

TP SIMULATION CAUSALE – Scilab/Xcos

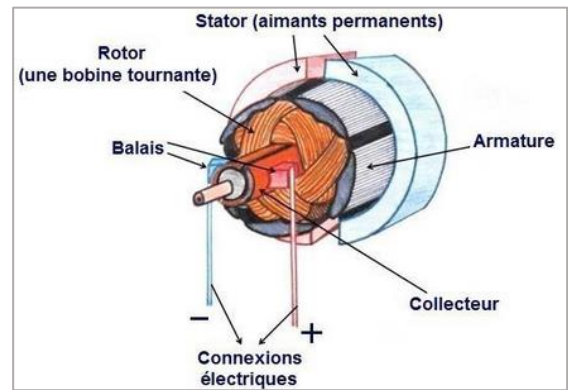
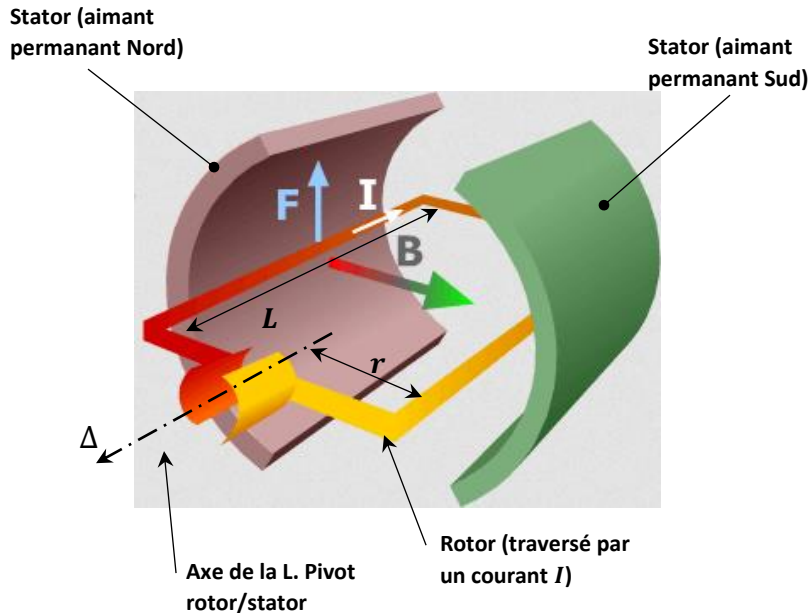
Durée 4h



Rappel : ce sujet ne vous appartient pas. Ne rien y inscrire !

MODELISATION DU MOTEUR A COURANT CONTINU

PARTIE I – FONCTIONNEMENT DU MOTEUR CC – PRINCIPE PHYSIQUE

1. PRINCIPE PHYSIQUE – 1^{ère} EQUATION DE COUPLAGE ELECTROMECHANIQUE

Le conducteur en cuivre de longueur \vec{L} solidaire du rotor et parallèle à l'axe de rotation du rotor (Δ) est traversé par un courant I et plongé dans un champ magnétique \vec{B} . Le champ magnétique \vec{B} est créé par les aimants permanents.

Il résulte de I et \vec{B} la force de Laplace : $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$ s'appliquant au conducteur.

Le force de Laplace \vec{F} crée donc un moment sur le rotor par rapport à l'axe de rotation (Δ). Le bras de levier est r .

Le moment de la force \vec{F} est donc : $M_{\Delta}(\vec{F}) = ILBr$.

Une force de même norme et de sens opposé s'exerce sur le conducteur diamétralement opposé. Cela double le moment qui devient un couple. En outre il y a N spires.

Finalement le couple exercé du stator sur le rotor est :

Couple électromagnétique (stator \rightarrow rotor) = $C_{mot} = 2r \cdot N \cdot B \cdot I \cdot L$

$$\boxed{C_{mot} = (B \cdot N \cdot S) \cdot I = K_T \cdot I} \Rightarrow 1^{\text{ère}} \text{ équation de couplage électromécanique}$$

B = champ magnétique en Tesla (T)

N = nombre de spires bobinées (nombre de boucles de conducteur)

S = surface d'une boucle ($L \times 2r$) en m^2

I = intensité traversant les conducteurs en Ampères (A)

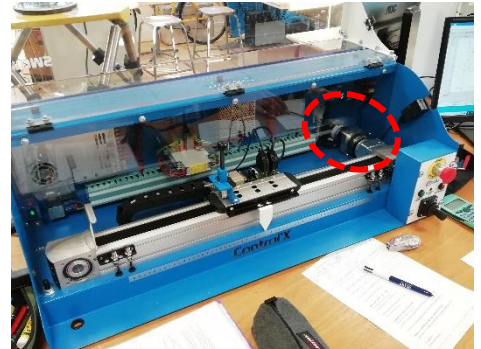
K_T = Constante de couple du moteur en Nm/A ; $K_T = B \cdot N \cdot S$

K_T est une donnée constructeur. Lettre "T" initiale de Torque signifiant couple en anglais.



Application

Le moteur électrique Sanyo du système Control'X possède les propriétés ci-dessous.



200 spires, champ magnétique 0,26T, diamètre moyen d'enroulement rotor 5cm, longueur rotor 8cm.

- ✎ Calculer la constante de couple du moteur K_T .
- ✎ Vérifier la cohérence avec les caractéristiques constructeur données en annexe.

2. LOI DE FARADAY – 2^{ème} EQUATION DE COUPLAGE ELECTROMECHANIQUE

La rotation d'une boucle de conducteur (=une spire) dans le champ magnétique \vec{B} fait apparaître une tension s'opposant à la tension aux bornes de cette boucle.

Cette tension, pour une spire, est : $e_1 = -\frac{d\phi}{dt}$ où ϕ est le flux du champ \vec{B} à travers la surface S de la boucle. $e_1 = -\frac{d(\vec{B} \cdot S \cdot \vec{n})}{dt}$ où \vec{n} est la normale à la boucle.

