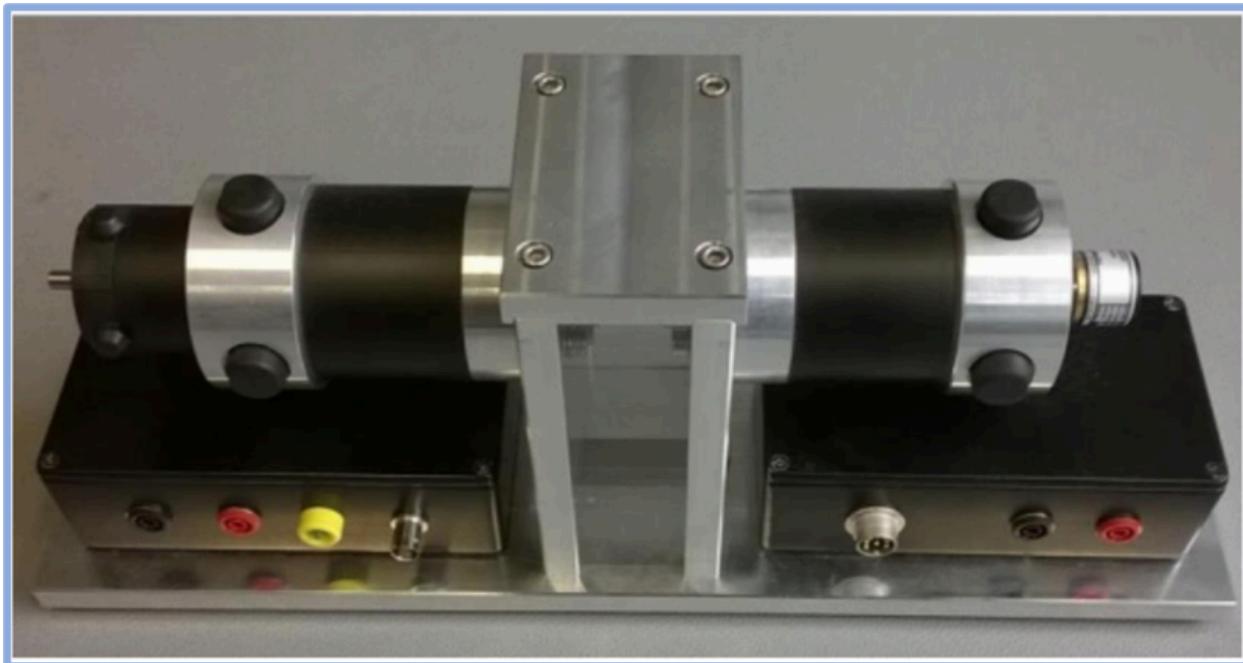


Victor Naturel, Thibault Tostain & Aude Vrignaud

GE4

Projet GES7 - Rapport final -



GE 4 – Grp3

Professeur : Mr Flieller

Année scolaire : 2023-2024

Table des matières

Table des matières.....	1
Introduction.....	3
Planification.....	4
Cahier des charges.....	5
Vitesse.....	5
Courant.....	6
Schéma de la structure de la commande.....	6
Caractéristiques de la MCC.....	7
Annotations utilisés dans le rapport.....	7
I. Schéma de la MCC et de son hacheur.....	8
A. Simulation et modélisation du moteur à vide.....	8
Équations de la MCC.....	8
Simulation avec MatLab via Simulink.....	9
Simulation sur PSIM.....	10
Comparaison des résultats.....	11
B. Simulation et modélisation du moteur avec pertes.....	12
Équations de la MCC avec pertes.....	12
Simulation avec MatLab via Simulink.....	13
Simulation sur PSIM.....	14
Comparaison des résultats.....	15
C. Simulation et modélisation du moteur avec pertes et hacheur.....	16
Équations de la MCC avec pertes et génératrice.....	16
Simulation avec MatLab via Simulink.....	17
Simulation sur PSIM.....	18
Comparaison des résultats.....	19
II. Asservissement du moteur.....	20
A. Asservissement en courant du moteur.....	20
Simulation avec MatLab via Simulink.....	20
Simulation sur PSIM.....	22
Comparaison des résultats.....	23
B. Asservissement en vitesse par la dynamo tachymétrique.....	24
Simulation avec MatLab via Simulink.....	24
Simulation sur PSIM.....	26
Comparaison des résultats.....	27
C. Asservissement en vitesse par le codeur incrémental.....	28

1. Fonctionnement d'un capteur incrémental.....	28
2. Conversion des signaux.....	30
Dimensionnement des composants.....	32
Réalisation d'un circuit imprimé.....	35
Le schématique.....	35
Le circuit imprimé.....	37
La gravure.....	39
La soudure.....	40
Réalisation du boîtier.....	41
Conception 3D.....	41
Impression 3D.....	42
Les connecteurs.....	43
Assemblage.....	44
Tests de fonctionnement.....	45
a. Essais sur la partie correcteurs.....	45
b. Problèmes rencontrés.....	46
c. Essais du système complet (hors codeur incrémental) sur banc moteur.....	47
Conclusion.....	49
Remerciements.....	50

Introduction

Le projet GE S7 porte sur l'asservissement en vitesse et en courant d'une machine à courant continu alimentée par un hacheur. Ce projet a pour objectif d'allier deux disciplines :

- l'électrotechnique par le biais des MCC et de l'électronique de puissance ;
- l'automatique dans la réalisation d'asservissement respectant le cahier des charges fixé.

Nous divisons ce projet en plusieurs parties pour le mener à bien :

- La modélisation et la simulation du moteur à courant continu sur Matlab-Simulink et PSIM ;
- La modélisation et la simulation du hacheur sur Matlab-Simulink et PSIM ;
- La modélisation et la simulation des asservissements en vitesse et en courant sur Matlab - Simulink et PSIM ;
- La réalisation du PCB avec des composants choisis selon les conclusions des modélisations ;
- La réalisation d'un boîtier
- Les tests et les débugages.

Planification

Afin de mener à bien ce projet au sein du groupe, nous avons réalisé un diagramme de Gantt dès les prémisses du projet pour répartir les principales tâches du projet sur le semestre ainsi que pouvoir mieux anticiper et visualiser les tâches à faire.

DIAGRAMME DE GANTT - PROJET GE4

du 11/09/23 au 16/01/24

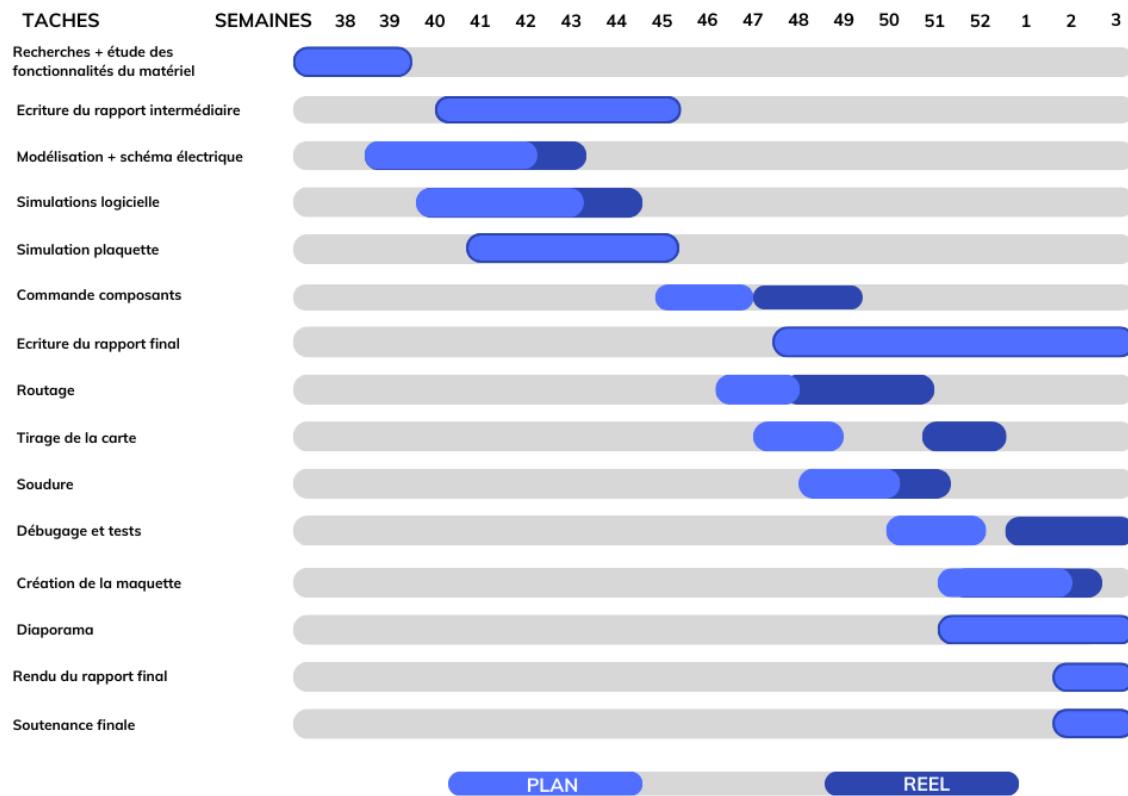


Figure 1 : Diagramme de Gantt

Nous retrouvons dans ce diagramme les prévisions que nous avons eu sur les tâches au début du projet et le temps que ces tâches nous ont réellement prisent à faire.

Cela nous a permis de bien nous rendre compte du temps mis pour une tâche et du temps restant pour les autres. Ainsi, au fur et à mesure du projet, nous avons pu adapter la durée des différentes tâches pour optimiser au mieux la suite de la réalisation du projet. De plus, ce diagramme nous a permis de répartir équitablement les tâches entre nous.

Cahier des charges

Le cahier des charges est un élément central dans la réalisation du projet. C'est lui qui pose les limites mais aussi les attentes pour ce projet. C'est une ligne directrice à suivre tout au long du projet. Il est donc primordial de correctement le réaliser pour éviter toute erreur de hors sujet à la fin du projet.

L'objectif de ce projet est d'asservir en vitesse et en courant une machine à courant continu avec une charge. Pour cela nous respecterons les demandes suivantes.

Vitesse

Pour la vitesse, on reçoit un signal d'un codeur incrémental ou d'une dynamo tachymétrique. Il faudra donner la possibilité à l'utilisateur de pouvoir choisir entre ces deux systèmes. Ces systèmes sont définis comme suit :

- Le codeur incrémental est codé sur deux signaux, la période définit la vitesse et l'ordre des fronts montant le sens de la rotation.
- La dynamo tachymétrique à un rapport de $6V$ pour $1000 \text{ tr. } min^{-1}$

La vitesse est aussi contrainte avec :

- $V_{nominal} = 3000 \text{ tr. } min^{-1}$
- $V_{maximale} = 4800 \text{ tr. } min^{-1}$

Enfin, le moteur à une $F_{électromotrice} = 13,3 \text{ V}$ pour $1000 \text{ tr. } min^{-1}$.

On accepte un dépassement de 10 à 20 % avec une erreur statique nulle.

On veut également un temps de réponse au moins 3x plus rapide qu'en boucle ouverte.

Courant

Pour le courant, nous utilisons un capteur qui a un ratio de 1 V pour 1 A. L'asservissement du système ne doit pas faire de dépassement supérieur de 10 à 20% et doit avoir un temps de réponse à 5% $\tau_{5\%} = 10 * T_{MLI}$ où T_{MLI} est la période du hacheur.

Il est cependant essentiel de ne pas dépasser les 5A dans le moteur, on limitera donc à 4,5A la commande pour qu'en cas de dépassement de 10% on ne dépasse pas les 5A. Avec ce limiteur, nous nous abstiendrons de poser un système de coupure en cas de dépassement des 5A car nous pouvons normalement faire confiance en notre asservissement.

Schéma de la structure de la commande

Le schéma de la structure de la commande sera le suivant :

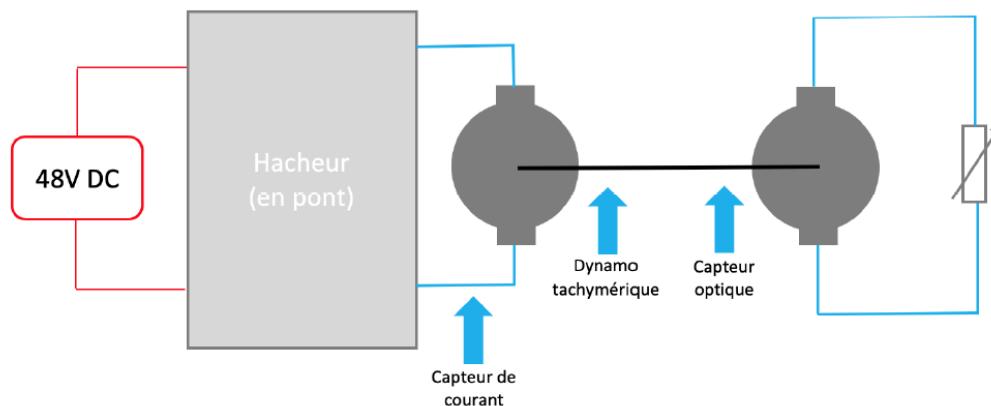


Figure 2¹ : Schéma de la structure de la commande

¹ Document pdf du sujet du projet

Caractéristiques de la MCC

On retrouve les caractéristiques de la machine dans la fiche technique suivante.

<i>Couple en rotation lente</i>	0.54	<i>N.m</i>	<i>M_o</i>
<i>Courant permanent rotation lente</i>	4.5	<i>A</i>	<i>I_o</i>
<i>Tension d'alimentation de définition</i>	49	<i>V</i>	<i>U</i>
<i>Vitesse de définition</i>	3000	<i>tr/mn</i>	<i>N</i>
<i>Tension maximale</i>	65	<i>V</i>	<i>Umax</i>
<i>Vitesse maximale</i>	4800	<i>tr/mn</i>	<i>Nmax</i>
<i>Courant impulsif</i>	13	<i>A</i>	<i>I_{max}</i>
<i>Fem par 1000 tr/mn (25°C)</i>	13.3	<i>V</i>	<i>K_e</i>
<i>Coefficient de couple électromagnétique</i>	0.127	<i>N.m/A</i>	<i>K_t</i>
<i>Couple de frottement sec</i>	2.4	<i>N.cm</i>	<i>T_f</i>
<i>Coefficient de viscosité par 1000 tr/mn</i>	0.53	<i>N.cm</i>	<i>K_d</i>
<i>Résistance du bobinage (25°C)</i>	1.52	<i>Ω</i>	<i>R_b</i>
<i>Inductance du bobinage</i>	2.2	<i>mH</i>	<i>L</i>
<i>Inertie rotor</i>	0.000083	<i>kg.m²</i>	<i>J</i>
<i>Constante de temps thermique</i>	7	<i>min</i>	<i>T_{th}</i>
<i>Masse moteur</i>	1.34	<i>kg</i>	<i>M</i>

Figure 3² : Extrait de la fiche technique de la MCC précisant ses caractéristiques

Annotations utilisées dans le rapport

Notation	Signification	Valeur	Unité
<i>C_m</i>	Couple moteur	-	N.m
<i>w</i>	Vitesse angulaire du rotor	-	rad/s
ϕ	Flux magnétique	-	Wb
<i>J</i>	Moment d'inertie	$8,3 \cdot 10^{-5}$	<i>kg.m²</i>
<i>f</i>	Frottements	5,06	N.m/rad.s
<i>Cch</i>	Couple résistant	0,012	N.cm
<i>U</i>	Tension d'alimentation du hacheur	48	V
<i>R</i>	Résistance du bobinage	1,52	Ohm
<i>L</i>	Inductance du bobinage	$2,2 \cdot 10^{-3}$	H
<i>K_{phi}</i>	Coefficient du couple électromagnétique	0,127	<i>N.m.A⁻¹</i>

² Document pdf du sujet du projet

I. Schéma de la MCC et de son hacheur

A. Simulation et modélisation du moteur à vide

Équations de la MCC

La machine à courant continu (MCC) est un type de machine électrique qui convertit l'énergie électrique en mouvement mécanique en utilisant un courant continu. Elle est composée d'un stator fixe et d'un rotor en rotation. Le stator génère un champ magnétique constant tandis que le rotor, qui porte des bobines de fil conducteur, est soumis à des forces magnétiques et tourne en réaction à ces forces.

