

TP CYCLE 4

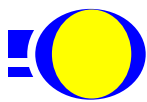
MODELE MÉCANIQUE

DE L'ATTELLE CPM 130

PRESENTATION DU SYSTEME

Le système étudié est une attelle de mobilisation du genou, présente dans les cabinets de kinésithérapie et centres de ré-éducation fonctionnelle. Le professionnel de santé l'emploie sur les patients ayant subi des lésions au niveau du genou, avec pour but de faire retrouver au patient, séance après séance, une mobilité satisfaisante de son articulation traumatisée.





COMPETENCES VISEES

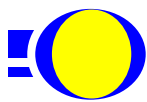
- ❖ Isoler un système et justifier l'isolement
- ❖ Interpréter et vérifier la cohérence des résultats obtenus expérimentalement, analytiquement ou numériquement. $\hookrightarrow I$
- ❖ Rechercher et proposer des causes aux écarts constatés.
- ❖ Identifier les paramètres d'un modèle
- ❖ Identifier et justifier les hypothèses nécessaires à la modélisation
- ❖ Modéliser une action mécanique
- ❖ Vérifier la cohérence du modèle choisi en confrontant les résultats analytiques et/ou numériques aux résultats expérimentaux
- ❖ Déterminer la réponse temporelle $\hookrightarrow I$
- ❖ Déterminer les actions mécaniques en dynamique dans le cas où le mouvement est imposé
- ❖ Déterminer la loi de mouvement dans le cas où les efforts extérieurs sont connus
- ❖ Mener une simulation numérique $\hookrightarrow I$
- ❖ Mettre en œuvre un système en suivant un protocole

MATERIEL MIS EN ŒUVRE

- ❖ L'attelle CPM130 instrumentée
- ❖ Un PC muni :
 - de l'IHM et de l'Environnement Multimédia Pédagogique (EMP)
 - d'un modèle CAO de l'attelle CPM-130 (sous SOLIDWORKS)
 - d'un modèle mécanique de l'attelle CPM-130 (sous MECA3D)

