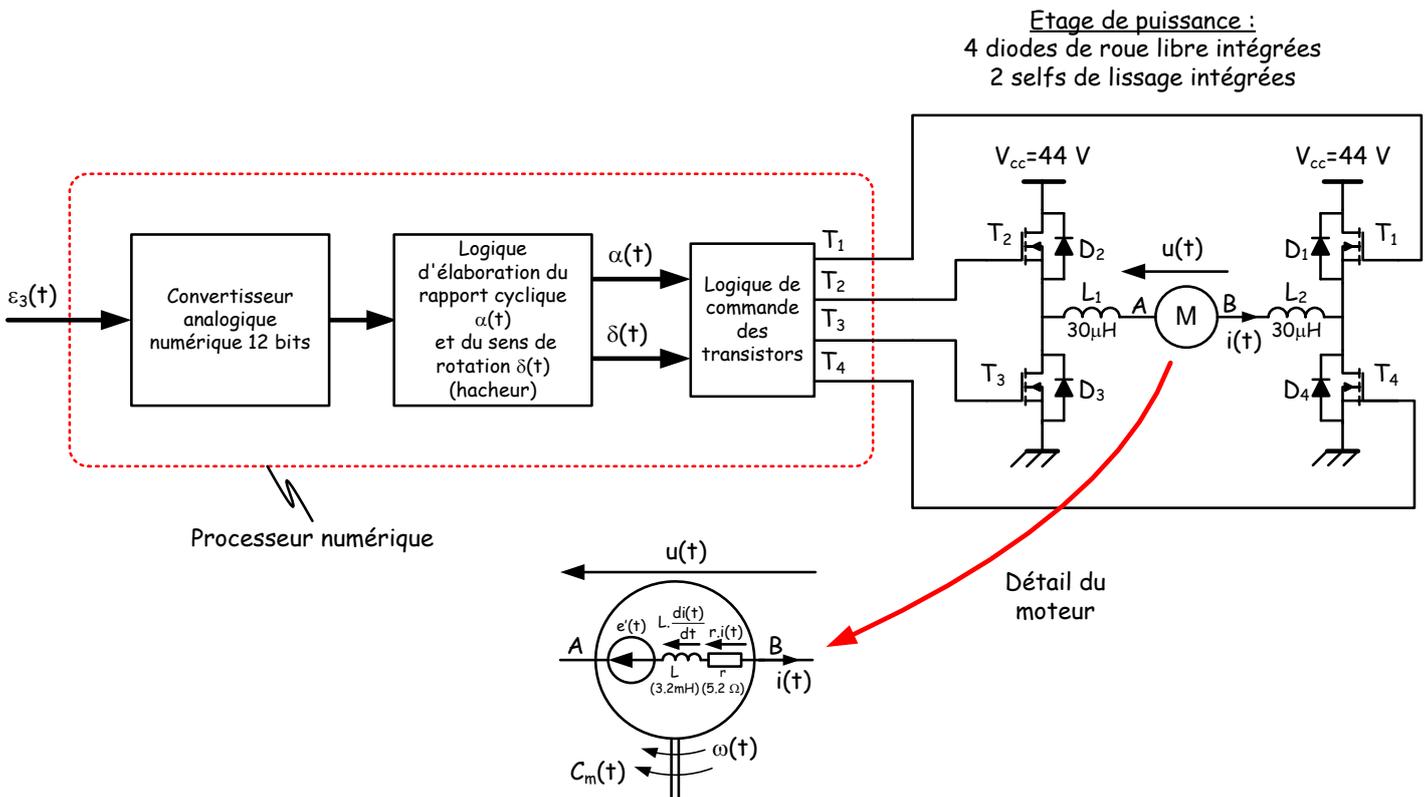
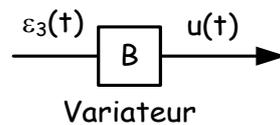


Écarts modèle-réel : du côté de la carte de puissance

Non continuité : le PWM

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

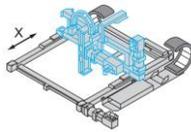
L'interface de puissance est composée principalement d'un convertisseur analogique numérique, d'une logique d'élaboration du rapport cyclique et du sens de rotation et d'une logique de commande des transistors de puissance du pont. Le pont utilisé est un pont en H à 4 quadrants. La fréquence du PWM est de 53.6 kHz.



Organisation interne du variateur de vitesse, aucune des sécurités n'est représentée

Plusieurs hypothèses doivent être formulées pour pouvoir considérer que la carte de puissance se comporte en gain pur ($B = 4$) :

- Quantification liée au convertisseur analogique numérique négligée
- Dynamique négligée (celle liée au processeur numérique et celle liée au temps de commutation des transistors et des diodes de roue libre du pont en H)



- Fréquence du PWM suffisamment élevée pour négliger les ondulations de courant et de vitesse du moteur.
- Pas de saturation de l'étage de sortie

Nota : Les selfs de lissage intégrées au variateur (30 μ H) sont de valeur négligeable par rapport à l'inductance de l'induit du moteur (3.2 mH)

En notant :

$\varepsilon_3(t)$: la tension d'entrée du variateur : $\varepsilon_3(t) \in [-10V ; 10V]$

$\alpha(t)$: le rapport cyclique

$\delta(t)$: le signe de $\varepsilon_3(t)$

V_{cc} : la tension d'alimentation de l'étage de puissance du pont en H : $V_{cc} = 42 V$

U_c : la chute de tension aux bornes des transistors $\approx 2\%$ max de V_{cc} .

B : le gain en tension du variateur : $B = 4$

$u(t)$ et $u_{moyenne}(t)$: la tension et la tension moyenne au bornes du moteur

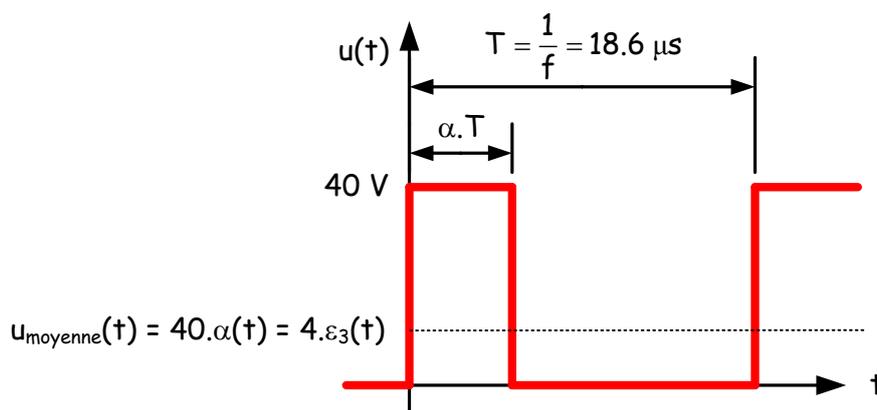
Le processeur de la carte calcule les paramètres $\alpha(t)$ et $\delta(t)$:

$$\alpha(t) = \frac{B \cdot |\varepsilon_3(t)|}{V_{cc} - U_c} \approx \frac{B \cdot |\varepsilon_3(t)|}{0.98 \cdot V_{cc}} \approx \frac{4 \cdot |\varepsilon_3(t)|}{40} \approx 0.1 |\varepsilon_3(t)|$$

$$\delta(t) = \text{signe} [\varepsilon_3(t)] = \frac{\varepsilon_3(t)}{|\varepsilon_3(t)|}$$

La tension moyenne aux bornes du moteur vaut alors :

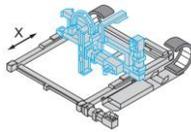
$$u_{moyenne}(t) = \alpha(t) \cdot (V_{cc} - U_c) \cdot \delta(t) \approx 40 \cdot \alpha(t) \cdot \delta(t) \approx 4 \cdot \varepsilon_3(t)$$



Par exemple si $\varepsilon_3(t) = 0 V$, $\alpha(t) = 0$, $\delta(t) = 0$ ou 1 (peu importe), $u_{moyenne}(t) = 0 V$

$\varepsilon_3(t) = 10 V$, $\alpha(t) = 1$, $\delta(t) = 1$, $u_{moyenne}(t) = 40 V$

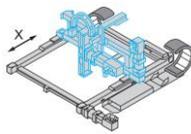
$\varepsilon_3(t) = -5 V$, $\alpha(t) = 0.5$, $\delta(t) = -1$, $u_{moyenne}(t) = -20 V$



Le tableau ci-dessous résume le fonctionnement du variateur : les transistors sont remplacés par leur interrupteur équivalent. Les selfs de lissage intégrées au variateur ne sont pas représentées.

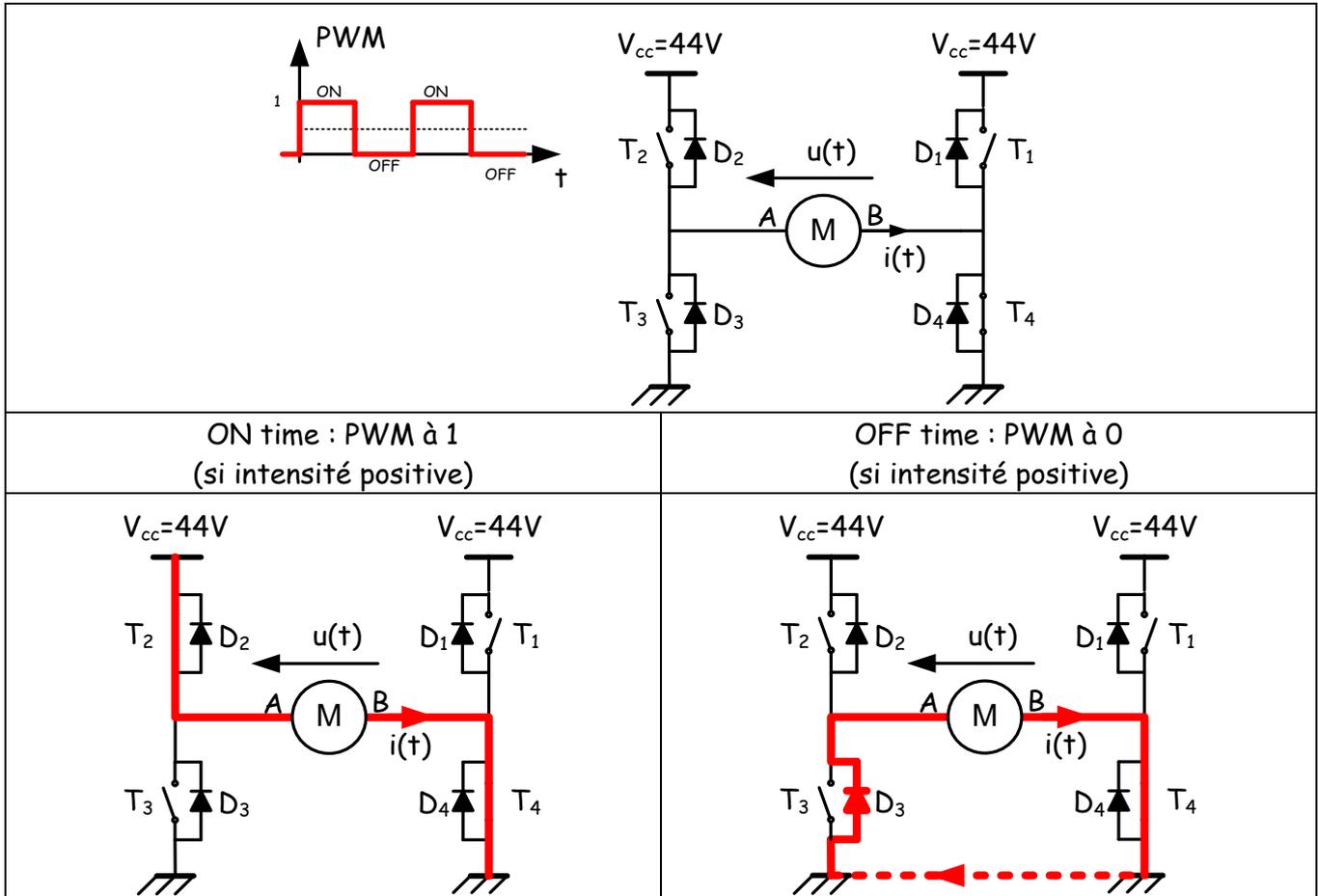
| Signe de $\varepsilon_3(t)$ | $\delta(t)$ | $\alpha(t)$ | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ |
|-----------------------------|-------------|-------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Positif | 1 | [0-1] | Bloqué (interrupteur ouvert) | Piloté à 53.6 kHz avec le rapport cyclique α | Bloqué (interrupteur ouvert) | Saturé (interrupteur fermé) |

| | | | | | | |
|---------|----|-------|-----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Négatif | -1 | [0-1] | Piloté à 53.6 kHz avec le rapport cyclique α | Bloqué (interrupteur ouvert) | Saturé (interrupteur fermé) | Bloqué (interrupteur ouvert) |
|---------|----|-------|-----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|



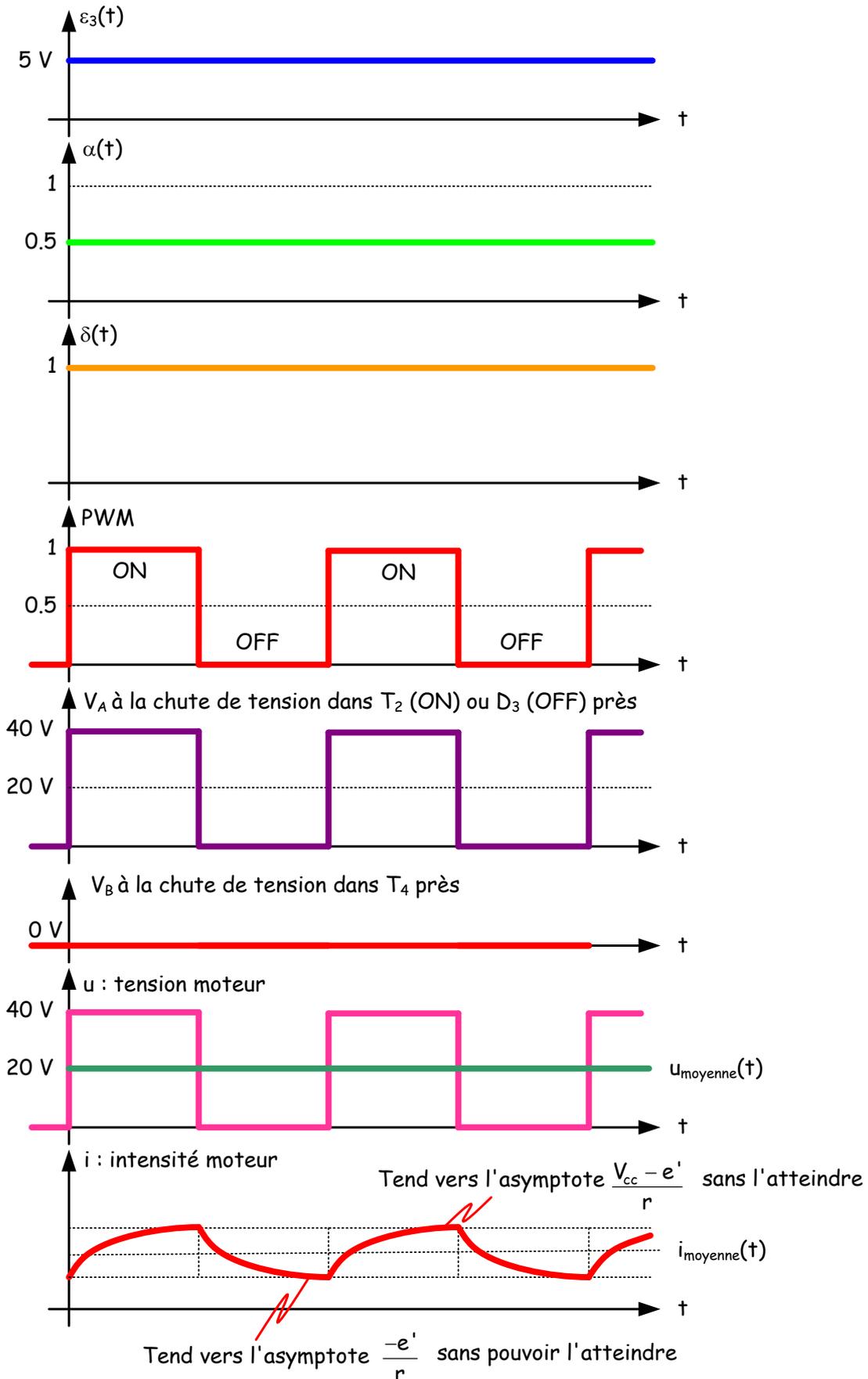
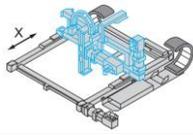
Le tableau ci-dessous indique plus précisément la circulation du courant pendant les différentes phases de fonctionnement du pont.

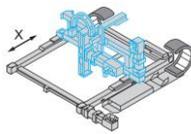
Les tracés sont effectués pour $\varepsilon_3(t) = 5 \text{ V}$, $\alpha(t) = 0.5$, $\delta(t) = 1$, $u_{\text{moyenne}}(t) = 20 \text{ V}$



Nota : La période du PWM étant très faible ($18.6 \mu\text{s}$) par rapport aux constantes de temps mécanique (22 ms) et électrique (0.6 ms), les tracés suivants sont effectués sous les hypothèses suivantes :

- La vitesse moteur est quasi constante sur une période du PWM, la force contre électromotrice $e'(t)$ l'est donc aussi.
- Le courant décroît mais n'a pas le temps de s'annuler lorsque le PWM est à 0 (OFF time)

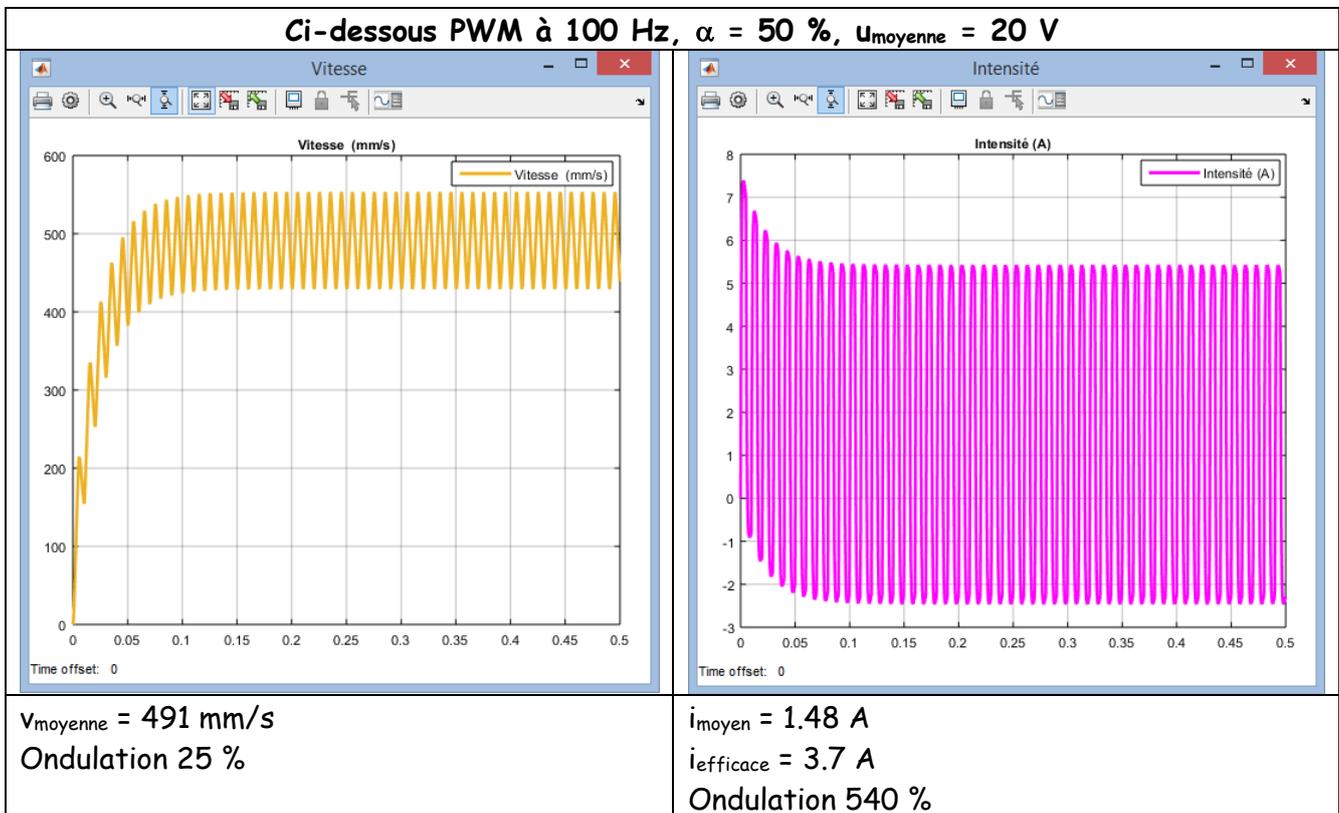


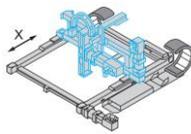


La question à se poser pour pouvoir modéliser le variateur de vitesse par un gain pur est de savoir si la fréquence du PWM est suffisante pour pouvoir considérer que tout se passe comme si l'amplification était analogique (continue). Il faut en particulier analyser l'évolution de deux signaux :

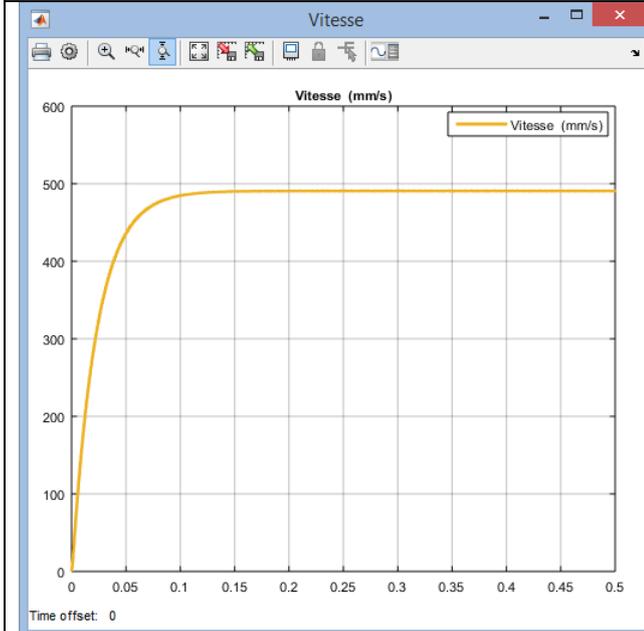
- La vitesse moteur : plutôt liée à la constante de temps mécanique ≈ 22 ms
- L'intensité moteur : plutôt liée à la constante de temps électrique ≈ 0.6 ms

Les signaux ci-dessous sont tracés pour une tension d'alimentation de moteur en échelon de tension de 20 V (rapport cyclique du PWM $\approx 50\%$) : simulation sur la base d'un modèle avec prise en compte de l'inductance L du moteur (c'est indispensable pour analyser l'ondulation de courant) et d'un couple résistant constant de 30 N (frottements secs).

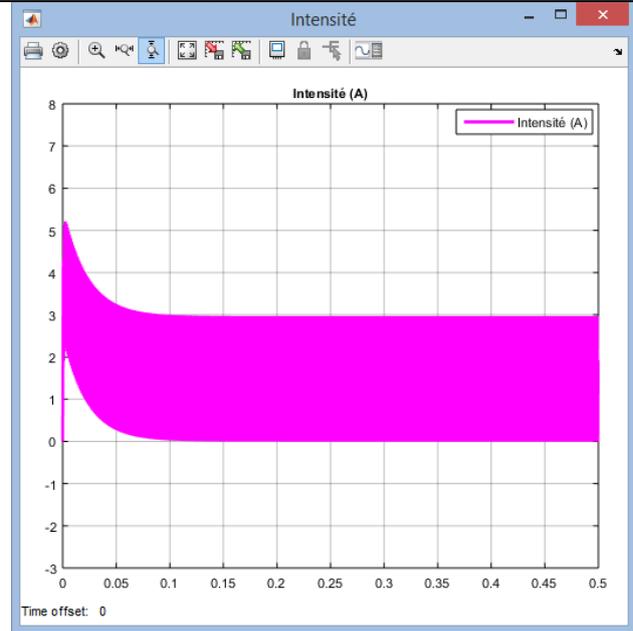




Ci-dessous PWM à 1 kHz, $\alpha = 50\%$, $u_{moyenne} = 20\text{ V}$

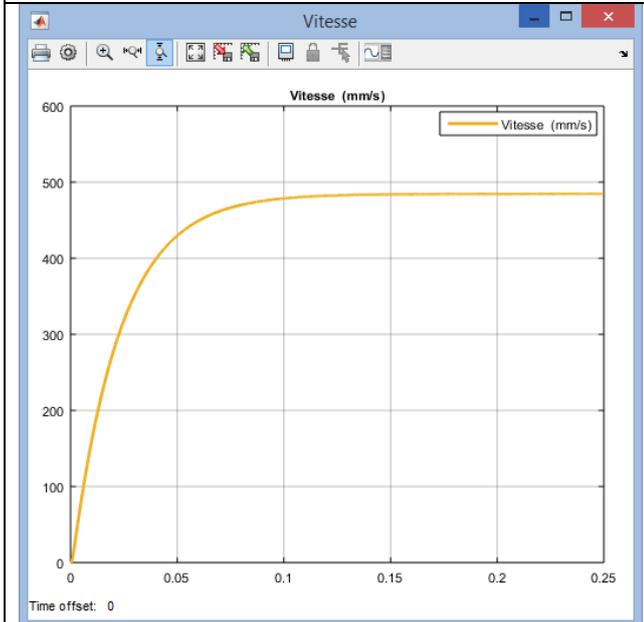


$v_{moyenne} = 491\text{ mm/s}$
Ondulation 0.6 %

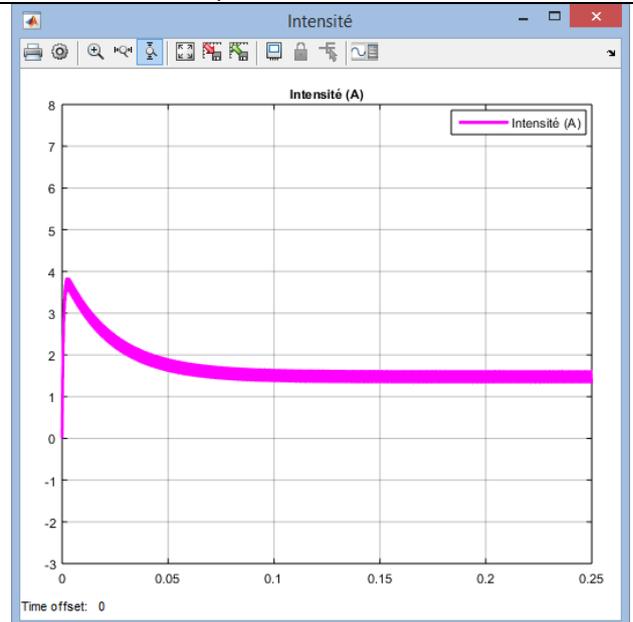


$i_{moyen} = 1.48\text{ A}$
 $i_{efficace} = 1.72\text{ A}$
Ondulation 201 %

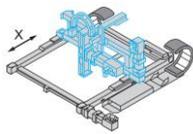
Ci-dessous PWM à 10 kHz, $\alpha = 50\%$, $u_{moyenne} = 20\text{ V}$



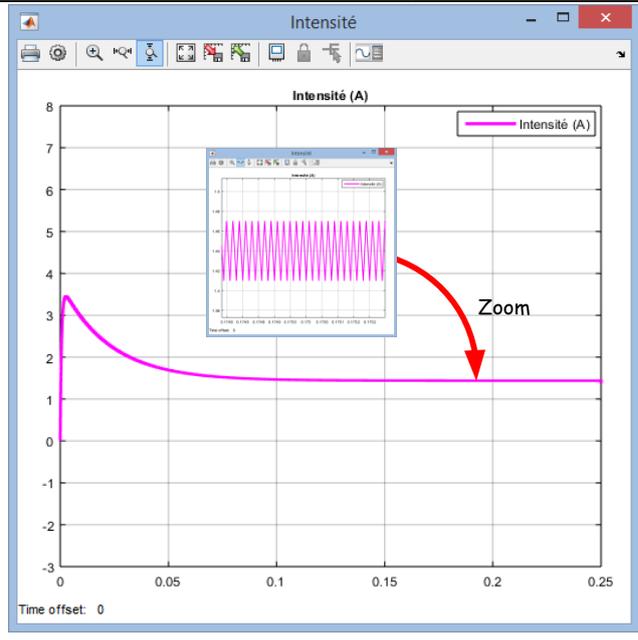
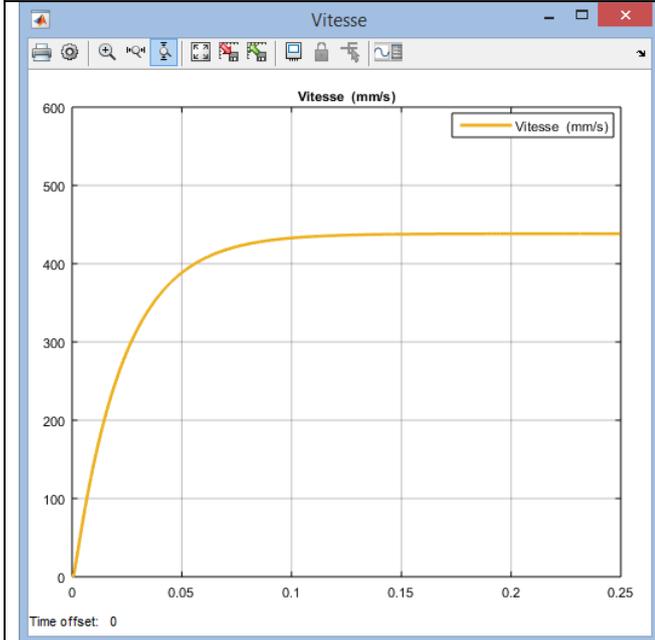
$v_{moyenne} = 491\text{ mm/s}$
Ondulation $\approx 0\%$



$i_{moyen} = 1.48\text{ A}$
 $i_{efficace} = 1.48\text{ A}$
Ondulation 21 %



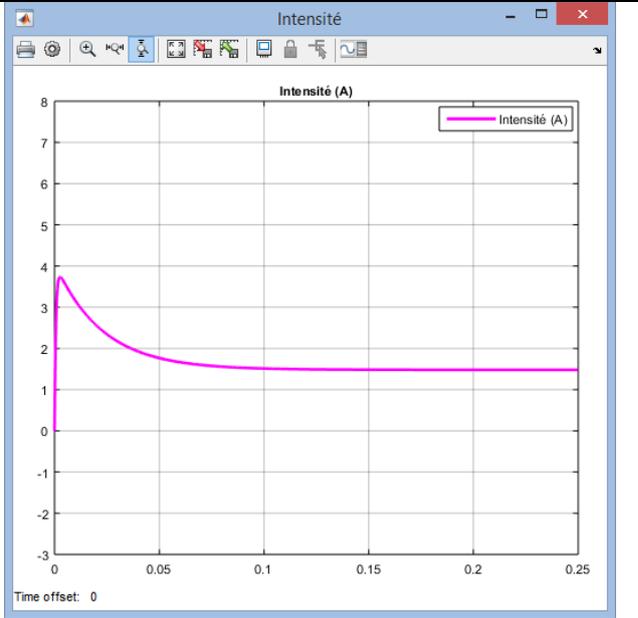
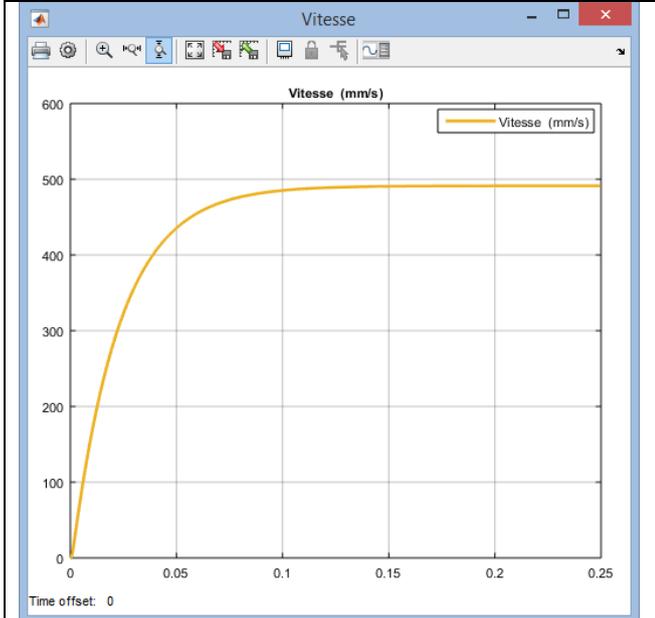
Ci-dessous PWM à 53.6 kHz (fréquence du variateur), $\alpha = 50\%$, $u_{moyenne} = 20\text{ V}$



$v_{moyenne} = 491\text{ mm/s}$
Ondulation $\approx 0\%$

$i_{moyen} = 1.48\text{ A}$
 $i_{efficace} = 1.48\text{ A}$
Ondulation 4%

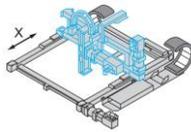
Ci-dessous tension continue $u = 20\text{ V}$



$v_{moyenne} = 491\text{ mm/s}$
Ondulation 0%

$i_{moyen} = 1.48\text{ A}$
 $i_{efficace} = 1.48\text{ A}$
Ondulation 0%

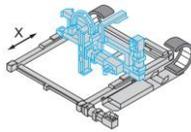
Lorsque les ondulations de courant sont importantes, les ondulations de couple moteur le sont aussi. Des vibrations (parfois audibles) peuvent être générées et exciter la structure de Control'X.



