

Projet GE S7

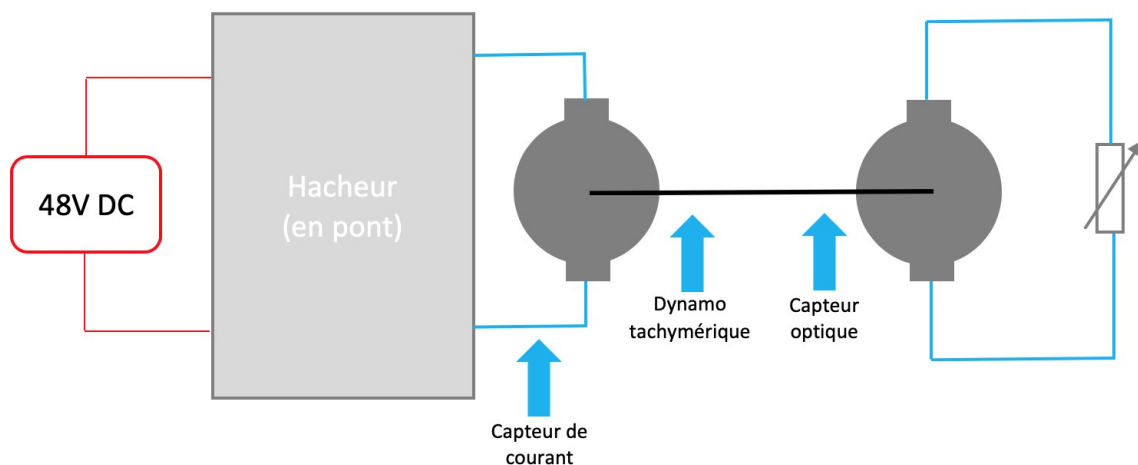
Asservissement d'une machine à courant continu

TRENCHANT Evan

TROULLIER Laël

VIRQUIN Rudy

GE4, groupe 2



Professeur : Damien Flieller

6 novembre 2025

Introduction

Dans le domaine de l'électronique de puissance et de l'automatique, la commande des machines électriques constitue un enjeu majeur pour de nombreuses applications industrielles. Parmi ces machines, la machine à courant continu (MCC) occupe une place particulière de par sa simplicité de commande et sa capacité à fournir des couples élevés à basse vitesse.

Ce projet, réalisé dans le cadre du semestre 7 de la formation en Génie Électrique à l'INSA Strasbourg, porte sur l'étude et la réalisation de l'asservissement d'une machine à courant continu avec charge. L'objectif principal est de développer un système de contrôle permettant d'asservir précisément la vitesse et le courant de la machine tout en respectant les contraintes de performance imposées.

Contexte et problématique

L'asservissement des machines électriques nécessite une approche méthodique combinant la modélisation théorique, la simulation numérique et la validation expérimentale. Dans le cas particulier de la machine à courant continu, plusieurs défis doivent être relevés :

- La modélisation précise du comportement dynamique de la machine et de sa charge
- La conception de correcteurs adaptés pour les boucles de courant et de vitesse
- La limitation des dépassements lors des régimes transitoires
- L'optimisation des performances en régime permanent et dynamique

Objectifs du projet

Ce projet vise à concevoir et valider un système d'asservissement complet pour une machine à courant continu. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

1. **Modélisation et simulation** : Développer un modèle mathématique précis de la machine à courant continu et de sa charge, puis l'implémenter dans les environnements MATLAB/Simulink et PSIM
2. **Asservissement en courant** : Concevoir et régler une boucle de régulation de courant permettant de contrôler précisément le couple de la machine
3. **Asservissement en vitesse** : Implémenter une boucle de régulation de vitesse en cascade avec la boucle de courant, utilisant soit un capteur tachymétrique soit un codeur incrémental
4. **Respect des spécifications** : Garantir que les dépassements en vitesse et en courant restent dans la plage de 10 à 20% lors des transitoires
5. **Validation comparative** : Comparer les résultats obtenus entre les simulations MATLAB/Simulink et PSIM pour valider la cohérence des modèles

Approche méthodologique

La démarche adoptée suit une approche progressive et structurée :

- **Phase 1** : Étude et modélisation de la machine seule
- **Phase 2** : Intégration de la charge mécanique et validation du modèle complet
- **Phase 3** : Conception et réglage de la boucle de courant

- **Phase 4** : Conception et réglage de la boucle de vitesse
- **Phase 5** : Optimisation globale et validation finale du système d'asservissement

Chaque phase fait l'objet d'une validation croisée entre les outils MATLAB/Simulink et PSIM, permettant de garantir la fiabilité des résultats et d'identifier d'éventuelles divergences de modélisation.

Structure du rapport

Ce rapport présente de manière détaillée l'ensemble des travaux réalisés. Il s'articule autour des axes suivants :

- La modélisation théorique et numérique de la machine à courant continu
- L'analyse comparative des outils de simulation
- La conception des correcteurs et leur réglage
- La validation expérimentale des performances obtenues
- L'analyse critique des résultats et les perspectives d'amélioration

Les résultats obtenus démontrent la faisabilité d'un asservissement efficace de la machine à courant continu tout en respectant les spécifications imposées, ouvrant ainsi la voie à des applications industrielles concrètes.

Table des matières

Introduction	2
1 Cahier des charges	5
1. Notations des variables pour le projet	5
2. Spécifications du système	5
2 Planification du projet	7
3 Étude de la MCC et de son hacheur	8
1. Simulation et modélisation du moteur à vide	8
2. Modélisation du moteur à courant continu avec charge	11
3. Modélisation du moteur avec charge et hacheur	13
4. Simplification du schéma bloc	15
4 Étude de l'asservissement du moteur	17
1. Asservissement en courant du moteur	17
Liste des figures et chemins d'accès	22
Conclusion	23

1 - Cahier des charges

1. Notations des variables pour le projet

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des notations utilisées dans ce projet, ainsi que les valeurs et unités correspondantes pour notre moteur à courant continu.

