

Asservissements

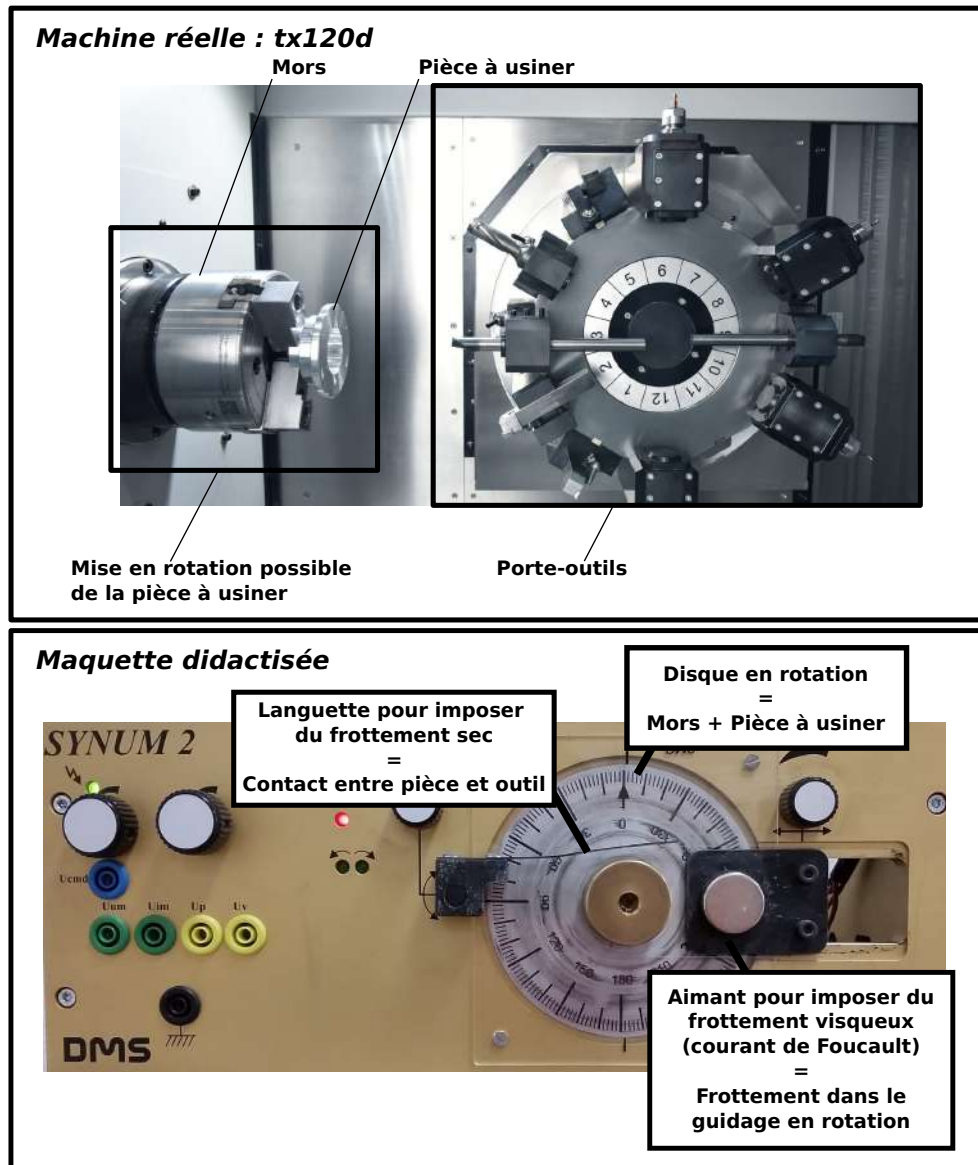
Choix d'un correcteur pour le pilotage d'une machine d'usinage

PSI : Lycée Rabelais

Mise en situation

On s'intéresse ici à une machine d'usinage multi-axes chinoise référencée tx120d. Cette machine a globalement deux modes de fonctionnement :

- Mode 1 : "vitesse de rotation constante de la pièce et déplacement de l'outil". Dans ce cas, il y a donc un **asservissement en vitesse de rotation des mors**.
- Mode 2 : "positionnement angulaire de la pièce et déplacement de l'outil qui tourne à vitesse constante". Dans ce cas, il y a donc un **asservissement en position angulaire des mors**.



Pour étudier les problématiques associées à ce double pilotage, nous travaillerons sur une maquette didactisée ayant

un axe motorisé instrumenté pour faire des mesures. Cette maquette est produite par la société DMS et est disponible dans la salle de TP. Elle est notamment équipée :

- D'un capteur de vitesse angulaire et d'un capteur de position angulaire ;
- D'un moteur qui entraîne directement le disque gradué visible ;
- D'une carte de commande et d'une interface logicielle avec l'ordinateur ;
- D'un aimant permettant, en créant des courants de Foucault, de représenter le frottement visqueux présent dans le guidage par roulements à billes sur le système réel ;
- D'une languette permettant de représenter le contact entre la pièce à usiner et l'outil.

Le sujet se scinde en trois parties. Dans la première, l'objectif sera de modéliser la motorisation et d'identifier les valeurs numériques des différents paramètres du système. Dans la deuxième, on mettra en œuvre une correction afin de piloter le système efficacement en mode 1, c'est-à-dire pour un asservissement en vitesse de rotation. Enfin, une troisième partie permettra de choisir la commande appropriée pour une commande en mode 2, c'est-à-dire pour un asservissement en position angulaire.

1 Modélisation

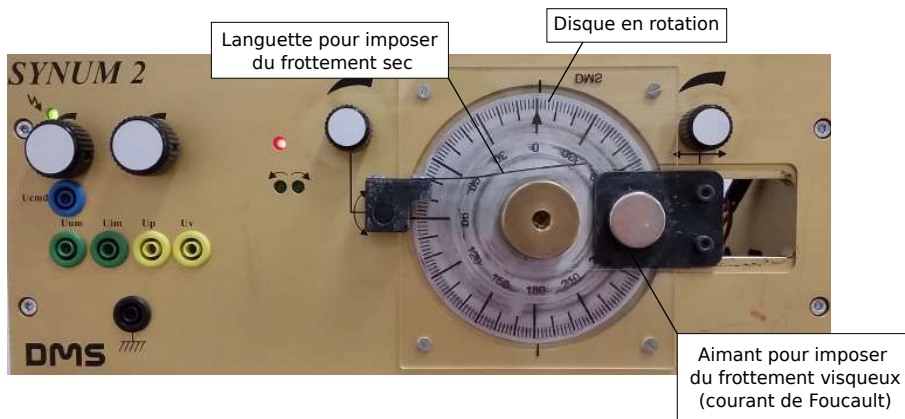
1.1 Présentation

La carte de commande permet de commander le moteur "en courant". Cela signifie qu'un asservissement en courant est déjà implémenté au sein de la carte. On admettra que cet asservissement est précis et que son temps de réponse est négligeable (devant le temps de réponse du système étudié). On admettra donc que le rapport entre la consigne courant (notée $i_c(t)$ qui sera exprimée en A) et le courant dans l'induit moteur (noté $i_m(t)$ exprimé en A également) est égal à 1.

On donne également k_m la constante de couple du moteur ($k_m = 43,8 \cdot 10^{-3}$ N.m/A) de telle sorte que le couple moteur $C_m(t)$ vérifie la relation $C_m(t) = k_m \cdot i_m(t)$.