Des ondulations de courant importantes impliquent aussi une valeur efficace du courant qui peut être bien différente du courant moyen. L'échauffement du moteur voire même son rendement peut en pâtir.

Conclusion : A la fréquence du PWM de 53.6 kHz du variateur de puissance, les ondulations de vitesse et de courant sont tout à fait négligeables : tout se passe comme si l'alimentation du moteur se faisait de façon continue.

Voir sous Control'Drive dans le menu "Bonus", "Validation PWM" pour traiter ce point de façon exhaustive.

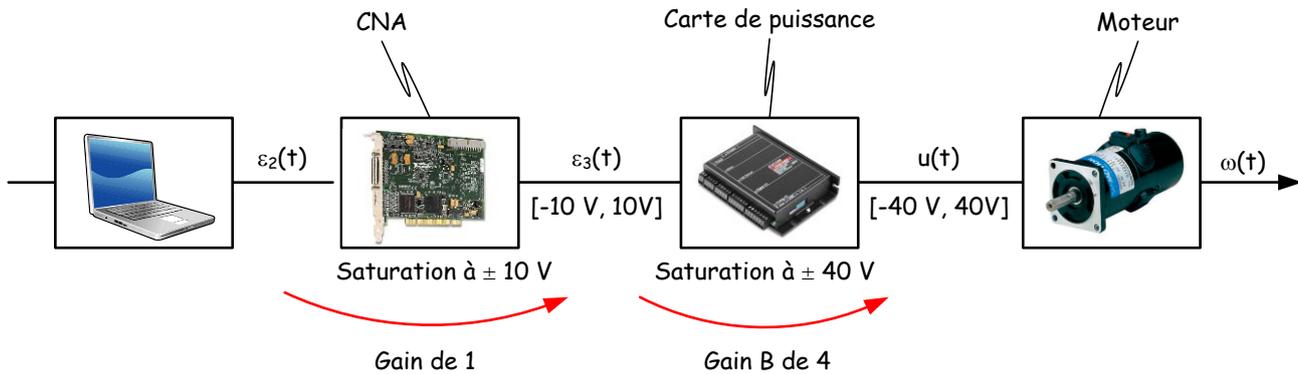


Ecart modèle-réel : du côté de la carte de puissance

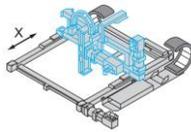
Non linéarité : Saturation de la tension de sortie

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

La carte de puissance est alimentée sous une tension $V_{cc} \approx 42 \text{ V}$. La chute de tension dans les transistors de puissance du pont en H est telle que la tension maxi aux bornes du moteur peut atteindre $0.98.V_{cc} \approx 40 \text{ V}$.



La carte de commande saturant à $\pm 10 \text{ V}$, compte tenu du gain $B = 4$, l'interface de puissance ne sature jamais en tension.



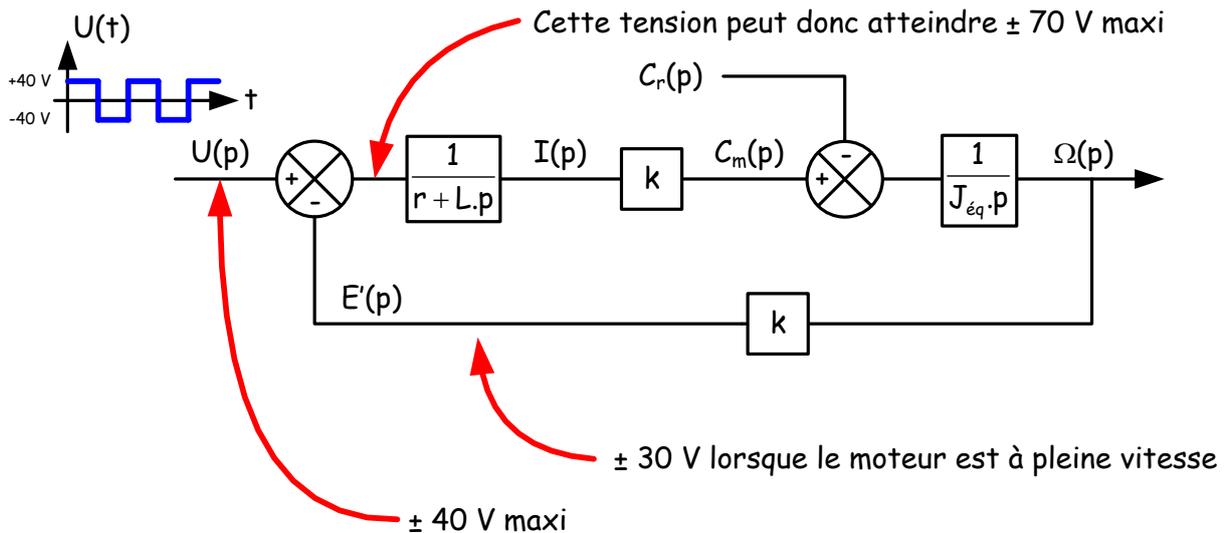
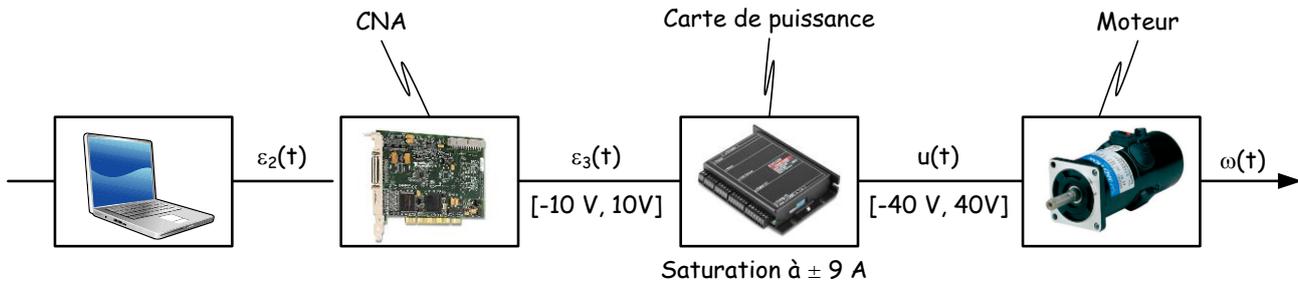
Ecart modèle-réel : du côté de la carte de puissance

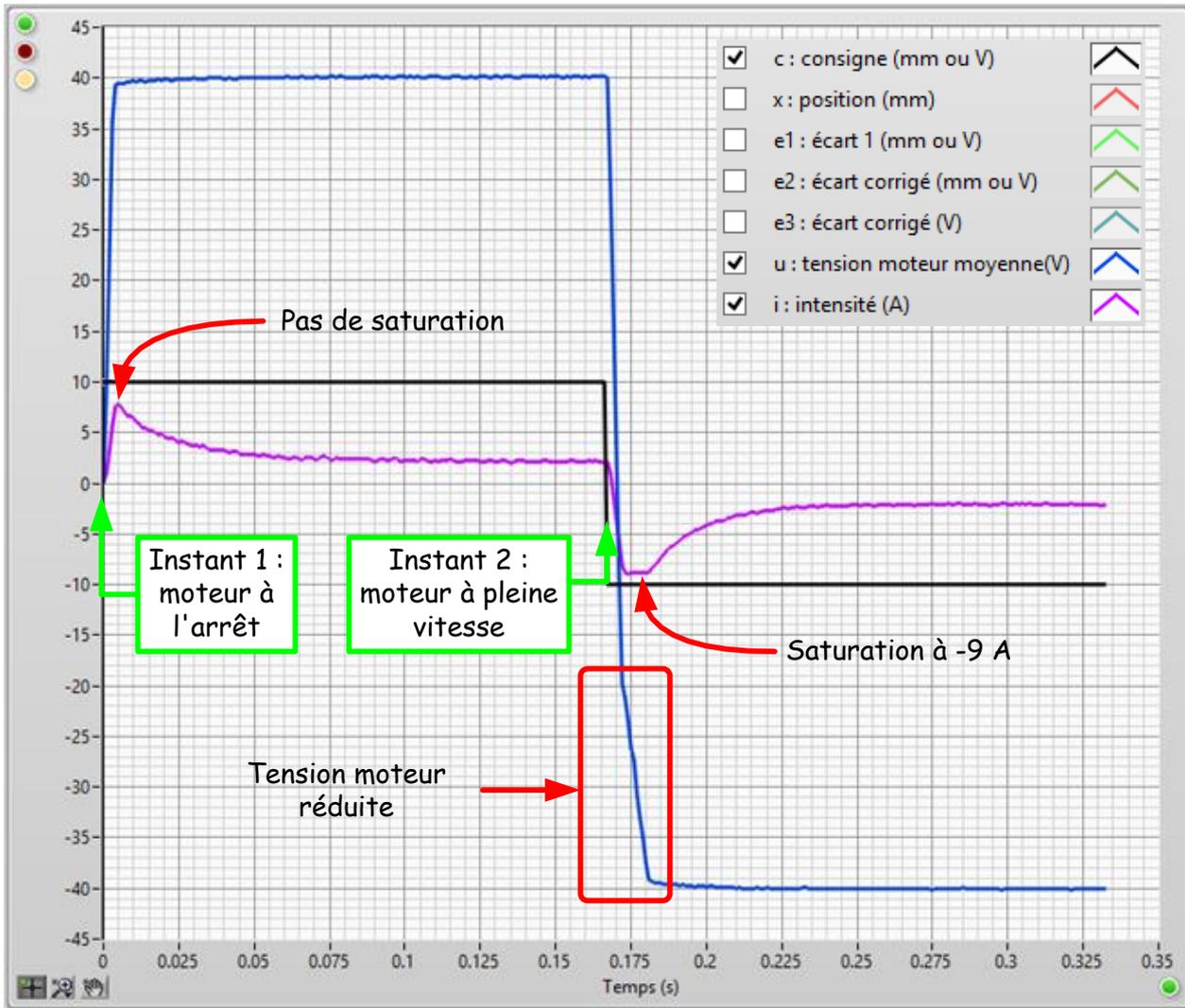
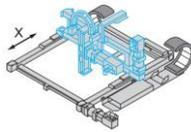
Non linéarité : Saturation de l'intensité de sortie

La saturation en intensité de la carte de puissance est réglée sur $i_{max} = 9 \text{ A}$. Dans les fait, lorsque cette intensité est atteinte, c'est la tension d'alimentation du moteur qui chute (en valeur absolue) de façon à ne pas dépasser les 9 A.

L'essai le plus violent qui soit est un essai en boucle ouverte sous une tension rectangulaire $\varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) = \pm 10 \text{ V}$. Cela tend à générer une tension d'alimentation du moteur de $\pm 40 \text{ V}$. Lorsque le régime permanent est atteint (moteur à pleine vitesse), la force contre électromotrice

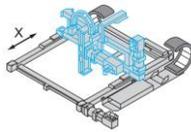
$e'(t) = k \cdot \omega(t)$ vaut environ 30 V (et non 40 V compte tenu des efforts résistants).



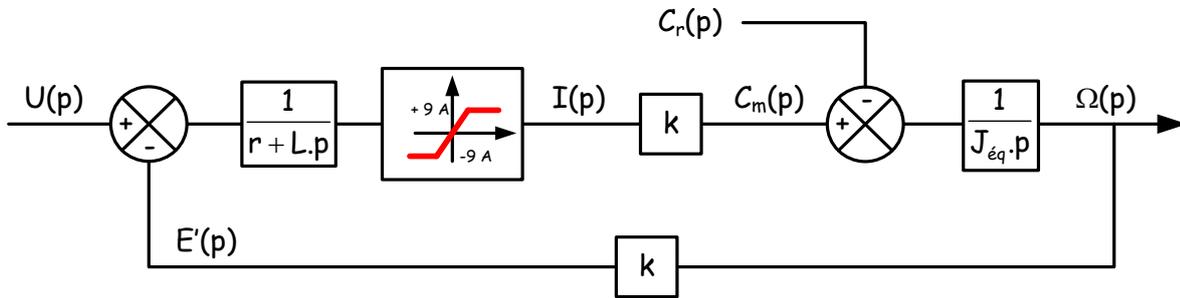


Essai en boucle ouverte sous une tension rectangulaire $\varepsilon_2(t) = \pm 10 \text{ V}$ (en noir)

| Instant 1 | Instant 2 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Echelon de tension de + 40 V avec moteur initialement à l'arrêt | Echelon de tension de - 40 V avec moteur initialement à pleine vitesse |
| L'intensité tend alors vers la valeur $i(t) = \frac{40}{r} = \frac{40}{5.1} \approx 7.8 \text{ A}$ Cette valeur asymptotique ne sera pas atteinte compte tenu de la dynamique électrique en $\frac{L}{r}$. La carte de puissance ne sature pas. | L'intensité tend alors vers la valeur $i(t) = \frac{70}{r} = \frac{70}{5.1} \approx 13.7 \text{ A}$ Cette valeur asymptotique ne sera pas atteinte compte tenu de : <ul style="list-style-type: none"> • La dynamique électrique en $\frac{L}{r}$ • La saturation à 9 A |

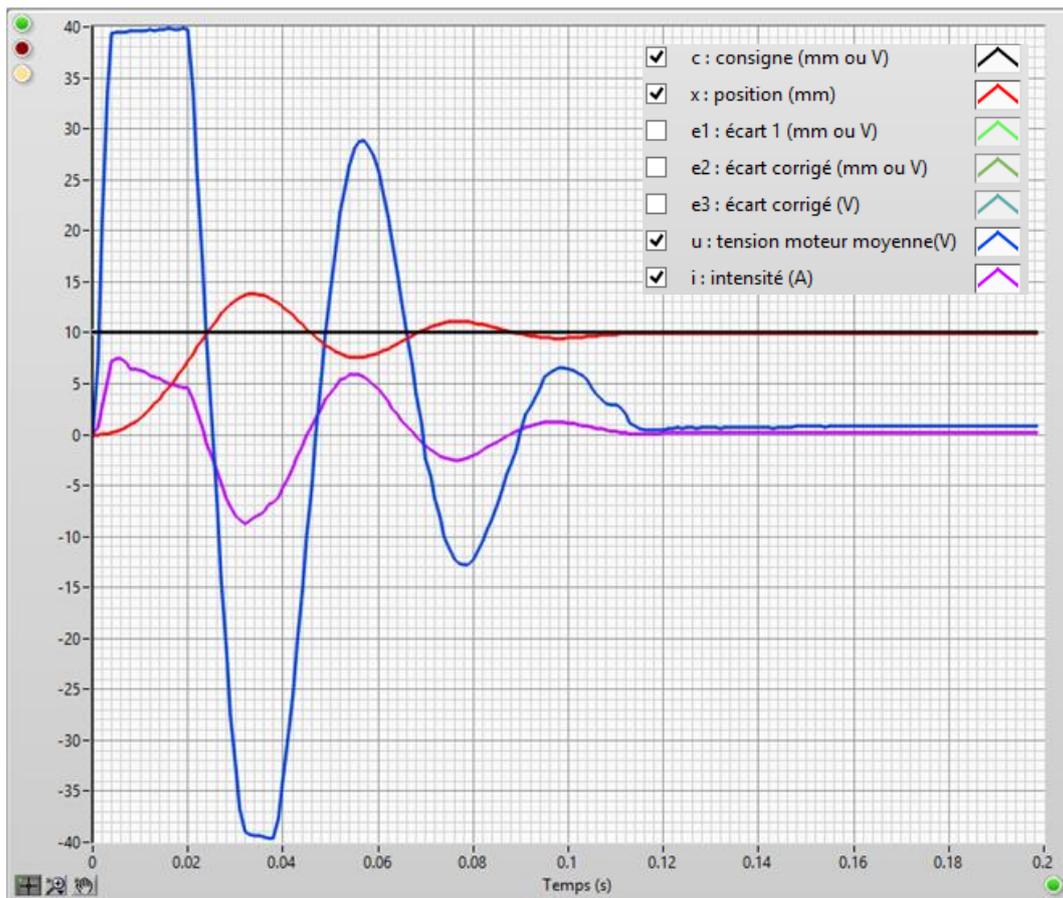


Un modèle prenant en compte la saturation en intensité serait alors celui-ci :



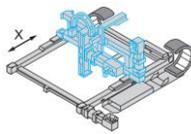
La saturation apparaît dans le schéma bloc du moteur mais physiquement, elle prend son origine dans le variateur de vitesse.

Lors d'un essai un peu plus standard (boucle fermée même avec un correcteur de valeur relativement élevée) la carte de puissance ne sature pas en intensité.



Essai en boucle fermée avec échelon de 10 mm et un correcteur de gain 3 : l'intensité ne sature pas

Conclusion : la saturation en intensité n'est généralement pas à prendre en compte dans les modèles.

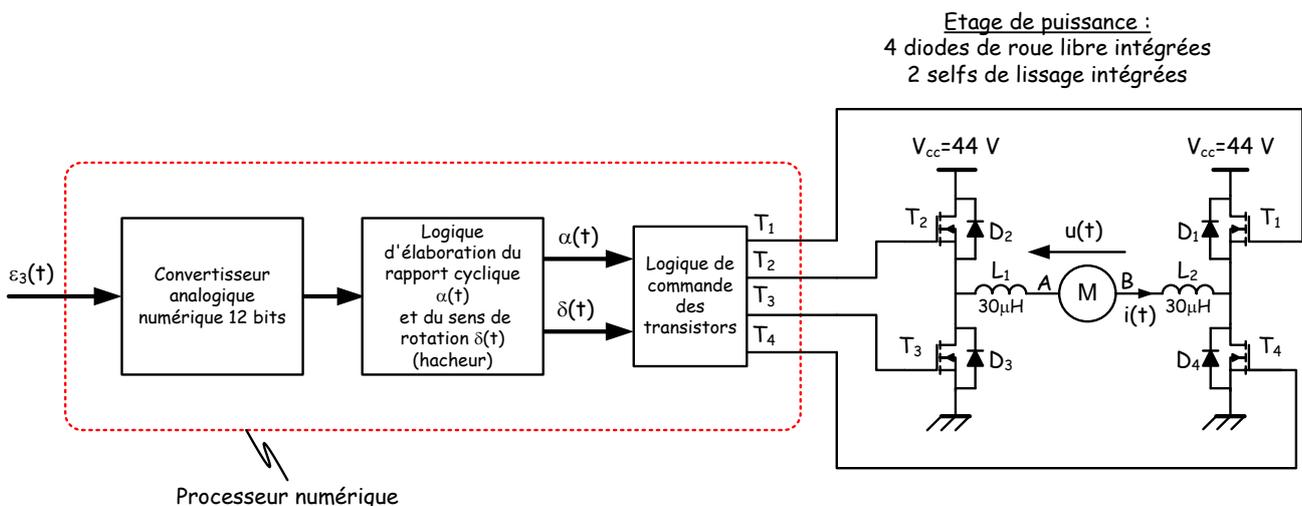


Écarts modèle-réel : du côté de la carte de puissance

Dynamique négligée

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Le variateur de vitesse est architecturé autour d'un contrôleur numérique (DSP, MCU ou FPGA, cela n'est pas précisé par le constructeur). Il n'a pas un comportement continu mais échantillonné.

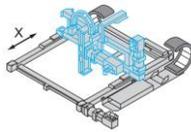


La fréquence d'échantillonnage n'est pas non plus précisée par le constructeur Maxon. A priori elle doit être au moins supérieure à 53.6 kHz, la fréquence du PWM.

L'étage de sortie est basé sur un pont en H composé de quatre transistors et 4 diodes de roue libre. La dynamique liée à la saturation / désaturation des transistors ainsi que celle liée au temps de réaction des diodes est ici négligée.

En conclusion de tout ce qui concerne la carte de puissance :

Compte tenu de la fréquence du PWM, de la non saturation de la tension de sortie et de la dynamique de commutation de l'étage de sortie négligée, un modèle de gain pur semble être assez approprié ($B = 4$).

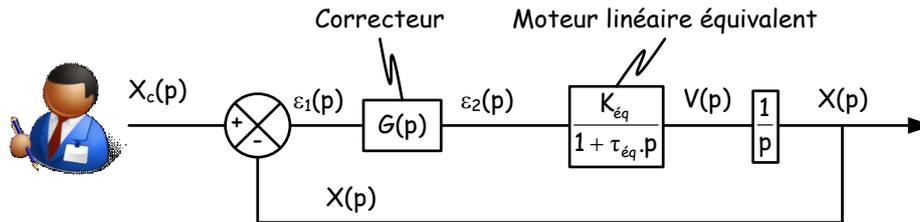


Ecart model-réel : du côté du moteur

Dynamique négligée : Constante de temps électrique non prise en compte

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

Rappelons le modèle de base utilisé :



Avec un correcteur proportionnel $G(p) = G$, on avait :

$$H_{bo}(p) = \frac{G \cdot K_{\text{égq}}}{p \cdot (1 + \tau_{\text{égq}} \cdot p)} \text{ où } K_{\text{égq}} = \frac{B \cdot K_{\text{mot}} \cdot R}{i} \text{ et } \tau_{\text{égq}} = \tau_{\text{mot}}$$

La constante de temps électrique du moteur vaut $\tau_{\text{élec}} \approx 0.6 \text{ ms}$

La constante de temps mécanique du moteur vaut $\tau_{\text{mot}} \approx 22 \text{ ms}$

Le rapport des constantes de temps vaut donc 36.

Nota : Cette constante de temps τ_{mot} est celle qui tient compte de l'inertie de tout l'équipage mobile sinon pour le moteur seul, on aurait $\tau_{\text{mot}} \approx 4.3 \text{ ms}$.

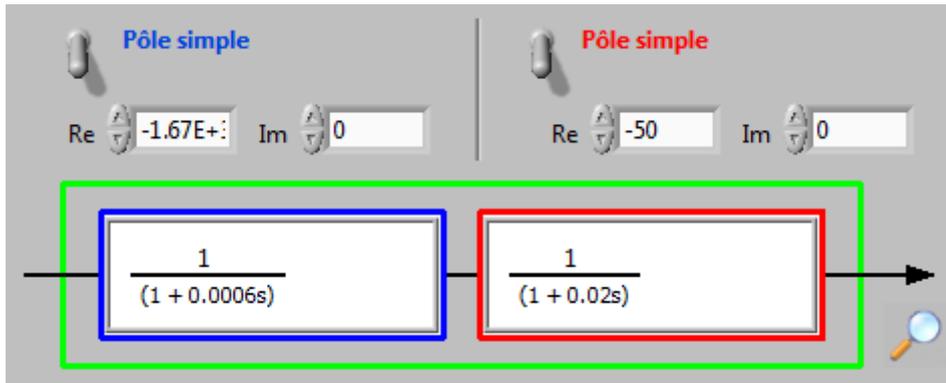
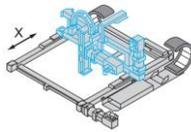
Ci-dessous, les considérations faites sur la boucle ouverte non corrigée seule en observant non pas la position $x(t)$ mais la vitesse du chariot $V(t)$.

Modèle de moteur en négligeant la constante de temps électrique :

$$\frac{V(p)}{\varepsilon_1(t)} = \frac{K_{\text{égq}}}{(1 + \tau_{\text{méca}} \cdot p)} = \frac{132}{(1 + 0.022 \cdot p)}$$

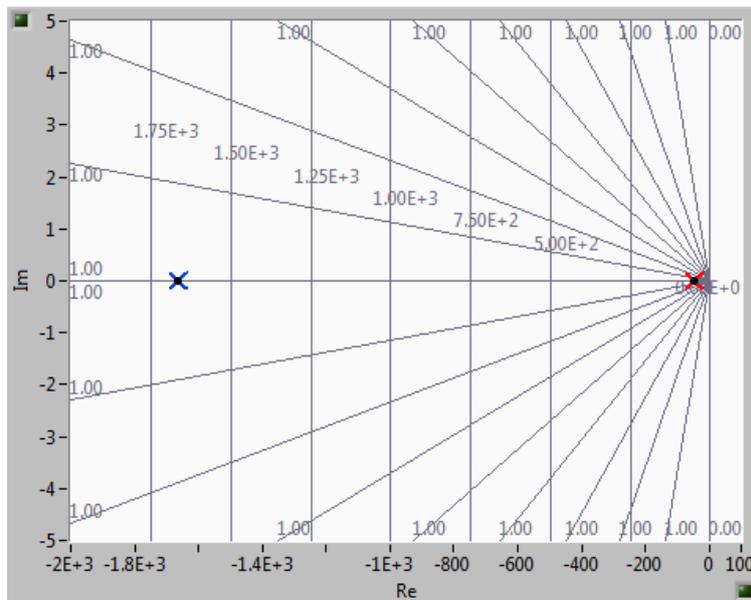
Modèle de moteur tenant compte de la constante de temps électrique :

$$\frac{V(p)}{\varepsilon_1(t)} = \frac{K_{\text{égq}}}{(1 + \tau_{\text{élec}} \cdot p) \cdot (1 + \tau_{\text{méca}} \cdot p)} = \frac{132}{(1 + 0.0006 \cdot p) \cdot (1 + 0.022 \cdot p)}$$

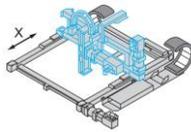


Décomposition de la fonction de transfert du moteur seul en un produit de deux premiers ordres

En **bleu** le premier ordre le plus rapide (constante de temps électrique), en **rouge** le premier ordre le plus lent (mode dominant) et en **vert** la fonction de transfert du moteur complet (2° ordre)

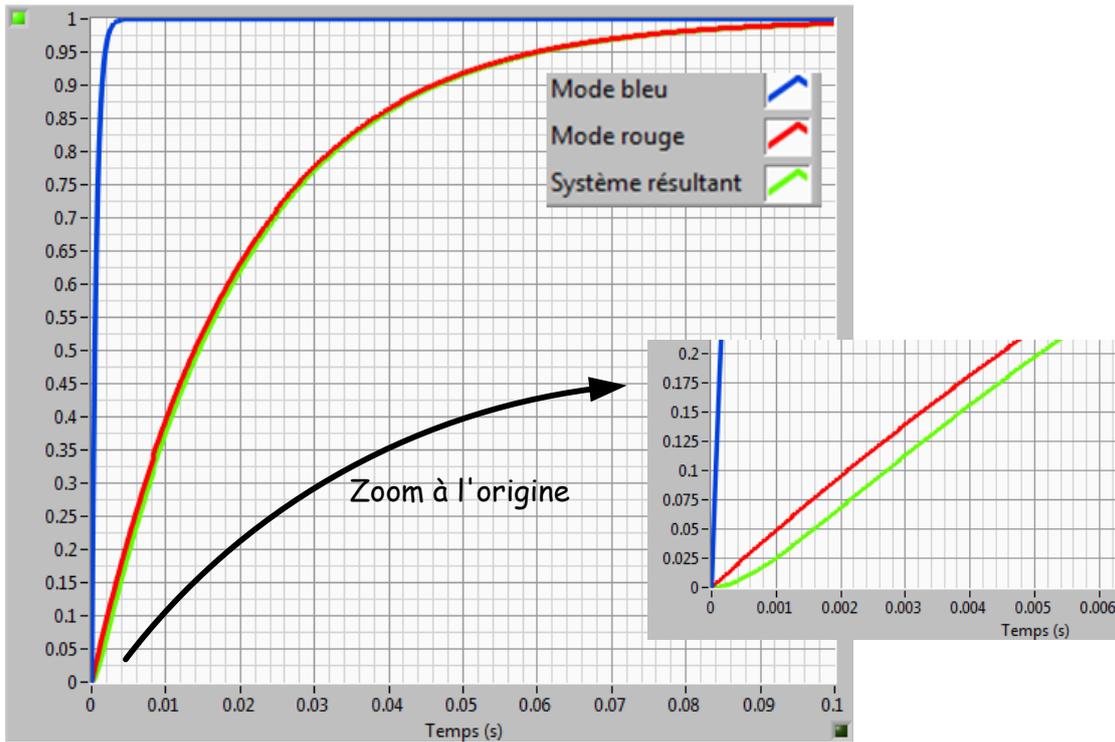


Pôles de la fonction de transfert du moteur

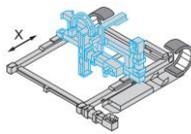


Aspect temporel :

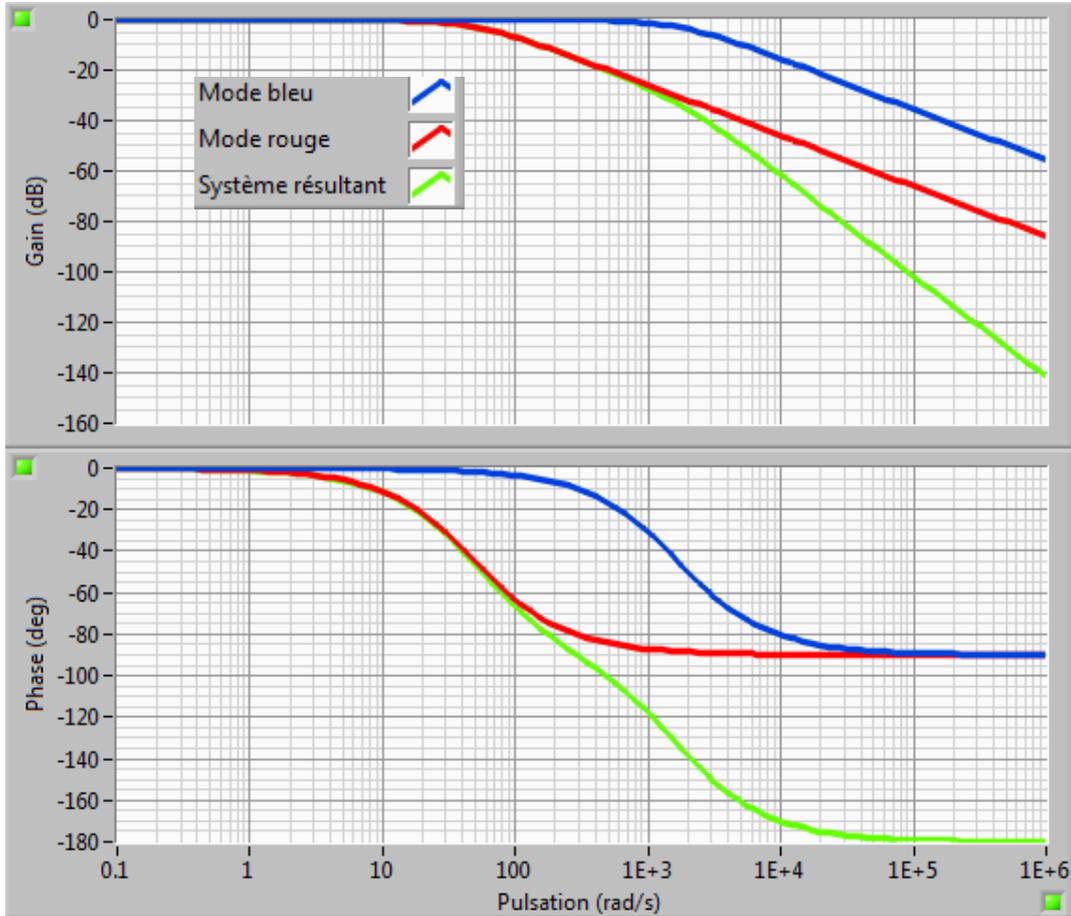
On présente ci-dessous les réponses indicielles unitaires du **mode rapide** (1^o ordre électrique), du **mode lent** (1^o ordre mécanique) et du **modèle de moteur** du 2^o ordre



Réponses indicielles unitaires des deux modes du premier ordre et du moteur (2^oordre)

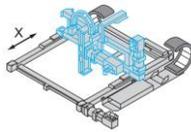


Aspect fréquentiel :



Réponses harmoniques des deux modes du premier ordre et du moteur (2^oordre)

La divergence des deux modèles apparaît significativement à partir de 200 rad/s : c'est bien au-dessus des pulsations dictées par le choix d'un amortissement "convenable" (autour de 50 rad/s de pulsation de coupure à 0 dB).

