

Projet GE S7

Asservissement d'une machine à courant continu
Électrotechnique - Module 3

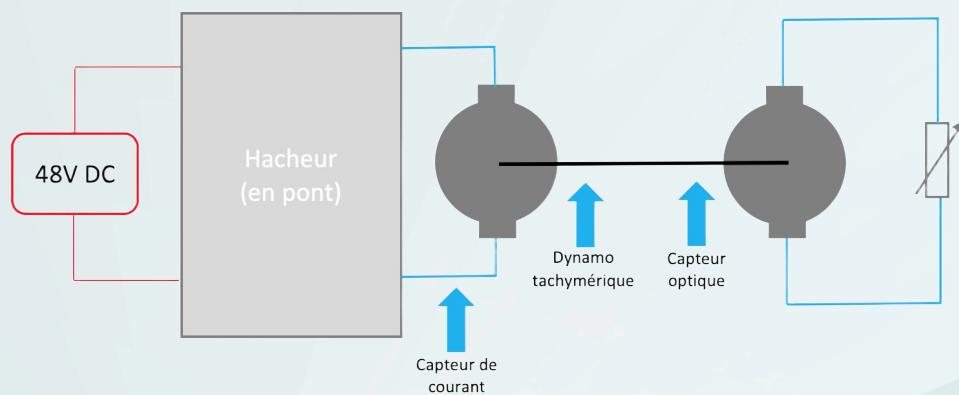
TRENCHANT Evan

TROULLIER Laël

VIRQUIN Rudy

GE4, groupe 2

RAPPORT FINAL



1 - Dimensionnement des asservissements

Après avoir validé la structure de contrôle avec des régulateurs PI idéaux en simulation, il est nécessaire de passer à l'étape de réalisation pratique. Cette phase consiste à traduire les fonctions de transfert théoriques en circuits électroniques réels à base d'amplificateurs opérationnels (AOP).

Le dimensionnement des asservissements constitue une étape cruciale du projet, car elle établit le lien entre la théorie et la mise en œuvre physique. Chaque bloc de la chaîne de commande doit être soigneusement dimensionné afin de garantir que les performances obtenues en simulation soient effectivement reproduites sur le système réel. Dans ce chapitre, nous détaillons le dimensionnement de chacun des éléments constitutifs de la boucle d'asservissement, en commençant par les circuits soustracteurs, puis en abordant les correcteurs PI pour les boucles de courant et de vitesse.

1. Réalisation des soustracteurs

Pour commencer nous réalisons un montage soustracteur permettant de comparer la sortie du montage à la commande.

On utilise alors ce montage à AOP qui permet, en choisissant les mêmes valeurs de résistances, d'obtenir un soustracteur simple :

$$V_s = V_2 - V_1$$

On choisit des résistances de $10k\Omega$ pour la réalisation pratique.

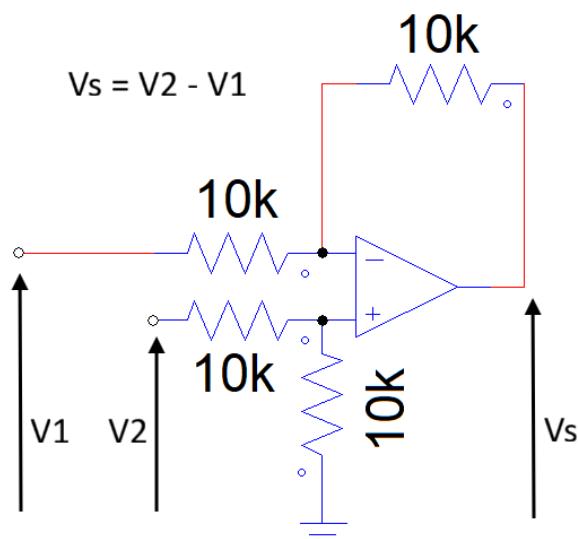


FIGURE 1.1 – Montage soustracteur à AOP

2. Dimensionnement des correcteurs réels

2.1. Structure du correcteur PI

La structure du correcteur PI à implémenter est représentée à la figure 1.2.

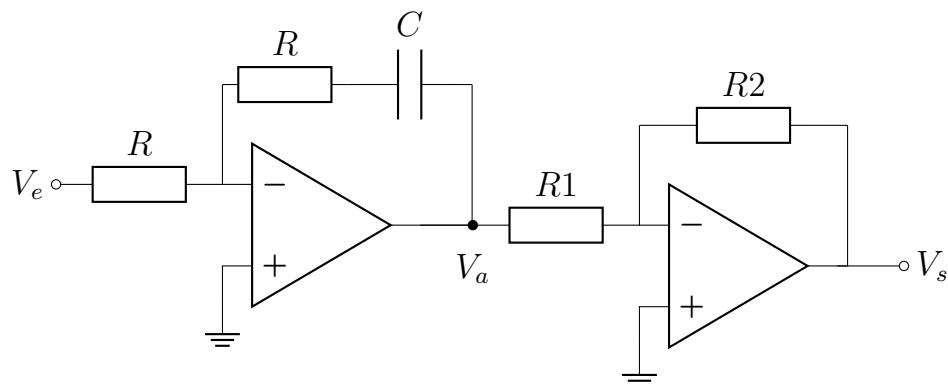


FIGURE 1.2 – Schéma d'un correcteur PI avec des amplificateurs opérationnels

2.2. Calcul de la fonction de transfert globale

La fonction de transfert globale du système s'exprime comme suit :

$$H(s) = \frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{V_a(s)}{V_e(s)} \cdot \frac{V_s(s)}{V_a(s)} = H_1(s) \cdot H_2(s)$$

