

MODÉLISER LE COMPORTEMENT DES SYSTÈMES MÉCANIQUES DANS LE BUT D'ÉTABLIR UNE LOI DE COMPORTEMENT OU DE DÉTERMINER DES ACTIONS MÉCANIQUES EN UTILISANT LES MÉTHODES ÉNERGÉTIQUES



JUSTIFICATION DU CHOIX DU MOTEUR D'UN SYSTÈME

CONTROL'X

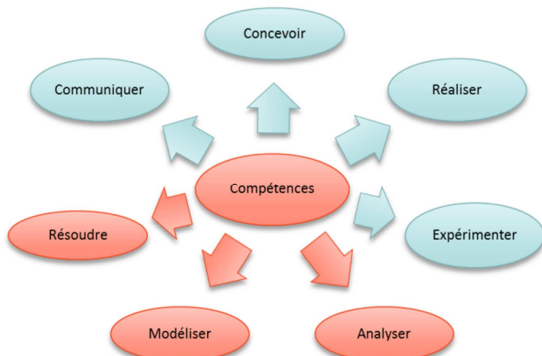
1 OBJECTIFS

1.1 Objectif technique

Objectif :

L'objectif de ce TP est de vérifier si le moteur utilisé sur le Control'X est correctement dimensionné.

1.2 Contexte pédagogique



Analyser :

- ☐ A3 – Conduire l'analyse

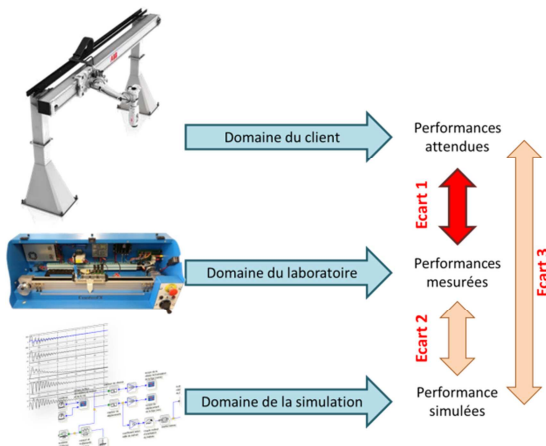
Modéliser :

- ☐ Mod2 – Proposer un modèle
- ☐ Mod3 – Valider un modèle

Résoudre :

- ☐ Rés2 – Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution analytique
- ☐ Rés3 – Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution numérique

1.3 Évaluation des écarts



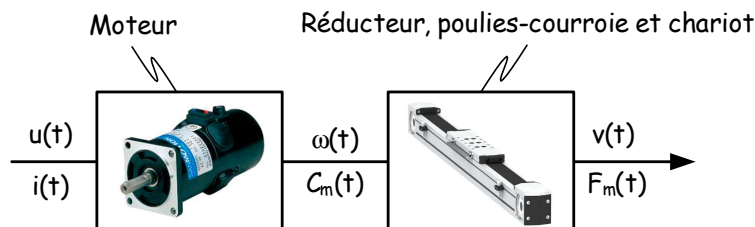
L'objectif de ce TP est de vérifier si le moteur du Control'X est compatible avec le besoin du client en analysant les résultats des simulations.

2 MISE EN SITUATION

2.1 Problématique

Le motoréducteur de Control'X est-il correctement dimensionné ?

Cet objectif passe par la compréhension fine des différentes transformations opérées dans la chaîne de transmission de puissance :



Activité 1 – Analyse de la problématique

Réaliser un échelon de tension de 10 V en boucle ouverte. (Le gain du variateur étant 4, le moteur est alors alimenté sous 40 V.)

- ☐ Observer dans un premier temps l'évolution de la position au cours du temps.
- ☐ Observer ensuite l'évolution de l'intensité et de la tension.
- ☐ Observer l'évolution du couple moteur et de la vitesse moteur. On fera l'hypothèse que le couple utile en sortie de moteur vaut k_i alors qu'en réalité il est diminué des frottements internes au moteur et du moment dynamique du rotor (moment nécessaire pour faire accélérer le rotor).