Pour N spires, il vient facilement :

$$\boxed{e = -BSN \cdot \omega_{rotor} = -K_e \cdot \omega_{rotor}} \Rightarrow \text{2^{ème} équation de couplage électromécanique}$$

e est appelée force contre électromotrice, ou *f. e. m.*

K_e (Vs/rad) est une constante donnée par le constructeur appelée coefficient de *fem.*

On remarque l'égalité physique parfaite : $K_e = K_T$

Application

- ✎ Vérifier, grâce aux données constructeur en annexe, qu'on a bien $K_e = K_T$.
- ✎ Démontrer que les dimensions de K_e et K_T sont identiques malgré des unités usuelles différentes.

PARTIE II – MODELE PHYSIQUE – SCHEMA BLOC – PREMIERE SIMULATION

1. MODELE PHYSIQUE

La modélisation physique du MCC abouti à quatre équations différentielles :

- Une équation électrique E1
- Deux équations de couplage électro/mécanique E2 et E3
- Une équation mécanique E4

La loi des mailles appliquée à l'induit du MCC :

$$u_{mot}(t) = e(t) + R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{(E1)}$$

La première loi de couplage électro-mécanique (forces de Laplace) :

$$C_{mot}(t) = K_T \cdot i(t) \quad \text{(E2)}$$

La deuxième loi de couplage électro-mécanique (loi de Faraday – force électromotrice) :

$$e(t) = K_e \cdot \omega_{mot}(t) \quad \text{(E3)}$$

Le théorème du moment dynamique appliqué au rotor moteur équivalent :

$$J_{eq} \frac{d\omega_{mot}(t)}{dt} = C_{mot}(t) - f_v \cdot \omega_{mot}(t) - C_r(t) \quad \text{(E4)}$$

$u_{mot}(t)$: tension d'alimentation aux bornes du moteur à courant continu

$e(t)$: force contre électromotrice dans l'induit du moteur

$i_{mot}(t)$: intensité dans l'induit moteur

$C_{mot}(t)$: couple moteur (= couple électromagnétique des forces de Laplace du stator sur le rotor)

$\omega_{mot}(t)$: vitesse angulaire du moteur

$C_r(t)$: couple résistant ramené à l'arbre moteur

R_m : résistance de l'induit moteur

K_e : constante de force contre électromotrice du MCC

J_{eq} : moment d'inertie équivalent de l'ensemble mécanique mobile entraîné, ramené sur l'arbre moteur

K_c : constante de couple du MCC

f_v : coefficient de frottement visqueux équivalent ramené au rotor moteur

2. MODELE CAUSAL : SCHEMA BLOC

Le passage dans le domaine symbolique de ces équations temporelles donne :

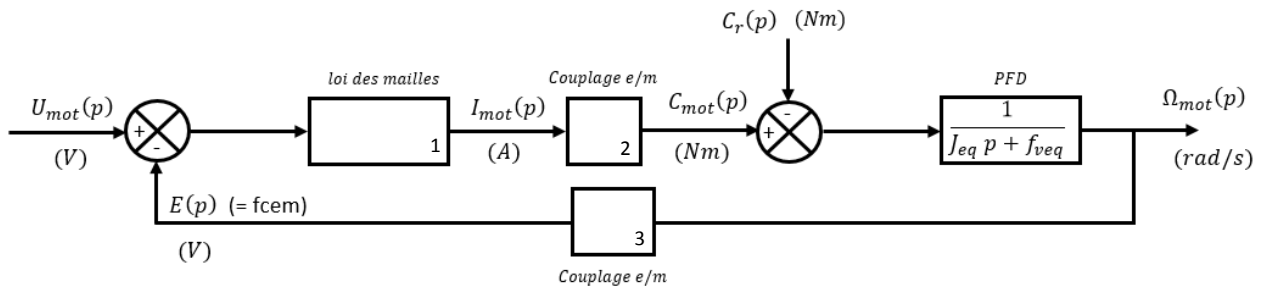
$$U_{mot}(p) = E(p) + R \cdot I_{mot}(p) + Lp \cdot I_{mot}(p) \quad \text{(E1)}$$

$$C_{mot}(p) = K_T \cdot I_{mot}(p) \quad \text{(E2)}$$

$$E(p) = K_e \cdot \Omega_{mot}(p) \quad \text{(E3)}$$

$$J_{eq}p \cdot \Omega_{mot}(p) = C_{mot}(p) - f_v \cdot \Omega_{mot}(p) - C_r(p) \quad \text{(E4)}$$

Ces quatre équations ont pour conséquence la modélisation sous forme de schéma bloc ci-dessous.



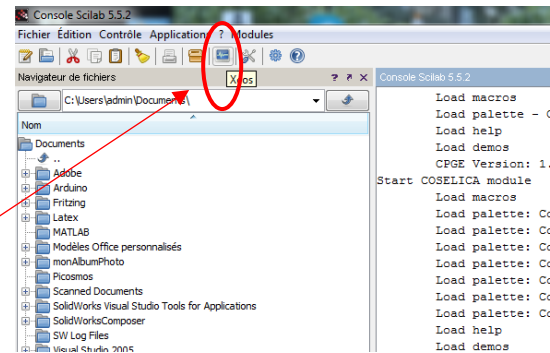
- Donner les fonctions de transfert des blocs 1, 2, 3 laissés vierges.
- Quel est l'ordre d'un moteur CC ainsi modélisé ?

