Travaux Pratiques – DYNAMIQUE DU SOLIDE
MAXPID

Objectifs du TP

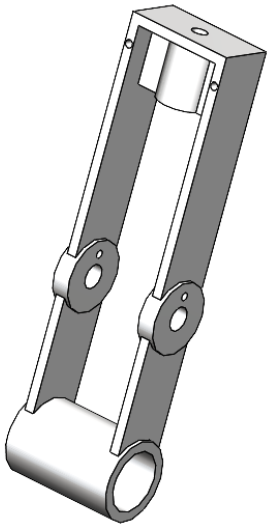
L'activité principale de ce TP consiste à mesurer, identifier et vérifier les caractéristiques dynamiques du bras du MAXPID afin de dimensionner correctement la motorisation du système.

1 – Modélisation du bras du MAXPID

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 bras du MAXPID.

Ouvrir la maquette SolidWorks « *Bras* » dans le dossier « *BRAS MAXPID 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 bras. 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 bras selon une décomposition en solides élémentaires :

- 2 parallélépipèdes rectangles
- 2 cylindres

En utilisant la modélisation simplifiée précédente, calculer le moment du bras du MAXPID autour de l'axe de rotation.

Évaluer grossièrement l'inertie I_{zz} du bras du MAXPID 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 bras, 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*** » 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.

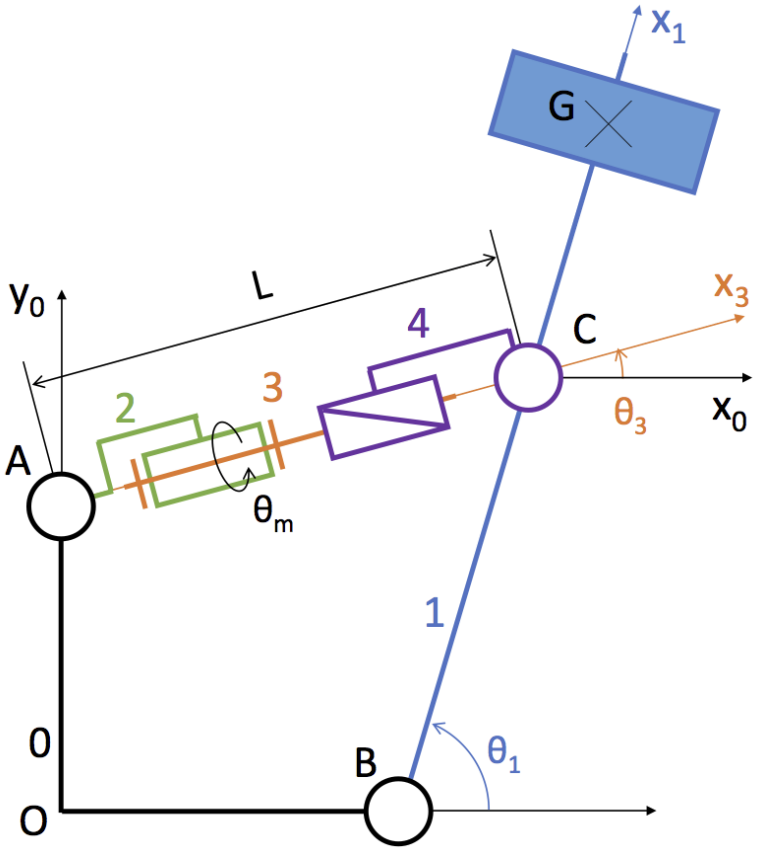
Quel(s) coefficient(s) de la matrice d'inertie interviendra(ont) pour dimensionner le moteur ?

Proposer et mettre en œuvre si possible une démarche permettant de déterminer expérimentalement le moment d'inertie du bras du MAXPID 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 bras du MAXPID, 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.

Quelle sera l'influence des masses additionnelles sur l'inertie globale du bras. Quantifier l'ajout de 1, 2 ou 3 masses additionnelles.

2 – Détermination analytique de la loi de mouvement du MAXPID



Le schéma fourni est associé à une modélisation mécanique en vue de déterminer l'équation du mouvement.

On rappelle que la grandeur asservie est la position de l'axe : $\theta_{1/0} = \theta_1$. La grandeur pilotée est la rotation de la vis par rapport au moteur : $\theta_{3/2} = \theta_m$.

Le rapport de réduction [vitesse de rotation de l'arbre moteur lié à la vis par rapport au stator moteur (3/2)] sur [vitesse de rotation du bras par rapport au bâti (1/0)] est régi par l'équation :

$$\frac{\dot{\theta}_m}{\dot{\theta}_1} = \frac{\omega_{32}}{\omega_{10}} = \frac{8,64.\sin(\theta_1) + 10,21.\cos(\theta_1)}{\sqrt{0,018 + 0,011.\cos(\theta_1) - 0,013.\sin(\theta_1)}}$$

$$X = \sqrt{0,018 + 0,011.\cos(\theta_1) - 0,013.\sin(\theta_1)}$$

Les applications numériques sont arrondies au millimètre.

