

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction .....                                                                 | 2  |
| I. Modélisation du système : .....                                                 | 3  |
| I.1 Le conditionner de sortie .....                                                | 4  |
| I.1.1 Transducteur de courant à compensation de flux .....                         | 4  |
| I.1.1.1.Principe .....                                                             | 4  |
| I.1.1.2. Modélisation du transducteur .....                                        | 4  |
| I.1.2 Chaîne d'acquisition .....                                                   | 5  |
| I.1.2.1 Démonstration de la fonction de transfert de la chaîne d'acquisition ..... | 5  |
| I.2 Le moteur et le hacheur .....                                                  | 6  |
| I.2.1 Le moteur .....                                                              | 6  |
| I.2.2 Le hacheur .....                                                             | 6  |
| I.3 Correcteur .....                                                               | 7  |
| I.3.1 Boucle ouverte.....                                                          | 7  |
| I.3.1.1 Pole dominant.....                                                         | 7  |
| I.3.1.2 Marge de phase .....                                                       | 7  |
| I.3.1.3 Step réponse.....                                                          | 8  |
| I.3.2 Transformation bilinéaire.....                                               | 9  |
| I.3.2.1 Déterminer T la fréquence de discrétisation .....                          | 9  |
| I.3.2.2 Modification du module .....                                               | 9  |
| II. Etude de la boucle fermée : .....                                              | 10 |
| II.1 Simulation de la boucle fermée.....                                           | 10 |
| II.2 Modélisation de la boucle fermée .....                                        | 10 |
| III. Equation récurrente .....                                                     | 11 |
| IV. Implémentation sur Keil .....                                                  | 11 |
| IV.1 Temps de réaction du correcteur .....                                         | 11 |
| IV.2 Protection soft.....                                                          | 12 |
| V. Mesure .....                                                                    | 13 |
| V.1 Régime libre .....                                                             | 13 |
| V.2 Réponse Step .....                                                             | 14 |
| V.3 Bode .....                                                                     | 14 |
| V.4 TOS.....                                                                       | 15 |
| Source .....                                                                       | 15 |
| Conclusion .....                                                                   | 16 |

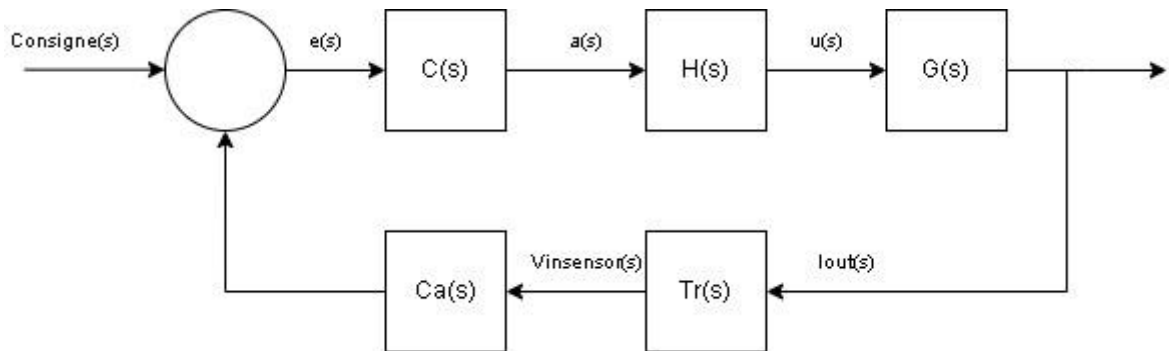
# Introduction

Ce rapport présente l'étude et la modélisation d'un système de contrôle en boucle fermée pour un moteur à courant continu, en mettant l'accent sur la conception et l'implémentation d'un correcteur numérique. Le système étudié comprend plusieurs composants clés : le correcteur, le hacheur, le moteur, un transducteur et un conditionneur de signal.

L'objectif principal de ce projet est de concevoir un correcteur numérique pour assurer un contrôle précis et stable du moteur en courant pour asservir son couple. Cela implique la modélisation de chaque composant du système, la synthèse du correcteur, et la vérification de la stabilité et de la performance de la boucle fermée.

# I. Modélisation du système :

Soit le système pouvant être modéliser sous la forme :



Avec :

- $C(s)$  le correcteur
- $H(s)$  le hacheur
- $G(s)$  le moteur
- $Tr(s)$  le transducteur
- $Ca(s)$  le filtre (conditionneur)

De plus les signaux :

- $e(s)$  l'erreur entre la consigne et la sortie
- $a(s)$  le rapport cyclique
- $u(s)$  la tension appliquée au moteur
- $I_{out}(s)$  le courant traversant le moteur
- $V_{outsensor}(s)$  l'image du courant traversant le moteur

Les signaux numérique ou purement logique :

- $E(s)$
- $a(s)$
- la sortie de  $Ca(s)$
- la consigne(s)

## I.1 Le conditionner de sortie

### I.1.1 Transducteur de courant à compensation de flux

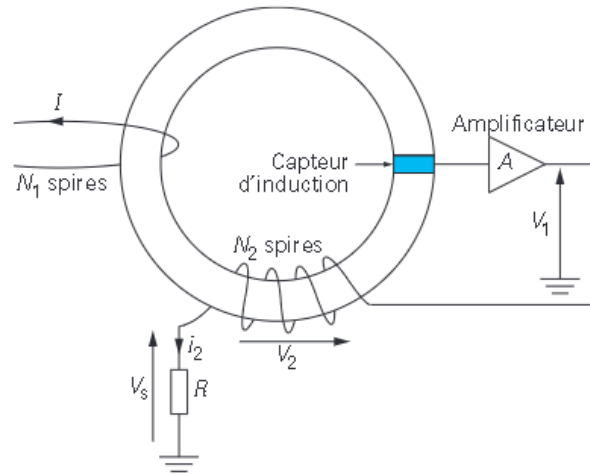
#### I.1.1.1.Principe

Ici nous nous intéressons au transducteur  $Tr(s)$ , il se base sur une compensation de flux magnétique.

