

# LABO – MET

**Entraînement réglé par un moteur  
synchrone à aimants permanents**

**Cahier des charges**

Michel Girardin

## Table des matières

<b>ENTRAÎNEMENT RÉGLÉ PAR UN MOTEUR SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS CAHIER DES CHARGES .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Régulation du courant.....</b>	<b>3</b>
1.1 Séance 1 : Transformée de Park et fonction de transfert du système à régler .....	3
1.2 Séance 2 : Identification du système à régler et synthèse du régulateur de courant.....	5
1.3 Séance 3 : Implémentation et tests du régulateur de courant.....	6
<b>2. Régulation de vitesse et de position.....</b>	<b>8</b>
2.1 Séance 5 : Fonction de transfert du système à régler (régulation de vitesse) .....	8
2.2 Séance 6 : Synthèse et implémentation du régulateur de vitesse ( $m_\varphi = 45^\circ$ ).....	9
2.3 Séance 7 : Régulation superposée de position.....	10

# 1. Régulation du courant

## 1.1 Séance 1 : Transformée de Park et fonction de transfert du système à régler

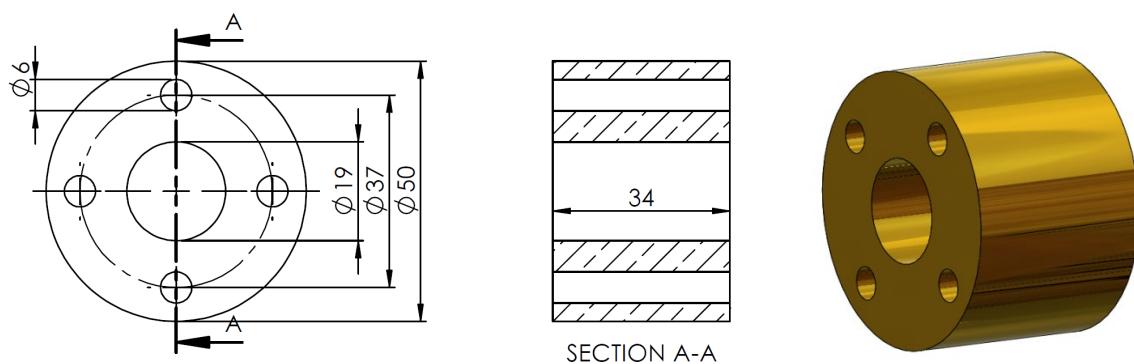
- Vérifier le comportement des variables ***thetaMoteur***, ***thetaElectrique*** et ***thetaMecanique*** en tournant le rotor à la main (consulter la VarList dans RTPWatch).

Le capteur de position (RESOLVER) mesure la position absolue du rotor sur 1 tour mécanique. Cette mesure est retournée dans la variable ***thetaMoteur*** une fois sur deux ( $f_{res} = 6 \text{ kHz}$ ). La résolution est de 14 bits, donc 16384 valeurs par tour mécanique (ce n'est pas la précision).

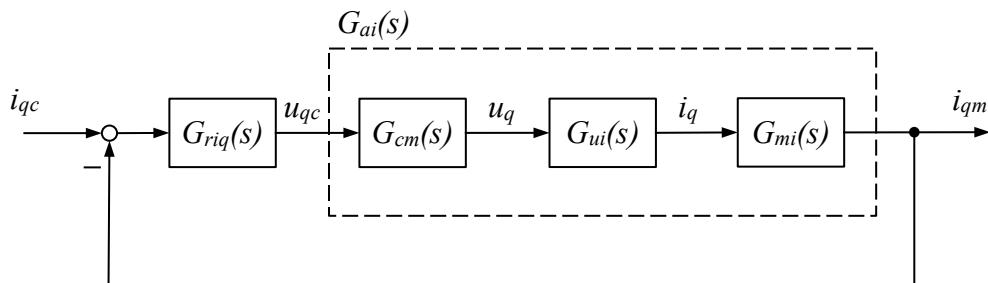
La variable ***thetaElectrique*** représente l'angle électrique entre l'axe magnétique et la position de la phase 1.

La variable ***thetaMecanique*** représente la position angulaire absolue multi-tour du rotor. Cette variable ne sera utilisée que pour la régulation de position.

