



DÉPARTEMENT DE L'ÉLECTROTECHNIQUE  
COMMANDE DES MACHINES

---

**TP N°1 :**  
**Hacheur réversible 4Q à IGBT  $f=5$  kHz**

---

Fait par :  
CHERBAL Souhaib

Proposé par :  
Pr. Mahmoudi

# Sommaire

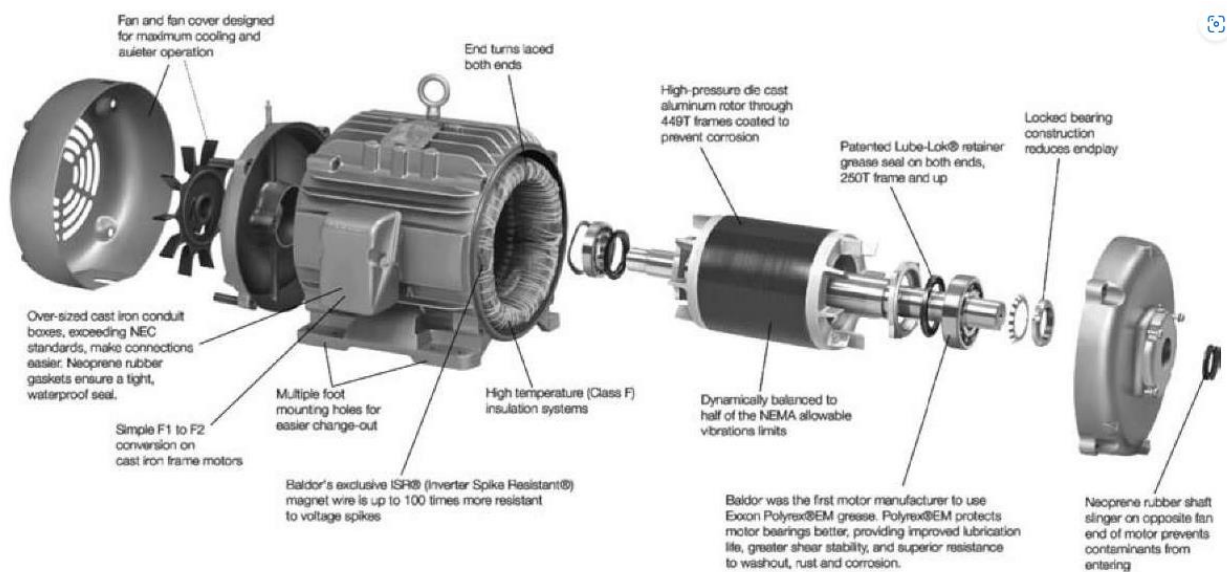
## Contents

<b>Introduction:</b>	<b>3</b>
<b>Données et Modélisation :</b>	<b>4</b>
Source d'alimentation :	4
Redresseur :	5
<b>Hacheur réversible 4Q :</b>	<b>5</b>
a) Définition :	5
b) Le fonctionnement en commande continue :	6
c) Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :	7
d) La fonction de transfert du hacheur :	7
<b>Commande de MCC :</b>	<b>7</b>
a) L'équation électrique :	7
b) Equation mécanique :	8
c) Schéma fonctionnel en BO :	8
<b>Régulation:</b>	<b>9</b>
<b>Partie simulation :</b>	<b>10</b>
Le montage Simulink pour le redresseur :	10
Résultat :	10
Le schéma Simulink :	11
<b>La simulation en boucle ouverte :</b>	<b>12</b>
<b>Simulation en boucle fermé :</b>	<b>14</b>
<b>Les résultats :</b>	<b>15</b>
<b>Partie pratique:</b>	<b>15</b>
Montage pratique:	15
Résultats pratiques:	16
<b>Conclusion :</b>	<b>17</b>