“Ce type de capteur de courant fonctionne en boucle fermée. Le principe est représenté à la figure ci-dessous. Le courant à mesurer  $I$  génère un flux dans le circuit magnétique. Il est compensé par le courant  $i_2$  issu de l'amplificateur afin d'annuler en permanence les ampères-tours :

$$N_1 I = N_2 i_2 \quad (1)$$

Le capteur d'induction détecte l'induction dans l'entrefer. L'asservissement de flux, dont la référence de consigne est nulle, génère les ampères-tours nécessaires à l'annulation du champ dans l'entre-fer. La tension de sortie  $V_s$  est l'image du courant de compensation  $i_2$  donc du courant  $I$ . Ce principe permet donc la mesure des courants continus et variables. ”



En réalité notre transducteur est plus élaboré car il utilise le courant en boucle ouverte associé à un transformateur. En plus de ses avantages en termes de linéarité il offre une isolation galvanique entre la puissance et la chaîne de mesure et de conditionnement  $Ca(s)$ .

#### I.1.1.2. Modélisation du transducteur

En étudiant la datasheet du LTS6-NP, on peut en conclure que par sa mise en œuvre sa fonction de transfert équivalente est :

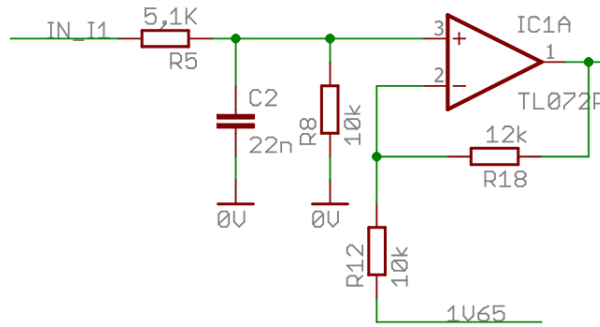
$$V_{outTransducteur} = 0.104 * I_{out}(t) + 2.5 \quad (2)$$

Soit à partir de l'équation (2) la fonction dynamique :

$$T_r(p) = \frac{\tilde{V}_{outTransducteur}(p)}{\tilde{I}_{out}(p)} = 0.104 \quad (3)$$

## I.1.2 Chaîne d'acquisition

Ici nous nous intéressons à la chaîne d'acquisition  $Ca(s)$  représentée ci-dessous :



### I.1.2.1 Démonstration de la fonction de transfert de la chaîne d'acquisition

Le Théorème de superposition à deux sources nous donne  $V_-$  :

$$V_- = \frac{V_{saop}(p)R_{12} + 1V65R_{18}}{R_{12} + R_{18}} \quad (4)$$

Un pont diviseur nous donne  $V_+$  :

$$V_+ = Ve(p) * \frac{Z_{eq}}{R_5 + Z_{eq}} \quad (5)$$

Avec  $Z_{eq} = \frac{\frac{1}{pc_2} * R_8}{\frac{1}{pc_2} + R_8} = \frac{R_8}{R_8 pc_2 + 1}$  :

$$V_+ = \frac{Ve(p)}{R_5 c_2 p + \frac{R_5}{R_8} + 1} = \frac{Ve(p) \frac{R_8}{R_5 + R_8}}{\frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} c_2 p + 1} \quad (6)$$

L'aop étant en régime linéaire  $V_+ = V_-$  :

$$\frac{Ve(p) \frac{R_8}{R_5 + R_8}}{\frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} c_2 p + 1} = \frac{V_{saop}(p)R_{12} + 1V65R_{18}}{R_{12} + R_{18}} \quad (7)$$

$$V_{saop}(p) = \left(1 + \frac{R_{18}}{R_{12}}\right) \left(\frac{R_8}{R_5 + R_8}\right) \frac{Ve(p)}{\frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} c_2 p + 1} - \frac{1V65R_{18}}{R_{12}} \quad (8)$$

Soit à partir de l'équation 8 le modèle dynamique  $\tilde{f}(p) = f(p) - \lim_{p \rightarrow \infty} f(p)$

$$C_a(p) = \frac{\widetilde{V_{saop}(p)}}{\widetilde{V_e(p)}} = \left(1 + \frac{R_{18}}{R_{12}}\right) \left(\frac{R_8}{R_5 + R_8}\right) \frac{1}{\frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} c_2 p + 1} \quad (9)$$

## I.2 Le moteur et le hacheur

### I.2.1 Le moteur

“D'un point de vue électrique, le moteur à courant continu peut être modélisé comme un système dont l'entrée est la tension de commande de l'induit  $u_m(t)$  et la sortie la vitesse de rotation de l'arbre moteur  $\omega_m(t)$ . L'induit est modélisé par une résistance en série avec une inductance et une force contre électromotrice  $e(t)$ . On donne ci-dessous le modèle de connaissance du moteur à courant continu :”

$$u_m(p) = e(p) + Ri(p) + Lpi(p) \quad (10)$$

$$e(p) = K_e \omega(p) \quad (11)$$

On néglige  $e(p)$ .

$$G(p) = \frac{i(p)}{u(p)} = \frac{1}{R + Lp} = \frac{\frac{1}{R}}{1 + \frac{L}{R}p} \quad (12)$$

En réalité le dénominateur de la fonction de transfert est de la forme :

$$(p\tau_m + 1)(p\tau_e + 1) \quad (13)$$

Avec  $\tau_m$  la constante de temps mécanique et  $\tau_e$  la constante de temps électrique.