3. SIMULATION CAUSALE SOUS SCILAB/XCOS

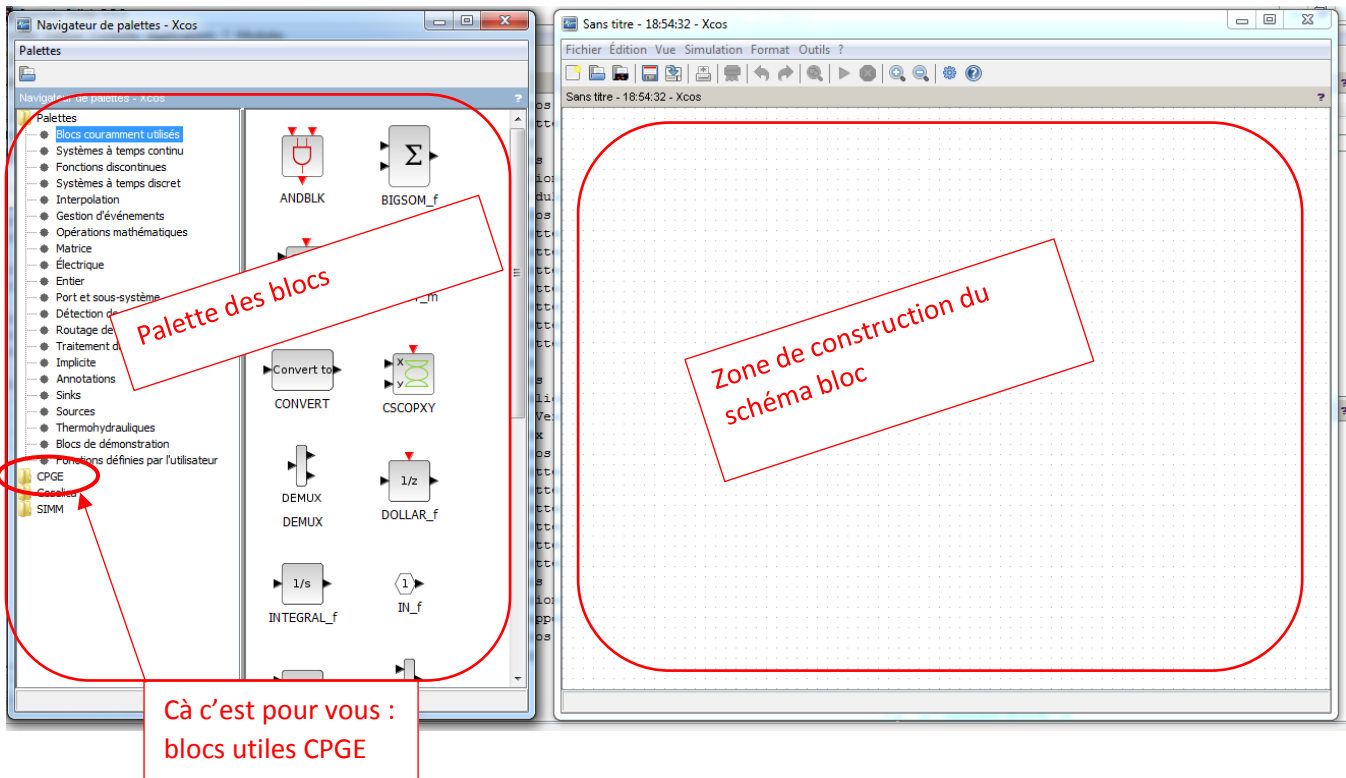
Dans le dossier «Logiciels mathématiques» sur le bureau du PC vous trouverez le raccourci d'ouverture de Scilab 5.32b. Cliquer/ouvrir Scilab.



Ouvrir le module de simulation causale Xcos

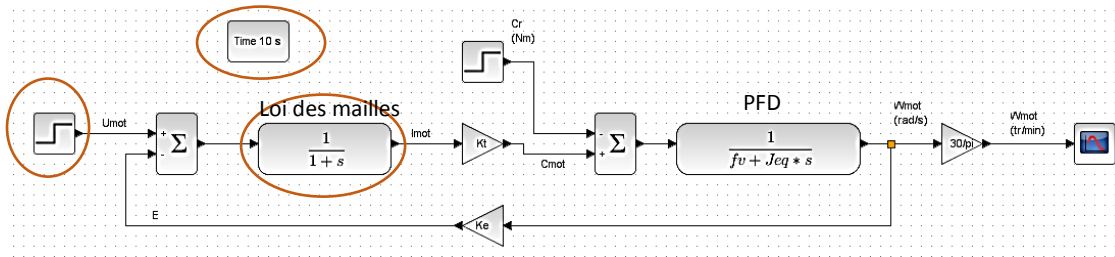


Vous obtenez l'écran suivant :



📄 Ouvrir le document Xcos : *Schema_Bloc_1_MCC-seul*

Le schéma bloc du MCC que vous connaissez apparait... version Xcos !



📄 Modifier les blocs nécessaires (couleur verte)

- loi des mailles : double clic dessus, (pour la saisie prenez exemple sur le bloc mécanique PFD)
- bloc d'entrée (consigne) : tension consigne égale à la tension nominale du moteur.

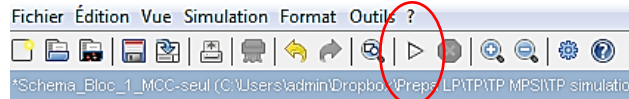
📖 Consulter en annexe les caractéristiques du moteur de Control'X pour les saisir

📄 Clic droit sur l'arrière-plan/Modifier le contexte : saisissez les valeurs des caractéristiques physiques du moteur CC.

Remarque : laisser à zéro le couple résistant. Nous verrons cela plus tard.

📄 Double clic sur bloc Time : saisissez une durée de 0,1s, 300 points de mesure.

▶ Lancer la simulation.



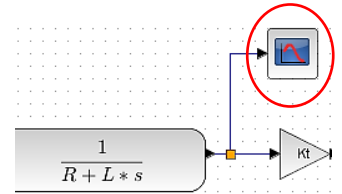
👉 Observer la tangente à l'origine. Quelle est la contradiction apparente avec l'ordre de la fonction de transfert du moteur ? Résoudre cette contradiction en zoomant sur l'origine (molette de la souris), ou en relançant une simulation avec une durée plus faible (0,005 s par exemple)

🔍 Quelle est la vitesse atteinte par le rotor ? En combien de temps cette vitesse est-elle atteinte ?

