



# TRAVAUX PRATIQUES SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGENIEUR



## Modélisation dynamique et pilotage d'un système

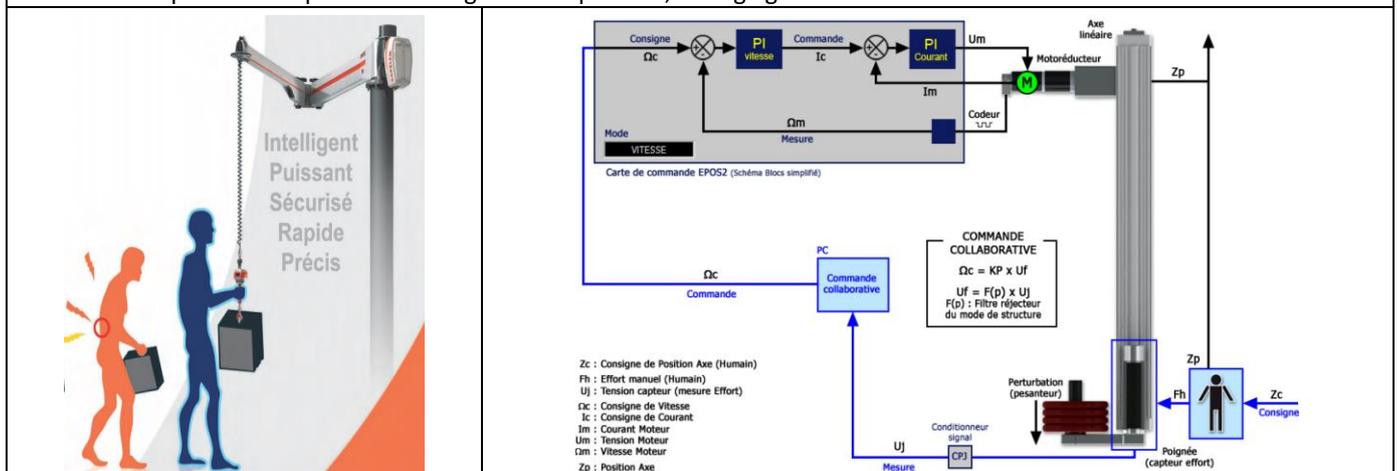
C124 C125  
C126

### Robot collaboratif COMAX : réponse dynamique

**Problématique :** *Quels sont les paramètres influents sur la dynamique d'un système lors de sa mise en position ? Pour cela vous êtes chargés :*

- d'exploiter un modèle 3D pour établir en partie le modèle de connaissance,
- d'acquérir la réponse indicielle et d'en déduire un modèle de comportement,
- d'agir sur le réglage d'un correcteur pour ajuster une réponse dynamique.

Issu de la technologie des Cobots (« Robots collaboratifs »), CoMax permet d'assister l'homme au travail et de diminuer les risques de TMS (troubles musculo squelettiques). CoMax est continuellement piloté par l'homme au moyen d'une commande intuitive et collaborative permettant de réaliser une tâche de levage sans effort. Le système du laboratoire didactisé comporte des capteurs et un logiciel d'acquisition, de réglage et de visualisation.



**Démarche à suivre :** La résolution de la problématique proposée est faite sous forme collaborative en trois activités autour du même support (*travail en îlot*).

#### ACTIVITE 1 C123 (2H30) : Dynamique du système par le théorème « Energie / Puissance »

- Localiser et exprimer l'énergie cinétique de ses différentes pièces en mouvement, et en faire le bilan.
- Localiser et exprimer les puissances extérieures,
- Localiser l'origine des puissances intérieures (pertes) à partir de la cinématique,
- Savoir exprimer analytiquement et évaluer expérimentalement ces pertes (rendement),
- Etablir et résoudre le théorème « Energie / Puissance ».

**Chef de projet**

#### ACTIVITE 2 C124 C126 (2H30) : Acquisition d'une loi « Entrée / Sortie » et modèle de comportement

- Configurer et raccorder une carte d'acquisition numérique multi entrées (DAQ NI6009) pour acquérir les grandeurs analogiques « Entrée / Sortie » du système,
- Faire l'acquisition et traiter éventuellement les données (mise à l'échelle, filtrage),
- Etablir le modèle de comportement par une méthode graphique et des abaques, par une méthode numérique et un tableur (Excel) et en déduire les caractéristiques dynamiques du système,
- Vérifier que la méthode expérimentale suivie peut s'appliquer au système étudié.

