Travaux Pratiques – DYNAMIQUE DU SOLIDE
Robot Jockey

Objectifs du TP

L'activité principale de ce TP consiste à mesurer, identifier et vérifier les caractéristiques dynamiques de l'ensemble poignet – support de baguette – baguette afin de mettre en avant le phénomène de couplage dynamique des deux axes et de dimensionner correctement la motorisation du système.

1 – Mise en situation

Les courses de dromadaire sont très populaires aux Emirats Arabes Unis et spécialement au Qatar. Ne pouvant supporter une charge en course de plus de 40 Kg, les dromadaires étaient traditionnellement montrés par de jeunes enfants venus du Pakistan, le plus souvent victimes de trafic. Sous la pression de la Ligue Internationale des Droits des Enfants, le gouvernement du Qatar décida d'interdire les jockeys humains au profit de jockeys humanoïdes et confia à une société d'ingénierie le soin de proposer une solution alternative.

Le jockey humanoïde, qui est composé essentiellement deux bras et un tronc, est sanglé sur le dos du dromadaire. Un premier bras (objet de l'étude et placé à droite) est équipé d'une baguette permettant de cravacher l'animal. Un second bras (non présent sur le système étudié et placé à gauche) permet d'agir sur les rennes.

Le pilote assis dans un 4x4 roulant en bordure de l'hippodrome, commande, en fonction du déroulement de la course, les deux bras du robot grâce à une télécommande. Il lui est possible d'alterner le raali et la frappe en faisant varier pour chacun des deux modes, l'intensité la fréquence ou bien encore l'amplitude.

Le système présent dans le laboratoire est le bras de robot anthropomorphique **réel** « instrumenté », pilotable et configurable.

On donne ci-dessous un extrait du cahier des charges fonctionnel donne les caractéristiques suivantes (le cahier des charges complet est disponible dans le **DOSSIER RESSOURCES**) :

FONCTION	Définition	Critères	Niveau	Flexibilité
FP1	DIRIGER (frappes)	- amplitude du mouvement - fréquence des frappes - intensité des frappes - trois zones de frappes	- réglage, position de départ précise - réglage (1 à 3 Hz) - réglable, inférieur à 50N -surface de frappe 25 cm²	+/- 2° +/-5% +/-5% +/-5cm²
FP2	STIMULER (raali)	- fréquence de rotation baguette - plan d'évolution de la baguette	- réglable (100 à 180 tr/min) - erreur d'inclinaison du poignet inférieure à 2°	+/-2tr/min +/-1°

2 – Modélisation du support de baguette avec une baguette

Afin de dimensionner (ou valider) la motorisation du système, il est nécessaire de connaître la répartition des masses en mouvement. On propose donc ici de déterminer les caractéristiques de l'opérateur d'inertie du support de baguette avec une baguette.

Ouvrir la maquette SolidWorks « SUPPORT_BAGUETTE_et_BAGUETTE » dans le dossier « JOCKEY SUPPORT BAGUETTE SEUL » (penser à dé-zipper le dossier CAO avant de l'utiliser : « clic droit » sur le dossier zippé puis « Extraire le dossier »).

Vérifier que les dimensions de l'esquisse sont conformes aux dimensions réelles du support de baguette avec une baguette. Par un croquis du bras dessiné à main levée, indiquer les dimensions des principaux volumes ainsi que leur position relative.

On propose une modélisation du support de baguette avec une baguette selon une décomposition en solides élémentaires :

- 1 parallélépipède rectangle
- 2 cylindres

En utilisant la modélisation simplifiée précédente, calculer le moment d'inertie du support de baguette avec une baguette autour de l'axe de rotation.

Évaluer grossièrement l'inertie I_{zz} du support de baguette avec une baguette par rapport à son axe. Les dimensions utiles seront relevées sur le système réel ou dans le DOSSIER TECHNIQUE.

Relever la masse, la position du centre de gravité, ainsi que les coefficients de la matrice d'inertie du support de baguette avec une baguette, issus du calcul effectué par SolidWorks.

Démarche pour obtenir les propriétés de masse d'une pièce (ou d'un assemblage)

- Dans l'arbre de construction de SolidWorks, sélectionner la pièce (ou l'assemblage) à considérer
- En cliquant dans l'onglet « ***Evaluer*** » puis « ***Propriétés de masse*** »

les propriétés massiques sont affichées (masse, volume, centre de gravité, matrice d'inertie, etc…).