1.2 Modélisation mécanique

On suppose ici que l'arbre en rotation, noté 1, est en liaison pivot avec le bâti, noté 0. Cette liaison est supposée parfaite d'un point de vue énergétique.



• L'arbre en rotation a un moment d'inertie J autour de l'axe de rotation et son centre d'inertie G est situé sur l'axe de rotation.

• Pour retrouver, sur la maquette, des résultats proches de ceux observés sur le système réel, un aimant sera rapproché du disque afin de créer des courants de Foucault. Un couple de frottement proportionnel à la vitesse de rotation

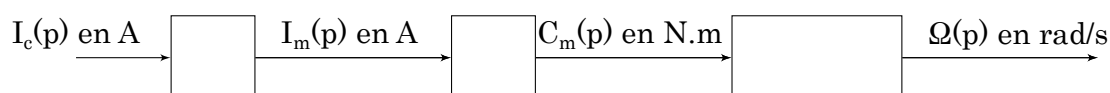
sera alors créé. Il s'agit bien de ce que l'on appelle plus généralement un frottement fluide (ou frottement visqueux). On notera f (en N.m/(rad/s)) le coefficient de proportionnalité de telle sorte que le couple de frottement sera noté $C_f(t) = -f \cdot \omega(t)$.

• Dans un premier temps, la languette n'est pas mise en contact avec le disque. On pourra alors négliger les frottements secs qui seraient créés par le contact entre la pièce à usiner et l'outil.

Question 1. En utilisant le théorème de l'énergie cinétique, déterminer la relation entre $C_m(t)$ et $\omega(t)$.

1.3 Calculs préliminaires

Question 2. Compléter le schéma-bloc ci-dessous. On notera pour la suite $A(p)$ (en majuscule), la transformée de Laplace de la variable $a(t)$ (en minuscule).



Question 3. Déterminer la fonction de transfert $BO1(p) = \frac{\Omega(p)}{I_c(p)} = \frac{K_{BO}}{1 + T_{BO} \cdot p}$. Identifier K_{BO} et T_{BO} .

Question 4. Tracer l'évolution temporelle de la vitesse de rotation pour une entrée en échelon de courant d'amplitude I_{c0} . Faire apparaître les temps caractéristiques et la valeur finale de la vitesse de rotation.

1.4 Expérimentations et exploitation

La maquette didactisée permet de régler les paramètres détaillés ci-dessous.

TP - Mode opératoire :

- Choisir le mode de commande "en boucle ouverte" :


```

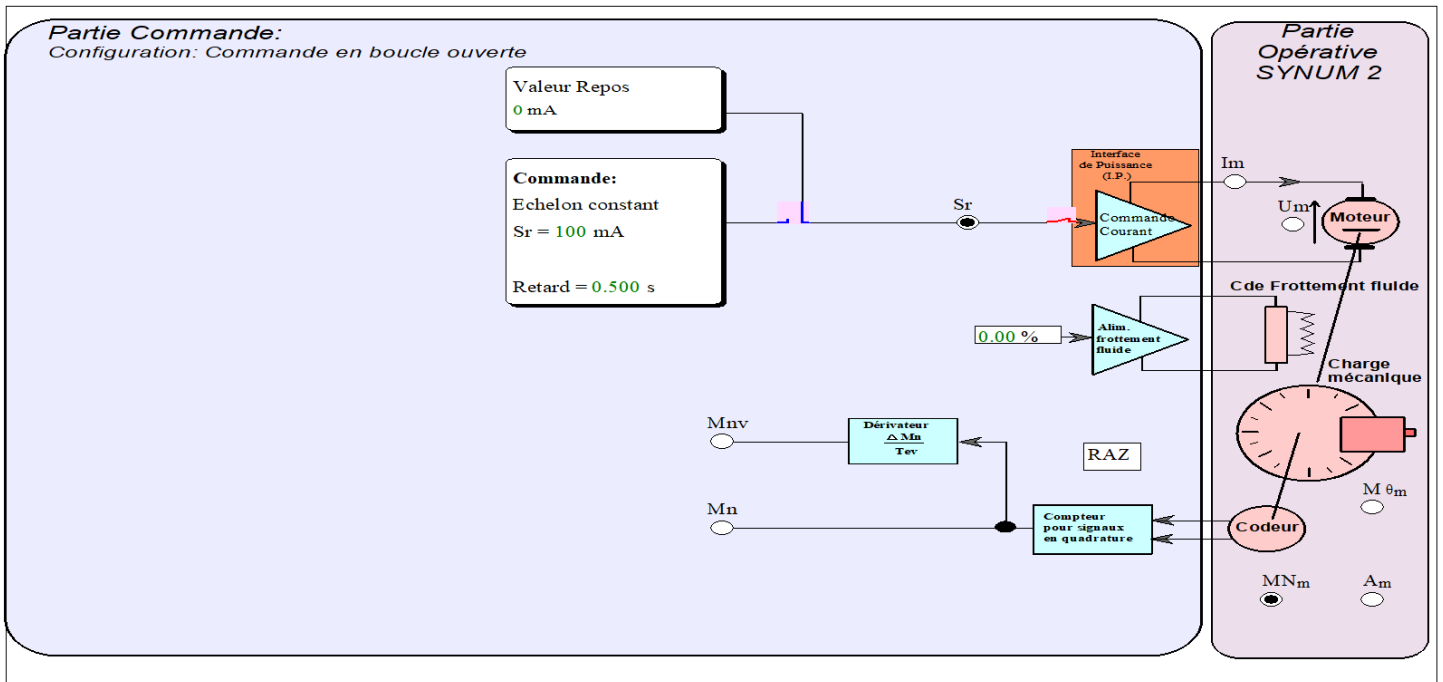
          graph LR
            A[Choisir] --> B[Mode de commande]
            B --> C[Boucle Ouverte]
          
```
- Choisir le type d'interface de puissance "commande courant" :


```

          graph LR
            A[Choisir] --> B[Interface de puissance]
            B --> C[Commande courant]
          
```
- Choisir les unités :


```

          graph LR
            A[Choisir] --> B[Unités]
            B --> C[Unités I.P]
          
```
- Vous pouvez désormais ouvrir/fermer le circuit à partir des interrupteurs, et modifier les paramètres (en vert) via un double-clic.
- On choisira pour l'expérience une grandeur de repos égale à 0 mA, un échelon constant de **100 mA** et un retard de 0,5 s.
- Il ne reste qu'à sélectionner les grandeurs à visualiser, lancer l'expérience et afficher les résultats.



