

BE Chaîne d'acquisition et commande numérique

Kenza Bouzergan
Kien Trung Tran

L'objectif de ce bureau d'étude est :

- d'implémenter la commande en couple d'une trottinette électrique,
- d'implémenter la commande en vitesse de la trottinette électrique.

Pour cela il faudra exploiter de nombreuses compétences comme :

- Analyser des architectures électroniques,
- Comprendre et commander un élément de puissance (hacheur + moteur électrique),
- Mobiliser ses connaissances en automatique continu pour dimensionner un asservissement,
- Faire évoluer la conception automatique continu vers une conception tout numérique par l'approximation bilinéaire,
- Utiliser Matlab et Simulink avec méthode,
- Programmer un système embarqué (couche applicative bare métal)
- Effectuer des mesures

Sommaire

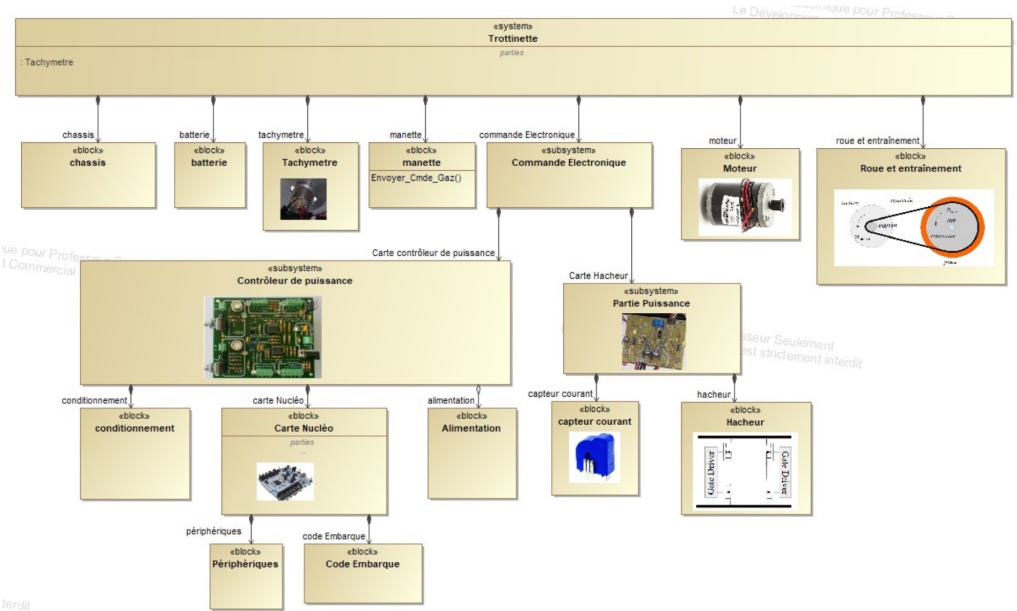
Introduction	4
I. Asservissement de couple	5
1. Compréhension du système étudié	5
2. Le schéma bloc du système détaillé :	5
II. Fonctions de transfert des différentes parties	6
1. Moteur et Hacheur	6
2. Filtre	7
III. Correcteur	7
IV. Vérifications sur Matlab et Simulink	10
V. Asservissement de couple dans le domaine discret	12
1. Choix de la fréquence d'échantillonnage	12
2. Approximation bilinéaire	12
3. Vérifications sur Matlab Simulink et Keil	12
VI. Validation en réel	15
1. Montage effectué	15
2 Analyse le résultat	15
VII. Asservissement de vitesse	17
Conclusion	21

Introduction

Notre projet d'étude consiste à mettre en place un régulateur de vitesse sur une trottinette électrique dans le cadre de l'enseignement sur les chaînes d'acquisition. Nous allons aborder plusieurs aspects de l'électronique étudiés précédemment et comprendre l'électronique de puissance. Ce projet est interdisciplinaire et nécessite des compétences en automatique, programmation, électronique, mécanique et mathématiques. L'objectif final est d'implémenter la commande en couple et en vitesse en réalisant une étude théorique du système de la trottinette, puis en implémentant les modélisations sur le système physique.

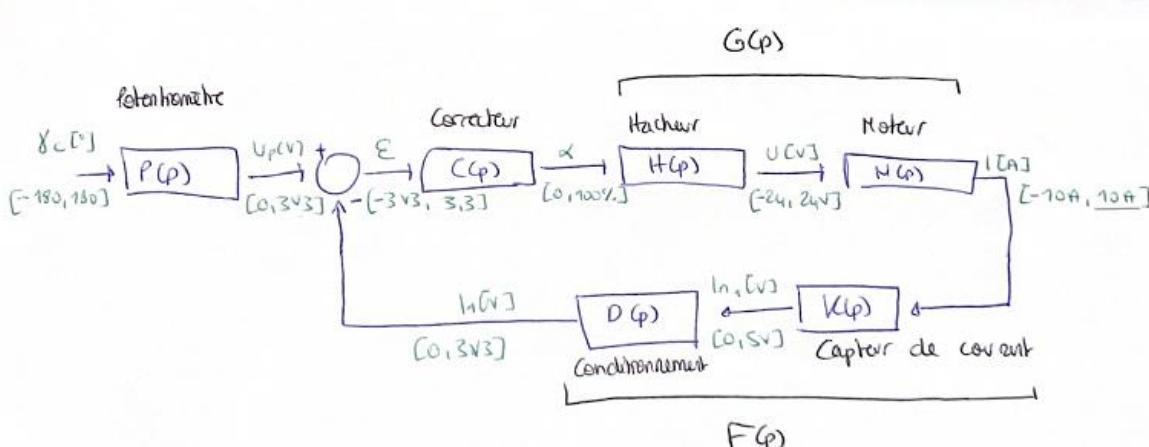
I. Asservissement de couple

1. Compréhension du système étudié



La trottinette utilise une tension de batterie de 24V pour fonctionner, ce qui n'est pas dangereux. Le moteur est un moteur à courant continu à excitation séparée (aimant permanent) avec une tension nominale de 24V, un courant nominal de 10A et une puissance nominale de 100W. Pour ce moteur, l'asservissement de couple est nécessaire pour piloter le couple du moteur par le courant. La consigne du système trottinette est l'angle du potentiomètre (poignée) en degrés. La commande du système physique (hacheur + moteur) se fait via une PWM et l'asservissement de couple (comme de vitesse) se fait par la comparaison entre la grandeur de consigne et la grandeur physique que l'on veut asservir qui sont des tensions captées par le microcontrôleur. Le capteur de consigne est le potentiomètre et le capteur de l'asservissement est le capteur de courant.