Nota : cliquer sur l'icône de la calculatrice pour savoir comment obtenir toutes les grandeurs issues des mesures effectuées.



- ☐ Observer l'évolution de la puissance électrique.
- ☐ Observer l'évolution de la puissance mécanique en sortie de moteur (en superposition avec la puissance électrique).
- ☐ Observer l'évolution du rendement du moteur.

3 COMPORTEMENT DE LA CHAÎNE D'ÉNERGIE

Activité 2 – Modélisation

- ☐ Ouvrir (en double cliquant dessus depuis l'explorateur Windows) le fichier Simulink "Modele_SimScape_ControlX.slx" : il s'agit du modèle multiphysique acausal de Control'X.
- ☐ Ouvrir et exécuter sous Matlab le fichier "Modele_SimScape.m", ce script exécute entre autre choses le fichier Simulink précédent.

On travaillera dans un premier temps sur la boucle ouverte avec le même type d'essai que celui effectué sur Control'X : $u(t) = 40 \text{ V}$.

Observer les mêmes signaux que ceux observés sur Control'X mais en simulation : On observera dans l'ordre :

- ☐ les oscilloscopes "Signaux méca moteur", "Signaux élec moteur", "Tous signaux sortie axe" et "Puissances"
- ☐ Les trois figures 1, 2 et 3 qui s'affichent à l'écran.

- ☐ Relever, **une fois le régime permanent atteint**, les valeurs de tension, courant, couple moteur, vitesse moteur, couple moteur ramené sur le chariot (force motrice) et vitesse du chariot.
- ☐ En déduire la puissance électrique, mécanique et le rendement du moteur.
- ☐ Travaille-t-on loin du point de fonctionnement nominal du moteur ? On pourra pour cette question consulter les caractéristiques du moteur dans le dossier technique et notamment les caractéristiques nominales.
- ☐ Observer dans quelle zone travaille le moteur une fois que le régime permanent est atteint : zone continue autorisée, intermittente ou instantané ?
- ☐ Relancer un essai mais avec un rapport de réduction i qui vaut non plus 3 mais 1 (comme s'il n'y avait pas de réducteur) : modifier pour cela le script "Modele_SimScape.m" et relancer le. Effectuer alors les mêmes relevés que précédemment.

- ☐ **Le réducteur de rapport 3 ne réduit pas la vitesse du chariot : comment est-ce possible ?**

- ☐ Relancer un essai mais avec cette fois-ci un effort résistant supplémentaire de 30 N. Que se passe-t-il avec et sans réducteur ?
- ☐ Consigner les résultats dans un tableau du type ci-dessous (régime permanent uniquement).

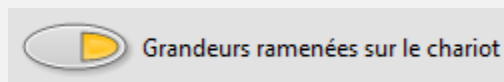
	Avec réducteur : $i = 3$	Sans réducteur : $i = 1$
Sans effort résistant : $F_{\text{ext}} = 0$	$u =$ $i =$ $C_m =$ $F_m =$ $\omega_{\text{moteur}} =$ $V_{\text{chariot}} =$ $P_{\text{élec}} =$ $P_{\text{méca}} =$ $\eta_{\text{moteur}} =$	$u =$ $i =$ $C_m =$ $F_m =$ $\omega_{\text{moteur}} =$ $V_{\text{chariot}} =$ $P_{\text{élec}} =$ $P_{\text{méca}} =$ $\eta_{\text{moteur}} =$
Avec effort résistant : $F_{\text{ext}} = 30 \text{ N}$	$u =$ $i =$ $C_m =$ $F_m =$ $\omega_{\text{moteur}} =$ $V_{\text{chariot}} =$ $P_{\text{élec}} =$ $P_{\text{méca}} =$ $\eta_{\text{moteur}} =$	$u =$ $i =$ $C_m =$ $F_m =$ $\omega_{\text{moteur}} =$ $V_{\text{chariot}} =$ $P_{\text{élec}} =$ $P_{\text{méca}} =$ $\eta_{\text{moteur}} =$

- ☐ Comparer.

