

### 3- MODÉLISATION ET ANALYSE DE SYSTÈMES À TEMPS CONTINU (MODULE CPGE)


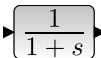



L'exemple que nous allons traiter est le même que celui utilisé dans le chapitre précédent : l'angiographe. Le module CPGE permet de dimensionner les correcteurs à mettre en place dans le système par des analyses fréquentielles. Il nécessite des connaissances théoriques (transformée de Laplace, analyse fréquentielle, correcteur...) pour être utilisée efficacement. Son utilisation est donc plutôt orientée post-bac.

Le cahier des charges du système est donc le même que dans le chapitre précédent, page 42.

#### MISE EN PLACE D'UN DIAGRAMME DE MOTEUR À COURANT CONTINU

Dans cette première partie, nous allons construire le diagramme du moteur à courant continu (résistance  $R_m$ , inductance  $L_m$ , constante de couple  $K_t$ , constante de vitesse  $K_e$  et inertie équivalente rapportée à l'axe moteur  $J_e$ ).

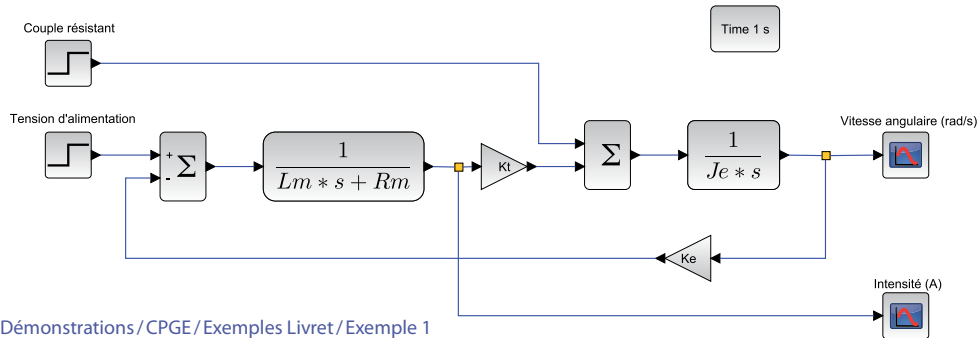
Ouvrez une nouvelle fenêtre d'édition Xcos. Positionnez les blocs suivants :

Désignation	Représentation	Sous-palette CPGE	Paramétrage
Échelon		Entrées / STEP_FUNCTION	Valeur finale : 0 Valeur finale : 80
Fonction de transfert continue		Opérateurs linéaires / CLR	Numérateur : 1 Dénominateur : $L_m*s + R_m$
Gain		Opérateurs linéaires / GAINBLK_f	$K_t$ $K_e$
Comparateur		Opérateurs linéaires / BIGSOM_f	
Visualisation		Sorties / SCOPE	Intensité (A) Vitesse angulaire (rad / s)

**À noter**

Pour configurer un sommateur en soustracteur, cliquez sur le bloc et choisissez la forme du vecteur [1,-1] ou 1 -1 (sans crochets, ni virgule). Il est possible de sommer ou de soustraire plus de deux valeurs en augmentant la taille du vecteur (exemple: 1 1 1 pour la somme de 3 entrées).

Construire le modèle du diagramme du moteur à courant continu en reliant les différents blocs (après les avoir positionnés puis éventuellement orientés), sous la forme du diagramme ci-dessous :



Pour définir les grandeurs de sortie (afin que les courbes obtenues soient ensuite repérables facilement), double-cliquez sur chacun des deux blocs **SCOPE** et configurez le nombre de courbes à superposer sur un même graphe (une seule dans notre cas) puis après avoir cliqué sur OK, entrez le nom du signal, à savoir une vitesse de rotation de l'axe du moteur (en  $\text{rad.s}^{-1}$ ) et l'intensité dans l'induit (en A).

En double-cliquant sur un espace vierge du diagramme, il est possible d'insérer du texte permettant d'améliorer la lecture globale. Dans l'image précédente, on a ainsi pu décrire à quoi correspondaient les deux échelons d'entrée et les deux sorties. Il est également possible d'attacher une étiquette / texte à un bloc par un simple clic droit sur le bloc, puis **Format / Édition** et de compléter la zone de texte.