2. Le schéma bloc du système détaillé :



II. Fonctions de transfert des différentes parties

1. Moteur et Hacheur

Le modèle électrique du moteur à courant continu est le suivant :

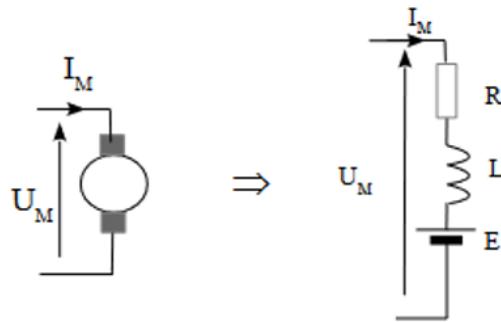
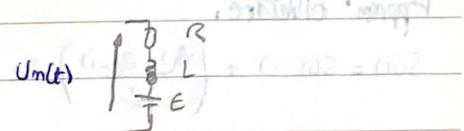


Figure 6 : Modèle de la MCC

On trouve donc la fonction de transfert suivante :

I - Moteur & Hacheur

$$U_m(t) = R I_m(t) + L \frac{d I_m(t)}{dt} + E(t)$$



$$\Rightarrow H(p) = \frac{1/R}{1 + L/R p}$$

$$\text{Modèle } H(p) \approx U_m = U_{batt} (2d_n - 1) \text{ au repos } U_m = 0 \Rightarrow 2d_n = 1 \Rightarrow d_n = \frac{1}{2}$$

$$U_m + \tilde{U}_m(t) = 2((d_0 + \tilde{d}(t)) - 1) U_{batt}$$

$$\therefore \frac{\tilde{U}_m(t)}{\tilde{Z}(t)} = 2U_{batt} = H(p)$$

$$\begin{array}{c} s(p) \\ \xrightarrow{2U_{batt}} \\ + \otimes \\ | E(p) \end{array} \xrightarrow{\frac{L}{R+Lp}} \xrightarrow{1/m(p)}$$

$$d(p) \xrightarrow{\frac{2U_{batt}}{1+E(p)}} m(p)$$

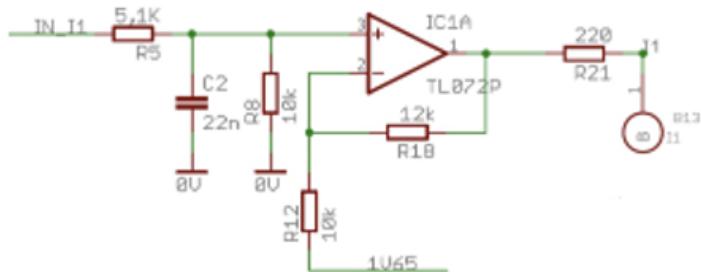
$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{3,123 - 0,088}{12} =$$

On trouve donc

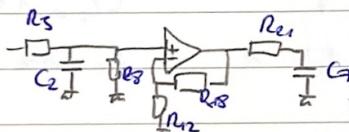
$$G(p) = \frac{2U_{batt}}{1 + T_0 p} K$$

2. Filtre

Pour trouver la fonction de transfert du filtre on regarde le schéma suivant :



II - Capteur + cond°



$$V+ = V- \Leftrightarrow \frac{R_{12}}{R_{12} + R_8} V_S = \frac{1}{1 + R_{eq} C_2 p} \times \frac{R_8}{R_S + R_8} V_{in}$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_S}{V_{in}} = \frac{1}{1 + R_{eq} C_2 p} \times \frac{R_8}{R_S + R_8} \left(1 + \frac{R_{18}}{R_{12}} \right)$$

$$F(p) = \textcircled{1} \times \frac{1}{1 + R_{21} G p} = \frac{\textcircled{2}}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} \quad V_{filt} = \frac{R_8}{R_S + R_8} \left(1 + \frac{R_{18}}{R_{12}} \right)$$

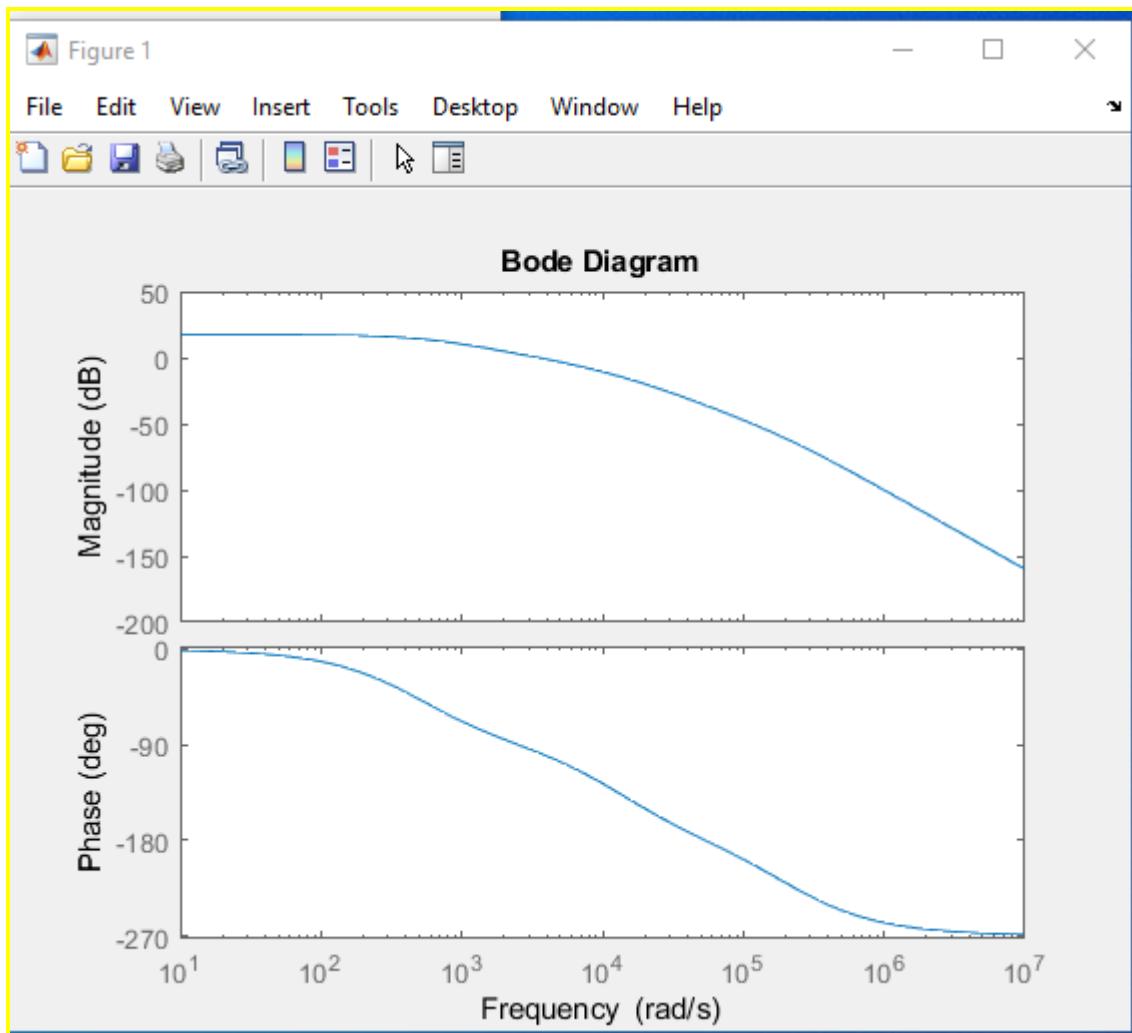
$$T_1 = R_{21} G \quad T_2 = R_{eq} C_2$$

$$\text{Capteur: } m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{3,125 - 1,875}{12} = 0,1708x + 2,5$$

$R(p) = \frac{V_{filt}}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} \Rightarrow \text{sensib capteur}$

III. Correcteur

Pour étudier la stabilité de notre système on trace le diagramme de bode de la fonction de transfert du système complet sans correcteur (c'est-à-dire $\mathbf{G}(\mathbf{p}) * \mathbf{F}(\mathbf{p})$).