- Implémenter la transformée de Park sur la mesure des courants et la transformée de Park inverse sur les consignes de tension.  
Pour garantir un temps de calcul faible, on utilise la fonction optimisée :  
***sincos(thetaElectrique, &sinThetaElectrique, &cosThetaElectrique)***
- Calculer l'inertie de la charge  $J_{ch}$  à partir du dessin ci-dessous.  
Il s'agit d'une bague en laiton ( $\rho = 8500 \text{ kg/m}^3$ )



- Etablir la fonction de transfert théorique du système à régler  $G_{ai}(s)$  pour la régulation du courant dans l'axe q. L'organe de commande (variateur) est modélisé par un retard pur  $T_r$ , sans utiliser l'approximation du 1<sup>er</sup> ordre ni celle de Padé.



Données du moteur synchrone :

$$T_N = 3.3 \text{ Nm}$$

$$I_N = 4.5 \text{ A (efficace)}$$

$$U_{L2} = 45 \text{ V (efficace)} \text{ à } 1000 \text{ rpm}$$

$$R = 2.7 \Omega$$

$$L = 9 \text{ mH}$$

$$J_m = 0.24 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

Données du variateur (onduleur triphasé) et de l'organe de mesure du courant :

$K_{cm} = 1$  ( $u_{dc} = 1$  ou  $u_{qc} = 1$  représentent une amplitude de 1 V sur la tension de phase du moteur)

$T_r \cong h = 83.3 \mu\text{s}$  (mais pour la mesure de position :  $h_2 = 166.7 \mu\text{s}$ )

$K_{mi} = 1$  (les variables *courantBranche1* et *courantBranche2* représentent des courants en [A])

$\tau_{mi} = ?$  (filtre passe-bas d'ordre 1 dont la fréquence de coupure est à déterminer)

Les constantes  $k_T$  et  $k_E$  doivent être exprimées en valeur de crête et en grandeur de phase.

Vérifier si le rapport entre  $k_T$  et  $k_E$  correspond aux prévisions théoriques pour un moteur synchrone.

## 1.2 Séance 2 : Identification du système à régler et synthèse du régulateur de courant

- A ce stade, pour maintenir  $i_d = 0$ , il suffit d'imposer une tension nulle sur l'axe d ( $u_{dc} = 0$ ). Vérifier le comportement du système à régler réel dans l'axe q en observant l'allure de  $i_q$  avec un saut indiciel sur  $u_{qc}$ . Vérifier et commenter également l'allure du courant dans l'axe d ( $i_{dm}$ ) pendant le saut indiciel sur  $u_{qc}$ .
- Réaliser une identification non paramétrique du système à régler  $G_{ai}(s)$  en appliquant un bruit blanc sur  $u_{qc}$  et en mesurant le courant  $i_{qm}$  dans l'axe q. Cette identification permet notamment de déterminer la constante de temps du filtre sur la mesure de courant  $\tau_{mi}$  et le retard pur de l'organe de commande  $T_r$ .

Péodicité	1
Buffer	4096
Amplitude	(A déterminer !)
Période/durée	2048

Après l'enregistrement des mesures, l'identification peut se faire à l'aide du logiciel Sysquake.

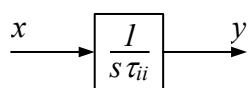
- Déterminer la constante de temps dominante équivalente du système à régler  $\tau_{dom}$ .
- Déterminer la somme des petites constantes de temps  $\Sigma \tau_{pet}$ .
- Déterminer le facteur  $N_{dom}$  correspondant à la méthode de compensation du pôle dominant.
- En traçant les diagrammes de Bode dans Matlab, on s'aperçoit qu'en variant le facteur  $N$ , on modifie la bande passante et l'erreur statique de la régulation de courant.  
Ecrire un programme Matlab permettant de tracer l'évolution de la bande passante et de l'erreur statique en fonction du facteur  $N$ .
- Pour une marge de phase  $m_\varphi = 45^\circ$ , trouver le facteur  $N$  qui représente un bon compromis entre erreur statique et bande passante.  
Déterminer les paramètres du régulateur PI ( $K_{pi}$  et  $\tau_{ii}$ ) correspondant.
- Répéter la démarche pour une marge de phase  $m_\varphi = 60^\circ$ .
- Commenter les résultats obtenus pour ces deux régulateurs PI ( $45^\circ$  et  $60^\circ$  de marge de phase).

### 1.3 Séance 3 : Implémentation et tests du régulateur de courant

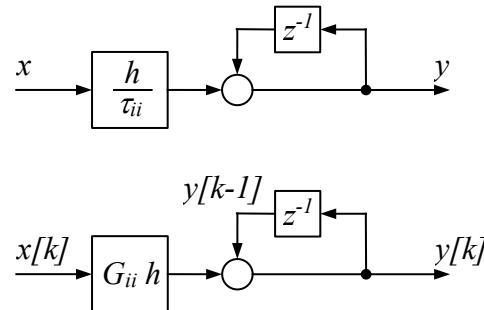
- Implémenter en C le régulateur PI de courant dans les axes d et q.