Remarque : Il est possible dans les *Options* de la fenêtre « **Propriétés de masse** » de modifier les unités de longueur et de masse ainsi que le nombre de décimales mais cela peut provoquer des gros arrondis pour les valeurs affichées. Il est donc conseillé de laisser les unités par défaut.

Une attention particulière sera apportée à la base dans laquelle est exprimée la matrice d'inertie.

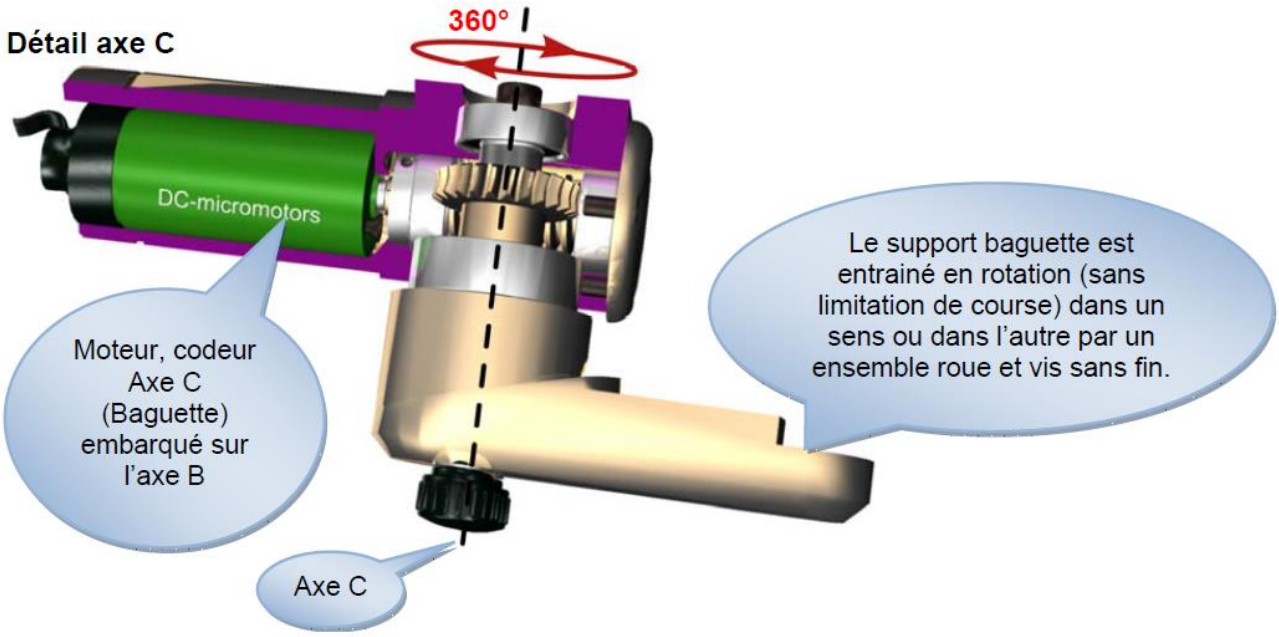
Justifier rigoureusement la forme de la matrice d'inertie.

Quel(s) coefficient(s) de la matrice d'inertie interviendra(ont) pour dimensionner le moteur ?

Proposer et mettre en œuvre si possible une démarche permettant de déterminer expérimentalement le moment d'inertie du support de baguette avec une baguette par rapport à son axe de rotation, ou proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de maximiser cette valeur en déterminant expérimentalement l'inertie du système rapportée à l'axe moteur.

L'objectif pour le groupe est de comparer pour les inerties du support de baguette avec une baguette, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

3 – Mise en évidence expérimentale du phénomène de couplage dynamique



On cherche à mettre en évidence expérimentalement le phénomène de couplage des deux axes B et C lors du mouvement de Raali.