Voici les différentes équations régissant la machine à courant continu :

$$\begin{aligned} u(t) &= e(t) + R * i(t) + L * \frac{di(t)}{dt} \\ J * \frac{dw}{dt} &= Cm(t) \\ e(t) &= Ke * w(t) \\ Cm(t) &= Kc * i(t) \end{aligned}$$

Dans notre étude, nous considérons $Ke = Kc = K_\phi$.

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} U(p) &= E(p) + R * I(p) + p * L * I(p) \\ J * p * \Omega(p) &= Cm(p) \\ E(p) &= K_\phi * \Omega(p) \\ Cm(p) &= K_\phi * I(p) \end{aligned}$$

D'où on en déduit :

$$\begin{aligned} I(p) &= \frac{U(p)-E(p)}{R+L*p} \\ E(p) &= K_\phi * \Omega(p) \\ Cm(p) &= K_\phi * I(p) \\ \Omega(p) &= \frac{Cm(p)}{J*p} \end{aligned}$$

Nous avons donc établi les différentes équations nécessaires à la modélisation ainsi nous pouvons maintenant réaliser le système sur MatLab puis sur PSIM pour ensuite comparer les résultats obtenus sur les deux simulations.

Simulation avec MatLab via Simulink

Nous représentons sur Simulink les équations précédentes sous forme de schéma bloc.

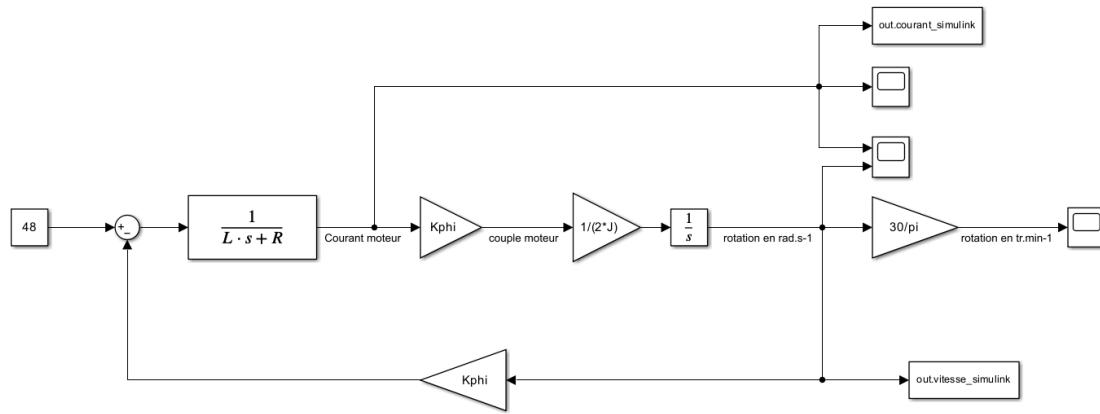


Figure 4³ : Schéma bloc sur Simulink

Les valeurs du schéma dépendent du cahier des charges défini au début de ce rapport. Nous retrouvons les valeurs des mesures utilisées dans le tableau récapitulatif des données utilisées dans le projet.

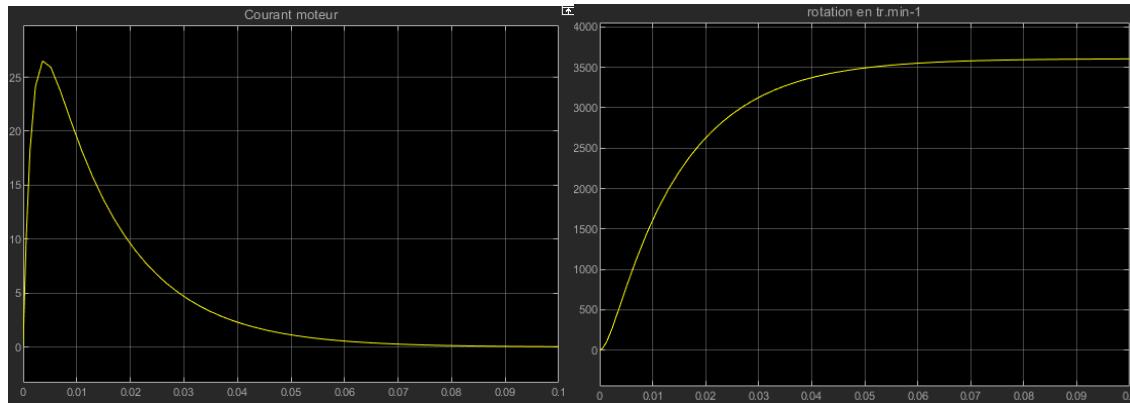


Figure 5⁴ : Résultats de la simulation sur Simulink

³ Projet GES7_simulations > 23.09.11 > Simulink_moteur_à_vide.slx

⁴ Projet GES7_simulations > 23.09.11 > (Simulink_moteur_à_vide.slx + variables.m)

Simulation sur PSIM

Pour la simulation sur PSIM, nous appliquons une méthode différente. Alors en comparant les résultats des deux simulations qui ont des approches différentes, nous pourrons vérifier si nos applications sont correctes. Nous retrouvons dans la figure suivante la modélisation du moteur sur PSIM.

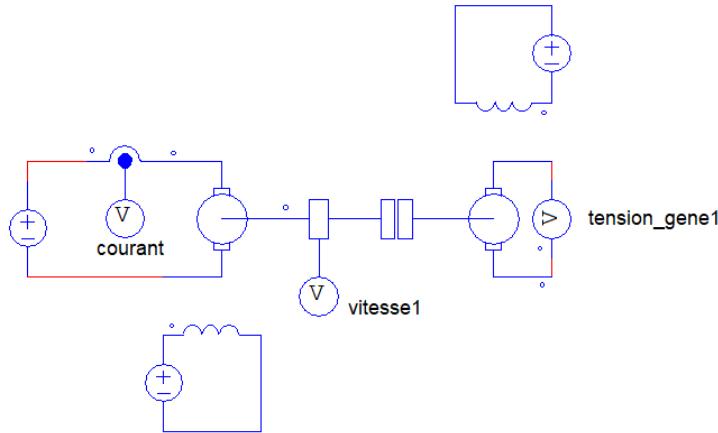


Figure 6⁵ : Simulation sur PSIM de la MCC à vide

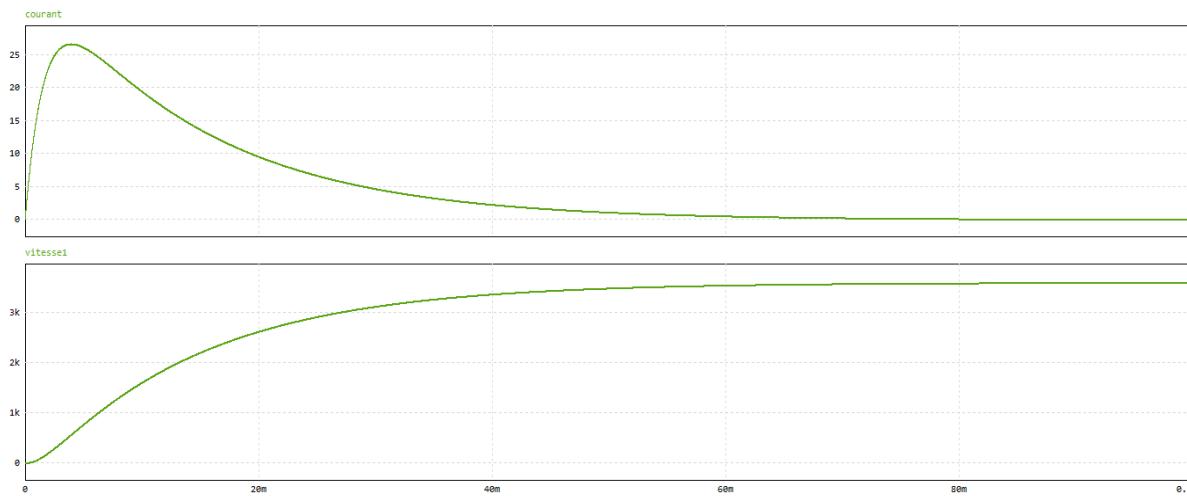


Figure 7⁶ : Résultat de la simulation sur PSIM

⁵ Projet GES7_simulations > 23.09.11 > PSIM_moteur_à_vide.psimsch

⁶ Projet GES7_simulations > 23.09.11 > PSIM_moteur_à_vide.psimsch

Comparaison des résultats

Nous comparons alors les résultats obtenus avec MatLab-Simulink et PSIM. On remarque que les deux résultats se superposent , alors la théorie est validée.

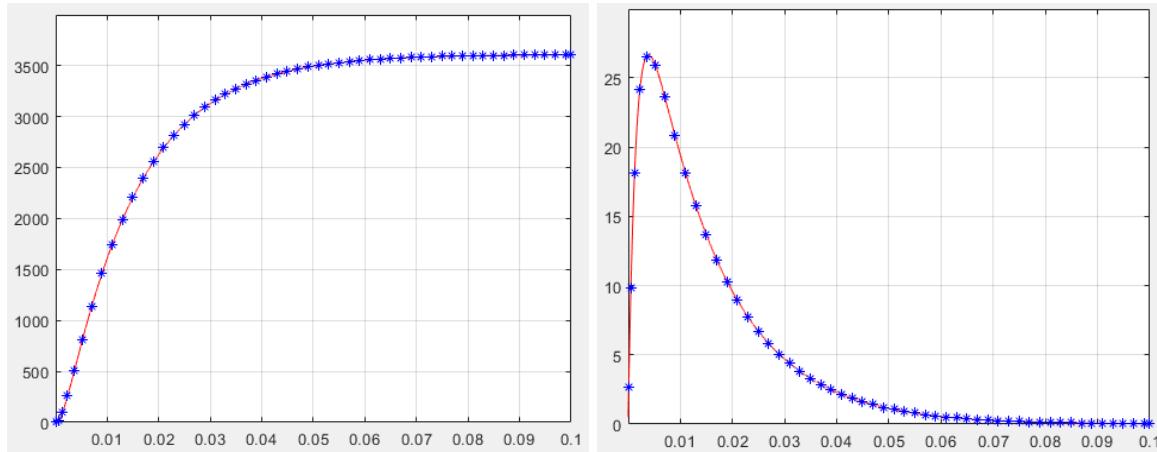


Figure 8⁷ : Comparaison des résultats (courant à gauche, vitesse à droite)

Nous pouvons alors passer à la partie suivante : la simulation en prenant en compte les pertes.

⁷ Projet GES7_simulations > 23.09.11 > compar_psime_simulink_a_vide.m

B. Simulation et modélisation du moteur avec pertes

Dans cette partie du projet, nous réalisons les mêmes démarches que la partie précédente mais en considérant le moteur avec des pertes, c'est-à-dire des frottements.

Équations de la MCC avec pertes

Les équations de la machine à courant continu que nous avions établi précédemment vont donc changer. Nous ajoutons les frottements et nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{aligned} u(t) &= e(t) + R * i(t) + L * \frac{di(t)}{dt} \\ J * \frac{dw}{dt} &= Cm(t) - Cch(t) - f * w(t) \\ e(t) &= Ke * w(t) \\ Cm(t) &= Kc * i(t) \end{aligned}$$

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} U(p) &= E(p) + R * I(p) + p * L * I(p) \\ J * p * \Omega(p) &= Cm(p) - Cch(p) - f * \Omega(p) \\ E(p) &= K_{\phi} * \Omega(p) \\ Cm(p) &= K_{\phi} * I(p) \end{aligned}$$

D'où on en déduit :

$$\begin{aligned} I(p) &= \frac{U(p)-E(p)}{R+L*p} \\ E(p) &= K_{\phi} * \Omega(p) \\ Cm(p) &= K_{\phi} * I(p) \\ \Omega(p) &= \frac{Cm(p)-Cch(p)}{J*p+f} \end{aligned}$$

Nous avons établi les équations de la machine à courant continu en considérant les pertes. Nous pouvons alors réaliser la modélisation de ce système.

Simulation avec MatLab via Simulink

Le schéma bloc également n'est plus le même. En effet, nous considérons les pertes donc nous ajoutons les frottements f et le couple résistant Cch .

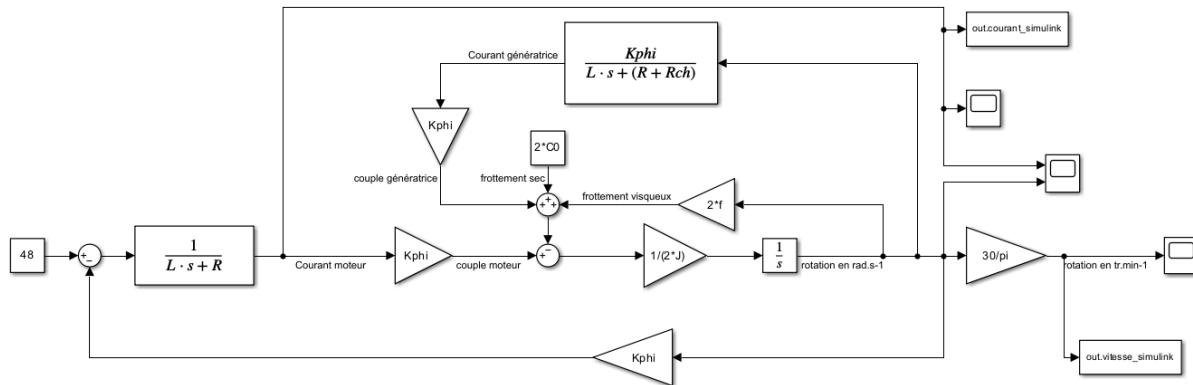


Figure 9⁸ : Schéma sur Matlab avec frottements

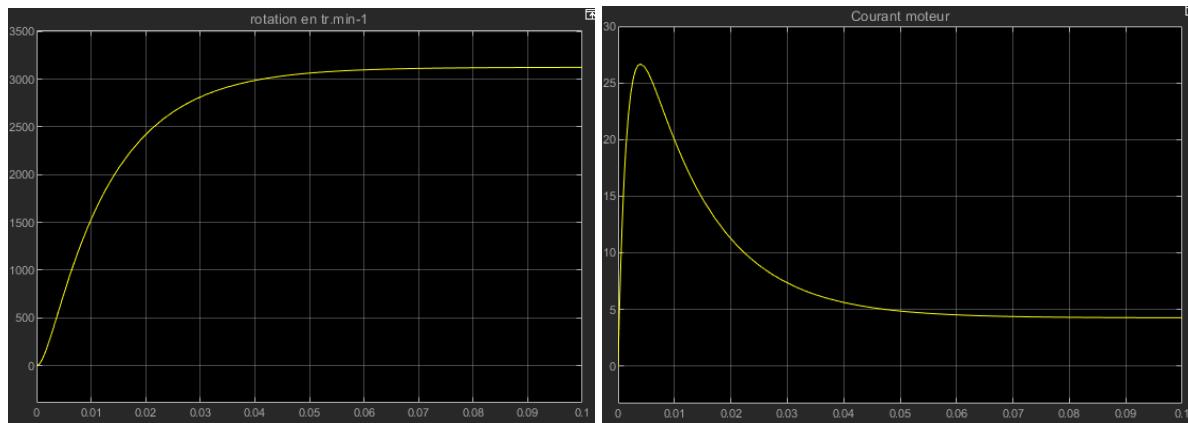


Figure 10⁹ : Simulation sur Matlab (à gauche la vitesse à droite le courant)

⁸ Projet GES7_simulations > 23.09.18 > Simulink_moteur_en_charge.slx

⁹ Projet GES7_simulations > 23.09.18 > (Simulink_moteur_en_charge.slx + variables.m)

Simulation sur PSIM

On modélise également sur PSIM le modèle en considérant les pertes.