#### ACTIVITE 3 C124 (2H30) : Réglage des performances dynamiques de l'asservissement

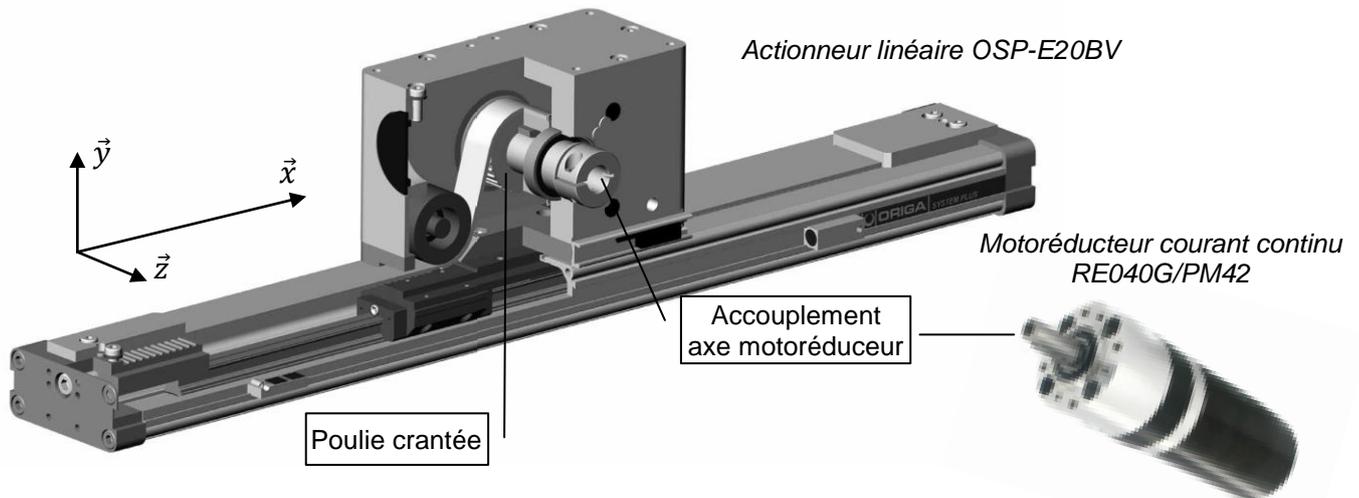
- Agir sur le réglage du correcteur et obtenir une réponse répondant aux critères de stabilité, précision, rapidité,
- Relever les caractéristiques dynamiques de la réponse, et les commenter pour le contexte d'emploi,
- Conclure sur les caractéristiques attendues d'une correction PI dans le contexte de votre système.

#### ACTIVITE COMMUNE DE SYNTHÈSE ET RESTITUTION ECRITE (20') / (Communiquer)

**Le chef de projet** gère la mise en commun des travaux effectués, il complète la « fiche bilan » distribuée, synthétise les études et résultats obtenus avec pour objectifs de **comprendre et expliquer le lien entre les 3 activités et la problématique posée.**

**ACTIVITE 1 CI23 (2H30) : Dynamique du système par le théorème « Energie / Puissance »**

En exploitant le système réel, sa documentation et les documents de cours, vous allez faire un bilan des éléments influents sur sa dynamique.

**ENERGIE CINETIQUE, PUISSANCES INTERIEURES ET EXTERIEURES****Mise en place des éléments de l'étude**

1. Lister les principaux composants dont les caractéristiques (masse et inertie) peuvent influencer sur le comportement dynamique du robot Comax.