La masse du bras passe de $m_1 = 1\ kg$ à $3\ kg$ en ajoutant les 3 masses additionnelles. $\left|\overrightarrow{BG}\right| = d_1$ passe de 60 mm à 175 mm et $[I(1)]_{B,z}$ de 11.10^{-3} kg.m^2 à 25.10^{-2} kg.m^2. L'inertie de l'ensemble 3 (rotor + vis) est évaluée à 9.10^{-6} kg.m^2. On négligera par la suite les poids des solides 2, 3 et 4, et inerties 2 et 4. L'inertie de l'ensemble 3 = vis + rotor ne sera prise en compte que sur leur axe de rotation. On considérera en permanence que le MAXPID est à l'horizontal. On donne également $\left|\overrightarrow{BC}\right| = 8\ cm$.

Détermination analytique de la loi de mouvement par une méthode DYNAMIQUE

En isolant seulement le solide 1, et en supposant qu'il est dans la position où $\overrightarrow{x_1} = \overrightarrow{y_0}$, déterminer l'effort $\overrightarrow{F_{4\to1}}$, en utilisant le TMD, en fonction de l'accélération (en G) de 1 par rapport à 0.

En exploitant la relation donnée entre ω_{32} et ω_{10}, exprimer l'effort $\overrightarrow{F_{4\to1}}$ en fonction de $\dot{\omega}_{32}$ (ainsi que d'autres paramètres constants).

Remarque : On considérera que l'action de 4 sur 1 est uniquement portée par $\overrightarrow{x_2} = \overrightarrow{x_0}$: $\overrightarrow{F_{4\to1}} = F_{41}.\overrightarrow{x_0}$.

En utilisant la relation force-couple de la liaison hélicoïdale, donner la relation entre le couple $C_{3\to4}$ et l'effort $F_{4\to1}$. En déduire la relation entre $C_{3\to4}$ et $\dot{\omega}_{32}$.

Après avoir isolé 2 et 3, proposer une équation dynamique issue du TMD afin d'obtenir la loi de mouvement (relation entre les vitesses, inerties, masses, dimensions, …).

Remarque : On considèrera un problème plan. On considèrera uniquement le couple $C_{3\to4}$. Le couple frottement fluide sera considéré nul $C_f = 0\ N.m$ et le couple de frottement sec sera également considéré nul $C_s = 0\ N.m$.

En déduire alors une écriture littérale de l'inertie équivalente J_{eq} ramenée à l'axe moteur. Donner la valeur numérique de J_{eq} pour 0, 1, 2 et 3 masses ajoutées (privilégier Python pour faire les calculs).

Détermination analytique de la loi de mouvement par une méthode ENERGETIQUE

Le mouvement imposé pour le bras du MAXPID est le suivant : loi de commande (pour $\dot{\theta}_1$) en trapèze de vitesse symétrique :

- Accélération : 10 rad/s²
- Vitesse maximale 1 rad/s
- Mouvement de 0 à 90°

Représenter l'allure de la courbe de la loi de vitesse et déterminer tous ses paramètres.

Ecrire le théorème de l'énergie cinétique appliqué à l'ensemble des solides en mouvement par rapport au bâti 0.

En déduire l'équation différentielle liant l'accélération angulaire du bras $\ddot{\theta}_1$, le couple moteur C_m et les caractéristiques utiles du mécanisme.

Donner, dans les 3 phases du mouvement (accélération constante, vitesse uniforme, décélération constante), l'expression littérale de $C_m = f(\theta_1)$.

Effectuer les applications numériques et représenter graphiquement l'allure de $C_m = f(\theta_1)$.

3 – Détermination expérimentale de l'inertie équivalente et des frottements

Les essais seront à en BO, BF, bras à plat ou vertical. Pour réaliser un essai en BO, il suffit de donner une consigne et de couper le retour capteur (bouton noir sur la façade du système).

Réglage initial :

- Correcteur proportionnel maxi (255)
- Accélération à 10 rad/s² (liaison 1/0)
- Vitesse de rotation de 1 rad/s (liaison 1/0)

Justifier d'après l'allure des courbes obtenues pour un essai en BO que l'on considère que le moteur est commandé en tension et non en courant.

On considérera que le MAXPID est toujours en position horizontale. On donne l'équation suivante issue du théorème du moment dynamique (équation caractéristique du moteur à courant continu) :

$$J_{eq}.\frac{d\omega_{32}(t)}{dt} = C_m(t) - f.\omega_{32} - C_s$$

Avec J_{eq} l'inertie équivalente ramenée à l'axe moteur.

Déterminer un protocole permettant d'obtenir la valeur de f et de C_s.