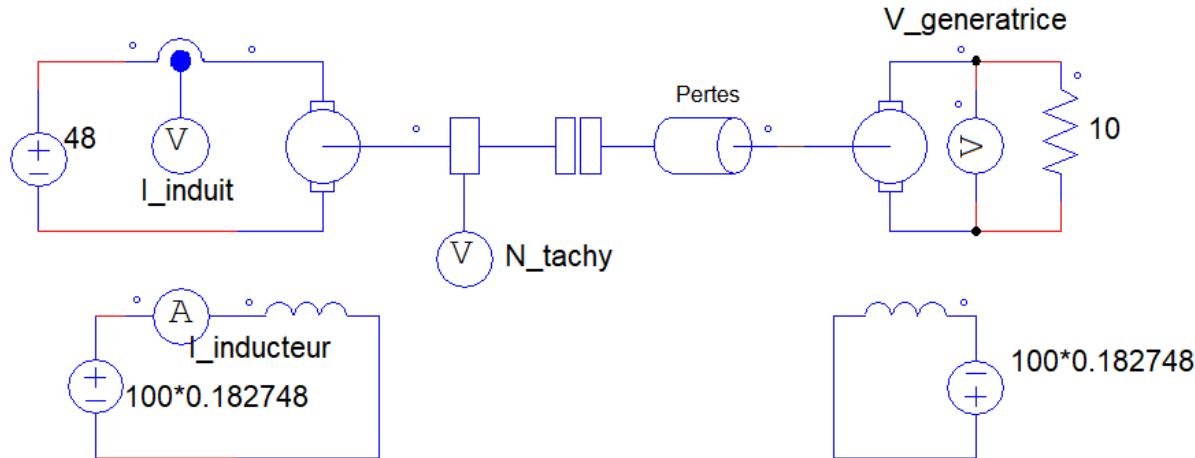


Figure 11¹⁰ : Schéma sur PSIM avec frottements

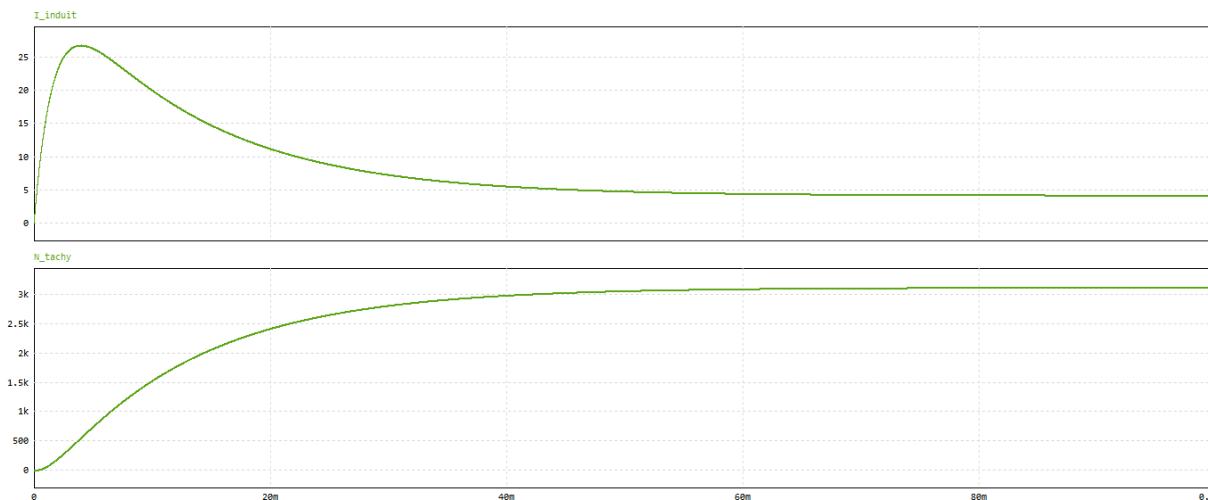


Figure 12¹¹ : Modélisation sur PSIM

¹⁰ Projet GES7_simulations > 23.09.18 > PSIM_moteur_en_charge.psimsch

¹¹ Projet GES7_simulations > 23.09.18 > PSIM_moteur_en_charge.psimsch

Comparaison des résultats

Nous comparons alors les résultats obtenus avec MatLab-Simulink et PSIM. On remarque que les deux résultats se superposent parfaitement, alors la théorie est encore validée. Le modèle est alors correct en considérant en plus les frottements.

On remarque également qu'avec l'ajout des frottements, le courant induit ne s'annule plus.

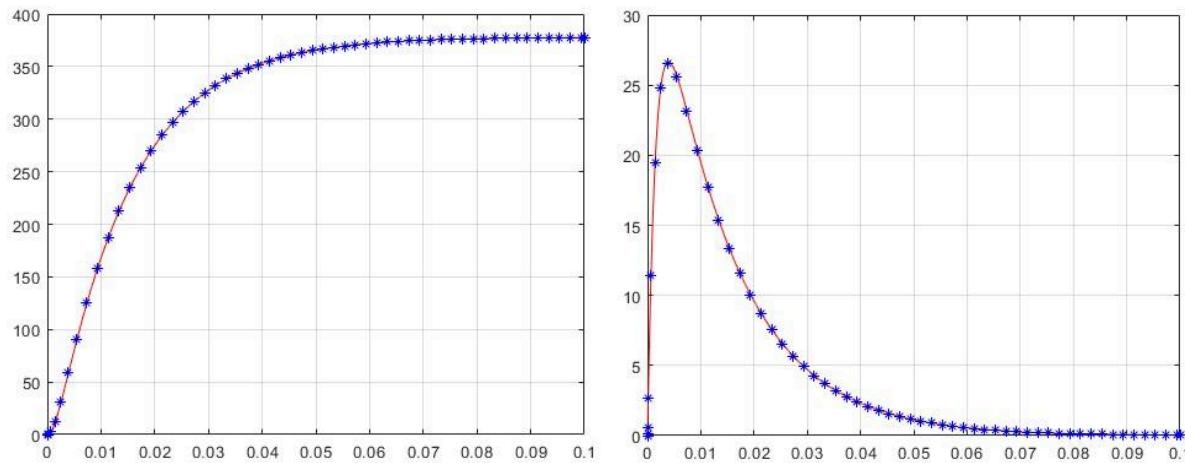


Figure 13¹² : Comparaison des résultats (courant à gauche, vitesse à droite)

Dans les deux tests précédents, nous avons considéré la MCC à vide. Il nous reste plus qu'à tester le modèle en ajoutant une charge sur la génératrice.

¹² Projet GES7_simulations > 23.09.18 > compar_psim_simulink_en_charge.m

C. Simulation et modélisation du moteur avec pertes et hacheur

Équations de la MCC avec pertes et génératrice

$$e(t) = Rch * i(t) + R * i(t) + L * \frac{di(t)}{dt}$$

$$J * \frac{dw}{dt} = Cm(t) - Cch(t) - f * w(t)$$

$$e(t) = Ke * w(t)$$

$$Cm(t) = Kc * i(t)$$

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient les équations suivantes :

$$I(p) = \frac{U(p)-E(p)}{R+Rch+L*p}$$

$$E(p) = K_{\phi} * \Omega(p)$$

$$Cm(p) = K_{\phi} * I(p)$$

$$\Omega(p) = \frac{Cm(p)-Cch(p)}{J*p+f}$$

Simulation avec MatLab via Simulink

A nouveau, nous représentons les équations précédentes sur Matlab sous forme de schéma bloc.

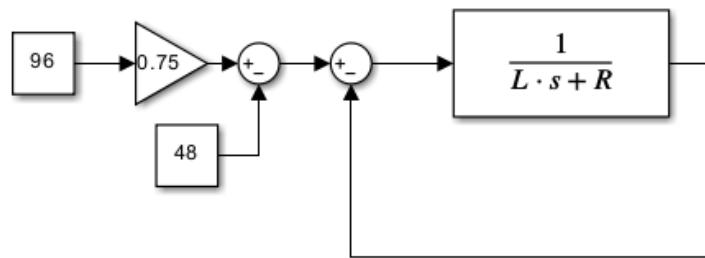


Figure 14¹³ : Schéma sur Matlab avec charge et frottements (*avec un rapport cyclique de 0.75*)

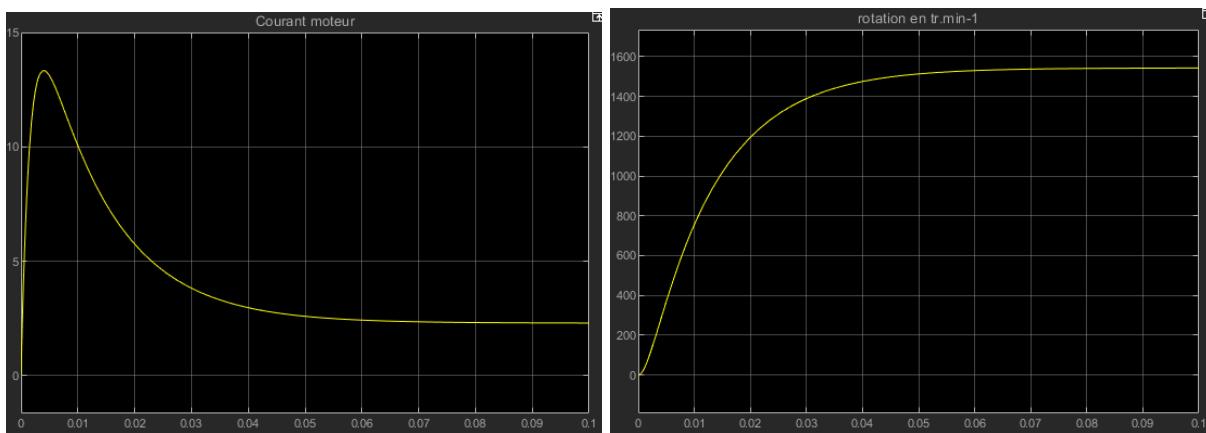


Figure 15¹⁴ : Simulation sur Matlab

¹³ Projet GES7_simulations > 23.09.27 > Simulink_moteur_avec_hacheur.slx

¹⁴ Projet GES7_simulations > 23.09.27 > (Simulink_moteur_avec_hacheur.slx + variables.m)

Simulation sur PSIM

Nous réalisons également la modélisation sur PSIM.

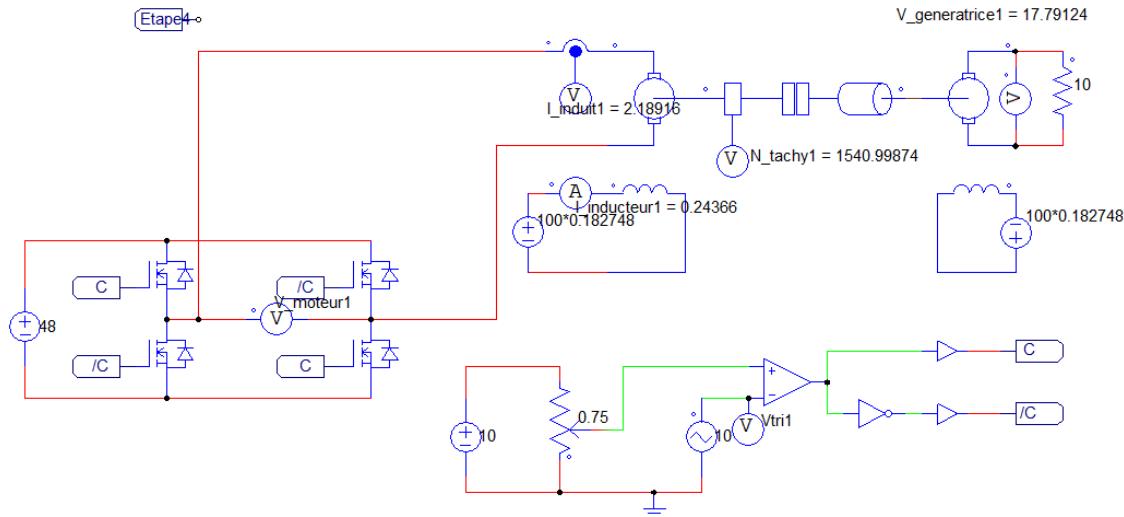


Figure 16¹⁵ : Schéma sur PSIM avec charge et frottements

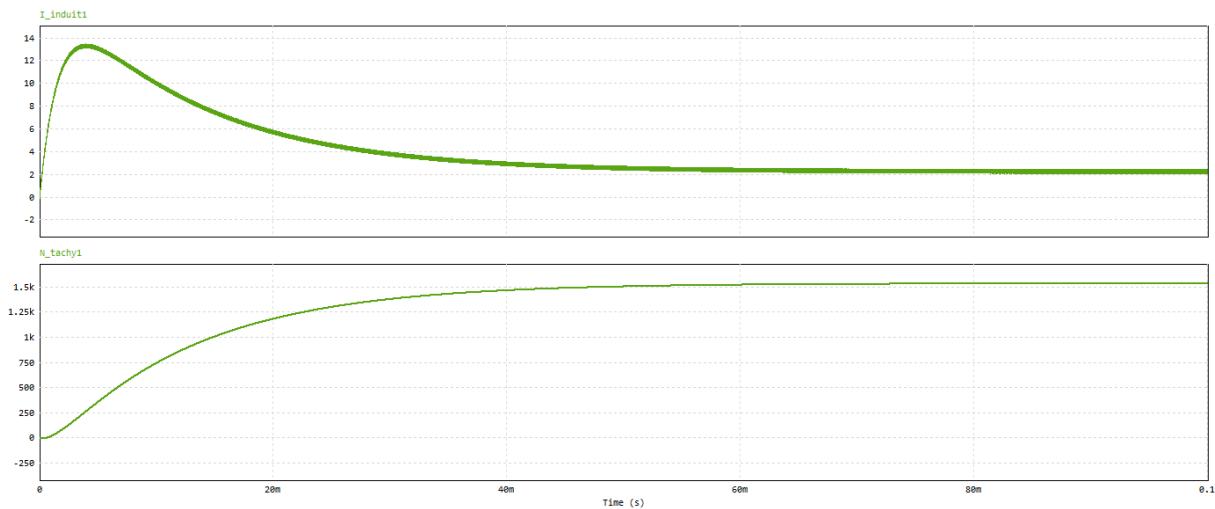


Figure 17¹⁶ : Résultat de la modélisation sur PSIM

¹⁵ Projet GES7_simulations > 23.09.27 > PSIM_moteur_avec_hacheur.psimsch

¹⁶ Projet GES7_simulations > 23.09.27 > PSIM_moteur_avec_hacheur.psimsch

Comparaison des résultats

Les courbes que nous obtenons de ces deux simulations se superposent encore. Aussi, nous remarquons que malgré l'ajout de la charge, la courbe de courant est similaire aux simulations précédentes. Nous pouvons donc valider le modèle de simulation de la MCC.

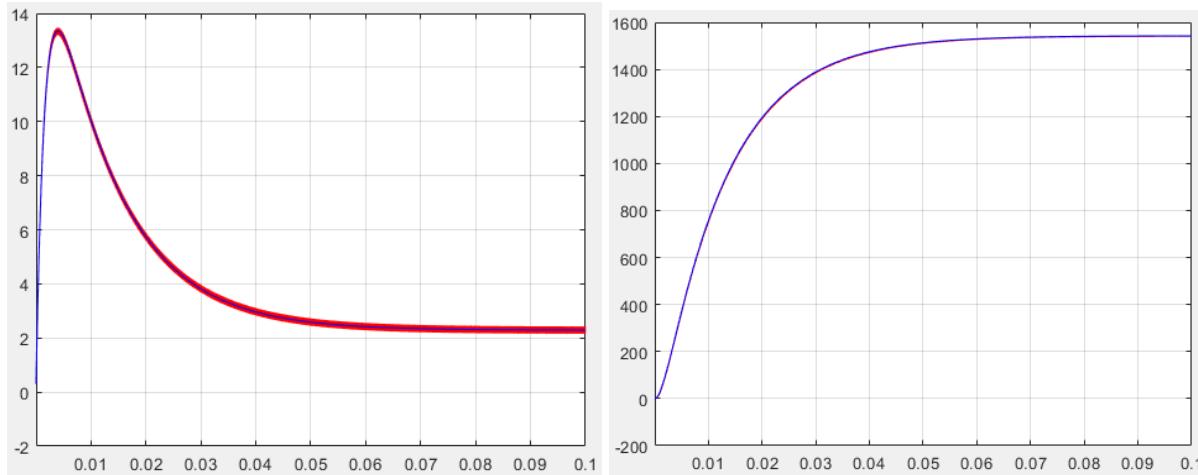


Figure 18¹⁷ : Comparaison des résultats

¹⁷ Projet GES7_simulations > 23.09.27 > compar_psim_simulink_hacheur.m

II. Asservissement du moteur

Dans cette partie, nous allons étudier les asservissements mis en place pour asservir le moteur.

A. Asservissement en courant du moteur

L'asservissement en courant du moteur va servir à appliquer la consigne donnée par l'asservissement en vitesse. Nous utiliserons un correcteur PI (Proportionnel Intégral). Il est important de souligner que la manière de noter l'équation du PI est différente entre Simulink et PSIM. La valeur de τ sur PSIM vaut $\frac{K_p}{K_I}$, le rapport des deux valeurs sur Simulink.

