



TP 2.3

VÉRIFICATION DE DIMENSIONNEMENT DE MOTORISATION DE L'ATTELLE CPM 130

PRÉSENTATION DU SYSTÈME

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**

- ❖ Caractériser un constituant de la chaîne de puissance
- ❖ Interpréter et vérifier la cohérence des résultats obtenus expérimentalement, analytiquement ou numériquement. $\Leftarrow I$
- ❖ Rechercher et proposer des causes aux écarts constatés
- ❖ Identifier et justifier les hypothèses nécessaires à la modélisation
- ❖ Choisir un modèle adapté aux performances à prévoir ou à évaluer
- ❖ Vérifier la cohérence du modèle choisi en confrontant les résultats analytiques et/ou numériques aux résultats expérimentaux
- ❖ Mettre en œuvre un système en suivant un protocole
- ❖ Choisir le protocole en fonction de l'objectif visé
- ❖ Régler les paramètres de fonctionnement d'un système
- ❖ Extraire les informations utiles d'un dossier technique
- ❖ Présenter de manière argumentée une synthèse des résultats

MATERIEL MIS EN ŒUVRE

- ❖ L'attelle CPM130 instrumentée
- ❖ Un PC muni de l'IHM et de l'Environnement Multimédia Pédagogique (EMP)

OBJECTIFS DU TP

L'objectif du TP est de vérifier le dimensionnement de la machine à courant continu faisant office d'actionneur de l'attelle de mobilisation du genou, désignée CPM-130.

Le dimensionnement peut se faire selon différents critères. On choisit dans ce TP d'effectuer une vérification de dimensionnement :

- sur la capacité à effectuer un mouvement quasi-statique sous charge donnée
- sur la capacité à générer une accélération donnée
- sur la capacité à dissiper l'énergie calorifique sur un cas de charge cyclique



I. DIMENSIONNEMENT EN QUASI-STATIQUE

On se place pour toute cette partie dans la situation d'une mobilisation passive de la jambe de patient, par l'attelle de rééducation CPM-130. Les mouvements en mobilisation passive sont relativement lents, pour des raisons thérapeutiques, si bien qu'on pourra négliger les effets dynamiques.

Objectif : déterminer l'effort maximum que le patient peut exercer sur le support du pied.

Activité 1 Activité expérimentale

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

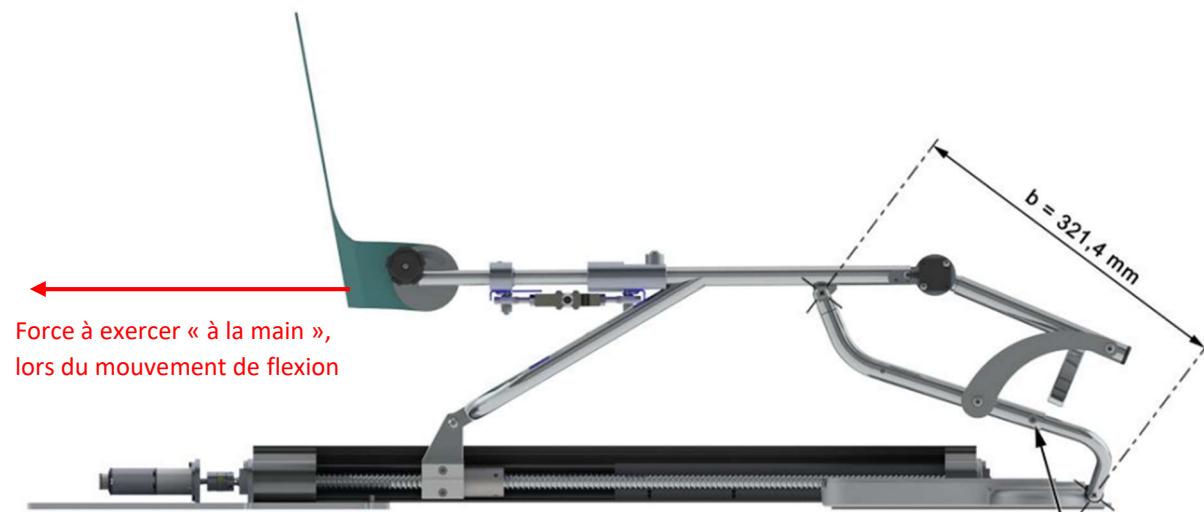


- Cliquez sur l'interrupteur « Activation » pour activer la carte de commande
- Passer en mode KINETEC, mobilisation PASSIVE, conformément à l'image ci-dessous



- Préparer un mouvement du genou de 10° (extension) à 60°(flexion), à une vitesse maximale de 4°/s

On souhaite établir une relation entre l'intensité du courant parcourant le moteur, et l'effort correspondant de l'attelle sur le pied du patient. C'est vous, qui au cours des trois essais successifs, allez générer avec votre main un effort sur l'attelle, à l'image de celui que le patient exercerait avec son pied (cf image ci-dessous).