📖 La tension imposée est la tension nominale : comparez donc la vitesse atteinte avec la vitesse nominale constructeur.

4. VISUALISATION DE NOUVELLES VARIABLES

4.1. Visualisation de l'intensité moteur $i_{mot}(t)$



Nous souhaitons voir l'évolution de l'intensité pour la tension maximale appliquée au moteur.

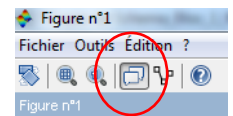
☞ Insérez un nouvel écran de visualisation (« scope ») : soit vous faites un cliquer/glisser à partir de la palette de blocs, soit vous faites un copier/coller d'un bloc déjà présent sur le schéma bloc.

Puis : double clic sur le bloc, donner un nom à la courbe...

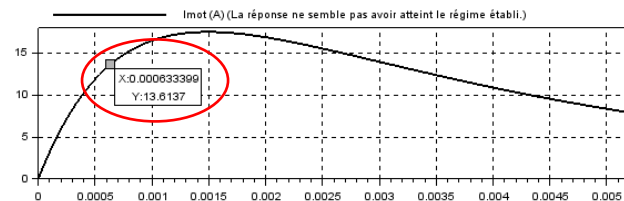
▷ Lancer la simulation (N'oubliez pas : tension maximale constructeur) : observez l'évolution du courant.

▷ Lancer une nouvelle simulation avec une nouvelle durée de simulation (bloc time) de manière à bien voir l'évolution de la courbe d'intensité.

Relever la valeur de l'intensité maximale atteinte au démarrage (« pic » d'intensité au démarrage) grâce à l'outil « **datatip** ».



☞ Comparer avec l'intensité donnée par le constructeur (il y a trois données de « courant », choisir la bonne !)



4.2. Visualisation de l'accélération angulaire du rotor $\gamma(t)$

Nous nous intéressons ici à l'accélération angulaire du rotor notée $\gamma(t) = \frac{d\omega_{mot}(t)}{dt}$.

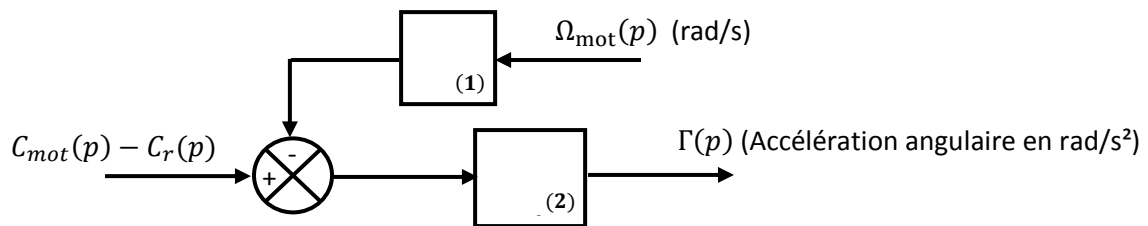
Nous souhaitons en effet relever la valeur de l'accélération maximale simulée et la comparer à la valeur donnée par le constructeur.

☞ Relever dans les données constructeur la valeur de l'accélération à vérifier.

L'équation différentielle (E4) issue du théorème du moment dynamique permet d'écrire l'expression de l'accélération :

$$\gamma(t) = \frac{d\omega_{mot}(t)}{dt} = \frac{1}{J_{eq}} [(C_{mot}(t) - C_r(t)) - f_v \cdot \omega_{mot}(t)] \quad \text{(E4)}$$

La conversion de cette expression sous forme de schéma bloc causal est :



✎ Donner l'expression des fonctions de transfert des blocs 1 et 2.

📖 Ouvrir le schéma bloc Xcos : « *Schéma_Bloc_2-accélération* ». Certains bloc sont déjà insérés mais pas tous. Terminer le schéma bloc Xcos conformément au schéma bloc ci-dessus de manière à visualiser l'accélération.

▷ Lancer la simulation (saisir la tension de commande et la durée de simulation correctes).

Observer l'allure de la courbe d'accélération. Conclure par rapport à la donnée constructeur.

5. INFLUENCE DE CERTAINES CARACTERISTIQUES TECHNOLOGIQUES DU MOTEUR SUR SON COMPORTEMENT

5.1. Influence de l'inductance sur le comportement du moteur

✎ Question préliminaire : que devient l'ordre du modèle du moteur si l'inductance est nulle ?

Il arrive qu'on fasse dans certaines études l'approximation $L=0$. Nous allons étudier l'influence de cette approximation : correcte, limite, grossière, inacceptable ?..

Pour cela nous allons tracer sur le même graphe les réponses avec deux valeurs de L :

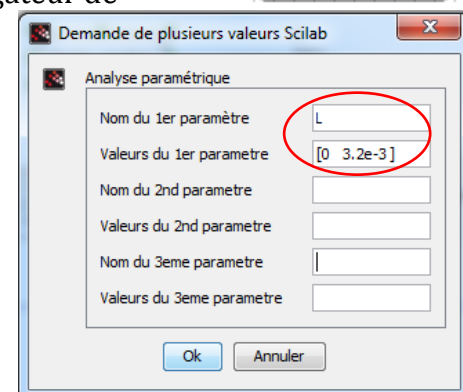
$L = 0H$ et $L = 3,2 \cdot 10^{-3}H$.

📖 Supprimer les blocs de visualisation de l'accélération. Ils ne sont plus utiles.

Faire glisser le bloc « Paramètre variation » à partir du navigateur de palettes (« *CPGE/Analyses...* »).

Double clic : saisir deux valeurs de L , 0 et $3,2 \cdot 10^{-3}H$.

▷ Lancer la simulation en revenant à la tension nominale de 75V. Analyser. Conclure. L'approximation est-elle acceptable ? Zoomer sur l'origine... conclusion.