Puisque la marge de phase ne nous convient pas, on pense à mettre un correcteur. On a donc le choix entre un correcteur simple et un PI.

On essaye d'abord avec un correcteur simple et grâce aux superbes explications de Mr Rocacher, on se rend compte que l'on aura un problème avec l'erreur à l'infini. On se tourne donc vers un correcteur PI.

- Correcteur PI

III - Correcteur PI

On pose $C(p) = \frac{U_r}{P} + U_0$

On a donc $C(p)$ de la forme $C(p) = \frac{1 + T_3 p}{T_4 p}$

on cherche les valeurs de T_3 et T_4

$$\text{On a } F_{TB0} = C(p) G(p) R(p) = \frac{1 + T_3 p}{T_4 p} \cdot \frac{G_0}{1 + T_1 p} \cdot \frac{K \text{ filtre}}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}$$

on veut éliminer le pôle dominant, on prend donc $\boxed{T_3 = T_0}$

$$\text{la f}_{TB0} \text{ direct, } F_{TB0} = \frac{G_0 \times K \text{ filtre} \times S}{T_4 p (1 + T_1 p) (1 + T_2 p)}$$

on cherche maintenant à trouver T_4 :

$$\text{On a } f_1 = \frac{1}{2\pi T_1} = 2,14 \text{ kHz} \quad f_2 = \frac{1}{2\pi T_2} = 32,8 \text{ kHz}$$

$$F_{TB0}(j2\pi f) = \frac{G_0 \times K \text{ filtre} \times S}{j2\pi f T_4 (1 + j2\pi f T_1) (1 + j2\pi f T_2)} = \frac{G_0 \times K \text{ filtre} \times S}{j \frac{f}{f_1} \left(1 + j \frac{f}{f_1}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_2}\right)}$$

$$\text{donc } |F_{TB0}(j2\pi f)| = \frac{G_0 K \text{ filtre} S}{\frac{f}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_1}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2}} = 1$$

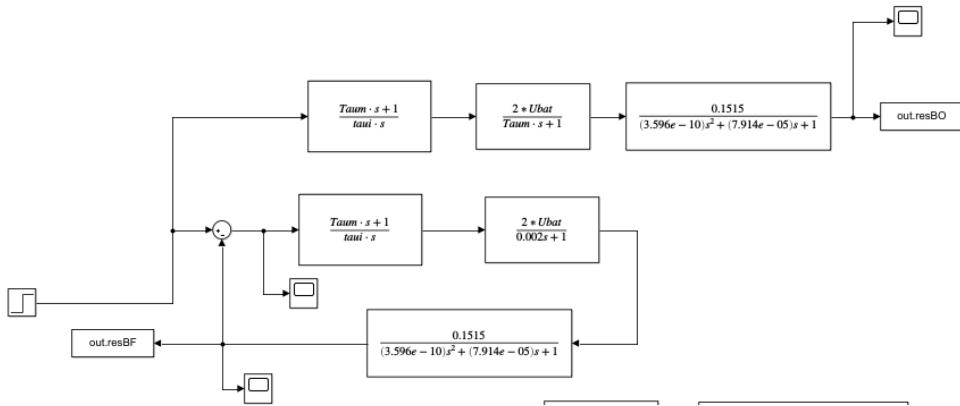
$$\text{donc } f_4 = \frac{f_T}{G_0 K \text{ filtre} S} \quad \text{avec } f_T = 400 \text{ Hz}$$

$$T_4 = \frac{1}{2\pi f_4} = \frac{2\pi f_4}{2\pi f_T} = \frac{G_0 K \text{ filtre} S}{\pi f_T} = \boxed{\frac{G_0 K \text{ filtre} S}{\pi f_T}}$$