Écran disponible pour le réglage de l'essai

Question 5. TP - Après configuration du système, relever l'évolution au cours du temps de la vitesse de rotation en fonction du temps pour une entrée en échelon de courant. **Le résultat de la question précédente est donné sur l'annexe : Essai en boucle ouverte.**

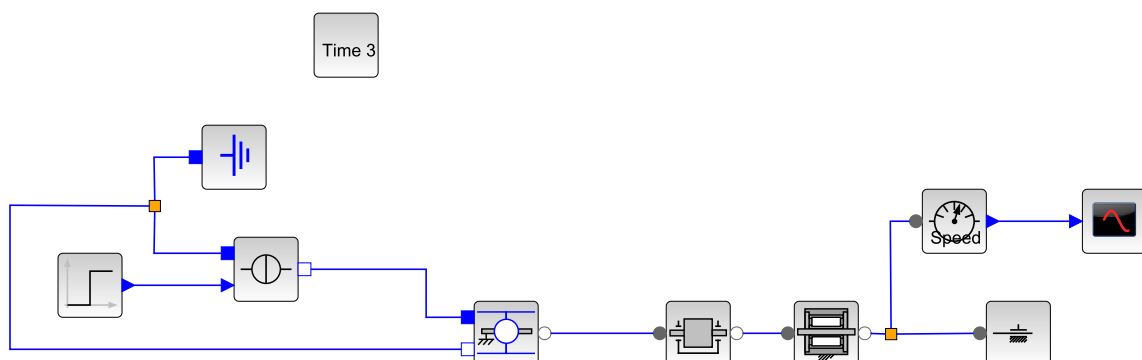
Question 6. Est-ce en accord avec la fonction de transfert $BO1(p)$ déterminée précédemment ? Justifier.

Question 7. Identifier les paramètres K_{BO} et T_{BO} .

Question 8. En déduire les valeurs de f et J .

1.5 Modélisation multi-physique

Question 9. TP - Sur *Scilab*, réaliser le schéma-bloc ci-dessous avec les outils de la bibliothèque multi-physique SIMM. Voir tutoriel en annexe si besoin.



Vous trouverez les différents blocs dans les bibliothèques suivantes :

- Échelon d'entrée : SIMM > Signaux > Source > MBS_Step
- Générateur de courant : SIMM > Électrique > Sources > CEAS_PrefdefCurrent
- Masse électrique : SIMM > Électrique > Sources > MEAB_Ground
- Constante de couple : SIMM > Électrique > Composant basique > Passif > CEAB_EMFGEN
- Inertie du solide en rotation : SIMM > Mécanique > Rotation 1D > Basique > MMR_Inertia

- Frottement dans la liaison pivot : SIMM > Mécanique > Rotation 1D > Basique > RotationalFriction
- Solide libre en rotation : SIMM > Mécanique > Rotation 1D > Basique > CMRC_Free
- Mesure de la vitesse : SIMM > Mécanique > Rotation 1D > Mesure > CMRS_GenSensor !!! **Attention !!!**
Il faut bien sélectionner le bloc dénommé *Position*, ensuite, en double-cliquant dessus, on peut le modifier pour qu'il mesure bien la vitesse de rotation.
- Visualisation : SIMM > Utilitaires > Visualisation
- Temps de la simulation : SIMM > Utilitaires > Visualisation > IREP_TEMP

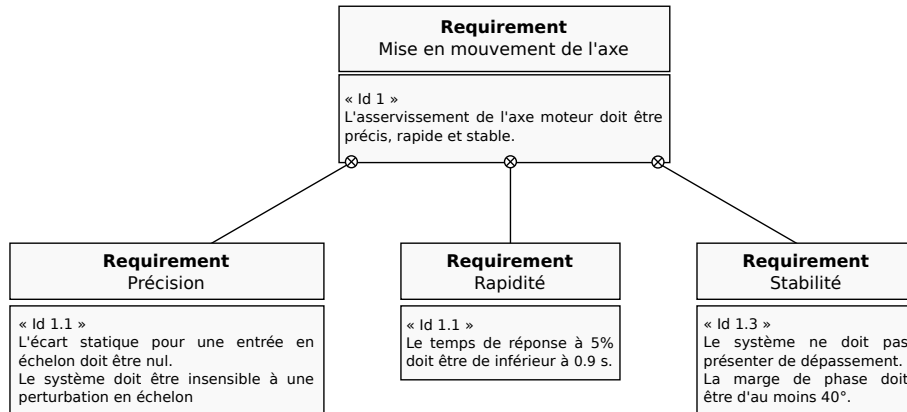
Question 10. Enregistrer votre modélisation. Régler les différents paramètres et notamment : I_{c0} , k_m , J , f et "pas de frottements secs" (on imposera 0 N.m).

Question 11. Lancer la simulation et vérifier que votre modèle numérique est bien en accord avec les résultats obtenus précédemment.

2 Régulation de vitesse

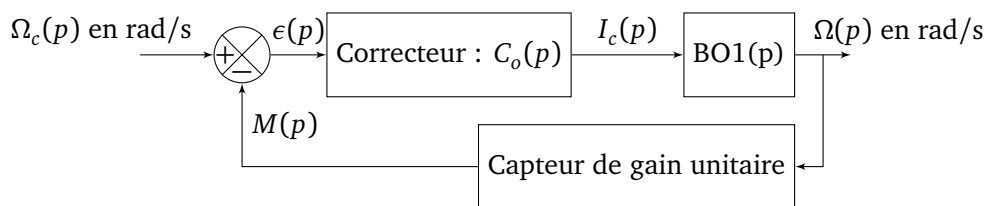
2.1 Objectif

Dans cette seconde partie, on souhaite mettre en œuvre le système en boucle fermée, asservi en vitesse. On étudiera notamment l'influence du bloc de correction afin de respecter le cahier des charges donné ci-dessous :



2.2 Hypothèses et notations

- Le moteur est toujours piloté en courant. Les résultats obtenus précédemment restent donc valables.
- La lamelle du frottement sec est maintenue en position escamotée. On pourra donc négliger le frottement sec global : cela signifie donc, dans cette partie, qu'il n'y a pas de perturbation.
- L'aimant reste en position de manière à créer des frottements visqueux.
- Le correcteur choisi, dans l'interface logicielle de la maquette, sera le "PID" (Proportionnel Intégral Dérivé) mais seule l'action proportionnelle sera utilisée dans un premier temps.
- D'après les résultats obtenus dans la partie précédente, le schéma bloc en boucle fermée peut donc se mettre sous la forme suivante :



Avec : $BO1(p) = \frac{K_{BO}}{1+T_{BO} \cdot p}$ où K_{BO} et T_{BO} sont les constantes déterminées dans la partie précédente.

Dans un premier temps, on choisira un correcteur proportionnel de gain k , on a donc $C_o(p) = k$. Ce gain k est réglable par l'utilisateur.

2.3 Calculs préliminaires

Question 12. Déterminer la fonction de transfert du système en boucle fermée $FTBF(p) = \frac{\Omega(p)}{\Omega_c(p)}$. Mettre cette fonction de transfert sous la forme canonique ci-dessous et identifier les paramètres caractéristiques définis ci-dessous.

$$FTBF(p) = \frac{K_{BF}}{1+\tau_{BF} \cdot p}$$

Question 13. Quelle est l'influence de la correction proportionnelle sur la rapidité du système. Déterminer la valeur de k qui permet de respecter l'exigence de rapidité du cahier des charges.


Question 14. Déterminer l'erreur relative (notée $\varepsilon\%$) pour une entrée en échelon de vitesse. Quelle est l'influence de la correction proportionnelle sur la précision du système ?

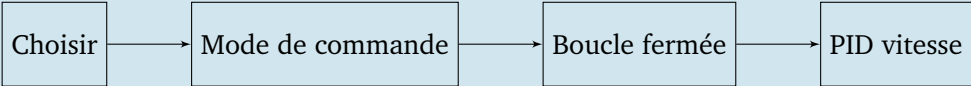
Question 15. Que peut-on dire des dépassements ?


Question 16. Ce correcteur est-il adapté ?