On réalise trois essais successifs lors desquels, **lors de la flexion seulement**, on exerce un effort suivant sur le support de pied tel que :

- Essai 1 : on laisse le mouvement libre sans le freiner
- Essai 2 : On retient l'attelle par le pied modérément
- Essai 3 : On retient l'attelle par le pied fermement



On veillera à chaque fois à éviter de provoquer des accélérations brusques, et on s'intéressera sur les relevés successifs au régime permanent

Pour chacune des mesures, vous pouvez passer en visualisation dynamique, puis enregistrer votre acquisition.



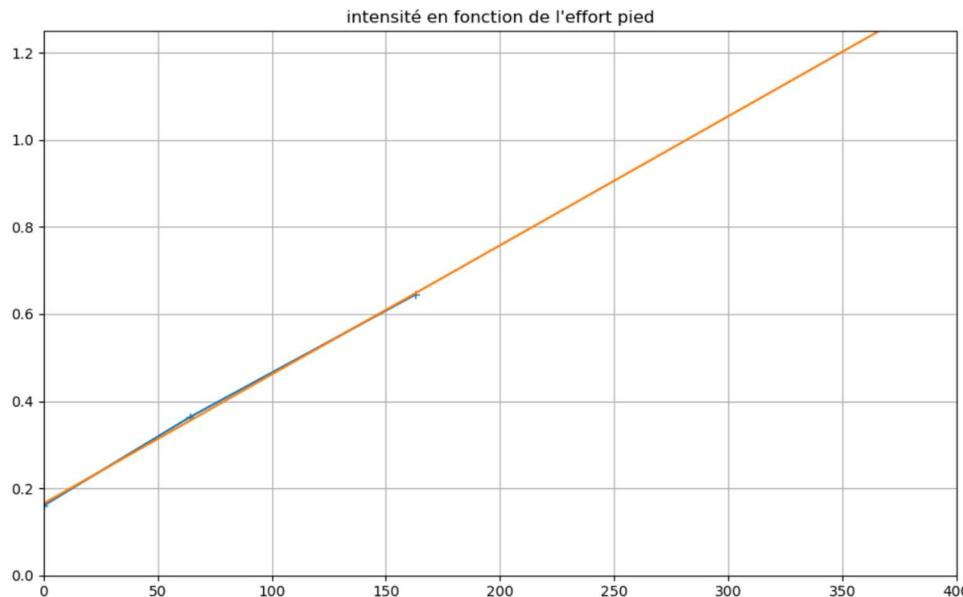
Relever à chaque fois l'intensité en régime permanent, et la noter dans un tableau tel que celui ci-dessous, en complétant avec les couples moteurs correspondants.

	Courant (A)	Couple moteur mNm	Force mesurée (N)
Effort nul	0,160	4,10	0
Effort moyen	0,363	9,29	64
Effort élevé	0,645	16,5	163

Activité 2 Exploitation des résultats

- A l'aide d'un outil numérique (Python, Excel, ...), tracer les points correspondant aux trois mesures dans un plan (force, courant). Justifier la forme obtenue.

Les 3 mesures sont ci-dessous en bleu. En orange figure la représentation graphique de la régression linéaire correspondante.



On constate que l'effort croît de façon affine en fonction de l'intensité.

C'était prévisible car une partie du couple moteur permet de compenser les frottements secs, l'autre partie semble croître linéairement avec l'effort exercé sur le pied.



Par mesure de sécurité, la commande inclut une boucle de courant, dont la fonction est de protéger l'électronique et la motorisation de courants excessivement élevé. Celle-ci est réglée pour le courant ne puisse dépasser 1.2 A

Activité 3 Extrapolation des mesures, dimensionnement de la MCC

Par extrapolation des mesures précédentes, déterminer la force maximale que l'attelle peut exercer sur le pied du patient.