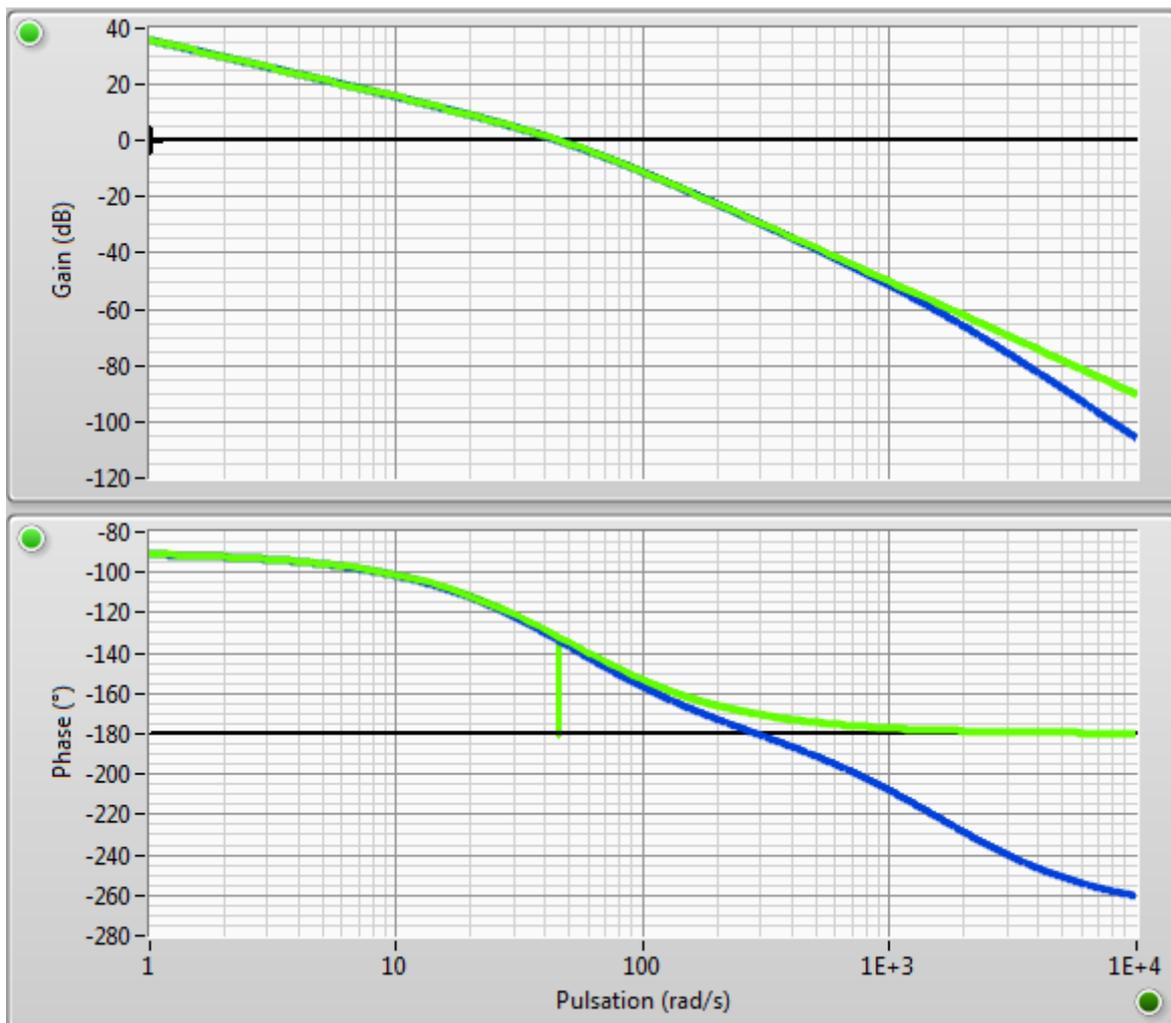


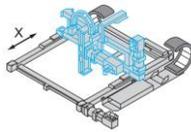
En négligeant la constante de temps électrique devant la constante de temps mécanique, le moteur est modélisé par un 1^o ordre. Le comportement haute fréquence du modèle de boucle fermée reflètera alors moins bien celui du système réel. En particulier, l'instabilité produite, sur le système réel, par une trop forte augmentation du gain G , ne pourra pas être mise en évidence avec le modèle de moteur du 1^o ordre (marges de gain et de phase toujours strictement positives).

Ci-dessous : boucle ouverte corrigée par le correcteur proportionnel qui permet de viser 45° de marge de phase

En **vert** modèle de boucle ouverte corrigée ($G = 0.5$) en négligeant la constante de temps électrique : $\omega_{co\ 0dB} = 46\ \text{rad/s}$, $M_{\varphi} = 45^\circ$, $M_G = \infty$

En **bleu** modèle de boucle ouverte corrigée ($G = 0.5$) prenant en compte la constante de temps électrique : $\omega_{co\ 0dB} = 46\ \text{rad/s}$, $M_{\varphi} = 45^\circ$, $M_G = 29\ \text{dB}$





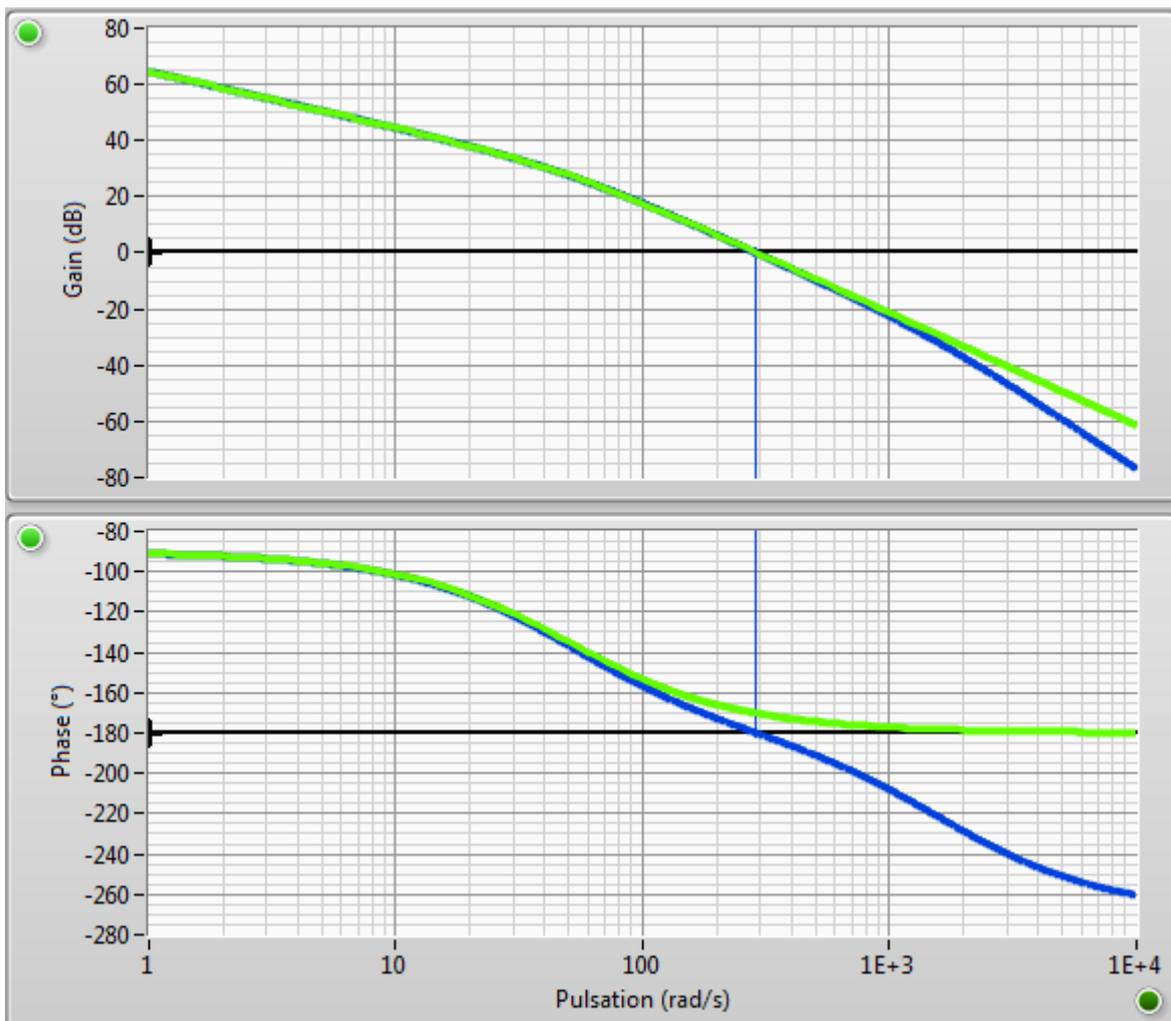
Dans les deux cas, le correcteur proportionnel qui permet de viser une marge de phase de 45° vaut 0.5 et la pulsation de coupure à 0 dB de ces boucles ouvertes ainsi corrigées vaut 46 rad/s.

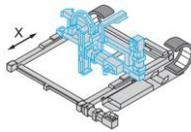
Les pulsations de coupure à 0 dB concernées par des marges de phases de la boucle ouverte corrigée de l'ordre de 45° se situent autour de $\omega_{co-0dB} \approx 50$ rad/s. A ces pulsations là, le déphasage supplémentaire induit par la constante de temps électrique du moteur ($\frac{L}{r} \approx 0.63$ ms) est inférieur à 2° .

Ci-dessous : boucle ouverte corrigée par le correcteur proportionnel qui permet de rendre instable le système dont le modèle tient compte de la constante de temps électrique.

En **vert** modèle de boucle ouverte corrigée ($G = 13.8$) en négligeant la constante de temps électrique : $\omega_{co-0dB} = 290$ rad/s, $M_\phi = 9.7^\circ$, $M_G = \infty$: **Le système en BF est mal amorti mais stable**

En **bleu** modèle de boucle ouverte corrigée ($G = 13.8$) prenant en compte la constante de temps électrique : $\omega_{co-0dB} = 288$ rad/s, $M_\phi = 0^\circ$, $M_G = 0$ dB : **le système est instable en BF !**

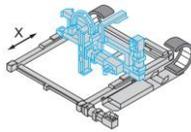




Conclusion : pour parler de stabilité la constante de temps électrique doit être introduite alors que pour parler d'amortissement, ce n'est pas nécessaire compte tenu de la gamme de fréquences concernées par les marges de stabilité que l'on vise : Un amortissement "correct" de boucle fermée est un facteur plus contraignant que sa stabilité (c'est évident !).

Toujours à propos de stabilité on liste ci-dessous les phénomènes qui peuvent être modélisés facilement pour approcher le plus possible le comportement réel de Control'X

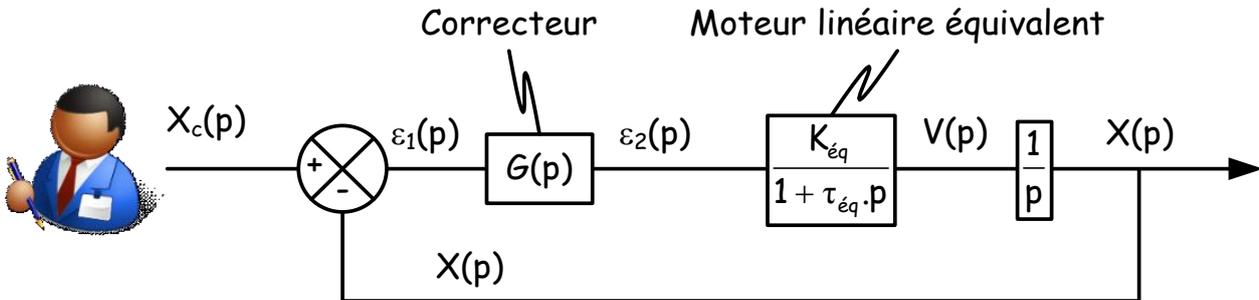
| Phénomène physique | Effet pour retarder l'instabilité lorsque le gain G du correcteur proportionnel augmente : |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prise en compte de l'inductance L | Défavorable |
| Prise en compte de l'échantillonnage $f_{éch}$ | Défavorable |
| Prise en compte des frottements visqueux f_v ou f_ω | Favorable |
| Prise en compte de la saturation du CNA V_{sat} | Favorable |



Ecart modèle-réel : du côté du moteur

Perturbations négligées :

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

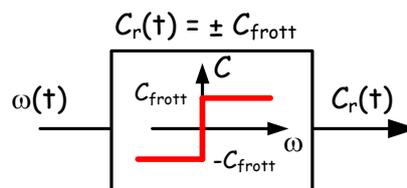


L'écart statique non nul observé sur le système réel ne correspond pas à celui prévu par le modèle : écart annoncé comme étant nul car le modèle de boucle ouverte est de classe 1 et les perturbations ne sont pas prises en compte.

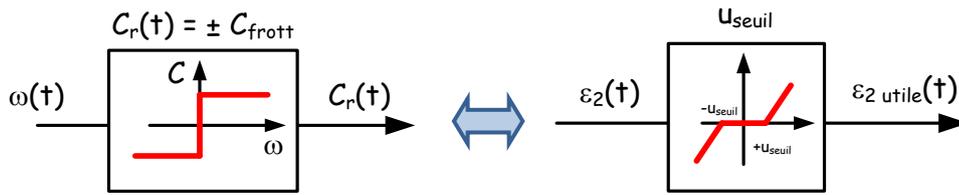
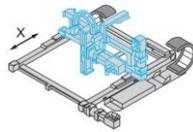
En réalité les résistances passives ne sont pas forcément négligeables. Des perturbations de plusieurs types peuvent être retenues : Résistances de type frottement sec, résistances au roulement et résistances de type frottement visqueux.

- Résistances type frottements secs (contact balais-collecteur par exemple) et résistances au roulement (guidages par éléments roulants).

Ces deux types de résistances passives se modélisent finalement de la même façon : il faut un couple moteur $C_m(t)$ suffisant pour commencer à vaincre le couple résistant $C_r(t)$ et à initier le mouvement (Penser au cône d'adhérence). Dans la suite de ce document, ce couple résistant $C_r(t)$ est désigné comme étant un couple de frottements secs mais c'est bien en réalité la somme d'un couple de résistances au roulement et d'un couple de frottements secs dont il s'agit. On notera $C_r(t) = \pm C_{frott}$ lorsqu'on fera référence à ce type de résistances. Ce couple $C_r(t)$ correspond bien-sûr à la somme de toutes les résistances de ce type ramenées sur l'arbre moteur.

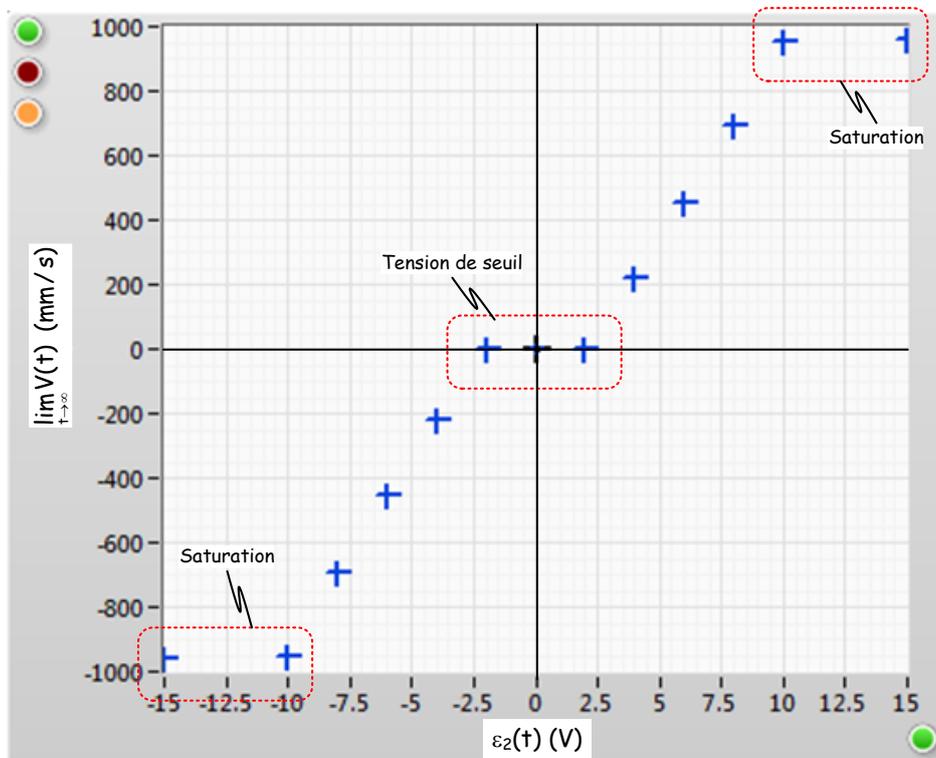


Plus loin dans ce document, on explique la relation entre ce couple de frottements secs C_{frott} et la tension de seuil de démarrage du moteur U_{seuil} .



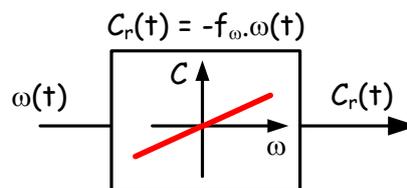
Dans tous les cas de modèles envisagés, ces résistances de type frottements secs C_{frott} , transformés ou non en tension U_{seuil} , relèvent de modèles non linéaires et sont difficiles à gérer.

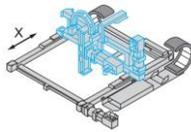
Ci-dessous les résultats d'une campagne d'essais menés en boucle ouverte : Tension constante $\epsilon_2(t)$ appliquée sur le moteur équivalent et vitesse finale atteinte $V_\infty(t)$ obtenue en régime permanent. Les deux phénomènes non linéaires évoqués, saturation de la carte de commande et tension de démarrage du moteur, apparaissent très clairement.



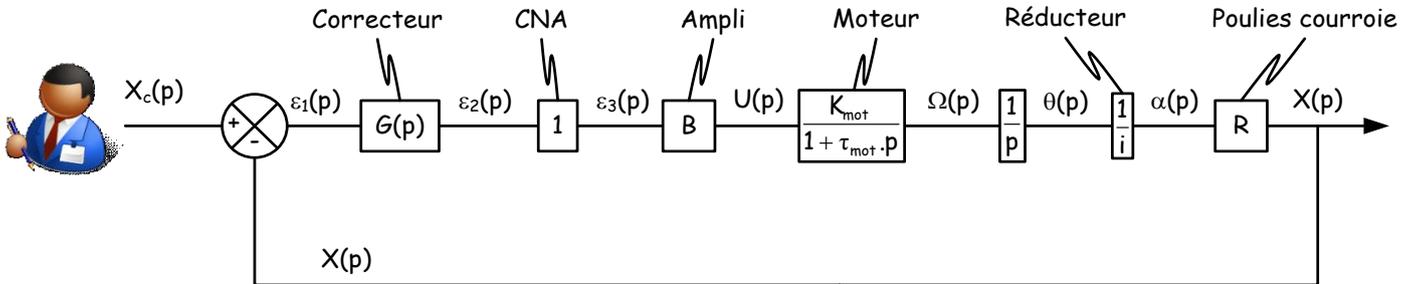
Abscisses : Tension $\epsilon_2(t)$ appliquée en boucle ouverte
Ordonnées : Vitesse du chariot atteinte en régime permanent : $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t)$

- Résistances de type frottements visqueux. Ces résistances seront modélisées en temps utile si nécessaire en utilisant un modèle linéaire de frottements visqueux : $C_r(t) = -f_{\omega} \cdot \omega(t)$



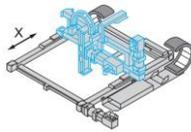


La fonction de transfert du moteur dans le modèle de base s'écrit $\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_{mot}}{1 + \tau_{mot} \cdot p}$.



Cette fonction de transfert peut être issue de deux types de modèles selon que l'on souhaite tenir compte ou non du frottement visqueux :

| Modèle linéaire sans frottements visqueux | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>r : résistance de l'induit k : constante de couple ou de force contre électromotrice J_{éq} : moment d'inertie ramené sur l'arbre moteur</p> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> </div> | <p>On a ici : $\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{\frac{1}{k}}{1 + \frac{r \cdot J_{éq}}{k^2} \cdot p}$</p> <p>Soit</p> $K_{mot} = \frac{1}{k}$ $\tau_{mot} = \frac{r \cdot J_{éq}}{k^2}$ |



Modèle linéaire avec frottements visqueux

r : résistance de l'induit
 k : constante de couple ou de force contre électromotrice
 $J_{\text{éq}}$: moment d'inertie ramené sur l'arbre moteur
 f_{ω} : coefficient de frottements visqueux (tous frottements visqueux ramenés sur l'arbre moteur)

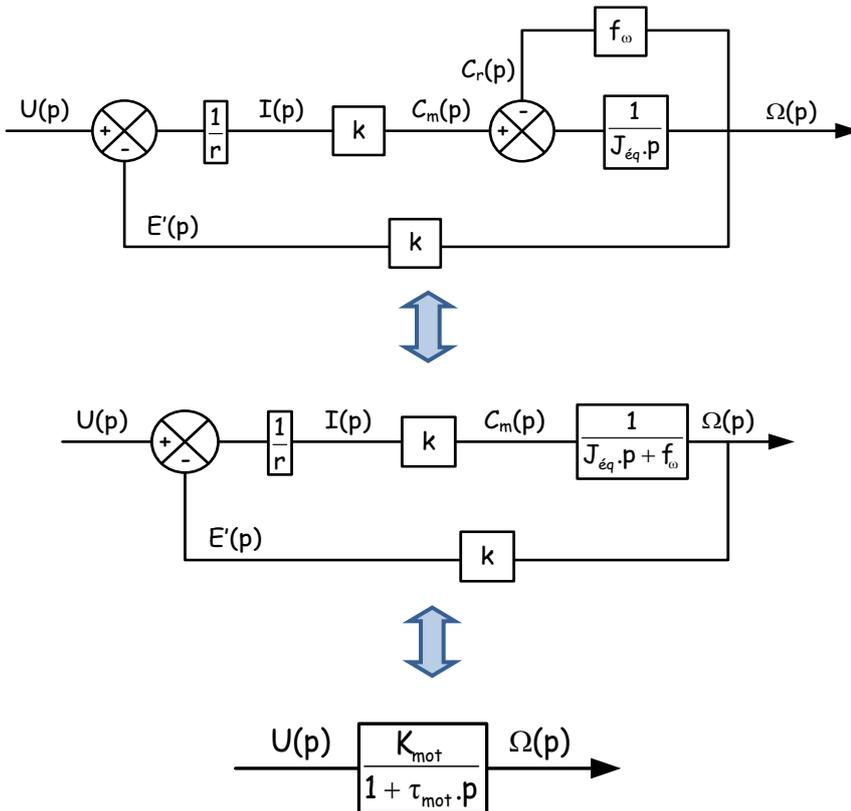
On a maintenant

$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{k}{1 + \frac{r \cdot J_{\text{éq}}}{r \cdot f_{\omega} + k^2} \cdot p}$$

Soit

$$K_{\text{mot}} = \frac{k}{r \cdot f_{\omega} + k^2}$$

$$\tau_{\text{mot}} = \frac{r \cdot J_{\text{éq}}}{r \cdot f_{\omega} + k^2}$$

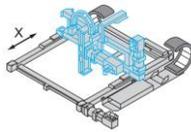


Finalement dans notre modèle de base, on avait choisi comme fonction de transfert du moteur $\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_{\text{mot}}}{1 + \tau_{\text{mot}} \cdot p}$

... mais cette fonction de transfert pouvait être tout aussi bien celle du moteur non perturbé (aucune résistance passive) ou celle du moteur perturbé uniquement par des résistances passives de type frottement visqueux.

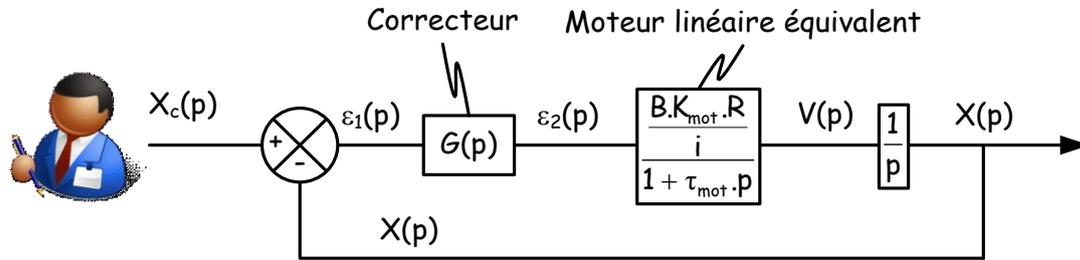
Un modèle de moteur avec résistances passives type frottements visqueux nous amène donc à considérer un moteur virtuel de gain statique $\frac{k}{r \cdot f_{\omega} + k^2}$ et non $\frac{1}{k}$

et de constante de temps $\frac{r \cdot J_{\text{éq}}}{r \cdot f_{\omega} + k^2}$ et non $\frac{r \cdot J_{\text{éq}}}{k^2}$: Un moteur qui tourne un peu moins vite et qui est un peu plus rapide que le moteur de base. Vous avez bien lu, un peu plus rapide !

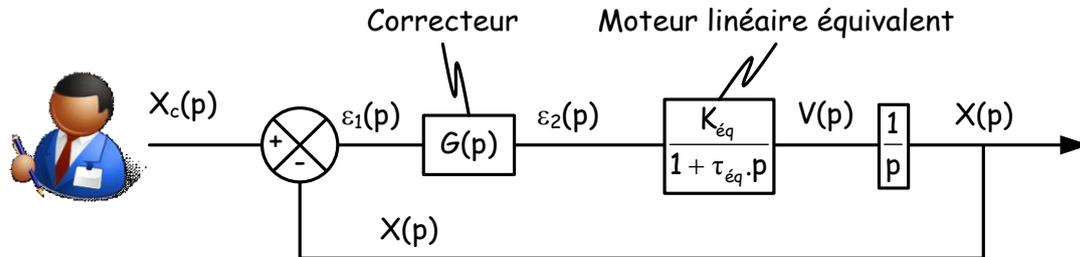


Valeurs numériques pour alimenter notre modèle de base :

On rappelle ci-dessous le modèle de boucle fermée que l'on avait considéré :

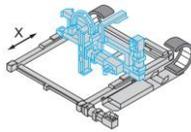


Soit en introduisant les variables $K_{\acute{e}q}$ et $\tau_{\acute{e}q}$:



Pour alimenter notre modèle, il faut donc prendre les valeurs suivantes :

- $K_{\acute{e}q} = \frac{B.K_{mot}.R}{i}$ avec :
 - $K_{mot} = \frac{1}{k}$ sur la base d'un modèle sans frottements visqueux
 - $K_{mot} = \frac{k}{r.f_{\omega} + k^2}$ sur la base d'un modèle avec frottements visqueux
- $\tau_{\acute{e}q} = \tau_{mot}$ avec :
 - $\tau_{mot} = \frac{r.J_{\acute{e}q}}{k^2}$ sur la base d'un modèle sans frottements visqueux
 - $\tau_{mot} = \frac{r.J_{\acute{e}q}}{r.f_{\omega} + k^2}$ sur la base d'un modèle avec frottements visqueux



On peut prendre les données constructeur suivantes pour calculer K_{mot} et τ_{mot}

$$k = 0.209 \text{ V}/(\text{rad/s})$$

$$r = 5.1 \Omega$$

$f_{\omega} = 1.35 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}/(\text{rad/s})$: valeur issue d'une campagne de mesure. Le constructeur annonce pour le moteur seul un coefficient de $0.124 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}/(\text{rad/s})$ soit 10 fois moins

$$J_{\acute{e}q} = 2.15 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

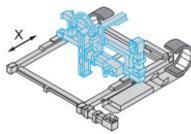
$$B = 4$$

$$R = 24.67 \text{ mm (conserver des mm pour les applications num\u00e9riques)}$$

Tous calculs faits, on trouve :

| | Mod\u00e8le de connaissance sans frottements visqueux | Mod\u00e8le de connaissance avec frottements visqueux | Mod\u00e8le de comportement |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|
| K_{mot} (rad/s)/V | 4.8 | 4.13 | 4 |
| $K_{\acute{e}q} = \frac{B \cdot K_{mot} \cdot R}{i}$ (mm/s)/V | 157 | 136 | 132 |
| $\tau_{\acute{e}q} = \tau_{mot}$ (ms) | 25 | 22 | 22 |

Nota : Les valeurs de $K_{\acute{e}q}$ et $\tau_{\acute{e}q}$ que l'on avait consid\u00e9r\u00e9es dans le mod\u00e8le de base \u00e9taient des valeurs issues d'un mod\u00e8le de comportement : elles int\u00e9graient donc les frottements visqueux.



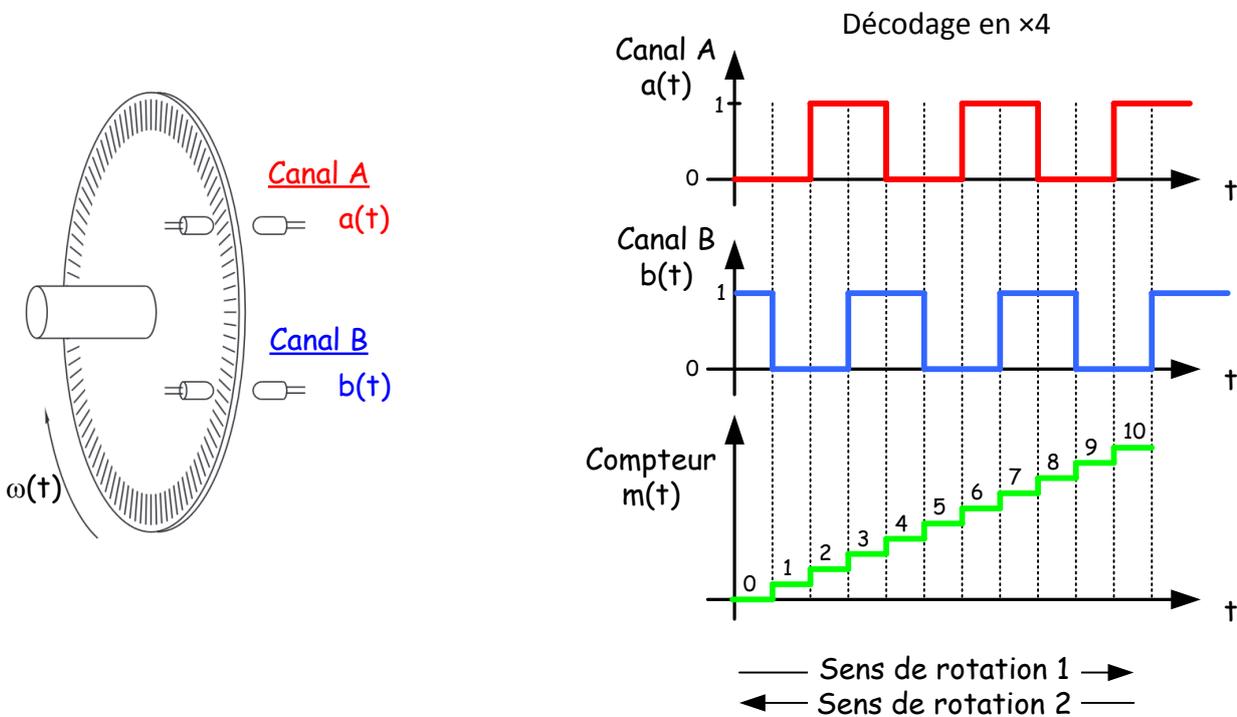
Écarts modèle-réel : du côté du codeur incrémental

Non continuité : la quantification

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

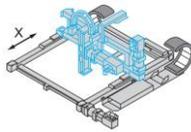
Le codeur génère des impulsions sur ses canaux A et B déphasés d'un quart de période. Le compteur/décompteur s'incrémente ou se décrémente sur tous les fronts montants et descendants des deux canaux A et B : c'est le décodage dit en $\times 4$.

On obtient ainsi 77 incréments / mm. Cela correspond à une résolution (ramenée sur le chariot) de 12.9 μm .



Cette quantification est négligeable. Elle peut être comparée par exemple à :

- La répétabilité de positionnement du chariot annoncée par Schneider à $\pm 50 \mu\text{m}$
- Au jeu angulaire du réducteur ramené sur le chariot qui est de 72 μm maximum.

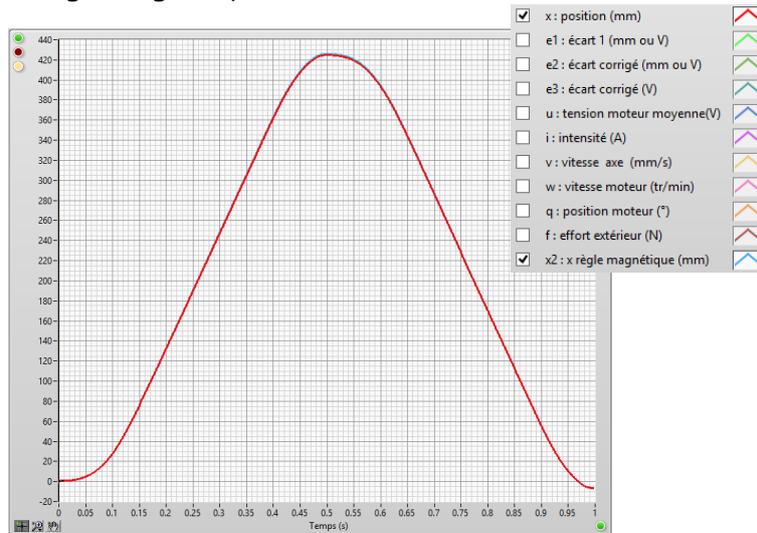


Ecart modèle-réel : du côté du moteur

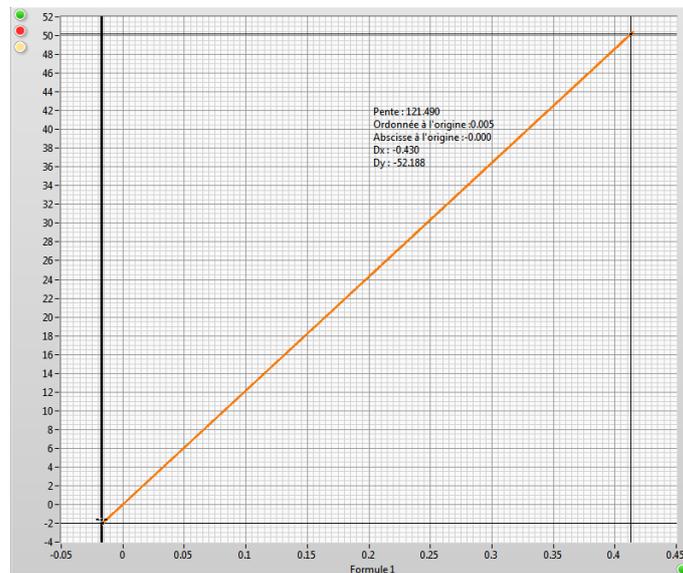
La mécanique de l'axe : jeu du réducteur, élasticité de l'accouplement et de la courroie

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

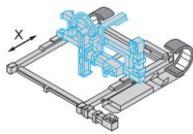
En faisant effectuer un aller-retour au chariot comme celui-ci-dessous, on ne voit quasiment aucune différence entre la position x issue du codeur incrémental monté sur l'arbre moteur et la position x2 issue de la règle magnétique :



En traçant la position de l'angle moteur θ (issu du codeur incrémental monté sur l'arbre moteur) en fonction de la position du chariot x2 (issue de la règle magnétique) on obtient un segment de droite : on ne voit aucun effet lié au jeu du réducteur ou à l'élasticité du joint d'accouplement ou de la courroie : pas d'hystérésis notamment. La pente mesuré vaut 121.5 soit quasiment le rapport $\frac{i}{R}$.