## Introduction:

L'évolution des systèmes d'entraînement des moteurs haute performance demeure un pilier essentiel dans le domaine industriel. Assurer un fonctionnement optimal requiert une réponse agile aux commandes de vitesse et de régulation de charge. Les moteurs à courant continu se distinguent par leur capacité à offrir un contrôle précis de la vitesse, tant dans les phases d'accélération que de décélération. La liaison directe de l'alimentation électrique au champ du moteur autorise un ajustement minutieux de la tension, particulièrement crucial dans les applications nécessitant une gestion pointue de la vitesse et du couple. Le réglage de la vitesse d'une machine à courant continu à excitation séparée s'opère par la modulation d'une tension continue variable, provenant d'un convertisseur continu tel qu'un redresseur ou un hacheur. Dans le cadre de notre projet, notre attention s'est focalisée sur la modélisation et la simulation de la commande en vitesse d'une telle machine, alimentée par un hacheur 4Q à IGBT réversible en tension, avec l'appui de Matlab. Notre démarche s'est articulée autour de la modélisation de la machine et des fondements de la

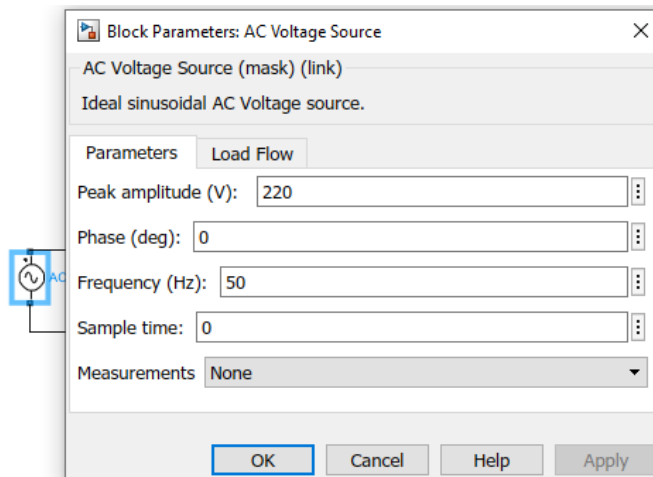
commande en vitesse, en vue de réaliser une simulation rigoureuse sur Matlab. Les conclusions de cette simulation seront exposées et débattues dans le présent rapport.



Données et Modélisation :

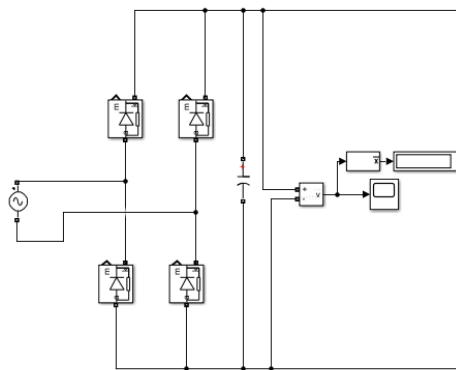
Source d'alimentation :

La source est monophasée 50 Hz, 220V

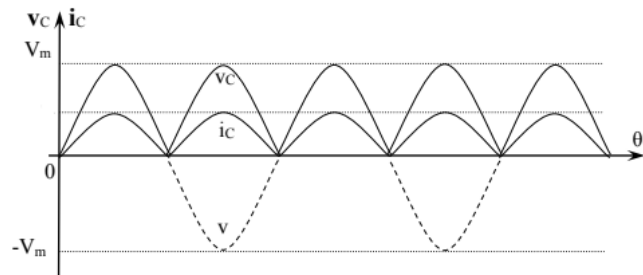


Redresseur :

Comme la source est alternatif monophasée, il nous faut un redresseur avec un pont double alternace pour avoir une tension continue



La tension de sortie de redresseur :