Une intensité de 1.2A permet de générer un effort sur le pied du patient de 350 N.

Activité 4 Conclure**II. DIMENSIONNEMENT EN DYNAMIQUE**

On souhaite ici évaluer l'accélération angulaire maximale du genou, à vide, lorsque la jambe est entraînée par l'attelle, en mobilisation passive.

DETERMINATION PAR MODELISATION

Une étude dynamique, qui n'est pas à mener dans ce TP, mène à démontrer que le mouvement de l'attelle est modélisable par l'équation suivante :

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

Données numériques :

$J_{eq}=2,06.10^{-6}$ kg m² (moment d'inertie équivalent à l'ensemble des pièces mobiles ramené sur l'axe moteur)

$C_{rsec}=-0,0021$ Nm (couple produit par l'ensemble des frottements secs entre pièces, ramené à l'axe du moteur)

$f=2,78.10^{-6}$ Nms (coefficients de frottement fluide correspondant à l'ensemble des frottements fluides entre pièces, ramené à l'axe du moteur)

On suppose que l'on commande l'attelle avec un échelon de tension. A l'échelle de temps considérée, l'inductance peut être négligée.

Activité 5 Au vu de l'équation de mouvement, déterminer et justifier à quel moment a lieu l'accélération maximum. Déterminer sa valeur.

Si on considère l'instant initial, le couple moteur est à son maximum, et la vitesse de rotation du moteur à son minimum ($\omega_M = 0$). Donc l'accélération angulaire $\dot{\omega}_M$ est à son maximum.

Au démarrage, et au vu de la limitation de courant à 1.2 A, le moteur peut produire un couple maximum de $1,2*25,6=31$ mNm.

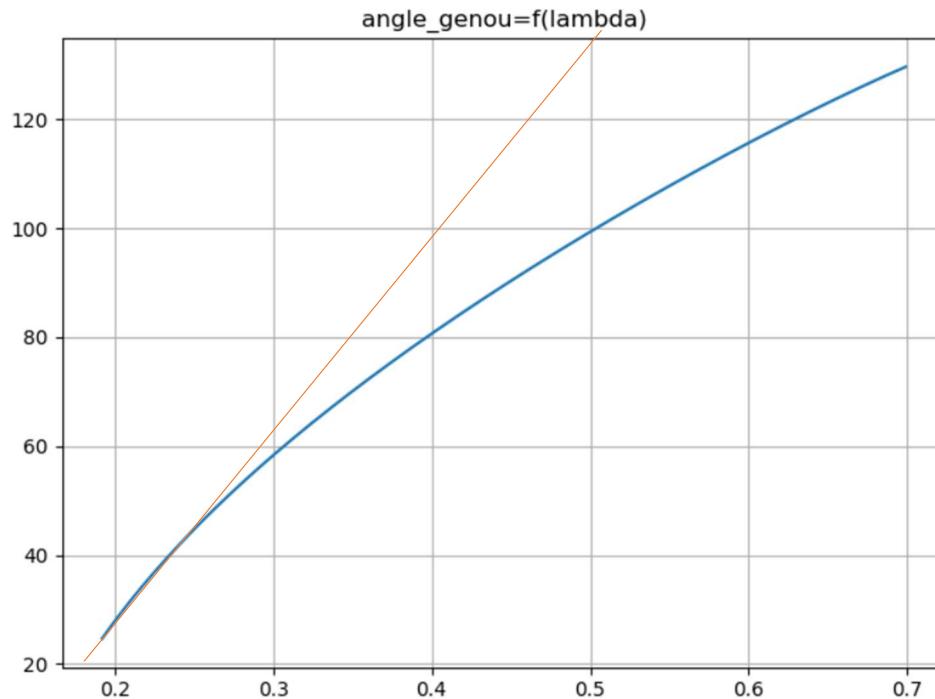
On a alors :

$$\dot{\omega}_M = \frac{C_M + C_{rsec}}{J_{eq}}$$

$$\text{Soit : } \dot{\omega}_M = \frac{31.10^{-3} - 2,1.10^{-3}}{2,06.10^{-6}} \approx 14000 \text{ rad.s}^{-2}$$



- Le rapport de réduction du réducteur est $r=1/16$
- Le pas de la vis à bille est tel que $pass=6\text{mm}$
- On donne ci-dessous une représentation graphique de la loi entrée-sortie de l'attelle.