TABLE 1.1

Notations des variables pour le projet

Notations	Nom	Valeurs	Unités
Paramètres nominaux			
M_0	couple en rotation lente	0,54	N.m
I_0	courant permanent rotation lente	4,5	A
U	tension d'alimentation de définition	49	V
N	vitesse de définition	3000	tr/min
Paramètres maximaux			
U_{max}	tension maximale	65	V
N_{max}	vitesse maximale	4800	tr/min
I_{max}	courant impulsif	13	A
Constantes électromécaniques			
K_e	constante de fem (à 25°C)	13,3	V/(1000 tr/min)
K_Φ	constante de couple électromagnétique	0,127	N.m/A
Paramètres de frottement			
T_f	couple de frottement sec	2,4	N.cm
K_d	coefficient de viscosité	0,53	N.cm/(1000 tr/min)
Paramètres électriques			
R	résistance du bobinage (à 25°C)	1,52	Ω
L	inductance du bobinage	2,2	mH
R_{ch}	résistance de charge	10	Ω
Paramètres mécaniques			
J	inertie du rotor	$8,3 \cdot 10^{-5}$	kg.m ²
M	masse du moteur	1,34	kg
T_{th}	constante de temps thermique	7	min
Variables dynamiques			
Ω	vitesse de rotation		rad/s
C_m	couple électromagnétique		N.m
C_r	couple résistant total		N.m
i	courant d'induit		A
u	tension d'alimentation		V
e	force contre-électromotrice		V

2. Spécifications du système

Le cahier des charges du projet est défini comme suit :

Asservissement en courant

- Temps de réponse maximal de 10 fois la période de la MLI soit 0,45 ms
- Dépassement maximal de 20%

Asservissement en vitesse

- Dépassement maximal de 20%

2 - Planification du projet

La réalisation de ce projet d'asservissement d'une machine à courant continu nécessite une planification rigoureuse pour garantir l'atteinte des objectifs dans les délais impartis. Cette section présente l'organisation temporelle du projet et le diagramme de Gantt détaillant les différentes phases de développement.

Diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt ci-dessous illustre la planification détaillée du projet sur 9 semaines, avec les dépendances entre les tâches et les jalons importants.

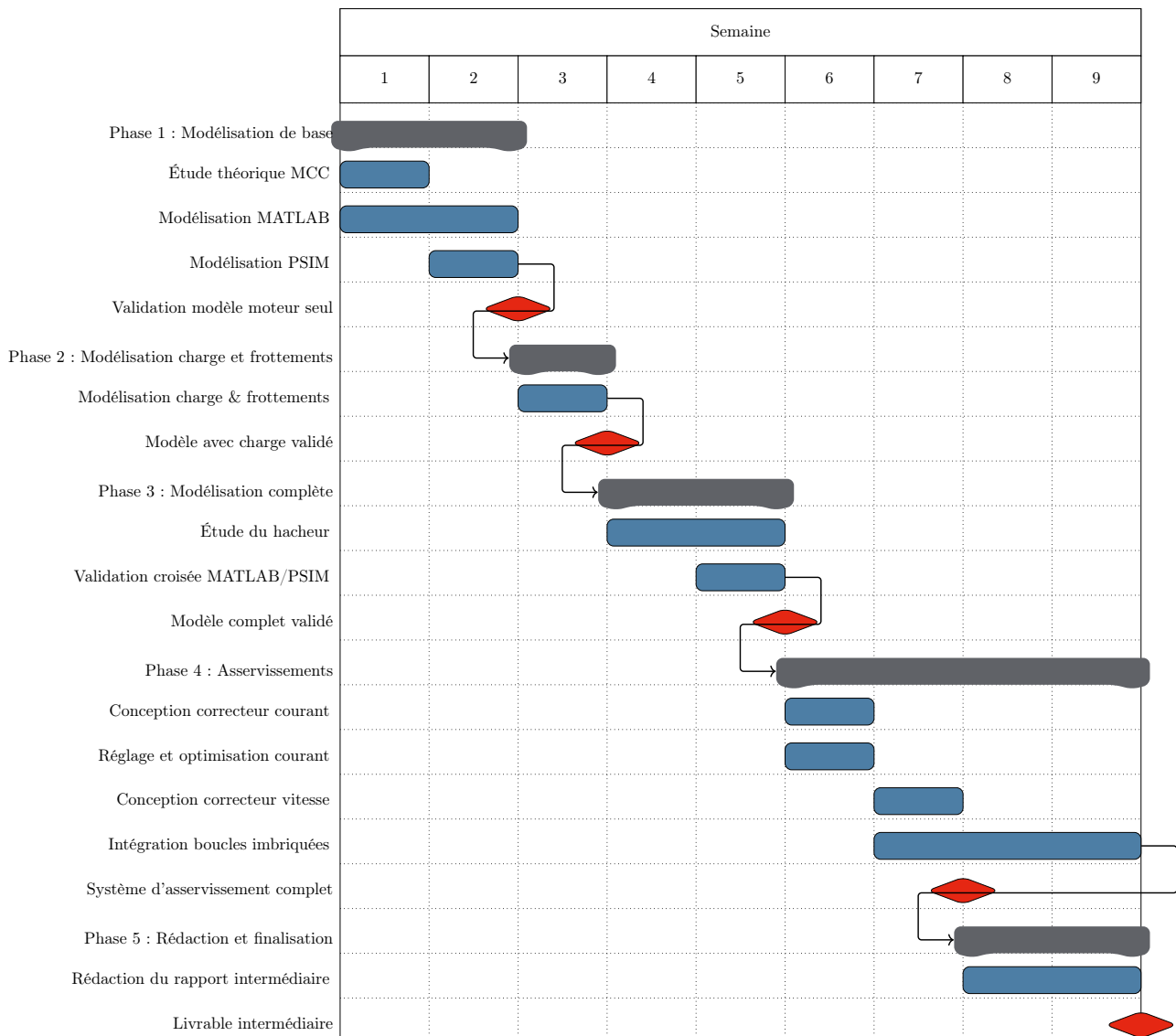


FIGURE 2.1 – Diagramme de Gantt — récapitulatif jusqu'à 9 semaines

3 - Étude de la MCC et de son hacheur

1. Simulation et modélisation du moteur à vide

1.1. Équations de la MCC

La machine à courant continu (MCC) est un dispositif électromécanique capable de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, et inversement. Cette conversion bidirectionnelle s'effectue grâce au passage d'un courant continu dans son induit, générant ainsi un couple moteur qui entraîne l'arbre en rotation. En mode générateur, le principe est inversé : la rotation de l'arbre produit une force électromotrice aux bornes de la machine. La MCC constitue ainsi un élément clé dans de nombreux systèmes d'entraînement industriels et de conversion d'énergie.

Formules d'une MCC sans pertes et sans charge

Les équations régissant le comportement d'une machine à courant continu sans pertes et sans charge sont les suivantes :

Équations temporelles de la MCC

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

$$C_m(t) = K_c \cdot i(t)$$

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m(t)$$

$$\text{On note ici : } K_c = K_e = K_\Phi$$

Transformée de Laplace

Les équations précédentes peuvent être exprimées dans le domaine de Laplace, ce qui facilite l'analyse et la modélisation du système :

Équations dans le domaine de Laplace

$$I(s) = \frac{U(s) - K_\Phi \Omega}{R + Ls}$$

$$C_m(s) = K_\Phi \cdot I(s)$$

$$E(s) = K_\Phi \cdot \Omega(s)$$

$$\Omega(s) = \frac{K_\Phi \cdot I(s)}{Js}$$

Conversion vitesse-tension

Le moteur possède une force contre-électromotrice E proportionnelle à sa vitesse de rotation. Les données constructeur indiquent : $E = 13,3 \text{ V}$ pour 1000 tr/min .