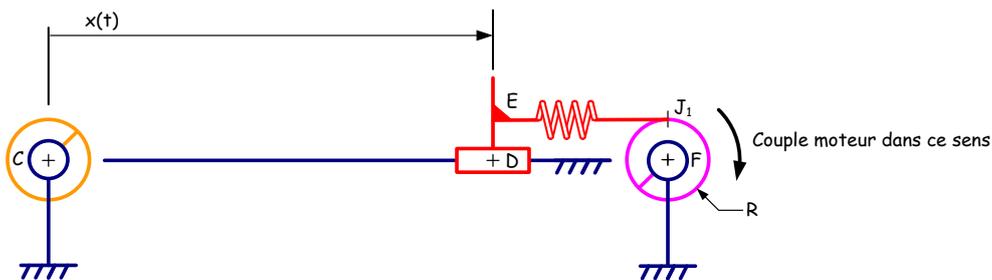
x2(t) en m en abscisses et $\theta(t)$ en radians en ordonnées



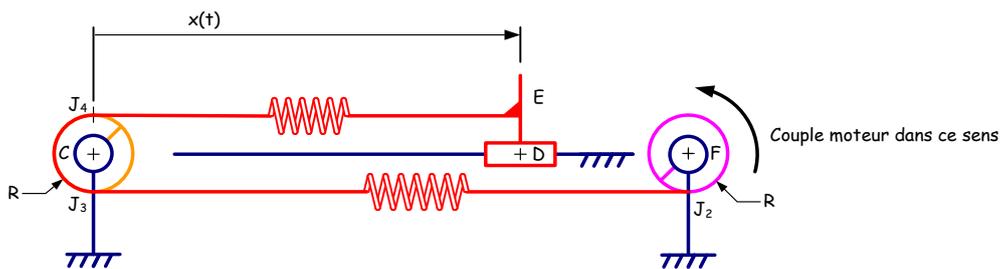
Le jeu du réducteur (10 min d'arc soit 0.0029 rad à priori ramené sur la sortie) pourrait être à l'origine de certaines différences entre les paramètres géométriques d'entrée $\theta(t)$ et le paramètre géométrique de sortie $x(t)$. Ce jeu angulaire $d\theta$ converti en distance correspond à $dx = R.d\theta = 70 \mu\text{m}$. Ce jeu semble être à l'origine de la répétabilité de positionnement de $50 \mu\text{m}$ annoncée par le constructeur Schneider.

L'élasticité de la courroie pourrait aussi avoir des conséquences. L'élasticité de la courroie k_c vaut $k_c = \frac{r_s}{l}$ où r_s est la raideur spécifique de la courroie ($0.572 \times 10^6 \text{ N}$) et l la longueur de la courroie.

En faisant l'hypothèse très simplificatrice que le brin mou de la courroie (qui est assez fortement précontrainte contrairement à une chaîne par exemple) transmet une tension nulle et donc que tout l'effort moteur transite par le brin tendu, on a ci-dessous les deux cas de figure extrêmes en fonction de la position du chariot et du sens du couple moteur.

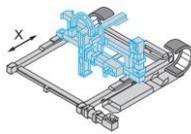


Cas 1 : l'effort moteur transite par une toute petite longueur de courroie : le brin tendu vaut environ 15 cm



Cas 2 : l'effort moteur transite par une grande longueur de courroie : le brin tendu vaut environ 1.5 m

C'est bien sûr dans le cas 2 que la déformation de la courroie risque d'avoir des conséquences importantes sur la relation entrée-sortie géométrique.



La masse de tout l'équipage mobile (chariot + accessoires) vaut sensiblement 2 kg. Lors d'une brusque accélération à $5g = 50 \text{ m/s}^2$, l'effort d'inertie $m\ddot{x}$ vaut environ 100 N. Cet effort d'inertie est donc à lui seul (sans compter les résistances dans la liaison glissière chariot-bâti), à l'origine d'une déformation de courroie valant $dx = \frac{m\ddot{x}}{k_c} = \frac{m\ddot{x}l}{r_s}$

On trouve numériquement : $dx = \frac{2 \times 50 \times 1.5}{0.572 \cdot 10^6} = 260 \mu\text{m}$ ce qui n'est pas négligeable. Cette élasticité ne s'observe pas expérimentalement et ce même pour des essais assez violents.

Conclusion : Les "défauts" mécaniques de l'axe ne semblent pas être à l'origine d'écarts importants entre notre modèle de base et le comportement réel observé.

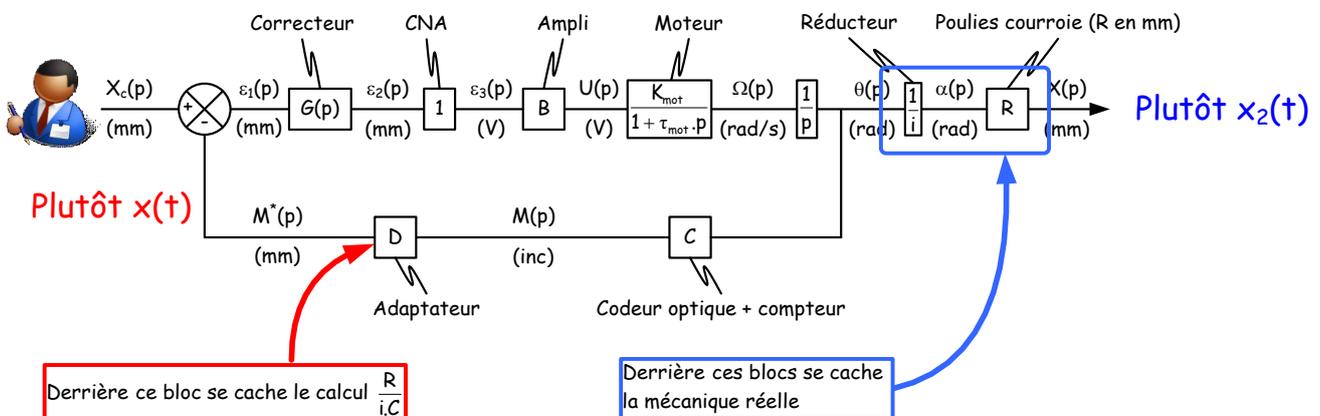
Nota : un modèle plus convenable concernant la tension de courroie mais qui n'affecte pas les résultats ci-dessus est celui-ci : $2 \cdot T_0 = T + t$

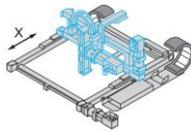
En nommant :

- T_0 la précontrainte installée au montage de la courroie entre les deux poulies
- t la tension transitant dans le brin le plus mou de la courroie
- T la tension transitant dans le brin le plus tendu la courroie



Attention : ces défauts mécaniques, même s'ils sont à l'extérieur de la boucle d'asservissement, interviennent aussi implicitement dans l'adaptateur de la chaîne de retour (bloc D). Ils interviennent aussi si l'on prend soin d'observer le signal x issu de la règle magnétique (x_2) et non le signal issu du codeur monté sur l'arbre moteur (x) pour caractériser les performances du positionnement.



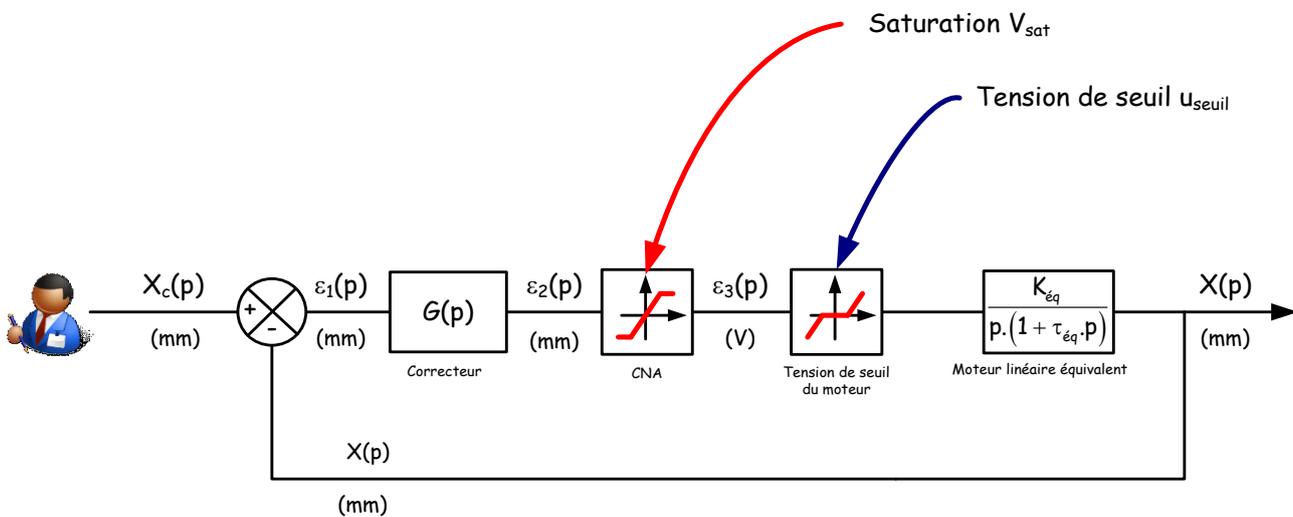


En résumé : Différences modèle - réel

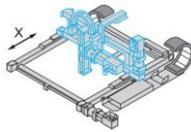
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Seules les perturbations (frottements secs et visqueux) et la saturation du convertisseur numérique analogique sont à l'origine de gros écarts entre le comportement réel observé et le comportement prévu par le modèle.

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

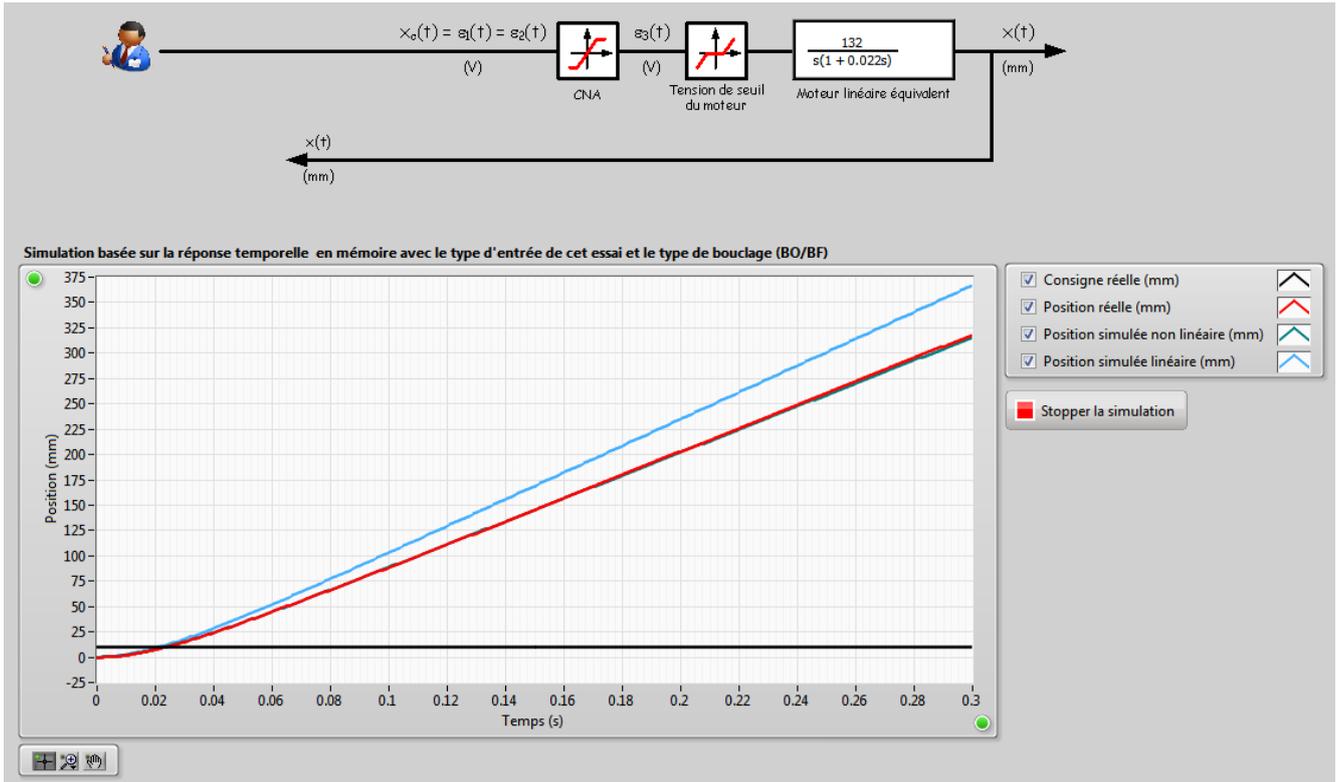


Rappelons que ce modèle permet d'expliquer en particulier que la tension de seuil u_{seuil} est susceptible de générer des écarts de position maxi $\varepsilon_{1 \text{ statique max}} = \frac{u_{seuil}}{G}$.

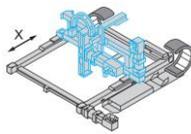


Comparaison modèle linéaire et non linéaire avec le comportement réel en BO sous 10 V

$$H_{BO}(p) = \frac{132}{p \cdot (1 + 0.022 \cdot p)}, V_{sat} = 10 \text{ V et } u_{seuil} 1.5 \text{ V}$$

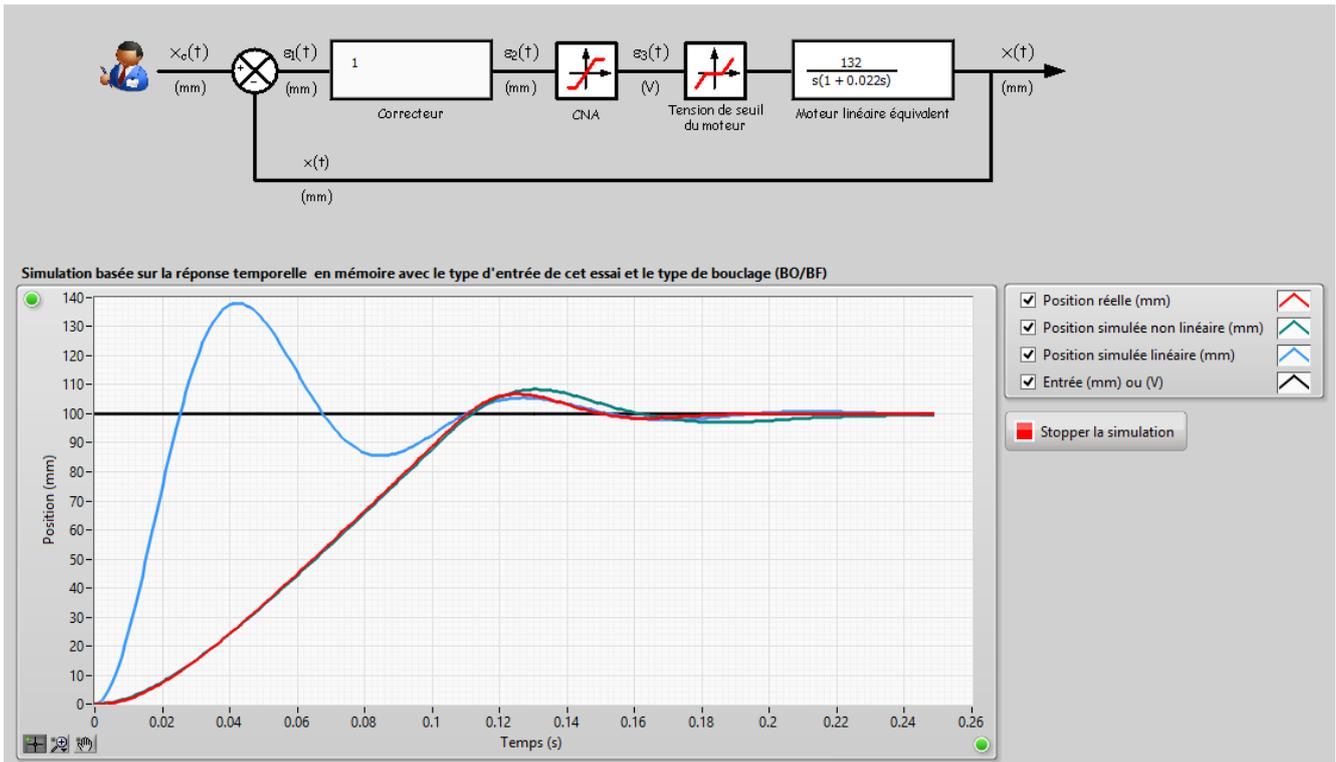


Validation du modèle non linéaire de boucle ouverte

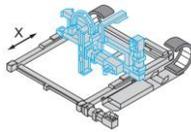


Comparaison modèle linéaire et non linéaire avec le comportement réel en boucle fermée pour une entrée indicielle de 100 mm et un gain de correcteur $G = 1$.

$$H_{BO}(p) = \frac{132}{p \cdot (1 + 0.022 \cdot p)}, \quad V_{sat} = 10 \text{ V et } u_{seuil} = 1.5 \text{ V}$$



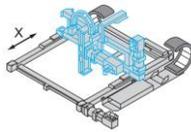
Validation du modèle non linéaire de boucle fermée



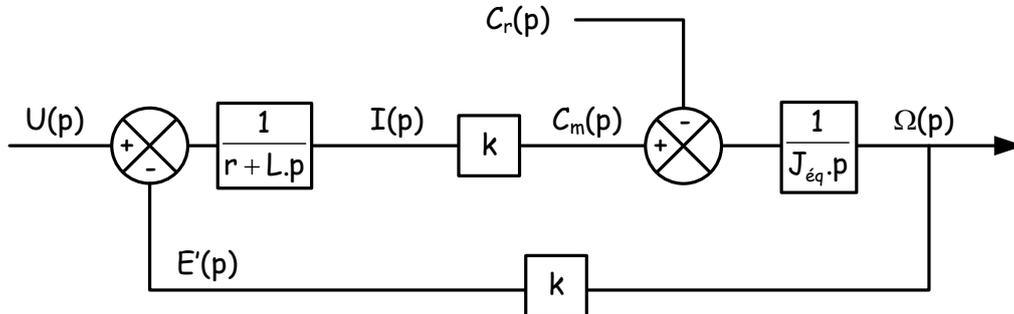
Modélisation du moteur seul

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

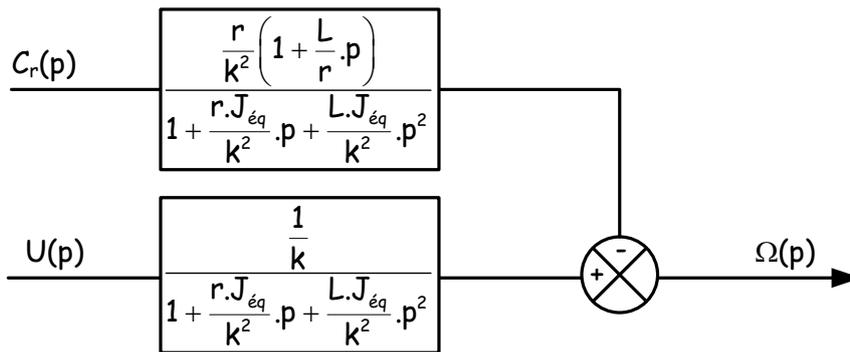
| Schéma électrique équivalent | Schéma mécanique équivalent |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><u>Equation électrique :</u></p> $u(t) = r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e'(t)$ | <p><u>Paramétrage :</u></p> $\begin{aligned} \bar{C} (\text{moteur} \rightarrow 1) &= C_m(t) \cdot \bar{y}_0 \\ \bar{C} (\text{ext} \rightarrow 1) &= -C_r(t) \cdot \bar{y}_0 \\ \bar{\Omega}_{1/0} &= \omega(t) \cdot \bar{y}_0 \end{aligned}$ <p><u>Equation dynamique :</u></p> $C_m(t) - C_r(t) = J_{\text{eq}} \cdot \dot{\omega}(t)$ |
| Couplages électro-mécaniques | |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Domaine électrique</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>$C_m(t) = k \cdot i(t)$</p> <p>$e'(t) = k \cdot \omega(t)$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Domaine mécanique</p> </div> </div> | |
| Valeurs numériques | |
| <p> $r = 5.1 \Omega$ $L = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ $k = 0.21 \text{ SI}$ $J_{\text{eq}} = J_{\text{mot}} = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ pour l'arbre moteur seul $J_{\text{eq}} = 2.15 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$ si on considère l'inertie équivalente de tout l'équipage mobile ramené sur l'arbre moteur (le moteur intervient pour 17 % de l'inertie totale). </p> | |



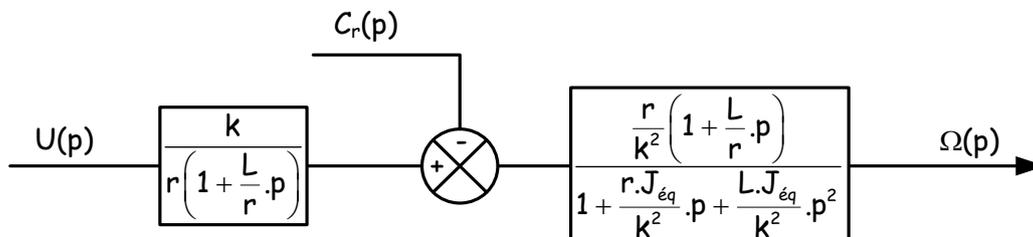
On obtient alors le schéma bloc suivant :

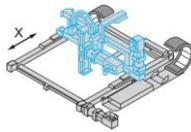


Ou sous forme plus compacte :



ou encore :

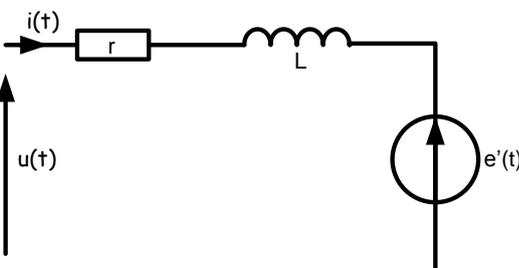
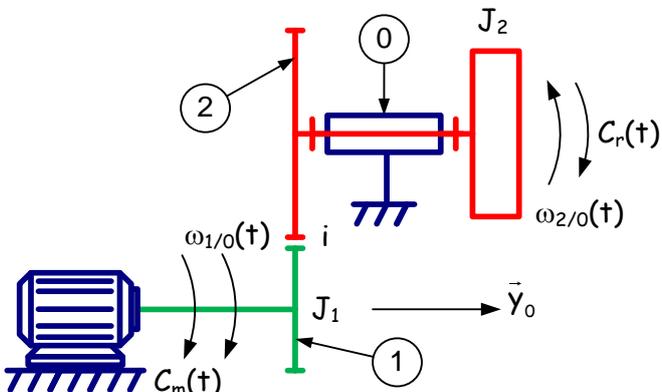


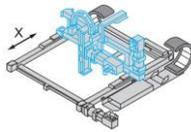


Transformation du schéma bloc du motoréducteur en schéma d'un moteur équivalent

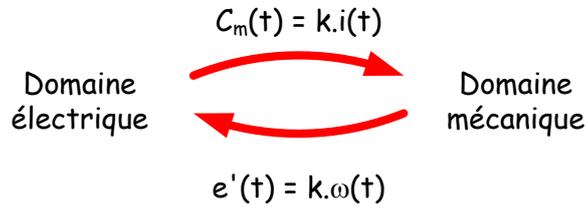
... Le réducteur de Control'X : un réducteur qui ne réduit pas

Ctrl + clic pour revenir au sommaire

| Schéma électrique équivalent | Schéma mécanique |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><u>Equation électrique :</u></p> $u(t) = r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e'(t)$ |  <p><u>Paramétrage :</u></p> $\bar{C}(\text{moteur} \rightarrow 1) = C_m \cdot \bar{y}_0$ $\bar{C}(\text{ext} \rightarrow 2) = C_r \cdot \bar{y}_0$ $\bar{\Omega}_{1/0} = \omega_{1/0} \cdot \bar{y}_0$ $\bar{\Omega}_{2/0} = -\omega_{2/0} \cdot \bar{y}_0$ $i = \frac{\omega_{1/0}}{\omega_{2/0}}$ $J_{\text{éq}} = J_1 + \frac{J_2}{i^2} : \text{Moment d'inertie ramené sur l'arbre moteur}$ $J_{\text{éq}}^* = J_{\text{éq}} \cdot i^2 = J_1 \cdot i^2 + J_2 : \text{Moment d'inertie ramené sur l'arbre de sortie du motoréducteur}$ <p><u>Equation dynamique :</u></p> $C_m(t) - \frac{C_r(t)}{i} = J_{\text{éq}} \cdot \dot{\omega}_{1/0}(t)$ |



Couplages électro-mécaniques



Valeurs numériques

$r = 5.1 \Omega$

$L = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

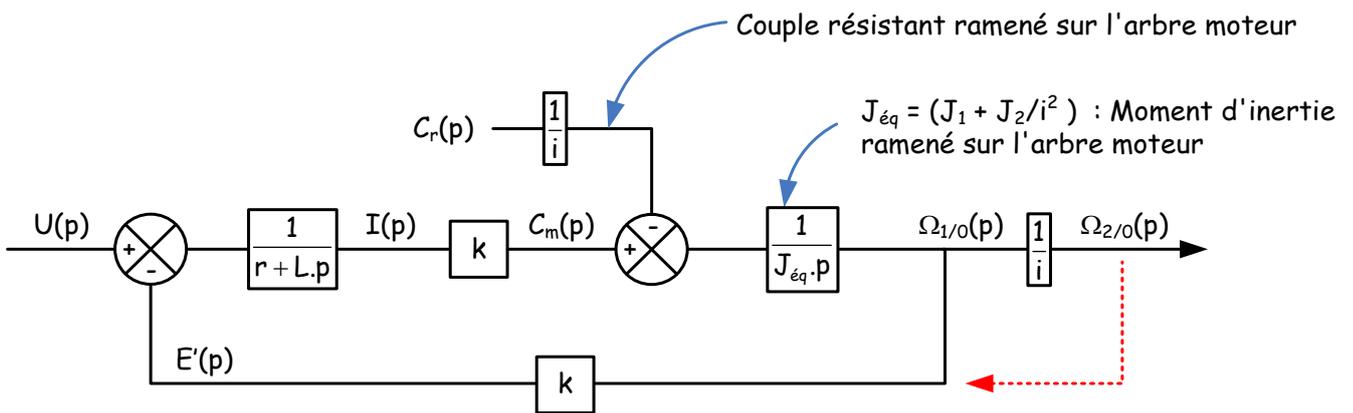
$k = 0.21 \text{ SI}$

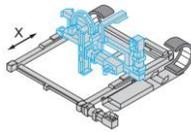
$i = 3$

$J_{\text{éq}} = J_1 + \frac{J_2}{i^2} = 6.26 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$: moteur + réducteur seuls, le tout ramené sur l'arbre moteur

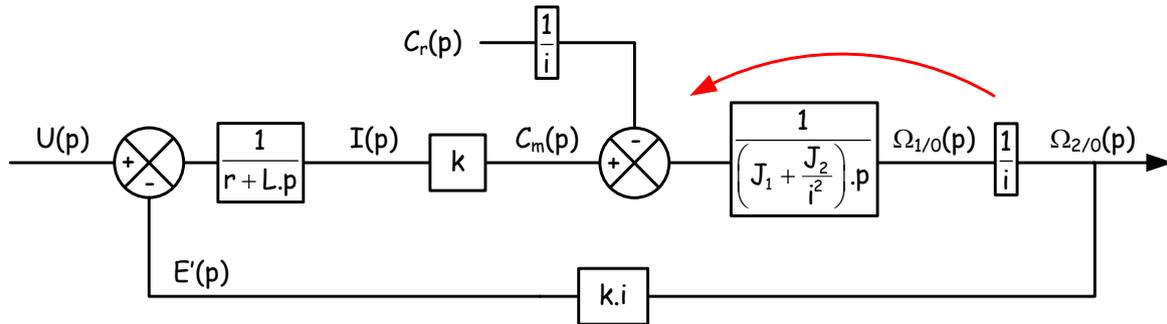
$J_{\text{éq}}^* = J_1 \cdot i^2 + J_2 = 5.63 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$: moteur + réducteur seuls, le tout ramené sur l'arbre de sortie du réducteur

Le schéma bloc traduisant les quatre équations de comportement prend la forme ci-dessous :

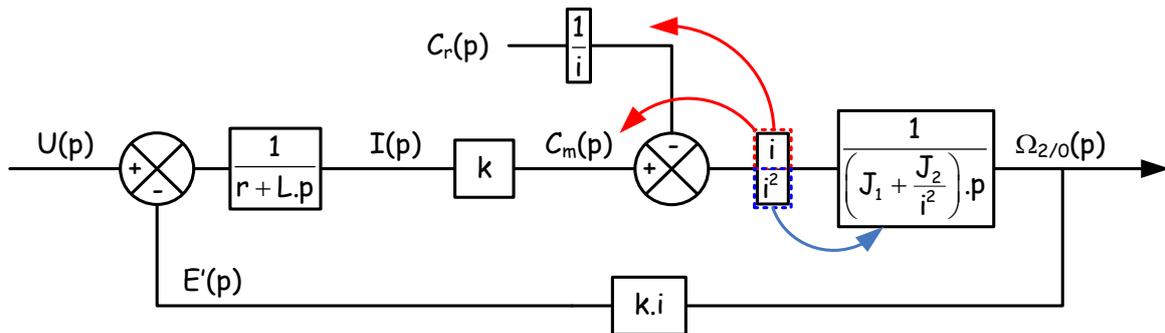




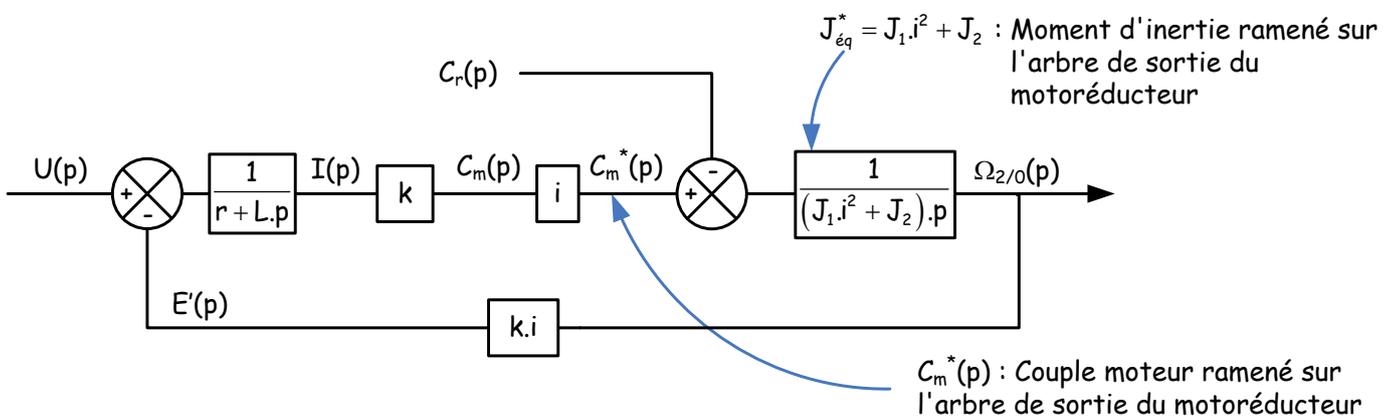
En déplaçant le point de piquage de la chaîne de retour, on obtient le schéma :

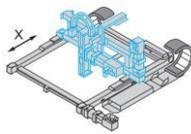


En remplaçant le quotient $\frac{1}{i}$ par $\frac{i}{i^2}$ pour faciliter la compréhension de la transformation qui va suivre :

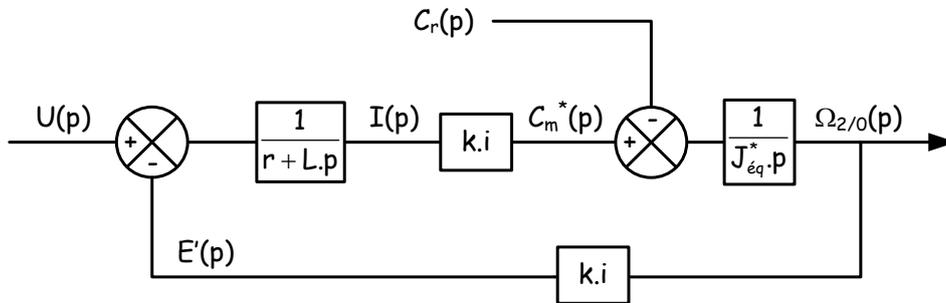


En faisant remonter le facteur i en amont du soustracteur et en utilisant le quotient $\frac{1}{i^2}$ pour modifier l'expression du moment d'inertie, on fait apparaître le couple moteur en sortie de motoréducteur $C_m^*(t)$ et le moment d'inertie équivalent mais cette fois ramené sur l'arbre de sortie du motoréducteur $J_{\text{ég}}^*$:

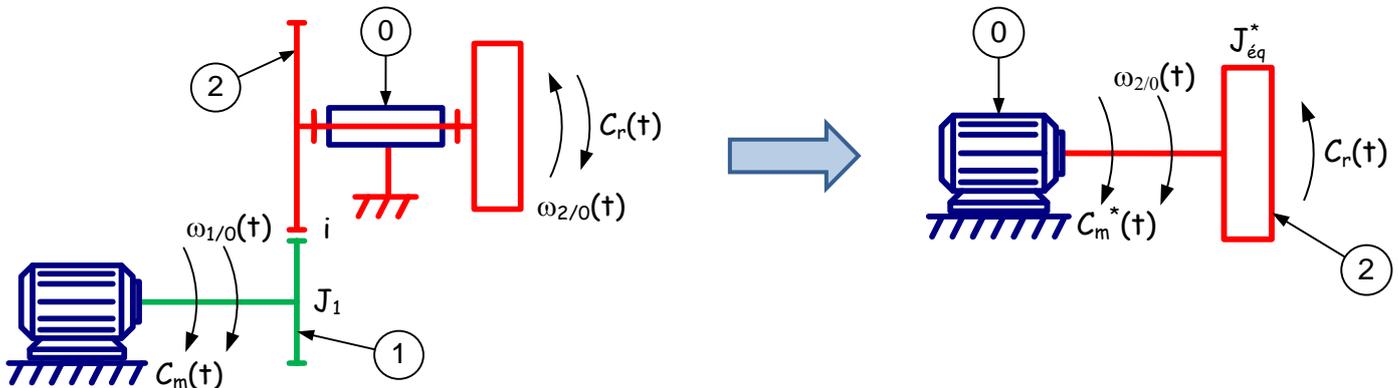




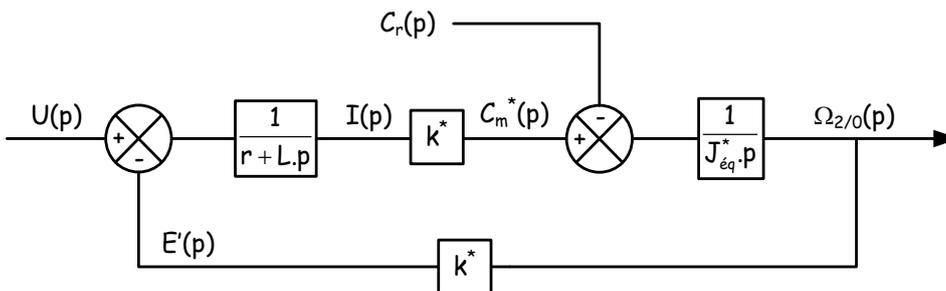
Une dernière transformation fait apparaître le coefficient $k.i$ qui est le coefficient de force contre électromotrice ou le coefficient de couple mais cette fois en considérant le motoréducteur dans son ensemble et non plus le moteur seul.