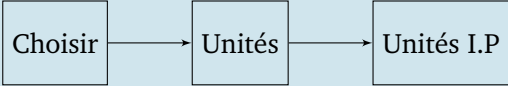
2.4 Expérimentations et exploitations

On cherche tout de même à valider le modèle mis en place en le confrontant à un résultat expérimental.

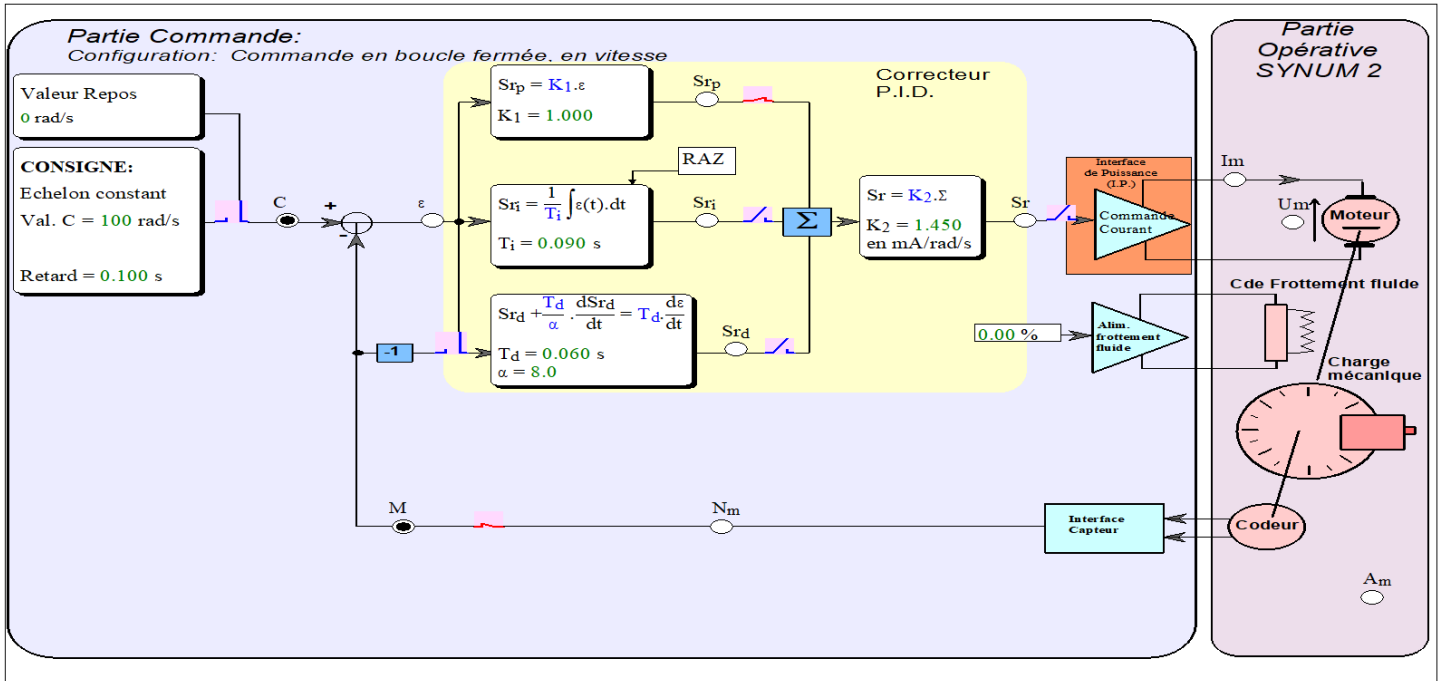
 **TP - Mode opératoire :**

- Choisir le mode de commande "en boucle fermée" :


```
graph LR; A[Choisir] --> B[Mode de commande]; B --> C[Boucle fermée]; C --> D[PID vitesse]
```
- Choisir le type d'interface de puissance "commande courant" :


```
graph LR; A[Choisir] --> B[Interface de puissance]; B --> C[Commande courant]
```
- Choisir les unités :


```
graph LR; A[Choisir] --> B[Unités]; B --> C[Unités I.P]
```
- Vous pouvez désormais ouvrir/fermer le circuit à partir des interrupteurs, et modifier les paramètres (en vert) via un double-clic.
- On choisira pour l'expérience une grandeur de repos égale à 0 rad/s, un échelon constant de 100 rad/s et un retard de 0,1 s.
- Configurer le correcteur de telle manière que $k = K_1.K_2$. On choisira $K_1 = 1$ et K_2 en fonction des résultats précédents.
- Il ne reste qu'à sélectionner les grandeurs à visualiser, lancer l'expérience et afficher les résultats.



Écran obtenu pour le fonctionnement en boucle fermée

Question 17. TP - Relever l'évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps. Le résultat de cette question est donné sur l'annexe : *Essai en boucle fermée : correction proportionnelle*.

Question 18. Vérifier la cohérence du résultat en mesurant le temps de réponse à 5% et l'erreur relative.

2.5 Utilisation d'un correcteur intégral

On utilise maintenant une correction intégrale de la forme : $C_o(p) = \frac{K_i}{p}$.

Question 19. Quel est l'avantage principal de ce correcteur ? Expliquer la différence avec un correcteur proportionnel.

Question 20. Choisir les valeurs de K_i qui permettent de respecter le critère relatif au dépassement.

Question 21. Dans le cas où le dépassement est à la limite de ce qui est acceptable par le cahier des charges, quel sera le temps de réponse à 5% ? Utiliser l'abaque donné en fin de sujet. Conclure.

2.6 Utilisation d'un correcteur proportionnel-intégral

Bien souvent, on évite d'utiliser un correcteur intégral pur. On préfère combiner les avantages des deux correcteurs vus précédemment. On utilise donc un correcteur de la forme : $C_o(p) = k \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p}\right)$.

Question 22. Montrer que ce correcteur peut se réécrire sous la forme : $C_o(p) = k \cdot \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p}$ et qu'il permet bien de respecter le critère de précision.

Pour déterminer les paramètres T_i et k , il existe de nombreuses méthodes. Nous utiliserons celle dite de la compensation du pôle dominant. Cela consiste à choisir T_i pour compenser le pôle dominant de la fonction de transfert en boucle ouverte sans correction. Cela revient donc simplement à choisir $T_i = T_{BO}$.

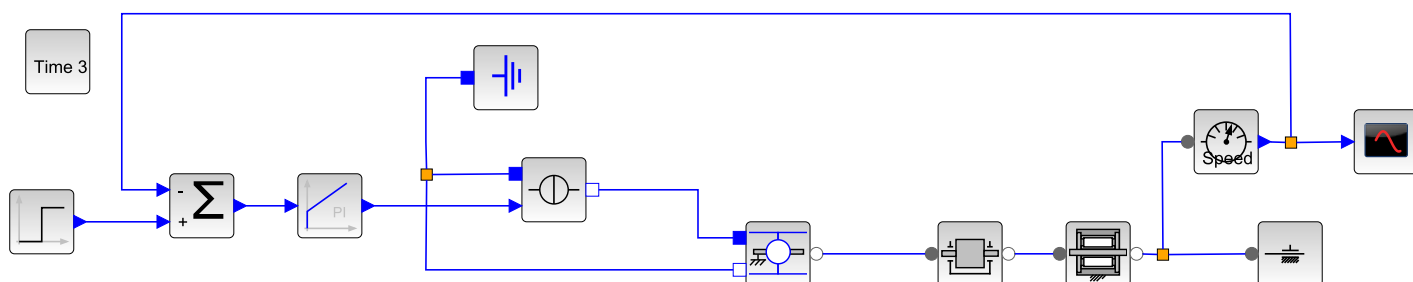
Question 23. Déterminer alors la fonction de transfert en boucle ouverte puis celle en boucle fermée.