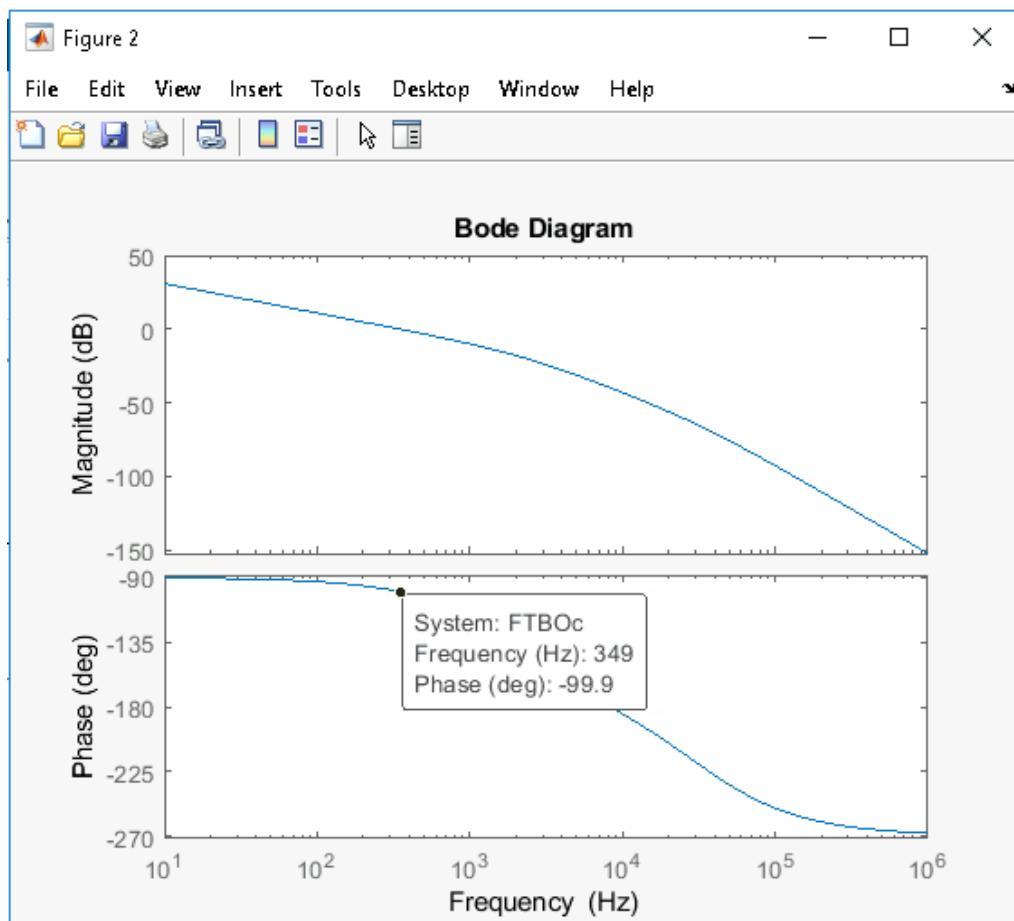
$$\boxed{T_1 = T_0 = \frac{L}{R}}$$

IV. Vérifications sur Matlab et Simulink

Voici notre schéma Simulink pour tester notre correcteur PI



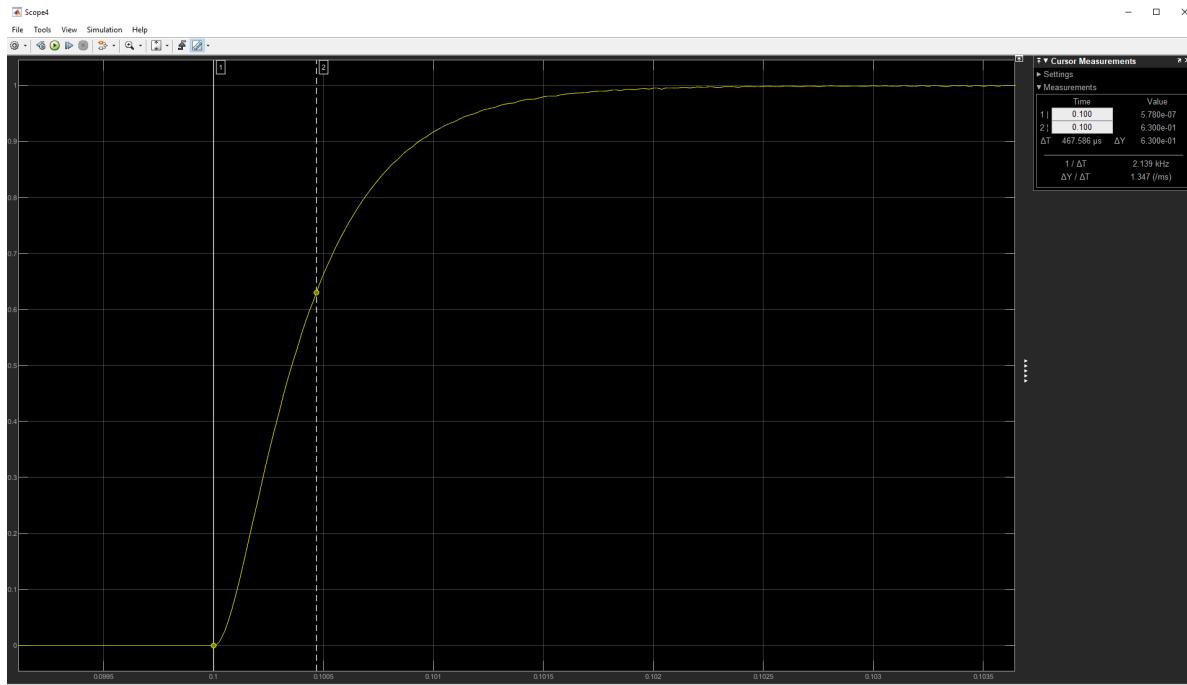
On trace le diagramme de Bode en BO et on obtient une marge de phase de 170 degrés ce qui est bien supérieur à 45 degrés.



On vérifie ensuite l'erreur statique en boucle fermée en observant la sortie du sommateur qui doit valoir 0.



Nous avons ensuite étudié la réponse indicielle du système en boucle fermée



Ici nous avons le temps de réponse égale à 467,586 **μs**, ce qui correspond à la fréquence de coupure Fc du boucle fermée égale à environ 340,38 Hz ce qui nous paraît raisonnable.

Nous observons aussi que la réponse ressemble à une réponse de l'équation premier ordre, il n'existe pas de dépassement ni oscillation donc nous pouvons considérer que notre correcteur PI marche bien.

V. Asservissement de couple dans le domaine discret

1. Choix de la fréquence d'échantillonnage

On commence notre travail dans le domaine discret en réfléchissant sur le choix de notre période d'échantillonnage. Si T_e est trop grand, on perdra de l'information et notre approximation de la fonction continue sera insuffisante. Cela signifie également que F_e sera très petit, ce qui entraînera un problème d'échantillonnage insuffisant. Il est donc important de s'assurer que $F_e > 1000$ si on a $F_c = 400$ Hz.

De plus, si T_e est trop petit, on aura des problèmes d'interruptions et de PWM.

On choisit donc $F_e = 5$ kHz.

2. Approximation bilinéaire

$$C\left(\frac{z}{T_e} \frac{z-1}{z+1}\right) = \frac{1 + T_3 \left(\frac{z}{T_e} \frac{z-1}{z+1}\right)}{T_1 \left(\frac{z}{T_e} \frac{z-1}{z+1}\right)}$$

$$\Leftrightarrow C(z) = \frac{z(T_e + 2T_3) + (T_e - 2T_3)}{2T_1(z-1)}$$

$$\frac{d\alpha}{\delta z} = \frac{z \left(\frac{T_e + 2T_3}{2T_1} \right) + \left(\frac{T_e - 2T_3}{2T_1} \right)}{z-1}$$

$$\Leftrightarrow \alpha(z-1) = \delta z \left(z \left(\frac{T_e + 2T_3}{2T_1} \right) + \left(\frac{T_e - 2T_3}{2T_1} \right) \right)$$

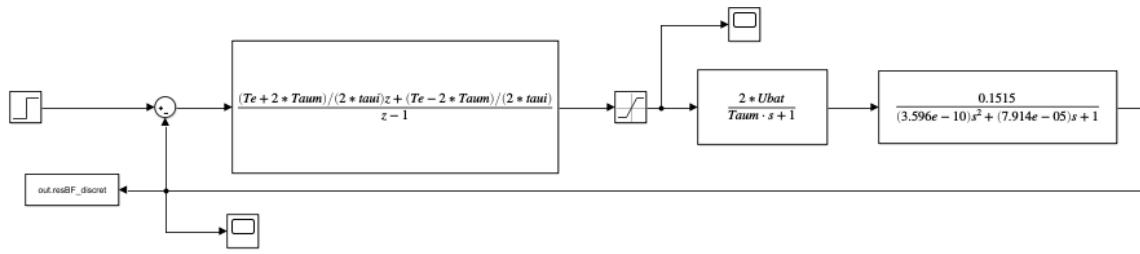
$$\Leftrightarrow \alpha(1-z^{-1}) = \delta z \left(1 \left(\frac{T_e + 2T_3}{2T_1} \right) + z^{-1} \left(\frac{T_e - 2T_3}{2T_1} \right) \right)$$

$$\Leftrightarrow \alpha(u) - \alpha(u-1) = \delta z(u) \left(\frac{T_e + 2T_3}{2T_1} \right) + \delta z(u-1) \left(\frac{T_e - 2T_3}{2T_1} \right)$$