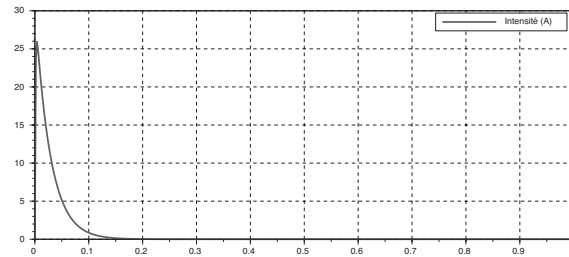
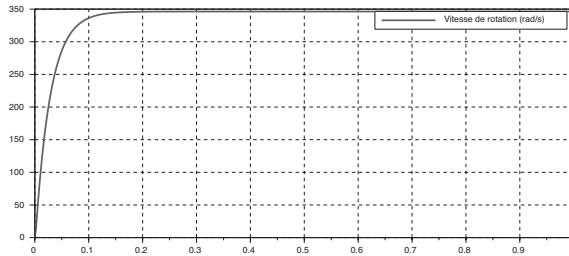
**À noter**  
Dans toutes les zones de texte, il est possible d'entrer du code LaTeX permettant, par exemple, d'insérer des équations.

En double-cliquant successivement sur les deux échelons d'entrée, configurez une tension de 80V (tension nominale du moteur), un instant initial  $t = 0$  s et un couple résistant nul à  $t = 0$  s (le cas perturbé sera étudié par la suite).

## Étude / Simulation

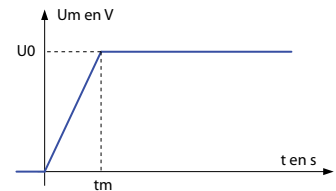
Pour lancer une simulation, il est nécessaire de spécifier le type d'étude retenu (temporelle et / ou fréquentielle).

Pour réaliser une étude temporelle, positionnez dans le diagramme un bloc **REP\_TEMP** (sous-palette **Analyses**). En double-cliquant sur ce bloc, configurez une durée de simulation de 1 s et 500 points d'affichage. Lancez alors la simulation. Deux courbes s'affichent, représentant respectivement l'intensité et la vitesse angulaire.



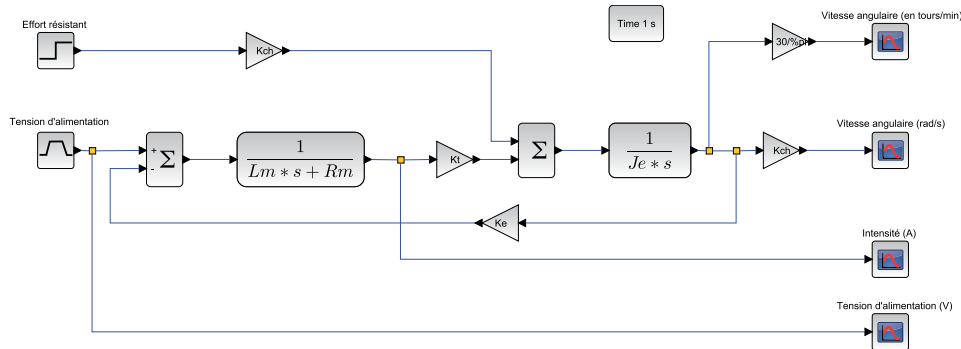
## MISE EN PLACE D'UN DIAGRAMME DE COMMANDE EN BOUCLE OUVERTE

En aval du moteur à courant continu se trouve une chaîne cinématique (réducteur à engrenages + système roue et vis sans fin + système pignon – crémaillère) de rapport de réduction  $K_{ch} = 31.8 \cdot 10^{-3} / 50 \text{ m} \cdot \text{rad}^{-1}$  permettant de transformer la rotation en une translation de l'axe linéaire. Afin de ne pas trop solliciter le moteur électrique, on l'alimente progressivement jusqu'à la valeur nominale (voir figure ci-contre) : on donne  $t_m = 0.1 \text{ s}$  (temps de montée) et  $U_0 = 40 \text{ V}$  (tension nominale). Ce signal peut classiquement être obtenu par soustraction d'une rampe de pente  $U_0/t_m$  à l'instant  $t = 0 \text{ s}$  et d'une rampe de même pente mais décalée dans le temps de  $t_m$  secondes. Cependant, le module CPGE offre la possibilité de définir un signal trapèze dont nous n'exploiterons que la partie initiale (montée et maintien) en prenant un temps de maintien en position maximale très grand. Par ailleurs, un effort  $F_r = -72 \text{ N}$  est exercé sur la structure qui se translate à l'instant  $t_r = 0.5 \text{ s}$ . Cet effort est ressenti comme un couple résistant au niveau du moteur avec, si l'on suppose un rendement unitaire, un rapport de proportionnalité correspondant au gain de la chaîne cinématique.