Simulation avec MatLab via Simulink

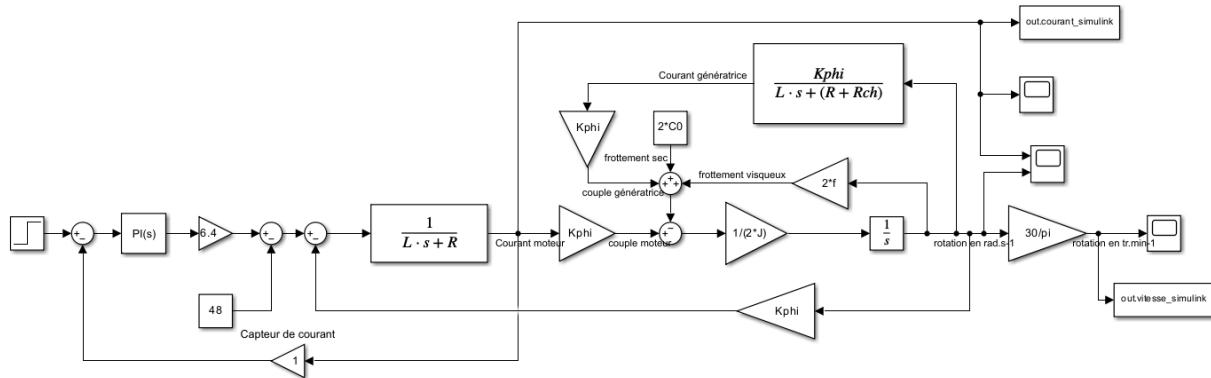


Figure 19¹⁸ : Schéma sur Simulink

Avec l'outil PID Tuner de Simulink, nous trouvons des valeurs de P et I pour lesquelles le cahier des charges est respecté.

$$P = 7,4247 \text{ et } I = 31205.$$

¹⁸ Projet GES7_simulations > 23.10.09 > Simulink_asserv_courant.slx

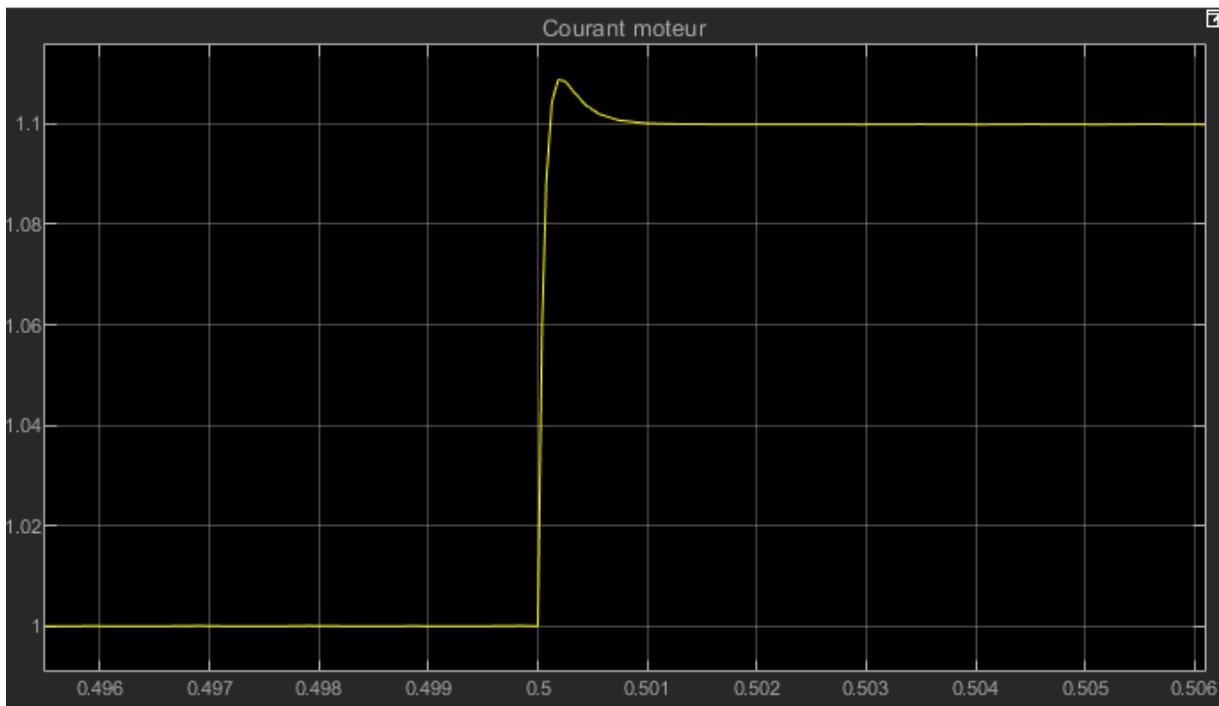


Figure 20¹⁹ : Simulation sur Simulink (au point de fonctionnement)

¹⁹ Projet GES7_simulations > 23.10.09 >(Simulink_asserv_courant.slx + variables.m)

Simulation sur PSIM

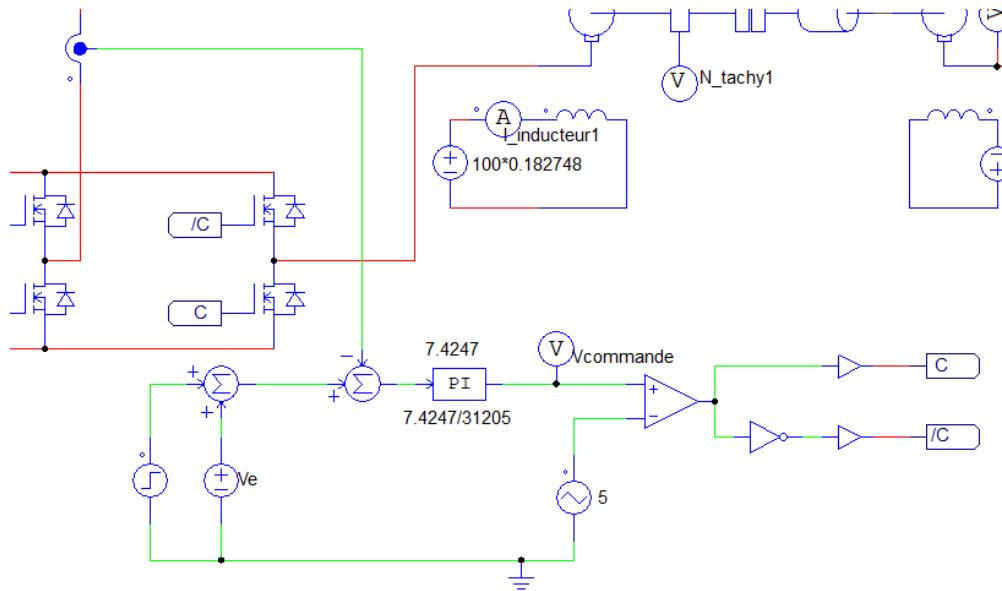


Figure 21²⁰ : Schéma sur PSIM

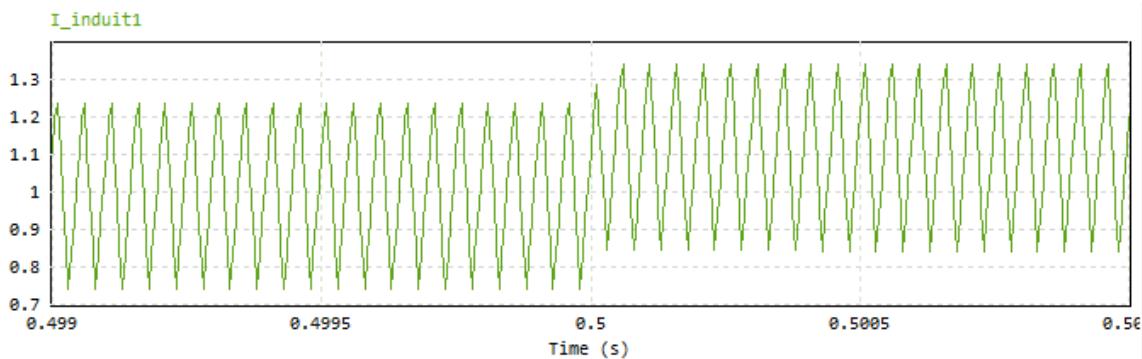


Figure 22²¹ : Modélisation sur PSIM (autour d'un point de fonctionnement)

²⁰ Projet GES7_simulations > 23.10.09 > PSIM_asserv_courant.psimsch

²¹ Projet GES7_simulations > 23.10.09 > PSIM_asserv_courant.psimsch

Comparaison des résultats

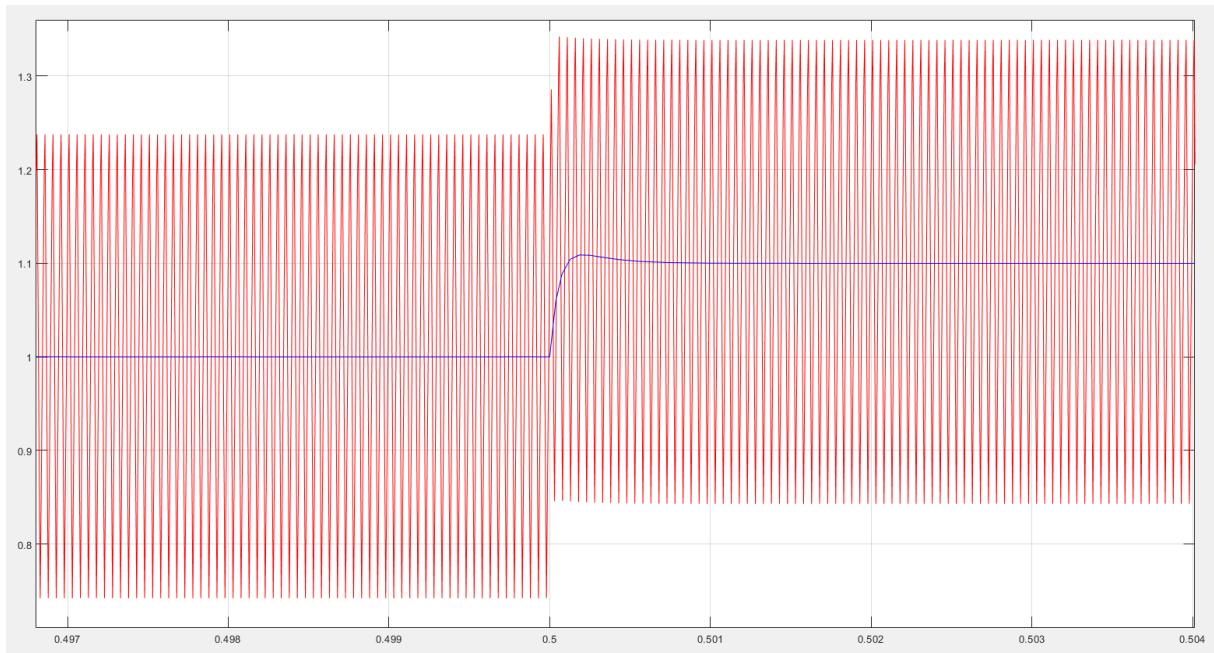


Figure 23²² : Comparaison des résultats

Au vu de la similitude des résultats, nous pouvons en conclure que notre système et ses valeurs sont justes aussi. Nous les utiliserons donc dans le dimensionnement des composants.

Il est à noter que les variations rapides observées sur PSIM sont du à la fréquence du hacheur. Cependant, comme nous ne modélisons pas le hacheur mais uniquement la valeur moyenne dans Simulink, les résultats sont plus lissés.

On note également que ce type de réponse est nommé une réponse ‘pile’, c'est-à- dire que le changement de valeur de fait en une période, c'est le plus rapide résultat possible. On l'observe sur la valeur basse du signal en rouge qui passe de 0,75 à 0,85 en une période.

²² Projet GES7_simulations > 23.10.09 > compar_psim_simulink_asserv_courant.m

B. Asservissement en vitesse par la dynamo tachymétrique

L'asservissement en vitesse par la dynamo tachymétrique ne demande pas de conversion de type de signaux. En effet, la dynamo tachymétrique donne directement une tension en fonction de la vitesse. D'après le cahier des charges, ce rapport est fixé à $6V$ pour $1000 \text{ tr. min}^{-1}$.

De plus, sachant que l'on a une vitesse maximal de $4800 \text{ tr. min}^{-1}$ que l'on va arrondir à $5000 \text{ tr. min}^{-1}$ par précaution, soit 4% de marge entre la théorie et la pratique, on peut en conclure que la tension à la sortie du la dynamo peut atteindre les $+30V$. Ce qui est bien au-dessus des $+15V$ prévu dans l'utilisation des AOP du circuit de commande. En pratique, il faudrait réduire cette tension, ainsi nous rajouterons un gain de $\frac{1}{2}$ en sortie de la dynamo tachymétrique.

Une fois ces valeurs obtenues, on peut prévoir un circuit de commande avec un circuit de type PI pour l'asservissement.

Comme pour l'asservissement en courant, nous avons réalisé ce circuit sur Matlab et Simulink pour s'assurer de la fiabilité des résultats en les comparants.

Encore une fois, nous avons $\tau = \frac{K_p}{K_I}$ sur PSIM.

Simulation avec MatLab via Simulink

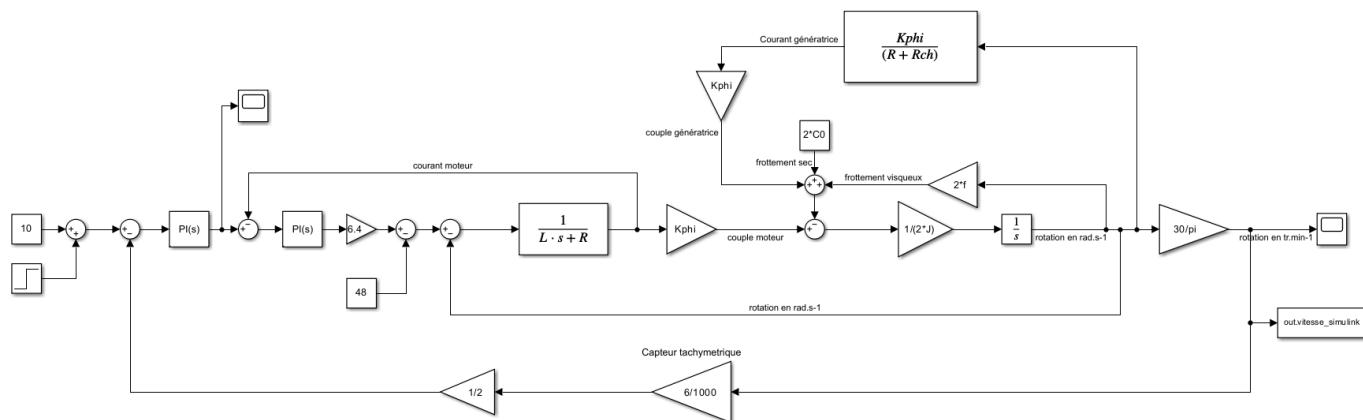


Figure 24²³ : Schéma sur Simulink

²³ Projet GES7_simulations > 23.10.25 > Simulink_asserv_vitesse.slx

L'outil PID Tuner de Simulink nous donne, pour respecter le cahier des charges :

$$P = 4,1412 \text{ et } I = 95,66.$$

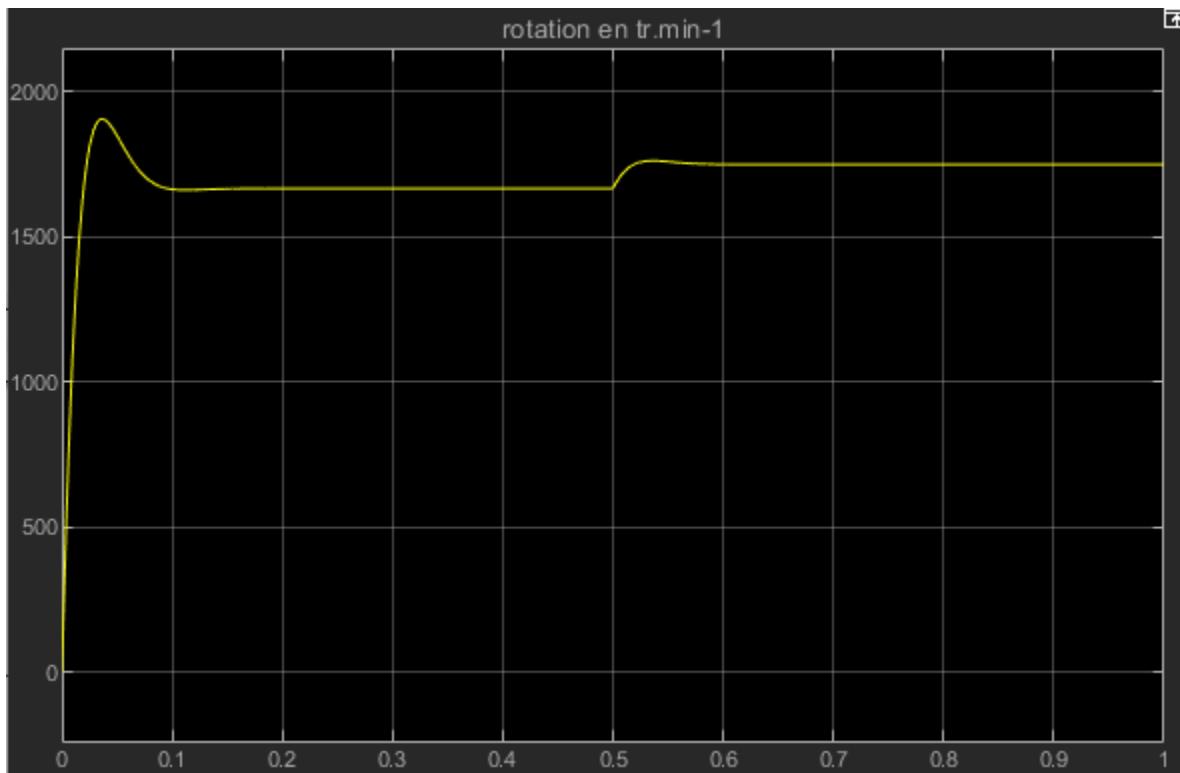


Figure 25²⁴ : Simulation sur Simulink

²⁴ Projet GES7_simulations > 23.10.25 > (Simulink_asserv_vitesse.slx + variables.m)