La datasheet du moteur indique :

$$\tau_m = 13ms \text{ et } \tau_e = 1.1ms$$

### I.2.2 Le hacheur

On s'intéresse ici à  $H(s)$ .

Soit :

$$\langle u(t) \rangle \geq \frac{1}{T} \int_0^T 2E dt \quad (14)$$

$$\langle u(t) \rangle \geq \frac{1}{T} \left( \int_0^{(a-1)T} E dt + \int_{(a-1)T}^T 0 dt \right) \quad (15)$$

$$\langle u(t) \rangle \geq \frac{1}{T} [Et]_0^{(a-1)T} \quad (16)$$

$$\langle u(t) \rangle \geq E(a - 1) \quad (17)$$

Or le signal ne varie pas de 0 à E mais de  $\pm E$  donc on doit le considérer :

$$\langle u(t) \rangle \geq E(2a - 1) \quad (18)$$

Soit

$$\overline{H(p)} = \frac{\overline{u(p)}}{\overline{a(p)}} = 2E \quad (19)$$

## I.3 Correcteur

On cherche à avoir un correcteur proportionnel intégrateur (PI) de la forme :

$$C(p) = \frac{1 + \tau_1 p}{\tau_i p} \quad (20)$$

On cherche à fixer  $\tau_1$  et  $\tau_i$ .

### I.3.1 Boucle ouverte

Soit le système en boucle ouverte :

$$F_{BO}(p) = C(p) * H(p) * G(p) * T_r(p) * C_a(p) \quad (21)$$

$$F_{BO}(p) = \frac{1 + \tau_1 p}{\tau_i p} * \frac{\frac{2E}{R}}{(p\tau_e + 1)} * 0.104 * \left(1 + \frac{R_{18}}{R_{12}}\right) \left(\frac{R_8}{R_5 + R_8}\right) \frac{1}{\frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} c_2 p + 1} \quad (22)$$

#### I.3.1.1 Pole dominant

Nous souhaitons rapporter notre système a un modèle simple pour cela nous allons fixer  $\tau_1 = \tau_e$  de cette manière nous apportons un pole dominant celui du filtre de sortie.

#### I.3.1.2 Marge de phase

Notre cahier des charges indique que la marge de phase doit être supérieure à 45 ° pour assurer la stabilité du système. Pour assurer cette marge de phase nous allons fixer  $F_t$  pour  $20 \log(|F_{BO}(F_T)|) = 0$  avec  $F_T \ll$  pour que cette fréquence appartienne au régime de l'intégrateur (on nous indique que  $F_T = 300\text{Hz}$ )

$$|F_{BO}(j\omega_T)| = 1 \quad (23)$$

On prendra donc :

$$F_{BO}(p) = \frac{1}{\tau_i p} * \frac{K_0}{(\tau_{ca} p + 1)} \quad (24)$$

Avec :

$$K_0 = 0.104 * \left(1 + \frac{R_{18}}{R_{12}}\right) \left(\frac{R_8}{R_5 + R_8}\right) * \frac{2E}{R} = 13.22$$

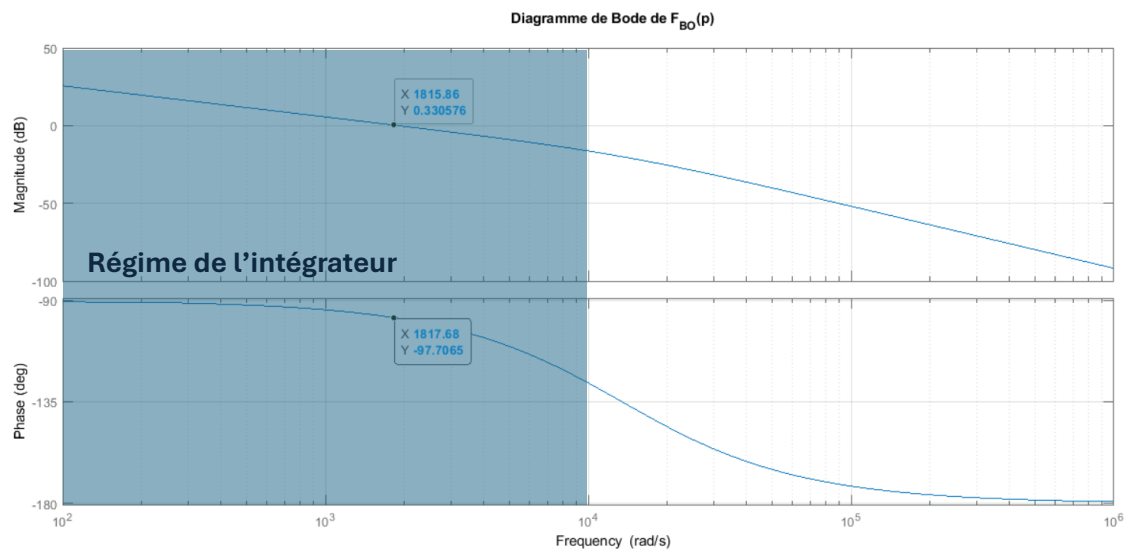
$$\tau_{ca} = \frac{R_5 R_8}{R_5 + R_8} c_2 = 7.43 * 10^{-5} s$$