Complétez le contexte avec les informations  $K_{ch} = 31.8 \cdot 10^{-3} / 50$ ,  $t_m$ ,  $t_r$ ,  $U_0$  et  $F_r$  à la suite des précédentes puis ajoutez trois gains **GAINBLK\_f** (sous-palette **Opérateurs linéaires**). Rajoutez également deux afficheurs **SCOPE** (sous-palette **Sorties**) pour le tracé de la tension d'alimentation et de la vitesse de déplacement. Remplacez l'échelon de tension par un bloc **TRAPEZOID** (sous-palette **Entrées**) et configurez l'amplitude, le temps de montée et prenez un temps de maintien de 10 (donc très supérieur au temps de simulation) sans modifier les autres paramètres.

À partir du diagramme initial, créez alors le diagramme ci-dessous, correspondant à la commande en boucle ouverte du système (entrée: tension du moteur en V, sortie: vitesse de déplacement de l'axe en  $m \cdot s^{-1}$  perturbation: force  $F_r$  à l'instant  $t_r = 0.5$  s). Un gain de  $30/\pi$  (qui s'écrit dans Scilab  $30/\%pi$ ) permet d'obtenir la vitesse de rotation en  $rad \cdot s^{-1}$ .

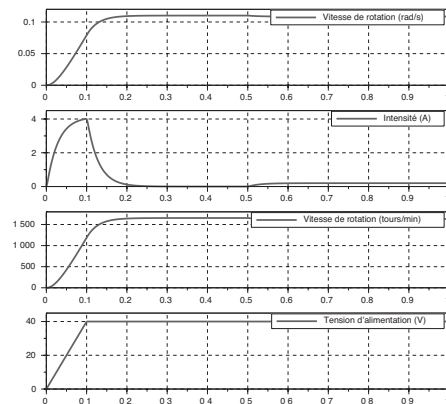


Démonstrations/CPGE/Exemples Livret/Exemple 2

Lancez la simulation.

Quatre courbes s'affichent, représentant respectivement la tension d'alimentation en V, l'intensité dans l'induit en A, la vitesse angulaire en  $tours \cdot min^{-1}$  et en  $rad \cdot s^{-1}$ .

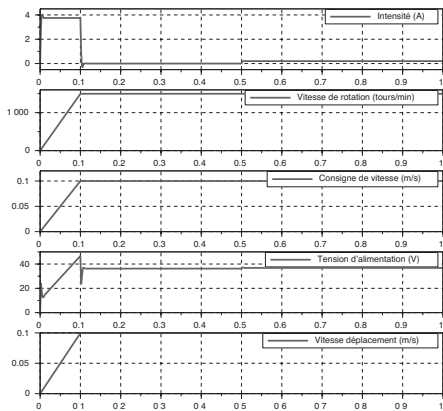
Analysez rapidement les courbes obtenues en les comparant à celles qui ont été obtenues par la simulation acausale.





- ▶ Ajout d’une observation de l’évolution de la tension d’alimentation du moteur,
- ▶ Mise en place d’un soustracteur et d’un correcteur PI, **PIcontrol** (sous-palette **Opérateurs linéaires**).

Modifiez le contexte en définissant la variable  $K_p=1$ . On utilise pour l’instant comme paramètres du correcteur PI, le gain proportionnel  $K_p$  et un gain intégral nul. Cette variable tient compte de l’ensemble correcteur + module d’amplification (hacheur) en amont de l’ensemble constitué du moteur et de la chaîne cinématique.



ASSERVISSEMENT DE VITESSE ET CORRECTION PROPORTIONNELLE

Nous allons, dans un premier temps analyser l’influence de la simple correction proportionnelle implantée sur le comportement temporel du système. Dans le contexte, la valeur de  $K_p$  est unitaire. La valeur n’a pas d’importance mais, pour être prise en compte, elle doit être définie.