Les régulateurs de courant dans les axes d et q doivent être munis d'une limitation ( $\pm 120$  V) et du dispositif anti-windup selon la méthode de l'écart fictif (il faut également prévoir une variable dans RTPWatch donnant la possibilité de désactiver l'anti-windup).

*Intégrateur analogique :*



*Intégrateur numérique :*



Loi de commande :

$$y(t) = \frac{1}{\tau_{ii}} \int_0^t x(\tau) d\tau$$

Loi de commande :  $y[k] = y[k - 1] + G_{ii} h x[k]$

Code C :  $y = y + G_{ii} * h * x;$

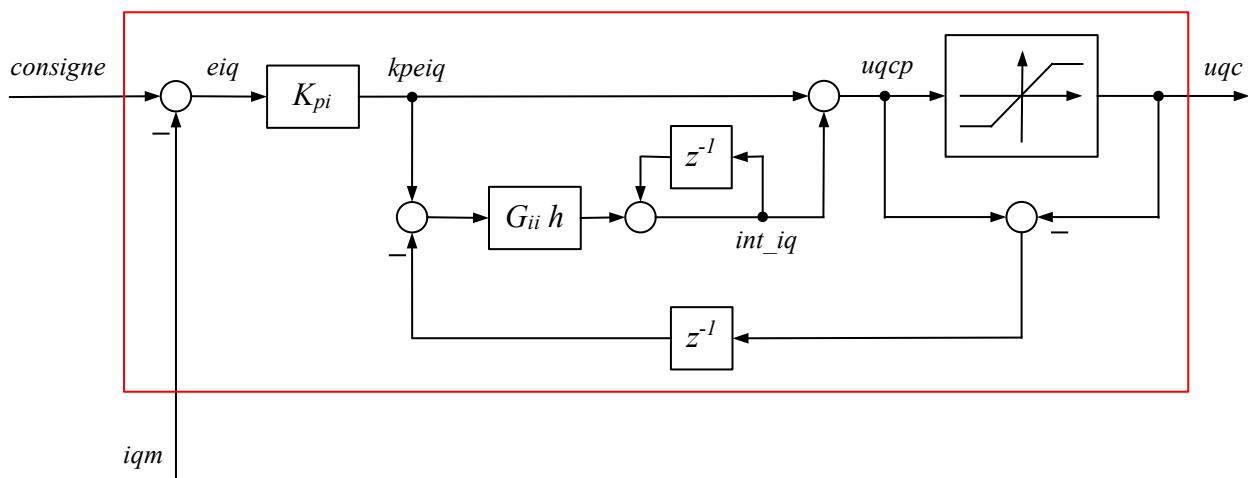
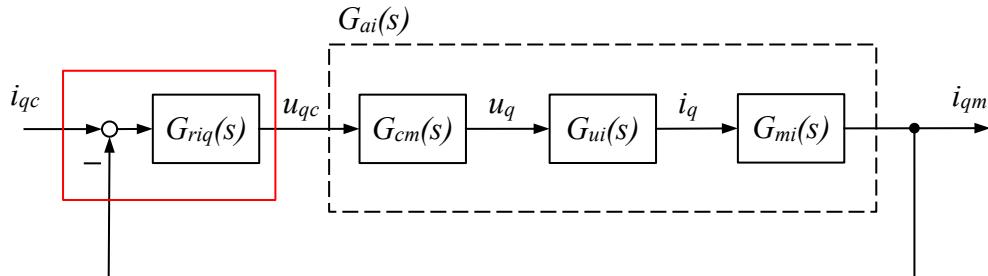