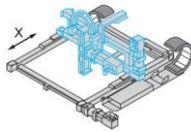


On a maintenant le schéma bloc du motoréducteur qui met en évidence que tout se passe comme si on avait affaire à un moteur "équivalent" : Un moteur tournant moins vite mais avec plus de couple. Le coefficient de force contre électromotrice ou coefficient de couple a augmenté ($i = 3$) et le moment d'inertie ramené sur l'arbre de sortie du motoréducteur aussi.



Les caractéristiques mécaniques du moteur seul n'apparaissent plus. En effectuant le changement de variable $k^* = k.i$ qui est le coefficient de couple ou de force contre électromotrice du moteur équivalent on a alors :

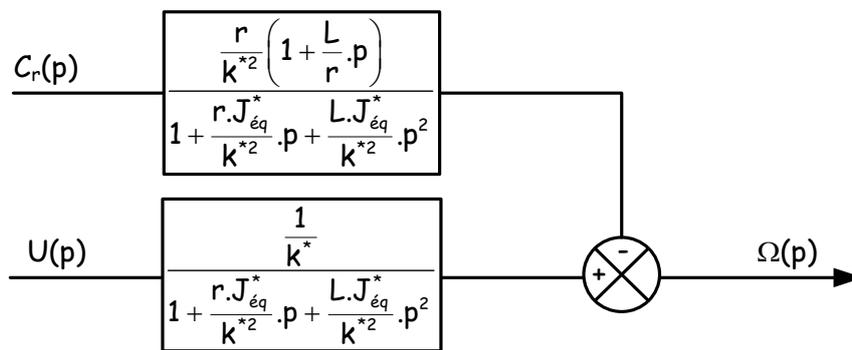




Cette transformation met aussi et surtout en évidence que le gain k joue le même rôle que le rapport de réduction ($k^* = k.i$) : une grosse réduction (i grand) a le même effet qu'un gros gain k .

Le moteur de Control'X a à la base un coefficient k important pour un moteur de 110 W. Avec le réducteur de rapport 3, le coefficient équivalent k^* est particulièrement important : on a donc un actionneur qui a puissance donnée tourne "lentement" mais présente un couple moteur "important".

On a là encore le schéma bloc condensé :



En nommant U_0 la tension d'alimentation supposée constante et C_{r0} un couple résistant constant appliqué sur le motoréducteur, on obtient une vitesse de rotation en régime permanent

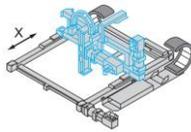
$$\omega_0 = \frac{1}{k^*} \cdot U_0 - \frac{r}{k^{*2}} \cdot C_{r0}$$

D'autre part, en régime permanent $C_{m0} = C_{r0}$ donc $\omega_0 = \frac{1}{k^*} \cdot U_0 - \frac{r}{k^{*2}} \cdot C_{m0}$

Ou encore $C_{m0} = \frac{k^*}{r} \cdot U_0 - \frac{k^{*2}}{r} \cdot \omega_0$: c'est l'équation de la courbe caractéristique du moteur dans le plan (C, ω) .

Avec la présence du réducteur, la courbe caractéristique du moteur se transforme en courbe caractéristique du motoréducteur : Sous une même tension constante d'alimentation U_0 , on a un motoréducteur qui est moins sensible à la charge que le moteur seul.

N.B. : Plus la pente est raide, moins le moteur est sensible à la charge.



| Courbe caractéristique du moteur seul | Courbe caractéristique du motoréducteur (vue en sortie de réducteur) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| | |
| <p>Le réducteur de Control'X ($i = 3$) rend la pente du motoréducteur 9 fois plus raide que celle du moteur seul.</p> <p>A tension d'alimentation U_0 donnée, la vitesse à vide en sortie de motoréducteur est 3 fois plus petite et le couple "arbre bloqué" ou couple de démarrage est 3 fois plus élevé que celui du moteur sans réducteur : La pente du motoréducteur est bien 9 fois plus raide que la pente du moteur seul.</p> | |

Tableau 1

Une question que l'on est tenté de se poser :

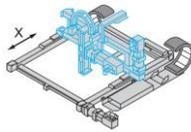
Sous charge résistante C_{r0} donnée, un réducteur réduit-t-il nécessairement la vitesse ?

Moteur non chargé, c'est évident, la réponse est oui $\frac{U_0}{k} > \frac{U_0}{k^*}$ mais qu'en est-il sous charge ?

Une réduction nous laisse penser que oui : la sortie va tourner moins vite. Mais d'un autre côté, le moteur est moins chargé, il a donc tendance à tourner plus vite.

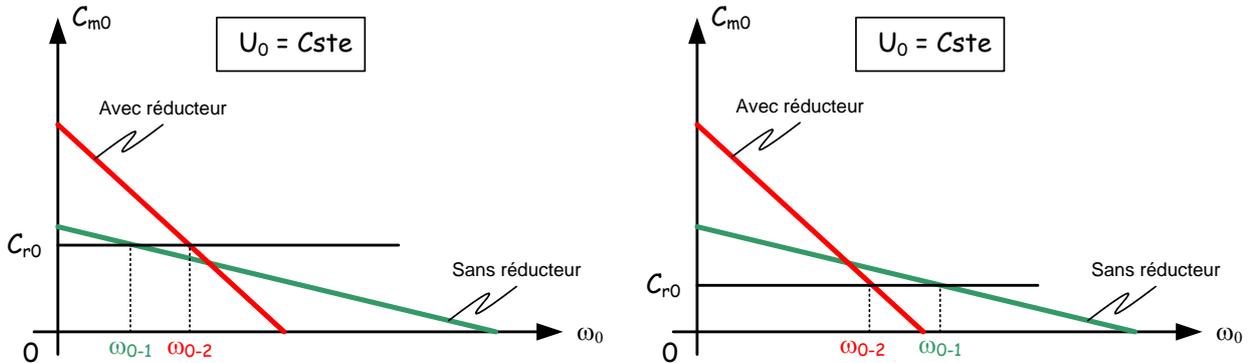
Sans réducteur, on aurait fini par avoir en sortie de moteur une vitesse $\omega_{0-1} = \frac{1}{k} \cdot U_0 - \frac{r}{k^2} \cdot C_{r0}$

Avec le réducteur, on aura une vitesse (en sortie de motoréducteur) $\omega_{0-2} = \frac{1}{k^*} \cdot U_0 - \frac{r}{k^{*2}} \cdot C_{r0}$



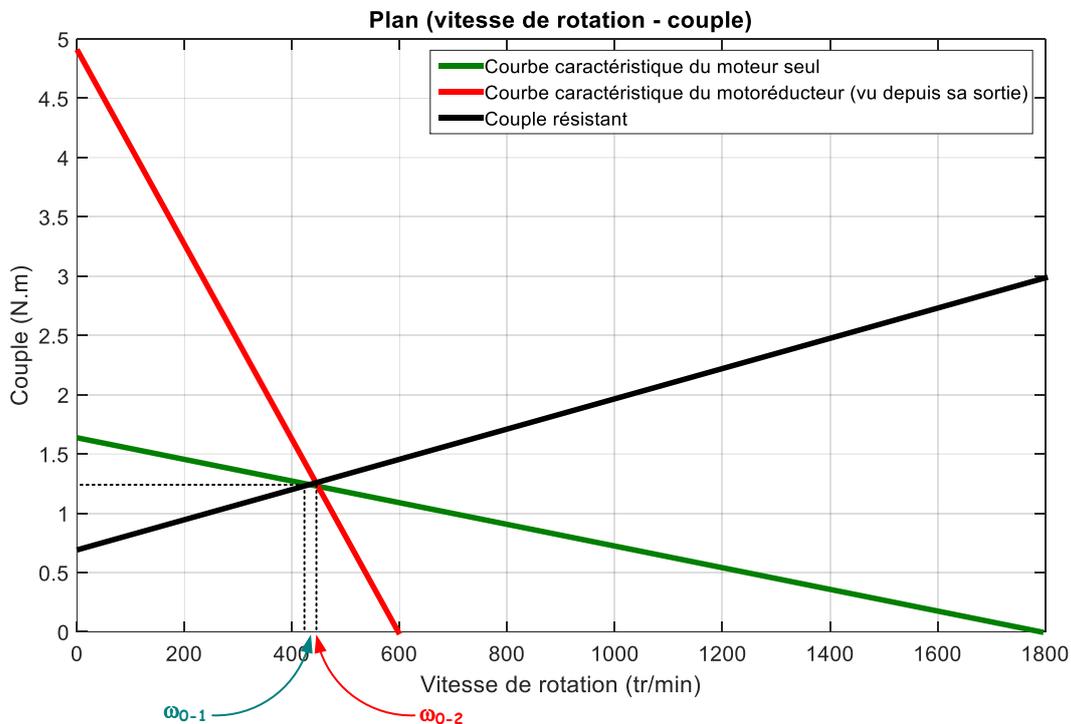
Question : Sous quelle condition peut-on avoir $\omega_{0-2} > \omega_{0-1}$?

Éléments de réponse : Cela dépend de C_{r0} !



La présence du frottement visqueux rend ce constat encore plus flagrant.

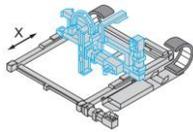
Sur Control'X, en faisant le même raisonnement mais en intégrant les frottements visqueux, on met en évidence que le réducteur ne réduit pas la vitesse de rotation !



Valeurs numériques du modèle :

Couple de frottement sec $C_{frott} = 0.69$ N.m

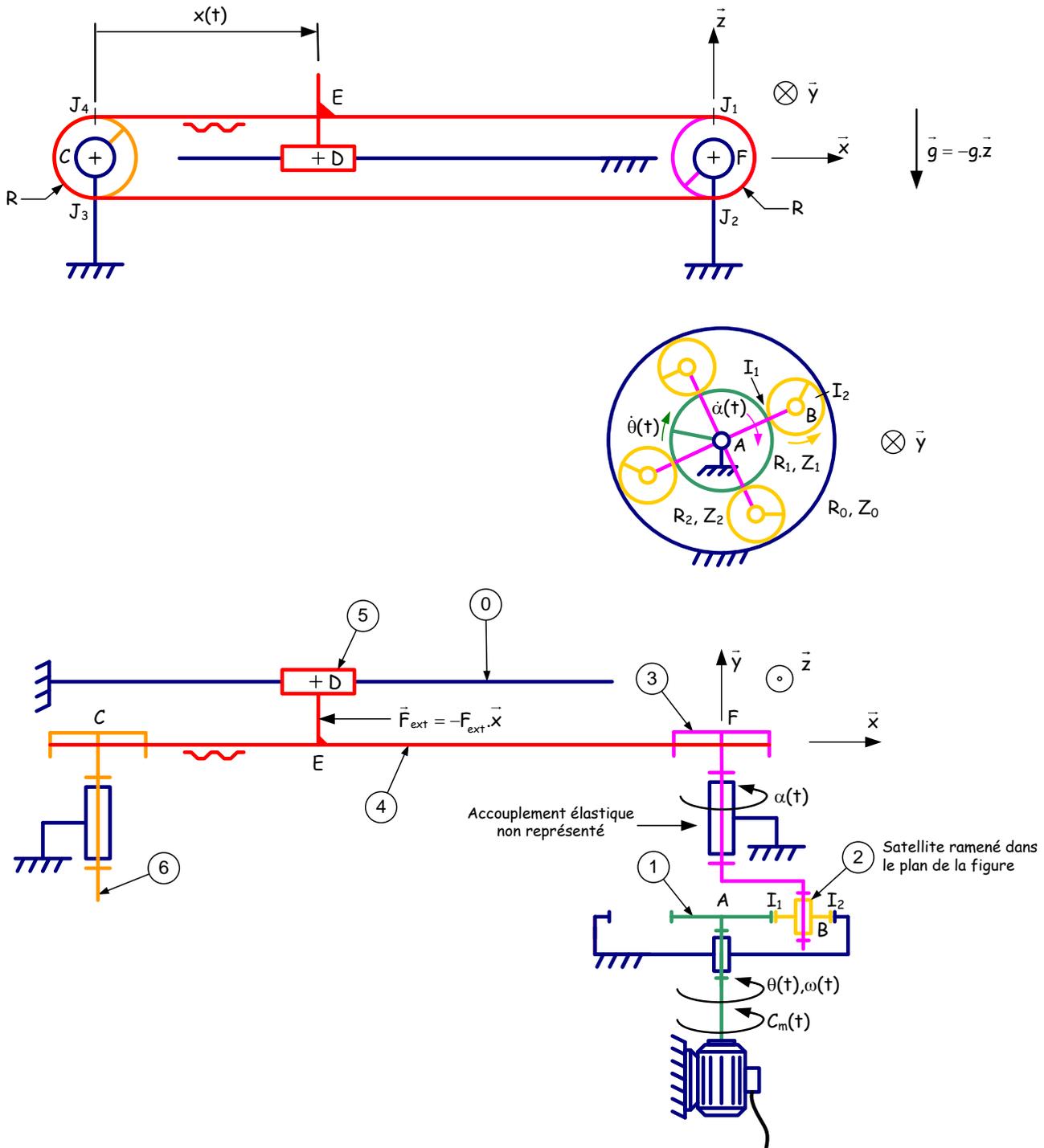
Constante de couple de frottement visqueux : $f_{\omega} = 0.0122$ N.m/(rad.s)

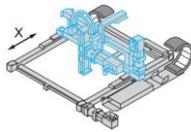


Modèle mécanique

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

Schéma mécanique





Paramétrage

Paramétrage des pièces

- 0 : bâti
- 1 : arbre moteur
- 2 : un des quatre satellites du réducteur
- 3 : poulie crantée en sortie de réducteur + le joint d'accouplement élastique (non représenté)
- 4 : courroie
- 5 : chariot
- 6 : autre poulie crantée

Paramétrage géométrique

$$x = \overline{CD} \cdot \vec{x}$$

R : rayon primitif de la poulie crantée. R = 24.67 mm

i : rapport de réduction du réducteur (rapport entrée sur sortie : $i = \frac{\dot{\theta}}{\dot{\alpha}} = 3$)

$Z_1 = 42$ dents, $Z_2 = 21$ dents $Z_0 = 84$ dents

Paramétrage cinématique :

$$\vec{\Omega}_{1/0} = \omega_{1/0} \cdot \vec{y} = \omega \cdot \vec{y} = \dot{\theta} \cdot \vec{y}$$

$$\vec{\Omega}_{3/0} = \omega_{3/0} \cdot \vec{y} = \dot{\alpha} \cdot \vec{y}$$

$$\vec{V}(E \in 5/0) \cdot \vec{x} = v \cdot \vec{x}$$

Paramétrage des efforts :

$$\vec{C}(\text{moteur} \rightarrow 1) = C_m \cdot \vec{y}$$

$$\vec{F}(\text{ext} \rightarrow 5) = -F_{\text{ext}} \cdot \vec{x}$$

$\vec{g} = -g \cdot \vec{z}$: accélération de la pesanteur

Paramétrage inertiel :

I_1 : Moment d'inertie de l'arbre moteur + génératrice tachymétrique + codeur incrémental (sans l'arbre d'entrée du réducteur)

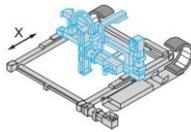
I_R : Moment d'inertie de tout le réducteur, ramené sur son entrée

I_3 : Moment d'inertie de la poulie 3 + accouplement (sans l'arbre de sortie du réducteur)

m_4 : masse de la courroie

m_5 : masse du chariot

I_6 : Moment d'inertie de la poulie folle



Hypothèses

- Courroie non dissipative

La courroie n'étant pas un solide, il faut pouvoir justifier dans le théorème de l'énergie cinétique que la puissance dissipée en son sein est nulle. (Puissance des actions mécaniques de cohésion).

- Courroie inextensible

Hypothèse nécessaire pour pouvoir considérer la courroie comme un solide rigide entre les points de tangence courroie-poulies : bref pour pouvoir utiliser la formule de Varignon $\vec{V}(E \in 4/O) = \vec{V}(J_1 \in 4/O)$ par exemple pour un sens d'enroulement : lorsque le brin tendu de la courroie est le brin supérieur droit $[EJ_1]$ par exemple.

- Courroie s'enroulant et se déroulant sans glisser sur la poulie motrice

Pour pouvoir utiliser la relation de couplage cinématique $V = R \cdot \dot{\alpha}$ qui vient de l'égalité $\vec{V}(J_1 \in 4/O) = \vec{V}(J_1 \in 3/O)$ lorsque le brin tendu de la courroie est le brin supérieur droit $[EJ_1]$ par exemple.

- Liaisons parfaites

Pour le modèle de départ en tout cas. On verra qu'il y a des frottements secs (ou des résistances passives type résistances au roulement qui se modélisent de la même façon).

Dans un second temps, on pourra aussi tenir compte de frottements visqueux qu'on ne doit pas forcément négliger selon la finesse du modèle visé.

- Référentiel O galiléen

Ce n'est finalement pas une mince hypothèse. Si Control'X est posé sur une table trop souple, qui se déforme pendant les accélérations par exemple, des efforts d'inertie supplémentaires non négligeables apparaissent.

Control'X accélère en effet à près de 5 g au démarrage.

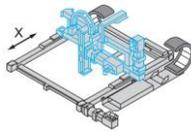
Equation dynamique

Par application du théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble des pièces mobiles, on trouve l'équation dynamique :

$$C_m(t) - \frac{R}{i} \cdot F_{ext}(t) = J_{\acute{e}q} \cdot \dot{\omega}_{1/O}(t)$$

$$\text{où } J_{\acute{e}q} = I_1 + I_R + \frac{I_3 + I_6 + (m_4 + m_5) \cdot R^2}{i^2}$$

A.N. : $J_{\acute{e}q} = 2.15 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$

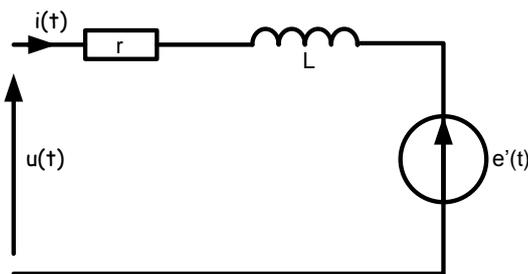


Modèles plus évolués

Transformation du schéma bloc de Control'X en schéma d'un moteur linéaire équivalent

[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

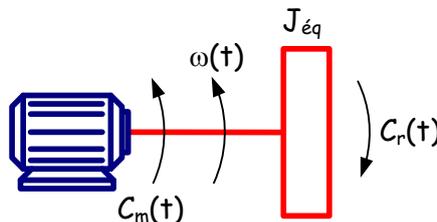
Schéma électrique équivalent



Equation électrique :

$$u(t) = r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e'(t)$$

Schéma mécanique équivalent

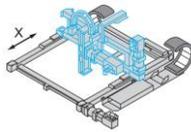


Equation de mouvement :

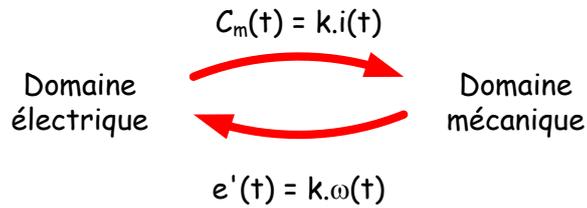
$$C_m(t) - C_r(t) = J_{eq} \cdot \dot{\omega}(t)$$

Equation cinématique :

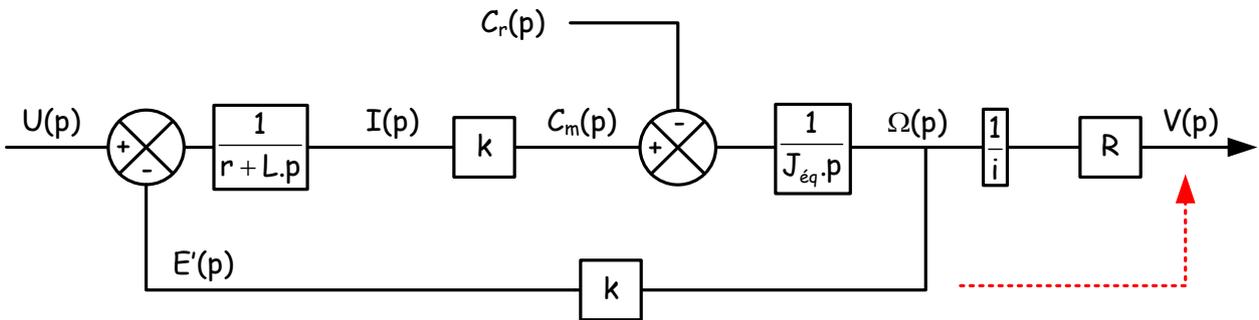
$$v(t) = R \cdot \dot{\alpha}(t) = \frac{R}{i} \cdot \dot{\theta}(t) = \frac{R}{i} \cdot \omega(t)$$



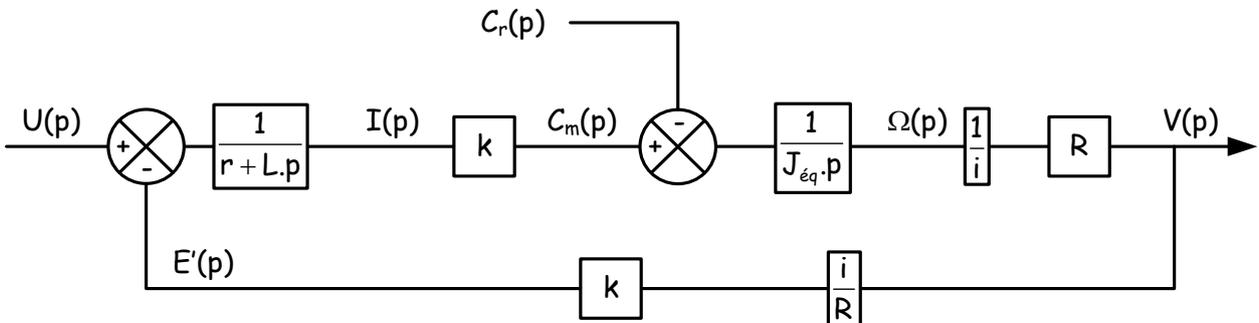
Couplages électro-mécaniques

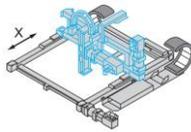


On part du schéma ci-dessous : $J_{\text{éq}}$ représente le moment d'inertie de toutes les pièces mobiles ramené sur l'arbre du moteur.

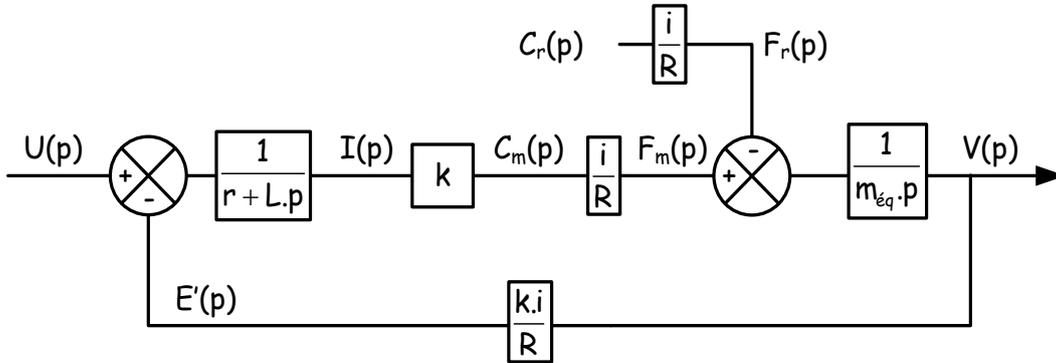


En déplaçant le point de piquage de la chaîne de retour, on obtient :



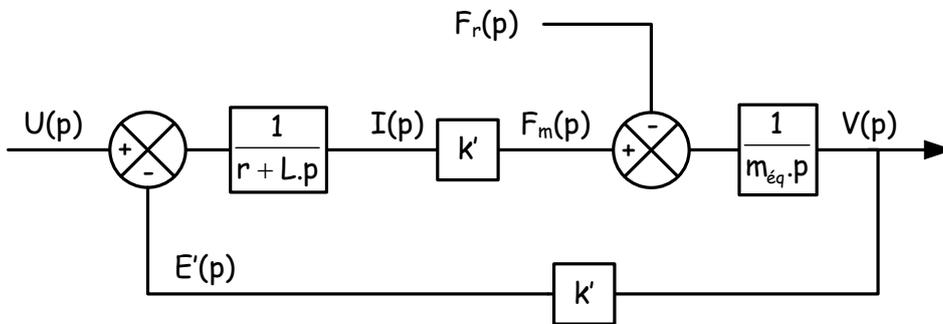


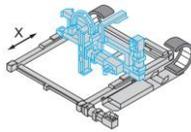
En posant $m_{\text{éq}} = J_{\text{éq}} \cdot \frac{i^2}{R^2}$, on obtient le schéma ci-dessous. Il transforme le couple résistant ramené sur le moteur $C_r(t)$ en force résistante ramenée sur le chariot $F_r(t)$ et de même, il transforme le couple moteur $C_m(t)$ en force motrice ramenée sur le chariot $F_m(t)$.



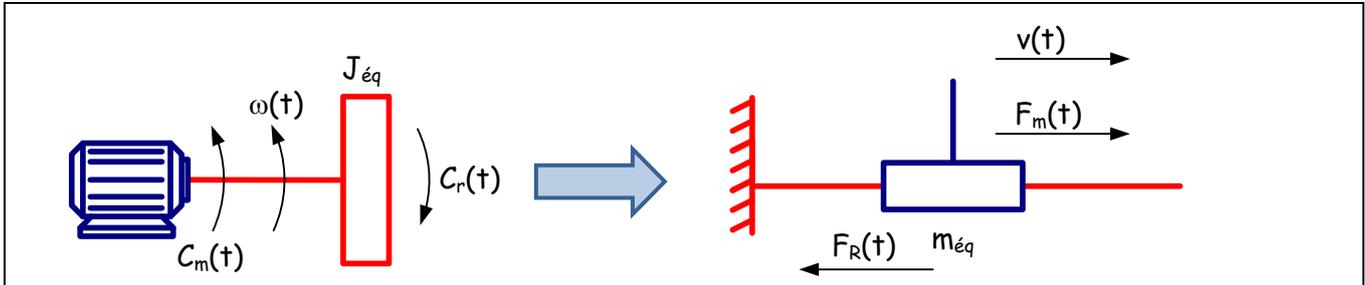
En introduisant le paramètre $k' = \frac{k.i}{R}$, on obtient le schéma d'un moteur linéaire équivalent :

On remarque que les grandeurs R , i et k jouent des rôles similaires : plus le coefficient k est grand, plus la réduction i est importante et plus le rayon de poulie R est petit et plus on aura un moteur équivalent qui développera une force motrice importante avec une vitesse de translation faible.





Tout se passe maintenant comme si on avait affaire non plus à un moteur rotatif mais à un moteur linéaire



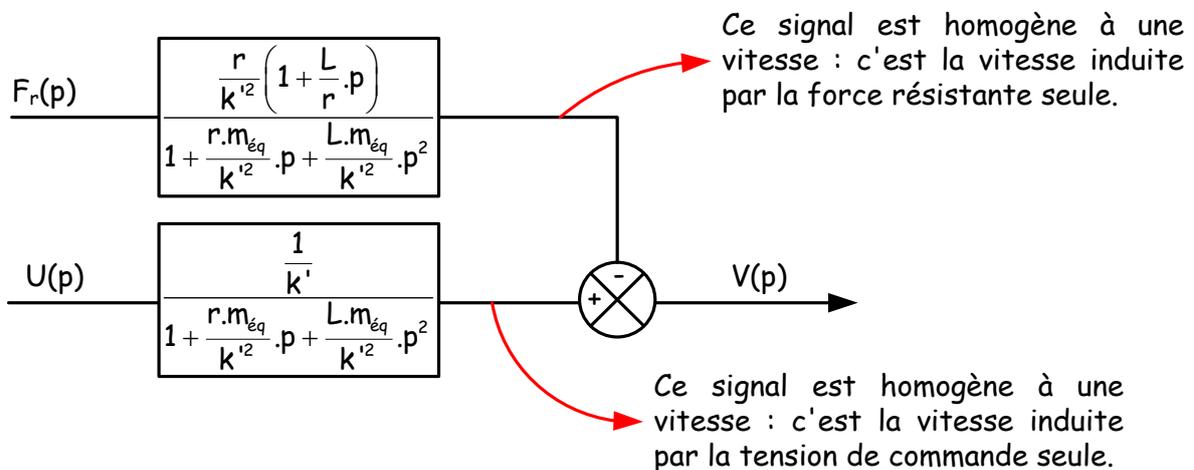
Le moteur linéaire correspond en fait au moteur rotatif mais ramené sur le chariot. Les caractéristiques mécaniques du moteur seul n'apparaissent plus.

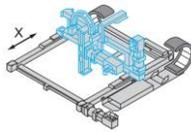
$$\begin{cases} J_{\acute{e}q} \cdot \dot{\omega}(t) = C_m(t) - C_r(t) \text{ et } v(t) = \frac{R}{i} \cdot \omega(t) \\ e'(t) = k \cdot \omega(t) \\ C_m(t) = k \cdot i(t) \\ u(t) = r \cdot i(t) + e'(t) \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} m_{\acute{e}q} \cdot \dot{V}(t) = F_m(t) - F_r(t) \\ e'(t) = k' \cdot v(t) \\ F_m(t) = k' \cdot i(t) \\ u(t) = r \cdot i(t) + e'(t) \end{cases}$$

Le moteur linéaire équivalent est un moteur dont l'entrée est une tension $u(t)$, la perturbation une force $F_r(t)$ et la sortie la vitesse linéaire $v(t)$. Ce moteur génère :

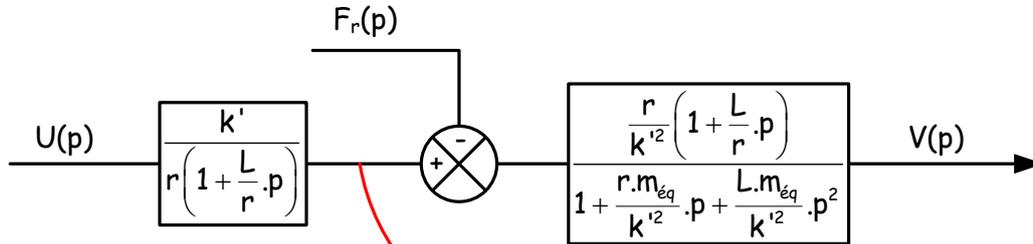
- Une force motrice proportionnelle au courant : $F_m(t) = k' \cdot i(t)$
- Une force contre électromotrice proportionnelle à la vitesse du chariot : $e'(t) = k' \cdot v(t)$

On retrouve alors le schéma bloc du moteur linéaire équivalent sous une forme plus compacte :





ou encore :



Ce signal est homogène à une force mais ce n'est pas la force motrice $F_m(t)$ ramenée sur le chariot.