Dans cette configuration, on suppose que les amplificateurs opérationnels sont idéaux, ce qui implique $\varepsilon = 0 \implies V^+ = V^-$. Le dimensionnement des correcteurs s'effectue en séparant les deux fonctions de transfert.

2.3. Dimensionnement du correcteur $H_1(s)$

Pour le premier étage du correcteur, on introduit une impédance équivalente :

$$Z_{eq}(s) = R + \frac{1}{C \cdot s} = \frac{RC \cdot s + 1}{sC}$$

En appliquant le théorème de Millman à l'entrée négative du premier AOP, on obtient :

$$V^- = \frac{\frac{V_e}{R} + \frac{V_a}{Z_{eq}(s)}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{Z_{eq}(s)}}$$

Puisque $V^- = 0V$, le numérateur doit être nul. On a donc :

$$\frac{V_e}{R} + \frac{V_a}{Z_{eq}(s)} = 0$$

En réarrangeant, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{V_a}{Z_{eq}(s)} &= -\frac{V_e}{R} \\ V_a &= -\frac{Z_{eq}(s)}{R} V_e \end{aligned}$$

Et donc :

$$H_1(s) = \frac{V_a(s)}{V_e(s)} = -\frac{Z_{eq}(s)}{R} = -\frac{\frac{RC \cdot s + 1}{sC}}{R} = -\frac{RC \cdot s + 1}{RC \cdot s}$$

2.4. Dimensionnement du correcteur $H_2(s)$

On applique le théorème de Millman au nœud V^- du second AOP :

$$V^- = \frac{\frac{V_a(s)}{R_1} + \frac{V_s(s)}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Puisque $V^- = 0V$ (masse virtuelle), le numérateur doit être nul :

$$\frac{V_a(s)}{R_1} + \frac{V_s(s)}{R_2} = 0$$

On isole $V_s(s)$ pour trouver la fonction de transfert :

$$\frac{V_s(s)}{R_2} = -\frac{V_a(s)}{R_1} \implies V_s(s) = -V_a(s) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

La fonction de transfert du second étage s'exprime alors par :

$$H_2(s) = \frac{V_s(s)}{V_a(s)} = -\frac{R_2}{R_1}$$



2.5. Fonction de transfert globale et identification

On calcule la fonction de transfert globale $H(s)$ en multipliant $H_1(s)$ et $H_2(s)$:

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) = \left(-\frac{RC \cdot s + 1}{RC \cdot s} \right) \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1} \right)$$

Les deux signes négatifs s'annulent. On réarrange les termes :

$$H(s) = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(\frac{RC \cdot s + 1}{RC \cdot s} \right)$$

On sépare la fraction pour faire apparaître la forme canonique :

$$H(s) = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(\frac{RC \cdot s}{RC \cdot s} + \frac{1}{RC \cdot s} \right) = \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{RC \cdot s} \right)$$

La forme de Laplace standard (ou canonique) pour un correcteur PI est :

$$H_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

2.6. Identification des paramètres

Par identification directe avec la structure PI souhaitée, on obtient les relations suivantes :

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{R_2}{R_1} \\ T_i &= RC \end{aligned}$$

2.7. Choix des composants

À partir des paramètres théoriques des correcteurs PI déterminés précédemment, nous procérons à l'identification des composants passifs normalisés (résistances et condensateurs) dont les valeurs commerciales permettent d'approcher au mieux les caractéristiques désirées. Les résultats de cette identification sont présentés ci-après :

Correcteur PI pour l'asservissement en courant :

Les paramètres du correcteur sont : $K_p = 5,053$ et $T_i = K_p/K_i = 1,39 \times 10^{-4}$ s.

Par identification avec les relations $K_p = R_2/R_1$ et $T_i = RC$, nous obtenons :

$$R \cdot C = 10 \times 10 \times 10^{-6} = 1 \times 10^{-4} \approx T_i \quad \text{et} \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{8,2 \times 10^3}{1,5 \times 10^3} = 5,467 \approx K_p$$

Composant	Valeur
R	10Ω
C	$10 \mu\text{F}$
R_1	$1,5 \text{k}\Omega$
R_2	$8,2 \text{k}\Omega$

Correcteur PI pour l'asservissement en vitesse :

Les paramètres du correcteur sont : $K_p = 6,8$ et $T_i = K_p/K_i = 13,45$ ms.