Activité 2 – Expérimentation

Ouvrir le menu "Bonus", "Caractéristiques moteur".

On peut observer les courbes soit vues "coté moteur", soit vues "coté moteur linéaire équivalent" :



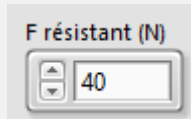
Analyser toutes les courbes une à une sauf pour l'instant la première : "Essai temporel en mémoire" :

☐ Essai temporel en mémoire
☒ Couple moteur (N.m)
☐ Intensité (A)
☐ Puissance (W)
☐ Rendement (%)
☐ Iso-Puissance (N.m)
☐ Couple résistant (N.m)
☒ Point de fonctionnement nominal

Commencer par exemple par observer toutes les caractéristiques sous la tension nominale de 75 V.

Que valent la vitesse à vide et l'effort "arbre bloqué" ou effort de démarrage ?

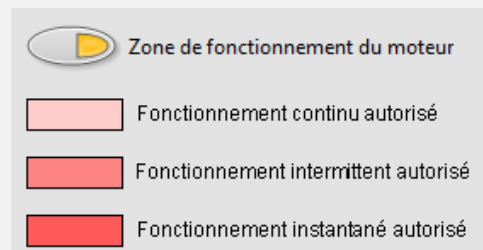
Mettre en place un effort résistant constant pour visualiser quel serait le point de fonctionnement du couple {moteur + récepteur} si cet effort résistant constant était appliqué sur le moteur.



Que vaut la puissance maximale, le rendement maximal, le couple maximal ?
Où doit se situer le point de fonctionnement pour travailler à puissance maxi, à rendement maxi, à couple maxi ?
Le moteur peut-il travailler à la fois à puissance maxi à rendement maxi et au couple maxi ?

Afficher le point de fonctionnement nominal. Que doit valoir l'effort résistant pour travailler au point de fonctionnement nominal ?

On peut observer les zones de fonctionnement du moteur.



Chaque constructeur à sa propre définition du point de fonctionnement nominal :

- Point de fonctionnement pour lequel la puissance est maximale
- Point de fonctionnement pour lequel le rendement est maximum
- Point de fonctionnement pour lequel le couple continu autorisé est maximum

Quelle est la définition du constructeur du moteur de Control'X : Sanyo (Japon).

Dans quelle zone de fonctionnement du moteur se trouve le point de fonctionnement nominal ?

Est-il possible de rester en ce point de fonctionnement en fonctionnement continu ?

Peut-on travailler à puissance maxi, à rendement maxi à couple maxi en fonctionnement continu ?

Analyser les courbes iso-puissance. La courbe iso-puissance $P = 107 \text{ W}$ par exemple est dans le plan (C, ω) la courbe telle que

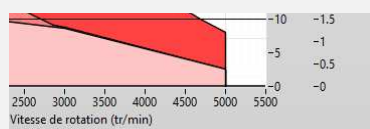
$$C \cdot \omega = P = 107. \quad \text{Il s'agit donc de la branche d'hyperbole d'équation}$$

$$C = \frac{P}{\omega} = \frac{107}{\omega}.$$

Tous les points se trouvant sur cette hyperbole correspondront à une puissance développée par le moteur de 107 W. Il y a deux intersections avec la courbe caractéristique du moteur : le point de fonctionnement nominal et un autre point de fonctionnement qui permet aussi au moteur de développer 107 W mais à plus fort couple et plus faible vitesse.

Analyser maintenant les mêmes courbes que précédemment mais sous la tension $U_{\text{alim}} = 40 \text{ V}$: c'est la tension maxi que peut délivrer le variateur de Control'X. Comment évoluent la puissance maxi, le rendement maxi, le couple maxi par rapport à la tension nominale de 75 V ?