Valeurs numériques pour alimenter ces modèles :

$r = 5.1 \Omega$

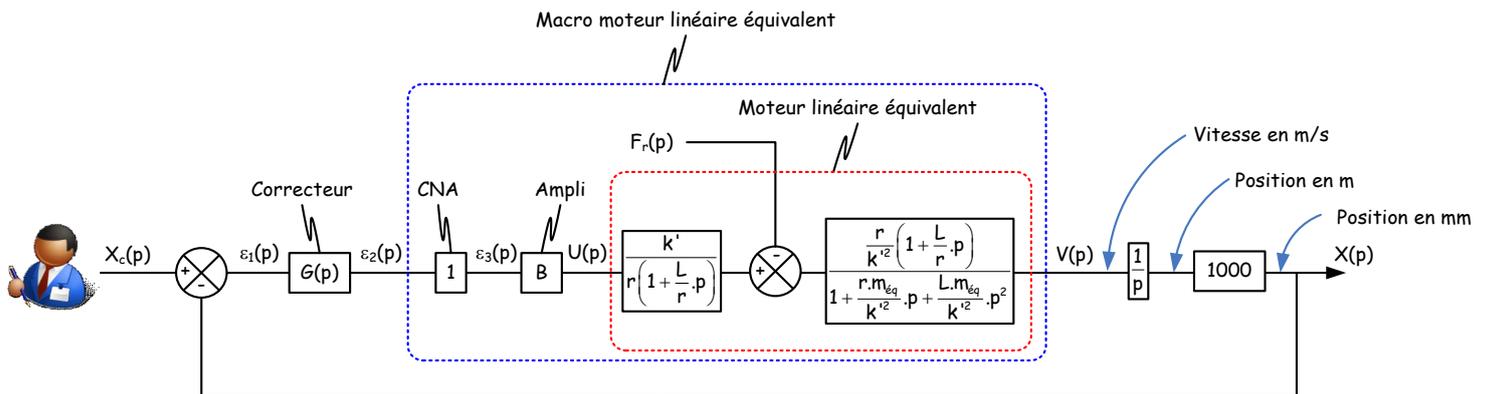
$L = 3.2 \text{ mH}$

$m_{\text{éq}} = 3.2 \text{ kg}$ (tout l'équipage mobile)

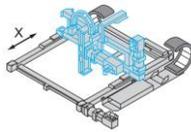
$k' = \frac{k_i}{R} = 25.5 \text{ N/A ou V/(m/s)}$

$B = 4$

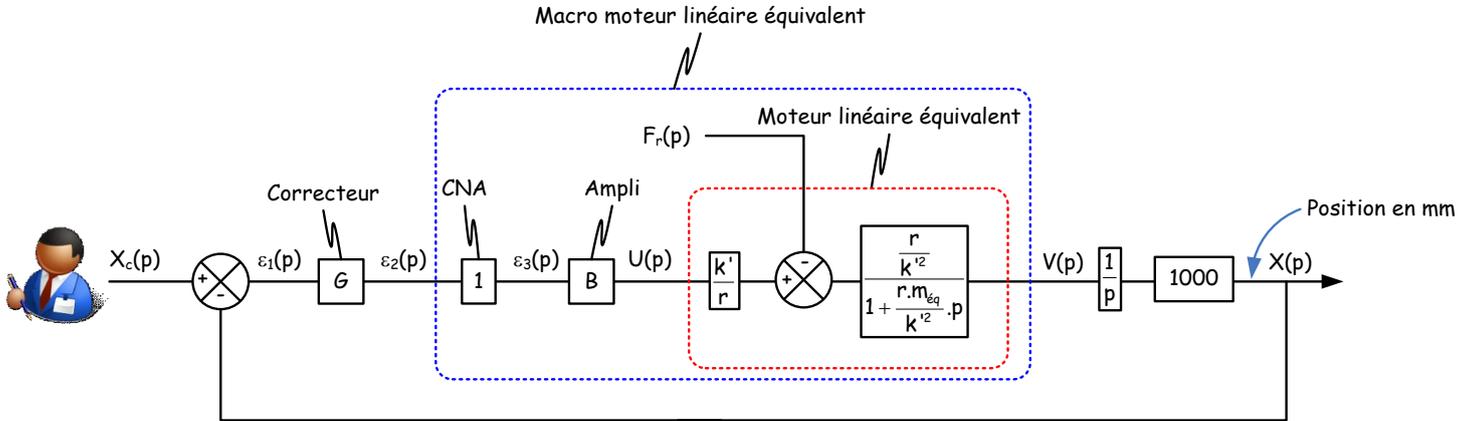
Lorsque ce modèle de moteur linéaire équivalent est intégré au schéma bloc de l'asservissement de position, cela donne le schéma :



Bien penser à multiplier dans les modèles la position par 1000 pour l'avoir en mm et refléter correctement ce qu'il se passe sous Control'Drive. La grandeur qui arrive vers la borne moins du soustracteur de l'asservissement doit être en mm. Si ce n'est pas le cas, il manque un rapport 1000 dans la boucle ouverte.



Simplification : Constante de temps électrique négligée devant la constante de temps mécanique, gain proportionnel $G(p) = G$.



On a alors les relations :

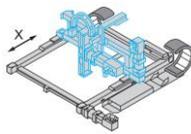
Fonctions de transfert vis à vis de la consigne et de la perturbation

$$X(p) = \frac{1}{1 + \frac{k'}{1000 \cdot B \cdot G} \cdot p + \frac{r \cdot m_{\text{eq}}}{1000 \cdot B \cdot G \cdot k'} \cdot p^2} \cdot X_c(p) - \frac{\frac{r}{k' \cdot B \cdot G}}{1 + \frac{k'}{1000 \cdot B \cdot G} \cdot p + \frac{r \cdot m_{\text{eq}}}{1000 \cdot B \cdot G \cdot k'} \cdot p^2} \cdot F_r(p)$$

Fonctions de transfert pour exprimer l'écart statique en fonction des entrées $X_c(p)$ et $F_r(p)$

$$\varepsilon_1(p) = \frac{\frac{k'}{1000 \cdot B \cdot G} \cdot p + \frac{r \cdot m_{\text{eq}}}{1000 \cdot B \cdot G \cdot k'} \cdot p^2}{1 + \frac{k'}{1000 \cdot B \cdot G} \cdot p + \frac{r \cdot m_{\text{eq}}}{1000 \cdot B \cdot G \cdot k'} \cdot p^2} \cdot X_c(p) + \frac{\frac{r}{k' \cdot B \cdot G}}{1 + \frac{k'}{1000 \cdot B \cdot G} \cdot p + \frac{r \cdot m_{\text{eq}}}{1000 \cdot B \cdot G \cdot k'} \cdot p^2} \cdot F_r(p)$$

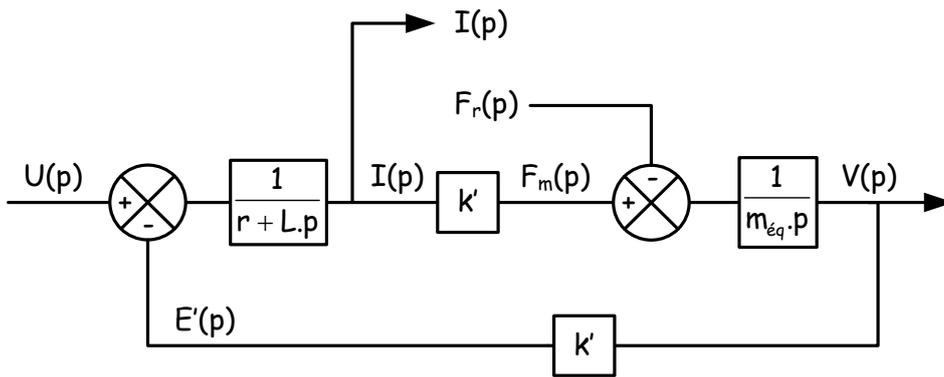
Ces deux fonctions de transfert sont utiles si l'entrée et la perturbation ne rentrent pas dans le cadre des théorèmes du cours (classe de la boucle ouverte et type d'entrée)



Modèle pour validation des ondulations de vitesse et de courant

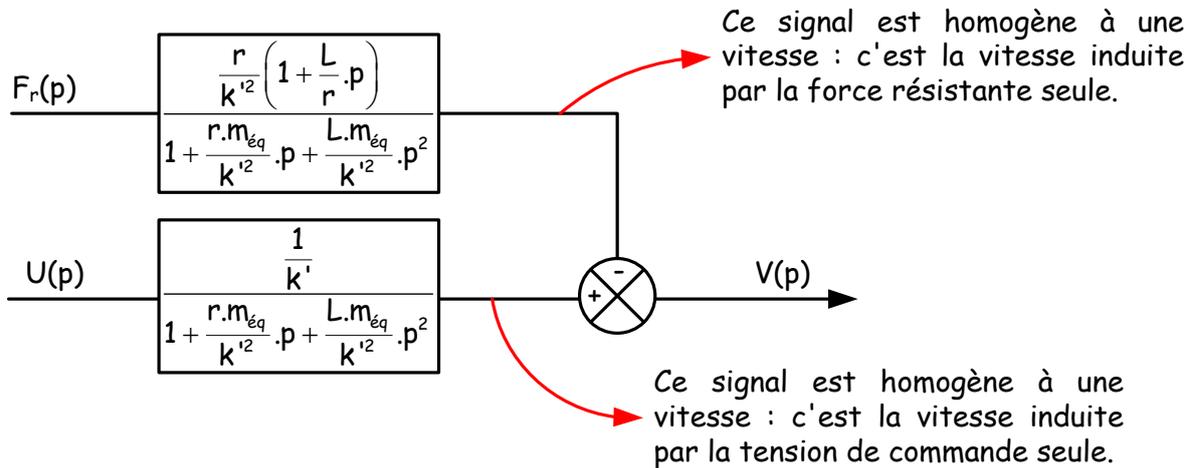
Si on veut valider les ondulations de vitesse et de courant (ou couple moteur) dues au PWM sur la base du modèle de boucle ouverte, on peut utiliser les fonctions de transfert ci-dessous.

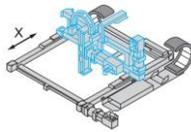
On peut prendre par exemple une force résistante constante $F_r(t) = 30 \text{ N}$ et une tension rectangulaire de rapport cyclique donné (entre 0 et 1) avec une tension d'alimentation de 40 V.



Fonctions de transfert pour caractériser l'ondulation de vitesse :

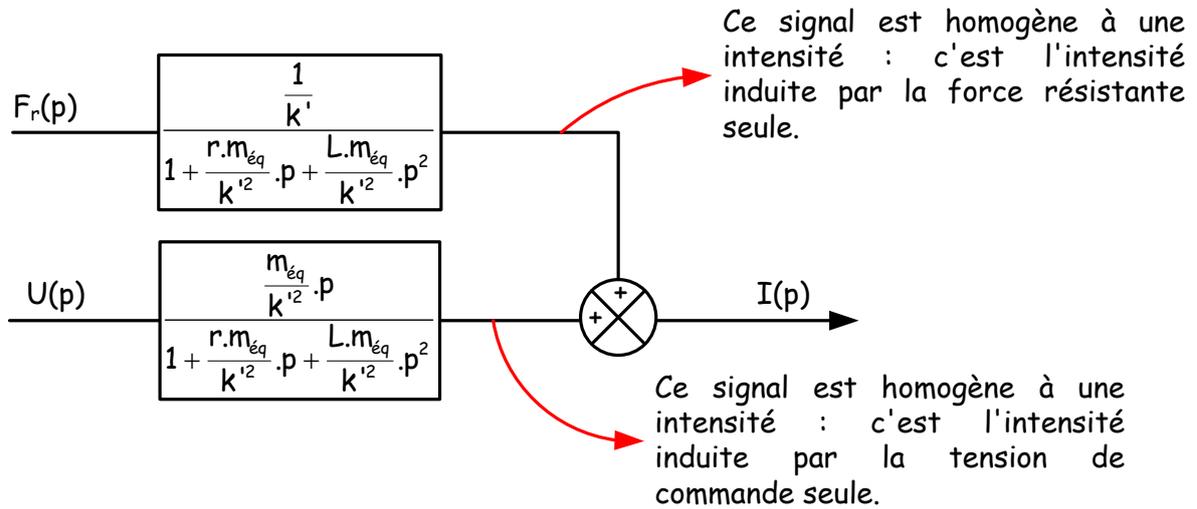
Pour l'ondulation de vitesse c'est la constante de temps mécanique (mode dominant) qui joue un rôle important, la constante de temps électrique pourrait presque être négligée.

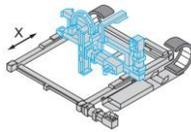




Fonctions de transfert pour caractériser l'ondulation de courant :

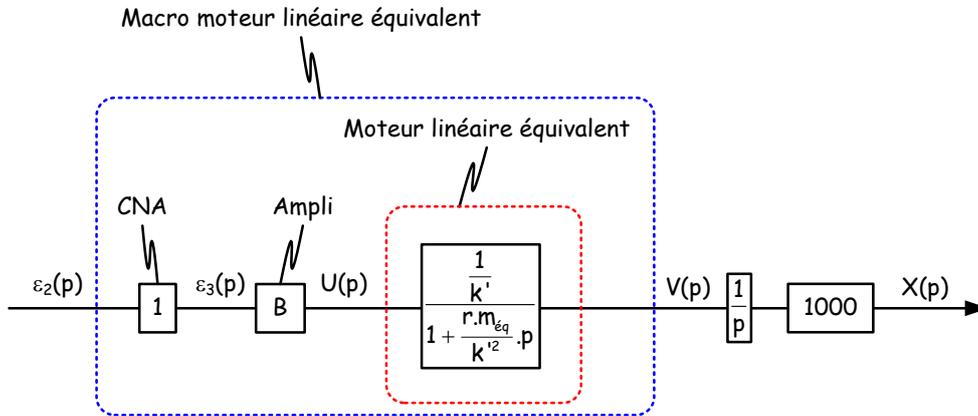
Pour l'ondulation de courant, la constante de temps électrique joue un rôle déterminant : il faut absolument en tenir compte.





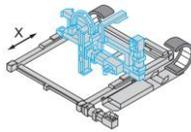
Modèle pour validation de la non saturation du CAN :

En boucle ouverte :



En boucle ouverte, c'est évident, il faut $\varepsilon_2(t) \in [-10V, 10V]$ si on veut éviter toute saturation.

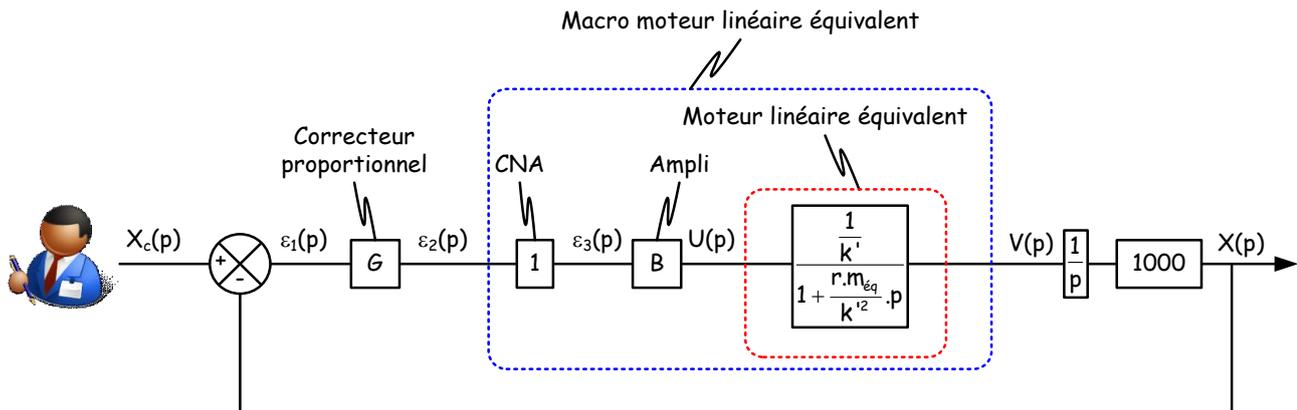
- Si l'entrée est un échelon $\varepsilon_2(t) = \varepsilon_{20}$, il faut $\varepsilon_{20} \in [-10V, 10V]$.
- Si l'entrée est un sinus $\varepsilon_2(t) = \varepsilon_{20} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ par exemple, il suffit encore de vérifier que $\varepsilon_{20} \in [-10V, 10V]$.



En boucle fermée :

Il faut maintenant calculer la fonction de transfert $\frac{\varepsilon_2(p)}{U(p)}$ pour estimer rapidement les risques de saturation du CNA de la carte de commande.

On travaille dans le cadre du modèle ci-dessous :

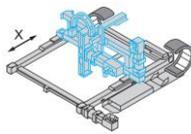


$$\varepsilon_2(p) = \frac{\frac{k'}{1000.B} \cdot p + \frac{r.m_{eq}}{1000.B.k'} \cdot p^2}{1 + \frac{k'}{1000.B.G} \cdot p + \frac{r.m_{eq}}{1000.B.G.k'} \cdot p^2} \cdot X_c(p)$$

Pour qu'il y ait non saturation, il faut qu'on ait toujours $\varepsilon_2(t) \in [-10V, 10V]$.

- Si $x_c(t)$ est un échelon d'amplitude x_{c0} , c'est évident : il faut $G.x_{c0} \in [-10V, 10V]$. Si la saturation doit se produire, elle se produira en particulier à l'instant initial. S'il n'y a pas saturation à l'instant initial, il n'y aura pas saturation plus tard.
- Si $x_c(t)$ est un sinus, $x_{c0} \cdot \sin(\omega.t)$ par exemple il faut tracer le diagramme de Bode de la fonction de transfert ci-dessus et vérifier que pour chacune des pulsations d'excitation on ait une tension $\varepsilon_2(t)$ dans la gamme $[-10 V, 10 V]$, c'est-à-dire qu'il ne faut jamais que le gain $K(\omega)$ de cette fonction de transfert soit tel que $K(\omega).x_{c0} \geq 10$.

Attention : Si G est grand, il y aura surtension et ce n'est pas parce que le système ne sature pas à basse pulsation ω avec des produits $G.x_{c0}$ petits que ce sera encore le cas à plus haute fréquence.



Modèles plus évolués sur la base du moteur linéaire équivalent

Equivalence frottement sec - seuil d'intensité - seuil de tension

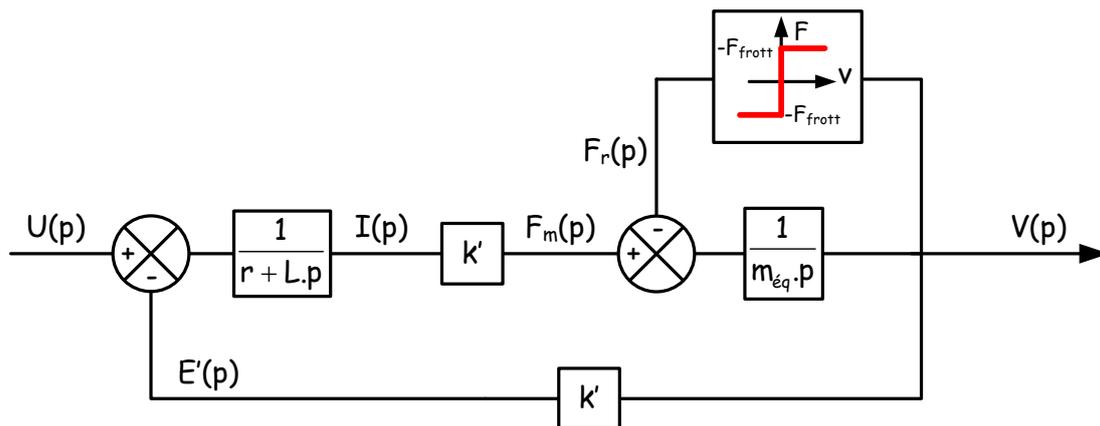
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

On s'intéresse ici à la modélisation d'une force résistante $F_r(t)$ issue de résistances passives de type frottements secs (balais sur collecteur par exemple) ou de type résistances au roulement (guidage par éléments roulants).

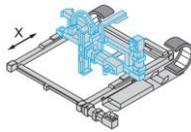
Dans les deux cas, frottements secs ou résistances au roulement, leur comportement est du type : "Il faut un effort moteur suffisant pour réussir à les vaincre et initier le mouvement." Cf. le modèle de Coulomb et le modèle usuel de résistance au roulement.

Dans la suite de ce document, la force résistante $F_r(t)$ est désignée comme étant une force de frottements secs mais c'est bien en réalité la somme d'une force de résistances au roulement et d'une force de frottements secs dont il s'agit : On la notera $F_r(t) = \pm F_{frott}$. Cette force est constante lorsque le chariot se déplace sauf lorsque son sens de déplacement s'inverse.

On cherche ici à mettre en place une équivalence entre la force $F_r(t)$ et la tension de seuil du moteur (tension de démarrage).

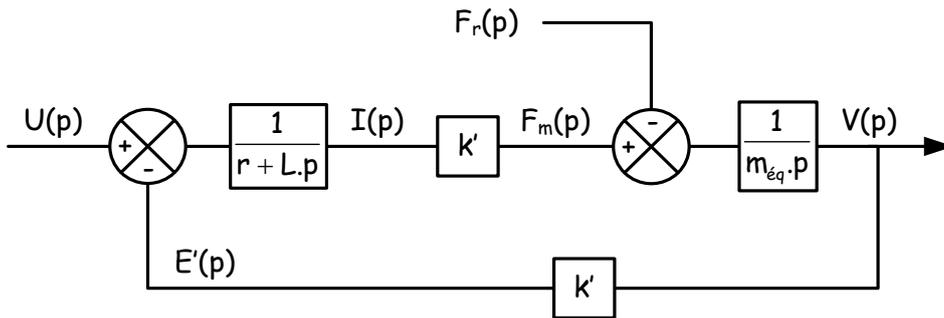


La force $F_r(t)$ n'est pas externe au mécanisme, elle peut être modélisée par le schéma bloc ci-dessus. Le bloc qui relie la vitesse $v(t)$ et l'effort résistant $F_r(t)$ traduit le modèle de Coulomb :



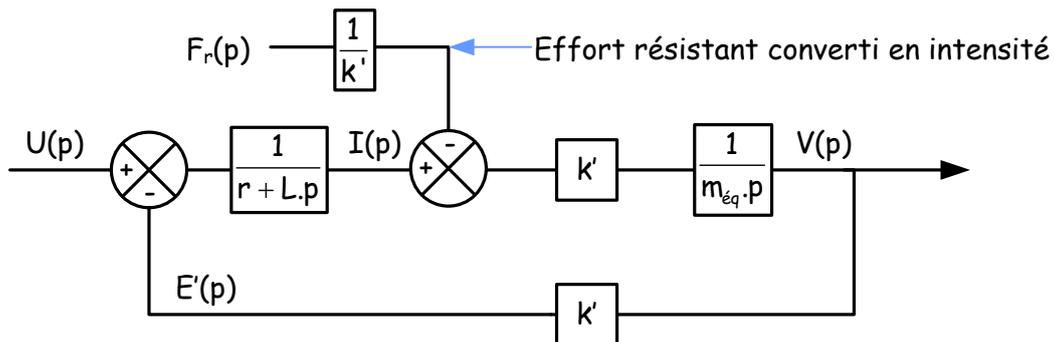
- A vitesse de chariot $v(t)$ non nulle, il y a frottement, $F_r(t) = \pm F_{frott}$ avec un signe opposé à la vitesse $v(t)$.
- Lorsque la vitesse $v(t)$ est nulle, il y a adhérence $F_r(t) \leq F_{frott}$ en valeur absolue...et là, c'est le grand mystère (surtout pour un solveur mathématique).

On part du schéma ci-dessous dans lequel $F_r(t)$ est une force considérée comme une perturbation.



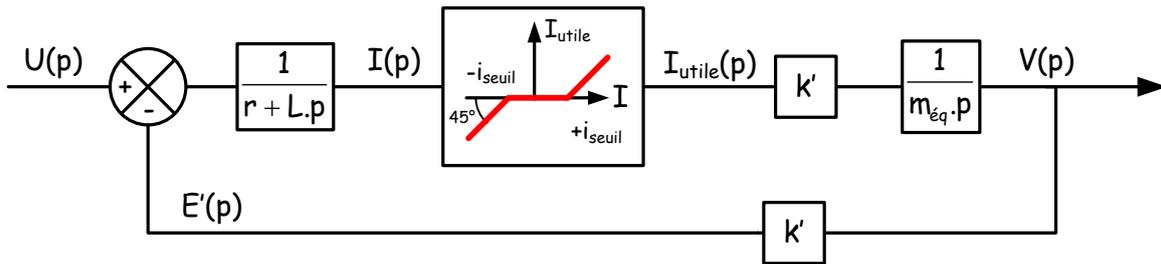
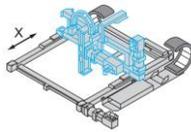
On cherche à transformer l'effort de frottement en tension équivalente : la tension de démarrage ou tension de seuil u_{seuil} du moteur : la tension nécessaire pour que le moteur commence à tourner.

En déplaçant le soustracteur de forces vers la gauche, on met tout d'abord en évidence une équivalence entre la force résistante $F_r(p)$ et l'intensité $I(p) = \frac{F_r(p)}{k'}$.



La force résistante $F_r(t)$ étant constante (sauf lors des inversions de sens de déplacement), elle peut être remplacée par $F_r(t) = \pm F_{frott}$.

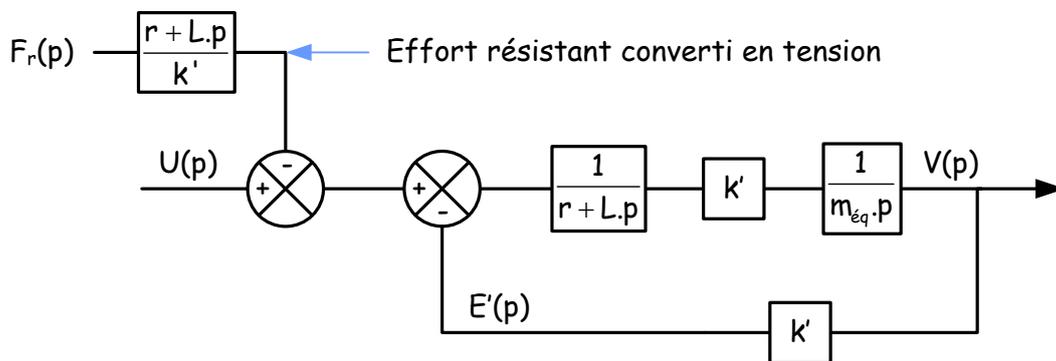
Cela fait apparaître une intensité de seuil $i_{seuil} = \frac{F_{frott}}{k'}$ qui peut être vue comme l'intensité qui génère une force motrice qui permet d'équilibrer les forces de frottement secs F_{frott} . (L'intensité nécessaire pour atteindre le bord du cône d'adhérence).



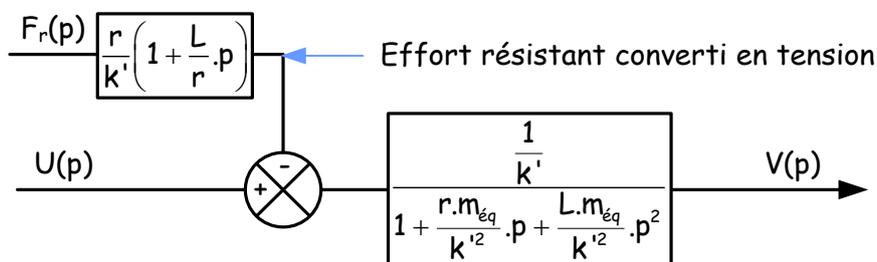
Ce seuil d'intensité à l'intérieur de la boucle n'est pas très pratique puisque cela introduit une non linéarité dans la boucle ce qui nous empêche d'exprimer globalement la fonction de transfert du moteur.

En continuant à déplacer le soustracteur d'intensité vers la gauche, on met en évidence une équivalence entre la force résistante $F_r(p)$ et la tension $F_r(p) \cdot \frac{(r + L.p)}{k'}$.

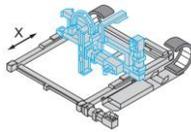
L'original temporel du terme $F_r(p) \cdot \frac{(r + L.p)}{k'}$ vaut $F_r(t) = \pm F_{frott} \cdot \frac{r}{k'}$ lorsque le chariot se déplace dans un même sens et $F_r(t) \leq F_{frott} \cdot \frac{r}{k'}$ en valeur absolue lorsque le chariot est à l'arrêt.



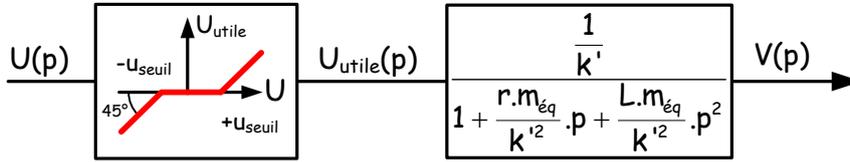
Soit sous forme plus compacte :



On peut alors introduire la tension de seuil $u_{seuil} = F_{frott} \cdot \frac{r}{k'}$ qui est la tension nécessaire pour lutter contre le couple de frottement sec $\pm F_{frott}$.

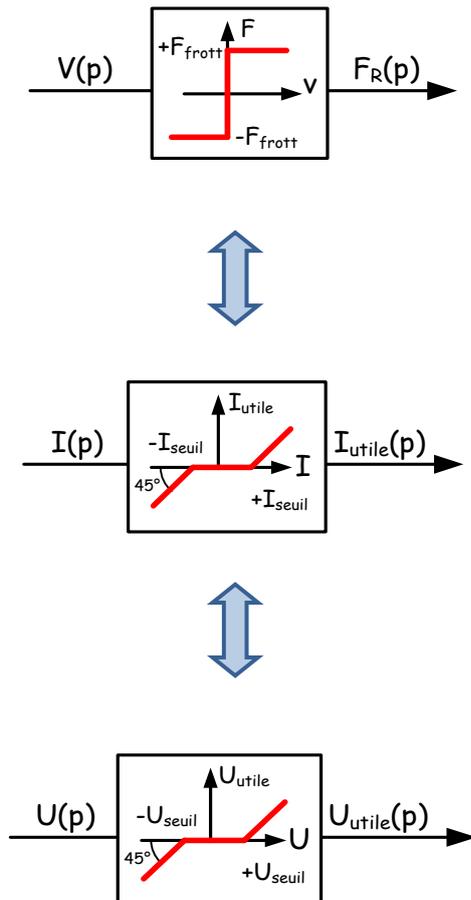


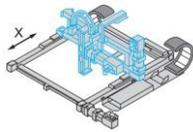
La tension de seuil est la tension qui permet de générer l'intensité qui elle-même génère le couple moteur nécessaire pour atteindre le bord du cône d'adhérence et équilibrer F_{frott} .



Ce schéma bloc est dans son ensemble non linéaire mais la boucle propre au moteur elle est linéaire. Cela est très pratique puisque on peut mettre en place la fonction de transfert du moteur au moins en tout cas de la tension $U_{utile}(p)$ vers la vitesse $V(p)$.

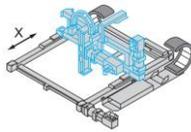
On a au final une équivalence entre la force de frottement sec, son équivalent converti en intensité moteur ou encore son équivalent converti en tension moteur. La forme la plus facile à gérer au niveau des calculs, ceux qui vont nous permettre un calage de correcteur par exemple, est l'équivalence force de frottement sec - tension de seuil.





Il n'y a pas équivalence stricte entre ces différents schémas blocs. La Force $F_r(t)$ est constante et égale à $\pm F_{\text{frott}}$ lorsque le chariot se déplace mais à chaque inversion du sens de déplacement il y a une dynamique du type premier ordre de constante de temps $\frac{L}{r}$ qui est négligée dans le dernier modèle.

Dans les faits, les modèles avec frottements secs ou avec tension de seuil sont tout à fait comparables.

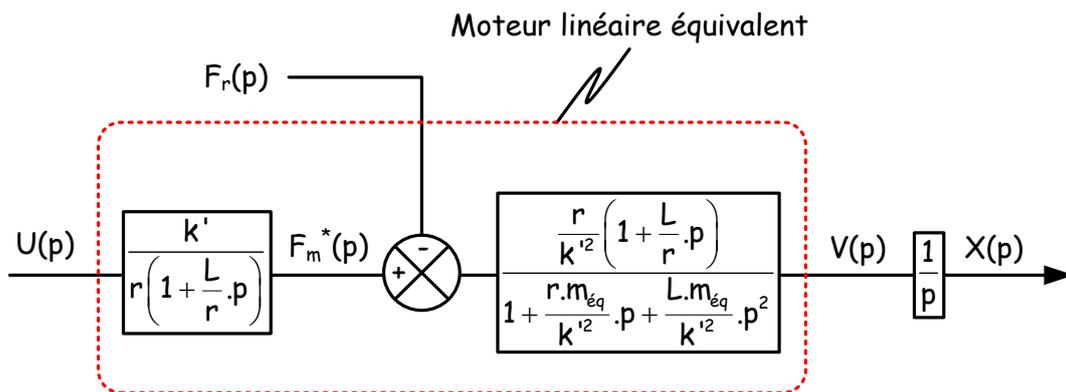


Modèles dérivés

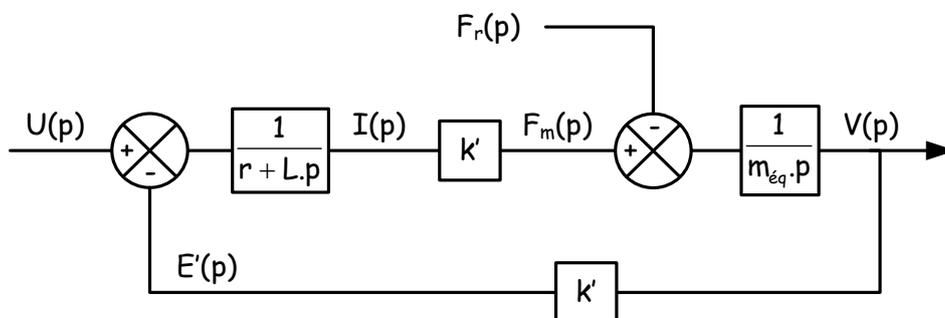
Prise en compte de tous les efforts perturbateurs

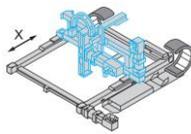
[Ctrl + clic pour revenir au sommaire](#)

On cherche ici à mettre en place un modèle de boucle ouverte qui tienne compte des différents efforts résistants susceptibles d'être rencontrés. On pourrait partir du schéma déjà condensé du moteur linéaire équivalent :



...mais on va repartir en peu plus en amont parce que cela fait apparaître des schémas blocs intéressants :





On va maintenant particulariser l'effort perturbateur : Posons $F_r(t) = F_{ext}(t) \pm F_{frott} - f_v.v(t)$

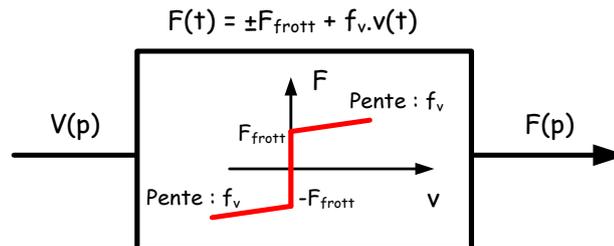
- $F_{ext}(t)$ est une force extérieure au moteur linéaire comme une charge pesante par exemple.
- $\pm F_{frott}$ est une force résistante de type frottements secs ou résistance au roulement. Le signe est à choisir en fonction de la vitesse $v(t)$ ou alors il faut prendre $F_{frott} \cdot \frac{v(t)}{|v(t)|}$ avec

$$F_{frott} \geq 0$$

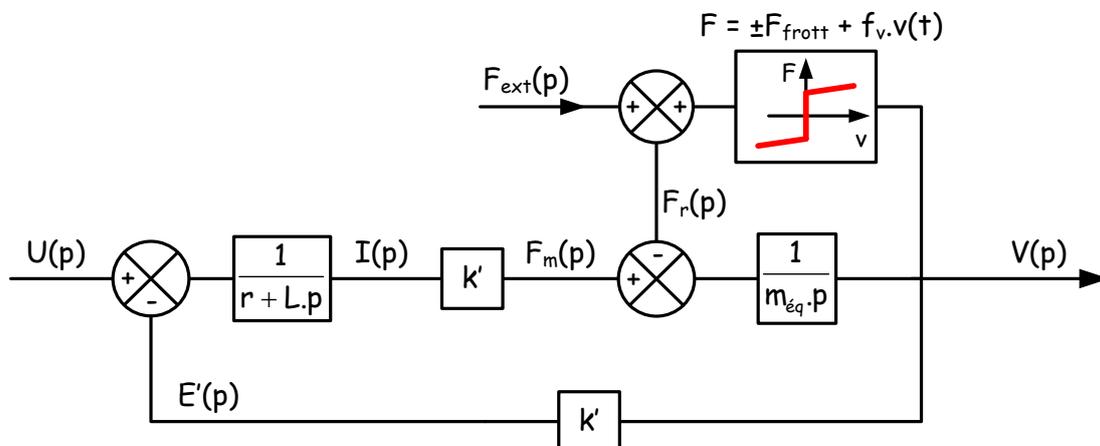
- $f_v.v(t)$ est une force de frottements visqueux ramenés sur le chariot où f_v est le coefficient de frottements visqueux. On avait déjà introduit le coefficient de frottement visqueux mais ramené sur l'arbre moteur : f_ω était tel que $C_r(t) = - f_\omega.\omega(t)$.