Par identification avec les relations $K_p = R_2/R_1$ et $T_i = RC$, nous obtenons :

$$R \cdot C = 3,3 \times 10^3 \times 3,9 \times 10^{-6} = 0,0129 \approx T_i \quad \text{et} \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{6,8 \times 10^3}{1 \times 10^3} = 6,8 \approx K_p$$

Composant	Valeur
R	$3,3 \text{ k}\Omega$
C	$3,9 \mu\text{F}$
R_1	$1 \text{ k}\Omega$
R_2	$6,8 \text{ k}\Omega$

3. Dimensionnement des autres composants de la chaîne d'asservissement

Après avoir dimensionné les correcteurs PI et les soustracteurs, il est nécessaire de compléter la chaîne d'asservissement avec les autres éléments essentiels : le limiteur de courant pour protéger le système, et les capteurs de vitesse (dynamo tachymétrique et codeur incrémental) qui nécessitent des circuits de conditionnement pour adapter leurs signaux.

3.1. Limiteur de courant

Afin de garantir le respect des contraintes fixées par le cahier des charges, il est impératif de limiter le courant circulant dans le système à une valeur maximale de 5 A . Cette protection est assurée par un circuit écrêteur de tension, réalisé à l'aide de résistances et diodes.

Principe de fonctionnement

Le montage proposé repose sur une architecture de redressement simple alternance permettant d'effectuer un écrêtage asymétrique du signal.

Durant l'alternance positive du signal d'entrée, la diode D se trouve polarisée en direct et devient conductrice. Le courant traverse alors le diviseur résistif constitué des résistances en série ($20 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega$), générant une chute de tension aux bornes de cet ensemble. Cette tension présente une forme identique à celle de l'alternance positive du signal d'entrée.

Lors de l'alternance négative, la diode D se trouve polarisée en inverse, ce qui se traduit par une impédance interne très élevée. Dans cette configuration, le courant traversant le diviseur résistif devient quasi nul, entraînant une chute de tension négligeable à ses bornes. Le signal de sortie est ainsi écrété pour les valeurs négatives.

L'amplificateur opérationnel monté en configuration suiveur, placé en sortie du circuit, assure une fonction d'adaptation d'impédance. Il permet de découpler les étages tout en préservant l'intégrité du signal écrêté sans charge supplémentaire sur le montage à diode.

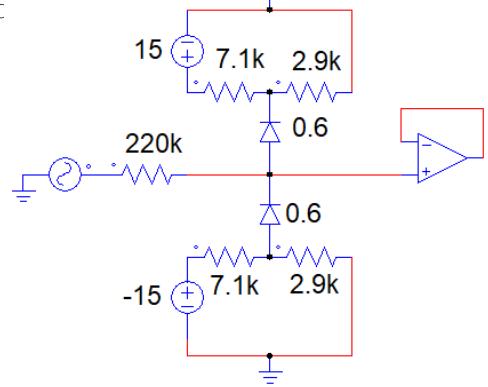


FIGURE 1.3 – Montage limiteur de tension à diodes

3.2. Capteur dynamo tachymétrique

La dynamo tachymétrique est un capteur analogique qui convertit directement la vitesse de rotation en une tension proportionnelle. Ce composant nécessite un conditionnement de signal pour adapter sa sortie aux niveaux requis par notre système d'asservissement.

Caractéristiques du capteur

Le capteur dynamo tachymétrique utilisé possède une constante de conversion $K_{\text{tachy}} = 6 \times 10^{-3}$ V/(rad/s). Cette valeur indique la tension générée par le capteur pour une vitesse de rotation donnée.

Conditionnement du signal

Sur PSIM, nous modélisons le capteur en appliquant le facteur 6/1000 à la vitesse mesurée pour représenter la dynamo tachymétrique réelle. Pour adapter la tension de sortie aux niveaux requis par le système, nous ajoutons un pont diviseur de tension qui divise par deux la tension de sortie.