En notant N la vitesse en tr/min et Ω la vitesse en rad/s , on obtient les relations suivantes :

$$E = \frac{13,3}{1000} \cdot N$$

$$\Omega = \frac{\pi N}{30} \Rightarrow E = \underbrace{\frac{13,3}{1000} \cdot \frac{30}{\pi}}_{0,127} \cdot \Omega$$

La constante de fcem est donc : $K_{\Phi} = 0,127 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Une fois le modèle mathématique de la MCC défini à partir des équations présentées ci-dessus, nous pouvons procéder à sa simulation numérique. Cette simulation sera réalisée successivement sur deux environnements logiciels complémentaires : Simulink, qui permet une approche par schéma-blocs, et PSIM, orienté vers la simulation de circuits de puissance. La confrontation des résultats obtenus avec les deux outils permettra de valider notre modélisation théorique.

1.2. Simulation avec Simulink

Dans l'environnement Simulink, notre démarche consiste à traduire le système d'équations différentielles sous forme d'un schéma-blocs interconnectés, où chaque bloc représente une opération mathématique élémentaire.

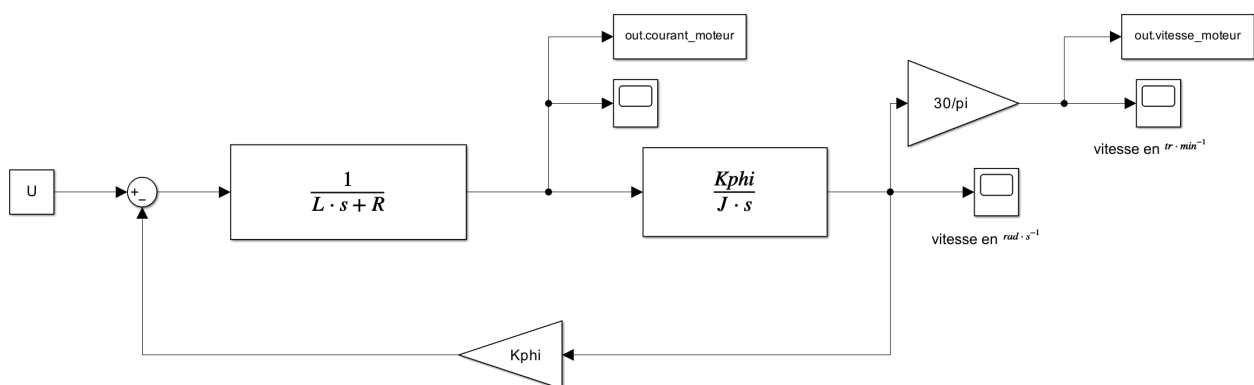


FIGURE 3.1 – Schéma Simulink du moteur à courant continu à vide

On remarque que le schéma Simulink présenté en Figure 3.1 intègre les équations de la MCC sans charge. Les simulations effectuées avec ce modèle permettent d'obtenir les réponses temporelles du courant et de la vitesse du moteur à vide, illustrées dans la Figure 3.2.

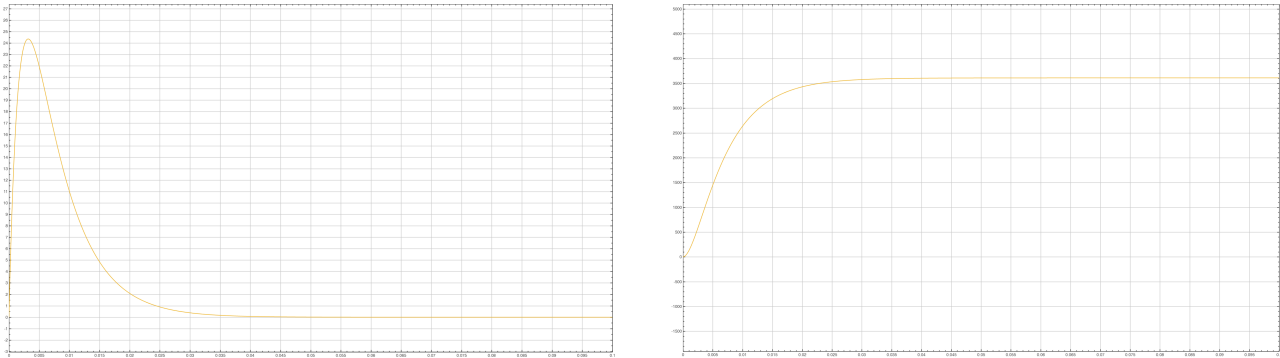


FIGURE 3.2 – Courbes de réponse du moteur à courant continu

1.3. Simulation sur PSIM

Pour la simulation sur PSIM, nous adoptons une approche méthodologique complémentaire. L'utilisation de deux méthodes distinctes (Simulink et PSIM) constitue une validation croisée : si les résultats concordent, nous pourrions confirmer la validité de nos modélisations.

Contrairement à Simulink qui nécessite la construction du modèle à partir des équations différentielles, PSIM propose une approche plus directe basée sur l'utilisation de composants pré-définis. Le logiciel met à disposition une bibliothèque de machines à courant continu standards qu'il suffit de paramétrer avec les caractéristiques de notre moteur réel. Cette méthodologie se rapproche davantage du fonctionnement physique du système et réduit significativement le nombre de calculs intermédiaires.

Le principe de modélisation sous PSIM repose sur l'assemblage de composants dont on définit ensuite les propriétés. Par exemple, pour simuler notre moteur, nous plaçons simplement un bloc « moteur DC » dans l'environnement de travail, puis nous renseignons ses paramètres électriques et mécaniques.

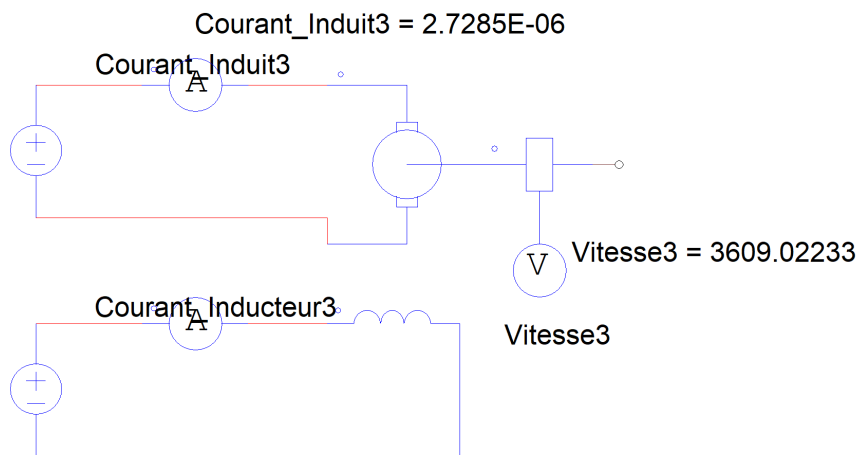


FIGURE 3.3 – Modélisation du moteur à courant continu sur PSIM

1.4. Comparaison des résultats

Nous comparons les résultats avec un programme *MATLAB*. Pour cela, nous avons besoin de récupérer les valeurs de notre modélisation sous forme de tableau : $X = [t \ i(t) \ \omega(t)]$.