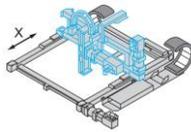
Les deux coefficients sont liés par la relation : $f_\omega = f_v \cdot \frac{R^2}{i^2}$

On introduit le bloc ci-dessous pour représenter graphiquement la somme des frottements secs et visqueux :

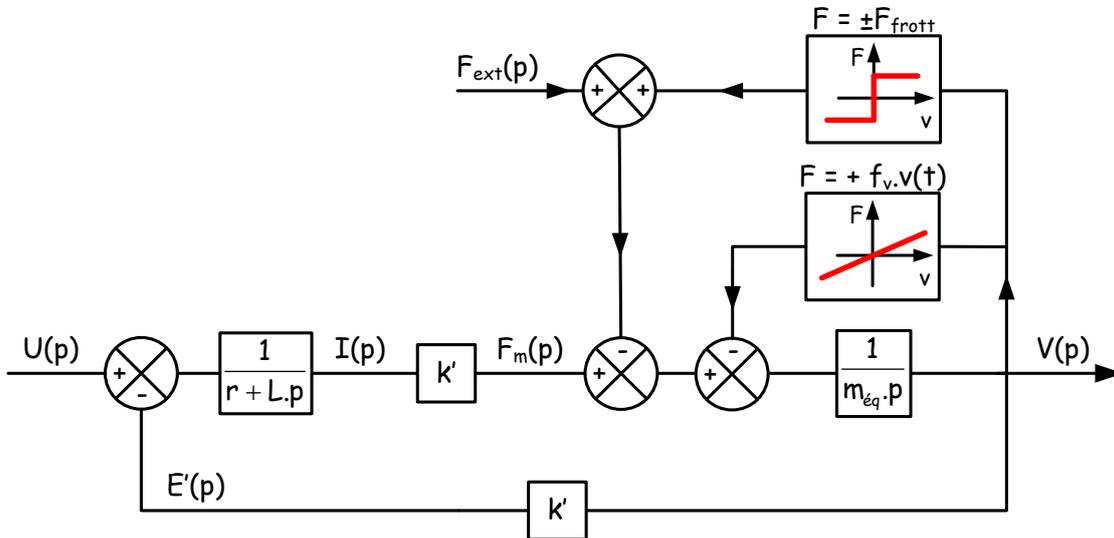


On obtient donc le schéma bloc du moteur linéaire équivalent avec prise en compte de tous ces efforts :

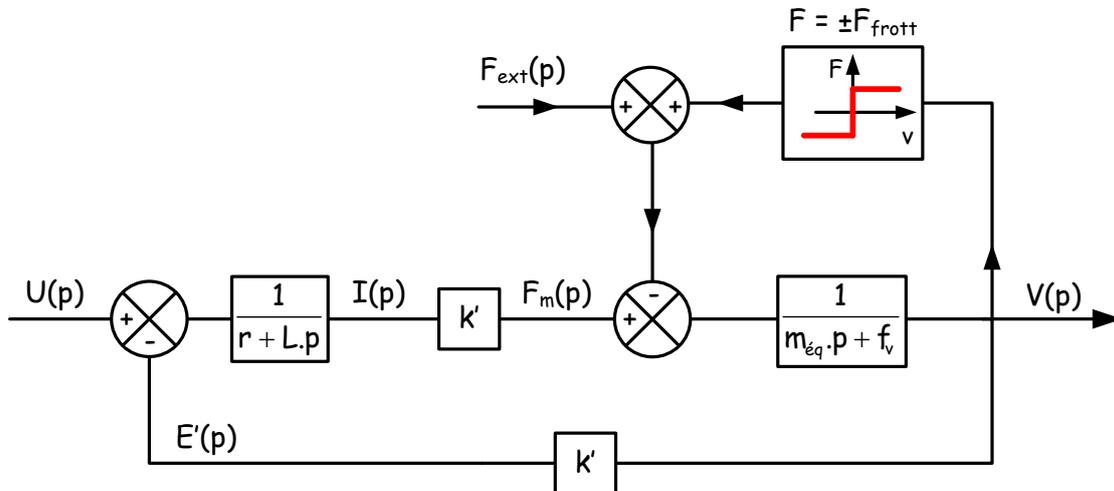




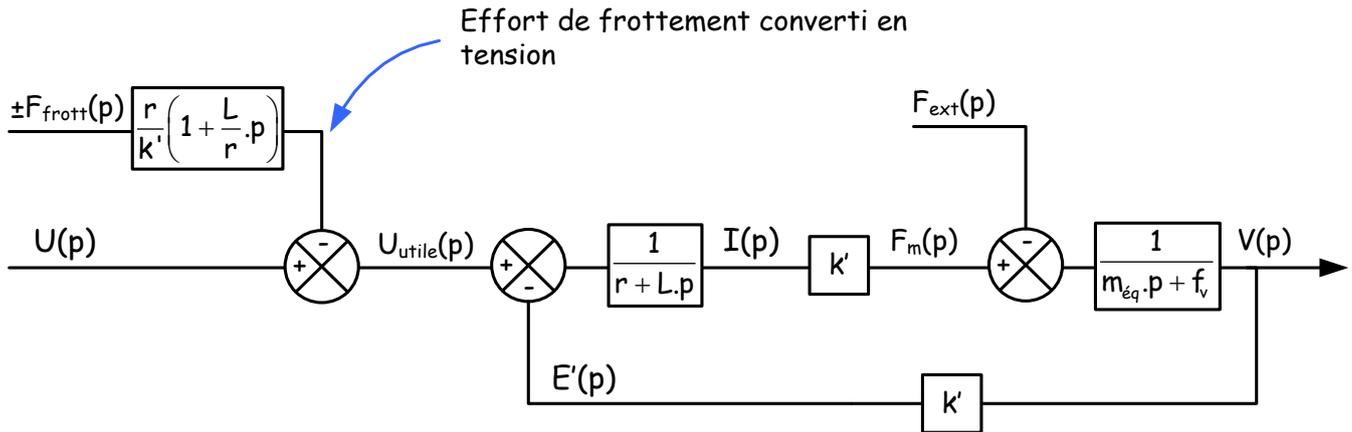
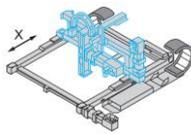
Soit en distinguant les frottements secs et les frottements visqueux :



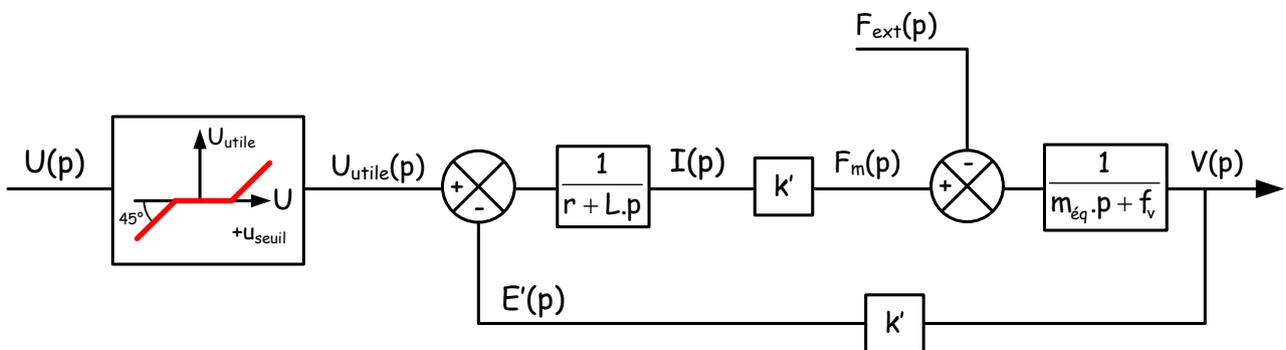
...puis en réduisant la boucle interne



...et en faisant remonter ce qui provient des frottements secs vers l'amont :

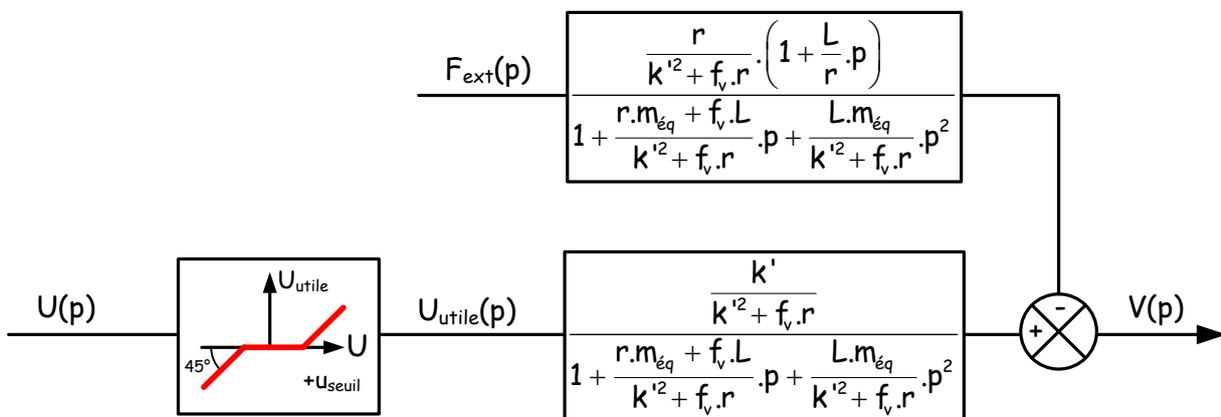


Avec les explications mentionnées précédemment à propos de l'équivalence tension-force de frottement on a alors :

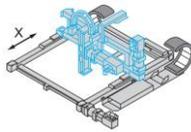


Dans ce schéma, comme expliqué, à chaque inversion du sens de déplacement il y a une dynamique du type premier ordre de constante de temps $\frac{L}{r} \approx 0.6$ ms qui est négligée. Dans les faits, les modèles avec frottements secs ou avec tension de seuil sont tout à fait comparables.

On a enfin sous une forme plus compacte :



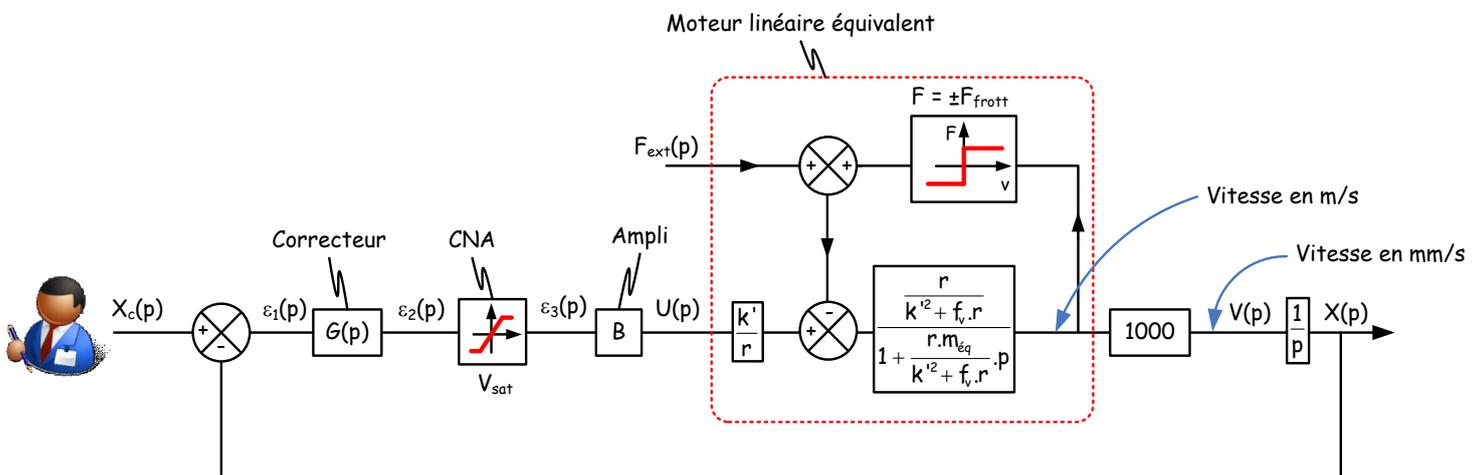
Forme qui constitue un excellent modèle et ce même en négligeant l'effet de l'inductance L.



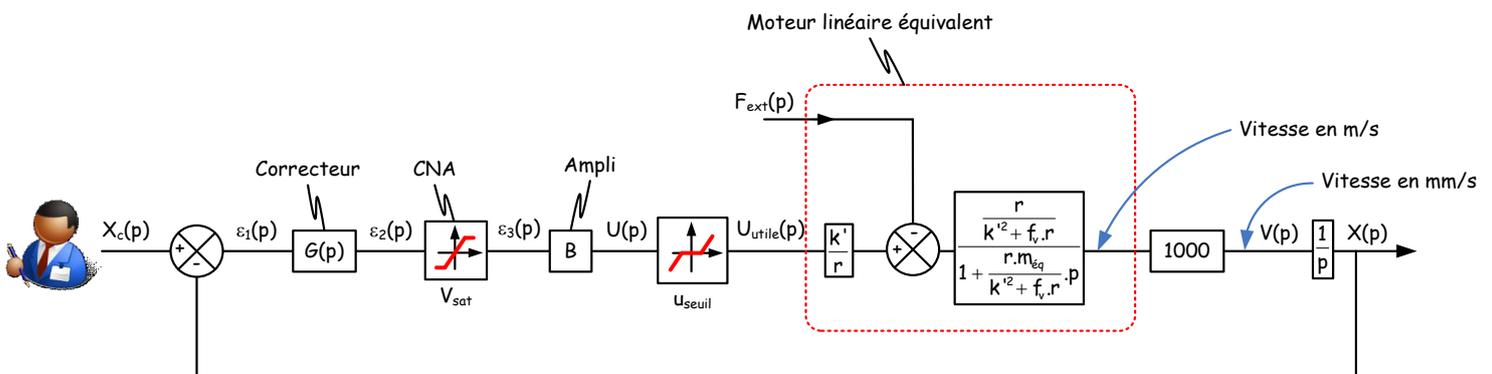
Sur la base de ces quelques schémas, on peut mettre en place une multitude de modèles dérivés selon les hypothèses envisagées :

- Forces de frottements prises en compte ou non : les forces de frottements secs sont les plus contraignantes (d'un point de vue calculatoire). Elles génèrent une non-linéarité qui nous empêche de mettre en place la fonction de transfert en boucle fermée.
- Forces de viscosité prise en compte ou non
- Force extérieure présente ou non
- Dynamique liée à la constante de temps $\frac{L}{r}$ prise en compte ou non

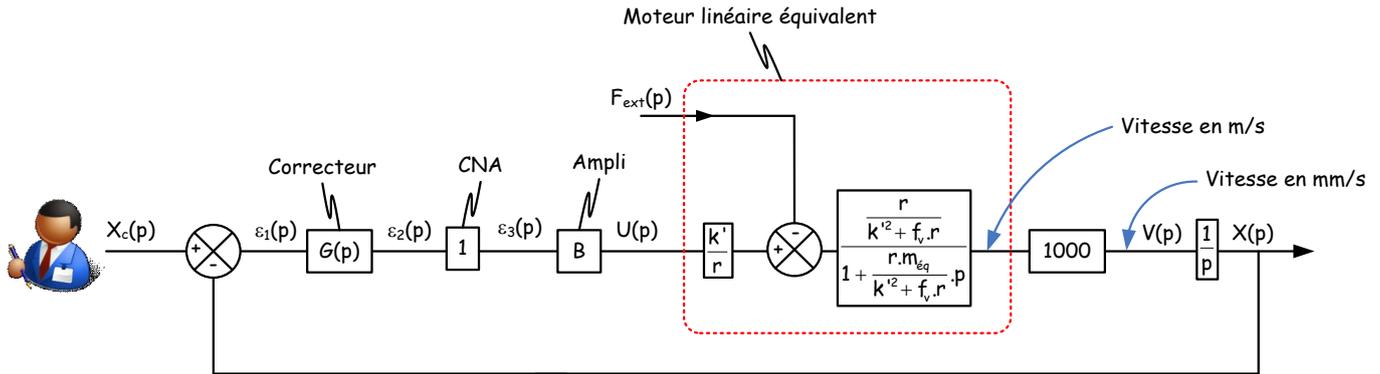
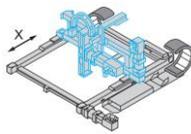
En faisant cette dernière hypothèse par exemple, on obtient le modèle de boucle fermée suivant :



ou encore ce qui revient quasiment au même, comme déjà expliqué :



Le modèle linéaire est celui que l'on obtient en éliminant la saturation et la tension de seuil :



Si on travaille sur le modèle ci-dessus en souhaitant qu'il colle au mieux aux essais que l'on va effectuer sur Control'X, il faut bien sûr se débrouiller pour éviter de trop fortes saturations et éviter de se retrouver en présence de frottements secs mal rejetés.

Concernant la saturation : c'est toujours possible de s'arranger pour qu'elle n'ait pas lieu. Il faut correctement choisir l'amplitude de la consigne par rapport au correcteur : Dans la cas d'un correcteur proportionnel de gain G par exemple et d'une entrée indicielle d'amplitude Δx_c , il faut que $|G \cdot \Delta x_c| < 10$.

Concernant les frottements secs : on ne peut pas les contourner, ils valent ce qu'ils valent. On peut juste se débrouiller pour que leur effet soit minimisé : en choisissant un correcteur adapté.

Par exemple toujours dans le cas d'un correcteur proportionnel de gain G et d'une entrée indicielle d'amplitude Δx_c , si on a le choix entre les deux essais :

- Un échelon de consigne de $\Delta x_c = 100$ mm avec un gain $G = 0.1$
- Un échelon de consigne de $\Delta x_c = 10$ mm avec un gain $G = 1$

Le modèle reflétera beaucoup mieux le comportement réel avec la deuxième combinaison ($G = 1$ et $\Delta x_c = 10$ mm) car avec ce gain, les perturbations sont 10 fois mieux rejetées. Le modèle ne tient pas compte de ce type de perturbation mais il y est peu sensible cela constitue donc quand même un excellent modèle.

Valeurs numériques à utiliser pour tous ces modèles :

$B = 4$

$k' = 25.5 \text{ N/A ou } V/(m/s)$

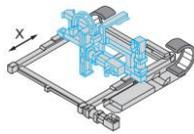
$r = 5.1 \Omega$

$L = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

$f_v = 20 \text{ N/(m/s)}$

$m_{eq} = 3.2 \text{ kg}$

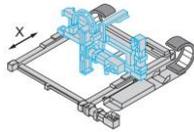
Détail du calcul de k' : $k' = \frac{k \cdot i}{R}$ avec $k = 0.21 \text{ (N.m/A)}$, $i = 3$ et $R = 24.67 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



Control'X

Prise en main de Matlab-Simulink
en contrôle-commande temps réel





Control'X peut se piloter de façon 100 % ouverte sous Matlab-Simulink. Pour cela il faut avoir installé Matlab-Simulink et les trois toolbox suivantes :

- Matlab coder
- Simulink coder
- Simulink desktop real-time

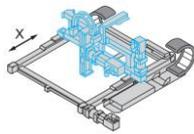
Cette dernière toolbox permet de faire du Control-Commande temps réel dans l'environnement Windows.

Matlab-Simulink demande la priorité haute sur les ressources processeur du PC pour exécuter les calculs nécessaires au pilotage et à la simulation tout en respectant la fréquence d'échantillonnage choisie. Cette dernière peut atteindre 20 kHz avec la carte de commande fournie avec Control'X. Si le code Simulink comporte des diagrammes d'état (toolbox StateFlow), il est préférable de choisir une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz pour respecter la cadence choisie tout en conservant une bonne interactivité avec l'utilisateur.

Le temps réel n'a pas un caractère déterministe puisque malgré tout, les calculs se font dans l'environnement Windows. Pour des applications non critiques le comportement est tout à fait satisfaisant puisque la fréquence d'échantillonnage est quasi systématiquement respectée et ce même sur un ordinateur ayant des performances modestes.

Tous les fichiers exemples se trouvent dans :

...\Dossier ressource\Exemple de code Matlab-Simulink Contrôle-Commande temps réel



Lancement de Matlab - Simulink

Lancement de Matlab, ouverture d'un fichier

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

- ouvrir et exécuter le fichier "param.m"
- ouvrir le fichier "Commande_en_BF_seule.slx" dans cet exemple

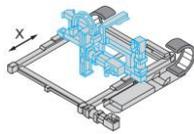
1) Pointer vers le répertoire contenant les deux fichiers précités

2) Ouvrir le script et le fichier de simulation

3) Exécuter le script "param.m"

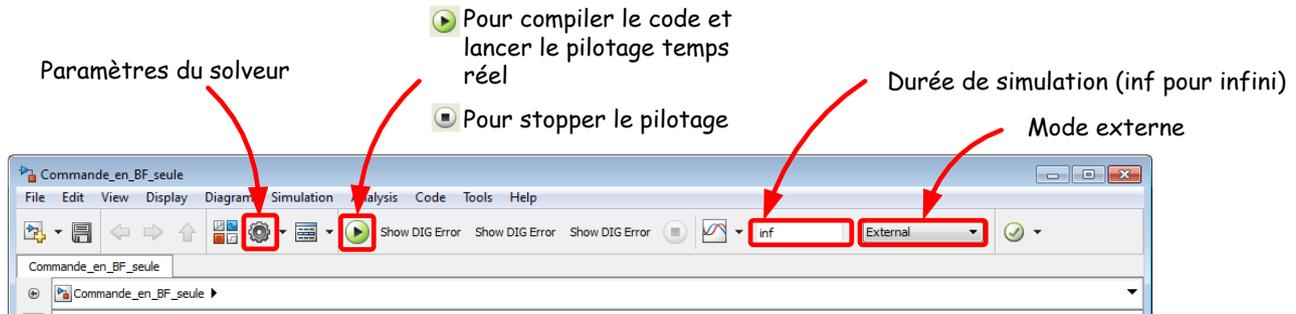
Nota : une solution plus simple consiste à double cliquer directement depuis l'explorateur Windows sur le fichier Matlab ou Simulink que l'on souhaite ouvrir. Le répertoire de travail (path) est alors automatiquement sélectionné.

Le fichier "param.m" permet de définir toutes les variables utiles, aussi bien pour le pilotage que pour la modélisation. Vous pourrez éventuellement modifier les valeurs des variables de ce fichier pour les affiner. On y définit notamment la période d'échantillonnage dt à 0.1 ms.



Execution d'un fichier Simulink

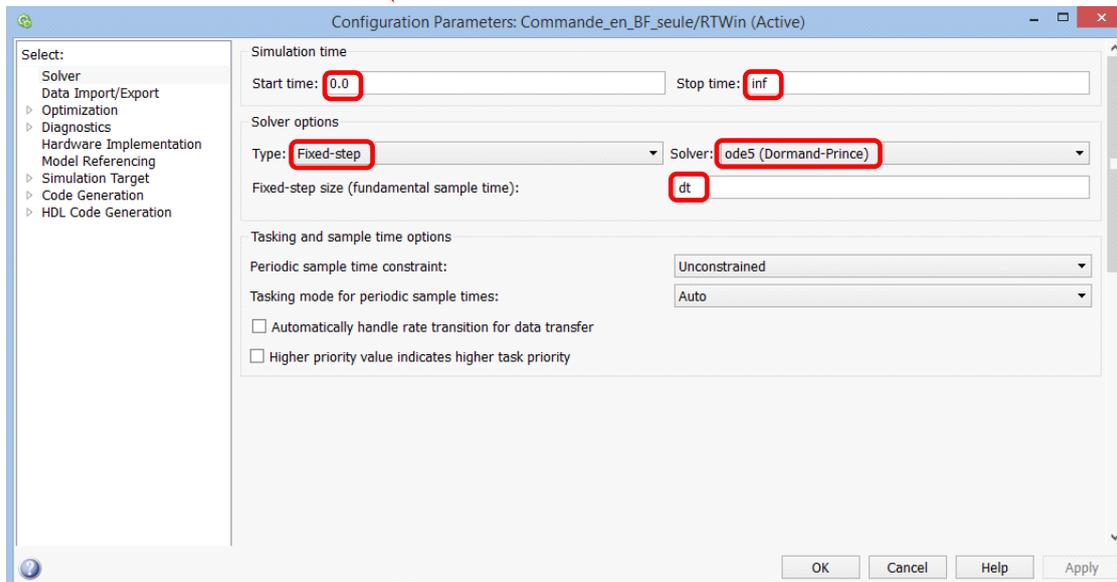
Pour le pilotage temps réel, procéder en 4 étapes :

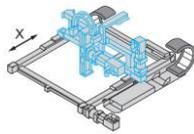


- 1) Vérifier que Simulink travaille en mode externe (pour piloter la carte de commande) et que la durée d'exécution du code correspond à ce qui est souhaité : ici une durée infinie.



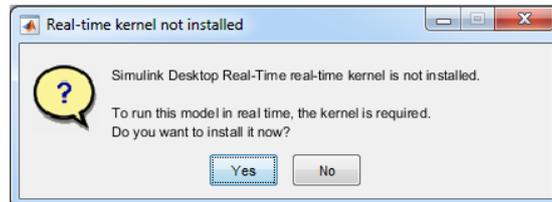
- 2) Vérifier que les paramètres du solveur sont conformes à ceux indiqués ci-dessous :
 - Type de solveur : ode 5 par exemple mais obligatoirement un pas fixe
 - Période d'échantillonnage dt : dt est définie à 1e-4 (0.1 ms) dans le script "param.m"





3) Lancer la compilation puis l'exécution du code : 

Au tout premier lancement d'un fichier de pilotage ".slx", le noyau temps réel de la toolbox "Simulink desktop real time" n'est pas installé :



Cliquer sur "Yes" et suivre les instructions qui s'affichent pour installer le noyau temps réel. Cette opération n'est à effectuer qu'une seule fois sur le poste relié à Control'X.

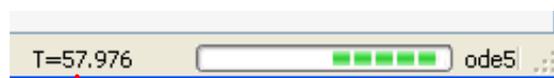
Le diagramme Simulink est ensuite compilé en langage C. Simulink va demander à Windows un traitement prioritaire. Les ressources du PC vont être dédiées prioritairement à l'exécution du pilotage tout en respectant le bon timing au niveau du déroulement du temps. **Le PC va être moins réactif** : c'est normal. Le noyau temps réel implémenté sous Windows réquisitionne les ressources processeur pour tenter de piloter le système en temps réel à la fréquence spécifiée.

Lorsque tout se passe bien, le message "Build process completed successfully" apparaît et à priori, le pilotage va s'effectuer normalement.



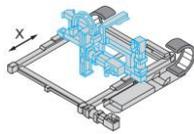
Ca y est, le couple {processeur de l'ordinateur + système d'exploitation Windows} (la cible), traite prioritairement les calculs nécessaires à l'exécution du diagramme Simulink.

Le système est maintenant piloté en temps réel à la fréquence choisie. Observer le caractère temps réel en examinant l'écoulement du temps en bas à droite.



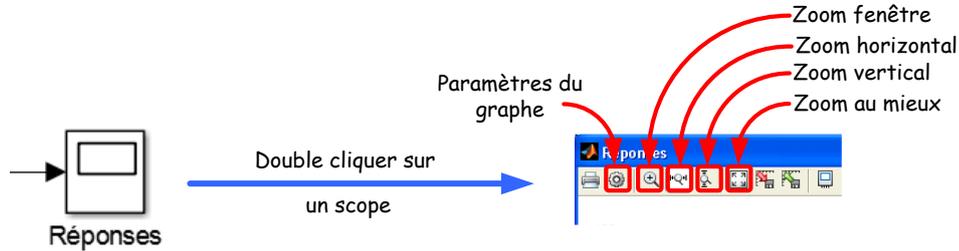
→ Ecoulement du temps en "temps réel"

En cas de problème consulter le fichier "13 Troubleshooting Matlab-Simulink" dans le dossier technique.



En cours de pilotage, vous pouvez observer l'évolution de certaines grandeurs en temps réel sur les différents afficheurs ou oscilloscopes :

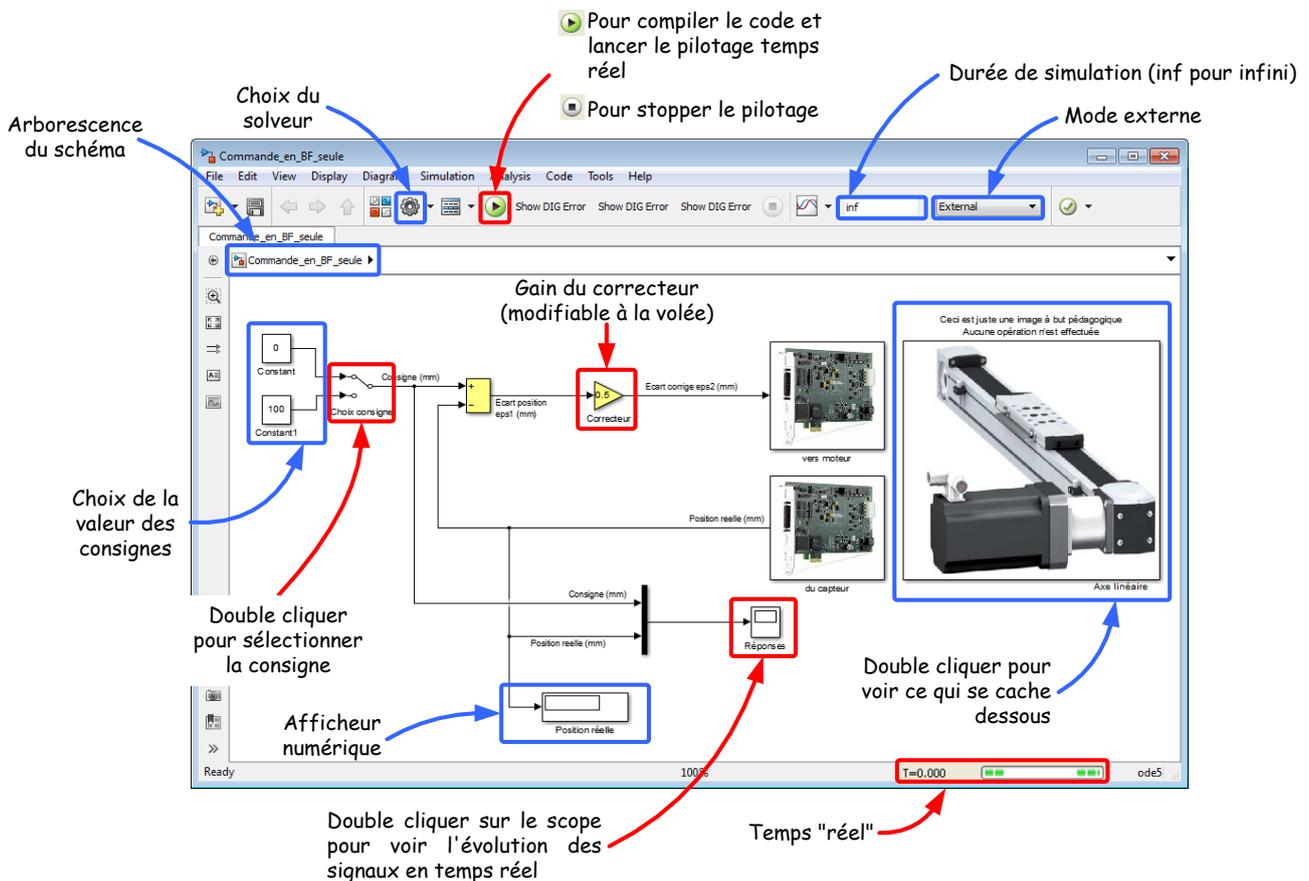
Double cliquer sur un oscilloscope sur le schéma bloc:

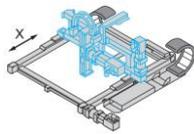


En cours de pilotage, vous pouvez modifier les constantes du schéma-bloc, le gain du correcteur en particulier

4) Stopper la simulation : 

Résumé





Création d'un nouveau modèle Simulink

Lorsque vous créez un nouveau modèle Simulink, vous devez préférentiellement partir soit d'un fichier existant soit du fichier vierge nommé "Fichier_vierge.slx" qui se trouve avec les exemples fournis. En effet, de nombreux paramètres sont associés à cette page dans des menus parfois bien cachés. C'est le cas notamment de la période d'échantillonnage dt, du type de solveur mathématique utilisé, du "Fixed-step size" réglé sur dt mais pas seulement.