Simulation sur PSIM

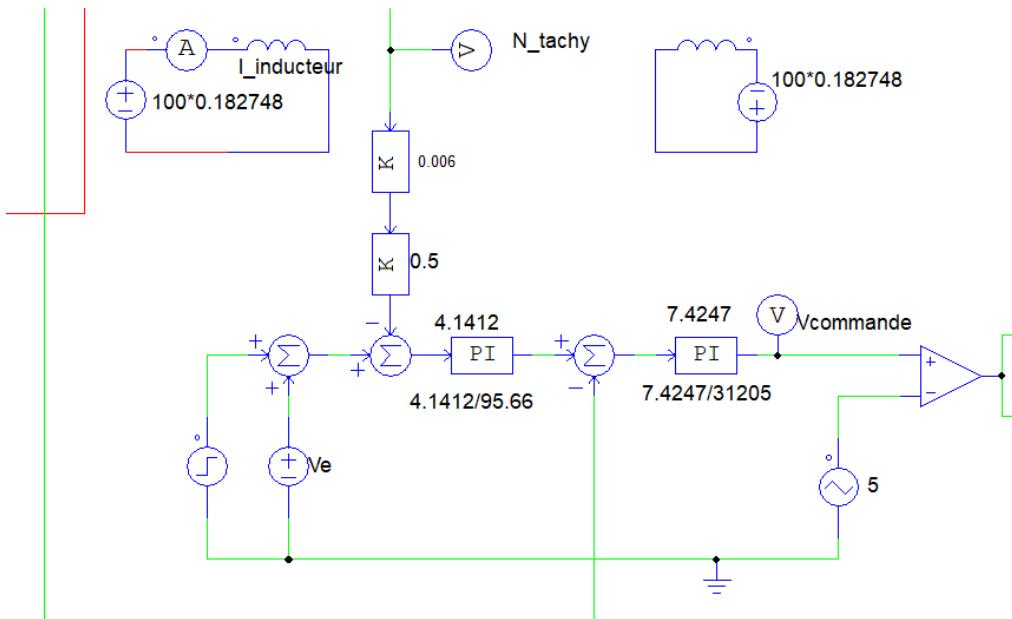


Figure 26²⁵ : Scéhma sur PSIM

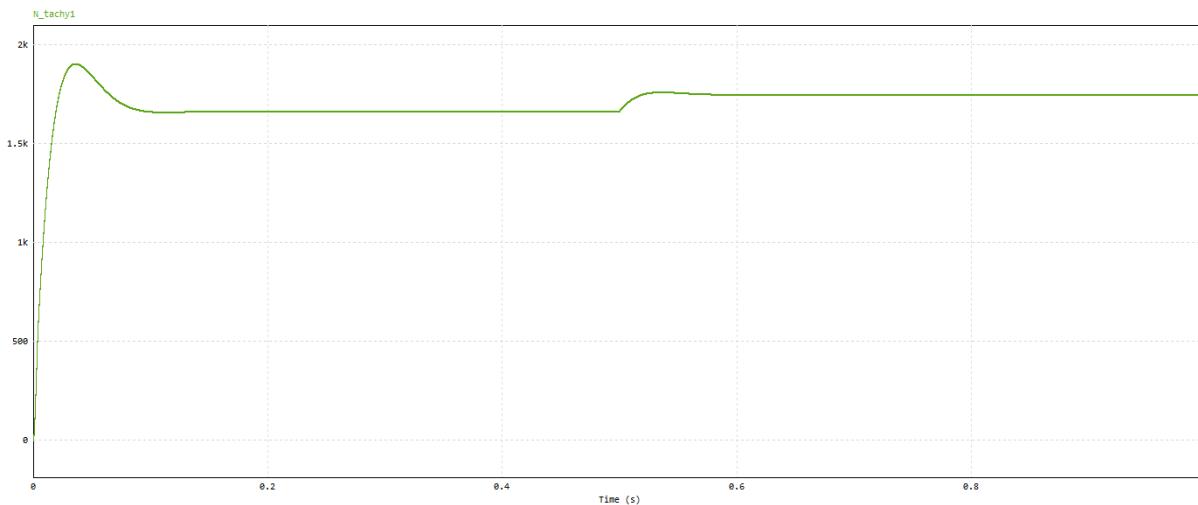


Figure 27²⁶ : Modélisation sur PSIM

²⁵ Projet GES7_simulations > 23.10.25 > PSIM_asserv_vitesse.psimsch

²⁶ Projet GES7_simulations > 23.10.25 > PSIM_asserv_vitesse.psimsch

Comparaison des résultats

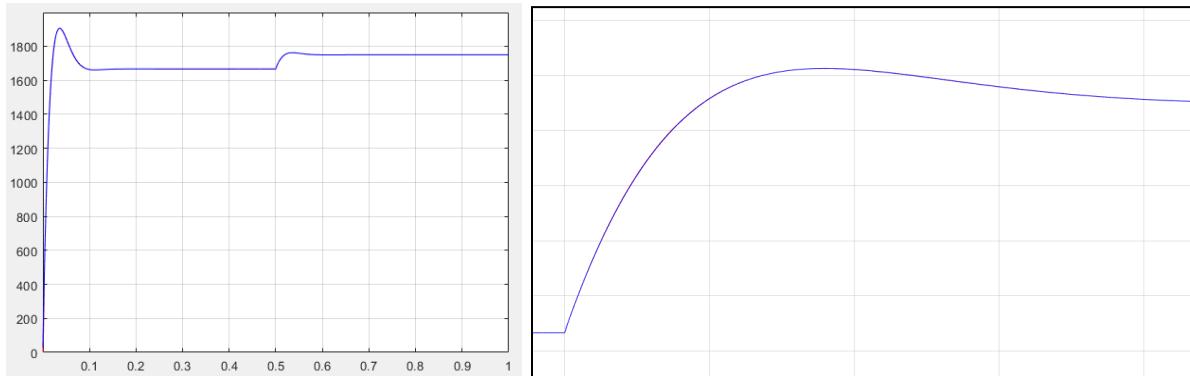


Figure 28²⁷ : Comparaison des résultats (avec un zoom sur l'échelon qui nous intéresse)

Au vu de la similitude des résultats, nous pouvons en conclure que notre système et ses valeurs sont justes aussi. Nous les utiliserons donc dans le dimensionnement des composants.

²⁷ Projet GES7_simulations > 23.10.25 > compar_psim_simulink_asserv_vitesse.m

C. Asservissement en vitesse par le codeur incrémental

Le deuxième type d'asservissement en vitesse se fait par un codeur incrémental. Pour réaliser cet asservissement, nous avons donc besoin de comprendre le fonctionnement de ce capteur et comment traiter les signaux qu'il envoie en plus de la réalisation de l'asservissement.

1. Fonctionnement d'un capteur incrémental

Le principe d'un tel capteur est de poser une diode électroluminescente d'un côté d'une roue et un capteur photosensible de l'autre. En réalisant des trous à espacement régulier dans la roue, on obtient un signal qui change en fonction de l'angle de rotation.

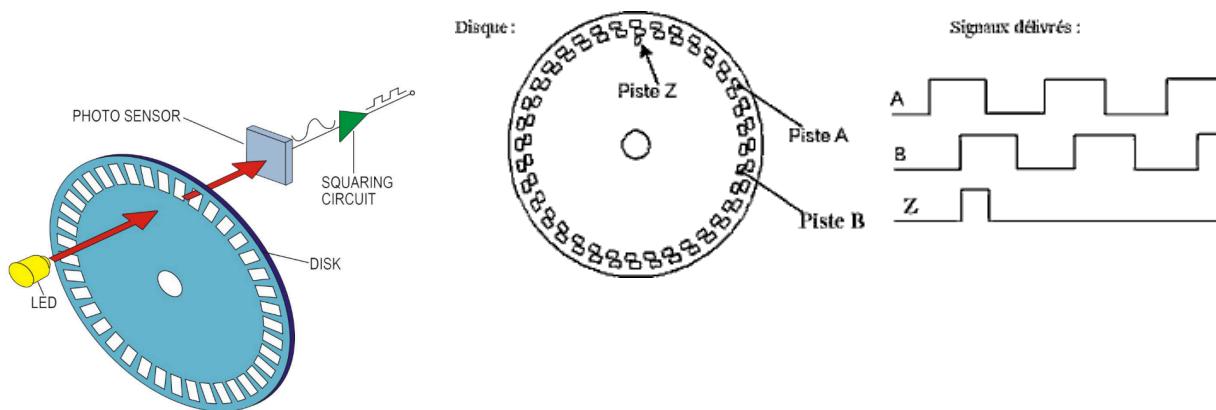


Figure 29²⁸ : Fonctionnement d'une roue à trous

Figure 30²⁹ : fonctionnement d'un capteur incrémental

Avec deux voies décalées d'un quart de période, on obtient un signal capable de nous donner le sens de rotation et la vitesse de rotation.

²⁸ Source :

<https://www.motionsquare.fr/differences-codeur-incremental-et-absolu-lequel-choisir-sur-votre-moteur-electrique/>

L

²⁹ Source : <https://rco.fr.nf/index.php/2016/07/06/codeurs-et-robotique/>

- Pour la vitesse de rotation, il faut regarder la fréquence des signaux. Connaissant le nombre de trous pour une rotation, il suffit ensuite de faire $f = \frac{1}{n \times T}$ avec f la fréquence du signal, T la période du signal et n le nombre de trous en 1 tour.
- Pour obtenir le sens de la rotation, il faut regarder quel front est en premier. En fonction du décalage sur la roue on obtient :

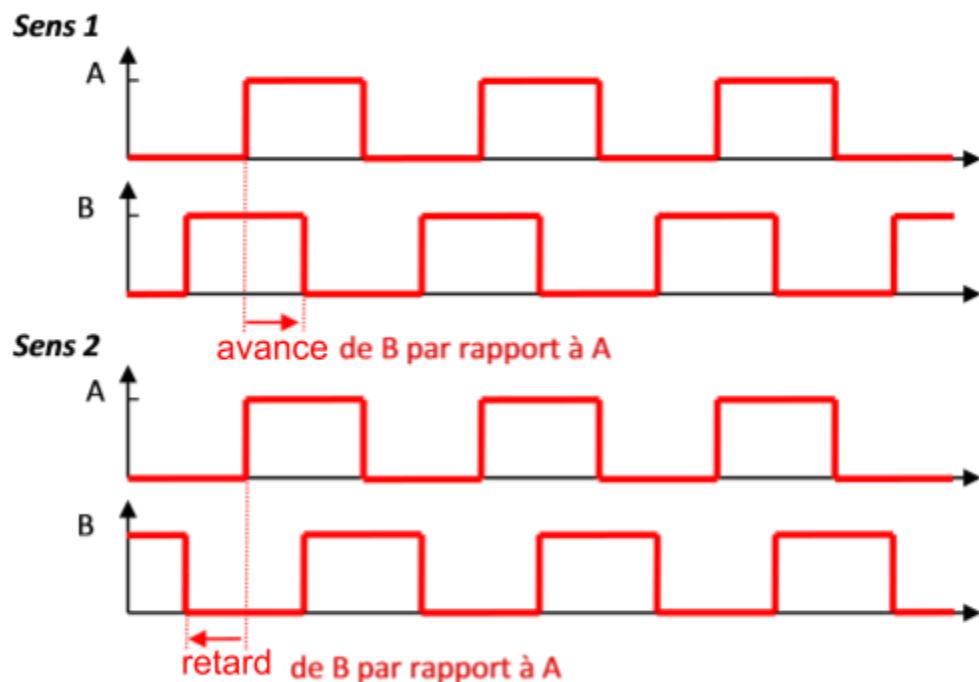


Figure 31³⁰ : Sens de rotation d'une roue en fonction de la position des fronts

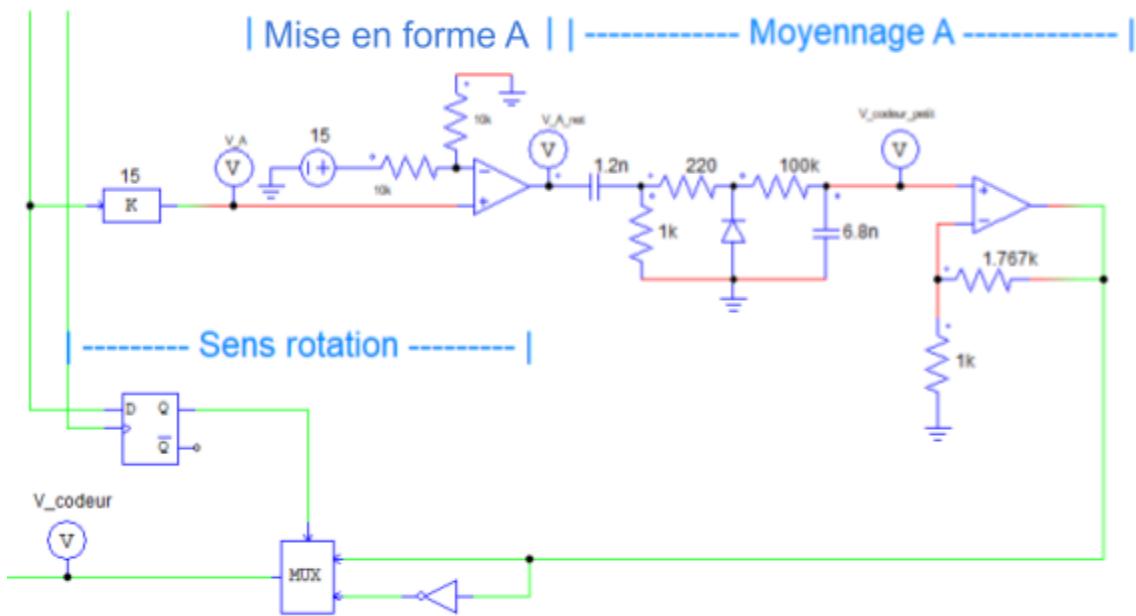
³⁰ Source : <https://arduino.blaisepascal.fr/les-codeurs-incrementaux/>

2. Conversion des signaux

Pour utiliser ces signaux dans un système analogique il nous faut les convertir.