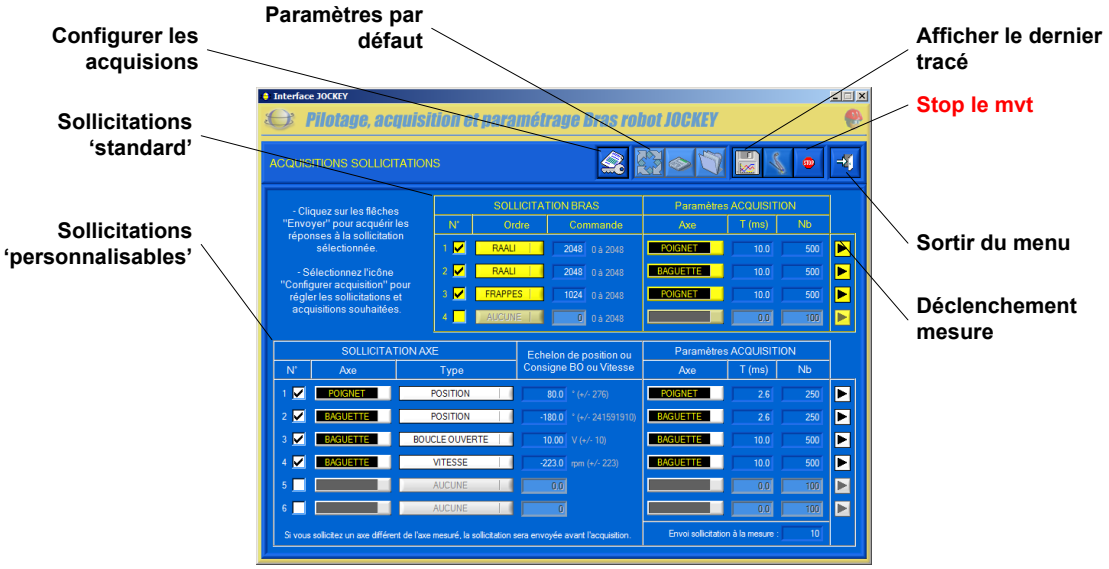
Le **DOSSIER RESSOURCES** et le **DOSSIER TECHNIQUE** contiennent des informations supplémentaires sur les constituants et leurs fonctions.

Lancer l'IHM (Interface Bras Robot Jockey) et solliciter le bras robot Jockey en mode 'Raali' (PWM réglé à 2048). Observer le mouvement oscillatoire de l'axe 'B Poignet' caractérisant le phénomène de couplage.

Attention aux personnes susceptibles de passer proche du Robot Jockey lors des mouvements de la baguette lors des mouvements de Raali.

A partir de l'observation précédente et de la structure de la chaîne de puissance de l'axe B, justifier le choix du type de commande de l'axe 'B Poignet' lors du mouvement de Raali.

Afin de définir expérimentalement les principaux facteurs influençant le phénomène de perturbation de l'axe 'B Poignet' en Raali, il est nécessaire de réaliser plusieurs expérimentations. Pour cela, aller dans le menu « *Acquisitions sollicitations* ».



Paramètres de la sollicitation 'personnalisée N°3' :

Remarque : Pour modifier la configuration, cliquer sur "*Configurer les acquisitions* »

Remarque : Pour lancer l'acquisition, appuyer sur la flèche noire ▶ de la ligne **sollicitation 'personnalisée N°3'**

⚠ Positionner correctement la baguette et le poignet afin que la baguette ne soit pas bloquée lors de son mouvement.

⚠ Attention aux personnes susceptibles de passer proche du Robot Jockey lors des mouvements de la baguette lors des mouvements de Raali.

🔧 En utilisant les paramètres détaillés ci-dessus, solliciter le bras par un mouvement de l'axe 'C Baguette' tout en observant l'axe 'B Poignet' (essai 'personnalisé' N°3).

🔧 Afficher l'évolution temporelle de l'orientation angulaire de l'axe B ainsi que la commande Um1 (en V).

Nouveaux paramètres de la sollicitation 'personnalisée N°3' :

Positionner correctement la baguette et le poignet afin que la baguette ne soit pas bloquée lors de son mouvement.

Attention aux personnes susceptibles de passer proche du Robot Jockey lors des mouvements de la baguette lors des mouvements de Raali.

En utilisant les paramètres détaillés ci-dessus, solliciter à nouveau le bras par un mouvement de l'axe 'C Baguette' tout en observant l'axe 'B Poignet' (essai 'personnalisé' N°3).

Afficher l'évolution temporelle de l'orientation angulaire du poignet.

Quelles différences observe -t-on par rapport à l'essai précédent ?