**L'énergie cinétique accumulée dans le système**

- L'inertie de l'actionneur linéaire (sans masses additives) rapportée sur l'axe de sortie de la poulie est donnée page 31 du « catalogue actionneurs linéaires Comax » ; il sera noté  $J_{\text{éq0}}$ .
  - On note  $N_m$  le nombre de masses additionnelles de 1 kg placées sur le support.
  - Soit  $R_p$  le rayon primitif de la poulie crantée et  $r$  le rapport de réduction du motoréducteur.
2. Exprimer l'énergie cinétique des pièces en mouvement. Utiliser des notations explicites et précises.
  3. En vue du dimensionnement de l'actionneur, il faut « rapporter » les inerties au niveau de l'axe moteur. Pour cela, exprimer la vitesse linéaire des masses additives en fonction de  $R_p$ ,  $r$  et de la vitesse angulaire du moteur, notée  $\omega_m$ .

4. Puis établir l'expression littérale de l'énergie cinétique totale sous la forme  $E_{c \text{ totale}} = \frac{1}{2} J_{\text{éq}} \omega_m^2$ .

Déterminer numériquement  $J_{\text{éq}}$  et comparer la contribution de chaque élément aux phénomènes inertiels engendrés et rapportés au niveau du rotor moteur. Conclure.

Données :  $J_{\text{rotor}}$  = voir document constructeur « Fiche\_RE40G\_PM42 » ;  $N_m = 4$ .

**Prise en compte des puissances intérieures**

5. 1<sup>er</sup> cas : On suppose la liaison glissière de l'actionneur linéaire comme parfaite. Déterminer le moment des torseurs cinématique et statique au centre de cette liaison (attention à l'ordre des indices). En déduire l'écriture correspondante de la puissance dissipée par cette liaison.
6. 2<sup>ème</sup> cas : Les frottements sont pris en compte dans cette même liaison glissière. Ils sont associés au modèle d'une force résistante opposée au déplacement, notée  $F_r$ , suivant la direction  $\vec{x}$ . En déduire la puissance désormais dissipée dans cette liaison.
7. Dans quel cas cette puissance sera considérée comme « intérieure » ou « extérieure » au système (termes utilisés dans l'écriture du théorème de la puissance cinétique).
8. Proposer un protocole expérimental permettant de quantifier les pertes dues au frottement au niveau de cette liaison glissière.
9. Conclure sur les solutions technologiques employées pour minimiser les pertes au niveau de cette liaison. Exemple d'actionneur linéaire à recirculation de billes : <https://www.youtube.com/watch?v=5QIE0mPq04Q>.
10. Quelle hypothèse doit-on impérativement vérifier (ou établir) avant de commencer une étude dynamique ?

**Prise en compte des puissances extérieures**

Notations :

- $C_{\text{méca}}$  le couple mécanique ramené sur l'arbre moteur, tel que  $C_{\text{méca}} = C_m - C_{\text{pes}} - C_{\text{fs}} \cdot \text{sign}(\omega_m)$ , avec :
  - $C_m$  le couple électromagnétique du moteur,
  - $C_{\text{pes}} > 0$  la norme du couple dû à l'action mécanique de la pesanteur, ramené sur l'arbre moteur,
  - $C_{\text{fs}} > 0$  la norme du couple dû au frottement sec ramené sur l'arbre moteur. La fonction  $\text{sign}(\omega_m)$  retourne le signe de la grandeur  $\omega_m$ , vitesse de rotation de l'arbre moteur en rad/s. Par convention, lors d'un mouvement vers le haut, nous avons  $\omega_m > 0$ ,

- $M_0 = 5,11 \text{ kg}$  est la masse de l'ensemble des pièces en translation, comprenant l'axe et son guidage linéaire, la poignée et le support de masses additionnelles.
11. Lister l(es) action(s) mécanique(s) engendrant une puissance dite « extérieure » lorsque le moteur est alimenté. Situation de fonctionnement où l'axe monte ( $\omega_m > 0$ ).
  12. Déterminer l'expression de la puissance délivrée par le moteur  $P_{\text{mot}}$ , en fonction de  $C_m$  et  $\omega_m$  ; puis exprimer la puissance de l'action de la pesanteur en fonction de  $M_0$ ,  $N_m$ ,  $g$ ,  $R_p$ ,  $r$  et  $\omega_m$ .
  13. Pour certaines valeurs de courant d'alimentation du moteur, il a été observé que :  $C_{\text{pes}} - C_{\text{fs}} < C_m < C_{\text{pes}} + C_{\text{fs}}$ . Interpréter le phénomène constaté.  
On rappelle que les relations de comportement dans la machine à courant continu permettent d'écrire  $C_m = K_m \cdot I_m$ , avec  $K_m = 30,2 \text{ mNm} \cdot \text{A}^{-1}$  et  $I_m$  l'intensité dans le moteur.
  14. Proposer un protocole expérimental pour quantifier  $C_{\text{fs}}$ . (pour la suite prendre  $C_{\text{fs}} \sim 0,04 \text{ Nm}$ ).