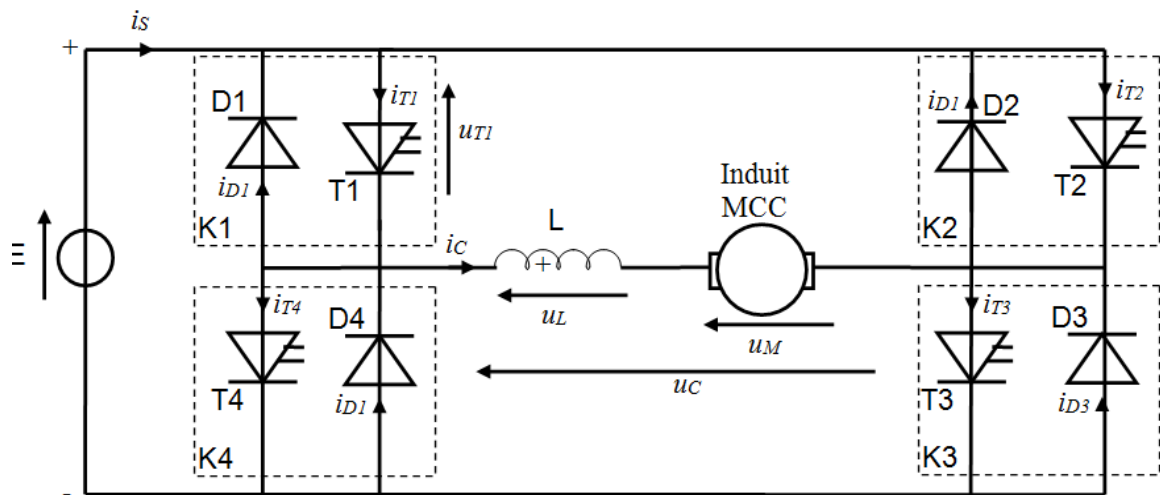
Hacheur réversible 4Q :

a) Définition :

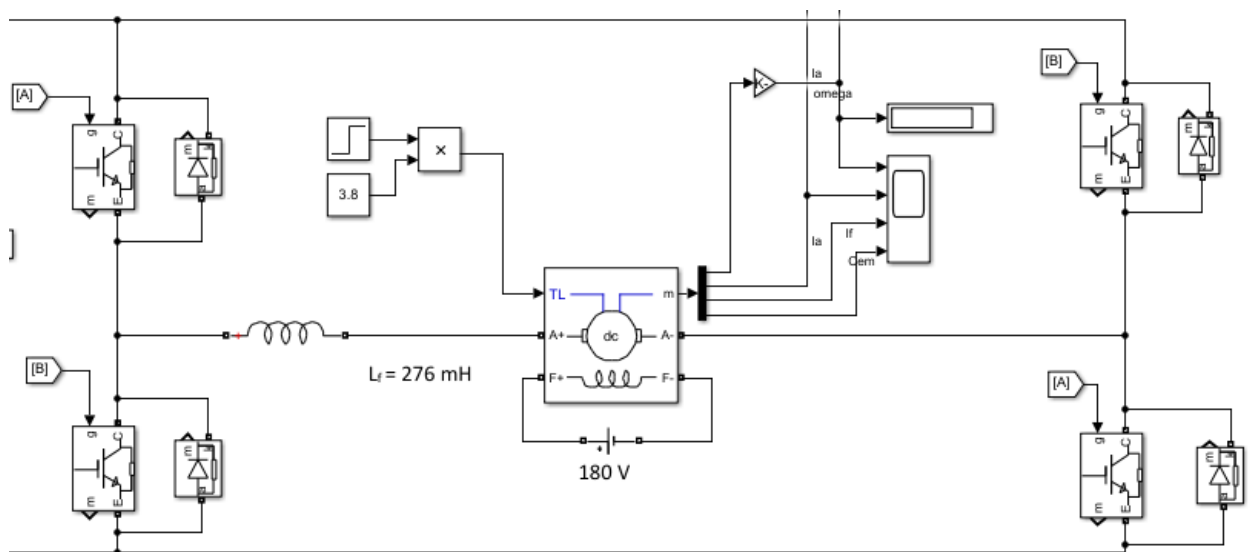
Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu. Ils permettent, à partir d'une tension continue fixe, d'obtenir une tension continue de valeur différente. Son symbole est :

Dans notre cas nous allons utilisés un hacheur réversible en 4 quadrants à IGBT

le schéma est :



Dans simulink :



Le montage se compose d'une source de tension continue E réversible en courant, de l'induit d'une machine à courant continu (MCC) accompagné de son inductance de lissage L, et de quatre interrupteurs électroniques K1, K2, K3, K4. Ces interrupteurs sont commandés pour s'ouvrir et se fermer, et sont bidirectionnels en courant.