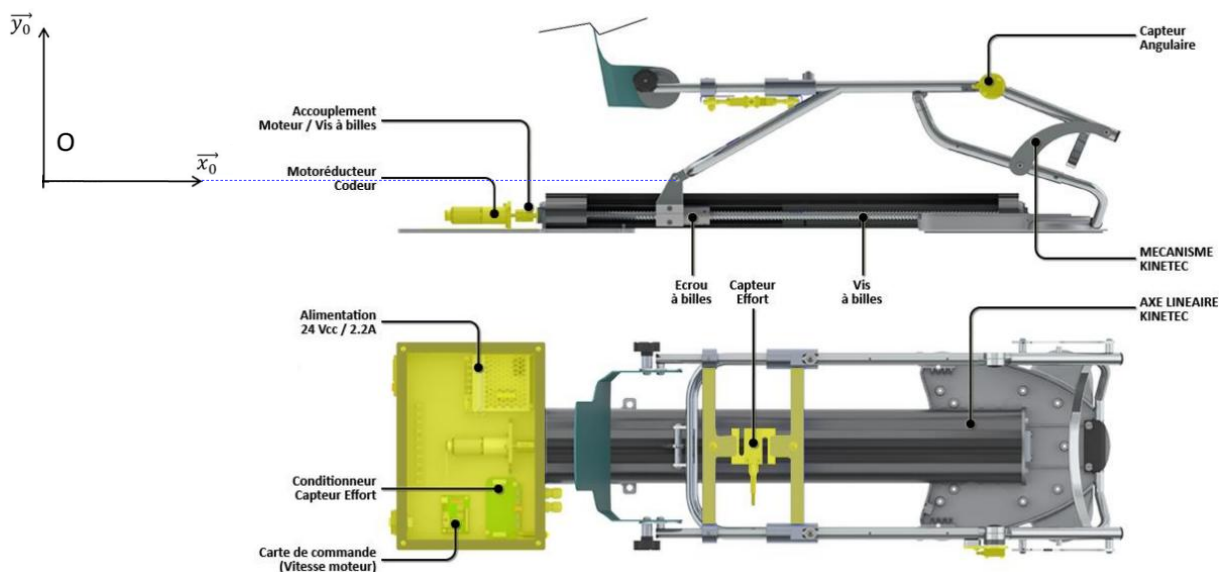
OBJECTIFS DU TP

L'objectif du TP est d'établir un modèle mécanique de l'attelle CPM-130, afin de déterminer l'expression temporelle d'un couple moteur qui permettrait d'obtenir une accélération angulaire constante pour l'articulation du genou, sans avoir recours à une boucle d'asservissement de position ou vitesse.



I. EQUATION DE MOUVEMENT DE L'AXE LINEAIRE

Ci-dessous figure un descriptif des constituants de l'attelle CPM-130.



L'objectif de cette partie est de déterminer l'équation de mouvement qui relie le couple moteur à la vitesse de déplacement de l'écrou à billes, et de la valider expérimentalement.

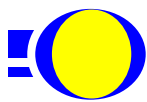
On utilisera les notations suivantes :

- Vitesse de rotation en sortie moteur : ω_M
- Couple en sortie du moteur : C_M
- Vitesse de rotation en sortie réducteur : ω_R
- Couple en sortie du moteur : C_R
- Pas de la vis : pas
- Rapport de réduction du réducteur : r
- Moment d'inertie du rotor : J_M
- Moment d'inertie du réducteur en son entrée : J_R
- Moment d'inertie de la vis : J_V

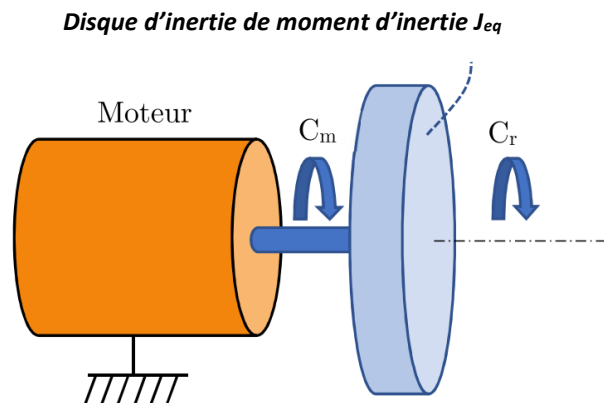
I.1 ANALYSE ENERGÉTIQUE DE L'ATTELLE

Activité 1 Déterminer littéralement, en employant toute simplification que vous jugerez pertinente, l'énergie cinétique de l'ensemble rotor + réducteur + vis à billes. Justifier qu'on ne s'intéresse pas aux pièces du mécanisme en aval de la vis à billes pour ce calcul.

Activité 2 En déduire l'expression de l'inertie équivalente J_{eq} vue depuis le moteur. Déterminer sa valeur numérique (en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$).



On considère que l'ensemble des phénomènes de frottement génère un couple « vu du moteur » que l'on note C_r . Cette hypothèse nous permet de nous ramener au problème mécanique équivalent suivant :



Activité 3 Par application du théorème de l'énergie cinétique, déterminer l'équation de mouvement reliant ω_M , C_m , et C_r .

1.2 MODÈLE DE FROTTEMENT

✓ Test de lâché

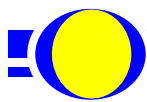
On s'intéresse dans le cadre de ces activités expérimentales de découverte au choix d'un modèle de frottement. On se propose d'effectuer l'expérience suivante, intitulée ici « test de lâché ».