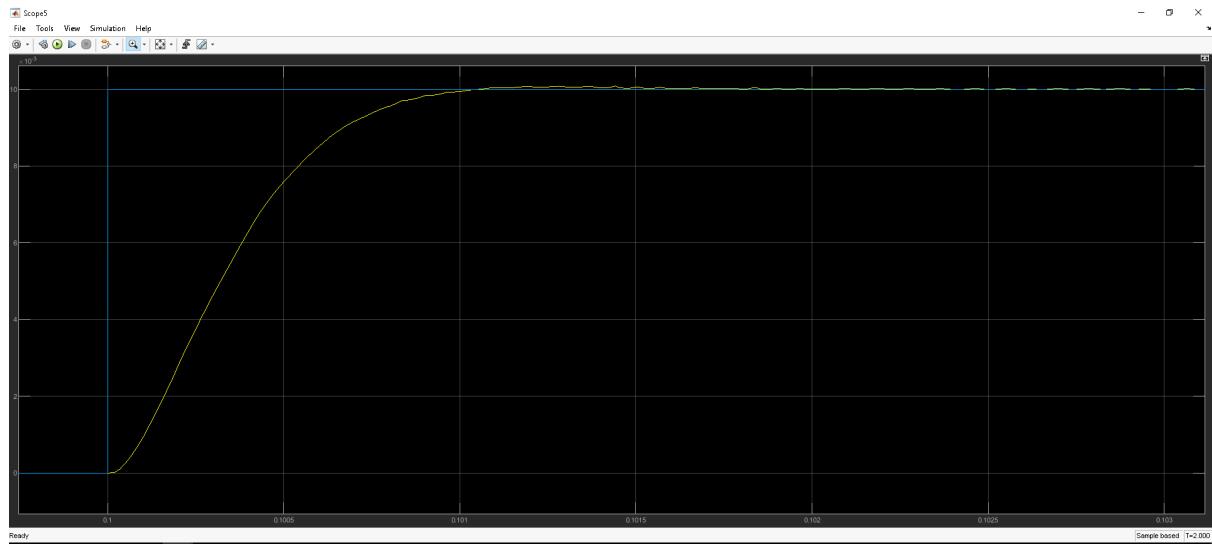
$$\Leftrightarrow \alpha(u) = \delta z(u) \left(\frac{T_e + 2T_3}{2T_1} \right) + \delta z(u-1) \left(\frac{T_e - 2T_3}{2T_1} \right) + \alpha(u-1)$$

3. Vérifications sur Matlab Simulink et Keil

Nous avons vérifié d'abord sur Matlab en insérant le correcteur numérique dans notre schéma



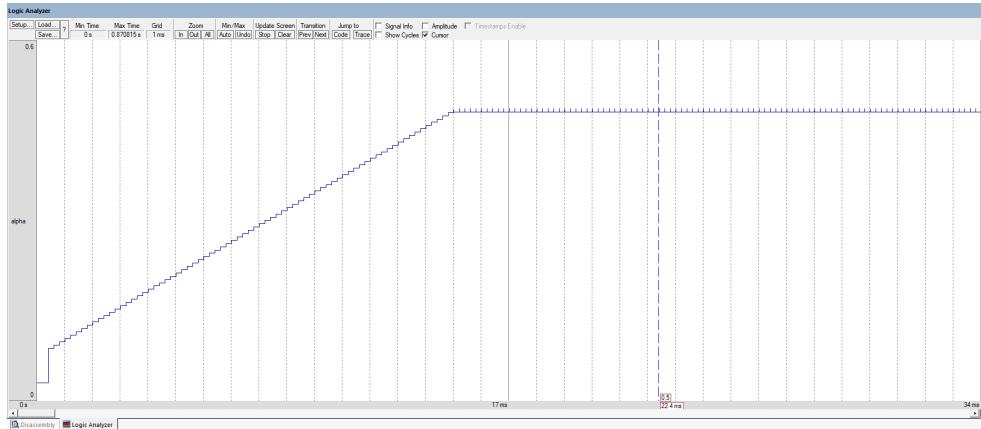
Le schéma est maintenant semi analogique numérique, nous ajoutons quand même une fonction de saturation entre -0.5V et 0.5V après le correcteur et nous observons la réponse



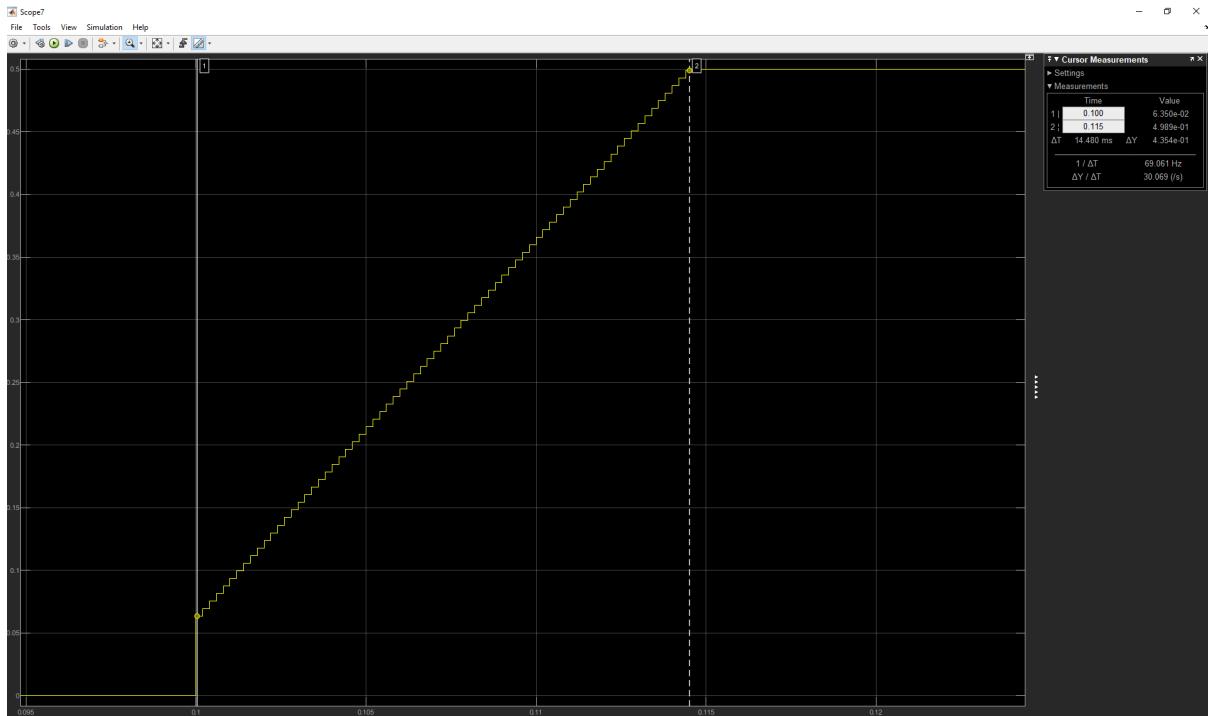
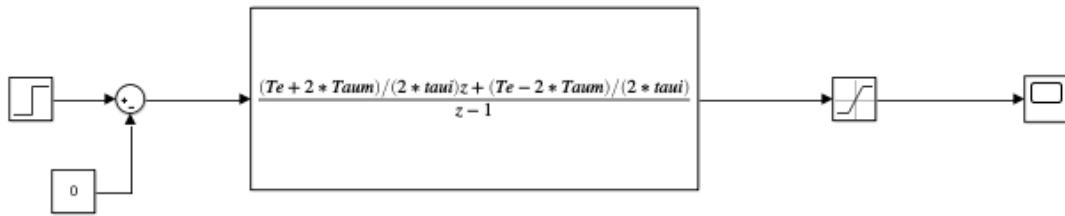
Le système répond bien au commande, il existe un petit dépassement mais nous considérons qu' on peut bien implémenter avec notre correcteur.