La machine à courant continu peut fonctionner soit en moteur, où l'énergie est transférée de la source E vers la MCC, soit en génératrice, où l'énergie est transférée de la MCC vers la source E.

Les interrupteurs sont composés soit d'un transistor, soit d'un thyristor (GTO), accompagné de son circuit de commande, et d'une diode connectée en antiparallèle, assurant ainsi la possibilité du retour du courant.

#### b) Le fonctionnement en commande continue :

Pour  $0 \leq t < \alpha T$ , on commande la fermeture de K1 et K3 donc  $U_c = E$  :

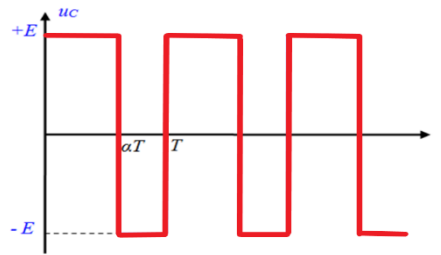
- Si  $i_c > 0$ , le courant circule par T1 et T3.
- Si  $i_c < 0$ , le courant circule par D1 et D3.

Pour  $\alpha T \leq t < T$ , on commande la fermeture de K2 et K4 donc  $U_c = -E$  :

- Si  $i_c > 0$ , le courant circule par D2 et D4.
- Si  $i_c < 0$ , le courant circule par T2 et T4

### c) Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

La forme de la tension de sortie est:



On calcule la valeur moyenne de la tension de sortie par la méthode des aires :

$$\langle UC \rangle = A + - A - T$$

Avec  $A+ = E.\alpha T$  et  $A- = E.(1-\alpha)T$

Donc  $\langle UC \rangle = E.\alpha T - E.(1-\alpha)T$

$$\langle UC \rangle = (2\alpha - 1).E$$

Cette tension est donc réglable de  $-E$  à  $+E$ .

### d) La fonction de transfert du hacheur :

$$\frac{U_{ch}}{U_{cm}} = \frac{G}{1 + sT_c}$$

$G$  : Le gain du hacheur.

$T_c$  : le retard causé par le GI. Avec  $T_c = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$  on obtient quand  $f = 5\text{KHz}$   $T_c = 0.0001\text{ s}$

Sachant que :  $U_{ch} = (2\alpha - 1) U_{smoy}$ ,

Donc  $\frac{U_{cm}}{U_h} = \frac{U_{ch}}{U_{smoy}}$  ce qui donne :  $U_{ch} = \frac{U_{smoy}}{U_h} U_{cm} = G U_{cm}$

D'où :  $G = \frac{U_{smoy}}{U_h}$

## Commande de MCC :

### a) L'équation électrique :

$$U_d = R_a I_a + L_f \frac{dI_a}{dt} + L_a \frac{dI_a}{dt} + E$$

avec  $E = h\Omega$

$$U_d = R_a I_a + L_\mu \frac{dI_a}{dt} + h\Omega$$

avec  $L_\mu = L_f + L_a$

$$U_d = R_a (1 + sT_e) I_a + h\Omega \dots\dots\dots (1)$$

Avec  $T_e = \frac{L_\mu}{R_a}$  la constante de temps électrique

On obtient  $T_e = 0.1227\text{ s}$

$T_c \ll T_e$  Donc  $T_c$  négligeable

b) Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_r \Omega - C_r \dots\dots\dots (2)$$

Donc  $(J s + f_r) \Omega = h I_a - C_r$

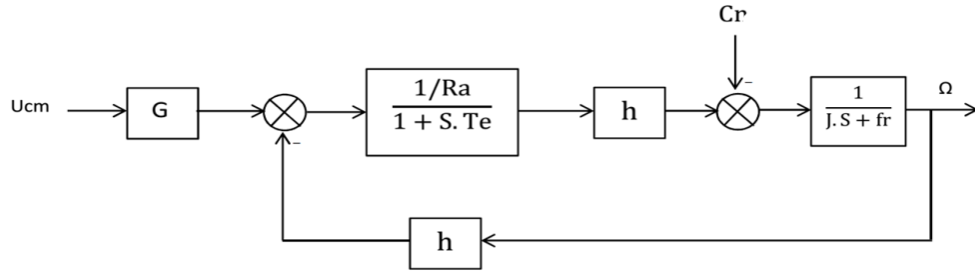
De (1) et (2) donc on finit par obtenir les équations suivantes :