Question 24. Déterminer la valeur de k pour avoir un temps de réponse à 5% de 0.9 s exactement.

Question 25. Un essai dans les conditions détaillées ci-dessus a été réalisé et est fourni en annexe : *Essai en*

boucle fermée : correction proportionnelle et intégrale. Vérifier que l'on retrouve bien les résultats attendus (rapidité et précision notamment).

Question 26. TP - Sur *Scilab*, réaliser le schéma-bloc associé à cet asservissement avec les outils de la bibliothèque multi-physique SIMM.



Vous trouverez les nouveaux blocs nécessaires dans les bibliothèques suivantes :

- Sommateur : SIMM > Signaux > Math > MBM_Add (en double-cliquant dessus, vous pourrez régler les signes)
- Correcteur Proportionnel-Intégral : SIMM > Signaux > Continu > MBC_PI

Question 27. Enregistrer votre modélisation.

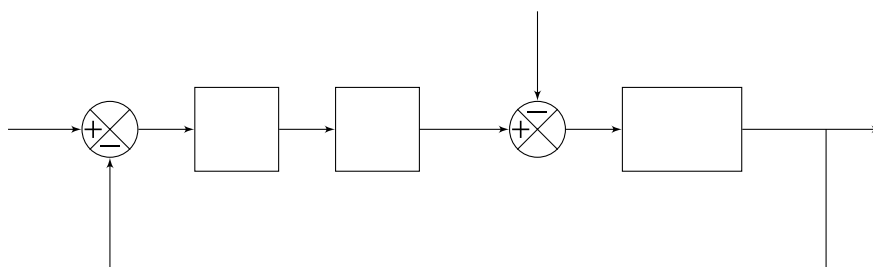
Question 28. Lancer la simulation et vérifier que votre modèle numérique est bien en accord avec les résultats précédents.

2.7 Prise en compte du contact entre l'outil et la pièce à usiner

On souhaite dorénavant prendre en compte le contact entre l'outil et la pièce à usiner. On suppose que ce contact rajoute donc un couple de frottement sec $C_r(t) = -\text{signe}(\omega(t)).C_{r0}$. Une valeur réaliste de C_{r0} - rapportée à la maquette didactisée - est $C_{r0} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ N.m.

Question 29. Reprendre la question 1 et déterminer cette fois-ci une relation entre $C_m(t)$, $C_r(t)$ et $\omega(t)$ lorsque $\omega(t) > 0$.

Question 30. Compléter alors le schéma-bloc ci-dessous de telle sorte que $\Omega_c(p)$ soit l'entrée et $\Omega(p)$ soit la sortie.



Question 31. Avec le correcteur proportionnel-intégral, l'asservissement sera-t-il sensible à une perturbation en échelon ?

Pour conclure sur le critère de rapidité, il est nécessaire d'utiliser le modèle numérique (il est impossible de réaliser un calcul analytique).

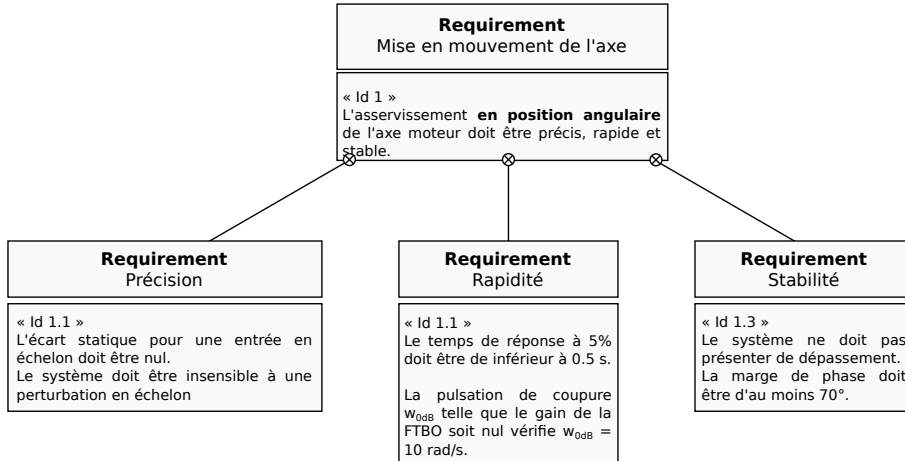
Question 32. Introduire, dans le bloc "frottements dans la liaison", le couple de frottement sec. La valeur de k déterminée dans la question ?? permet-elle de respecter le critère de rapidité ? Lors d'un usinage avec beaucoup d'enlèvement de matière, on peut avoir un couple plus important : $C_{r0} \approx 5 \cdot 10^{-3}$ N.m - rapportée à la maquette didactisée. Analyser l'influence d'un tel changement sur votre modélisation numérique.

3 Asservissement en position angulaire

Dans cette dernière partie, nous chercherons à concevoir l'asservissement en position angulaire des mors. On rappelle ici que la maquette est, bien évidemment, équipée d'un capteur permettant la mesure de la position angulaire.

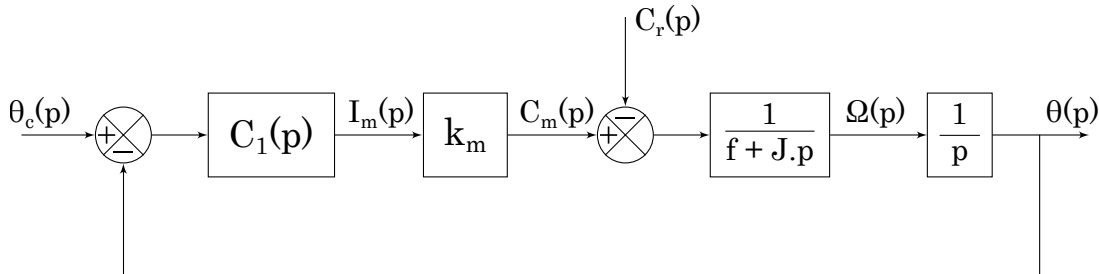
On note ici $\theta(t)$ l'angle réel de la pièce fixée dans les mors et $\theta_c(t)$ l'angle consigne.

On souhaite ici respecter le cahier des charges suivant :



3.1 Première proposition

Dans un premier temps, on propose un "simple" bouclage en mesurant la position angulaire. On note $C_1(p)$ le correcteur associé à cet asservissement.



Question 33. Montrer qu'il est nécessaire de choisir un correcteur de classe 1 au moins pour respecter les critères de précision.