Pour avoir la vitesse de rotation, nous utilisons un filtre passe haut pour faire ressortir les pics et une diode en parallèle pour ne garder qu'un type de front, les fronts montant. On obtient ainsi des impulsions à chaque front montant et en prenant la valeur moyenne on a la vitesse de rotation. Pour le sens de rotation, nous utilisons un flip-flop D, en branchant l'un des signaux sur le D et l'autre sur l'horloge. On obtient directement le sens de rotation en fonction de la valeur de Q.

Nous pouvons alors mettre ce schéma sous PSIM pour le simuler. Il est important de prendre en compte que le codeur de PSIM fournit un signal entre 0 et 1V alors que dans la vraie vie nous avons un signal de 0 à 15V. On a donc ajouté un gain de 15 à l'entrée du système de calcul de la vitesse de rotation.



On remarque 2 étapes dans le système de calcul de la vitesse :

- La mise en forme du signal servant à enlever le potentiel bruit qu'il y aurait. Pour ce faire nous utilisons un comparateur du type LM331 qui compare la valeur à une tension de référence ici à 7,5 V générée par un pont diviseur de tension.
- Le calcul de la vitesse. Une fois le signal mis en forme nous pouvons en sortir la donnée de vitesse en générant un pic à chaque front montant et en calculant la valeur moyenne. À faible fréquence les pics seront éloignés et la valeur moyenne sera proche de 0V et plus on augmente la vitesse plus les pics vont se rapprocher et la valeur moyenne augmenter. Pour la faire correspondre à la valeur de sortie de la dynamo tachymétrique

on sort de ce bloc par un gain réglable qui aura pour but de faire varier le signal entre 0V et 12V en fonction de la vitesse.

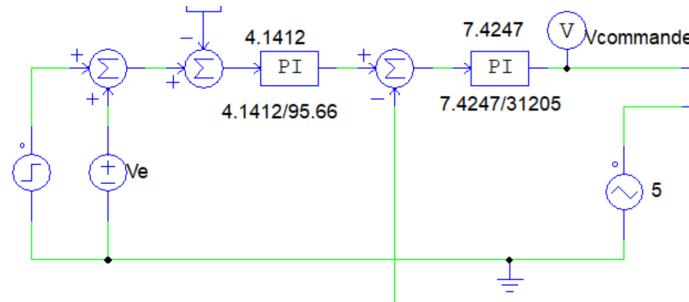
Cependant, nous obtenons une valeur absolue de la vitesse avec cette méthode, nous devons donc aussi regarder le sens de rotation du moteur pour appliquer ou non un gain de -1 au signal. Pour ce faire nous utilisons une bascule D. En un signal fait un front montant l'autre vaut soit 1 soit 0 en fonction du sens de rotation du moteur et de l'ordre des trous sur le disque.

On peut donc mettre l'un des signaux sur le signal d'horloge et l'autre celui de donnée et l'on obtient le sens de rotation. Attention, il est important de rappeler que l'ordre des trous change le sens de rotation perçu, il est donc important de vérifier si A ou B doit faire l'horloge pour avoir un sens de rotation correct.

Enfin, on peut combiner ces deux informations avec une porte inverseuse et un multiplexeur analogique pour avoir un signal de sortie similaire à celui de la dynamo tachymétrique.

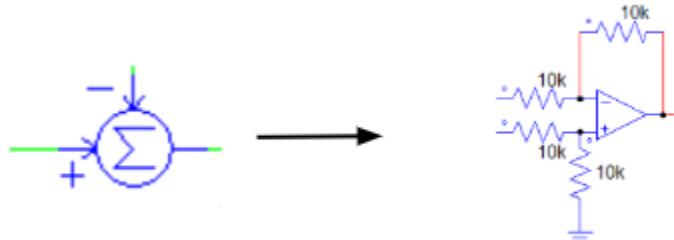
Dimensionnement des composants

On commence le dimensionnement par la boucle d'asservissement.

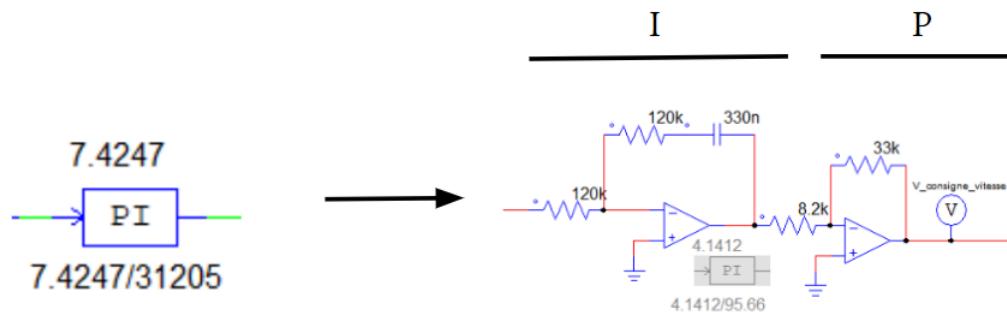


Dans cette boucle, on retrouve plusieurs blocs :

- Un soustracteur qui se dimensionne par quatres résistances et un AOP.



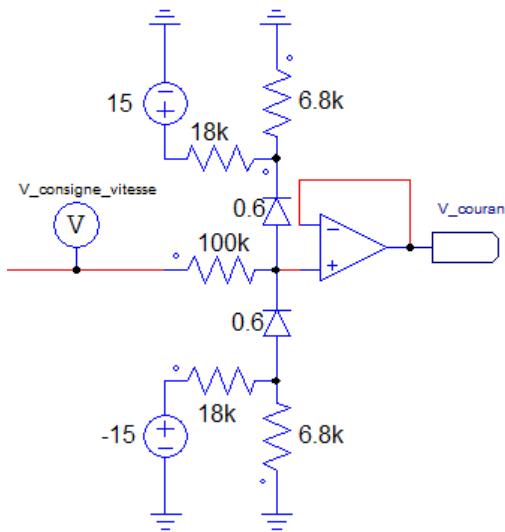
- Un bloc PI qui se dimensionne par un intégrateur inverseur pour la partie I et un amplificateur inverseur pour la partie P



- Le limiteur de courant où nous retrouvons dans le dimensionnement un suiveur pour adapter l'impédance, des ponts diviseurs en haut et en bas du montage pour régler les valeurs limites positives et négatives.

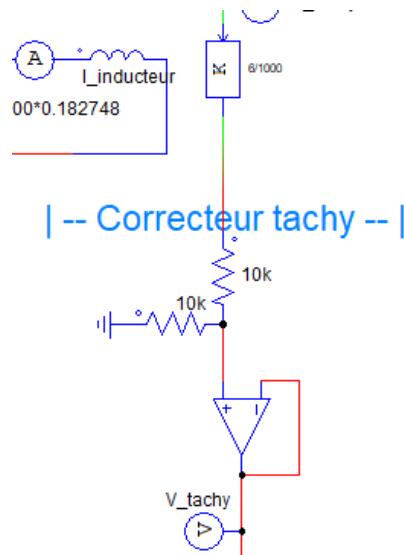
En entrée, dans l'idéal, il faudrait une résistance de grande valeur et des ponts diviseurs avec des valeurs de résistances plus faibles par rapport à celle d'entrée pour avoir un écrêtage propre. Mais dans notre cas, les résistances, qui sont en réalité des potentiomètres que nous réglons, ont de trop grandes valeurs.

De base, nous avions une résistance d'entrée de $220\text{k}\Omega$ mais nous avions une sortie non écrêtée et une tension réduite par rapport à l'entrée. Nous avons alors placer une résistance de $100\text{k}\Omega$ et nous avons alors un sortie très peu réduite en tension.



Nous obtenons alors les différents montages dimensionnés suivant le cahier des charges.

Nous utiliserons également un pont diviseur de tension pour avoir notre gain $\frac{1}{2}$ en sortie de la dynamo tachymétrique.



Suite au dimensionnement de tous les composants du montage du projet, nous avons pu réaliser la commande des composants, via le fournisseur RS Components, en respectant le budget qui nous été permis pour ce projet, soit 25€. Nous avons commandé les composants tels que le LM311, des entretoises (pour réaliser la superposition de nos PCB) et des supports DIL (pour pouvoir facilement enlever les AOP et composants à broche du PCB si jamais il y a un soucis ou un besoin de les changer).

Nous avons regardé, lors de la commande sur le site de RS Components, les stocks en Europe, pour que les composants arrivent le plus rapidement possible et que nous puissions avancer le projet rapidement.

Nous avons aussi récupéré des composants d'anciens projets. Cela nous a éviter de repasser des commandes et permet de réutiliser des composants encore fonctionnels.

Réalisation d'un circuit imprimé

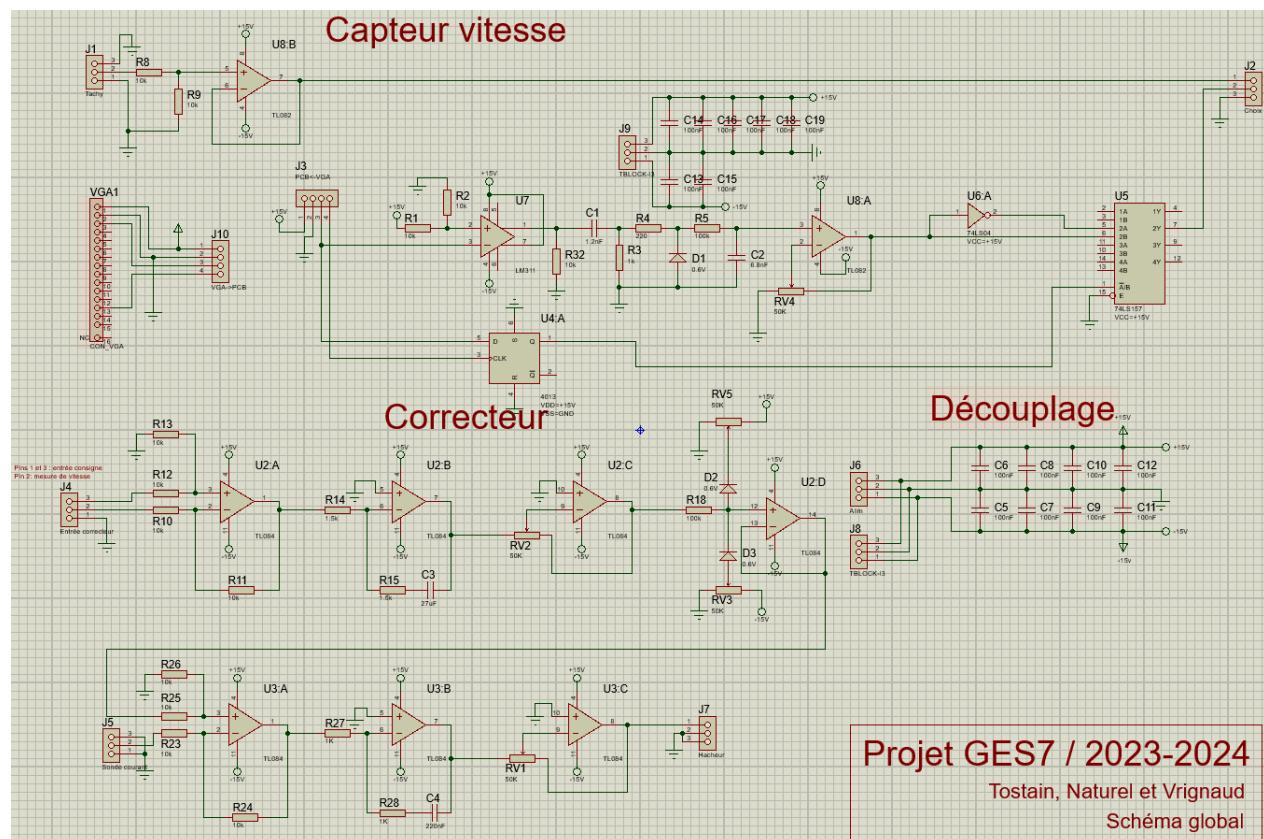
Dans la partie schématique de Proteus, nous avons pu distinguer les différentes parties :

- Le capteur de vitesse
- Le découplage
- Le correcteur

Ensuite, nous avons réalisé la partie câblage du PCB dans Proteus. Il a fallu d'abord vérifier que tous les packages des composants correspondaient bien aux attentes voulues et dans le cas où il n'y a pas de packages, nous avons dû les réaliser par nous même, ce qui fut le cas entre autres pour le connecteur VGA.

Nous pouvons retrouver le PCB en version finale dans le fichier 'Projet GES7_simulations > 23.12.27>pcb_v4_complet'.

Le schématique



Le schématique est une étape importante dans le passage de la simulation PSIM à la carte électronique. En effet, il est important de faire gaffe à garder les mêmes structures, ne pas inverser des pins ou trouver les bonnes références de composants faisant le lien entre les composants théoriques et ceux réels.

Il y a aussi à ce moment une réflexion sur la réalisation physique de la carte, il faut penser aux condensateurs de découplage et aux connecteurs.

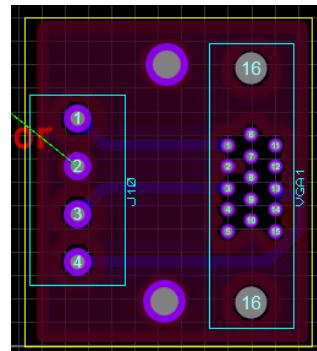
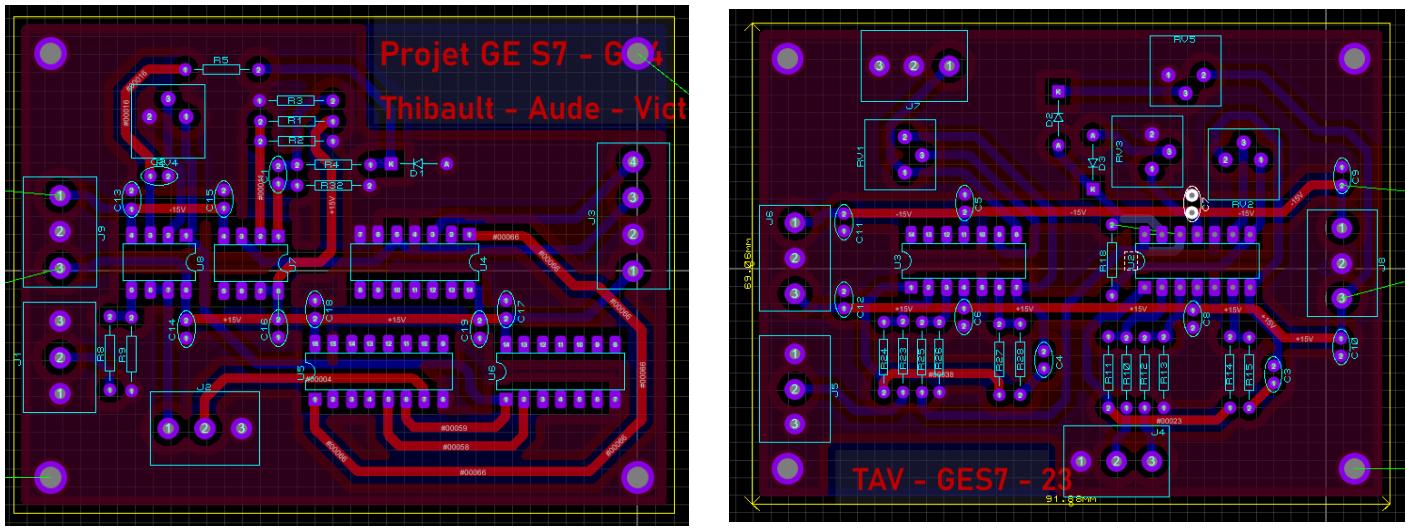
Le circuit imprimé

Une fois une première version du schéma réalisée nous pouvons passer à la conception du circuit imprimé. Nous avons choisi de faire 3 circuits différents pour pouvoir accélérer l'étape de soudure en soudant à 3 en même temps, l'étape de recherche de dysfonctionnement en réduisant le nombre de composants à vérifier sur une même carte et l'étape de test en testant chaque carte individuellement et en même temps. Ce choix a été judicieux et nous pensons avoir gagné plusieurs heures grâce à ce dernier.

Cette partie demande de réfléchir au placement des composants pour optimiser le routage. On peut remarquer que sur la carte de droite nommée "TAV - GES7 -23" les pistes d'alimentations sont droites et le plus courtes possible mais aussi avec une contrainte sur l'épaisseur plus forte que pour les pistes de signaux tout en étant posé sur une face différente. Les condensateurs de découplage sont eux posés le plus proche possible des composants nécessitant une alimentation pour avoir le signal de puissance le plus lisse possible. Il faut aussi penser à poser les connecteurs en extérieur pour faciliter leur utilisation.