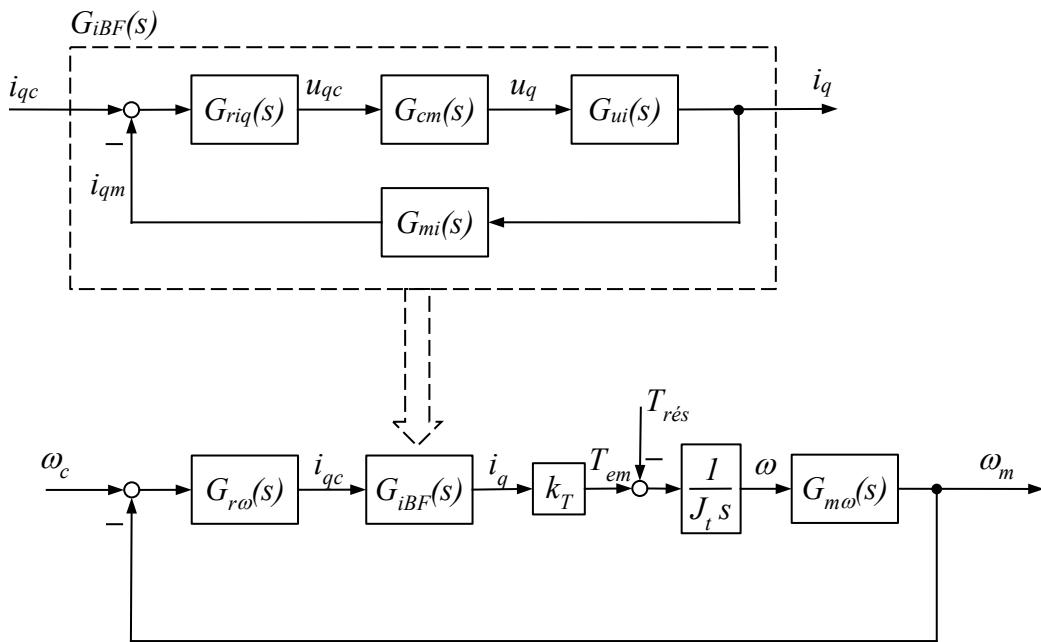
Schéma bloc du régulateur de courant dans l'axe q

- Expliquer pourquoi on doit placer un retard d'une période d'échantillonnage dans la contre-réaction de l'anti-windup et analyser son impact sur le comportement de la régulation.
- Tester la régulation de courant avec des sauts indicuels (avec  $m_\varphi = 45^\circ$  et  $m_\varphi = 60^\circ$ ) en s'assurant que les régulateurs n'entrent pas en limitation. Comparer les mesures avec les prévisions théoriques sous Matlab.
- En prenant le régulateur PI dimensionné pour une marge de phase de  $45^\circ$  :  
Vérifier et commenter le comportement du système à rotor libre, avec et sans intégrateur.  
Vérifier et commenter le comportement du système à rotor bloqué, avec et sans intégrateur.
- Trouver un moyen de démontrer le bon fonctionnement de l'anti-windup.

## 2. Régulation de vitesse et de position

### 2.1 Séance 5 : Fonction de transfert du système à régler (régulation de vitesse)

- Fonction de transfert du système à régler  $G_{a\omega}(s)$ .

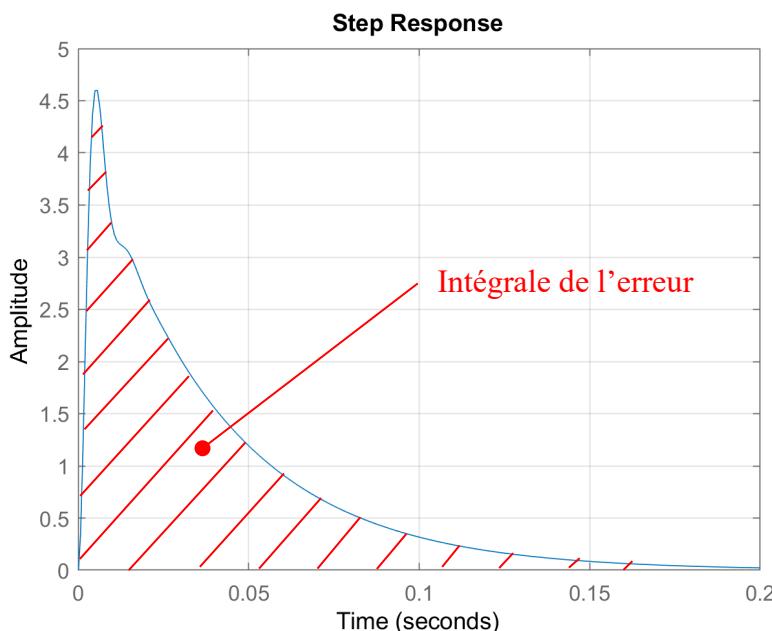


- Fixer les paramètres du régulateur de courant pour une marge de phase de  $45^\circ$ .
- Implémenter le calcul de la vitesse (à partir de **thetaMoteur**) et vérifier le résultat.
- Implémenter un filtre passe-bas numérique d'ordre 1 sur le calcul de la vitesse  $G_{m\omega}(s)$ . Choisir une fréquence de coupure de 100 Hz. Vérifier le fonctionnement du filtre.
- A l'aide d'un bruit blanc sur la consigne de courant, identifier la fonction de transfert du filtre passe-bas.
- Etablir la fonction de transfert du système à régler  $G_{a\omega}(s)$  en gardant la régulation de courant en boucle fermée sous la forme  $G_{iBF}(s)$
- Déterminer la somme des petites constantes de temps  $\Sigma \tau_{pct}$  en modélisant la régulation de courant en boucle fermée  $G_{iBF}(s)$  par une fonction de transfert d'ordre 1. La constante de temps de la composante intégrale du régulateur PI sera :