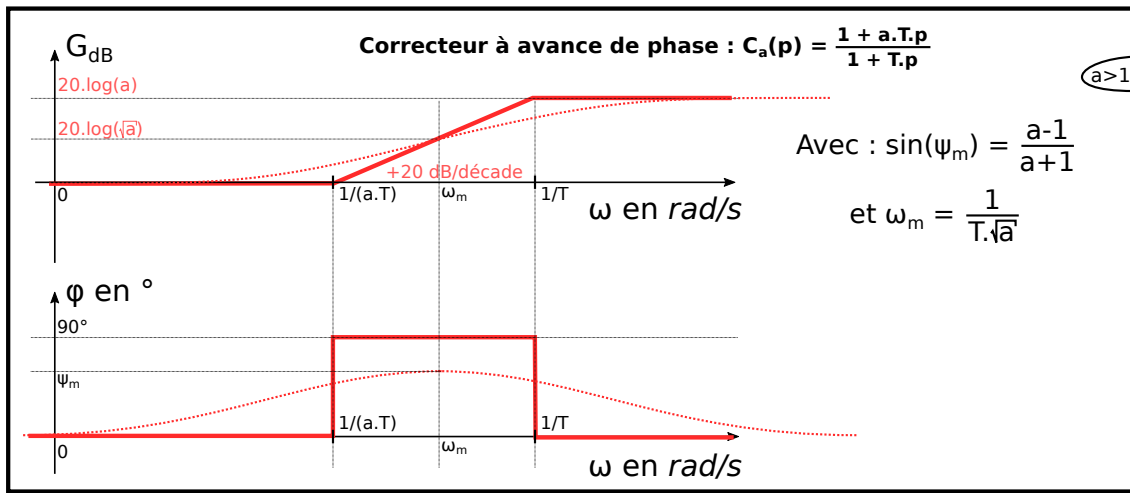
Question 34. Pour cette question, on suppose que l'on utilise un correcteur intégral de la forme $C_1(p) = \frac{K_1}{p}$. Montrer alors que le système devient instable.

3.2 Deuxième proposition

Pour palier ce problème, on propose d'utiliser un correcteur plus élaboré dit proportionnel-intégral et à avance de phase $C_1(p) = K_1 \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p} \frac{1 + a \cdot T \cdot p}{1 + T \cdot p}$ où $a > 1$. La partie $K_1 \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p}$ est la partie correcteur *proportionnel-intégral* et

$C_a(p) = \frac{1 + a \cdot T \cdot p}{1 + T \cdot p}$ correspond à la partie correcteur à *avance de phase*.

Ci-dessous, le diagramme de Bode du correcteur à avance de phase est donné ainsi que certaines caractéristiques dont notamment le degré de phase maximum.



On choisira pour la suite $T_i = T_{BO}$ pour compenser le pôle dominant de la fonction de transfert en boucle ouverte non-corrigée.

Question 35. Déterminer la valeur de a pour que la valeur maximale du déphasage de la FTBO soit égale à "Marge de phase limite du cahier des charges" - 180° .

Question 36. Déterminer ensuite T pour que ce maximum de phase soit ajouté en $\omega_{0dB} = 10 \text{ rad/s}$.

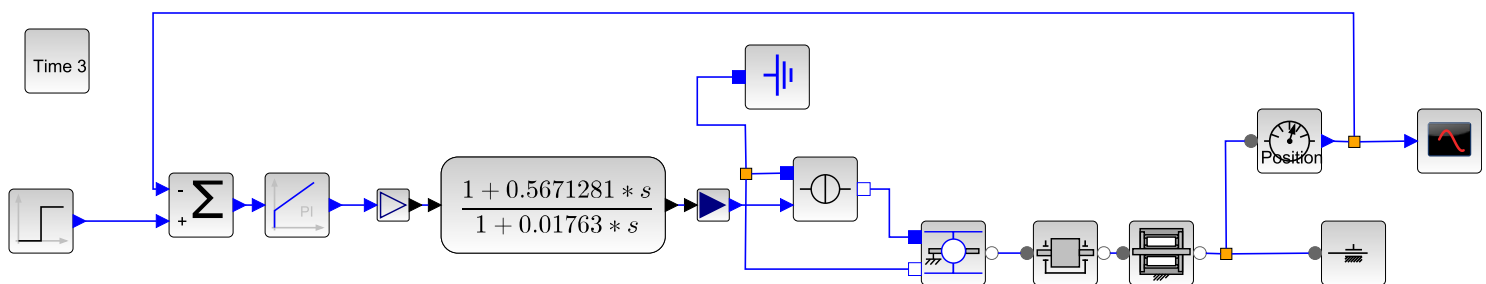
Question 37. Déterminer enfin K_1 pour que le gain de la FTBO soit bien nul pour $\omega_{0dB} = 10 \text{ rad/s}$.

3.3 Modélisation multi-physique

Question 38. TP - Sur *Scilab*, réaliser le schéma-bloc ci-dessous avec les outils de la bibliothèque multi-physique SIMM.

Vous trouverez les nouveaux blocs nécessaires dans les bibliothèques suivantes :

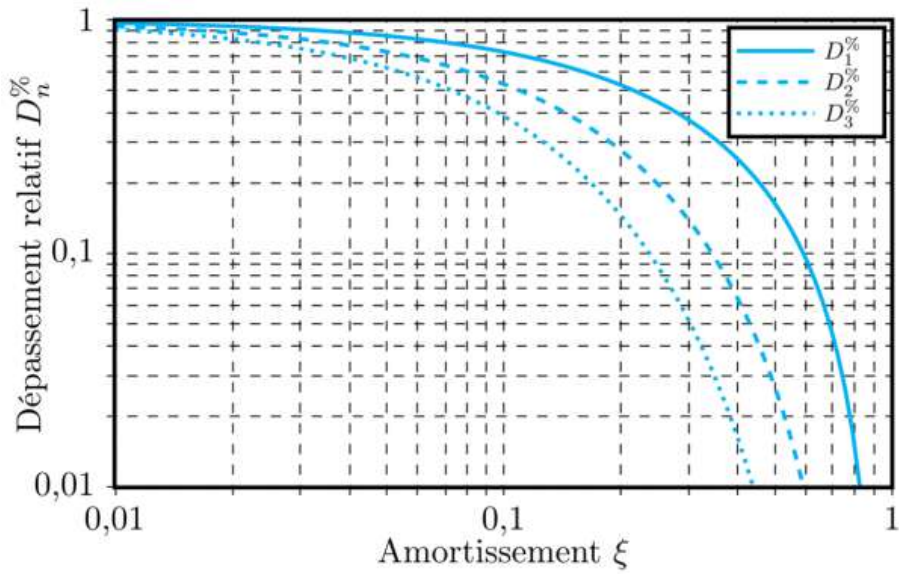
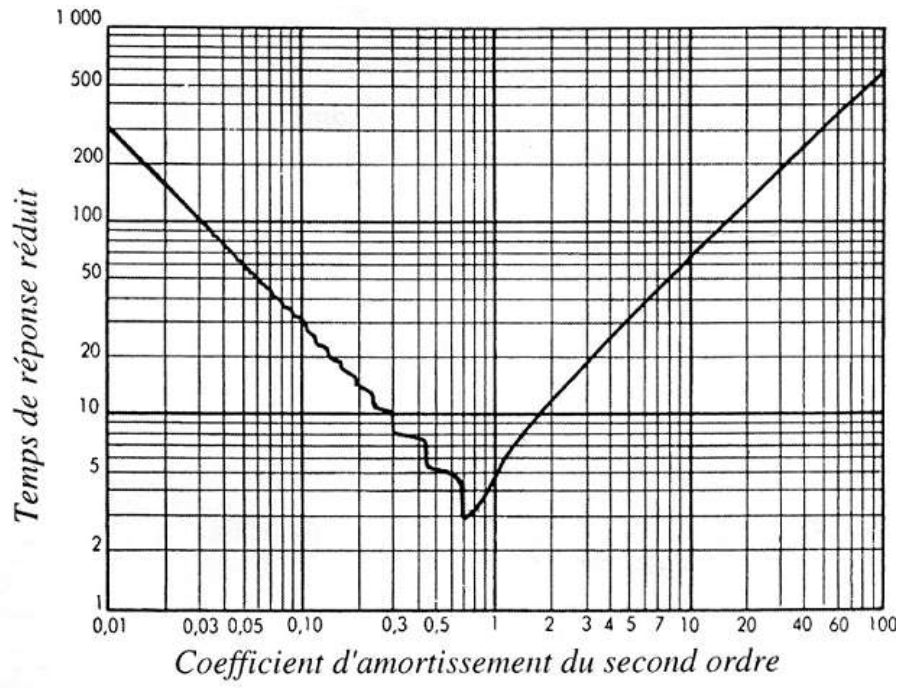
- Fonction de transfert : CPGE > Opérateurs linéaires > CLR - s est la variable p de Laplace
- Adaptateur d'entrée pour transformée de Laplace : SIMM > Utilitaires > Routage > CBI_RealInput
- Adaptateur de sortie pour transformée de Laplace : SIMM > Utilitaires > Routage > CBI_RealOutput