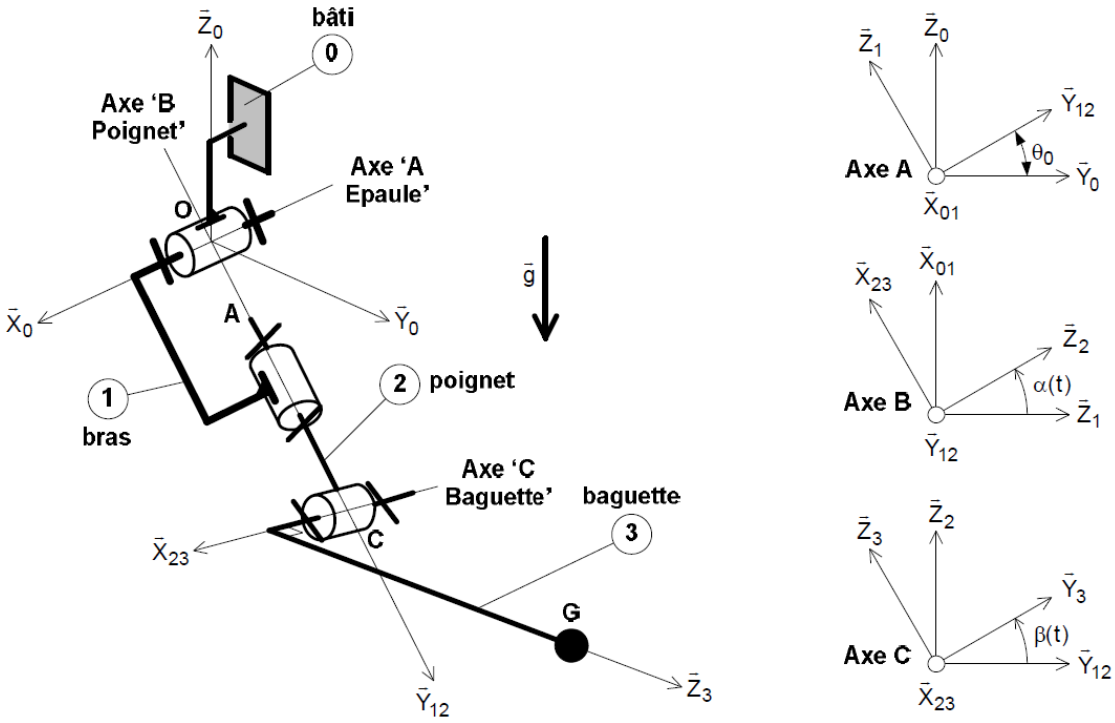
Commenter en quelques lignes le résultat temporel de ces deux essais en insistant notamment sur les points suivants :

- Quelle est l'allure de l'évolution temporelle de l'axe B ?
- Observe-t-on un régime stationnaire ? A quelle date débute-t-il ? Peut-on le caractériser ?
- Quelle est l'allure de l'évolution temporelle de la tension de commande Um1 ?

Conclure sur le phénomène de couplage dynamique.

4 – Mise en évidence analytique du phénomène de couplage dynamique

Le schéma cinématique spatial ci-dessous présente un modèle simplifié du bras robot Jockey. On y retrouve les 3 axes dénommés : épaule (A), poignet (B) et baguette (C).



On donne : $\overrightarrow{OC} = L.\vec{Y}_{12}$ $\overrightarrow{CG} = d.\vec{X}_{23} + H.\vec{Z}_3$

On se place dans la configuration suivante : $\theta_0 = cste \in [0°, -90°]$. Seuls les axes B et C sont motorisés.

Dans ces conditions, on note que le point C est fixe dans R_0.

Hypothèses :

- Toutes les liaisons sont supposées parfaites
- $R_0 = (O, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$ supposé galiléen
- Masse ponctuelle liée à (**3**) (notée m) en G
- Moment d'inertie du solide (**2**) suivant la direction $\vec{Y}_{12}$ noté I_2
- Champ de gravité $\vec{g} = -g.\vec{Z}_0$
- Action mécanique exercée par le stator (lié à **1**) du moteur M1 sur le rotor (lié à **2**)

$$\{T_{M1}\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ C_{m1}.\vec{Y}_{12} \end{matrix} \right\}_A$$

- Action mécanique exercée par le stator (lié à **2**) du moteur M2 sur le rotor (lié à **3**)

$$\{T_{M2}\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ C_{m2}.\vec{X}_{23} \end{matrix} \right\}_C$$

On cherche à mettre en évidence le phénomène de couplage des deux axes B et C lors de la mise en rotation de la baguette (mouvement de Raali).