Activité 6 Au vu de la loi entrée-sortie ci-dessus, quelle est la position du chariot qui, à accélération angulaire donnée de l'arbre moteur, correspond l'accélération angulaire la plus forte au démarrage pour l'articulation du genou ?

$$\begin{aligned}\theta_G &= f(P_a) \\ \frac{d\theta_G}{dt} &= \frac{dP_a}{dt} \frac{df(P_a)}{dP_a} \\ \frac{d^2\theta_G}{dt^2} &= \frac{d^2P_a}{dt^2} \frac{df(P_a)}{dP_a} + \frac{dP_a}{dt} \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{df(P_a)}{dP_a} \right) \right)\end{aligned}$$

Proportionnel à $\dot{\omega}_M$

Pente loi ES

=0 au démarrage

On déduit de ce développement que l'accélération angulaire du genou maximale au démarrage, à accélération moteur donnée, a lieu pour les valeurs de P_a les plus faibles (car la pente de la loi ES y est maximale). $P_a=200\text{ mm}$



Activité 7 Déterminer, en vous appuyant sur ces développements, l'accélération angulaire du genou dans le cas d'un démarrage dans la position critique mise en évidence.

On se limite à la plage d'utilisation donnée sur la représentation graphique de la loi entrée-sortie. Le point de fonctionnement critique (tangente de plus grande pente) correspond à $P_a=200\text{mm}$

$$\begin{aligned}\frac{d^2\theta_G}{dt^2} &= \frac{d^2P_a}{dt^2} \frac{df(P_a)}{dP_a} \\ &= \dot{\omega}_M * r * \frac{pas}{2\pi} * \frac{df(P_a)}{dP_a}\end{aligned}$$

Avec $\frac{df(P_a)}{dP_a} = \frac{100}{0.4-0.2} * \frac{\pi}{180} \approx 2\pi \text{ rad} \cdot m^{-1}$

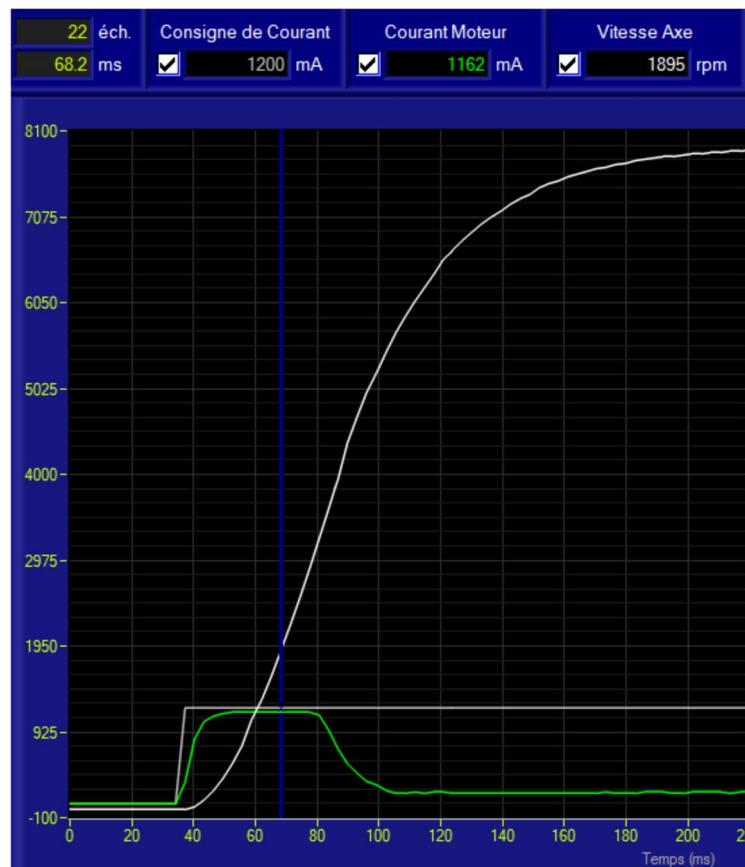
A.N : $\frac{d^2\theta_G}{dt^2} \approx 5 \text{ rad} \cdot s^{-2}$

VERIFICATION EXPERIMENTALE

Activité 8 En exploitant le système de laboratoire en mode LABO, mettre en œuvre un protocole expérimental tel que :

- L'IHM est en mode LABO
- Amener le chariot à $P_a=200 \text{ mm}$
- Préparer un asservissement de courant, avec une entrée en échelon de 1200 mA
- Durée : environ 0,5s
- Mesurer la vitesse de rotation du moteur, et le courant.