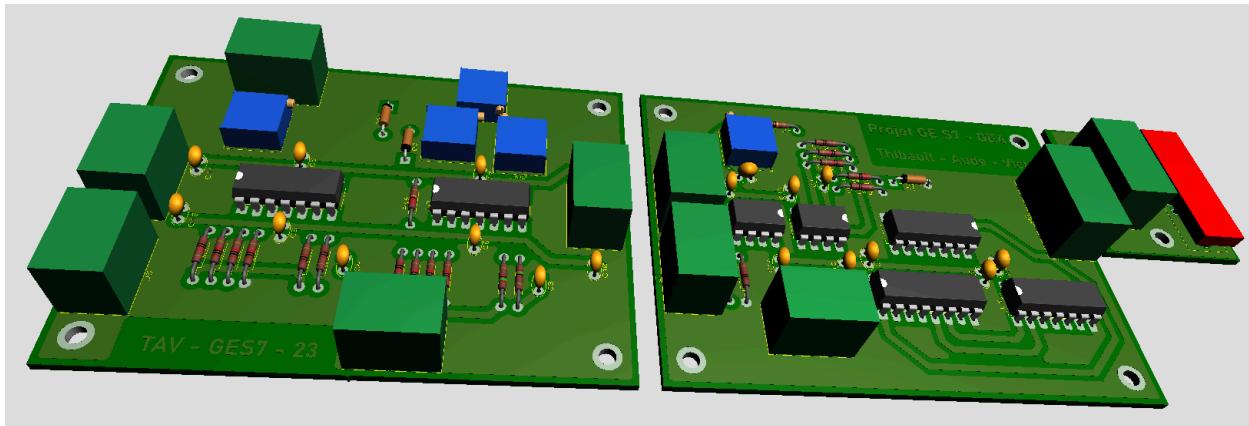
Ensuite, nous pouvons placer les composants passifs que nous réunissons par thématique, tous les composants d'un PI sont l'un à côté de l'autre et non mélangé avec d'autres parties.

C'est un moment où l'on peut avoir des problèmes pour faire un routage propre, il peut être judicieux à ce moment de revenir sur le schématique pour changer l'utilisation des broches des composants à plusieurs composants en interne comme le TL074.



On peut remarquer que grâce au choix des composants traversants nous n'avons pas besoin de via dans ce design. Il a aussi été plus facile de tracer des pistes propres. Cependant ce choix a aussi augmenter la taille des PCB.

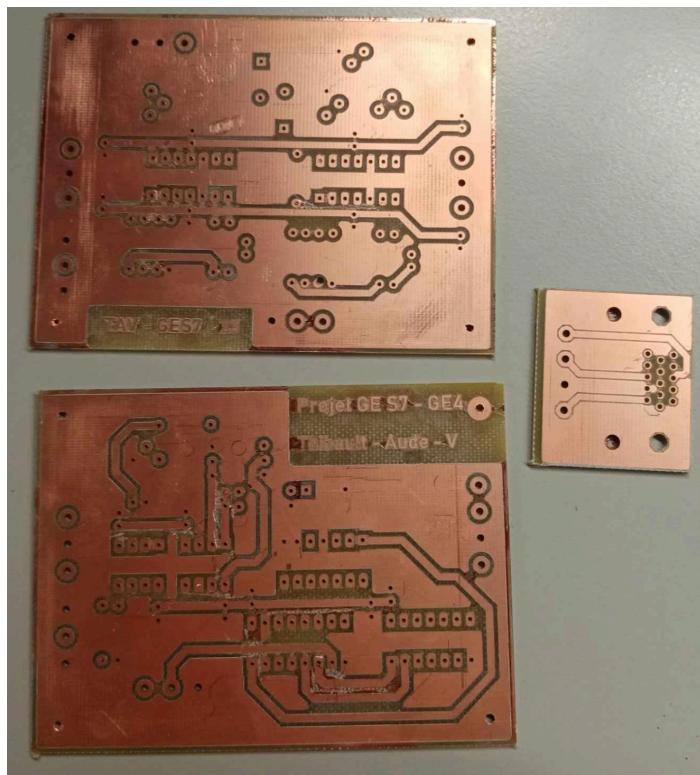
Enfin, nous pouvons visualiser les PCB pour s'assurer du bon placement des composants sur la carte



La gravure

Une fois la conception terminée nous avons pu envoyer le design aux techniciens de la PFGE par la plateforme dédiée.

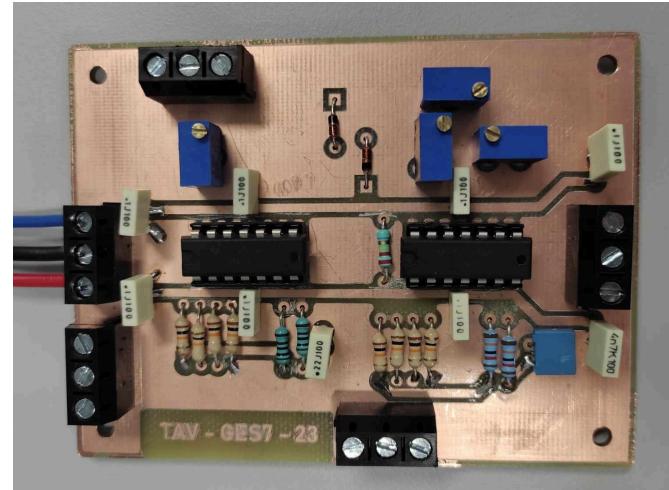
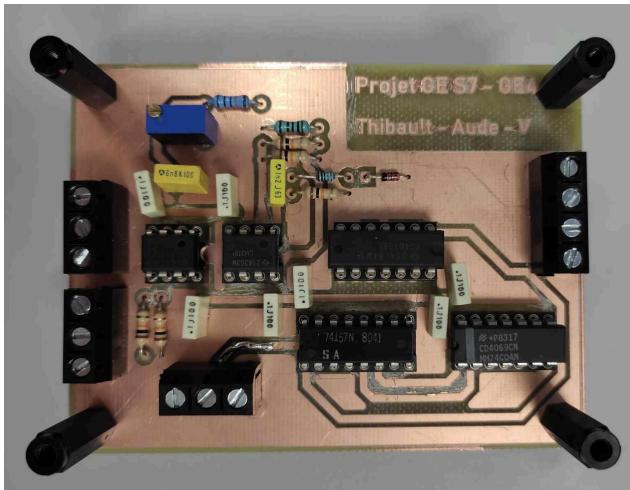
Sous quelques jours ouvrés nous avons reçu nos trois cartes. Malheureusement les mèches de la machine sont arrivées en fin de vie sur nos cartes et de nombreuses pistes n'ont pas été ou mal été séparées entre elles. Nous avons donc avec un cutter fait un travail de nettoyage du pcb. Certains trous n'avaient aussi pas été complètement, il a donc fallu terminer le perçage manuellement.



La soudure

On a ensuite soudé tous les composants sur les PCB en se référant toujours au fichier Proteus pour placer les composants aux bons endroits.

Nous avons vérifié les soudures effectuées avec un multimètre pour être sûr que la continuité était bien réalisée. Nous avons effectué le réglage des potentiomètres pour avoir les bonnes valeurs suivant les simulations.



Réalisation du boîtier

Suite à la distribution des connecteurs utiles pour la boîte par le professeur, nous avons pu commencer à réfléchir à comment la concevoir.

Nous pouvons retrouver le boîtier en version finale dans le fichier ‘Projet GES7_simulations > 24.01.08’.

Conception 3D

Nous avons choisi de la réaliser en impression 3D. Celà implique donc de la modéliser en 3D via un logiciel prévu à cet effet. Nous avons utilisé le logiciel FreeCAD 20.1, un logiciel de conception 3D libre de droit et gratuit nous permettant à tous de pouvoir travailler dessus et l'ouvrir d'ici 10 ans si l'on veut retourner sur ce projet.

Nous avons décidé de partir sur un système avec les connecteurs au fond du boîtier (en violet ci-dessous) pour qu'ils n'appliquent pas de force pouvant renverser la boîte. Le pcb est lui attaché au couvercle (en jaune ici) pour pouvoir facilement l'enlever et un switch pour choisir le type de lecture de la vitesse par la tachy ou par le codeur incrémental en haut.

On pourrait imaginer par la suite profiter de l'espace sur le couvercle pour ajouter un système d'affichage de la vitesse et de la puissance consommée.

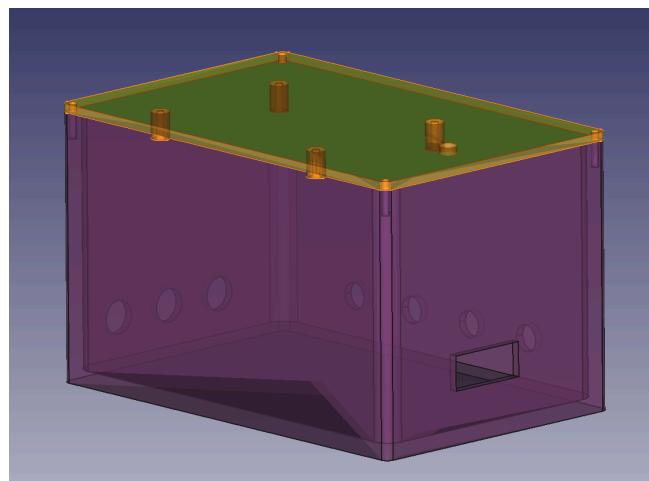


Schéma en transparence du boîtier

Pour le dimensionnement des trous nous avons pris la valeur moyenne entre le filetage et l'extérieur du système d'attache pour s'assurer que chaque composant passerait bien dans l'espace prévu à cet effet.

Impression 3D

Un fois la modélisation terminée nous pouvons exporter le fichier en format .stl et ouvrir un logiciel de découpe 3D, aussi appelé slicer, pour convertir le fichier en .gcode et pouvoir l'envoyer dans une imprimante 3D qui pourrait alors imprimer le boîtier.



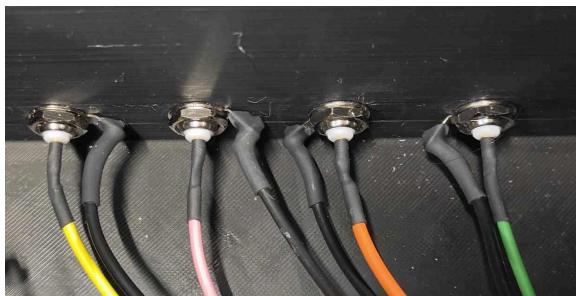
Photo du début de l'impression d'une des pièces, ici nous pouvons voir en noir la première couche.

Les techniciens ayant des problèmes avec les 2 imprimantes de la PFGE nous sommes passés par le Club de Robotique (CRIS) pour utiliser leur imprimante 3D pour notre projet.

Les connecteurs

Nous avons ensuite réalisé le câblage pour les câbles coaxiaux des signaux et les câbles de l'alimentation.

Les connecteurs sont tous fixés à la boîte avec les systèmes de fixation reçus avec le port notamment des écrous. Nous avons alors utilisé des cosses pour les câbles de l'alimentation. Le tout a été recouvert de gaine thermo pour faire un rendu propre et qu'il n'y ait pas de fils volants dans la boîte.



Intérieur



Extérieur

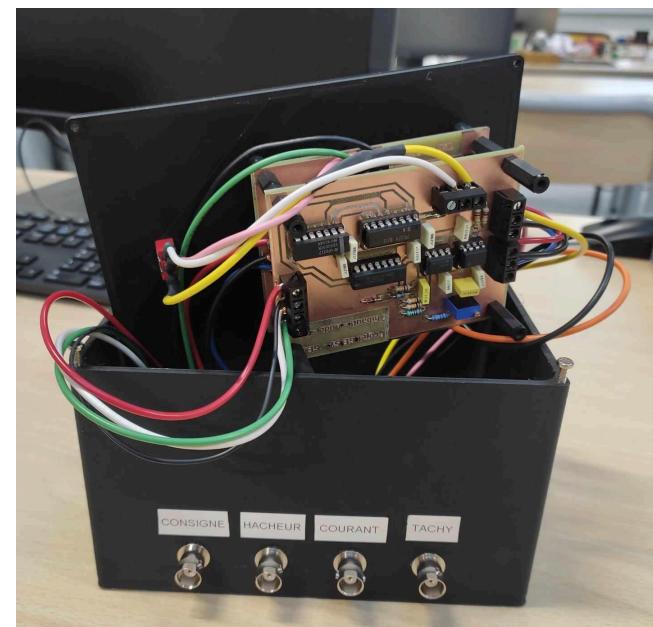


Assemblage

Nous avons alors assemblé la boîte dans son intégralité. Le PCB a été placé avec les entretoises sur le couvercle du boîtier. Les PCB reliés entre eux avec des câbles et les PCB reliés aux ports également par des câbles. La fermeture du boîtier est réalisée par des vis que nous avons placées aux quatres coins du couvercle.

Nous avons prévu des longueurs de câbles suffisamment longues pour que l'ouverture du boîtier se fasse facilement et que nous ayons accès aux PCB et aux câbles.

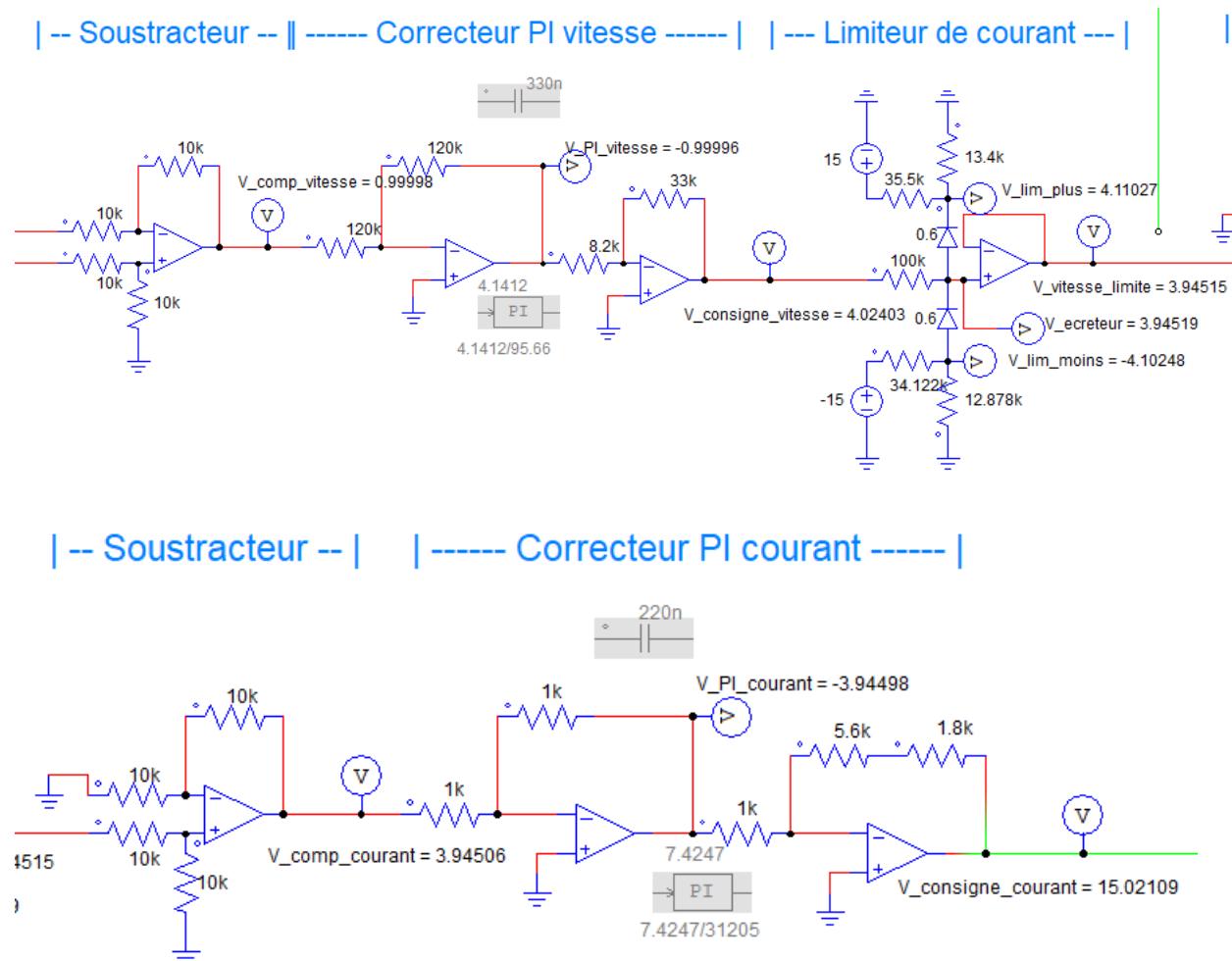
Également, l'étiquetage sur la boîte pour les connecteurs nous a permis de facilement faire les câblages et de ne pas se tromper par la suite pour les tests.