On retrouve bien les valeurs attendues, notamment en vitesse où on a la relation suivante à

l'état stable :

$$\omega = \frac{U}{K_{\Phi}} = \frac{48}{0,127} = 377,95 \text{ rad/s} \quad \text{ou} \quad \omega = \frac{U}{K_e} = \frac{48}{13,3} = 3609 \text{ tr/min}$$

Les courbes de la Figure 3.4 montrent une excellente concordance entre les résultats obtenus avec Simulink et PSIM, validant ainsi notre modélisation du moteur à courant continu à vide. Nous pouvons donc passer aux simulations suivantes : le moteur avec des pertes et sa charge.

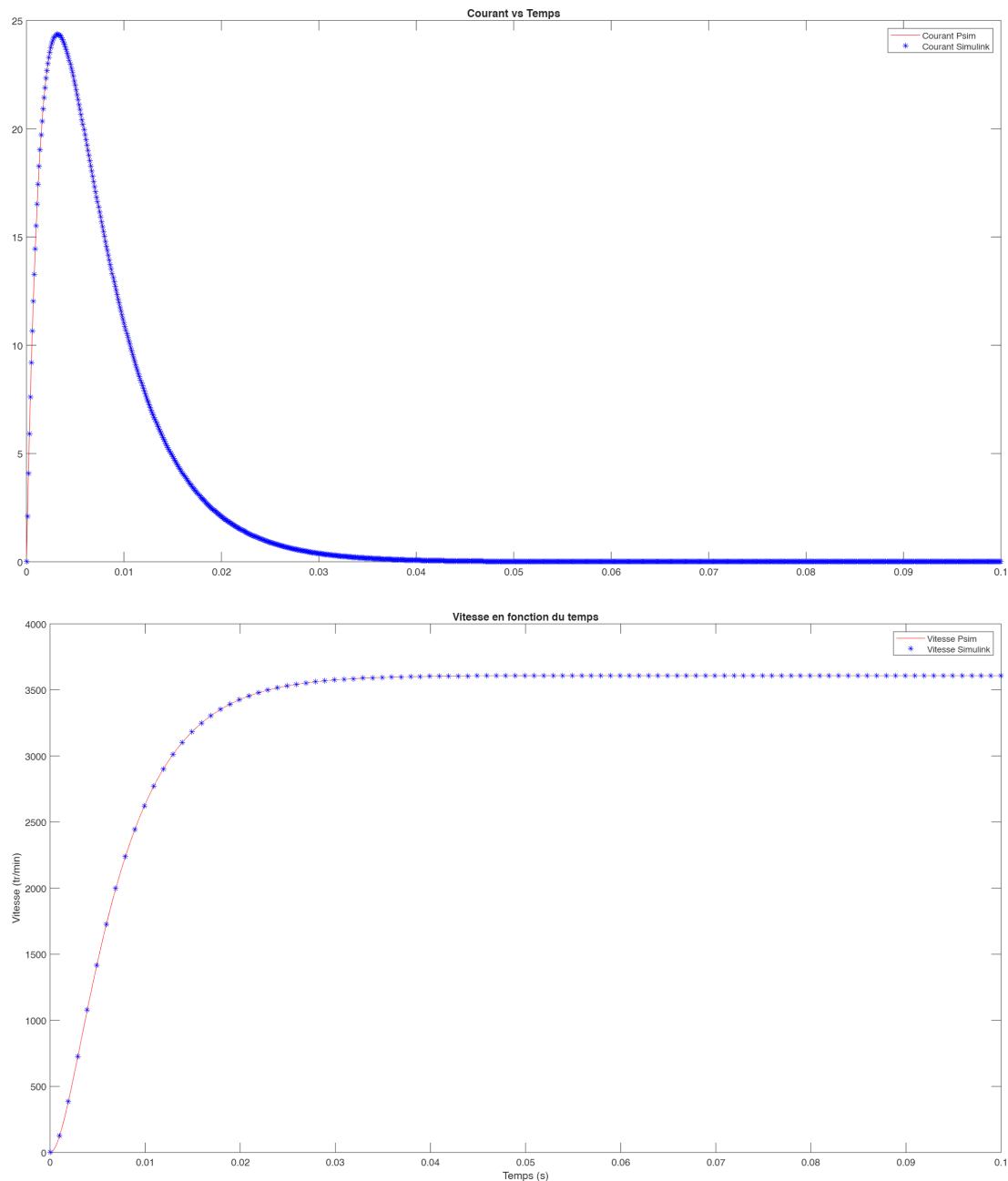


FIGURE 3.4 – Comparaison des résultats Simulink et PSIM pour le moteur à vide

2. Modélisation du moteur à courant continu avec charge

Dans cette partie, nous allons effectuer la même logique qu'avec le moteur à vide. Cette fois-ci le moteur a des pertes, appelées frottements, et le couple résistant du moteur est pris en compte. On note :

$$f = C_f \cdot \Omega = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{1}{1000} \cdot 0,53 \cdot 10^{-2} = 5,06 \cdot 10^{-5} \text{ N.m/rad.s}$$

$$C_r = 2 \cdot C_0 = 0,024 \text{ N.m}$$

2.1. Équations de la MCC avec pertes

Les équations de notre système vont donc changer. En effet en ajoutant les frottements, le système devient :

Formules d'une MCC avec pertes

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

$$C_m(t) = K_c \cdot i(t)$$

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m(t) - f \cdot \omega(t) - C_r(t)$$

Ce qui donne dans le domaine de Laplace :

Équations dans le domaine de Laplace

$$I(s) = \frac{U(s) - K_\Phi \Omega}{R + Ls}$$

$$C_m(s) = K_\Phi \cdot I(s)$$

$$E(s) = K_\Phi \cdot \Omega(s)$$

$$\Omega(s) = \frac{C_m + C_r}{Js + f}$$

Une fois les équations trouvées, nous allons pouvoir déterminer le schéma bloc et effectuer les mesures.

2.2. Simulation Simulink

Le schéma bloc n'est plus le même. En effet, celui-ci devient plus complexe, puisque qu'on y ajoute le couple résistant C_r et les frottements f .