Nous devons ensuite "numériser" notre correcteur, le but est de construire notre correcteur avec Keil.

En utilisant le résultat de l'équation de récurrence au dessus, en mettant l'entrée 10 de l'ADC à 0.1V, nous observons ça comme notre rapport cyclique de notre correcteur construisant sur Keil.



En gardant la même configuration, nous pouvons examiner notre construction de correcteur sur Keil avec Simulink



En comparant la première et dernière valeur de deux graphes (celles du Keil et Simulink), nous pouvons conclure que nous avons bien "cloné" notre correcteur sur Keil ou que nous pouvons passer à l'implémentation en réel.

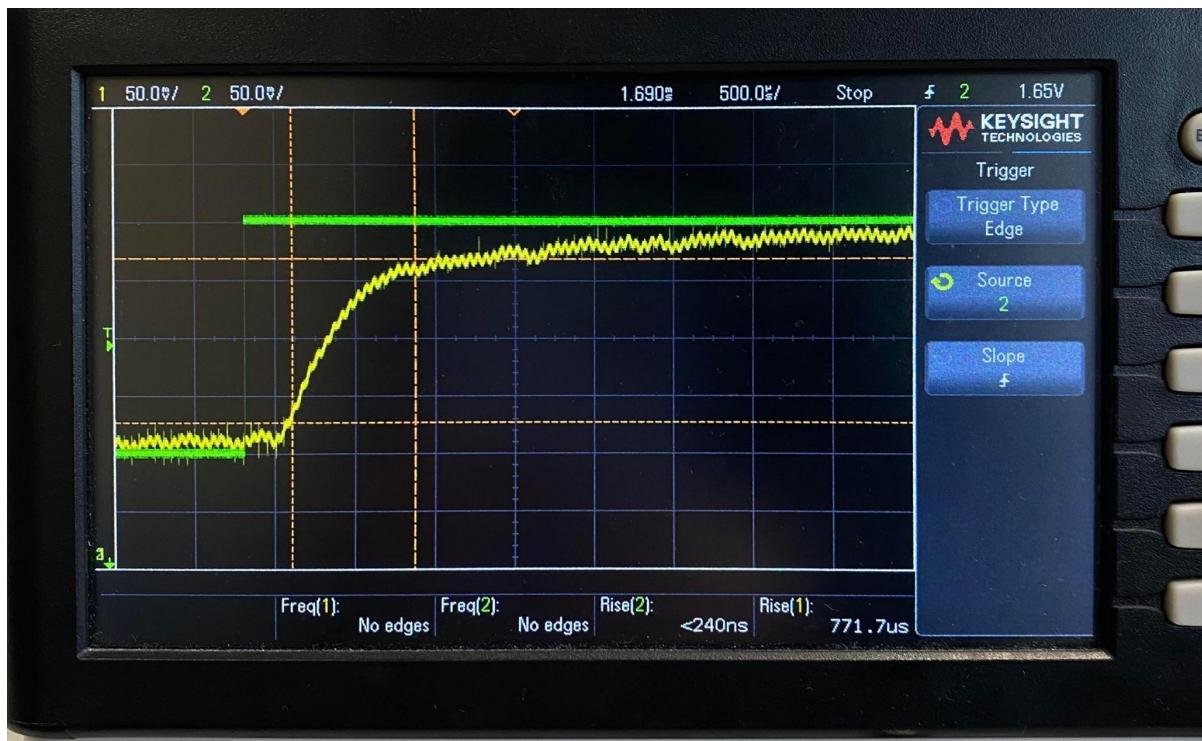
VI. Validation en réel

1. Montage effectué

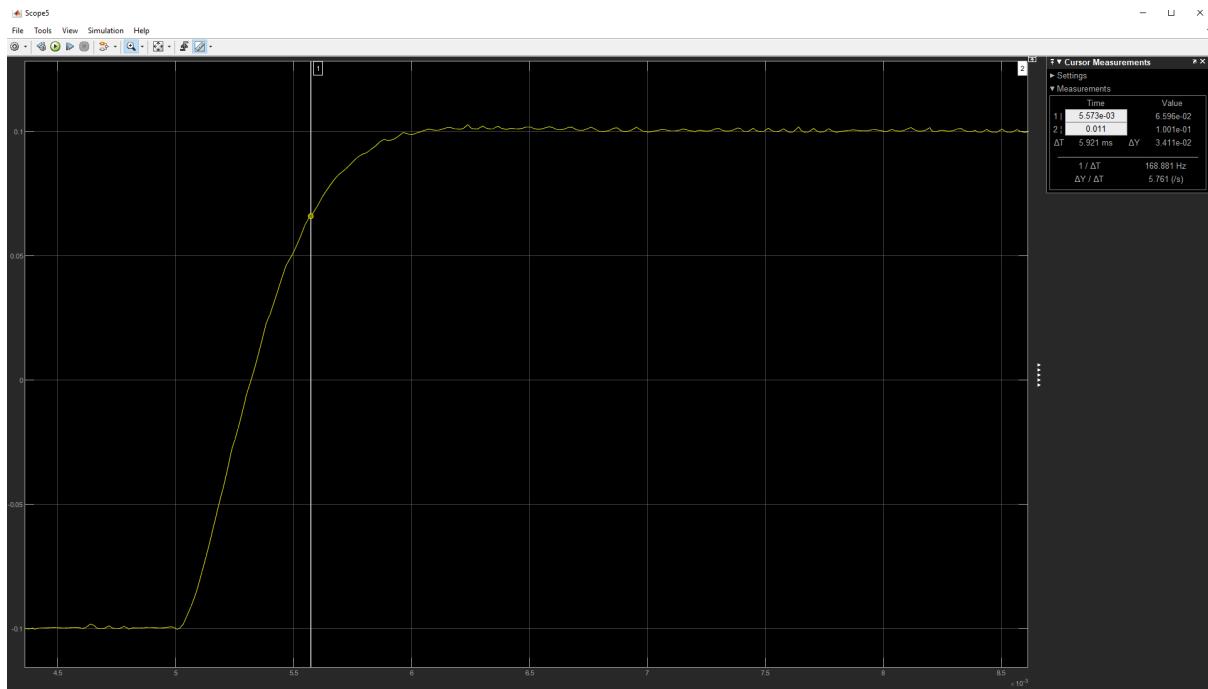


2 Analyse le résultat

Nous mettons un signal carré comme l'entrée et observons ce que notre système lui réagi.



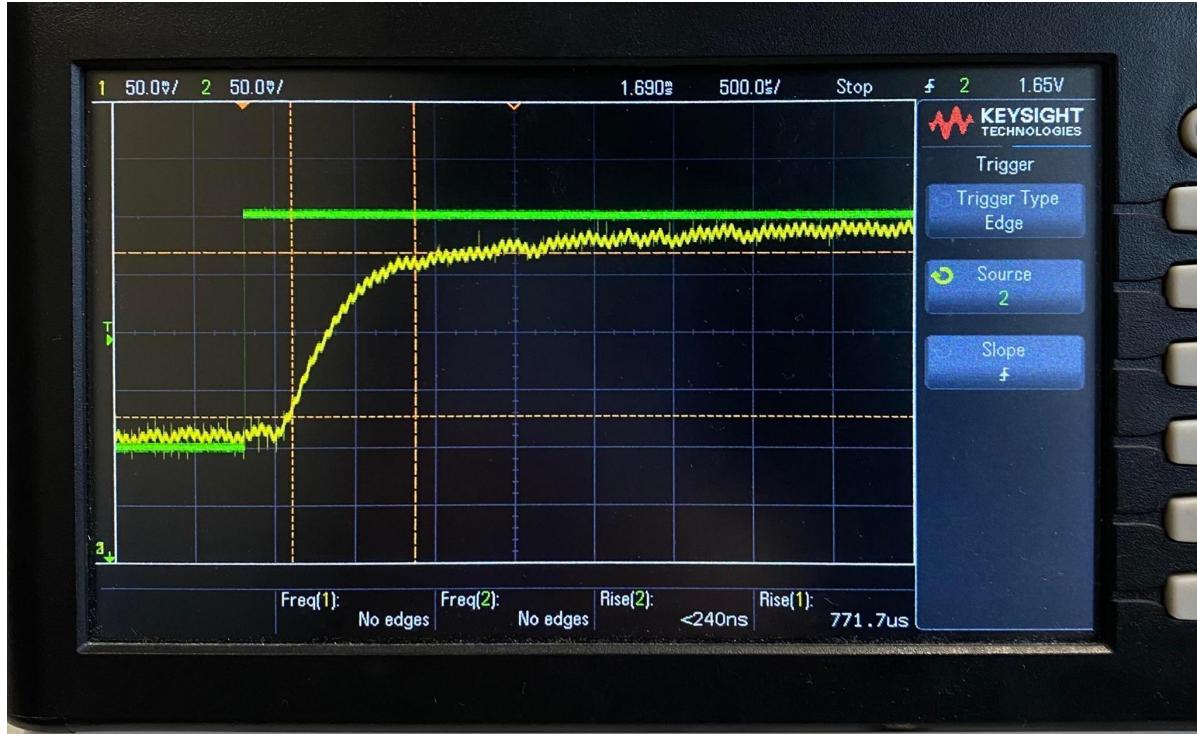