$$\tau_{i\omega} = N \cdot \Sigma \tau_{pct}$$

## 2.2 Séance 6 : Synthèse et implémentation du régulateur de vitesse ( $m_\phi = 45^\circ$ )

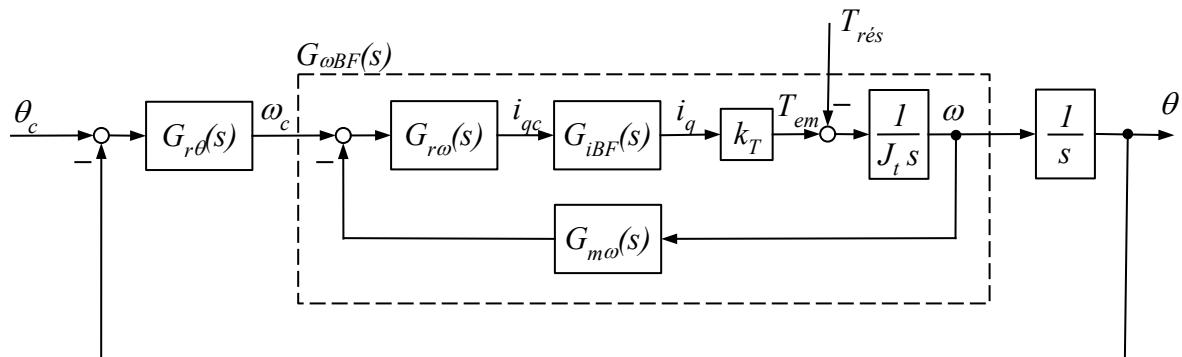
- Déterminer la valeur minimale de  $N$  permettant encore d'avoir une marge de phase de  $45^\circ$ .
- Tracer l'allure de la bande passante en fonction de  $N$  (pulsation pour laquelle le déphasage du système en boucle ouverte vaut  $-135^\circ$ ).
- Montrer l'allure de la réponse indicielle du système en boucle fermée en régulation de maintien. Saut indiciel de perturbation  $T_{\text{rés}}$  avec une consigne de vitesse nulle  $\omega_c = 0$  (graphe ci-dessous). (Utiliser la fonction ‘ $\text{step}(Gv,t)$ ’ avec ‘ $t = \text{linspace}(0, 0.2, 1000)$ ’).
- Tracer l'allure de l'intégrale de l'erreur lors du saut indiciel de perturbation en fonction de  $N$ . (Prendre la somme des points de la fonction ‘ $[Y,t] = \text{step}(Gv,t)$ ’ : ‘ $\text{sum}(Y) * 0.2 / 1000$ ’).



- Trouver le facteur  $N$  qui représente un bon compromis entre la bande passante et l'intégrale de l'erreur statique en régulation de maintien.
- Avec la valeur de  $N$  choisie, déterminer  $K_{p\omega}$ ,  $T_{i\omega}$ ,  $\omega_c$ ,  $\text{Int}(\text{erreur})$ .
- Que représente ‘physiquement’ l'intégrale de l'erreur lors du saut indiciel de perturbation ?
- Implémenter le régulateur PI de vitesse en C avec limitation et anti-windup.  
 $i_{qc} \in [-5A .. +5A]$ .
- Vérifier le fonctionnement du réglage de vitesse en comparant les sauts indiciels mesurés avec les prévisions théoriques de Matlab.

## 2.3 Séance 7 : Régulation superposée de position

- Déterminer la fonction de transfert du système à régler pour la régulation de position.



- Faire la synthèse du régulateur P de position.
- Implémenter le régulateur P de position en C avec limitation de la sortie.  
 $\omega_c \in [-300 .. +300 \text{ rad/s}]$ .
- Vérifier le fonctionnement du réglage de position en comparant les mesures de sauts indicels avec les prévisions théoriques de Matlab.
- Vérifier le fonctionnement de l'anti-windup du régulateur de vitesse.
- Implémenter en C la possibilité de générer une perturbation de couple (commande a priori). Mesurer le comportement du réglage de position.  
 Mesurer la rigidité statique d'asservissement (avec et sans la composante intégrale du régulateur de vitesse) et comparer les valeurs avec les prévisions théoriques.