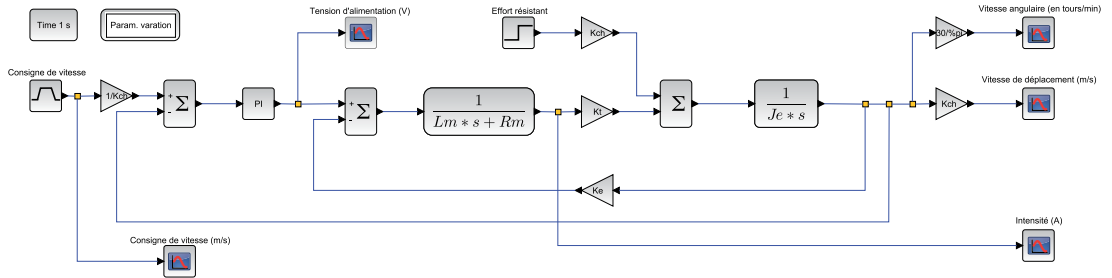
Nous introduisons les nouveaux blocs suivants:

Désignation	Représentation	Sous-palette CPGE	Paramétrage
Variation paramétrique		Analyses / PARAM_VAR	$K_p$ [0.5,1,5,10,100]
Saturation		Non-linéarités / SATURATION	40 -40

Insérez un bloc **PARAM\_VAR** (sous-palette **Analyses**) pour faire une étude paramétrique.

### À noter

Le bloc PARAM\_VAR permet de faire des études paramétriques sans avoir besoin de linéariser le système. Le diagramme peut donc utiliser n'importe quel type de blocs.

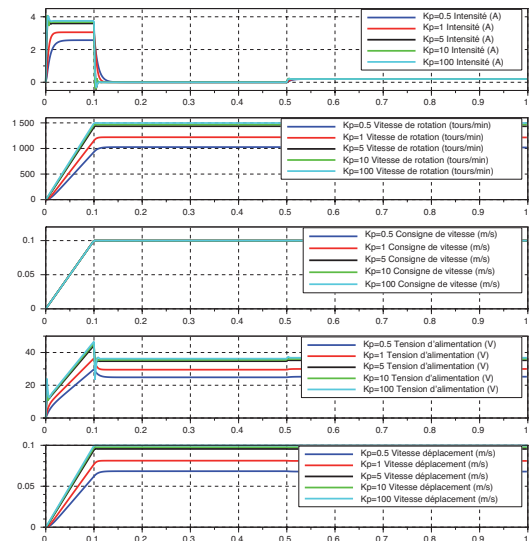


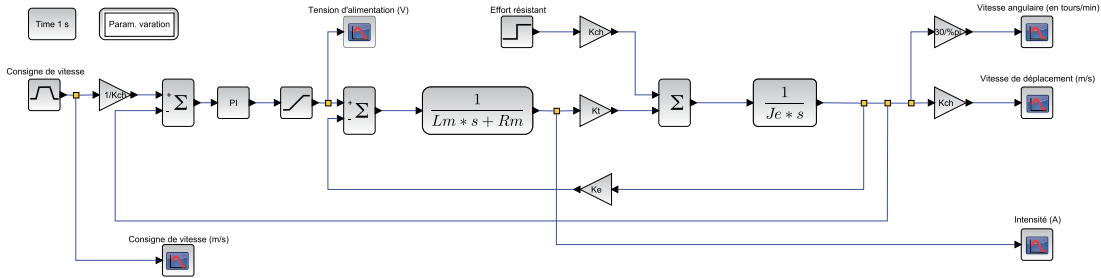
Lancez la simulation et observez l'influence du gain du correcteur sur les performances en comparaison aux attentes du cahier des charges.

La valeur de la tension d'alimentation doit physiquement être limitée à 40V pour protéger le moteur. On constate cependant que, pour plusieurs valeurs de Kp, cette tension est dépassée. Pour améliorer le modèle, il est donc indispensable d'ajouter une non-linéarité physique : la saturation.

Sélectionnez tous les blocs situés après le correcteur (les blocs sont mis en surbrillance) et déplacez un des blocs pour mouvoir l'ensemble. Insérez alors, entre le bloc correspondant à l'ensemble correcteur + hacheur et le moteur, un bloc **SATURATION** (sous-palette **Non-linéarités**).

Configurez la saturation avec les valeurs indiquées dans le tableau précédent (40 et -40).



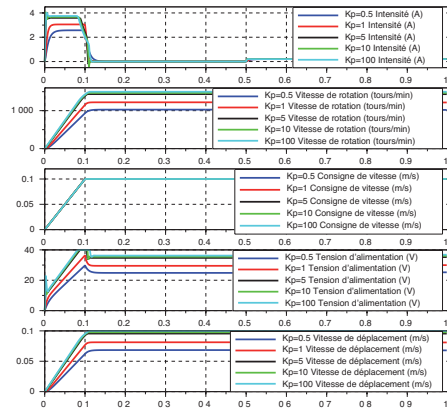


Relancez la simulation et observez l'effet de la saturation sur la réponse obtenue, tant au niveau des grandeurs électriques que sur le suivi de la consigne de vitesse en trapèze.