En mettant la même configuration sur Simulink, nous pouvons comparer entre simulation et réel.



Nous voyons que le système en réel répond plus vite que celui en simulation, nous mettons donc une entrée sinus afin d'étudier la stabilité de notre système. Enfin, nous trouvons que la fréquence de coupure en réel est plus élevée que celle en simulation mais le système est toujours stable. Malheureusement, faute de temps, nous ne pouvons pas continuer à étudier pour déduire la cause de ce décalage entre réel et simulation.

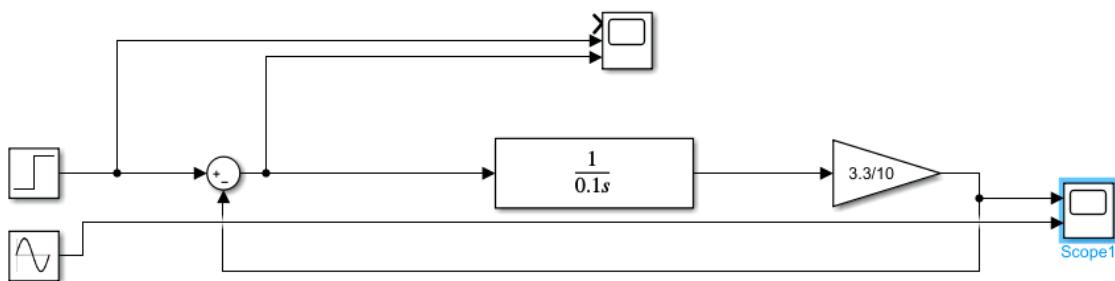
VII. Asservissement de vitesse

Dans cette partie, nous allons faire un correcteur PI tout comme la partie précédente pour contrôler la vitesse de notre trottinette. En suivant les explications de M.Rocacher, nous considérons notre système de puissance en réel comme une intégrateur avec un Tau à déduire avec le graphe de la réponse indicielle en réel. Nous mesurons donc la pente de la réponse indicielle.