$$U_d = G U_{cm} = R_a (1 + s T_e) I_a + h \Omega \quad \text{avec} \quad G = \frac{U_{cm}}{U_h}$$

$$G U_{cm} - h \Omega = R_a (1 + s T_e) I_a \dots\dots\dots (3)$$

$$(J s + f_r) \Omega = h I_a - C_r \dots\dots\dots (4)$$

c) Schéma fonctionnel en BO :



$$C_r = K \Omega \quad \text{Donc} \quad \Omega = \frac{h I_a}{(J s + f_r + K)}$$

On remplace  $\Omega$  dans l'équation (3)

On obtient la fonction de transfert du courant :

$$I_a = \frac{G(J s + f_r + K)}{h^2 + R_a(J s + f_r + K)(1 + s T_e)} U_{cm}$$

$$I_a = \frac{\frac{G(k + f_r)}{h^2} \left( \frac{J s}{k + f_r} + 1 \right)}{1 + R_a \frac{(k + f_r)}{h^2} \left( \frac{J s}{k + f_r} + 1 \right) (1 + s T_e)} U_{cm}$$

$$I_a = \frac{\frac{G(k + f_r)}{h^2} (\tau_m s + 1)}{1 + \delta (\tau_m s + 1) (1 + s T_e)} U_{cm}$$

Tel que  $\tau = R_a \frac{(k + f_r)}{h^2} = 0.1052 \text{ s}$

et  $\tau_m$  constante de temps mécanique  $\tau_m = \frac{J}{k + f_r} = 0.511 \text{ s}$

$$1 + \tau (\tau_m s + 1) (1 + s T_e) = 1 + \tau (\tau_m s + s^2 \tau_m T_e + 1 + s T_e)$$

$$= (1 + \tau) \left( \frac{\tau_m + T_e}{(1 + \tau)} s + \frac{\tau_m T_e}{(1 + \tau)} s^2 + 1 \right)$$

$$= (1 + \tau) (Y (\tau_m + T_e) s + Y s^2 \tau_m T_e + 1) \quad \text{avec} \quad Y = \frac{\tau}{(1 + \tau)} = 0.09518$$

$$= (1 + \tau) (1 + T_e s) (1 + T_m s)$$

Tel que  $T_e = \tau_e = 0.1227 \text{ s}$

et

$$T_m = Y \tau_m = 0.0486 \text{ s}$$

donc

$$I_a = \frac{\frac{G(k + f_r)}{h^2} (\tau_m s + 1)}{(1 + \tau) (1 + T_e s) (1 + T_m s)} U_{cm}$$

Avec  $I_a(s) = F_{io}(s) U_{cm} + F_{co}(s) C_r$



$$F_{io}(s) = \frac{\frac{G(k+f_r)}{h^2}(\tau_m s + 1)}{(1+\tau)(1+T_e s)(1+T_m s)} \quad \text{La fonction de transfert du courant par rapport au } U_{cm}$$

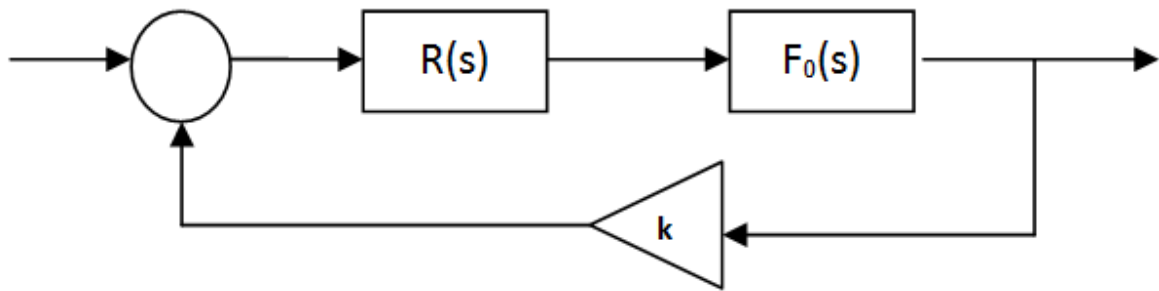
$$F_{\Omega o}(s) = \frac{GK/h}{(1+\tau)(1+T_e s)(1+T_m s)} \quad \text{La fonction de transfert de vitesse par rapport au } U_{cm} \mu$$