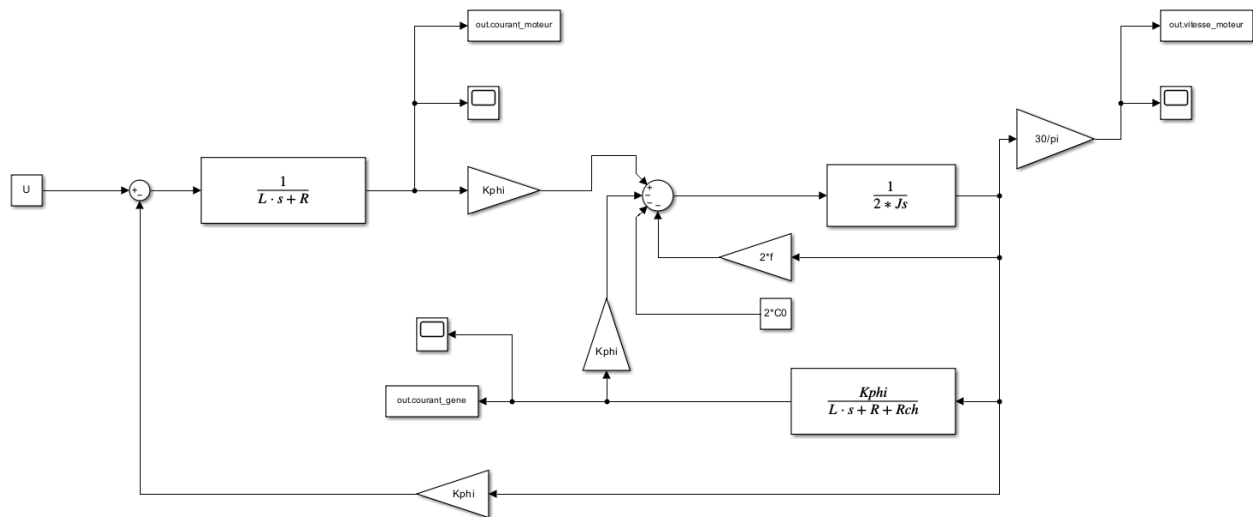


FIGURE 3.5 – Schéma Simulink du moteur à courant continu avec charge et frottements

2.3. Simulation sur PSIM

2.4. Comparaison des résultats

3. Modélisation du moteur avec charge et hacheur

cf. [Modélisation Simulink et PSIM du dossier 03_01_10_2025](#)

3.1. Modélisation du hacheur

Le hacheur, ou convertisseur continu–continu, est un dispositif d’électronique de puissance qui permet de modifier la valeur moyenne d’une tension continue à l’aide d’interrupteurs commandés. Il est couramment utilisé pour piloter des charges électriques (ici une machine à courant continu) avec un bon rendement.

Sur PSIM, le hacheur est modélisé par un pont en H composé de quatre transistors MOSFET pilotés en paires. Le schéma fonctionnel comporte le pont en H alimenté par une source continue (ici 48 V), un générateur de signal triangulaire et un comparateur qui produit le signal PWM de commande.

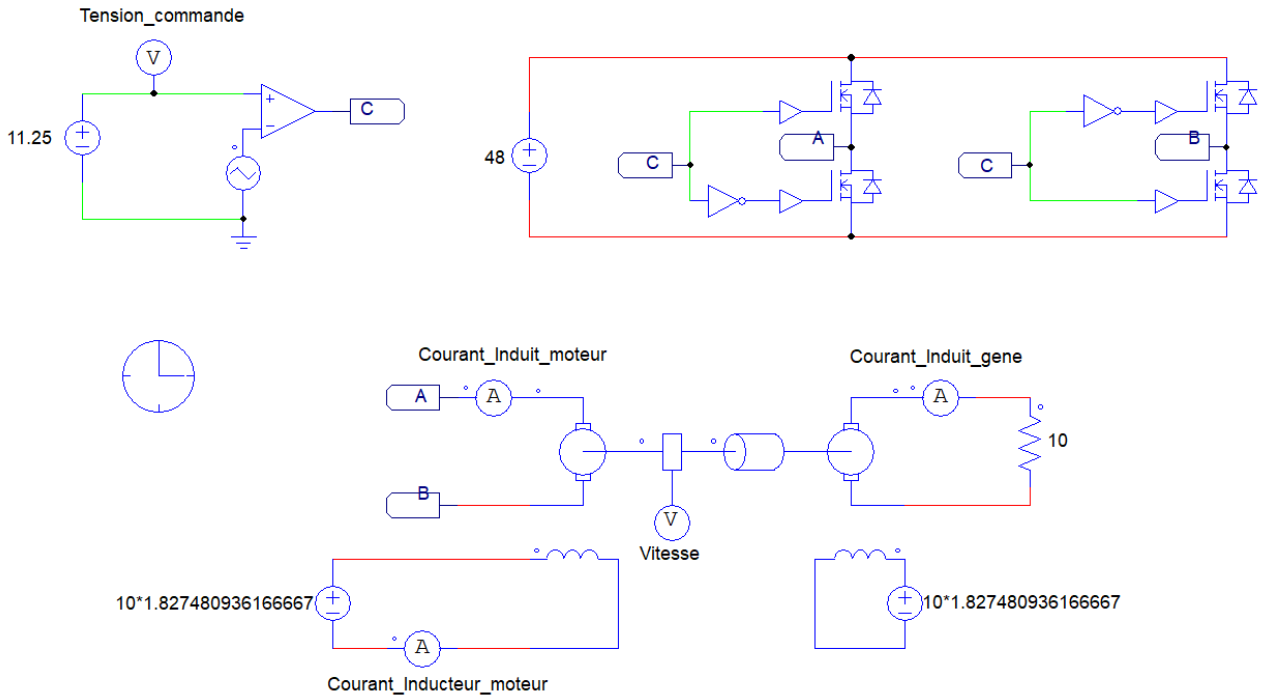


FIGURE 3.6 – Modélisation du hacheur sur PSIM

Le hacheur fournit une tension de sortie moyenne qui peut être positive ou négative (mode bipolaire). La valeur moyenne de la tension de sortie V_s dépend de trois grandeurs : la tension d'alimentation (ici 48 V), la tension de commande continue (notée V_{commande}) et le rapport cyclique α du signal de commande (duty cycle) appliqué aux interrupteurs.

La commutation des transistors s'effectue par paires (par exemple 1 et 4 d'une part, 2 et 3 d'autre part) de façon complémentaire afin de piloter le pont en H. Le rapport cyclique α correspond à la proportion de la période pendant laquelle l'interrupteur est fermé. Pour $\alpha = 0$ la tension de sortie vaut $V_s = -48 \text{ V}$, pour $\alpha = 1$ on obtient $V_s = +48 \text{ V}$, et pour des valeurs intermédiaires de α la tension de sortie varie de manière (approximativement) linéaire entre ces extrêmes. Ainsi, une augmentation de α entraîne une augmentation de V_s .