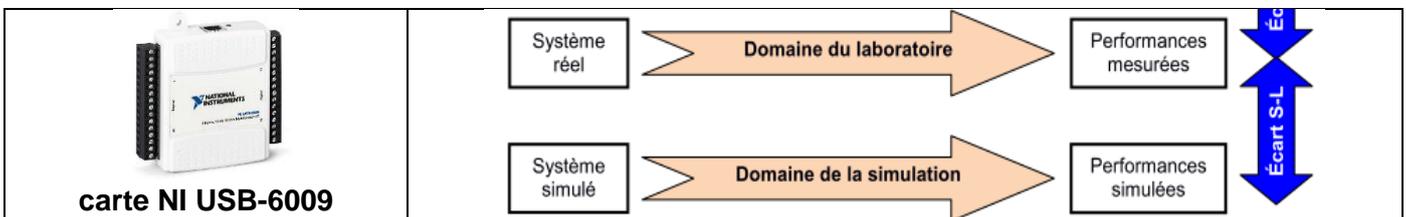
## SYNTHESE DE L'ETUDE

15. Etablir littéralement l'expression du théorème de la puissance cinétique dans le cas d'un système parfait puis non parfait.  
Le constructeur fournit les données suivantes pour la consigne de position : accélération maximale au niveau du moteur  $\dot{\omega}_m \text{ max} = 20000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .
16. Déterminer le couple moteur en phase d'accélération (dynamique), noté  $C_{m \text{ max}}$  puis en phase statique (vitesse uniforme), noté  $C_{m \text{ stat}}$ . Vérifier le dimensionnement du moteur avec les données constructeur.
17. Proposer un protocole expérimental permettant de quantifier le rendement global du système d'un point de vue énergétique. Le mettre en œuvre et estimer le rendement  $\eta_{\text{global}}$ .

## ACTIVITE 2 C126/ C124 (2H30) : Acquisition d'une loi « Entrée / Sortie » et modèle de comportement

Etablir le **modèle de connaissance** d'un système (à partir des équations) est parfois difficile et approximatif.

Etablir le **modèle comportemental** du système existant à partir d'un essai indiciel est souvent plus efficace et précis et tient compte du contexte d'emploi du système.



L'acquisition des mesures sera faite grâce à un module numérique NI USB-6009, puis elles seront exploitées :

- soit à partir de la réponse graphique à l'aide d'abaques,
- soit à partir d'un tableur et d'un fichier de points.

Vous devez modéliser la fonction de transfert liant la tension aux bornes de l'induit d'une MCC (variable d'entrée) à la vitesse de son rotor lors de son démarrage (variable de sortie).

L'alimentation de la machine est réalisée à partir d'une alimentation 0-30V réglée à 10V environ et subitement reliée à l'induit du moteur. Mettre la limitation de courant au maximum pour qu'elle n'intervienne pas lors de l'essai.

- La tension d'alimentation est observée par l'intermédiaire d'une sonde de tension isolée à gain ajustable...
- La vitesse est mesurée par une dynamo tachymétrique délivrant une tension proportionnelle à la vitesse.
- Une carte d'acquisition NI USB-6009 permet de récupérer les signaux sur ses entrées analogiques.

## EXPLOITATION DE LA NOTICE du boîtier NI USB-6009 et CONFIGURATION DE L'ACQUISITION

Utiliser la notice résumée de la carte et du logiciel d'acquisition.