$$|F_{BO}(j\omega)| = \left| \frac{K_0}{\sqrt{(\tau_i \omega_T)^2 + (\tau_{ca} \tau_i \omega_T^2)^2}} \right| = 1 \quad (25)$$

$$\frac{K_0}{\sqrt{\omega_T^2 + \tau_{ca}^2 \omega_T^4}} = \tau_i \quad (26)$$

$$\tau_i = 6.945\text{ms}$$

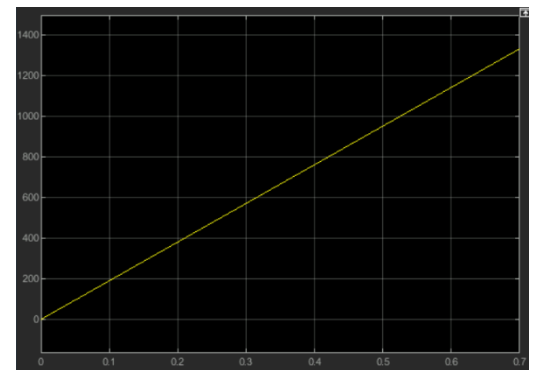
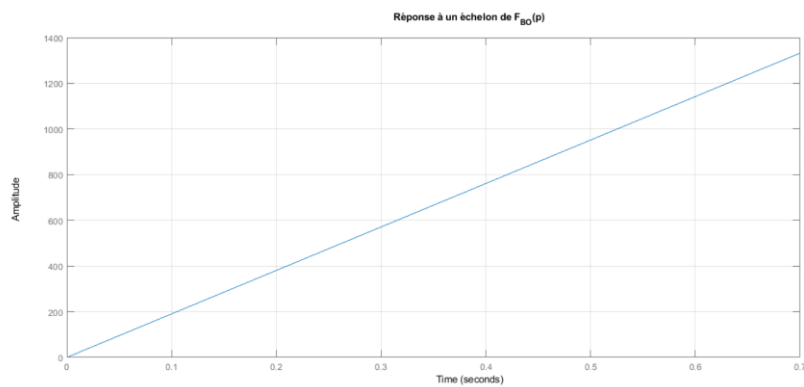
Vérification de la marge de phase :



Soit une marge de phase de  $82^\circ$ .

### 1.3.1.3 Step réponse

Nous allons tracer la réponse à un échelon de la fonction de transfert en boucle ouverte, cela n'a aucun intérêt hormis assurer que notre modèle sur Matlab est équivalent à celui sur Simulink.



### I.3.2 Transformation bilinéaire

Le correcteur est une fonction qui comme dit précédemment sera réalisé par un microcontrôleur (STM32). Il s'agira donc d'un système discret et il nous faut donc le modéliser comme tel. Nous allons donc lui appliquer une transformation bilinéaire.

$$c(p) = \frac{1 + \tau_e p}{\tau_i p} \text{ avec } p = \frac{2}{T} * \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (27)$$

#### I.3.2.1 Déterminer T la fréquence de discrétisation

Il nous faut tout d'abord déterminer T la fréquence de discrétisation. Pour cela on doit accepter une perte sur la marge de phase :

$$\Delta\varphi = -\frac{T_e}{2} * 2\pi * F_T \text{ (On accepte de perdre } 20^\circ \text{ sur la marge de phase)}$$

$$-\frac{20\pi}{180} = -\frac{T_e}{2} * 2\pi * F_T$$

$$T_e = 3.703 * 10^{-4} s$$

Il est possible de faire le calcul ainsi car :

$$\text{Arg}(z * z') = \text{Arg}(z) + \text{Arg}(z')$$

#### I.3.2.2 Modification du module

Cela implique-t-il une modification du module ?

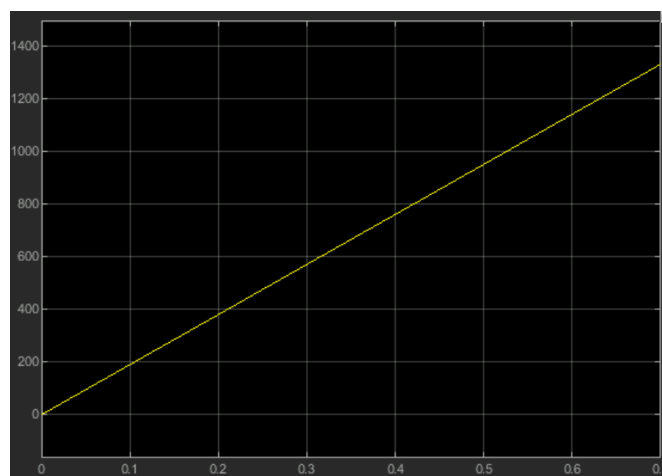
On peut voir la fonction comme un retard, un retard dans le domaine de la place est rigoureusement  $= e^{-as}$  avec  $a$  le retard hors :

$$|f(x) * e^{\theta j}| = |f(x)|$$

On applique donc maintenant la transformation bilinéaire :

$$c(z) = \frac{z \left( 1 + \tau_e \frac{2}{T} \right) + 1 - \tau_e \frac{2}{T}}{z \tau_i \frac{2}{T} - \tau_i \frac{2}{T}} = \frac{6.632 - 4.63}{37.5z - 37.5} = \frac{0.176z - 0.123}{z - 1} \quad (28)$$

Test avec Simulink :