## Régulation:

Le circuit de réglage du courant d'induit est un réglage interne. Le régulateur doit être ajusté pour garantir un bon comportement dynamique par rapport à la valeur de référence. Notre système, équipé de l'organe de commande, présente une constante de temps dominante et une petite constante de temps. Dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser un régulateur de type PI. Le choix des constantes de temps proportionnelle et intégrale de ce régulateur est essentiel pour assurer la stabilité du système. La génératrice tachymétrique est connectée à un capteur ayant les caractéristiques suivantes : 10V pour 100 rad/s, et elle est elle-même reliée à un régulateur PI. La fonction de transfert du régulateur PI est la suivante :

$$\frac{U_{cm}}{\varepsilon} = \frac{1 + sT_n}{T_i}$$

La structure de réglage est la suivante :



La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$\frac{\Omega}{V_{ref}} = \frac{1 + sT_n}{T_i} \frac{\frac{Gk}{h}}{(1+\tau)(1+sT_e)(1+sT_m)}$$

Comme la constante mécanique  $T_m$  est une constante de temps dominante, on la compense en posant  $T_n = T_m = 0.0486s$ .

Ce qui donne à la fin la fonction de transfert suivante :

$$G(s) = \frac{\Omega}{V_{ref}} = \frac{\frac{Gk}{h}}{(1+\tau)sT_i(1+sT_e)}$$

On pose  $T = \frac{(1+\tau)h}{Gk} =$

$$G(s) = \frac{1}{sTT_i(1+sT_e)}$$

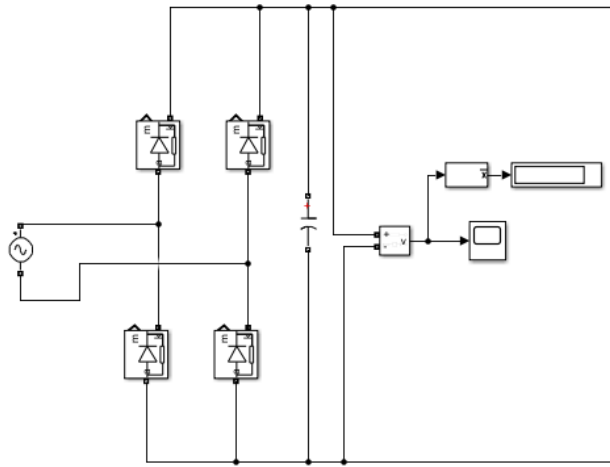
Pour que le système soit stable, nous appliquons le critère d'ajustement optimale ce qui nous donne :  $T_i = \frac{2T_e'}{T}$