1. INDIQUER à l'aide de schémas la différence entre l'acquisition d'un signal en mode Différentiel (DIF) et en mode asymétrique référencé à la masse (RSE). CHOISIR le mode de raccordement de vos capteurs (dynamo tachymétrique et sonde de tension isolée).
2. DEDUIRE de ce qui précède le nombre maximum d'acquisitions simultanées analogiques pour une carte NI6009 dans chacun des 2 modes (DIF et RSE).
3. INDIQUER la fréquence d'échantillonnage maximum de la carte et DEDUIRE si on utilise 2 voies en mode DIFF, la fréquence d'échantillonnage maximale possible pour chaque voie.
4. INDIQUER les caractéristiques de la conversion CAN en nombre de bits et en DEDUIRE la résolution de mesure ou quantum (en mV) pour une plage de tension de 10V.

**MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION DE LA VITESSE au DEMARRAGE D'UNE MCC**

- 5. PROPOSER le schéma de câblage de façon à utiliser les 2 entrées en mode DIF.
- 6. RELEVÉR les coefficients utiles à la mesure pour les 2 capteurs utilisés.  
ESTIMER les amplitudes maximales des signaux à relever à partir des caractéristiques de la MCC pour une tension d'alimentation de 10V environ.

**Réaliser le câblage seulement s'il est validé par un professeur**

- 7. CONFIGURER les 2 entrées choisies avec le logiciel Labview Signal Express, CONFIGURER le coefficient de l'entrée vitesse de façon à obtenir directement la vitesse en rd/s.
- 8. DEFINIR les critères que vous vous fixez pour configurer la fréquence d'échantillonnage et la durée d'acquisition des signaux. REALISER cette configuration.
- 9. FAIRE L'ACQUISITION, et si elle est correcte, EXPORTER les données de mesure dans un tableur Excel de façon à pouvoir les exploiter ultérieurement.

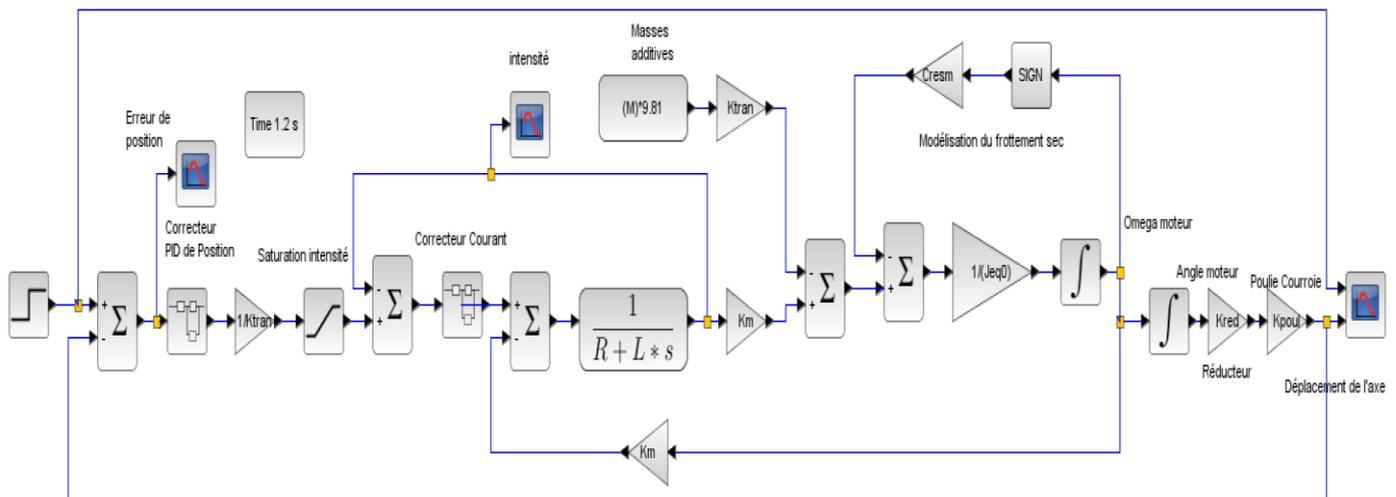
**MODELISATION EXPERIMENTALE, ETABLISSEMENT DU MODELE**

- 10. ETABLIR de 2 façons le modèle expérimental (fonction de transfert) entre la tension d'induit et la vitesse de rotation de la machine soit  $H(p) = \Omega(p) / U(p)$ .
  - Méthode graphique à partir du tracé en utilisant le document **Méthodes et abaques d'identification2015.pdf**
  - Méthode numérique à l'aide d'un tableur (**fichier Identif\_numérique\_ordre2\_passe\_bas.xlsx**).