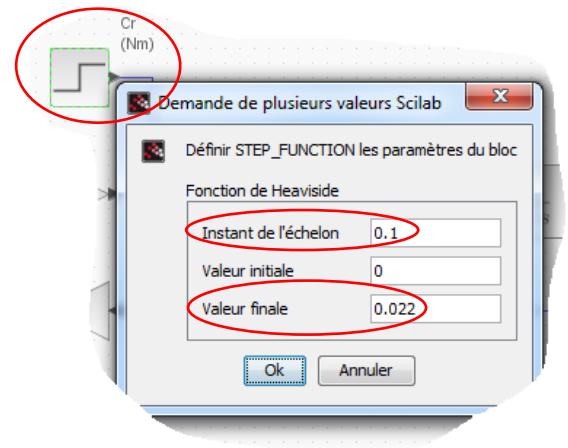
5.2. Prise en compte des frottements secs

Vous avez peut-être remarqué que le document constructeur annonce un « couple de friction » de $0,022Nm$. Ceci est la conséquence des frottements secs entre pièces mobiles dans le moteur. Nous allons visualiser l'influence de ce couple de frottement sur la réponse temporelle.

Pour cela, nous allons faire apparaître ce couple de frottement à $t=0,1s$ pour bien voir la différence avec le modèle sans frottement.

☞ Saisir la valeur de $0,022Nm$ à $0,1s$.

▷ Simuler avec une durée de simulation $0,15s$. Bien agrandir la fenêtre du graphique. Conclure. Quel nom peut-on donner à l'entrée $C_r(t)$ du point de vue de l'étude causale des SLCI ?



6. SIMPLIFICATION DU MODELE 2^{ème} ORDRE EN 1^{er} ORDRE

La fonction de transfert du moteur calculée avec ses données numériques est :

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U_{mot}(p)} = \frac{4,7}{2,7 \cdot 10^{-6} p^2 + 4,2 \cdot 10^{-3} p + 1} = \frac{4,7}{(1 + 3,5 \cdot 10^{-3} p)(1 + 0,76 \cdot 10^{-3} p)}$$

Il apparaît donc, pour ce modèle 2^{ème} ordre sur-amorti, deux constantes de temps :

$$\tau_1 = 0,76 \text{ ms} \text{ et } \tau_2 = 3,5 \text{ ms}.$$

☞ Parmi ces deux constantes de temps, laquelle est la **constante de temps « mécanique »**, conséquence entre autre, de l'inertie mécanique du rotor, et laquelle est la **constante de temps électrique**, conséquence entre autre, de l'inductance ?

On considère que ces constantes de temps sont suffisamment distinctes (rapport $\frac{3,5}{0,76} = 4,6$) pour simplifier la fonction de transfert de 2^{ème} ordre en 1^{er} ordre :

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U_{mot}(p)} = \frac{4,7}{(1 + 3,5 \cdot 10^{-3} p)(1 + 0,76 \cdot 10^{-3} p)} \approx \frac{4,7}{1 + 3,5 \cdot 10^{-3} p}$$

Bien entendu, comme l'approximation ci-dessus l'indique, la partie la plus lente impose sa réponse par rapport à la partie la plus rapide. On garde donc la constante de temps la plus élevée.

La simulation suivante a pour but de comparer les deux modèles par leur réponse temporelle sur le même graphique.

☞ Ouvrir le schéma bloc « *Schema_Bloc_3_MCC-1er ordre* ». Modifier le bloc nécessaire.

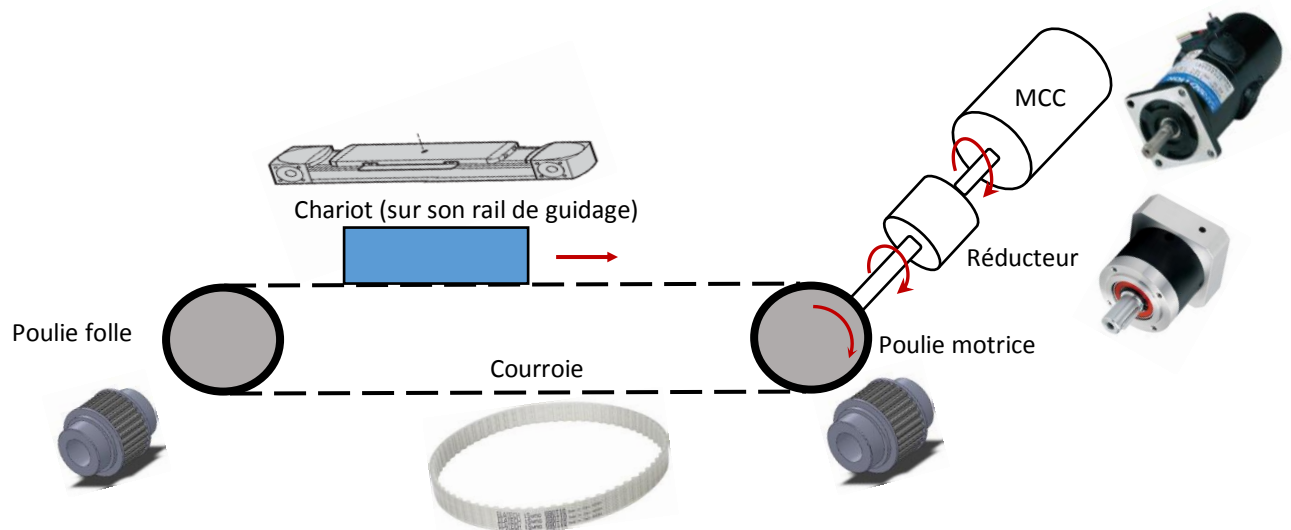
▷ Simuler. Comparer. Zoomer sur la zone intéressante pour vérifier qu'on a bien un 1^{er}/2^{ème} ordre Conclure sur la pertinence de l'approximation.