Le protocole est le suivant :

- En mode LABO, placer chariot à 350 mm
- Consigne courant à 0 mA
- choix des mesures : exclusivement Vitesse Axe
- période d'échantillonnage 20ms (pour une durée de mesure d'environ 5s) :

ENVOYER SOLlicitATION (Axe linéaire)		Choix des Mesures		Echantillonnage	
Consigne de COURANT		Actif	Variable	Octets	Période : 20.0 ms
Consigne : 0 mA		1 : ☒	Vitesse Axe	4	Durée : 5120.0 ms
		2 : ☐	Courant Moteur	2	Délai : 10 % durée
		3 : ☐	Vitesse Axe	4	
		4 : ☐	Position Axe	4	
☒ ACQUISITION (Carte de commande)		ENVOYER			Voir derniers Tracés

On « lance » le chariot à la main, puis on le lâche (l'acquisition doit inclure le mouvement total jusqu'à l'arrêt).

**Activité 4** Au vu de l'expérience mise en œuvre, se prononcer sur un modèle de frottement adéquat (pas de quantification attendue pour cette question).

Maintenant qu'un modèle de frottement a été choisi, on souhaite quantifier les paramètres caractéristiques de celui-ci, à savoir son couple résistant sec, noté C_{rsec} (N.m), et son coefficient de frottement visqueux, noté f (N.m.s)

- Connecter l'interface PC (la LED devient verte en mode « connexion ») au CPM-130



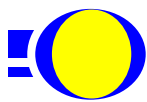
- Cliquer sur l'interrupteur « Activation » pour activer la carte de commande
- Passer en mode LABO
- Amener le chariot à son abscisse initiale $P_{a0}=230$ mm grâce à la commande ci-contre

Paramétrer le mouvement commandé en cliquant sur « envoyer sollicitation axe » (cocher *acquisition*) avec les paramètres suivants :



- Consigne de vitesse du chariot= 5 mm/s
- Choix des mesures : Courant et Vitesse Axe
- Période d'échantillonnage 100ms (pour une durée de mesure d'environ 4s)
- Correcteur vitesse : $K_p=90$; $K_i=0$

Activité 5 Faire 4 mesures, pour lesquelles la consigne en vitesse du chariot sera successivement de 5, 10, 15, et 20 mm/s, lors desquelles vous relèverez les valeurs de ω_{moteur} (rad.s⁻¹), et l'intensité I (A) en régime permanent. Justifier que la mesure de l'intensité nous fournit en régime permanent une image du couple résistant C_r (Nm) dû aux frottements.**Activité 6** Tracer avec un outil numérique (Excel, Python,...) vos relevés de points $|C_r| = f(I)$. En déduire les valeurs du couple résistant sec C_{rsec} (N.m), et le coefficient de frottement visqueux f (N.m.s). (aide : sous Python, vous pourrez avantageusement utiliser la méthode *polyfit* de la bibliothèque *Numpy*, ou la méthode *linregress* de la bibliothèque *stats* afin de mettre en œuvre une régression linéaire).



1.3 CONFRONTATION DU MODÈLE À L'EXPÉRIENCE

Il s'agit maintenant de comparer les réponses respectives du système réel et du modèle à un échelon de courant. A cette fin, il est possible, en mode LABO, d'imposer un échelon de courant. On admet que, dans le cadre de la qualification du modèle mécanique, l'asservissement en courant est idéal.

Activité 7 Déterminer l'amplitude de la consigne de courant qui correspond à une amplitude de couple de 5 mN.m.