Analyser maintenant la première courbe "Essai temporel en mémoire" : il s'agit de l'évolution de l'effort moteur en fonction de la vitesse correspondant à l'essai temporel en mémoire. L'effort moteur est ici calculé en tenant compte des frottements internes du moteur.



Quel est le point de fonctionnement du moteur (le régime permanent atteint).
 Quels est l'effort résistant au point de fonctionnement, la vitesse au point de fonctionnement ?
 Que valent alors la puissance électrique, mécanique, le rendement en ce point de fonctionnement ?
 Discuter



Activité 2bis – Expérimentation – Pour aller plus loin

Dans le menu "Bonus", "Caractéristiques moteur", la courbe caractéristique du moteur est la courbe du couple moteur utile $C_{m\text{-utile}}$ (le couple disponible en sortie de moteur) en fonction de sa vitesse ω en **régime permanent**. Elle est tracée à partir du modèle suivant en se plaçant en régime permanent : $\omega(t) = \text{cste}$.

Schéma électrique équivalent	Schéma mécanique équivalent
<p><u>Equation électrique :</u></p> $u(t) = r.i(t) + L.\frac{di(t)}{dt} + e'(t)$	<p><u>Paramétrage :</u></p> $\overset{ur}{C}_{(moteur \rightarrow rotor)} = C_m(t).y_0^r : \text{couple électromagnétique}$ $\overset{ur}{C}_{(moteur\text{-}utile \rightarrow charge)} = C_{m\text{-}utile}(t).y_0^r : \text{couple moteur propre à}$

	<p>entraîner la charge</p> $\vec{C}_{(ext \rightarrow charge)} = - \vec{C}_r(t) \cdot \vec{y}_0$ $\vec{\Omega}_{1/0} = \omega(t) \cdot \vec{y}_0$ <p style="text-align: center;"><u>Equations dynamiques :</u></p> $C_{m-utile}(t) = C_m(t) - C_{frott-moteur} - f_{\omega-moteur} \cdot \omega(t) - J_{mot} \cdot \ddot{\theta}(t)$ $C_{m-utile}(t) - C_r(t) = J_{charge} \cdot \ddot{\theta}(t)$
Couplages électro-mécaniques	

Les valeurs de k , $f_{\omega-moteur}$, $C_{frott-moteur}$, r et L sont celles données dans le catalogue constructeur du moteur.

Indiquer les formules qui ont permis de tracer toutes les courbes

☐

Activité 3 – Synthèse

Toutes les observations faites jusqu'à présent concernaient un essai en boucle ouverte sous une tension moteur $u(t) = 40 \text{ V}$. Control'X étant asservi en position, la tension moteur ne sera pas en fonctionnement normal constante mais évoluera à priori à tout instant.

On cherche à mettre en évidence ici que les observations faites jusqu'à présent conservent un grand intérêt parce que la carte de commande sature assez rapidement (Et c'est tant mieux, cela permet de protéger les différents organes de la chaîne d'énergie).

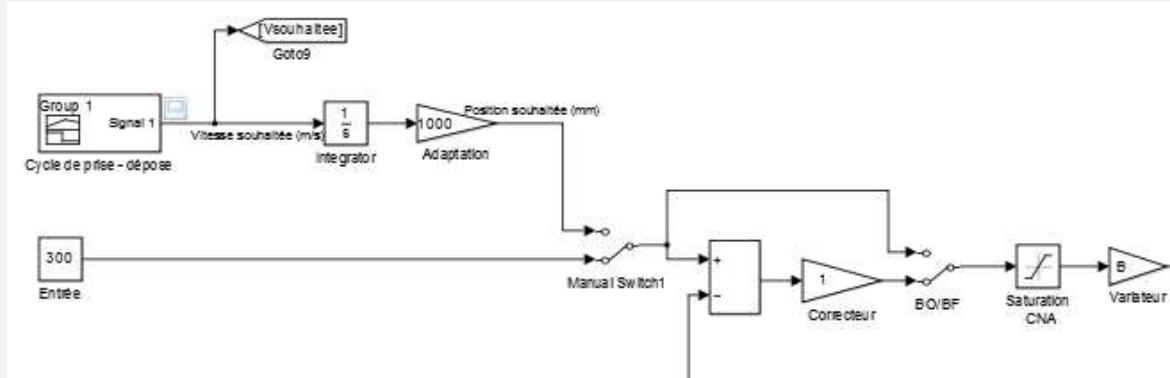
- ☐ Effectuer un nouvel essai sur Control'X mais cette fois en boucle fermée (Menu "BO/BF"), avec un correcteur $K = 1$ (Menu "Correcteur"). Lancer un échelon de 300 mm. Analyser maintenant dans l'onglet analyse temporelle la courbe de position et de tension moteur. À partir de quel instant t et quelle position $x(t)$ le système ne sature-t-il plus ?
- ☐ Sur la durée de positionnement, pendant quelle fraction du temps le système est-il en saturation ?