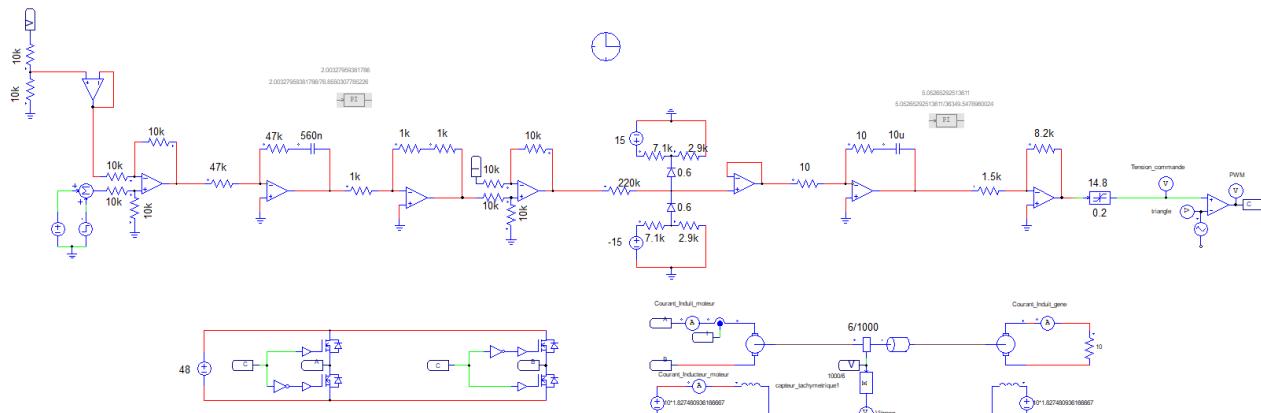


FIGURE 1.4 – Schéma de modélisation du capteur tachymétrique sur PSIM

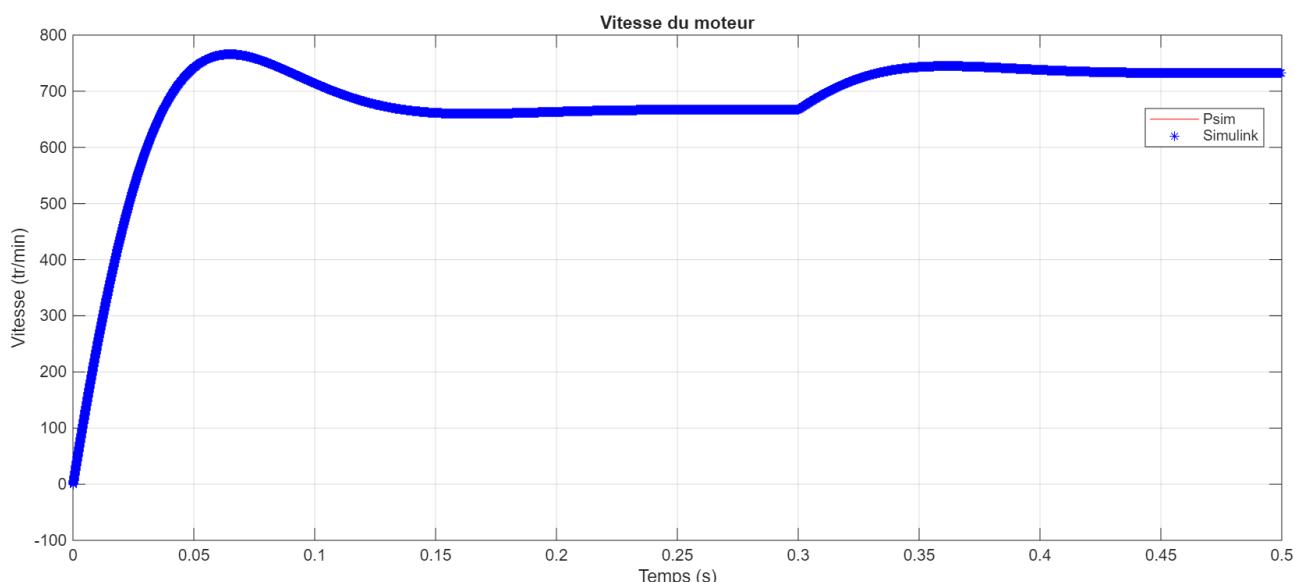


FIGURE 1.5 – Comparaison entre Simulink et PSIM pour le capteur tachymétrique et les choix de composants

La figure 1.5 illustre la comparaison entre les modélisations Simulink avec correcteurs PI idéaux et PSIM avec composants réels (résistances et condensateurs). On observe une excellente concordance entre les deux courbes, sachant que nous avons à nouveau appliqué un facteur 0,99 aux données Simulink. Le graphe confirme que les choix de composants permettent de reproduire les performances théoriques. Les performances dynamiques restent conformes aux spécifications, démontrant que le passage aux composants réels n'altère pas significativement le comportement de l'asservissement.

3.3. Codeur incrémental

Le codeur simulé sous PSIM délivre une tension comprise entre 0 et 1 V, alors que le codeur réel fournit un signal de 0 à 15 V. Pour corriger cette différence d'échelle et obtenir une simulation représentative, un gain de 15 a été ajouté à l'entrée du bloc de calcul de la vitesse de rotation.

Circuit de conversion impulsions/tension

Pour utiliser le codeur incrémental dans notre système d'asservissement analogique, il est nécessaire de convertir les impulsions numériques en une tension analogique proportionnelle à la vitesse. Cette conversion peut être réalisée par un circuit fréquence-tension (convertisseur F/V). Le schéma complet de l'asservissement en vitesse avec codeur incrémental devient ainsi :