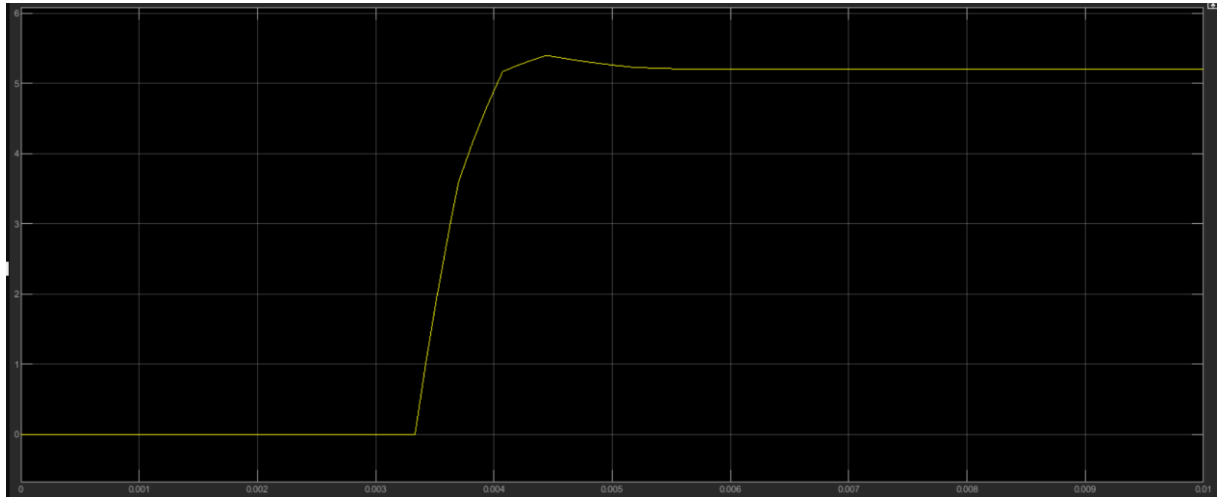


On peut voir que la transformée bilinéaire n'a pas d'impact sur la fonction de transfert.

## II. Etude de la boucle fermée :

### II.1 Simulation de la boucle fermée

Nous réalisons la simulation sous Simulink du système complet en boucle fermée.



### II.2 Modélisation de la boucle fermée

$$F_{BF}(p) = \frac{\frac{2E}{R\tau_i p}}{1 + F_{B0}(p)} \quad (29)$$

$$F_{BF}(p) = \frac{2E}{R} * \frac{\tau_{ca} p + 1}{\tau_{ca} \tau_i p^2 + \tau_i p * K_0} \quad (30)$$

On a bien des pôles purement réel négatif, donc une stabilité E/S.

On un coefficient d'amortissement légèrement supérieure a 1 donc un léger dépassement .

### III. Equation récurrente

On cherche à trouver l'équation récurrence pour réaliser le correcteur et pouvoir l'implémenter.

$$C(z) = \frac{a(z)}{\varepsilon(z)} = \frac{0.176z - 0.123}{z - 1} \quad (31)$$

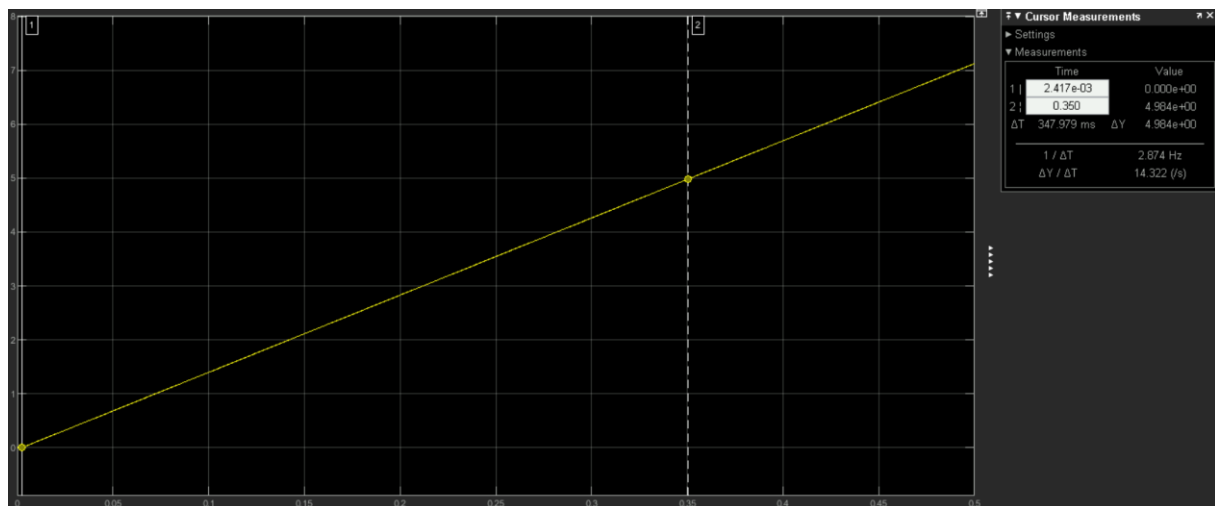
$$a(z)(z - 1) = (u(z) - v_y(z))(0.176z - 0.123) \quad (32)$$