Afin d'analyser la capacité du système à suivre l'évolution de la consigne, il est bien entendu possible de comparer la réponse temporelle obtenue à la consigne en superposant plusieurs courbes sur un même afficheur (SCOPE).

Double-cliquez sur le bloc **SCOPE** de la vitesse de déplacement et demandez deux courbes de noms «Vitesse de déplacement ( $\text{m.s}^{-1}$ )» et «Consigne de vitesse ( $\text{m.s}^{-1}$ )» puis connectez la nouvelle entrée.

Lancez la simulation et observez l'effet de la saturation pour la valeur  $K_p = 100$ .





## ASSERVISSEMENT DE VITESSE ET CORRECTION PROPORTIONNELLE ET INTÉGRALE

Afin d'améliorer sensiblement la capacité du système à suivre la consigne de vitesse, il est nécessaire d'apporter un effet intégral à la correction.

On choisit alors de renseigner le gain  $K_i$  du correcteur PI:  $C(p) = Kp + \frac{K_i}{p} = Kp \left(1 + \frac{1}{Ti p}\right)$



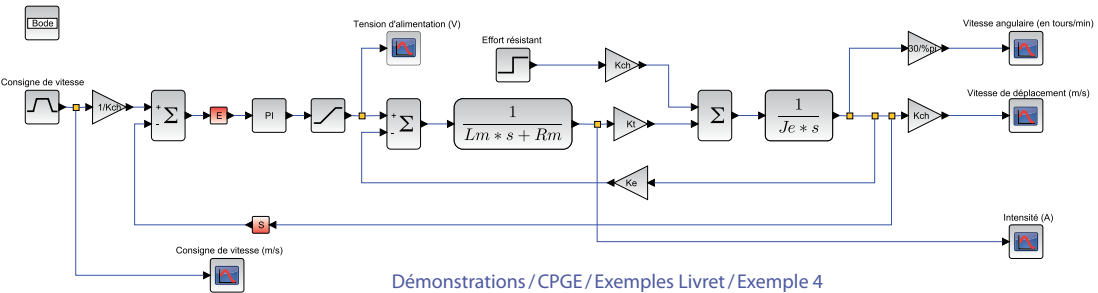
Pour analyser l'influence des paramètres et le réglage du correcteur, on réalise une analyse fréquentielle en boucle ouverte. Pour réaliser cette analyse, il est nécessaire de linéariser le diagramme. Normalement les blocs non-linéaires (type saturation) sont remplacés par des gains unitaires (sauf pour le retard qui peut être traité exactement en boucle ouverte).

Désignation	Représentation	Sous-palette CPGE	Paramétrage
Analyse fréquentielle		Analyses / REP_FREQ	
Points d'entrée / sortie		Analyses / GRANDEUR_PHYSIQUE	

Supprimez le bloc REP\_TEMP et remplacez-le par un bloc REP\_FREQ (sous-palette Analyses) qui réalisera l'analyse fréquentielle. On peut cumuler la réponse temporelle et la réponse fréquentielle en laissant les deux blocs REP\_TEMP et REP\_FREQ sur le schéma.

Ajoutez également deux blocs GRANDEUR\_PHYSIQUE (sous-palette Analyses) qui sont utilisés pour définir les points d'entrée et de sortie de l'analyse fréquentielle. Double-cliquez sur ces blocs pour les nommer « E » et « S » (tout nom est possible). Positionnez-les avant le bloc Plcontrol et au niveau du retour du premier comparateur (attention à bien les relier).

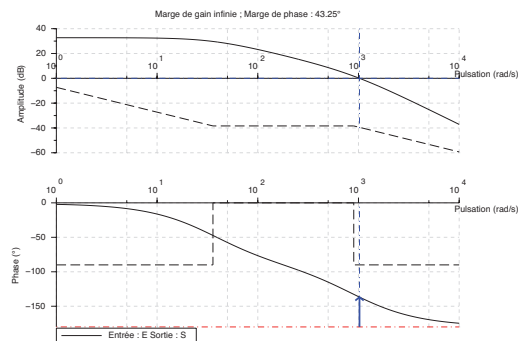
On doit alors se trouver dans la situation du diagramme suivant :



**À noter**

Plusieurs blocs REP\_FREQ peuvent être introduits dans le diagramme, ce qui permet d'obtenir la réponse fréquentielle de la boucle ouverte et celle de la boucle fermée dans deux fenêtres graphiques séparées. Si l'on souhaite superposer deux réponses fréquentielles, il suffit de configurer les différentes entrées et sorties séparées par des points-virgules. Exemple : E1;E2 et S1;S2.