La commande PWM est générée en comparant, au moyen d'un comparateur (ou d'un AOP configuré), une tension continue de référence $V_e = V_{\text{commande}}$ avec un signal triangulaire V_{triangle} qui varie typiquement de 0 à 15 V. Le comparateur produit alors le signal V_{pwm} dont le rapport cyclique est proportionnel à V_{commande} . En sortie du comparateur, des suiveurs (buffers) sont placés pour assurer une adaptation d'impédance et piloter correctement les étages de commande des MOSFET.

Ce modèle permet d'étudier le comportement statique et dynamique du hacheur (effet du filtrage, des commutations, des temps morts, etc.) et sert de base pour obtenir les courbes de comportement et les signaux de commande utilisés dans les simulations ultérieures.

3.2. Caractéristique du hacheur

Le hacheur utilisé possède une caractéristique de transfert non-linéaire avec une zone morte. La tension de sortie moyenne $\langle u_{AB} \rangle$ dépend de la tension de commande u_{commande} selon la relation suivante :

Relation tension de sortie :

$$\begin{aligned}\langle u_{AB} \rangle &= \frac{96}{15} (u_{\text{commande}} - 7,5) \\ &= \frac{96}{15} u_{\text{commande}} - 48 \\ &= 6,4 u_{\text{commande}} - 48\end{aligned}$$

Caractéristiques principales :

- Zone morte : $0 \leq u_{\text{commande}} < 7,5$ V
- Pente : 6,4 V/V
- Tension maximale : 48 V à 15 V de commande
- Point de fonctionnement intermédiaire (en rouge) : (11,25 V; 24 V)

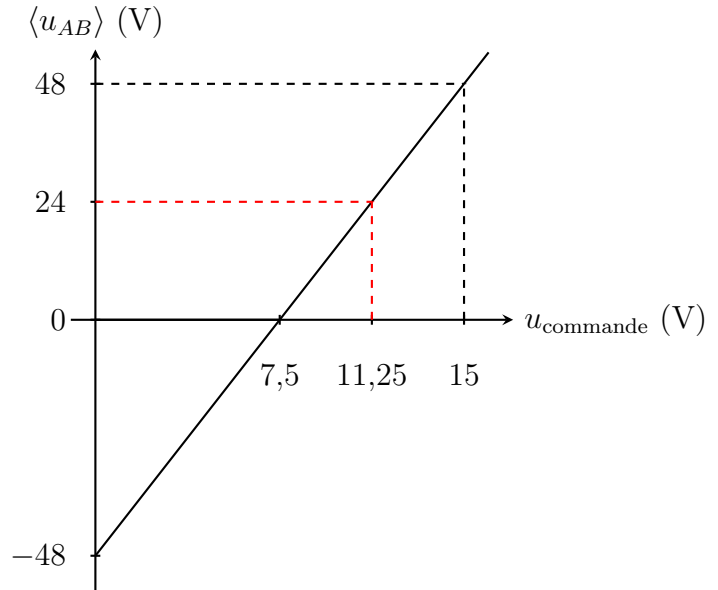


FIGURE 3.7 – Caractéristique de transfert du hacheur

Cette caractéristique montre que le hacheur présente une zone morte pour les faibles tensions de commande (inférieures à 7,5 V), puis un comportement linéaire avec un gain de 6,4. La tension de sortie est limitée à ± 48 V.

4. Simplification du schéma bloc

A ce stade de l'analyse, nous disposons du schéma bloc complet de notre système, avant asservissement en vitesse. Comme illustré dans la Figure 3.8, ce schéma est assez complexe en raison de la présence de plusieurs boucles de rétroaction imbriquées. Pour faciliter l'analyse et la conception des contrôleurs, il est nécessaire de simplifier ce schéma bloc en combinant les différents éléments.

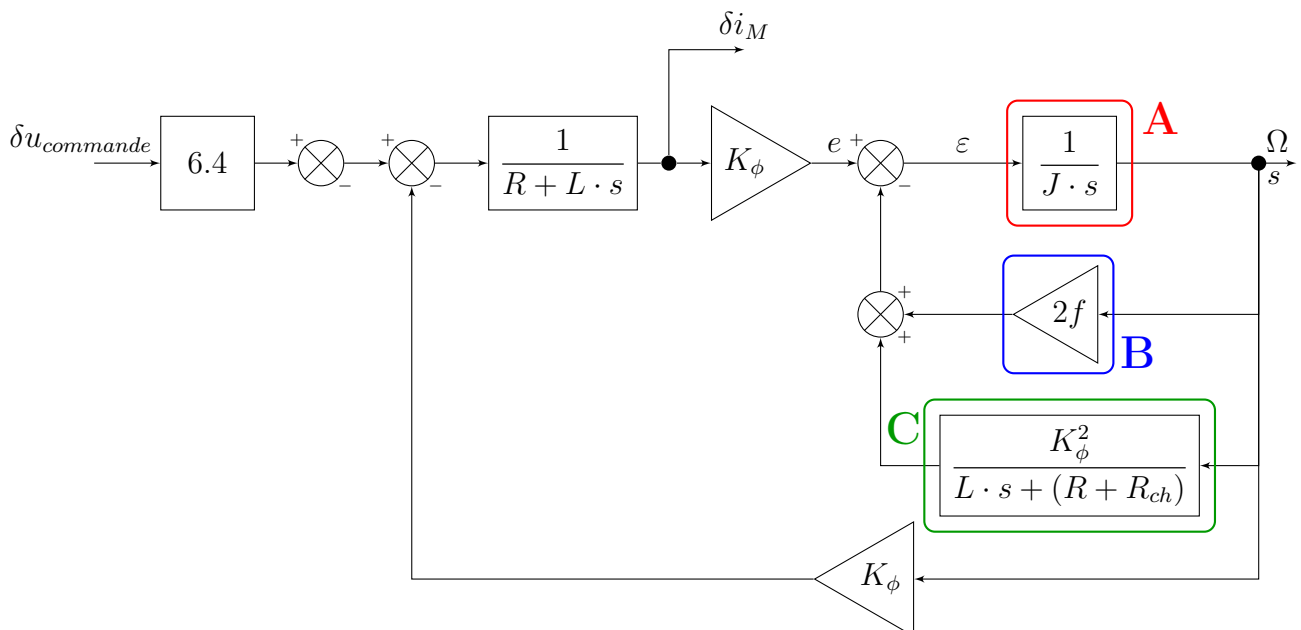


FIGURE 3.8 – Schéma bloc de l'asservissement en courant avec boucle de courant imbriquée

Cette simplification permet d'obtenir une représentation plus concise du système, facilitant ainsi l'analyse et la conception des contrôleurs.

$$\begin{cases} \varepsilon = e - B \cdot \Omega - C \cdot \Omega \\ s = A \cdot \varepsilon = A \cdot (e - (B + C) \cdot s) \end{cases} \implies s = \frac{A \cdot e}{1 + A \cdot (B + C)} = H \cdot e$$

Le diagramme bloc simplifié de l'asservissement en vitesse est présenté dans la Figure 3.9.