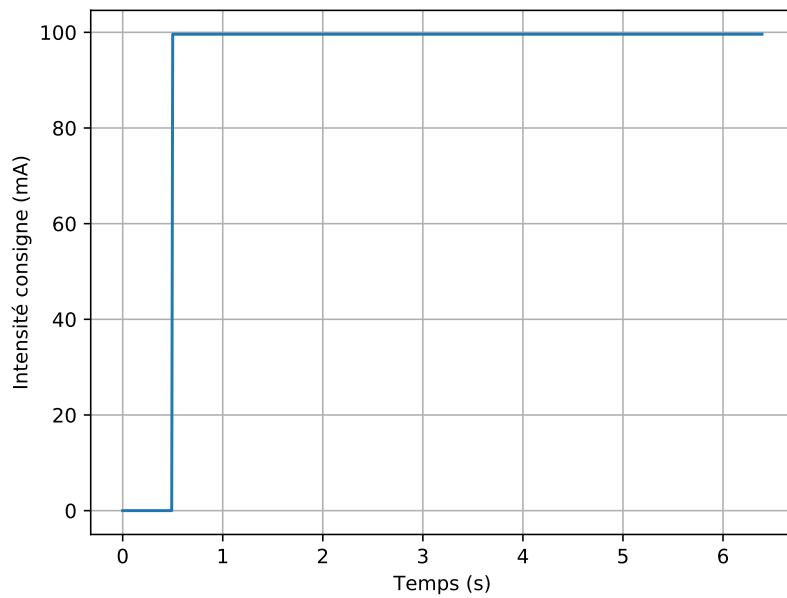
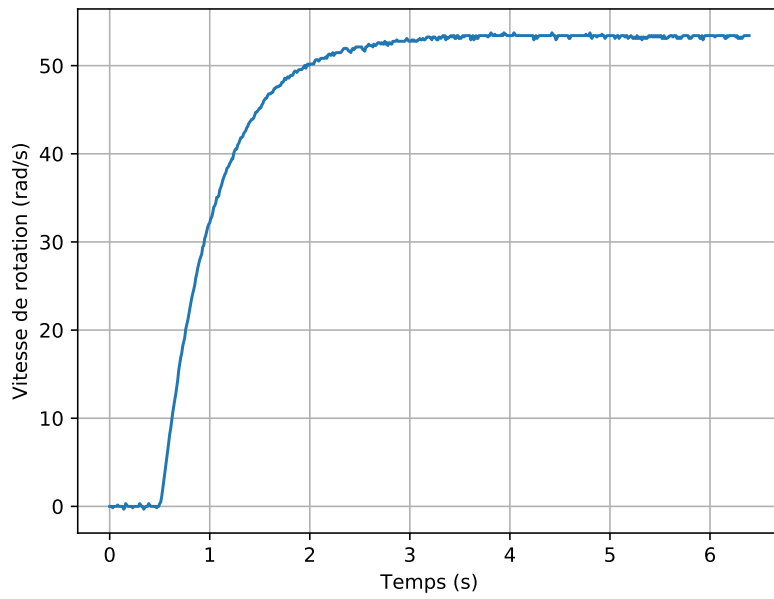
Question 39. Le correcteur permet-il de respecter le cahier des charges ?

Question 40. Proposer une autre structure d'asservissement (avec un bouclage interne de la vitesse de rotation). Quel type de correcteur pourrait permettre de répondre au cahier des charges avec cette nouvelle structure ?

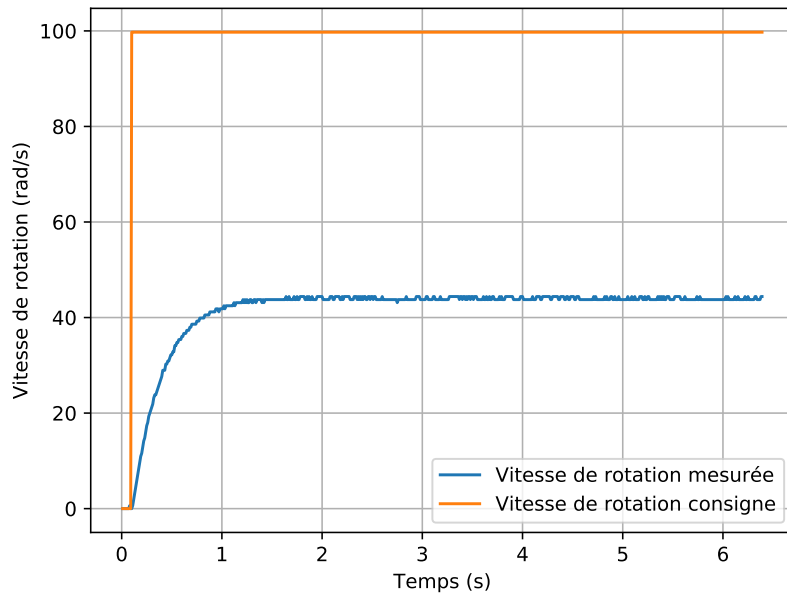
— Abaques —



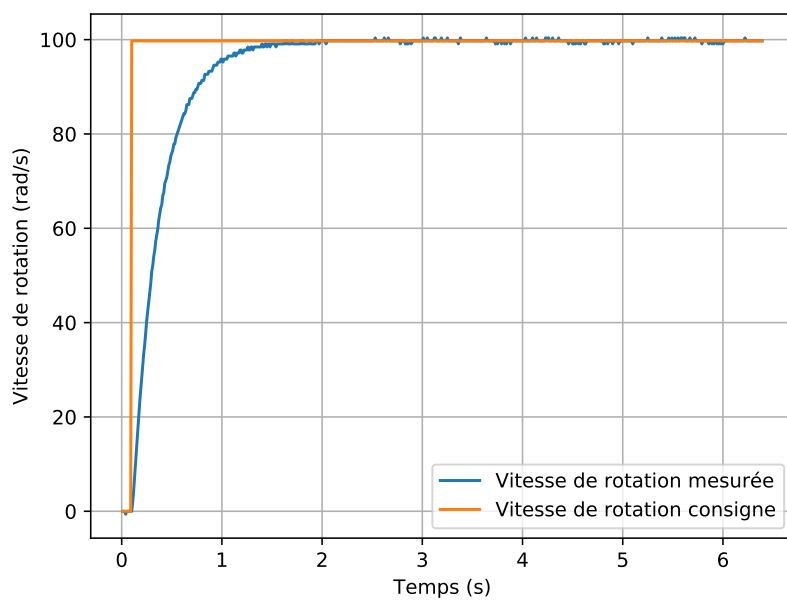
Essai en boucle ouverte avec $I_{c0} = 100 \text{ mA}$