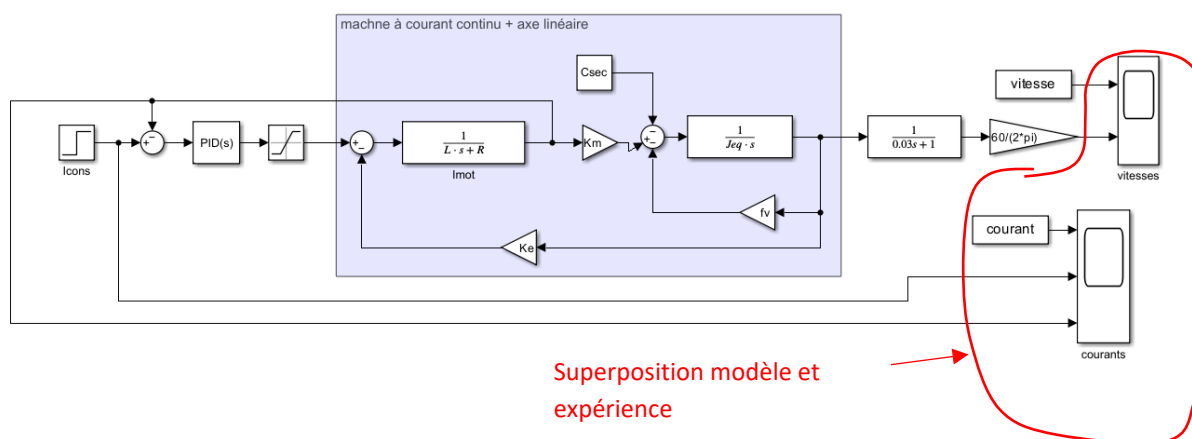
Activité 8 Mettre en œuvre le protocole expérimental dans lequel l'attelle CPM-130 est soumise à un échelon de courant d'amplitude correspondante à une amplitude de couple de 5 mNm. (pour la mise en œuvre de ce protocole vous pourrez vous référer au manuel de l'IHM p.67). Vous procéderez à l'acquisition avec les paramètres suivants :

- Grandeurs acquises : consigne courant, courant réel, vitesse axe
- Période : 15 ms (donc durée d'acquisition environ 2s)

Exporter les données issues de votre acquisition au format .csv

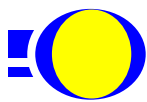
Vous disposez d'un modèle Matlab (voir figure ci-dessous) de la commande de la MCC, intitulé *modele_vs_exp.csv.xls*, qui permet d'importer votre fichier expérimental (.csv) afin de **superposer directement sous Matlab la réponse simulée et la réponse réelle**. Le fichier est configuré pour ouvrir le fichier .csv donné en exemple : *cons_200mA.csv*.

Il faut bien penser à lancer le fichier *donnees_exp.m* pour charger les vitesses et courants expérimentaux !



Activité 9 Confronter la réponse expérimentale avec celle prédite par le modèle, et se prononcer sur la validité de ce dernier.

Activité 10 Alimenter le modèle Matlab avec les grandeurs que vous avez déterminées au cours du TP, modifier votre fichier csv afin qu'il ait la même forme que le fichier *cons_200mA.csv* (ou, si vous manquez de temps, employer directement *cons_200mA.csv*), puis exécuter la simulation. Commenter les courbes obtenues et conclure sur la validité de votre modèle.



II. NOUVELLE PROBLÉMATIQUE ACAUSALE

II.1 LIMITES DU MODÈLE

Pour rappel, le modèle obtenu en première partie correspondait à l'équation différentielle suivante :

$$J_{eq} \dot{\omega}_M(t) = C_M(t) + C_{rsec} + f \omega_M(t)$$

Dans cette équation différentielle, modélisant un phénomène mécanique, une variable (dite « d'état ») correspond à la cause du phénomène, et une autre à la conséquence.

Activité 11 Quelle est la variable correspondant à la cause du problème, quelle est celle correspondant à la conséquence ?

Activité 12 Dans cette partie, on souhaite établir la faisabilité de l'implantation d'une nouvelle commande de l'attelle CPM-130, plus simple, qui ne ferait pas intervenir d'asservissement en position ou vitesse pour la phase de montée en vitesse de l'attelle (début ou fin de trapèze de vitesse).

Problématique : le problème d'ingénierie correspondant revient à déterminer l'expression temporelle d'un couple moteur C_M qui permettrait d'obtenir une accélération angulaire constante pour l'articulation du genou.

On peut observer que dans cette situation, l'étude revient à se fixer une conséquence, et à déterminer la cause qui la provoque... Le problème est donc acausal, et les méthodes de résolution « classiques » ne permettent pas de le résoudre. Ainsi on a recours à un outil numérique qui permet la résolution de problèmes dont la présentation est acausale.

II.2 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DU PROBLÈME ACAUSAL

L'application Meca3D, complément à Solidworks, effectue très bien ce travail pour une étude mécanique.