☞ Si on choisit le modèle 1^{er} ordre, quel problème se pose si on veut mettre en place le couple de frottement sec ?

PARTIE III – MISE EN CONTEXTE : SYSTEME CONTROL'X EN BOUCLE OUVERTE

1. PRESENTATION

Le rotor du moteur CC maintenant modélisé, entraîne un réducteur. L'arbre de sortie du réducteur entraîne une poulie dont la courroie est solidaire du chariot à déplacer en translation sur son rail.



Vitesse de l'arbre d'entrée du réducteur (=vitesse rotor MCC) : ω_{mot} (rad/s)

Vitesse de sortie du réducteur (=vitesse **poulie** motrice) : ω_{pou} (rad/s)

Vitesse de translation du chariot : v_{ch} (m/s).

Rapport de réduction du réducteur : $i = \frac{1}{3}$

Rayon de la poulie : $R_{pou} = 24,67 \text{ mm}$

On a donc la vitesse du chariot avec la relation classique : $v_{ch} = R_{pou} \cdot \omega_{pou}$

Inertie de l'ensemble mobile {Réducteur, accouplement, deux poulies, courroie, chariot}

L'inertie de la chaîne de puissance mécanique à entraîner va intervenir dans la modélisation. Il est possible de calculer l'inertie totale de l'ensemble mobile rapportée au rotor moteur. Ce calcul simple sera vu en 2^{ème} année de CPGE.

Le moment d'inertie équivalent à prendre en compte est : $J_{eq} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Vous remarquez que l'inertie totale est plus élevée (heureusement !) que l'inertie du rotor seul : $2,8 \cdot 10^{-4} > 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. L'inertie du rotor moteur n'intervient finalement que pour 13% de l'inertie totale.

Coefficient de frottements visqueux de l'ensemble mobile

Comme pour l'inertie, l'ensemble mobile est le siège de frottements visqueux. Le nouveau coefficient de frottement visqueux rapporté au rotor moteur à prendre en compte est : $f_{v-eq} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Nms/rad}$.

Il est presque 10 fois supérieur au coefficient du rotor seul !

Couple de frottement sec

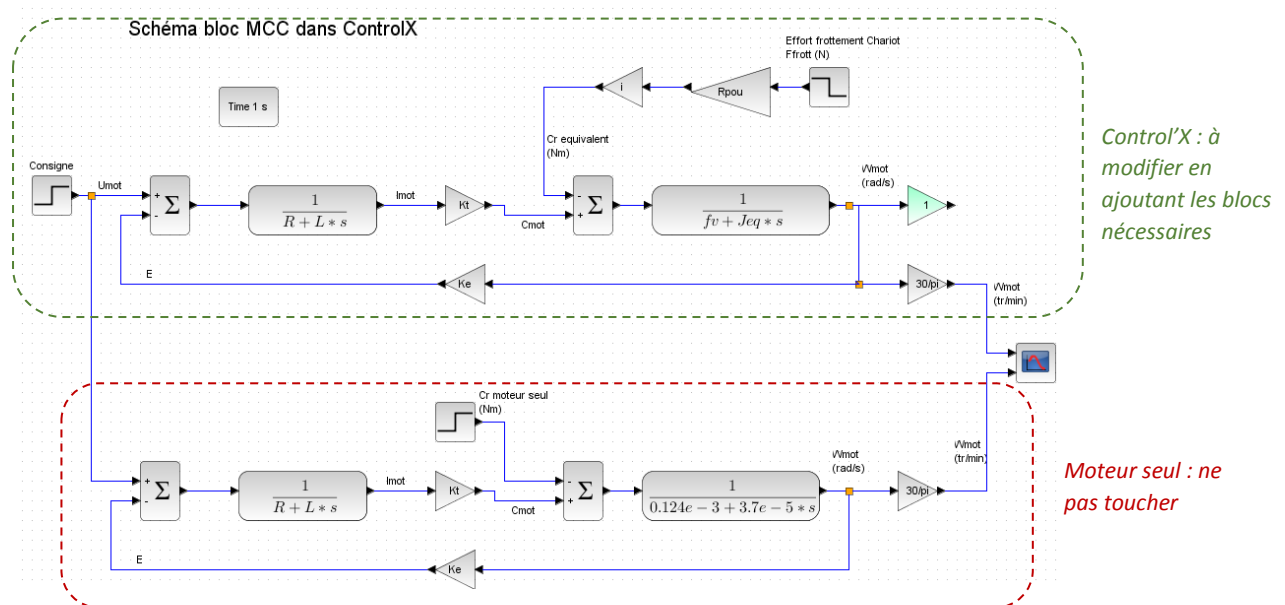
Là encore, les frottements sec entre pièces mécaniques mobiles entre elles, est à prendre en compte. Je vous propose de mesurer le couple de frottement sec directement sur le système Control'X pendant la séance de TP. Je ferai la démonstration devant vous...

Tension d'alimentation moteur

Par construction, le variateur alimentant le moteur de Control'X est limité à la tension maximale U_{mot} de 40V. Cela dans le but de protéger le moteur. C'est la tension que nous retiendrons pour la simulation qui suit.

2. MODELISATION POUR VISUALISER LA VITESSE DU CHARIOT v_{ch}

📄 Ouvrir le schéma bloc « *Schema_Bloc_4_ControlX-BO* ». Vous obtenez ceci :



📄 Modifier le schéma bloc de la partie Control'X : ajouter les blocs nécessaires pour visualiser la vitesse du chariot V_{ch} en m/s.

Saisir les valeurs nécessaires de i , R_{pou} , F_{frott} , U_{mot} , J_{eq} , f_v .

▷ Simuler. Bien entendu, n'oubliez pas d'adapter la durée de la simulation quitte à relancer la simulation.

📄 Noter la vitesse du chariot maximale atteinte.