Remarque : Pour obtenir ces valeurs, il est nécessaire de se placer dans une configuration où J_{eq} n'intervient pas. Il est également nécessaire de faire plusieurs essais.

Aide : Il peut être pertinent de s'intéresser à la courbe du courant en fonction de ω_{32}

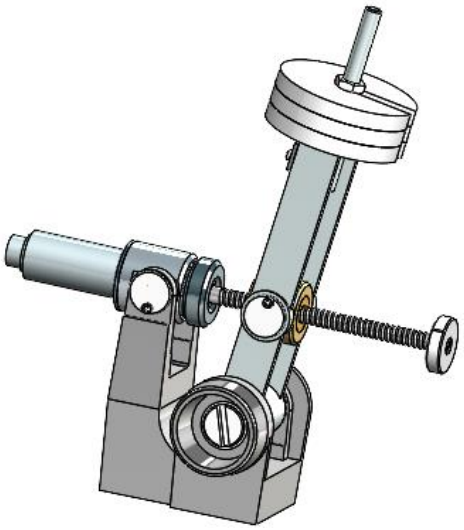
Détailler les manipulations permettant de déterminer l'inertie équivalente J_{eq} ramenée à l'axe moteur.

Déterminer la valeur numérique de J_{eq} pour 0 masse ajoutée puis 1, 2 et 3 masses ajoutées.

Remarque : Les essais seront réalisés pour une même position du bras du MAXPID.

4 – Détermination par simulation numérique des couples transmis et de la loi de mouvement

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



Proposer une simulation permettant de déterminer le couple statique pour maintenir le bras à l'horizontal, à 45° et à la verticale.

Vérifier la cohérence des résultats en comparant ceux obtenus avec le modèle de bras chargé et avec le bras « nu ».

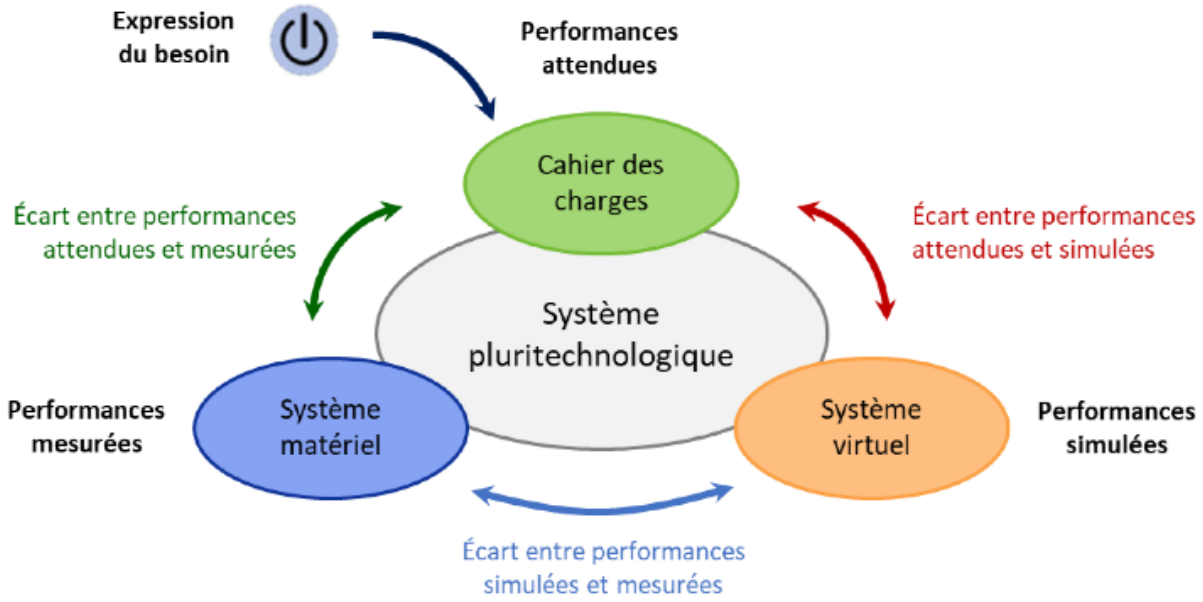
Le mouvement imposé pour le bras du MAXPID est le suivant : loi de commande (pour $\dot{\theta}_1$) en trapèze de vitesse symétrique :

- Accélération : 10 rad/s²
- Vitesse maximale 1 rad/s
- Mouvement de 0 à 90°

Déterminer les paramètres temporels du trapèze et utiliser cette courbe comme entrée dans le pivot 1/0 (voir « COMPLEMENTS SIMULATION SOLIDWORKS/MECA3D » à la fin du **DOSSIER RESSOURCES**).

Réaliser une simulation et déterminer l'évolution du couple moteur sur le mouvement imposé.

5 – Validation

L'objectif pour le groupe est de comparer pour l'inertie équivalente, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

L'objectif pour le groupe est de comparer pour la loi de mouvement et pour le couple du 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.