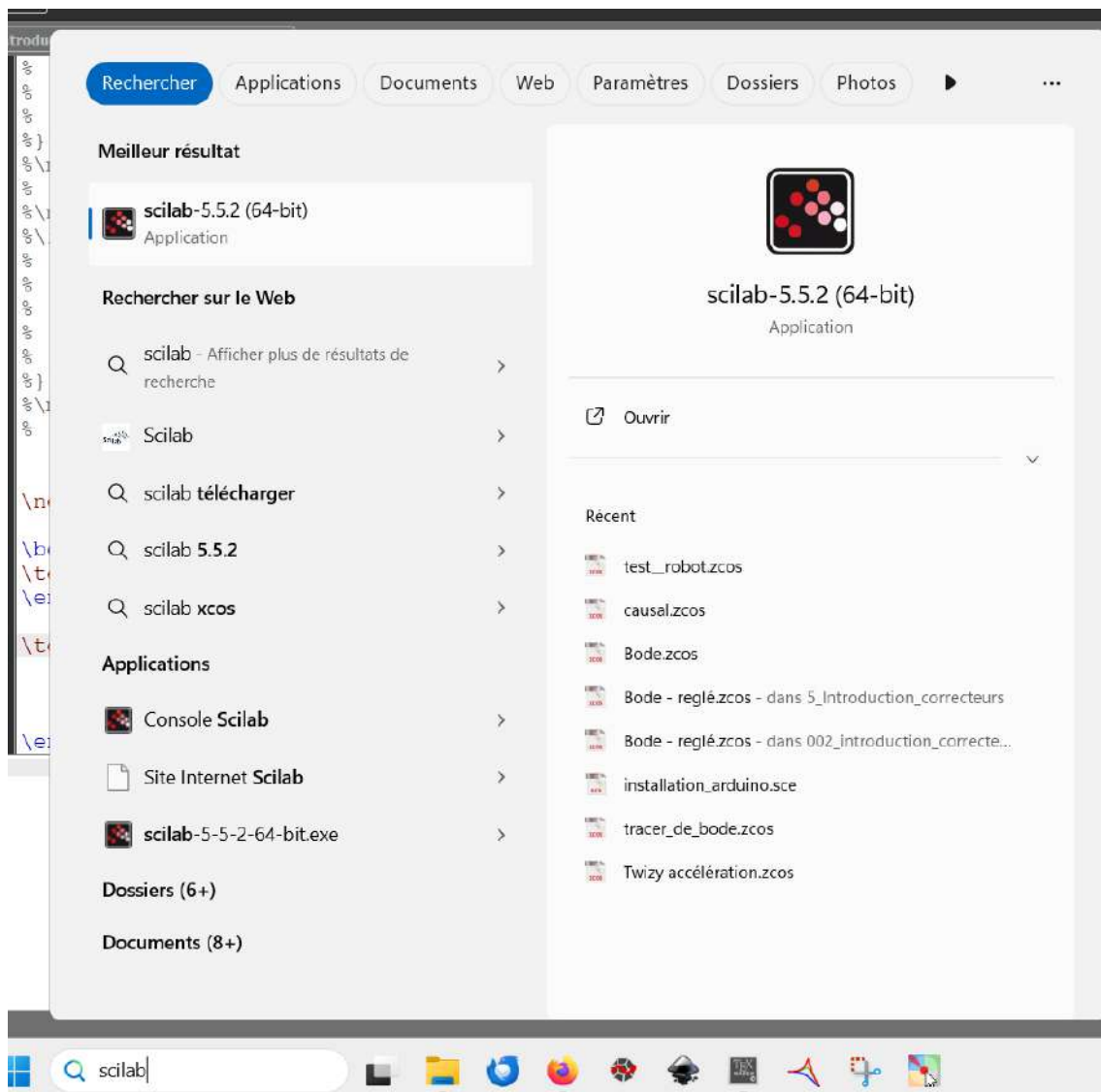
Essai en boucle fermée : correction proportionnelle avec $k = 1,45 \text{ mA}/(\text{rad/s})$



Essai en boucle fermée : correction proportionnelle-intégrale avec $k = 3,33 \text{ mA}/(\text{rad/s})$ et $T_i = T_{BO}$

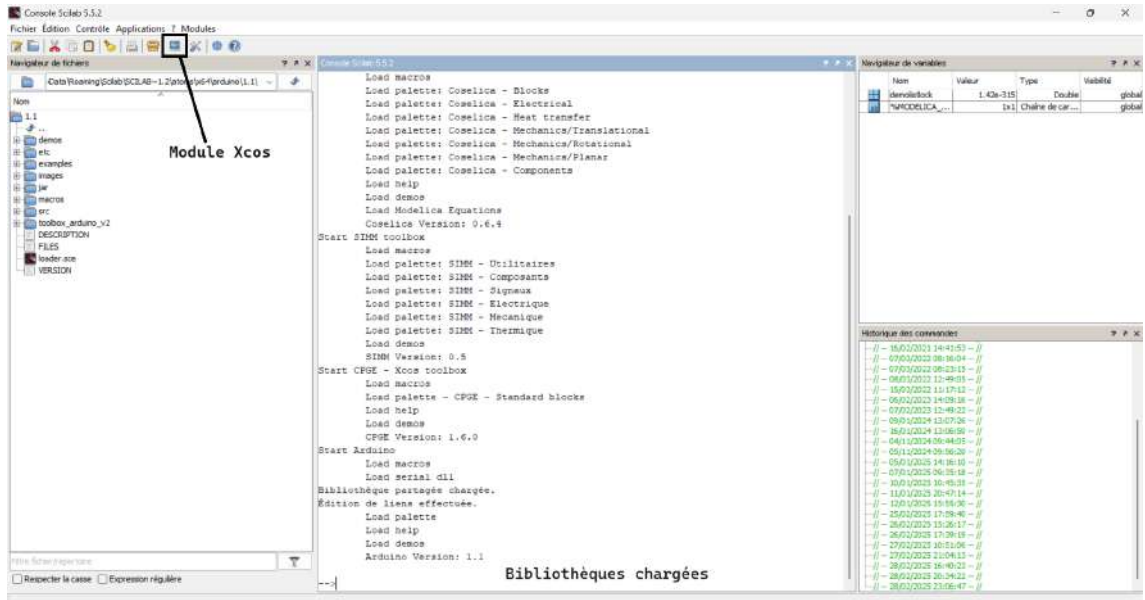


1. Lancer Scilab en tapant "Scilab" dans la barre de recherche Windows.



2. Bien attendre la fin du chargement de toutes les bibliothèques !!!

3. Lancer Xcos (voir page suivante).



4. Utiliser le logiciel en glissant-déposant les blocs. Les symbole "play" permet de lancer la simulation. On se limitera à des blocs de la bibliothèque SIMM sauf pour les deux dernières questions.