- ☞ Comparer la vitesse du rotor moteur ω_{mot} , quand il est seul et quand il entraine l'équipage mobile de Control'X : temps de réponse $T_{r_{5\%}}$, et vitesse finale atteinte $\omega_{mot\infty}$.
- ☞ Quelle est la cause du temps de réponse plus élevé ?
- ☞ Quelle est la cause d'une vitesse finale diminuée ?

3. VISUALISATION DE L'INTENSITÉ MOTEUR i_{mot}

- ☞ Ajouter les blocs nécessaires pour visualiser sur un même graphique les variations de l'intensité moteur pour le moteur seul et le moteur entrainant la charge de Control'X.
- ▷ Simuler. Conclusion.

4. VISUALISATION DE LA POSITION DU CHARIOT x_{ch}

- ☞ Ajouter les blocs nécessaires pour visualiser la position du chariot x_{ch} en mm.
- ▷ Simuler. Conclusion.

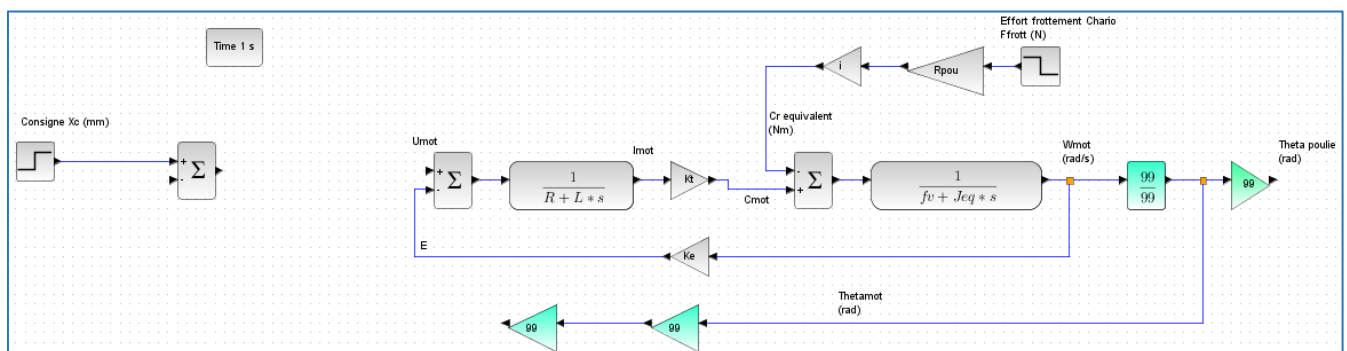
PARTIE IV – ASSERVISSEMENT EN POSITION

On souhaite maintenant asservir la position du chariot.

C'est-à-dire que la consigne saisie par l'utilisateur est maintenant la position désirée du chariot (ce n'est plus la tension moteur), et la sortie est la position réelle du chariot.

☞ Ouvrir le modèle Scilab/Xcox : « *Schema_Bloc_5_ControlX-Asservi* »

Le schéma bloc qui apparait ressemble à ceci.



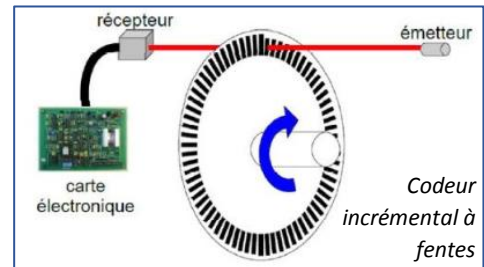
Vous vous doutez que les blocs colorés comportant la valeur « 99 » sont à renseigner, et qu'il est nécessaire d'insérer de nouveaux blocs.

☞ Compléter le schéma bloc partiel en tenant compte des indications suivantes :

- L'entrée est la position consigne en mm
- La sortie est la position réelle en mm
- La mesure de la position du chariot est indirecte. Un codeur incrémental à fentes est placé sur le rotor moteur. Il renvoie 2000 impulsions par tour de rotor. Ce flux d'impulsions est ensuite converti en mm par traitement électronique ($gain = 0,02583 \text{ mm/imp}$).



Codeur sur le rotor
moteur
(Derrière le système
Control'X)



- La position du chariot X_{ch} (mm) est comparée à la position consigne X_{cons} (mm) avec un comparateur. L'erreur $X_{cons} - X_{ch}$ est ensuite traitée par le correcteur.
- Le correcteur est de type proportionnel, gain $K_{corr} = 1$
- Le variateur pilotant le moteur est inséré entre le correcteur et le moteur. Son gain est noté : $Var = 3,83$
- Insérer un « scope » pour visualiser la tension moteur U_{mot} et l'intensité I_{mot} .
- Pour la consigne : saisissez une valeur personnelle réaliste (vous connaissez Control'X)
- Et... n'oubliez pas : quand on utilise une variable formelle dans un bloc, on la définit d'abord dans le contexte avec sa valeur numérique, puis, on crée le bloc avec la variable. Sinon... message d'erreur !



▷ Simuler. N'oubliez pas d'adapter la durée de simulation pour une observation pertinente.