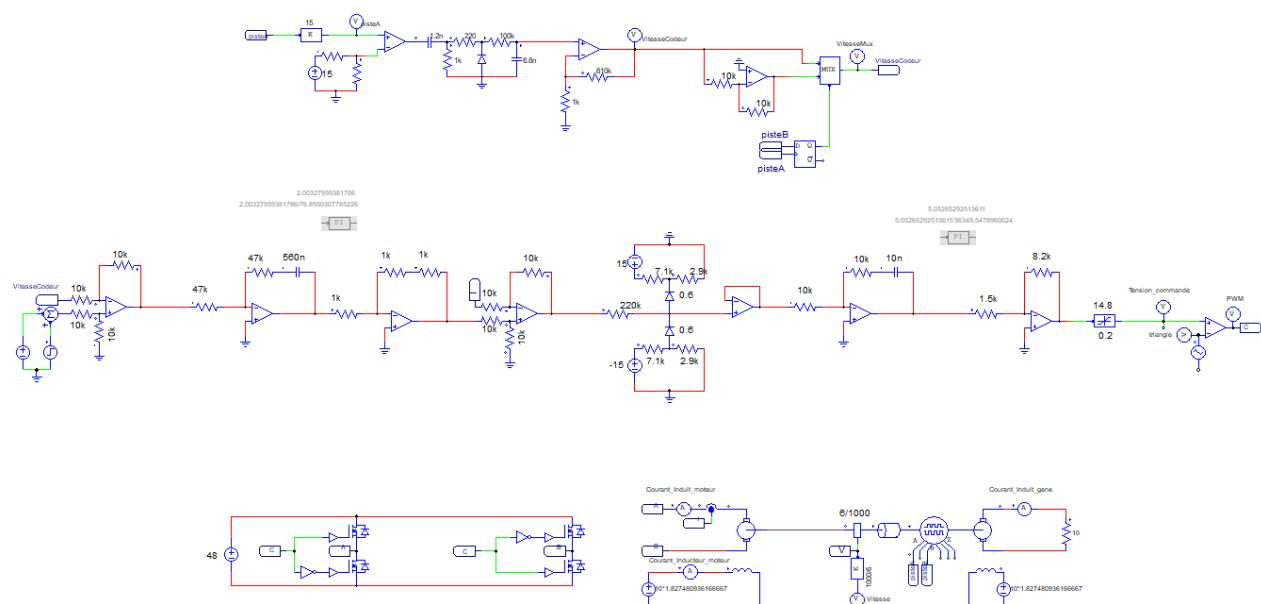


FIGURE 1.6 – Schéma complet de l'asservissement en vitesse avec codeur incrémental

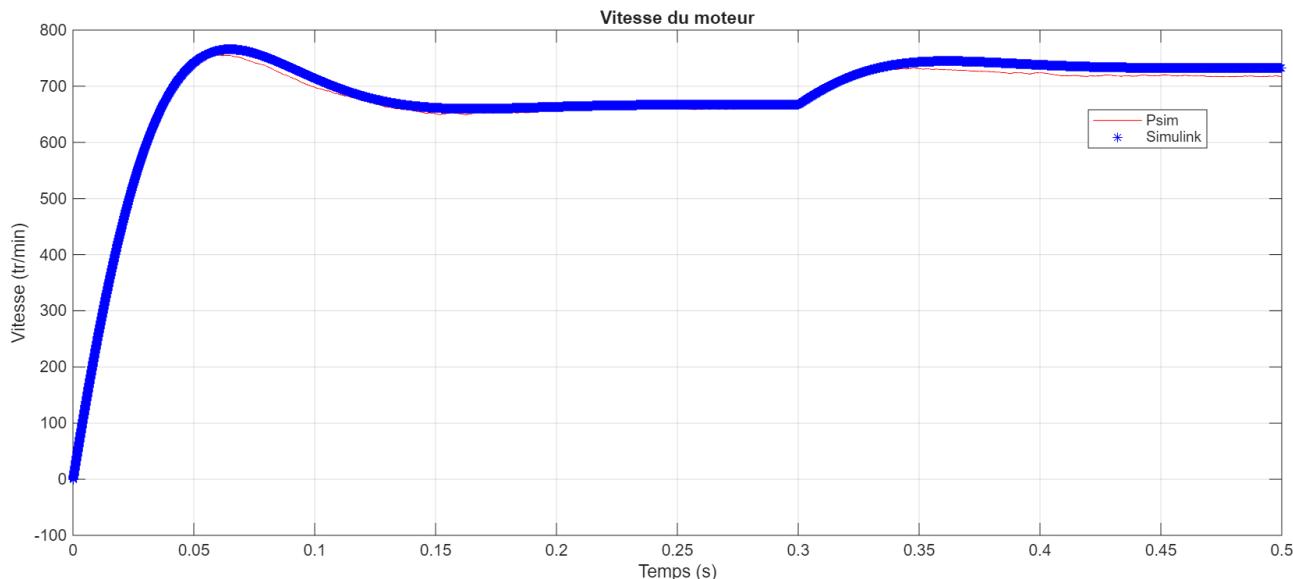


FIGURE 1.7 – Comparaison entre Simulink et PSIM pour le codeur incrémental et les choix de composants