En utilisant le Théorème du Moment Dynamique TMD au point C en projection sur $\vec{X}_{23}$ à la baguette (3) dans son mouvement par rapport à (1) fixe dans R_0, déterminer l'équation de mouvement de (3).

Remarque : L'expression finale du **TMD** au point C en projection sur $\vec{X}_{23}$ à la baguette (**3**) dans son mouvement par rapport à (**1**) fixe dans R_0, donne :

$$mH\sin\beta\,(d\ddot{\alpha} + H\dot{\alpha}^2\cos\beta) + mH^2\ddot{\beta} = mgH(\cos\beta\sin\theta_0 + \sin\beta\cos\alpha\cos\theta_0) + C_{m2} \qquad (\mathbf{1})$$

En utilisant le Théorème du Moment Dynamique TMD au point C en projection sur $\vec{Y}_{12}$ à l'ensemble $\boldsymbol{\Sigma} = (\mathbf{2} \cup \mathbf{3})$dans son mouvement par rapport à (1) fixe dans R_0, déterminer l'équation de mouvement de $\boldsymbol{\Sigma}$.

Remarque : L'expression finale du **TMD** au point C en projection sur $\vec{Y}_{12}$ à l'ensemble $\boldsymbol{\Sigma}$ dans son mouvement par rapport à (**1**) fixe dans R_0, donne :

$$[m(d^2 + H^2\cos^2\beta) + I_2]\ddot{\alpha} - 2mH^2\dot{\alpha}\dot{\beta}\sin\beta\cos\beta + mdH\ddot{\beta}\sin\beta + mdH\dot{\beta}^2\cos\beta$$
$$= mg\cos\theta_0\,(d\cos\alpha + H\cos\beta\sin\alpha) + C_{m1} \qquad (\mathbf{2})$$

Extraire des deux équations précédentes les termes de couplage. Commenter le résultat obtenu.

On place le bras en position verticale et en mouvement de Raali (fréquence de rotation $\dot{\beta}$ supposée constante). On choisit la position particulière $\alpha = 0$. Directement sur le bras, on estime les valeurs des trois constantes : $d = 2\ cm, H = 40\ cm, m = 200\ g$, pour $\omega = [100, 170]\ tr/min$ et $\beta = \omega * t$.

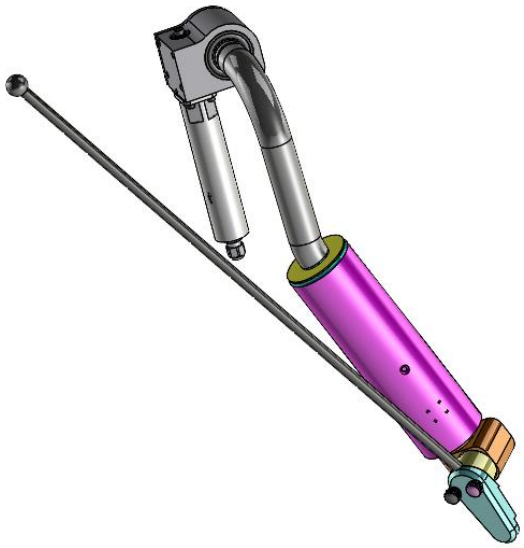
Pour la fréquence maximale de rotation de la baguette en mouvement de Raali, tracer sur Python l'évolution temporelle de $C_{m1}(t)$. Commenter la courbe obtenue.

Conclure sur l'effet de la vitesse de rotation sur le phénomène de couplage dynamique.

5 – Mise en évidence par simulation numérique du phénomène de couplage dynamique

Prise en main de la simulation

Ouvrir la maquette SolidWorks « JOCKEY_DYNAMIQUE » dans le dossier « JOCKEY CAO DYNAMIQUE » (penser à dé-zipper le dossier CAO avant de l'utiliser : « clic droit » sur le dossier zippé puis « Extraire le dossier »).



Lancer une simulation pour une étude dynamique.

Remarque : Il y a ici 2 mobilités cinématiques. Pour les études, il faut laisser libre la liaison pivot entre le poignet et le bras (choisir « *Libre* » dans la case « *Mouvement* » lors du calcul mécanique) et piloter la liaison pivot entre le poignet et le support de baguette avec une vitesse uniforme à fixer.

Remarque : On fixera une vitesse du poignet de 60 tr/min, une durée d'étude de 10 s.

Observer et décrire le comportement du système.

Tracer la courbe de l'angle poignet en fonction du temps. Commenter le résultat obtenu.