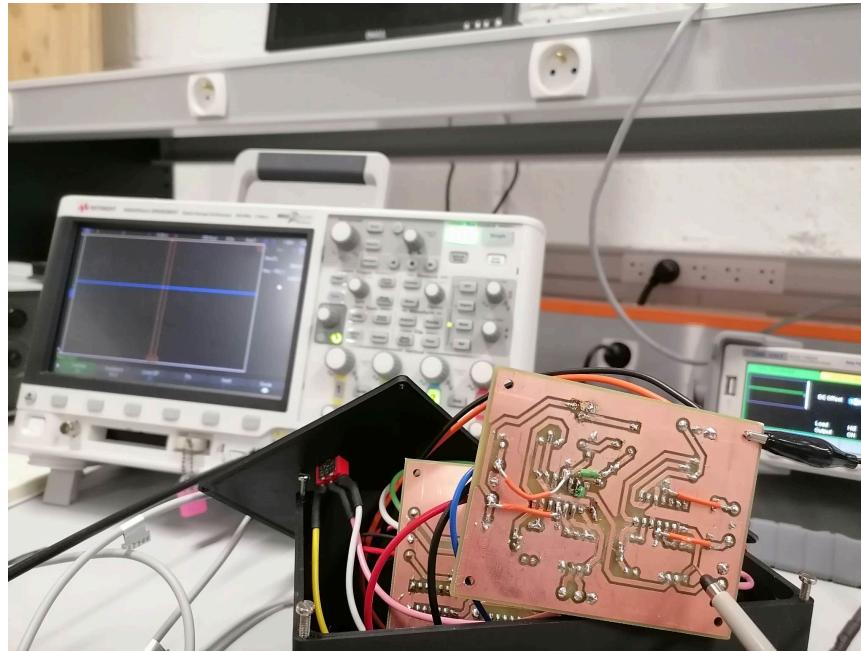
Tests de fonctionnement

a. Essais sur la partie correcteurs

Tout d'abord, nous avons commencé par le test des correcteurs. Pour cela, nous avons appliqué une consigne constante de 1V, sans retour de vitesse ni de courant. Comme l'entrée de l'intégrateur est par conséquent constante, nous avons court-circuité les condensateurs afin d'éviter l'instabilité et donc la saturation du système. Les correcteurs I, initialement des intégrateurs inverseurs deviennent de simples inverseurs :



Sur PSIM, nous avons observé les valeurs de tension à chaque point stratégique du circuit afin de comparer à nos mesures réelles. Pour avoir des valeurs les plus proches de la réalité possible, nous avons pris soin d'ajuster les valeurs des résistances sur PSIM pour correspondre aux valeurs réelles de nos potentiomètres.

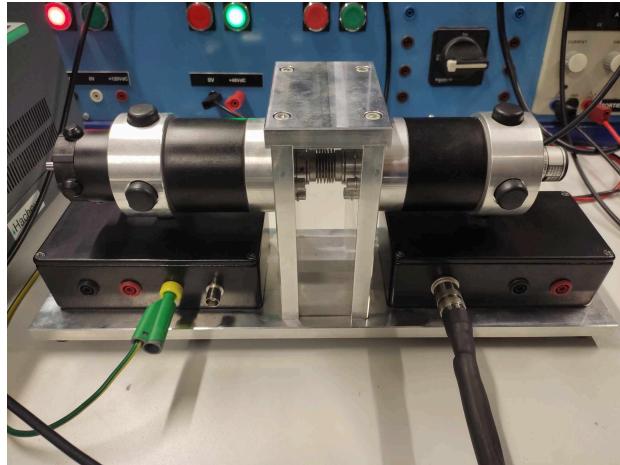


Nous effectuons nos mesures avec une sonde de tension classique branchée à un oscilloscope

b. Problèmes rencontrés

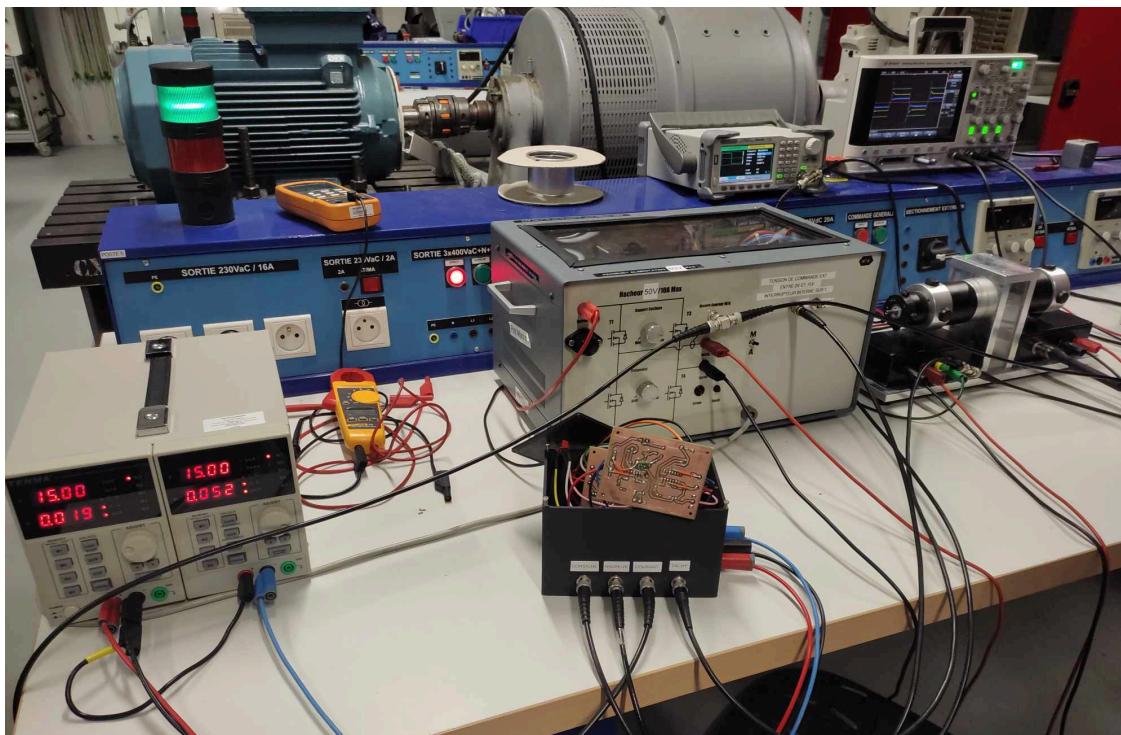
- Pas de continuité entre le T-bloc d'alimentation et les pistes +15V et -15V : nous avons dû rajouter des câbles soudés directement sur les pistes d'alimentations (câbles orange sur l'image ci-dessus)
- Le suiveur du limiteur de courant étant bouclé sur la borne +, sa sortie saturait. Nous avons donc dû couper les pistes et refaire les bonnes connexions avec des câbles (câbles verts sur l'image)
- Les diodes utilisées dans le circuit limiteur étaient des diodes Zener et non classiques
- Le potentiomètre de la partie positive du limiteur est sensible aux chocs, sa valeur change facilement. L'idéal aurait été de le changer.

c. Essais du système complet (hors codeur incrémental) sur banc moteur

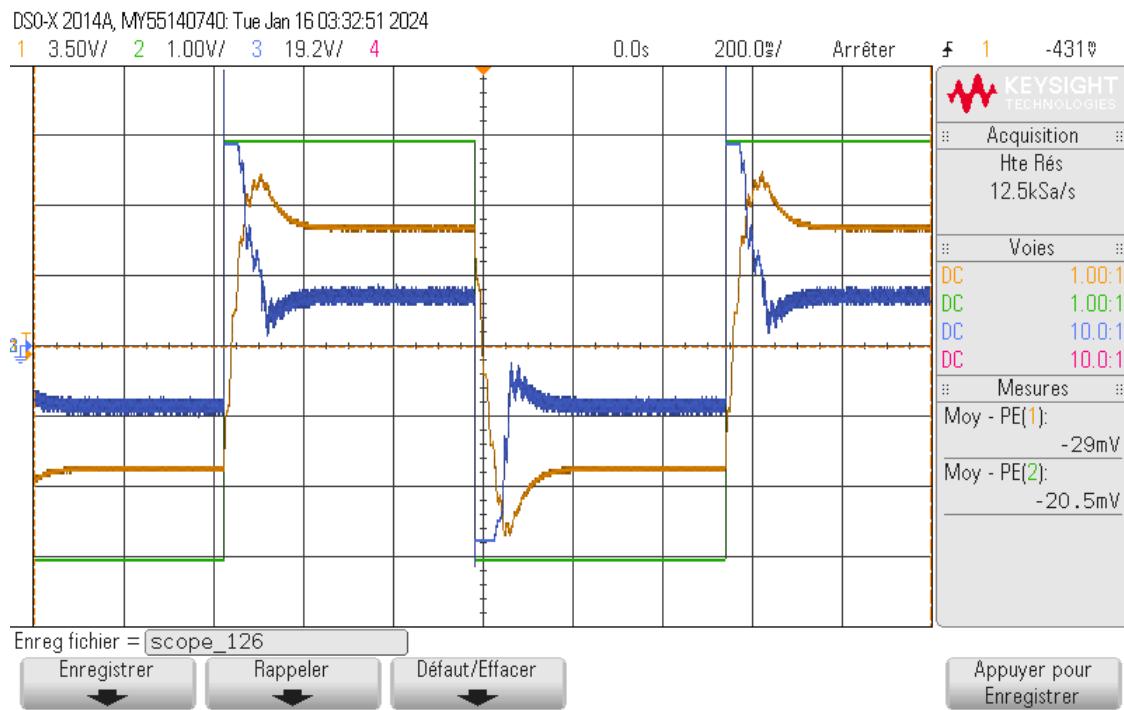


Pour ce test, nous alimentons en +15V notre boîtier, en +48V notre hacheur, sur lequel nous connectons la sortie hacheur de notre boîtier et nous connectons un rhéostat à la génératrice pour faire office de charge, que l'on pourra faire varier.

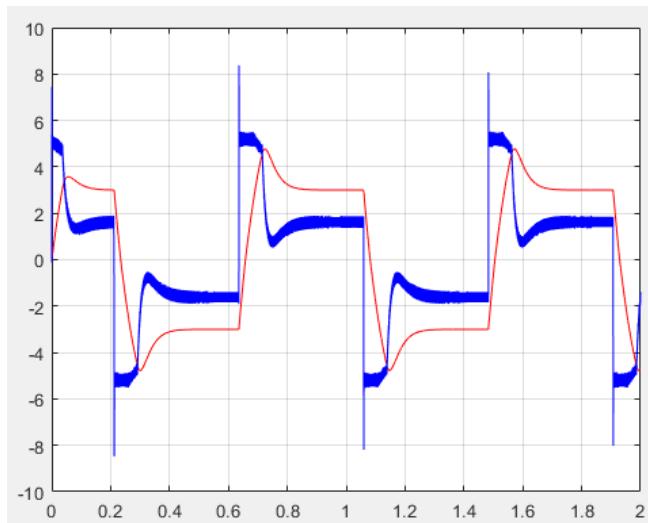
Nous appliquons une consigne carrée dont on fera légèrement varier la tension. On ajuste la fréquence pour avoir un asservissement complet sur une demie période.



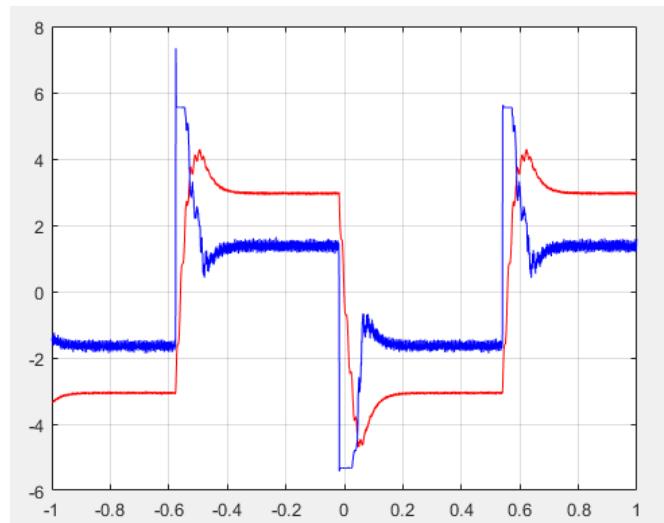
Nous observons sur l'oscilloscope la consigne, la sortie du capteur de courant et la sortie de la dynamo tachymétrique :



En appliquant la même consigne et en observant les mêmes tensions sur PSIM, nous avons pu comparer les résultats à l'aide d'un script Matlab :



Données PSIM



Données oscilloscope

Conclusion

Pour conclure ce rapport final, il nous semble important de décrire ce que ce projet nous a apporté que ce soit par l'aspect technique et aussi humain.

Dans un premier temps, une organisation. Un projet de cette ampleur demande de correctement prévoir ce que l'on va faire pour ne pas être surpris par le temps. On a donc réalisé un diagramme de Gantt et une répartition des tâches que l'on peut voir au début du rapport. De plus, nous avons aussi réalisé de nombreuses réunions et créé des canaux de communication dédiés au projet pour faciliter l'avancement hors des séances de cours. Cette organisation nous a permis de fournir une carte fonctionnelle avant la date de présentation du projet.

Dans un second temps, une rigueur. De nouveau, l'ampleur de ce projet rentre en jeu, et cette fois dans l'empêchement de tâtonner pour trouver, il faut savoir ce que l'on fait et où celà nous mène. C'est donc ce qui nous a poussé à détailler le cahier des charges dès le début du projet et à réaliser de nombreuses simulations pour tester rapidement des systèmes. C'est aussi pour ça que nous avons opté pour un système de sauvegarde à double historique. D'une part avec un système de rangement des fichiers proposé par le professeur et gardant une trace de tous les fichiers quand ils fonctionnent sans jamais les modifier par la suite et celà dans un répertoire avec la date de la modification. D'autre part, les fichiers sont enregistrés sur Github, un service qui propose de revenir à toutes les versions d'un fichier et qui garde un historique de chaque modification avec un commentaire personnalisé. Ce dernier service nous a aussi permis de plus facilement partager le travail que l'on faisait.

Dans un troisième et dernier temps, un apprentissage constant. En effet, ce projet nous a confronté à de nombreux aspects du génie électrique que nous ignorions avant. Que ce soit la prise en main de logiciel comme PSIM ainsi que la possible synergie entre les logiciels quand nous avons comparé les résultats des deux logiciels, PSIM et Matlab - Simulink, pour perfectionner nos modèles. Ou bien la mise en application de circuits électroniques dans un projet réel, comme la découverte sur système de conversion pour le codeur incrémental ou la mise en série de deux contrôleurs, systèmes que nous n'avions pas encore eu l'occasion de découvrir. La conception d'une carte électronique de cette ampleur est aussi un moment rare dans notre formation jusqu'à présent et nous pensons l'avoir correctement appréhendée.

Enfin, si nous ne devions retenir qu'une seule expérience de projet, ce serait la première fois que nous avons testé la carte avec le moteur. Nous avons alors compris que chaque étape, appliquée avec rigueur, nous a amené à ce résultat. Des simulations poussées et réalistes, un dimensionnement précis et calculé, un pcb tester partie par partie, c'est toutes ces étapes qui nous permettent d'avoir la joie de voir le moteur fonctionner exactement comme attendu.

Remerciements

Nous remercions M. Damien Flieller, notre professeur référent dans ce projet, pour son aide précieuse bien au delà des séances et pour les conseils qu'il nous a donné tout au long de ce projet.

Nous remercions les élèves de la classe de GE4 avec qui nous avons travaillé et partagé nos expériences.

Et nous remercions les techniciens de la plateforme Génie Électrique pour leur aide à la réalisation de projet.