- Démarrer l'application Solidworks
- Ouvrir le fichier d'assemblage CPM-130.SLDASM
- Vérifier que le complément Méca3D est bien activé :



Vous disposez d'un mécanisme déjà existant et paramétré sous Méca3D, vous devrez néanmoins corriger le pas de la liaison hélicoïdale, pour le régler à 6mm.

Remarque : les frottements précédemment évalués ont été pris en compte dans le modèle MECA3D. Dans la mesure où ils sont déclarés en sortie du réducteur, ils sont amplifiés d'un facteur 16.

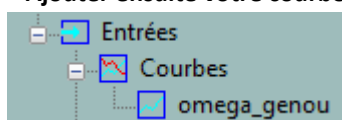
- Le coefficient de frottement fluide est déclaré au sein de la liaison pivot entre la vis et le bâti
- Le couple résistant sec est déclaré comme un couple connu constant s'exerçant sur la vis

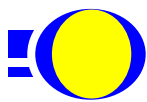
Activité 13 Déclarer le couple s'exerçant sur la vis comme couple moteur inconnu.

Activité 14 Créer sous MECA3D (outils/meca3D/courbes/définition) une loi de mouvement

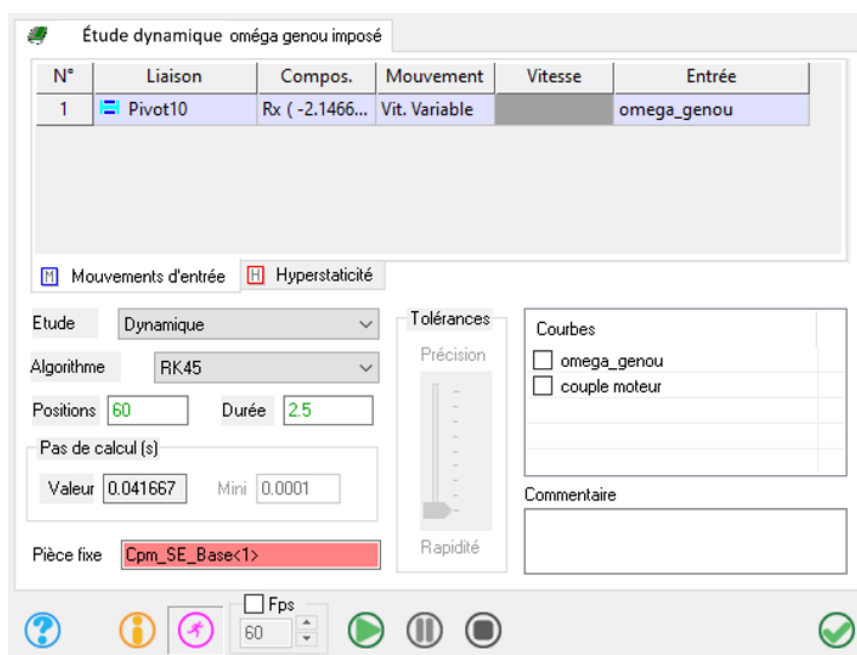
$\omega_{genou} = f(t)$ telle l'articulation du genou subisse une accélération angulaire de 0.03 rad.s⁻² pendant 2.5 secondes.

Ajouter ensuite votre courbe parmi les « entrées » de MECA3D :





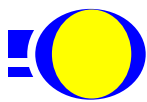
Activité 15 Paramétrer une Analyse « dynamique », dans laquelle vous imposerez une « vitesse variable » à l'articulation du genou, en imposant votre loi de vitesse.



Activité 16 Lancer une étude dynamique, et éditer la courbe correspondant au couple moteur en fonction du temps. Conclure.