4 POINT DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR

4.1 Simulation du point de fonctionnement du moteur

Activité 4 – Modélisation

- ☐ Observer par simulation sous Simulink ce qui vient d'être vu sur Control'X. Se placer en boucle fermée dans le fichier Simulink avec un échelon de 300 mm d'amplitude :



Remettre un réducteur de rapport $i = 3$ et un effort résistant $F_{\text{ext}} = 0$ dans le script "Modele_Simscape.m" avant de le relancer.

Analyser en particulier les trois figures affichées : $u = u(i)$, $C_m = C_m(\omega)$ et $F_m = F_m(v)$.

Indiquer quels sont les quadrants parcourus (moteur ou résistant). Le moteur est-il toujours moteur ? Discuter.

- ☐ En observant la courbe de réponse en position en fonction du temps, analyser à quels instants la puissance électrique et la puissance mécanique changent de signe (Changement de quadrant) ?

4.2 Validation de la motorisation

Activité 4 – Expérimentation

On travaille toujours sur le dernier essai réalisé (boucle fermée, $K = 1$, 300 m, échelon de 300 mm)

- ☐ Afficher maintenant la courbe de tension moteur en fonction de l'intensité $u = u(i)$. Discuter.
- ☐ Afficher ensuite la courbe donnant le couple moteur en fonction de la vitesse moteur $C_m = C_m(\omega)$: utiliser pour cela la fonction "Afficher caractéristiques moteur" dans le menu "Analyse temporelle". Discuter.
- ☐ Se placer en échelle automatique (Les petites diodes vertes à côté des axes X et Y) : discuter.
- ☐ En observant les deux courbes précédentes, $u = u(i)$ et $C_m = C_m(\omega)$, indiquer quels sont les quadrants parcourus (moteur ou résistant). Le moteur est-il toujours moteur ? Discuter.
- ☐ En observant la courbe de réponse en position en fonction du temps, analyser à quels instants la puissance électrique et la puissance mécanique changent de signe (Changement de quadrant) ?

4.3 Synthèse : comparaison des comportements

Activité 5 – Synthèse

Rappel du cahier des charges :

Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité
Permettre de positionner un composant	Cadence de prise + dépose	3000 composants à l'heure	mini
	Précision (Répétabilité)	± 0.1 mm	maxi
	Course en X	300 mm	± 10 mm

On cherche à valider ici le dimensionnement du moteur par rapport au critère de cadence de prise + dépose des composants électroniques.

Le cycle de prise + dépose d'un composant se fait selon le trapèze de vitesse dont les différentes phases sont résumées par le graphique ci-dessous :

Phase	Fonction
1	Prise d'un composant dans le magasin
2 à 4	Déplacement vers le circuit imprimé en respectant une loi vitesse en trapèze
5	Dépose du composant sur le circuit imprimé
6 à 8	Retour vers le magasin en respectant une loi de vitesse en trapèze

Question préliminaire : vérifier qu'avec ce cycle, la cadence de prise + dépose d'un composant peut être tenue. Il n'existe pas de méthode générale de dimensionnement d'un moteur à courant continu. Cependant la démarche qui suit est celle que l'on peut retrouver dans les préconisations d'un certain nombre de constructeurs (Sanyo, Maxon, Schneider).