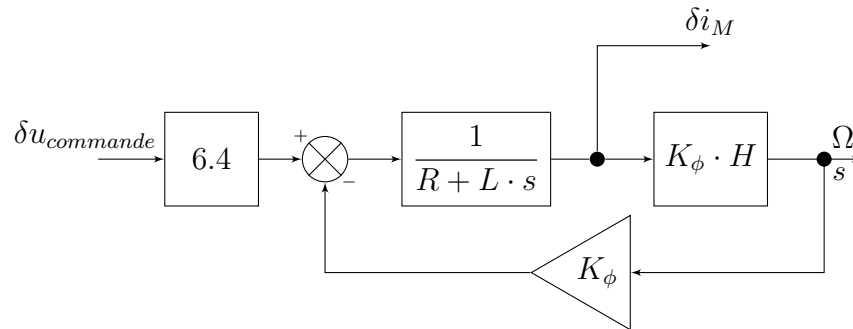


FIGURE 3.9 – Schéma bloc de l'asservissement en courant simplifié

On peut alors écrire la fonction de transfert en boucle ouverte du système simplifié :

$$\delta_{i_M}(s) = \frac{1}{R + L \cdot s} \cdot \delta u_{commande}(s) = FTBO(s) \cdot \delta u_{commande}(s)$$

$$1 + \frac{(K_\phi)^2 \cdot H}{R + L \cdot s}$$

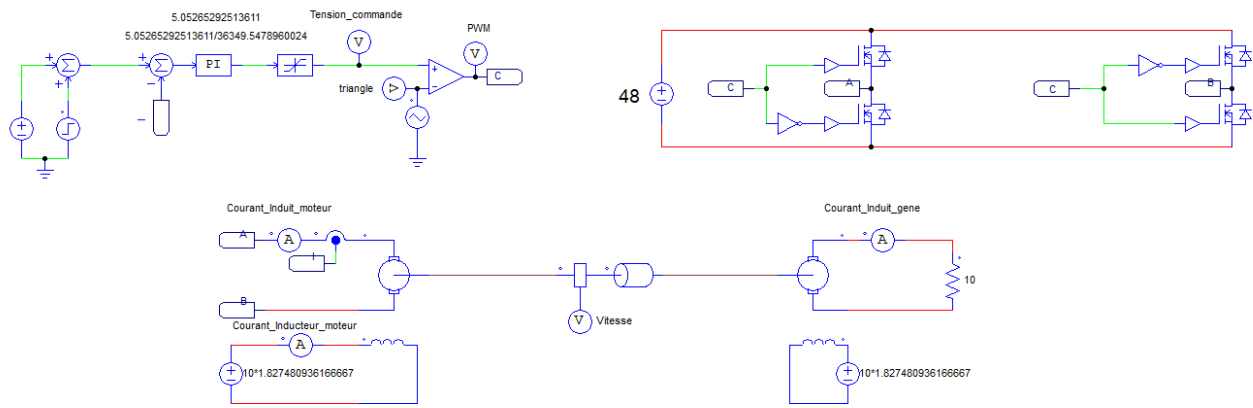


FIGURE 4.2 – Schéma de l'asservissement en courant du moteur dans PSIM

Comparaison des résultats

Dans cette section, nous allons comparer les résultats obtenus avec les deux outils de simulation, Simulink et PSIM.

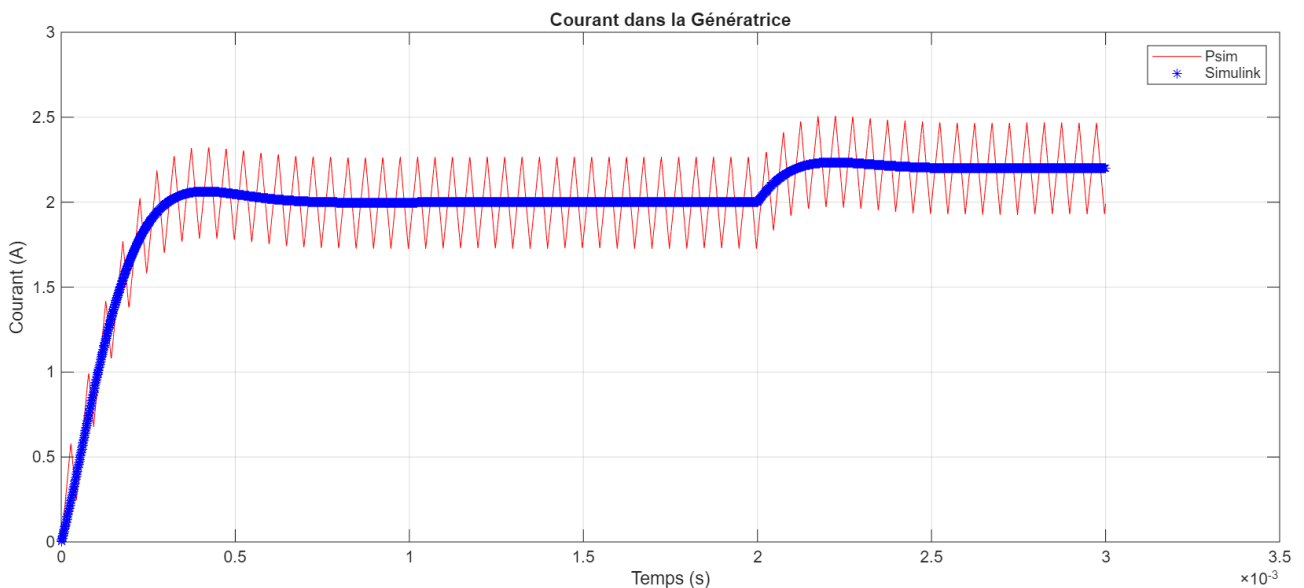


FIGURE 4.3 – Comparaison des réponses indicielle de l'asservissement en courant du moteur entre Simulink et PSIM

On constate que la réponse indicielle de l'asservissement en courant du moteur présente un dépassement d'environ 19% et un temps de réponse de 0,35 ms. Ce qui respecte les spécifications du cahier des charges qui exige un dépassement maximal de 20% et un temps de réponse maximal de 10 fois la période de la MLI soit 0,45 ms.

1.2. Asservissement en vitesse du moteur

Simulation sur Matlab/Simulink

Nous commençons par la simulation de la vitesse du moteur en boucle ouverte sur Simulink.