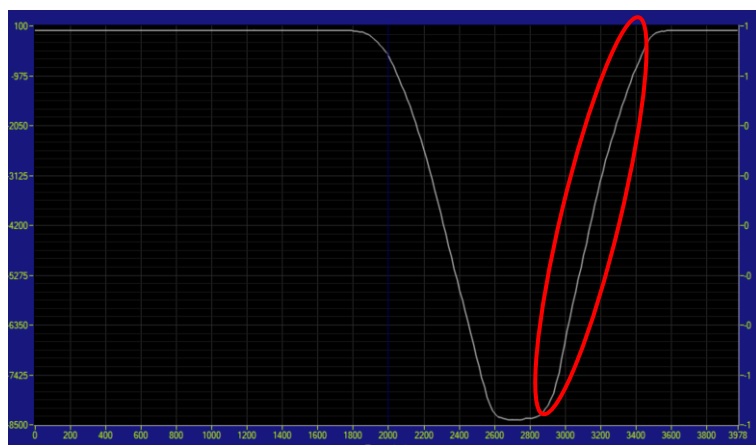
II.3 SYNTHÈSE

Activité 17 Synthétiser la démarche d'ingénierie proposée durant ce TP, et discuter qualitativement de la validité des modèles et résultats obtenus.



Correction partielle :

$J_{eq}=2,06 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (on considère que la vis est un cylindre en acier de longueur 0.722m, de diamètre moyen 15 mm, en acier (masse volumique $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)). J_m et J_r sont dans la doc technique.

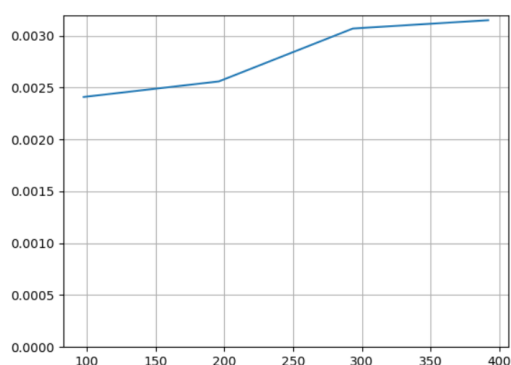


Le modèle de frottement est tel que $C_r = -C_{rsec} - f\omega_M$ (C_{rsec} correspondant au modèle de Coulomb)

En régime permanent, on a $C_m = -C_r$. Or, $C_m = kt \cdot I$, par conséquent, en R.P., $C_r = -kt \cdot I$

$V_{cons} \text{ (mm/s)}$	$N_{m_RP} \text{ (tr/min)}$	$\Omega_{m_RP} \text{ (rad.s}^{-1}\text{)}$	$I \text{ en RP (A)}$	$C_r \text{ en RP (Nm)}$
5	933	97.70	0.094	0.00241
10	1872	196.0	0.100	0.00256
15	2803	293.5	0.120	0.00307
20	3742	391.9	0.123	0.00315