$$aa[k] = 0.176\varepsilon[k] - -0.123\varepsilon[k - 1] + a[k - 1] \quad (33)$$

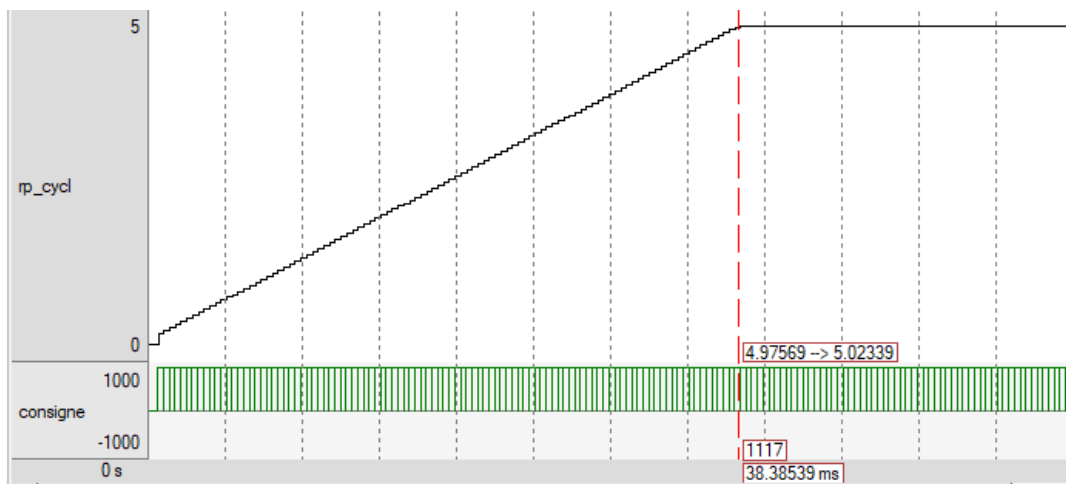
### IV. Implémentation sur Keil

#### IV.1 Temps de réaction du correcteur

Nous allons appliquer une consigne sur notre correcteur et enlever le retour de sortie. Ainsi on peut vérifier que notre correcteur implémenté sur STM32 a le même comportement que celui modéliser sur Simulink.



Le temps de réaction sur la simulation Keil est de 38ms contre 35 sur Simulink.



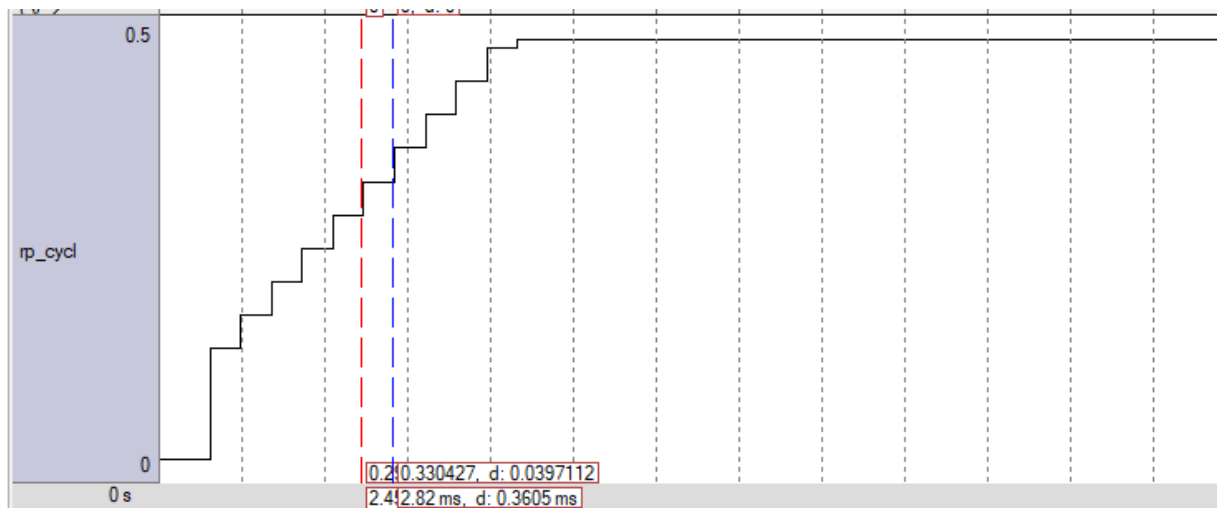
## IV.2 Protection soft

Nous avons pu simuler sur Keil la consigne en la limitant entre 0.9V et 2.42V(soit  $\pm 5A$ ). On implémente l'équation de récurrence. Plus diverse protection notamment sur l'envol de l'intégrateur.

```
155 int consigne, mesure;
156 float erreur, rp_cycl;
157 float erreur1 = 0, rp_cycl_1 = 0;
158 int rp_cycl_2=0;
159
160 void IT_Ext_3V3(void)
161 {
162     consigne = Entree_3V3();
163     if (consigne>3003) consigne = 3006; //Limite à 2.42V la consigne (potentionmètre)
164     if (consigne<1117) consigne = 1117; //Limite à 0.9 la consigne (potentionmètre)
165
166     mesure = Il();
167
168     erreur = ((float)consigne - (float)mesure) * 3.3 / 4096; // Calcul de l'erreur en Volts
169
170     rp_cycl = 0.176*erreur-0.123*erreur1+rp_cycl_1; // Formule équation de récurrence
171
172     if(rp_cycl>0.5) rp_cycl = 0.5;
173     if(rp_cycl<-0.5) rp_cycl = -0.5;
174
175     rp_cycl_2 = (int)(rp_cycl * 1000.0); // Convertir le rapport cyclique
176
177     R_Cyc_1(rp_cycl_2+500); //
178     R_Cyc_2(500-rp_cycl_2); //
179
180     rp_cycl_1 = rp_cycl;
181     erreur1 = erreur;
182 }
```