Déduire de votre expérience l'accélération angulaire maximale au niveau du genou.





$$\omega_M = \frac{3583 - 1320}{83 - 62} * \frac{2\pi}{60} * \frac{1}{10^{-3}} = 10900 \text{ rad.s}^{-2}$$
$$\ddot{\theta}_g = 10900 * \frac{1}{16} * \frac{0.006}{2\pi} * 2\pi = 4.2 \text{ rad.s}^{-2}$$

Activité 9 Interpréter les écarts entre le modèle et l'expérience

- La pente la plus grande est atteinte lorsque l'intensité est maximum. Or, le moteur a déjà commencé à tourner (plus de 1000 tr/min). Donc les frottements fluides interviennent alors qu'ils ont été négligés dans le modèle
- Le courant n'est pas strictement de 1200 mA mais plutôt autour de 1150 mA

CONCLUSION**Activité 10 Au vu des valeurs mesurées d'accélération angulaire maximale, justifier le profil de commande en mode KINETEC PASSIF.**

Une accélération de 4 rad.s^{-2} si elle était maintenue correspondrait à une vitesse de rotation de 0,7 tours/s atteinte en une seconde ! Evidemment, une telle accélération n'est pas maintenue, mais sa brutalité, même sur une durée courte, est à éviter dans le contexte thérapeutique de l'attelle.

La loi en trapèze de vitesse permet d'imposer une accélération angulaire modérée et constante au niveau de l'articulation du genou.

III. DIMENSIONNEMENT SUR CRITÈRE DE DISSIPATION D'ÉNERGIE CALORIFIQUE

Une caractéristique importante d'un moteur électrique dans le cadre de son dimensionnement vis-à-vis d'une application est son **couple nominal** :

- Si le couple fourni par le moteur est **supérieur au couple nominal** de celui-ci, l'échauffement **augmente**. Si l'échauffement augmente trop longtemps, il peut y avoir détérioration
- Si le couple fourni par le moteur est inférieur au couple nominal, l'échauffement diminue

On cherche donc, dans le cas général d'une application où le couple évolue dans le temps, la valeur du couple, qui, développé constamment (donc sans évolution dans le temps) **produirait le même échauffement qu'un couple variable**. La grandeur recherchée est la valeur efficace du couple, et se nomme **couple efficace C_{eff}** .

Pour rappel, la valeur efficace d'une grandeur se détermine, sur une durée (ou une période) T , de la façon suivante :

$$C_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C(t)^2 dt}$$

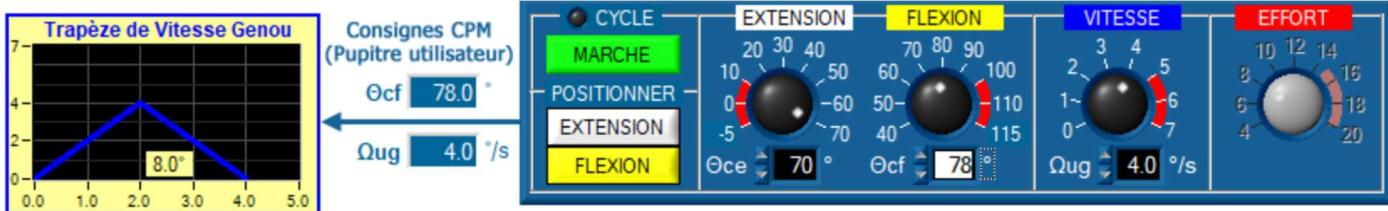
Pour démontrer qu'un moteur ne produise pas un échauffement menant à sa défaillance, il faudra simplement vérifier que le couple efficace sur une période donnée est inférieur au couple nominal du moteur, qui est une donnée constructrice.