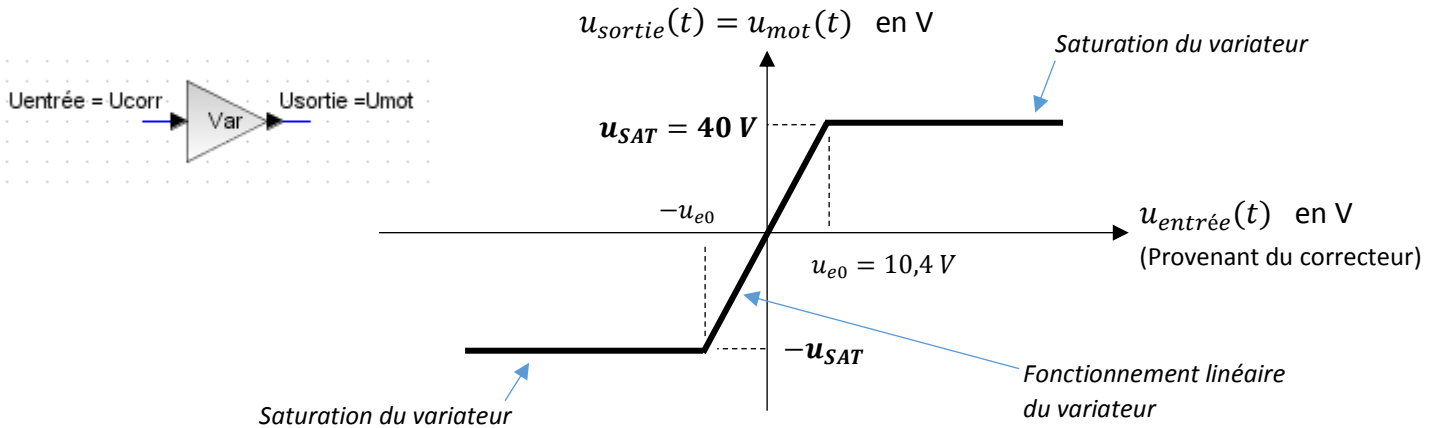
☞ Noter la valeur de l'intensité maximale atteinte I_{max} , et la tension maximale U_{max} .

☞ Conclusion, recul ...

PARTIE V – PRISE EN COMPTE DE LA SATURATION DE LA COMMANDE MOTEUR

Le variateur pilotant le moteur ne peut pas délivrer une tension infinie ! Cela est évident. Il y a donc une tension maximale délivrable. Cette tension de saturation est $U_{sat} = 40V$ pour Control'X. La courbe ci-dessous illustre le phénomène de saturation.

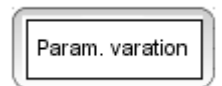
Quand la tension d'entrée du variateur dépasse un certain seuil u_{e0} la tension de sortie reste constante malgré l'augmentation de $u_{entrée}(t)$, et vaut le tension de saturation U_{sat} .



Objectif : étudier l'influence de la saturation de la commande du moteur sur la réponse temporelle du système.

Il faudra donc visualiser deux réponses simultanément : la réponse avec saturation du variateur et la réponse sans saturation.

Il faut donc utiliser le bloc « *paramètre variation* » que vous avez utilisé précédemment. Il permettra de visualiser les réponses pour deux valeurs de U_{sat} (à déterminer) permettant de superposer les deux courbes. Vous laisserez la visualisation de l'intensité, tension et position.

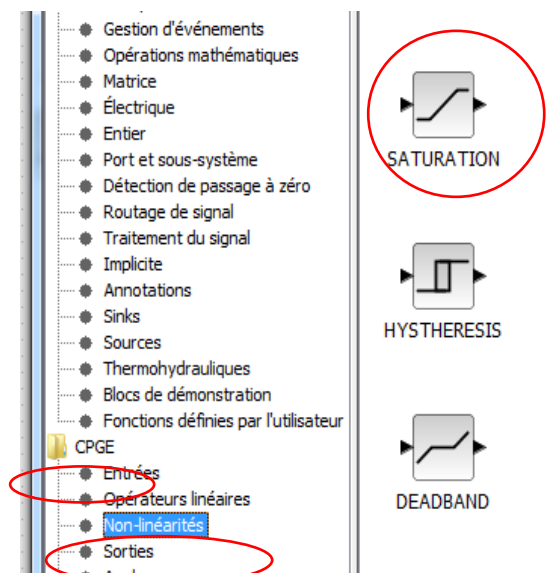


📁 Le bloc saturation se trouve ici.

📁 A vous de mobiliser vos connaissances acquises pendant ces TP. Vous savez tout faire maintenant.

👉 Après simulation et affichage des courbes, vous noterez :

- Les deux temps de réponse à 5%
- Les deux erreurs
- Les deux dépassements relatifs
- Les deux tensions maxi et l'existence de la saturation
- Les deux intensités maxi



👉 Vérifier la cohérence entre la tension/intensité maxi et les données constructeur.

FIN DU SUJET

ANNEXE 1 – CARACTERISTIQUES MOTEUR CONTROL'X

Sanyo T511-T012-EL8



Caractéristique	Température	Symbole	Unité	Valeur	Observations
Puissance nominale	**	P_{nom}	W	110	
Tension nominale	**	U_{nom}	V	75	
Couple nominal	**	C_{nom}	N.m	0.34	
Courant nominal	**	I_{nom}	A	2.0	
Vitesse nominale	**	ω_{nom}	tr/min	3000	soit 314 rad/s
Couple maxi en continu	**	C_{cont}	N.m	0.42	
Couple maxi instantané	**	C_{max}	N.m	3.4	
Courant maxi en continu	**	I_{cont}	A	2.2	
Courant maxi instantané	**	I_{max}	A	18	
Vitesse maximale			tr/min	5000 ^(a)	soit 523 rad/s
Couple de friction	*	$C_{frott-moteur}$	N.m	0.022	
Accélération instantanée	maxi **		rad/s ²	91.9×10^3 ^(a)	
Coefficient de frottement visqueux	*	$f_{D-moteur}$	N.m/min	0.013×10^{-3}	soit $0.124e-3$ N.m/(rad/s)
Constante de couple	*	k ou k_c	N.m/A	0.21	
Constante de force contre électromotrice	*	k ou k_e	V.min / tr	21.8×10^{-3}	
Moment d'inertie du rotor	*	J_{mot}	kg.m ²	0.037×10^{-3}	
Résistance d'induit	*	r	Ω	5.1	
Inductance d'induit	*	L	mH	3.2	
Constante de temps mécanique	*	$\tau_{méca}$	ms	4.3	
Constante de temps électrique	*	$\tau_{élec}$	ms	0.63	
Constante de temps thermique	**		min	30	
Résistance thermique	**		K/W	2.4	
Température limite	**		°C	105	

(a) : obtenue pour la tension maximale 112 V