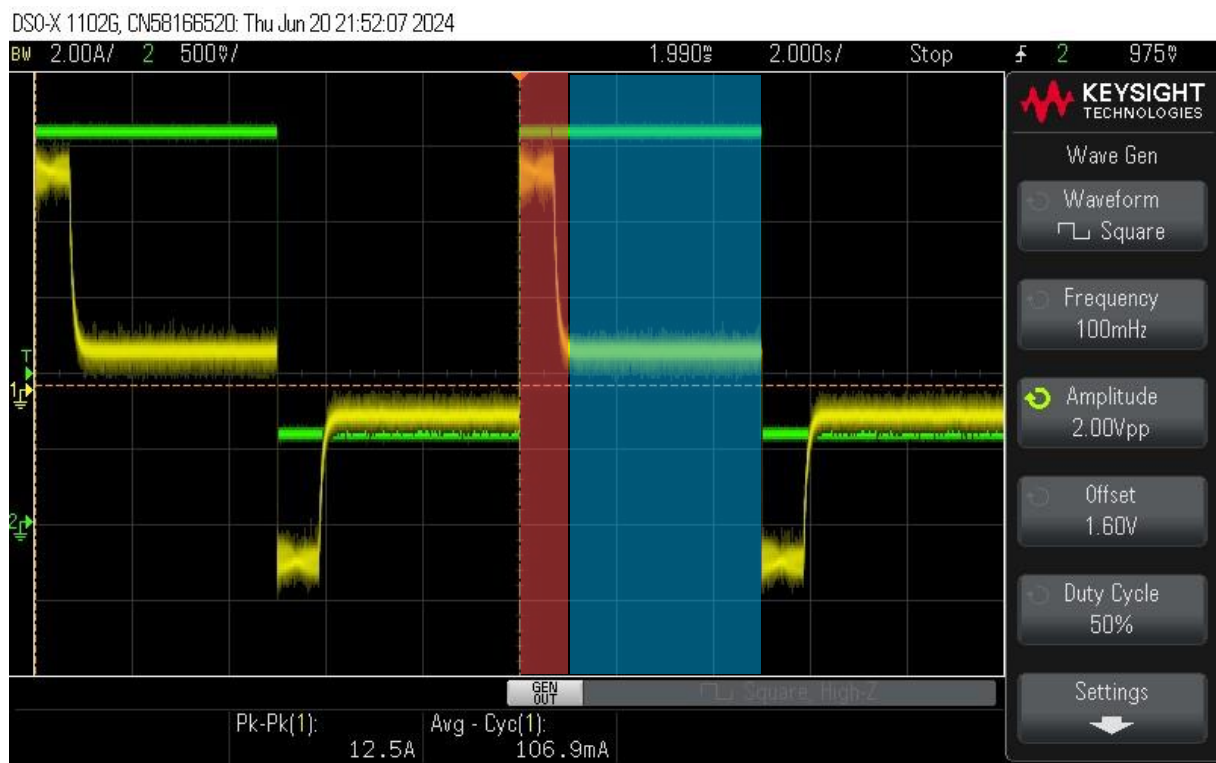
Le temps de correction du correcteur est représenté au travers de ce graphe, nous observons que les mesures effectuées sont en corrélation avec les simulations de simulink avec  $T_e = 360 \mu s$ .

Nous avons saturé la sortie dans le but d'éviter d'envoyer trop de courant dans le moteur.



## V. Mesure

### V.1 Régime libre



En vert la consigne appliquer, en jaune le courant dans le moteur.

Deux phases :

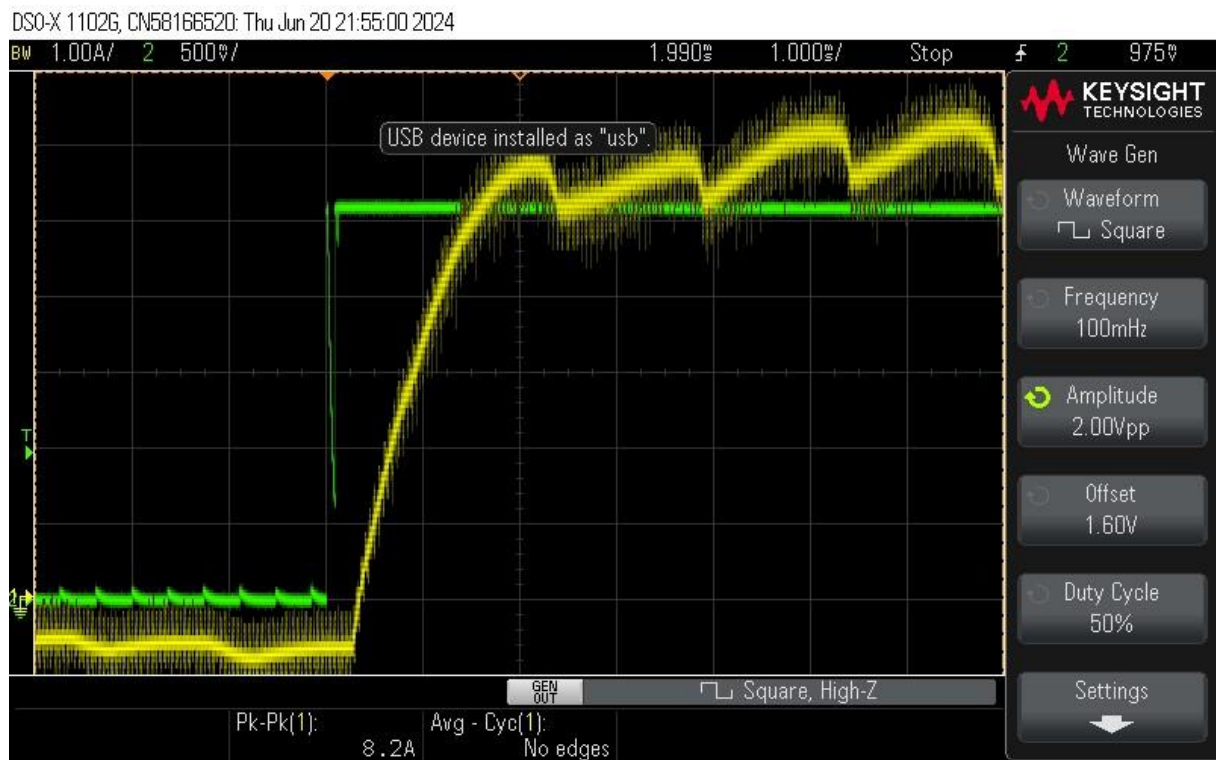
Phase une :

Le système est dans la boucle d'asservissement, il est en saturation.