Enlever les efforts de pesanteur sur la baguette (voir « COMPLEMENTS SIMULATION SOLIDWORKS/MECA3D » à la fin du **DOSSIER RESSOURCES**).

Observer et décrire le comportement du système. Tracer la courbe de l'angle poignet en fonction du temps. En déduire l'intérêts de considérer les efforts de pesanteur dans la simulation.

Comparer les résultats obtenus de la simulation avec la courbe expérimentale réalisée avec le robot. Expliquer les différences en évaluant l'importance de modéliser un frottement sec au niveau des liaisons.

.

Conclure sur la pertinence du modèle numérique lorsque la chaîne fonctionnelle du poignet est libre.

Validation du modèle

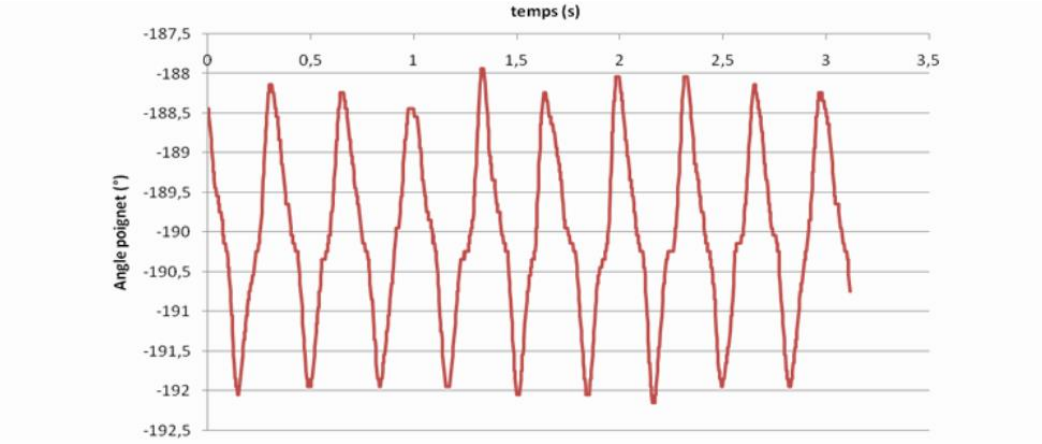
En mode RAALI, dans la configuration précédente, donner les valeurs maximums du déplacement de l'angle poignet et vérifier si cette performance est compatible avec le cahier des charges fonctionnel.

Proposer une solution technique simple pour améliorer les performances du système.

Lancer la simulation après avoir mise en place cette solution technique.

Reporter les résultats de l'angle poignet et tracer la courbe correspondante. Comparer les résultats à ceux obtenus précédemment.

Pour améliorer les performances du maintien en position de l'axe poignet en mode RAALI, on asservit en position l'axe poignet. La courbe réelle est présentée ci-dessous.



Résultat pris pour poignet asservi sur la position -190° et baguette en rotation, avec une vitesse de 3 tour/min.

La modélisation numérique réalisée précédemment avec SolidWorks parait-elle réaliste comparée à la courbe réelle ? Conclure.

6 – Etude expérimentale des facteurs influents sur le couplage dynamique

Les termes de couplage des deux axes B-C ont été identifiés par l'équipe **MODELISATEUR** lors de la modélisation du bras robot Jockey. Une expression du couple moteur C_{m1} a été établie et un tracé a été proposé.

Cette étude montre que les caractéristiques du bras qui influencent l'intensité du couplage sont principalement (ω, d, H, m). On cherche à confirmer expérimentalement cette assertion, et si besoin, à la compléter.

Pour plusieurs valeurs de la fréquence de rotation de la baguette (axe C en Raali), relever l'amplitude des oscillations de l'axe B, soit $\boldsymbol{\Delta\alpha}$ (en °).

Comment évolue cette variation en fonction de $\boldsymbol{\omega}$?

Remarque : Pour modifier la valeur de la fréquence de rotation de la baguette, il faudra se placer en BO et modifier les valeurs de consigne, dans la même configuration logicielle que la première partie expérimentale.

En observant le bras robot Jockey, quels sont les autres facteurs influents que l'on peut facilement modifier afin de montrer leurs influences sur le phénomène de couplage ? Mettre en place les mesures pour le montrer.