On part du cycle de déplacement souhaité (voir ci-dessus).

On calcule à tout instant le couple moteur $C_m(t)$ nécessaire pour obtenir l'évolution de la vitesse souhaitée $v(t)$.

Modèle mécanique à utiliser :

Équation dynamique : $m_{\text{eq}} \cdot \ddot{x}(t) = F_m(t) - F_r(t)$ où $F_r(t) = F_{\text{frott}} + f_v \cdot v(t) + F_{\text{ext}}$

Relation entrée sortie cinématique : $v(t) = \frac{R}{i} \cdot \omega(t)$

- Inertie équivalente ramenée sur le chariot : $m_{\text{eq}} = 3.2 \text{ kg}$
- Frottements secs (de l'ensemble du mécanisme) F_{frott} ramené sur le chariot : $F_{\text{frott}} = 30 \text{ N}$: signe opposé à la vitesse
- Coefficient de frottements visqueux (de l'ensemble du mécanisme) ramené sur le chariot : $f_v = 20 \text{ N/(m/s)}$
- Force extérieure supplémentaire exercée sur le chariot : $F_{\text{ext}} = 50 \text{ N}$ (toujours positive par exemple)
- Rayon primitif de la poulie crantée : $R = 0.0247 \text{ m}$

- Rapport de réduction du train épicycloïdal : $i = 3$

On définit :

- La vitesse absolue moyenne : $\omega_{\text{moy}} = \frac{1}{T_{\text{cycle}}} \cdot \int_{t=0}^{t=T_{\text{cycle}}} |\omega(t)| \cdot dt$
- Le couple thermique équivalent : $C_{\text{m-thermique}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{cycle}}} \cdot \int_{t=0}^{t=T_{\text{cycle}}} (C_{\text{m}}(t))^2 \cdot dt}$: il s'agit du couple constant qui sur la même durée de cycle T_{cycle} produirait le même échauffement du moteur que le couple variable $C_{\text{m}}(t)$. Il faut avoir en mémoire que l'échauffement du moteur provient principalement de la puissance Joule dissipée par la résistance interne du moteur : $r \cdot i^2(t)$ et que $C_{\text{m}}(t) = k \cdot i(t)$.

Le dimensionnement du couple {moteur + réducteur} est validé si les critères suivants sont respectés :

- Critère 1 : tous les couples ($C_{\text{m}}(t)$, $\omega(t)$) se trouvent sous la courbe caractéristique du moteur correspondant à la tension maxi qui pourra lui être appliquée (40 V dans notre cas).
- Critère 2 : tous les couples ($C_{\text{m}}(t)$, $\omega(t)$) se trouvent dans l'une des zones de fonctionnement autorisées (continu, intermittent ou instantané).
- Critère 3 : le couple ($C_{\text{m-thermique}}$, ω_{moy}) se trouve dans la zone de fonctionnement continu autorisé

Nota : Ce dimensionnement est basé sur le trapèze de vitesse souhaité et non pas sur la vitesse réellement obtenue compte tenu de la présence de la boucle d'asservissement. En effet, si la motorisation est validée à partir du cycle souhaité, à priori elle le sera aussi sur le cycle réellement obtenu. En phase d'avant-projet, cela permet de s'affranchir des caractéristiques de l'asservissement. D'autre part, si l'asservissement à des caractéristiques dynamiques satisfaisante, le cycle réel ressemblera fortement au cycle souhaité (c'est le but).

On pourra s'interroger sur le fait qu'aucun dimensionnement en puissance n'a été effectué et en conclure que si les différents critères exposés (qui sont des critères mixtes en couple + vitesse) sont validés, la puissance que peut développer le moteur est nécessairement suffisante. On peut utilement penser aux courbes iso-puissances par exemple pour cette question.