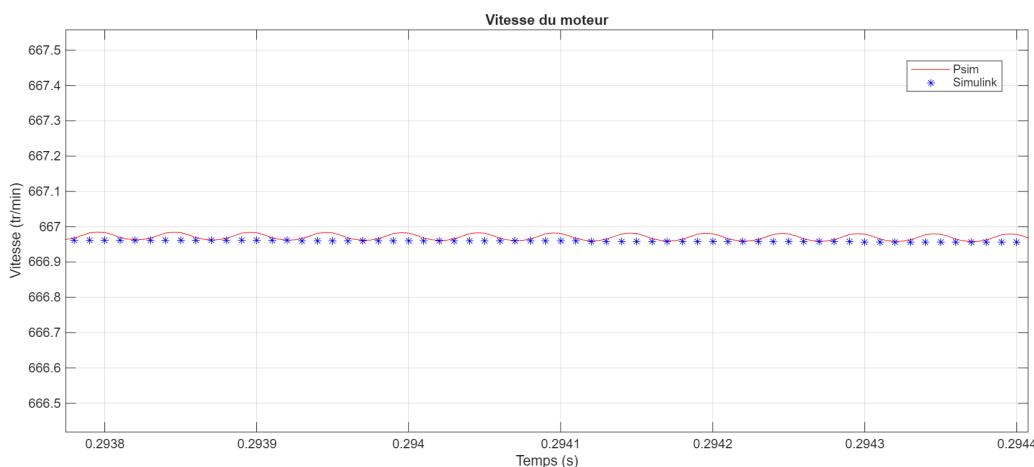


FIGURE 1.8 – Zoom sur la comparaison entre Simulink et PSIM pour le capteur tachymétrique

La figure 1.7 illustre la comparaison entre les modélisations Simulink avec correcteurs PI idéaux et PSIM avec composants réels (résistances et condensateurs). On observe une bonne concordance entre les deux courbes, confirmant que les choix de composants permettent de reproduire les performances théoriques. Les oscillations caractéristiques du codeur incrémental sont présentes sur la simulation PSIM, validant la cohérence de la modélisation du capteur numérique. Les performances dynamiques restent conformes aux spécifications, démontrant que le passage aux composants réels n'altère pas significativement le comportement de l'asservissement.

2 - Conception des PCB



3 - Assemblage du système

1. Commande des composants

En parallèle de la réalisation du circuit imprimé, nous avons réalisé la commande de composants chez le fournisseur Farnell.

Le budget étant restreint à 25€, nous avons fait en sorte de récupérer un maximum de composants déjà présents en PFGE pour limiter le coût de notre commande. De plus, nous avons mutualisé les commandes des différents groupes pour éviter les frais de livraison et diminuer le coût de certains composants achetés en plus gros lot.

Voici la liste des composants que nous avons dû commander :

Composant	Référence	Lien Farnell	Quantité	Prix HT
TL082	TL082CDT	Lien	6	3,52 €
Diodes	1N4148WS	Lien	3	0,50 €
Potentiomètre 10kΩ	T93YA103KT20	Lien	2	1,90 €
Bascule D	HEF40175BT,653	Lien	1	1,06 €
MUX	DG419DY-E3	Lien	1	1,57 €
Capacité 470 μ F	25ZLK470M8X20	Lien	2	0,83 €
Résistance 47kΩ	CRCW080547K0FKEA	Lien	1	0,22 €
Résistance 8,2kΩ	MCWF08P8201FTL	Lien	1	0,11 €
Résistance 560kΩ	ESR10EZPF5603	Lien	1	0,75 €
Capacité 560nF	MC1206B564K250CT	Lien	1	0,79 €
Capacité 6.8nF	MC1206B682K201CT	Lien	1	0,41 €
Capacité 1.2nF	CC1206JKNPOZBN122	Lien	1	0,63 €
TOTAL TTC				14,8 €

Tableau 1 : Liste des composants commandés

2. Soudure du PCB

Une fois que le PCB a été produit par les techniciens et que nous avons reçu la commande, nous sommes passés à la soudure de la carte.

Pour ce faire, nous avions décidé de réaliser une carte entièrement avec des composants montés en surface pour obtenir la carte la plus petite possible. Nous avons donc réalisé en premier la soudure des composants CMS au four à souder, nous avons donc placé les AOP, résistances, capacités et diodes ainsi que la bascule D et l'interrupteur commandé.

Une fois ces composants soudés, nous nous sommes occupés des composants traversant : les différents borniers, potentiomètres et capacités de découplage. Nous avons soudé ces éléments au fer à souder.

Cela nous donne le PCB visible à côté.

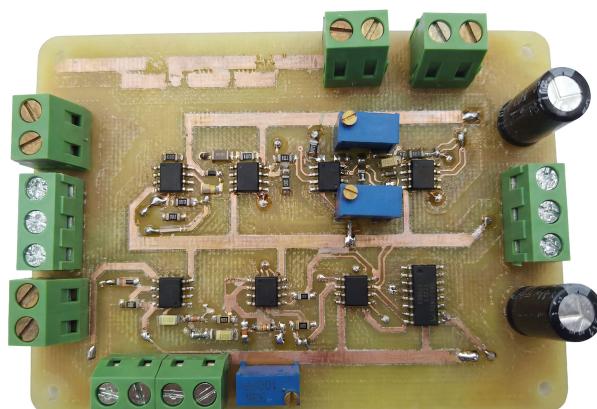


FIGURE 3.1 – PCB après soudure des composants

Pour ce qui est de la connexion de notre carte au système réel, nous devons utiliser des câbles coaxiaux pour récupérer les différentes tensions utiles au fonctionnement du système. De plus, notre système doit être alimenté en +15V et -15V à l'aide d'une alimentation de labo.