Pour chaque méthode CHOISIR en justifiant une forme d'écriture canonique de type ordre 1 ou 2 passe bas et définir ses caractéristiques.

**SYNTHESE DE L'ACTIVITE, extrapolation au SYSTEME ETUDIE puis à votre TIPE**

- 11. Pour le système COMAX, en utilisant le schéma bloc ci-dessous, INDIQUER comment il faudrait envisager la modélisation expérimentale de l'ensemble MCC + cinématique et EXPOSER les difficultés à mettre en œuvre cette méthode pour un système complet en ordre de marche.



- 12. Pour votre TIPE, ENVISAGER une démarche comparable de type « modélisation expérimentale ». CITER la modélisation dont vous avez besoin et DONNER les grandes lignes de la méthode à mettre en œuvre (types des grandeurs pertinentes à mesurer, capteurs qu'il vous faudra utiliser).

**ACTIVITE 3 CI24 (2H30) : Réglage des performances dynamiques de l'asservissement****TRAVAIL PREPARATOIRE**

Prendre connaissance du dossier « [Comax INTERFACE Pilotage.pdf](#) ».

1. Mettre en service le système à l'aide du logiciel en veillant à respecter les consignes. Faire un essai en mode collaboratif avec **les 3 masses additives en place**

**REPONSE INDICIELLE en TRANSLATION VERTICALE (ASSERVISSEMENT DE POSITION)**

2. ACCEDER au mode « asservissement de position » et respecter toutes les consignes.
3. Accéder au réglage du correcteur PID et REGLER  **$K_p = 2420$ ,  $K_i = 8340$  et  $K_d = 3240$** .
4. FAIRE un essai indiciel d'environ 100mm, à partir d'une position à l'écart de butées, dans un sens puis dans l'autre.
5. ENREGISTRER les tracés de la réponse de **la position verticale** et du **courant moteur** l'IMPRIMER sur feuille.
6. RELEVER pour **la position verticale** les résultats importants (**distinguer valeur absolue avec ses unités et relative en %**) :
  - valeur finale et valeur éventuelle du premier dépassement  $D1(\%)$ , l'erreur finale absolue et relative,
  - temps de réponse à 5% et temps de montée (de 10% à 90% de la variation de la sortie),
  - pseudo période  $\omega_R$  éventuelle des oscillations,
  - symétrie ou non du fonctionnement pour les 2 sens de rotation de la cheville.
7. RELEVER la valeur du pic de courant et du courant permanent lorsque la position est atteinte.
8. AUGMENTER la valeur du correcteur  $K_p$  afin d'avoir un comportement pseudo périodique de la réponse indicelle. Justifier ce comportement pseudo périodique à partir de l'action sur  $K_p$ .
9. EFFECTUER le même essai et les mêmes relevés en enlevant 2 masses additives, COMPARER le temps de réponse et JUSTIFIER son évolution.

Pour supprimer l'erreur finale dite « erreur statique » car en réponse à un échelon, il faut mettre en place une correction de type PI (Proportionnelle + Intégrale).

10. Revenir à une situation avec  $K_p = 2420$  et AGIR sur le paramètre  $K_i$  en le diminuant de moitié. Que constatez-vous et pour quelle raison ? Ajuster  $K_i$  pour OBTENIR une réponse sans dépassement mais la plus rapide possible (amortissement  $m = 1$ , réponse dite critique).
11. ENREGISTRER alors le tracé de la réponse de **la position verticale** et du **courant moteur** pour un angle positif et l'IMPRIMER.

**SYNTHESE ET CONCLUSION SUR VOTRE ACTIVITE**

12. INDIQUER et COMMENTER quelles sont les influences du type de correction P et PI d'un point de vue dynamique sur **le comportement de l'assistance du déplacement vertical de la charge**.
13. Pour un réglage du correcteur donné, DEVELOPPER une analyse qualitative de l'influence des actions mécaniques (statique), des liaisons (cinématique), de l'énergétique et des pertes (dynamique) sur le comportement de la mise en position de la charge.