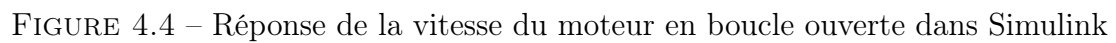
[illegible]

FIGURE 4.5 – Schéma de l’asservissement en vitesse du moteur dans Simulink

- $K_p = 37,3376029909659$
- $K_i = 14022,585396076$

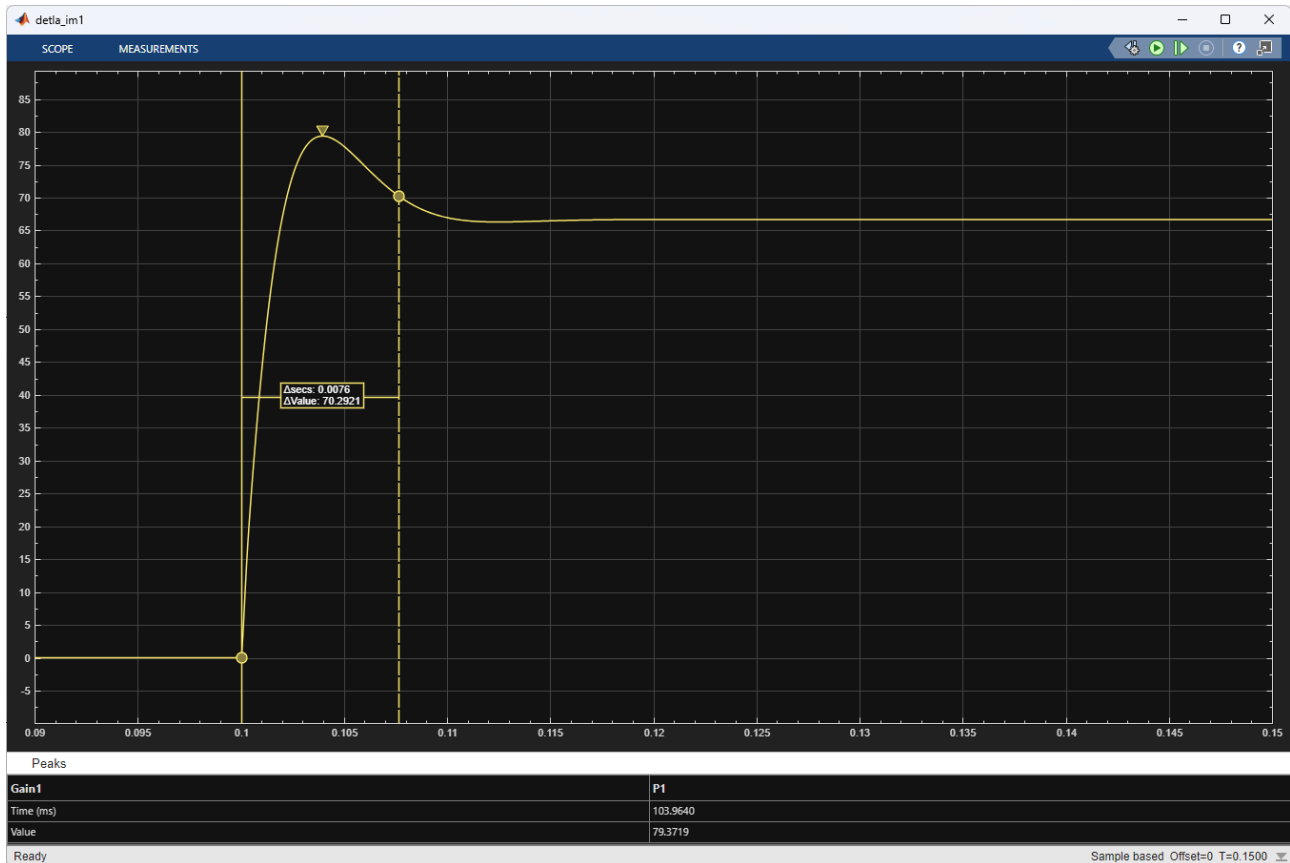


FIGURE 4.6 – Réponse de l'asservissement en vitesse du moteur dans Simulink

Nous relevons un temps de réponse à 5% de 7,6 ms et un dépassement de 18,5%, ce qui respecte les spécifications du cahier des charges.

Simulation sur PSIM

J'arrive pas à avoir la même réponse en vitesse sur Psim et sur Simulink. Alors que Clément y est arrivé. J'ai essayé de rajouter les frottement sec sur Simulink ca change rien. En jouant sur le temps de réponse voulu ca change rien non plus car si je met un temps de réponse plus long j'ai un dépassement sur Simulink et pas de dépassement sur Psim. Et quand je met un temps de réponse plus court j'ai un plus gros dépassement sur Psim que sur Simulink.

Comparaison des résultats

1.3. Asservissement en vitesse avec le codeur incrémental

Le cahier des charges impose la possibilité d'asservir la vitesse du moteur à l'aide d'un codeur incrémental.

Principe de fonctionnement du codeur incrémental

Le fonctionnement du codeur incrémental repose sur un disque rotatif équipé de fentes. Celui-ci est interposé entre une diode électroluminescente et un capteur photodiode. Lorsque le disque tourne, les fentes permettent à la lumière de passer à travers, générant ainsi des impulsions électriques dans le capteur. Le nombre d'impulsions générées par tour dépend de la résolution du codeur.

Le codeur incrémentale fournit est composé de deux piste de fentes décalé d'un quart de période, ce qui permet de déterminer le sens de rotation du moteur en analysant la séquence des impulsions générées par les deux capteurs.

Pour mesurer la vitesse de rotation du moteur, il suffit de compter le nombre d'impulsions générées par le codeur sur une période de temps donnée. La vitesse angulaire peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$\omega = \frac{N \cdot 2\pi}{P \cdot T} \quad (4.1)$$

où :

- ω est la vitesse angulaire en radians par seconde (rad/s)
- N est le nombre d'impulsions comptées
- P est le nombre d'impulsions par tour du codeur
- T est la période de temps pendant laquelle les impulsions sont comptées en secondes (s)
- 2π est une constante pour convertir les tours en radians

Pour connaître le sens de rotation, on analyse la séquence des impulsions des deux pistes. Si la piste A précède la piste B, le moteur tourne dans un sens. Si la piste B précède la piste A, le moteur tourne dans le sens inverse.

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 3.1 : Modelisation/01_12_09_2025/moteur_seul_12_09_2025.slx

Figure 3.2 : Modelisation/01_12_09_2025/moteur_seul_12_09_2025.slx

Figure 3.3 : Modelisation/01_12_09_2025/moteur_seul_12_09_2025.psimsch

Figure 3.4 : Modelisation/01_12_09_2025/comparasion_moteur_seul_12_09_2025.m

Note : Cette liste permet de retrouver rapidement les fichiers sources utilisés pour générer les figures du rapport.

Conclusion