5 VALIDATION DE LA MOTORISATION

Activité 6 – Expérimentation

Trouver un moyen pour valider expérimentalement le choix du couple {moteur + réducteur} en utilisant :

- Le module "Calculs sur réponse temporelle" du Menu "Analyse temporelle" de Control'Drive

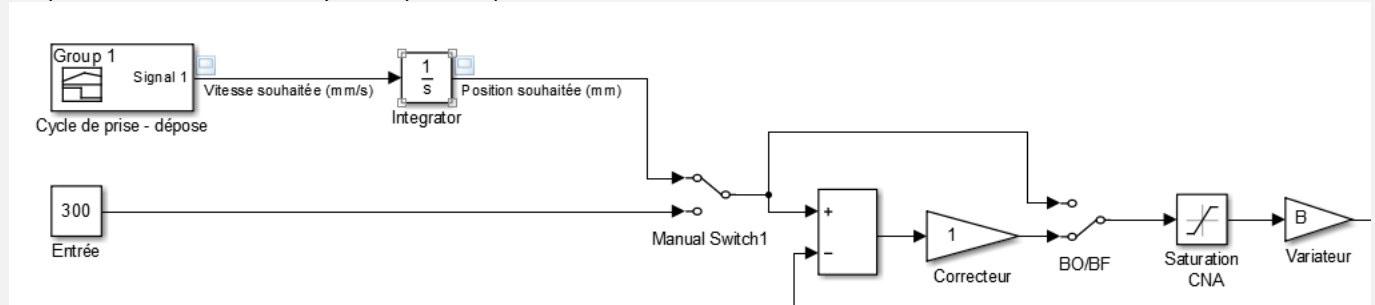
- Le menu "Bonus", "Caractéristiques moteur".

On pourra lancer seulement la première partie du cycle en trapèze de vitesse (phases 1 à 4). la deuxième partie (phases 5 à 8) est en tout point similaire à la première partie. Les calculs de dimensionnement n'en seront donc pas affectés.

Activité 6 – Simulation

Trouver un moyen pour valider théoriquement le choix du couple {moteur + réducteur}.

On pourra utiliser l'entrée "Cycle de prise-dépose" du fichier Simulink :



Lancer le cycle en trapèze présenté et observer si le moteur travaille en respectant les critères énoncés. Valider le dimensionnement du couple {moteur + réducteur}.

Utiliser les informations présentes sur le fond bleu de la feuille Simulink.

Vous pouvez légèrement modifier le script .m comme ci-dessous pour faire apparaître les points (C_m , ω) issus du cycle en trapèze souhaité : modifier les commentaires % au début de la ligne 81

Activité 6 – Synthèse

Conclure.

TOUTE L'ÉQUIPE : prise en main de la problématique

On travaille sur le modèle suivant de moteur :

Equation de mouvement :

$$C_m(t) - C_r(t) = J_{eq} \cdot \ddot{\theta}(t)$$

Equation électrique :

$$u(t) = r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e'(t)$$

Couplages électro-mécaniques

On pourra travailler aussi sur le moteur linéaire équivalent de Control'X : moteur dont l'entrée est la tension $u(t)$, la perturbation une force $F_r(t)$ appliquée sur le chariot et la sortie la vitesse linéaire $v(t)$. Ce moteur génère :

- Une force motrice $F_m(t)$ proportionnelle au courant $i(t)$
- Une force contre électromotrice $e'(t)$ proportionnelle à la vitesse $v(t)$ du chariot

TOUTE L'ÉQUIPE : prise en main de la problématique

Equation de mouvement :

$$m_{\text{eq}} \cdot \ddot{x}(t) = F_m(t) - F_r(t)$$

Equation électrique :

$$u(t) = r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e'(t)$$

Couplages électro-mécaniques

En nommant R le rayon primitif de la poulie et i le rapport de réduction du réducteur, on a alors la relation entrée sortie cinématique suivante $v(t) = \frac{R}{i} \cdot \omega(t)$ et on demande d'admettre que $k' = \frac{k \cdot i}{R}$