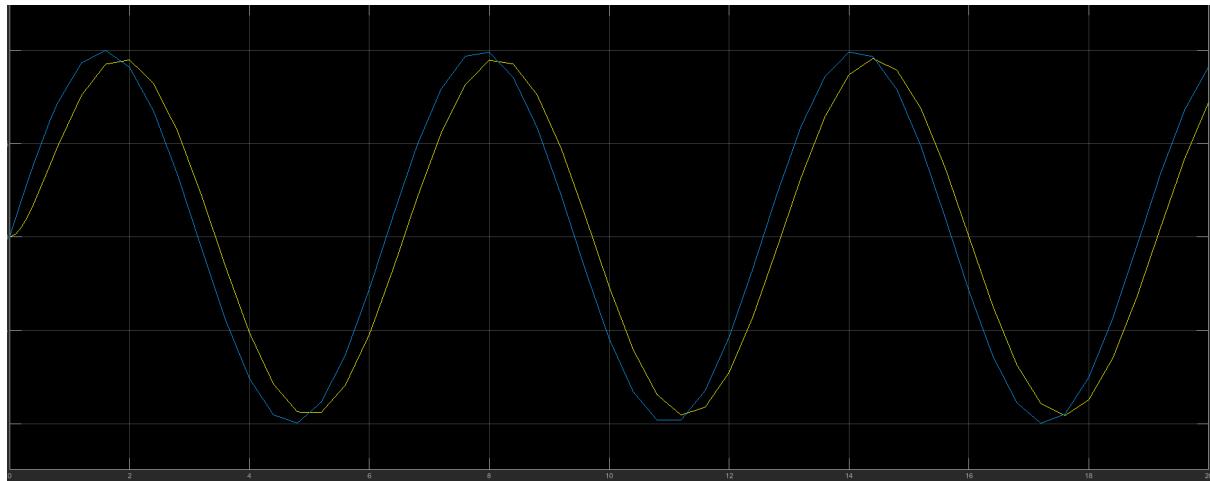


$$\text{Tau} = (0,16 - 0,11) / 0,5 = 0,1.$$

Notre système devient donc



Nous mettons un signal sinus comme entrée pour voir le transitoire de notre système.

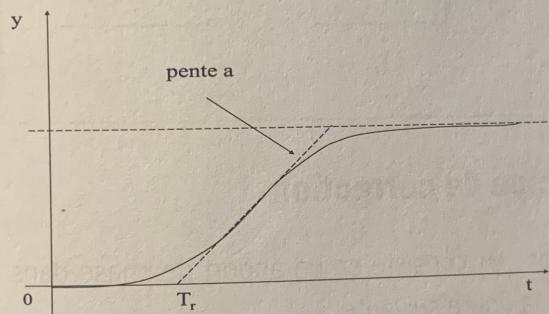


Nous observons que le système ne répond pas très bien à la commande (l'écart entre jaune et bleu est assez grand), nous décidons donc de mettre un correcteur PI pour améliorer la réponse.

Comme il n'y a pas le cahier de charge pour cette partie, nous décidons d'utiliser la méthode de la réponse indicelle qui a la principe suivant

a ~ Méthode de la réponse indicelle

Les paramètres du correcteur sont établis à partir du retard pur T_r et de la pente en régime transitoire a de la réponse indicelle du système à commander.



On utilise les formules données dans le tableau suivant :

Type	k_p	τ_i	τ_d
P	$1/aT_r$		
PI	$0,9/aT_r$	$3T_r$	
PID	$1,2/aT_r$	$2T_r$	$0,5T_r$

Correcteur PI $k_p + \frac{1}{\tau_p}$

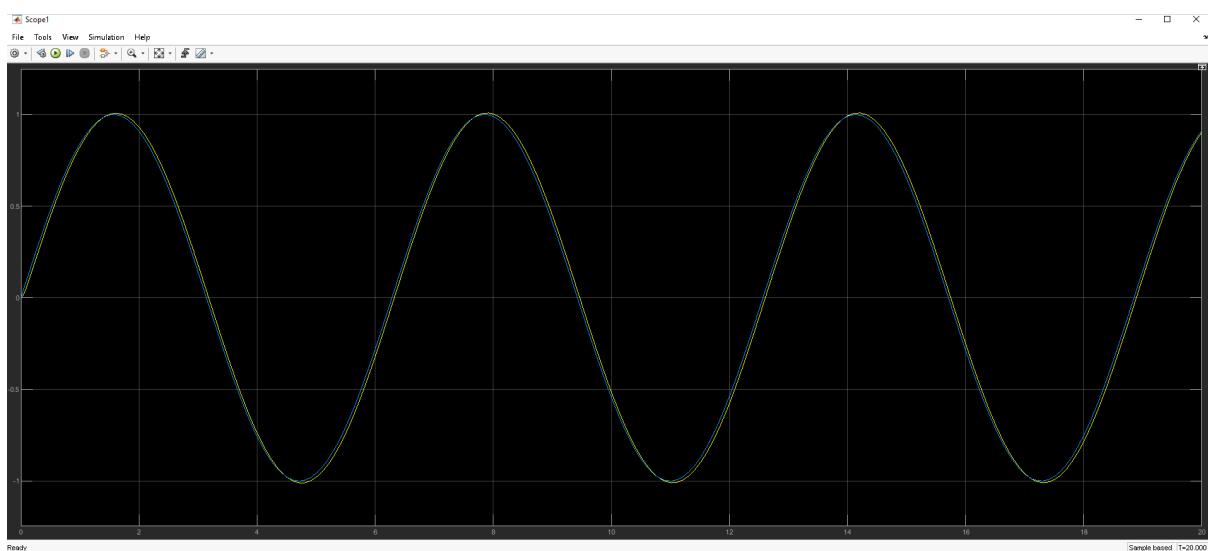
a la pente en régime transitoire = 0,7 (cf graphique au dessus)
 T_r retard pur = 0,181

Donc, en suivant le tableau, on a $k_p = \frac{0,9}{0,7 \cdot 0,181} = 7,1$

$$\tau_p = 0,181 \times 3 = 0,543$$

D'où le correcteur PI $k_p + \frac{1}{\tau_p} = 7,1 + \frac{1}{0,543} = \frac{3,853}{0,543} = 7,1$

Nous mettons ensuite ce correcteur dans le système et voyons la réponse



La réponse du système est beaucoup mieux qu'avant. Nous pouvons dire alors que notre calcul de correcteur marche. Il reste à tester ce correcteur en discret sur Simulink et l'implémenter avec Keil mais malheureusement nous n'avons pas assez de temps pour le faire. Cependant, nous avons compris le principe de la boucle de vitesse: comment marche le capteur de vitesse, comment il réagit quand on met une commande trop forte, comment réagit le système faute de régulateur de vitesse.

Conclusion

Pour conclure, ce qui nous a tout particulièrement plu dans ce projet de bureau d'études est qu'il nécessite l'utilisation simultanée et conjointe de l'informatique, de l'automatique et de l'électronique sur un seul système.

Ce projet nous a également permis d'intégrer les contraintes imposées par l'électronique de puissance dans la mise en place d'un système de commande analogique et numérique.

Bien que nous ayons déjà étudié l'identification des fonctions de transfert, la création de schémas blocs et la modélisation sous Matlab et Simulink dans d'autres travaux pratiques d'automatique, ce qui nous a le plus intéressés dans ce projet était la modélisation du correcteur. Bien que nous ayons déjà compris le fonctionnement d'un correcteur, nous n'avions jamais eu l'occasion d'en réaliser un.

Ce projet a été très enrichissant et nous a donné une idée de ce que nous réservait la vie d'ingénieur.