Enfin, il doit être possible de choisir avec quel capteur nous réalisons l'asservissement, donc nous utilisons un interrupteur pour basculer entre la dynamo tachymétrique et le codeur incrémental qui est relié à un port VGA.

Ce qui fait que nous devons réaliser la soudure de fils reliant la carte à ces composants de connectique :

- 4 fiches BNC
- 3 fiches bananes
- 1 interrupteur
- 1 connecteur VGA

Pour faire cela proprement, nous avons coupé les fils pour qu'ils soient le plus courts possible pour éviter leur encombrement. Nous avons également rajouté des gaines thermo rétractables à chaque soudure pour éviter tout faux contact ou court-circuit.

Voici le PCB relié à tous les organes de connexions :

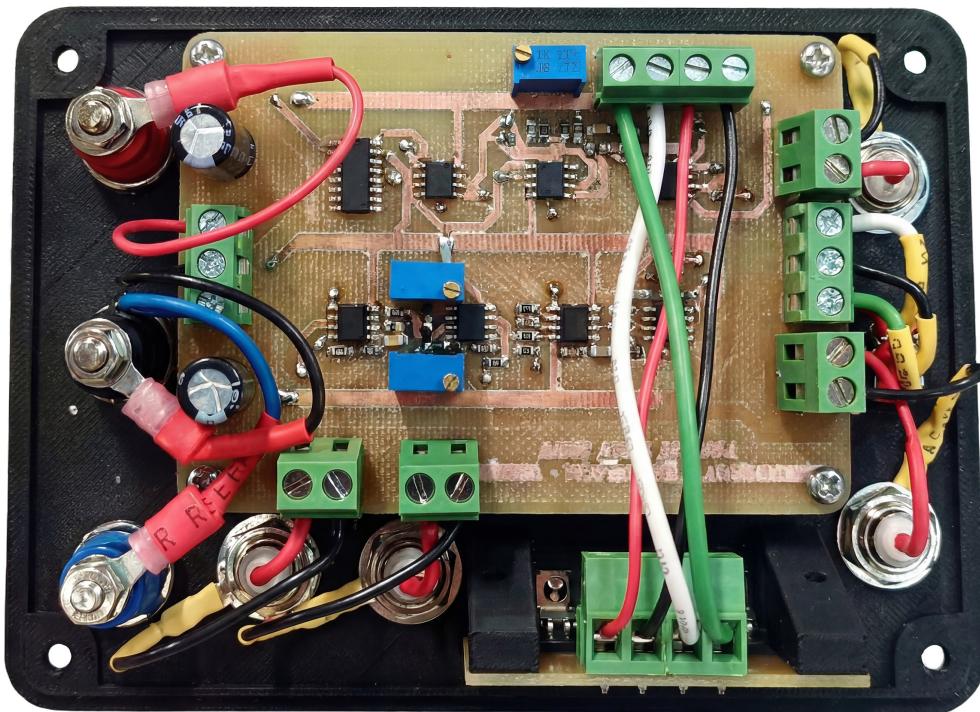


FIGURE 3.2 – PCB relié à toutes les connectiques

3. Réalisation du boîtier

Pour maintenir le PCB et les connectiques en place, nous avons réalisé une boîte imprimée en 3D pour y fixer tous les composants.

Cette boîte a été pensée pour être la plus pratique possible si des modifications doivent être réalisées. C'est pourquoi nous avons décidé de fixer la totalité des composants sous le couvercle de cette boîte pour que, si nous voulons l'ouvrir, nous ayons facilement accès à tous les composants. Le but était vraiment d'éviter que des fils relient le couvercle et la boîte, ce qui est embêtant quand on veut l'ouvrir.

Nous avons aussi fait en sorte d'indiquer sur le couvercle l'utilité de chaque connectique en imprimant le texte d'une autre couleur. Nous utilisons aussi des vis en plastique pour maintenir fermée la boîte car ce matériau n'est pas conducteur.

Pour ce qui est du reste de la boîte, nous avons simplement réalisé un boîtier le plus petit possible et capable d'accueillir tous les composants. Voici le résultat du projet entièrement assemblé :



FIGURE 3.3 – Couvercle du boîtier

[PLACEHOLDER : Image dessous de la boîte]

FIGURE 3.4 – Vue de dessous du boîtier

Conclusion

Ce projet d'asservissement d'une machine à courant continu a permis d'acquérir une vision complète de la chaîne de régulation, depuis la modélisation théorique jusqu'au dimensionnement des composants électroniques réels. À ce stade du projet, il convient de dresser un bilan des travaux réalisés et d'identifier les tâches qui restent à accomplir pour finaliser le système.