Phase deux :

L'asservissement ne peut pas atteindre le courant demandé car il n'a pas de charge suffisante.  
Le moteur fonctionne donc à tension de 24 V avec un rapport tension/courant qui lui est propre.

## V.2 Réponse Step

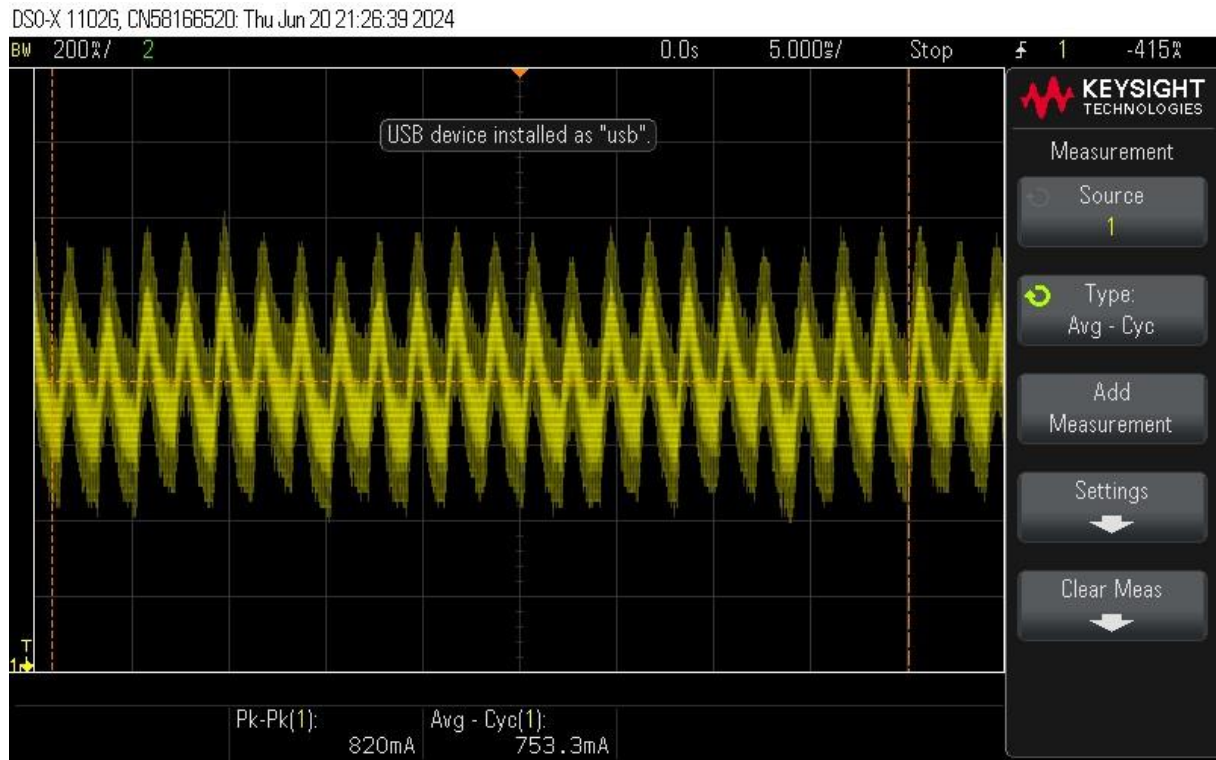


Soit un temps de monter d'environ 1.3ms ce qui est cohérent avec les simulations Simulink.

## V.3 Bode

Faire un Bode est inutile toutes les informations peuvent être déterminées avec la réponse à un step.

## V.4 TOS



## Source

[http://stephane.genouel.free.fr/FT/0%20Dossier%20technique/1%20Texte/Moteurelectriqueweb/co/Moteur%20electrique\\_4.html](http://stephane.genouel.free.fr/FT/0%20Dossier%20technique/1%20Texte/Moteurelectriqueweb/co/Moteur%20electrique_4.html)

<https://cdn-techniques-ingenieur-fr.gorgone.univ-toulouse.fr/lucy/ti/cdn.prod.v3.3.0/>

# Conclusion

Ce rapport détail la modélisation et l'implémentation d'un système de contrôle à boucle fermée pour un moteur à courant continu, avec un accent particulier sur la conception d'un correcteur numérique. Le projet a permis d'explorer diverses étapes essentielles, allant de la modélisation des composants du système à la simulation et la vérification de la performance de la boucle

En conclusion, ce travail a démontré avec succès la conception et la mise en œuvre d'un système de contrôle performant pour un moteur à courant continu, intégrant des techniques avancées de modélisation et de simulation, tout en respectant les contraintes pratiques d'implémentation sur un microcontrôleur. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des applications industrielles nécessitant des contrôles de précision pour les systèmes électromécaniques.