Montrer expérimentalement que l'orientation du bras robot Jockey (angle noté $\boldsymbol{\theta_0}$) a une influence sur le phénomène de couplage. Pour différentes valeurs de $\boldsymbol{\theta_0}$, relever l'amplitude des oscillations de l'axe B, soit $\boldsymbol{\Delta\alpha}$ (en °).

En se plaçant à la fréquence de rotation maximale de la baguette (en Raali), estimer la valeur maximale du courant moteur (en A).

Remarque : Il faudra ici, sur le logiciel, choisir d'acquérir les informations sur la baguette et non le poignet.

En déduire une estimation pour l'amplitude de C_{mot} (en Nm) à partir des caractéristiques du moteur à courant continu disponibles dans le **DOSSIER RESSOURCES**.

Pour une configuration donnée (par exemple bras robot vertical, baguette en composite), il est à présent possible de quantifier le phénomène de couplage des deux axes B-C lors du mouvement de Raali. Afin de contrecarrer cet effet et de conserver (dans une certaine tolérance) l'axe 'B Poignet' immobile, une commande asservie en position est mise en place.

Accéder au panneau de réglage du correcteur

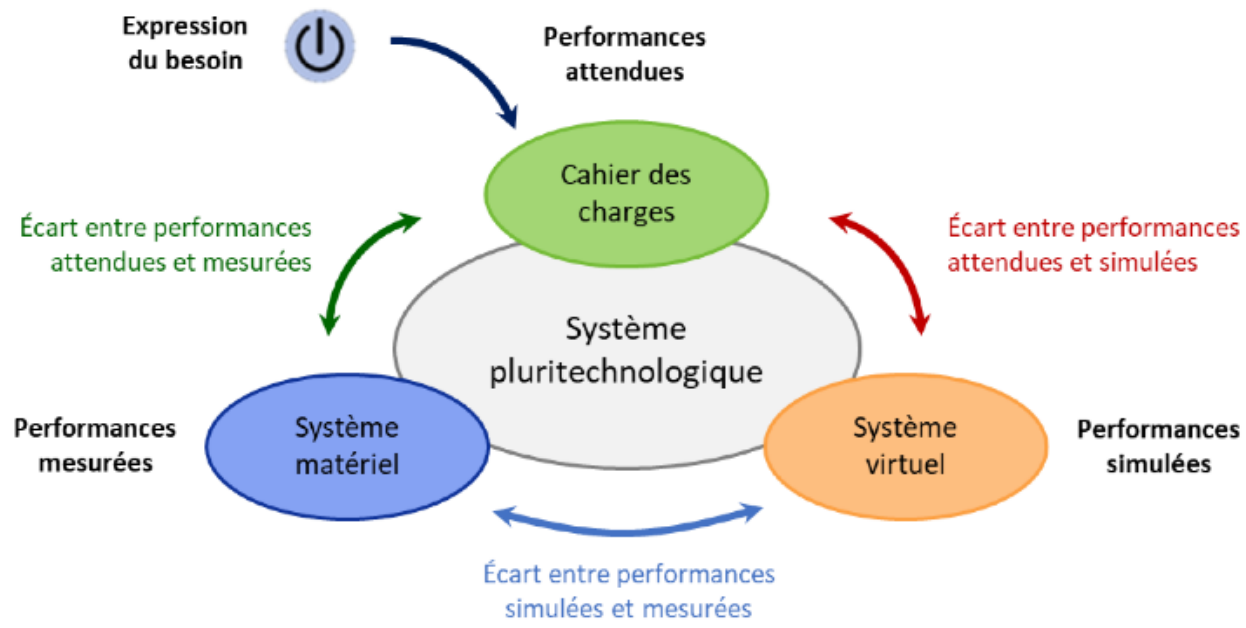
de l'axe 'B Poignet' du bras robot Jockey'.

On modifie les caractéristiques du correcteur afin de se placer uniquement dans le cadre d'une correction proportionnelle de gain réglable K.

En faisant varier la valeur du gain proportionnel K du correcteur, indiquer son influence sur l'amplitude des oscillations de l'axe B, soit $\Delta\alpha$ (en °). Conclure.

Régler expérimentalement le correcteur proportionnel afin de limiter à 2° l'amplitude des oscillations angulaires de l'axe B.

7 –Validation

Quel est le rôle du poignet sur le maintien en position du système ?

L'objectif pour le groupe est de comparer pour le phénomène de couplage dynamique, l'amplitude des oscillations de l'axe du poignet et le couple moteur, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.