Travaux restant à réaliser

Malgré les avancées significatives effectuées en simulation et en dimensionnement, plusieurs étapes essentielles restent à compléter avant la finalisation du projet :

1. **Réalisation du circuit imprimé (PCB)** : La conception et la fabrication de la carte électronique permettant d'implémenter physiquement l'ensemble des circuits dimensionnés (correcteurs PI, soustracteurs, limiteur de tension, conditionnement des capteurs).
2. **Assemblage et câblage du système** : Le montage des composants sur le PCB, le raccordement du moteur, des capteurs (dynamo tachymétrique et codeur incrémental) et de l'alimentation de puissance.
3. **Tests et validation expérimentale** : La mise en service progressive du système réel, comprenant :
 - La vérification du bon fonctionnement des correcteurs PI analogiques
 - Les tests de l'asservissement en courant puis en vitesse
 - La comparaison des performances mesurées avec les résultats de simulation
4. **Réglage et optimisation** : L'ajustement fin des paramètres si nécessaire pour compenser les écarts entre le modèle théorique et la réalité (tolérances des composants, pertes non modélisées, perturbations électromagnétiques).
5. **Caractérisation complète** : L'évaluation des performances dans différentes conditions de fonctionnement (variations de charge, changements de consigne, robustesse face aux perturbations).

Bilan et perspectives

Les travaux menés ont établi des fondations solides pour la réalisation pratique du système. La modélisation mathématique de la MCC a été développée et validée sur MATLAB/Simulink et PSIM, incluant la machine à vide, avec charge mécanique et hacheur quatre quadrants. Deux boucles de régulation en cascade ont été conçues et optimisées, respectant les spécifications du cahier des charges en termes de temps de réponse et de dépassement. L'étude comparative de deux capteurs (dynamo tachymétrique et codeur incrémental) a validé la flexibilité du système, et le dimensionnement complet des circuits analogiques réels a été réalisé avec succès.

Ce projet a permis de développer une méthodologie rigoureuse allant de la modélisation théorique à la réalisation pratique, tout en maîtrisant les outils de simulation et en validant systématiquement chaque étape par comparaison croisée. La réalisation expérimentale du système constituera l'aboutissement de ces travaux, permettant de confronter les prédictions théoriques à la réalité. Les fondations méthodologiques acquises constitueront des atouts précieux pour les développements futurs et l'adaptation du système à d'autres applications industrielles.

Liste des figures et chemins d'accès

Cette section recense l'ensemble des figures présentes dans ce rapport ainsi que le chemin d'accès aux fichiers de simulation correspondants.

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/00_Moteur_a_Vide/Moteur_Seul_VALIDE_12_09_2025.slx

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/00_Moteur_a_Vide/Moteur_Seul_VALIDE_12_09_2025.slx

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/00_Moteur_a_Vide/Moteur_Seul_VALIDE_12_09_2025.psimsch

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/00_Moteur_a_Vide/Comparaison_Moteur_Seul_VALIDE_12_09_2025.m

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/01_Moteur_Charge_Frottement/Moteur_Charge_Frottement_VALIDE_03_11_2025.slx

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/01_Moteur_Charge_Frottement/Moteur_Charge_Frottement_VALIDE_03_11_2025.psimsch

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/01_Moteur_Charge_Frottement/Comparaison_Courant_Moteur_Charge_Frottement_VALIDE_03_11_2025.m

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/02_Moteur_Hacheur/Moteur_Hacheur_VALIDE_03_11_2025.psimsch

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/02_Moteur_Hacheur/Moteur_Hacheur_VALIDE_03_11_2025.slx

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/02_Moteur_Hacheur/Comparaison_Courant_Moteur_Hacheur_VALIDE_03_11_2025.m

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/03_BF_Courant/BF_Courant_VALIDE_06_11_2025.slx

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/03_BF_Courant/BF_Courant_VALIDE_06_11_2025.psimsch

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/03_BF_Courant/Comparaison_Asservissement_Courant_VALIDE_06_11_2025.m

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/04_BF_Courant_Vitesse/BO_Vitesse/BO_Vitesse_VALIDE_06_11_2025.slx

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/04_BF_Courant_Vitesse/BO_Vitesse/BO_Vitesse_VALIDE_06_11_2025.psimsch

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/04_BF_Courant_Vitesse/Comparaison_BF_Vitesse/Comparaison_Asservissement_Courant_Vitesse_VALIDE_06_11_2025.m

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/05_Codeur_Incrémentale/BF_Vitesse/Codeur_Incrementale_VALIDE_08_11_25.psimsch

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/05_Codeur_Incrémentale/BF_Vitesse/Codeur_Incrementale_VALIDE_08_11_25.psimsch

Figure ??: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/05_Codeur_Incrémentale/Comparaison_Vitesse_Codeur_Incremental_VALIDE_08_11_2025.m

Figure 1.4: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/06_Choix_Des_Composants/Tachy/Choix_composants_Tachy_VALIDE_08_11_25.psimsch

Figure 1.5: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/06_Choix_Des_Composants/Tachy/Comparaison_Composants_Tachy_VALIDE_08_11_2025.m

Figure 1.6: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/06_Choix_Des_Composants/Codeur/Choix_Composants_Codeur_Incremental_VALIDE_08_11_25.psimsch

Figure 1.7: Modélisation_Intermédiaire_VALIDE/06_Choix_Des_Composants/Codeur/Comparaison_Composants_Codeur_Incremental_VALIDE_08_11_25.m