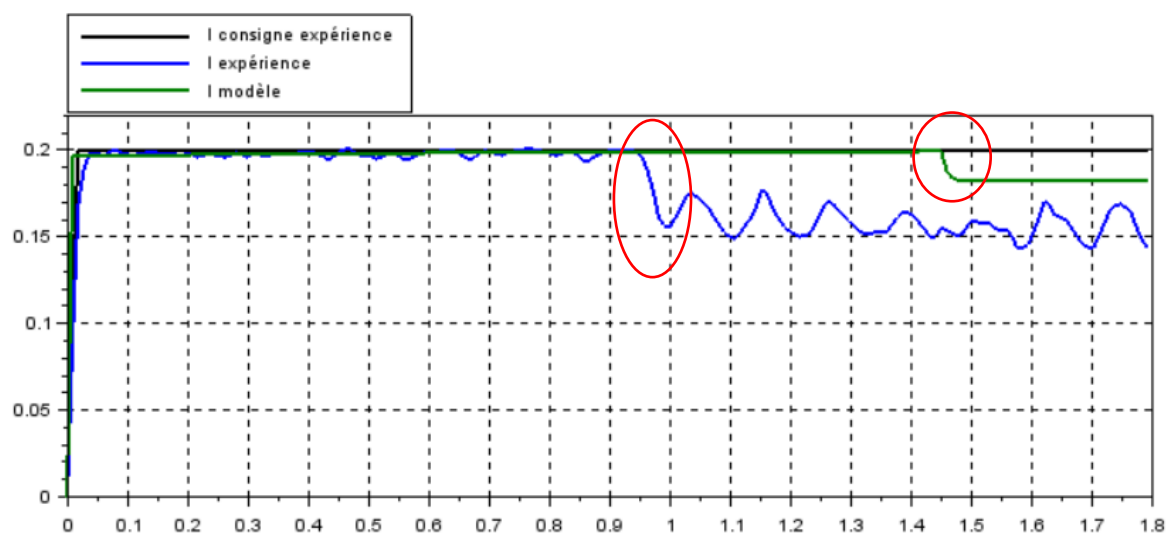
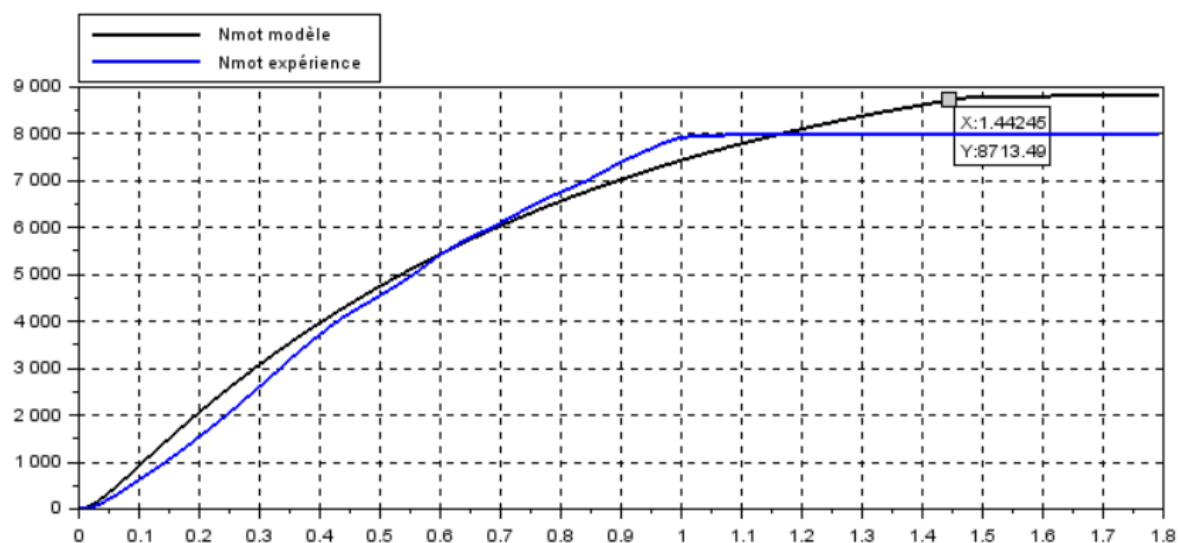
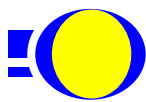
Tracé du couple résistant en RP en fonction de la vitesse de rotation du moteur



En approchant le nuage de points obtenu avec une fonction affine, dans la mesure où $|C_R| = C_{rsec} + f\omega_M$, l'ordonnée à l'origine est le couple résistant sec C_{rsec} , et le coefficient directeur est f .

On trouve $C_{rsec}=0.0021 \text{ Nm}$

$f=2,78 \cdot 10^{-6} \text{ Nms}$

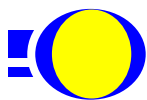


Modèle Scilab echelon_courant.zcos

Les courbes issues de l'expérience et du modèle sont comparables.

La différence la plus notable entre modèle et expérience provient de la chute de courant, qui a lieu à des régimes différents.

- La chute d'intensité de l'expérience est due à la limitation de la vitesse du moteur à 8000 tr/min. Cette « saturation » n'a pas été prise en compte dans le modèle
- La chute d'intensité du modèle à 8700 tour/min traduit un phénomène physique intrinsèque à la MCC (cf graph ci-dessous).



Analyse de l'écart