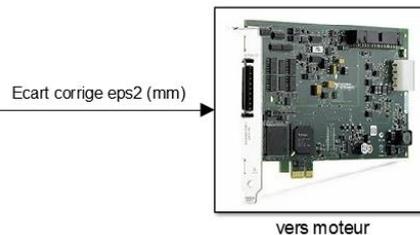
De la même façon, utilisez abondamment les éléments de la bibliothèque "Bibliothèque.slx". Toutes les entrées sont paramétrées avec la période d'échantillonnage dt et les oscilloscopes sont aussi paramétrés pour effectuer de l'acquisition sur une longue durée (là encore dans des menus parfois bien cachés)

Si vous voulez importer d'autres éléments des bibliothèques standards de Simulink, c'est tout à fait possible. En général, il n'y a rien de particulier à faire. Pour les entrées il faudra parfois les paramétrer en double cliquant dessus et en choisissant un "sample time" égal à dt.

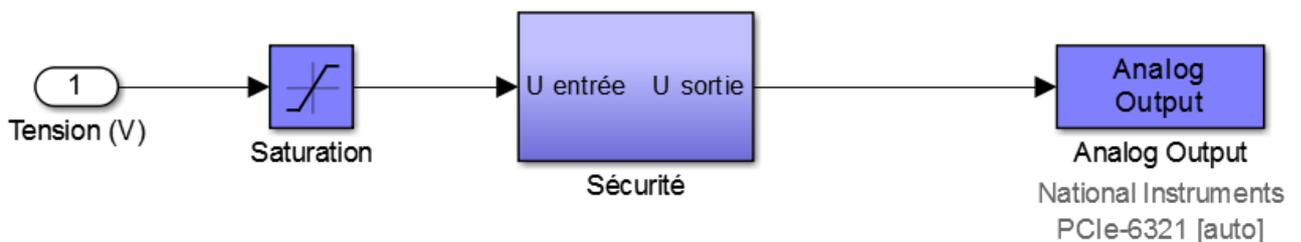
Bloc tension de sortie

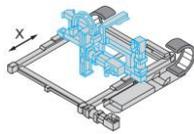


Ne modifiez pas le bloc de sortie analogique :



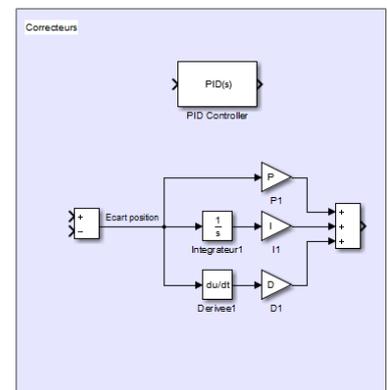
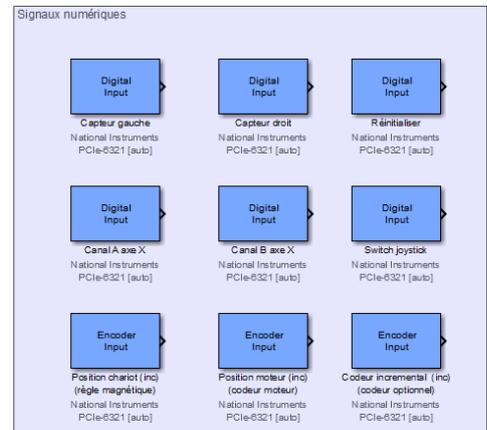
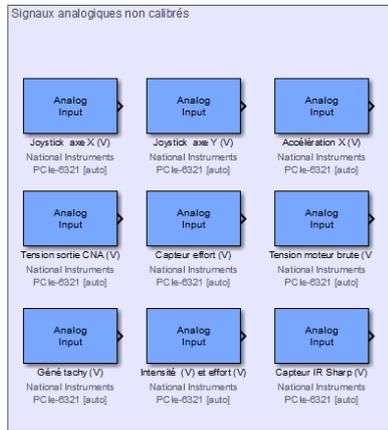
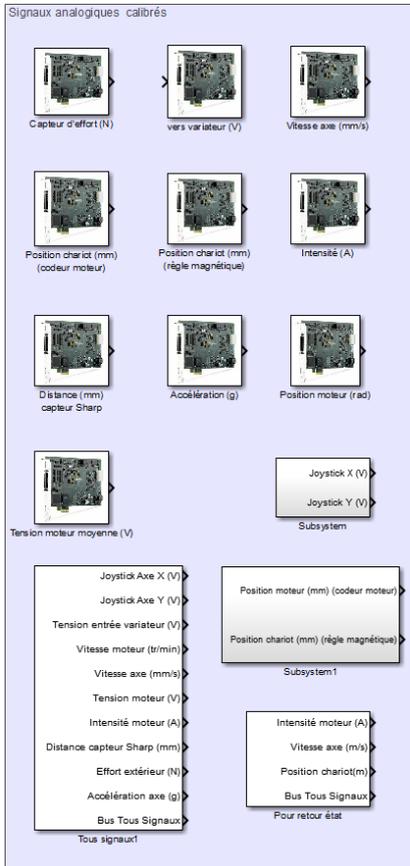
C'est un sous-système (double-cliquer dessus pour voir) qui intègre les sécurités liées aux capteurs de fin de course "matériels".

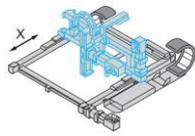




Ci-dessous, une partie des blocs de la bibliothèque qui permettent de communiquer avec Control'X.

Tous les gains nécessaires à leur utilisation sont définis ans le fichier "param.m"

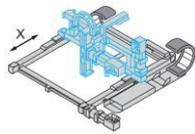




Control'X

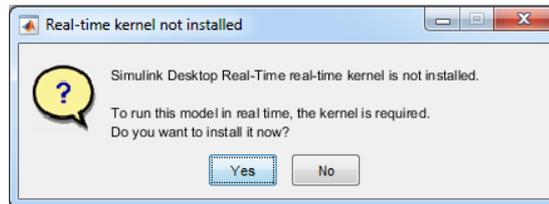
Troobleshooting Matlab-Simulink





Installation du noyau temps réel

Au tout premier lancement d'un fichier de pilotage, le noyau temps réel de la toolbox "Simulink desktop real time" n'a pas forcément été installé :

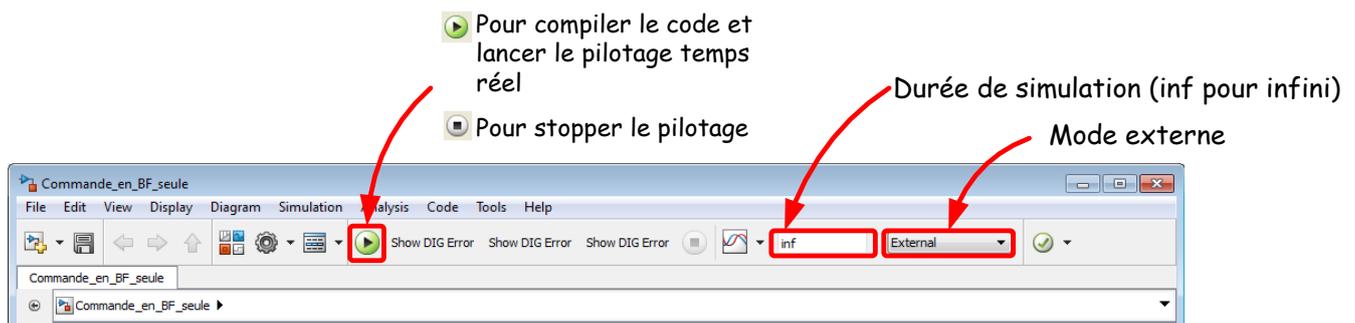


Solution : cliquer sur "Yes" et suivre les instructions qui s'affichent pour installer le noyau temps réel. Cette opération n'est à effectuer qu'une seule fois sur le poste relié à Control'X.

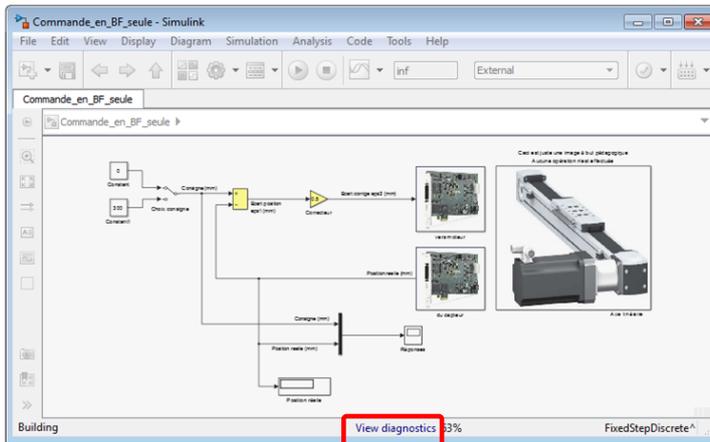
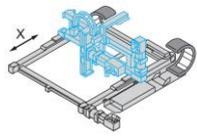
N.B. : Si plusieurs versions de Matlab-Simulink sont installées, elles partagent parfois difficilement le noyau temps réel et il est alors conseillé de n'utiliser qu'une seule version ou bien même de désinstaller toutes les versions non utiles au pilotage temps réel (celles qui n'utilisent pas la toolbox "Simulink desktop real time").

Erreurs de compilation

Après le lancement d'un fichier Simulink, il est possible de suivre le déroulement de la compilation :

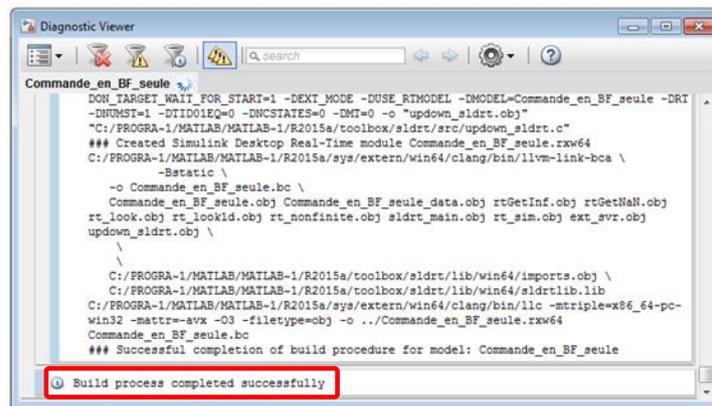


Nota : Ne pas oublier de choisir le mode "External" pour communiquer avec la cible (la carte National Instrument).



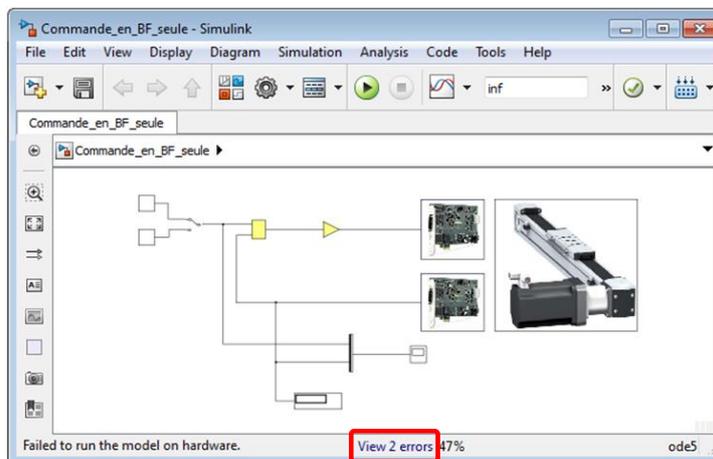
Pour voir le déroulement de la compilation

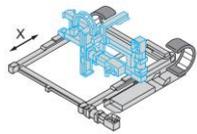
On obtient alors la fenêtre suivante :



Lorsque tout se passe bien, le message "Build process completed successfully" apparaît et à priori, le pilotage va s'effectuer normalement.

Si ce n'est pas le cas, Simulink génère un rapport d'erreur (visible après avoir cliqué sur "View diagnostic").

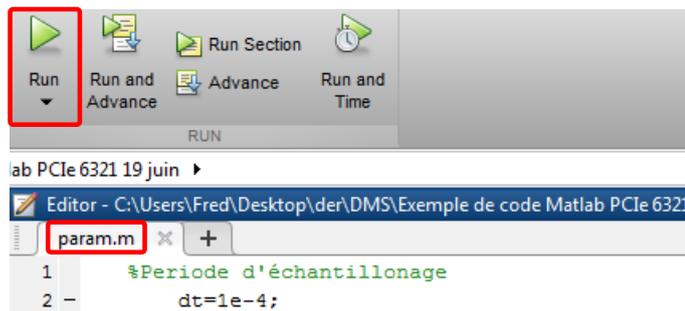




Plusieurs messages d'erreur sont alors susceptibles d'être rencontrés. Les causes d'erreur les plus fréquentes sont les suivantes :

- a) Certains paramètres n'ont pas été définis comme la période d'échantillonnage dt par exemple.

Solution : lancer le fichier "param.m" par exemple ou définir toutes les constantes utiles au pilotage sur la ligne de commande de Matlab.

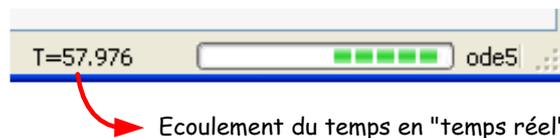


- b) Une erreur est générée parce qu'un schéma Simulink tourne et est déjà en train d'occuper les ressources processeur.

Solution : ne faire tourner qu'un modèle à la fois.

Non-respect de la période d'échantillonnage

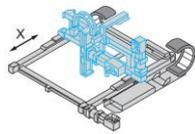
La période d'échantillonnage choisie semble ne pas être respectée et le temps ne s'écoule pas en temps "réel"



Solution : la période d'échantillonnage choisie (notée dt) est trop faible par rapport à la complexité des tâches d'acquisition ou de génération des signaux dans le temps imparti. En général le facteur limitant est le nombre de voies analogiques mesurées.

Par exemple, les 16 voies analogiques ne peuvent à priori pas être mesurées à 10 kHz.

Solution : choisir une période d'échantillonnage plus élevée



Le noyau temps réel implémenté sous Windows réquisitionne les ressources processeur pour tenter de piloter le système en temps réel à la fréquence spécifiée (celle correspondant au dt).

En général, les facteurs limitant l'exécution du code à la période choisie (dt) sont les suivants (du plus limitant au moins limitant) :

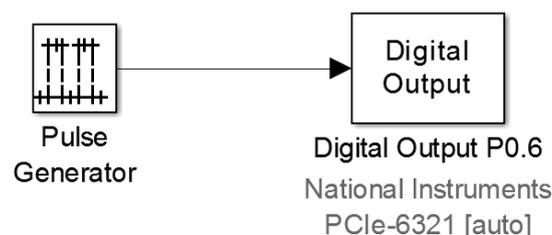
- La feuille Simulink contient du code StateFlow : privilégier alors une période d'échantillonnage de 1 ms par exemple.
- Les performances du PC ne sont pas suffisantes parce qu'il y a trop de programmes qui tournent en arrière-plan (des virus par exemple).
- Les performances de la carte vidéo ne sont pas suffisantes.
- Un nombre trop élevé de conversions analogiques numériques demandées à la carte de commande (c'est la carte de commande qui représente le facteur limitant)
- Un code trop complexe à effectuer dans un temps imparti trop court.

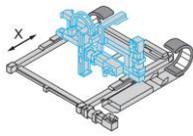
Nota : Les ressources processeur sont attribuées prioritairement aux calculs nécessaires pour exécuter les instructions correspondant au code Simulink. Les fonctions d'affichage ou de lecture des actions utilisateur ne sont pas prioritaires. Le caractère temps réel peut très bien être tout à fait respecté alors que l'affichage par exemple lui n'est pas effectué en temps réel. L'interaction avec l'utilisateur peut être fortement dégradée mais avec un code qui malgré les apparences tourne en temps réel.

Il vaut souvent mieux attendre que le code se termine en cliquant sur  pour stopper le pilotage plutôt que de rebooter l'ordinateur en pensant qu'il y eu plantage.

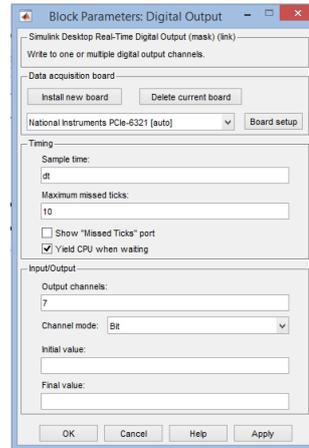
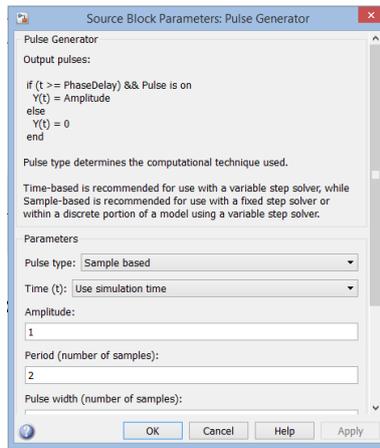
Le caractère temps réel peut être vérifié à l'oscilloscope avec la sortie dédiée sur le côté de Control'X : il s'agit de la sortie numérique P0.6 de la carte de commande (pin 16).

Ce petit bout de code se trouve dans le fichier " Test_respect_temps_reel.slx" qui se trouve avec les exemples fournis.

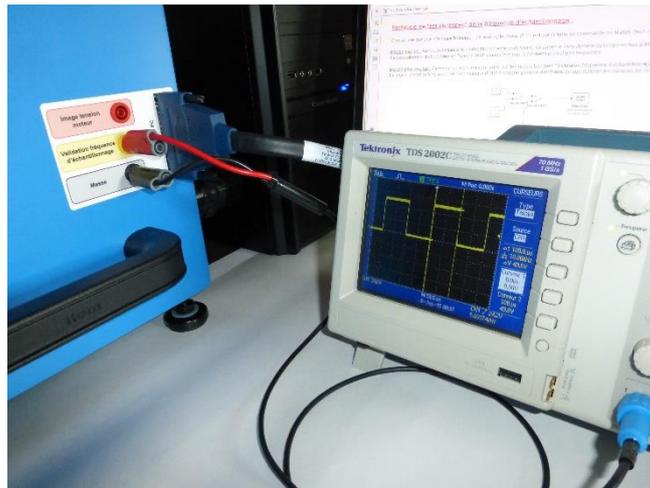


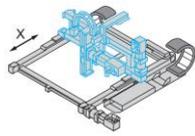


Les blocs "Pulse Generator" et "Digital Output P0.6" y sont paramétrés comme suit :



Il suffit alors de valider la période d'échantillonnage à l'oscilloscope.





Problèmes divers

a) Le nom du fichier Simulink n'est pas compatible avec le format exigé par Matlab-Simulink

Solution : choisir un nom de fichier compatible : pas d'accent, pas d'espaces, pas de caractères spéciaux.

b) Certains oscilloscopes se figent.

Solution : il faut alors quitter Matlab-Simulink et relancer le fichier.

c) Si certains problèmes persistent, effectuer dans l'ordre les essais suivants

- Fermer le fichier, le ré-ouvrir sous Simulink et essayer à nouveau de le compiler
- Renommer le fichier et essayer à nouveau de le compiler
- Ouvrir un fichier qui fonctionne, effacer tout ce qu'il contient et faire un copier-coller du modèle du fichier qui ne fonctionne pas sous ce nouveau fichier
- Fermer Matlab-Simulink, le relancer et essayer à nouveau
- Effacer dans le répertoire de travail tous les fichiers et répertoires créés automatiquement lors d'une compilation : fichiers rxw32 ou rxw64 répertoires type slprj ou *sldrt_win64

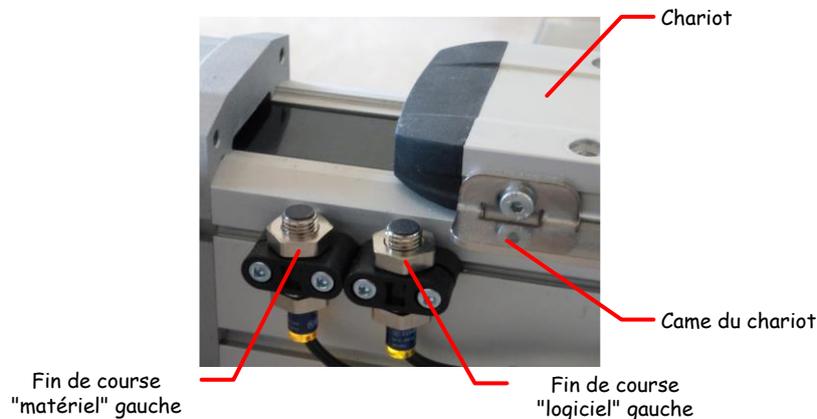
Pour créer un nouveau fichier, il est préférable de partir du fichier vierge fourni "Fichier_vierge.slx" qui se trouve avec les exemples fournis. En effet toutes les feuilles Simulink possèdent des réglages dans divers menus.

Mise en service de Control'X

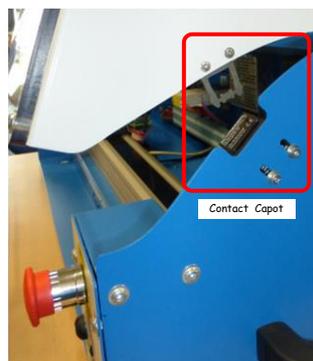
Etape 1 : Mettre sous tension Control'X : pour cela, basculer l'interrupteur situé au dos du carter sur la position 1 :



Etape 2 : Vérifier que la came du chariot de Control'X ne recouvre pas les fins de course "matérielle" gauche et droit. Si cela devait être le cas, déplacer à la main le chariot vers l'intérieur de façon à découvrir ces deux fins de course :



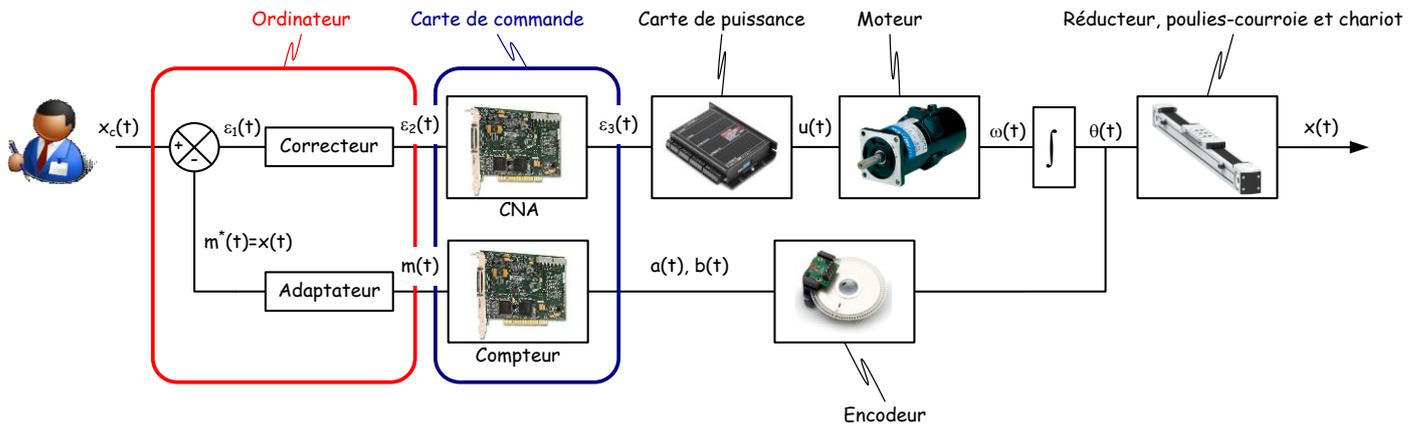
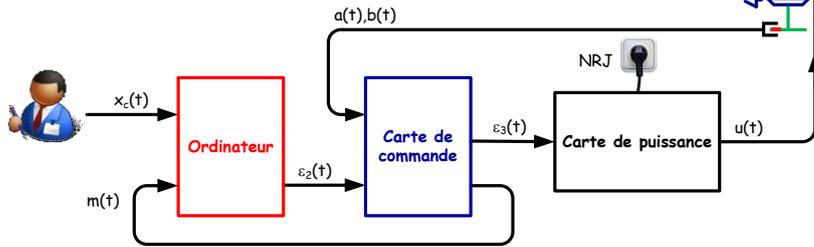
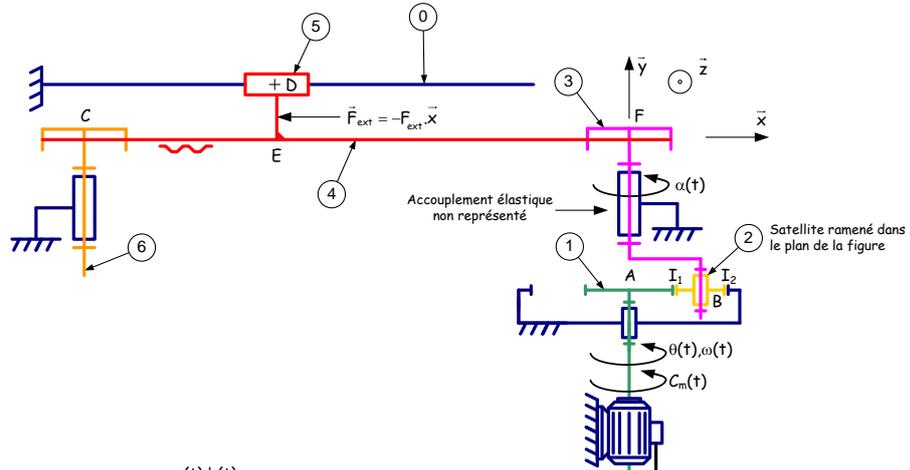
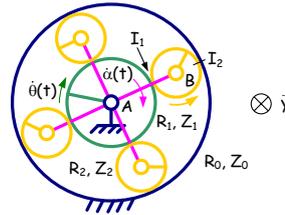
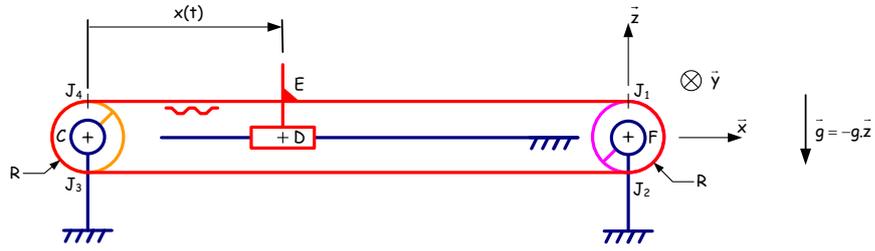
Etape 3 : Fermer le capot du carter pour fermer l'interrupteur de sécurité :



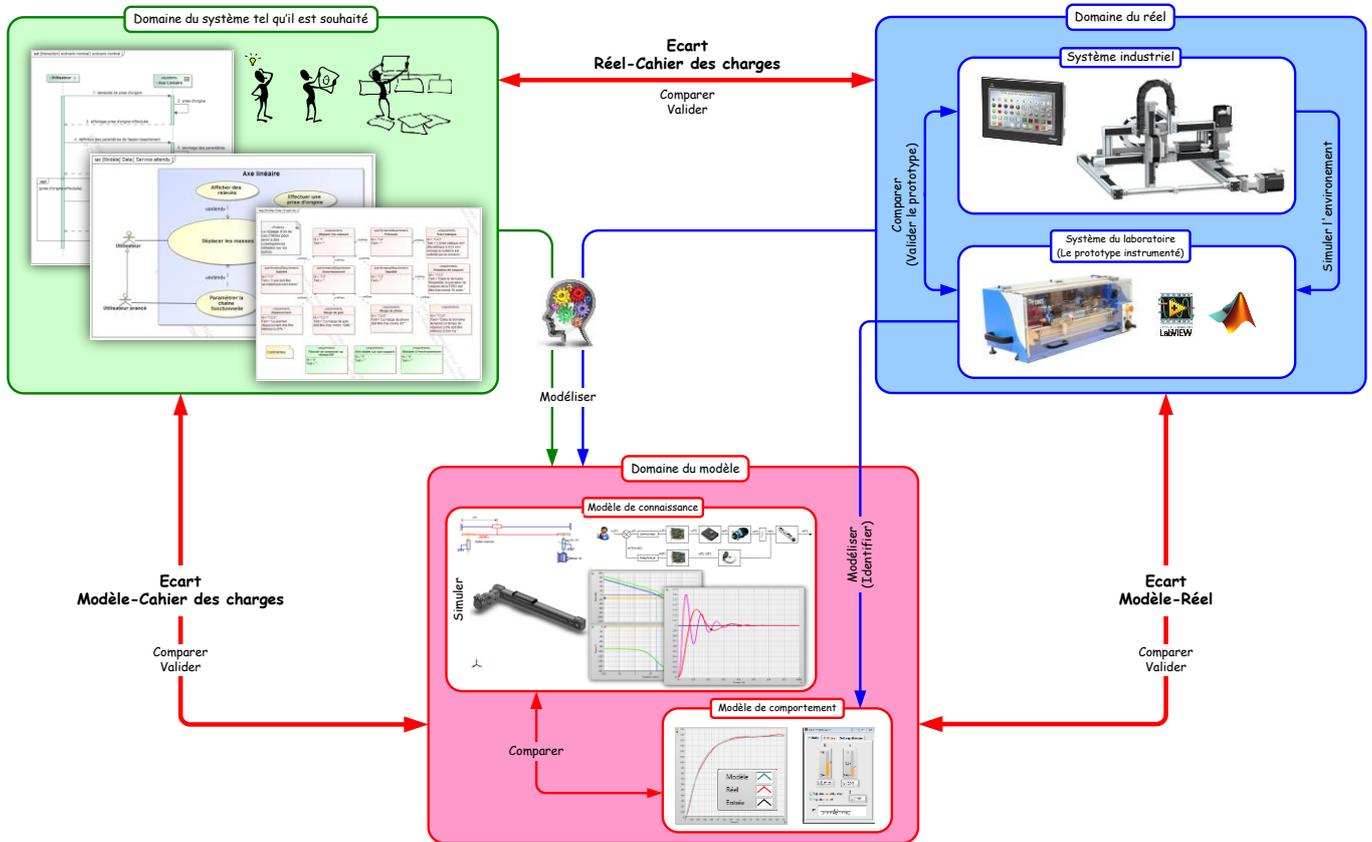
Etape 4 : Sur le pupitre, déverrouiller l'arrêt d'urgence puis appuyer sur le bouton poussoir "Armer système". Un relais auto alimenté colle et la diode verte "variateur prêt" s'allume.



Présentation structurale - fonctionnelle de Control'X



Analyse des écarts sur Control'X

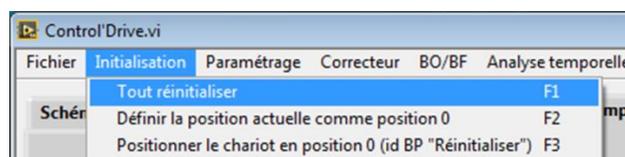


Lancement de Control'Drive

Lancer 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 fin de course "logicielle".

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



Lancement de Matlab Simulink en contrôle commande temps réel

Depuis l'explorateur Windows, double cliquer sur le fichier "param.m" pour lancer Matlab et ouvrir ce fichier : le répertoire de travail (path) sera sélectionné automatiquement.

Depuis l'explorateur, double cliquer sur le fichier Simulink de Simulation/Pilotage.



Script "param.m"

Exécuter ce script de configuration

Annotations for the Simulink interface:

- Arborescence du schéma**: Points to the left-hand tree view.
- Choix du solveur**: Points to the 'Simulation' menu.
- Choix de la valeur des consignes**: Points to the 'Constant' block in the diagram.
- Double cliquer pour sélectionner la consigne**: Points to the 'Choix consigne' block.
- Afficheur numérique**: Points to the 'Position réelle' scope.
- Gain du correcteur (modifiable à la volée)**: Points to the 'Correcteur' gain block.
- Double cliquer pour voir l'évolution des signaux en temps réel**: Points to the 'Réponses' scope.
- Temps "réel"**: Points to the 'T=0.000' indicator at the bottom.
- Type de solveur utilisé**: Points to the 'ode5' solver name.
- Pour compiler le code et lancer le pilotage temps réel**: Points to the 'Run' button.
- Pour stopper le pilotage**: Points to the 'Stop' button.
- Durée de simulation (inf pour infini)**: Points to the 'inf' simulation time field.
- Mode externe**: Points to the 'External' mode dropdown.
- Double cliquer pour voir ce qui se cache dessous**: Points to the 'Axe linéaire' block.

Diagram illustrating how to zoom into a scope:

- Start with a scope icon labeled **Réponses**.
- Instruction: **Double cliquer sur un scope**.
- Result: A zoomed-in view of the scope toolbar with annotations:
 - Zoom fenêtre**: Points to the window zoom icon.
 - Zoom horizontal**: Points to the horizontal zoom icon.
 - Zoom vertical**: Points to the vertical zoom icon.
 - Zoom au mieux**: Points to the fit icon.