On peut alors configurer, dans le bloc REP\_FREQ, le type de diagramme fréquentiel (Bode, Black ou Nyquist), les points d'entrée et de sortie (référence aux blocs GRANDEUR\_PHYSIQUE «E» et «S») ainsi que l'affichage ou non des marges de stabilité et des asymptotes. Dans la fenêtre de configuration du bloc, il est possible de définir les pulsations minimale et maximale : prendre ici 1 et 10 000. Lancez une simulation (analyse fréquentielle seule) pour les paramètres par défaut du correcteur ( $K_p=1$  dans le contexte et  $K_i=0$ ). Visualisez alors les marges de gain et de phase sur les diagrammes de Bode.



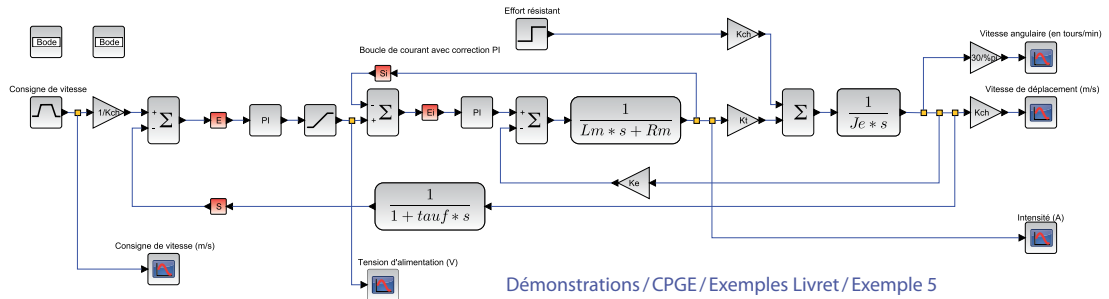
Modifiez les valeurs pour voir leur impact sur le comportement fréquentiel de la boucle ouverte. Il est nécessaire de relancer une simulation à chaque fois. Vous pouvez également positionner un bloc PARAM\_VAR pour voir l'influence des paramètres pour des jeux donnés en analyse fréquentielle. Attention, le calcul de marges n'est fait que pour une seule courbe (pas le tracé des asymptotes).

Un réglage satisfaisant pour avoir une marge de phase de  $45^\circ$  environ est  $K_p=10$  et  $K_i=0.1$ .

Ajoutez le bloc REP\_TEMP (durée 1 s, 200 points de tracés) et observez la réponse temporelle. Vous pouvez supprimer le bloc REP\_FREQ pour n'observer que la réponse temporelle.

On voit que ce réglage PI n'est pas idéal dans le cas d'étude car le moteur utilisé peine à entraîner de manière efficace le système avec cette structure série. Afin d'améliorer sensiblement les performances, on commande le moteur en courant c'est-à-dire que l'on ajoute une boucle de courant. Cette structure de commande est très classique de nos jours. La quasi-totalité des cartes de commande actuelles dispose de cette fonctionnalité que nous utilisons ici.

Le principe de la boucle de courant est simple. On vient, grâce à une structure adéquate, mesurer l'intensité au niveau de l'induit et alors modifier l'alimentation réelle du moteur après une correction le plus souvent de type PI comme le montre le diagramme suivant :



Démonstrations / CPGE / Exemples Livret / Exemple 5

Dans ce diagramme, le retour de courant a été choisi unitaire car le gain du capteur (résistance de shunt ou capteur à effet Hall) est ici intégré dans le correcteur PI.

Il est nécessaire de régler le correcteur PI de la boucle de courant (utilisant les grandeurs physiques  $E_i$  et  $S_i$ ) puis le correcteur PI de la boucle de vitesse. Un filtre a été ajouté dans la boucle de retour tachymétrique pour être au plus prêt de la physique du système (mesure par codeur puis dérivation numérique bruitée).

On voit qu'il est possible, en utilisant cette structure, d'atteindre des performances relativement importantes tout en ne modifiant ni la structure globale de l'asservissement (donc en gardant un codeur incrémental sur l'axe du moteur) ni le choix du moteur à courant continu, ce qui est toujours délicat (coût, implantation, etc.).