On se place donc dans le cas d'une sollicitation cyclique défavorable vis-à-vis du critère d'échauffement. Pour cela, on a réalisé un protocole expérimental lors duquel on a demandé à un cobaye (sain) d'utiliser l'attelle, et

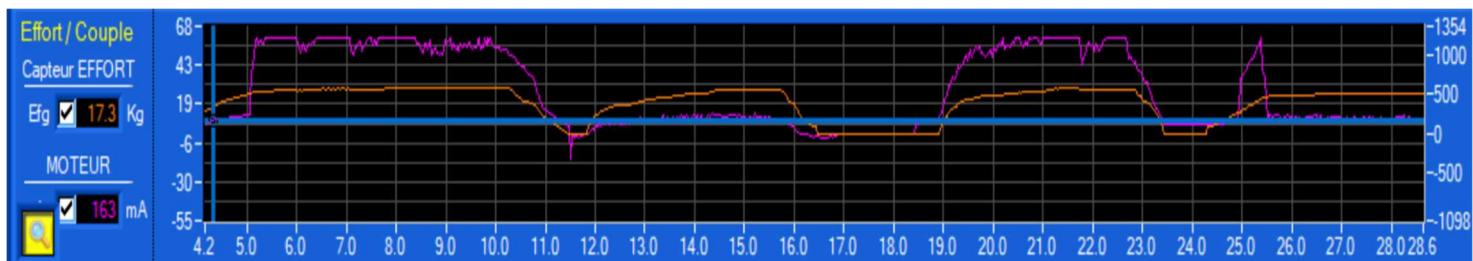


d'exercer lors du fonctionnement en mode KINETEC PASSIF, avec la jambe, un effort intense et périodique. On a enregistré le courant moteur au cours du temps. Vous pouvez, si vous en avez le temps, réaliser cette expérience vous-même, sinon le fichier de mesure vous est donnée et s'intitule *couple_efficace.txt*.

Paramétrage du protocole :

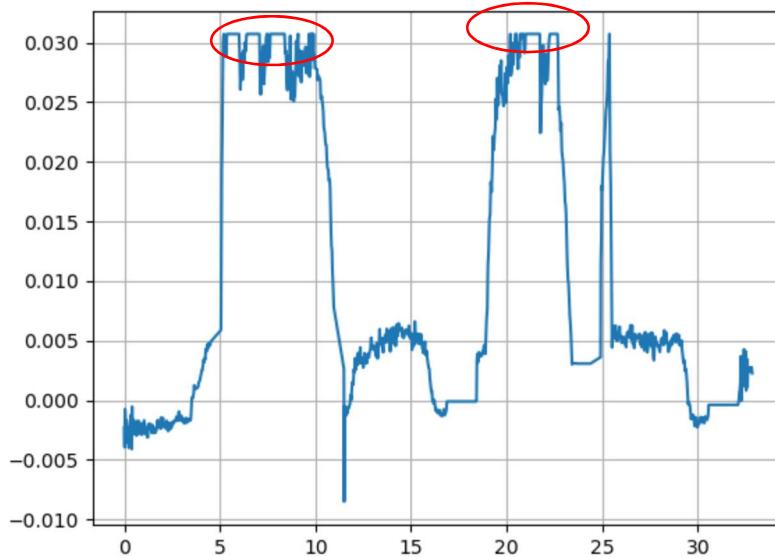


Acquisition de l'intensité :



Vous disposez de l'acquisition dans le fichier *couple_efficace.txt*.

Activité 11 Proposer un script sous Python qui utilise le fichier fourni *couple_efficace.txt* pour afficher la courbe du couple en fonction du temps.



Couple moteur (en Nm) en fonction du temps, pour une charge cyclique intense

Activité 12 Au vu des considérations précédentes, mettre en évidence la présence d'une saturation du courant, et justifier sa pertinence.



Le courant, proportionnel au couple, est manifestement volontairement saturé (grâce à la boucle de courant). La saturation de couple est à 31 mNm, donc celle du courant à $21/25.6=1.2A$. Cela permet de protéger le moteur et l'électronique de puissance de pics de courant susceptibles de les détériorer. Par ailleurs, la valeur maximale du courant correspond à une valeur maximale de couple proche du couple nominal, limitant ainsi les risques que les bobinages de la MCC subissent une surchauffe.

Activité 13 Compléter le script pour en déduire la valeur du couple efficace du moteur sur la durée de l'expérience.

$C_{eff}=16 \text{ mNm} < \text{couple nominal (26,3 mNm)}$.

Activité 14 Conclure quant au dimensionnement du moteur sur critère de dissipation énergétique, sur le cycle considéré.

Le cycle considéré correspond à une charge intense de la CPM-130. Le couple efficace reste inférieur au couple nominal, il n'y a donc à priori pas de risque de surchauffe critique.

IV. SYNTHESE

Activité 15 Synthétiser la démarche d'ingénierie proposée durant ce TP, et discuter qualitativement de la validité des modèles et résultats obtenus.