## Partie simulation :

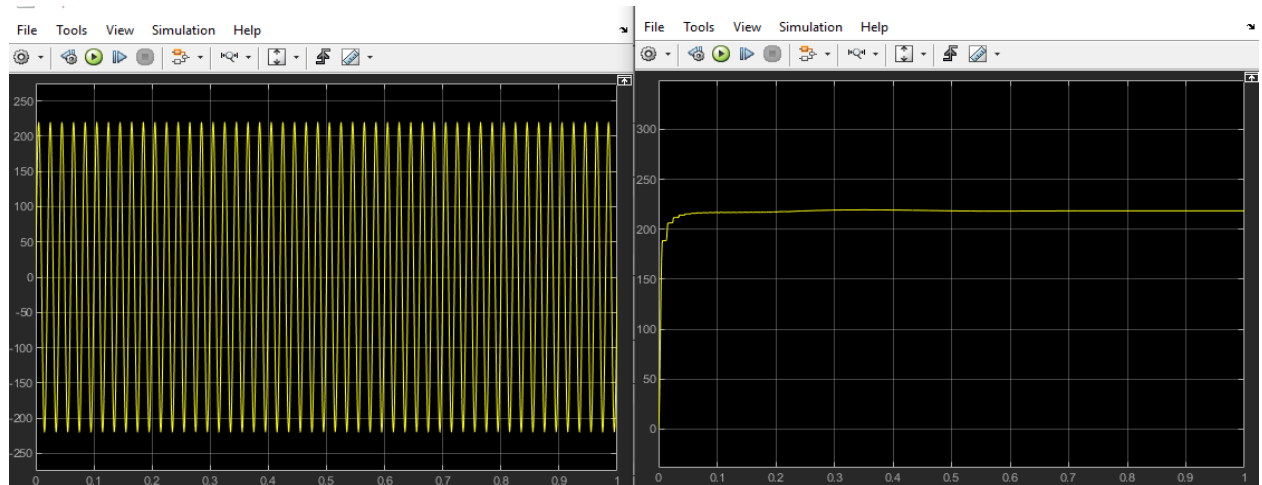
Plaque signalétique et paramètres de la machine à courant continu :

Puissance	: 1,1 kW
Tension d'induit nominale	: 220 V
Courant nominal	: 6 A
Vitesse nominale	: 3000 tr/mn
$k\Phi = h$	: 0,57 Nm/A
Résistance d'induit	: 2,33 $\Omega$
Inductance d'induit	: 10 mH
Moment d'inertie global	: $7,5 \times 10^{-3}$ Nm rd/s <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	: $1,75 \times 10^{-4}$ Nm/rd/s
Inductance de lissage	: 276 mH
Couple de charge	: $1,45 \times 10^{-2}$ Nm/rd/s
Source	: ~monophasé 50 Hz, 220V
Convertisseur	: Hacheur réversible 4Q à IGBT $f=5$ kHz

Le montage Simulink pour le redresseur :



Résultat :



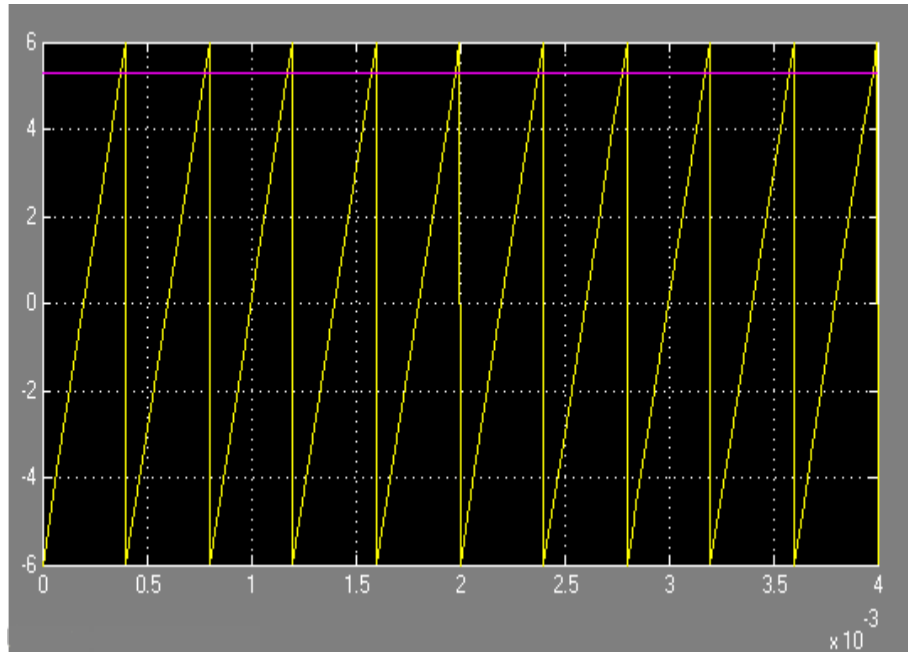
**Les tensions triphasées**

**la tension redressée**

Maintenant il ne faut le signal de commande pour cela on va utiliser les dents de scie :

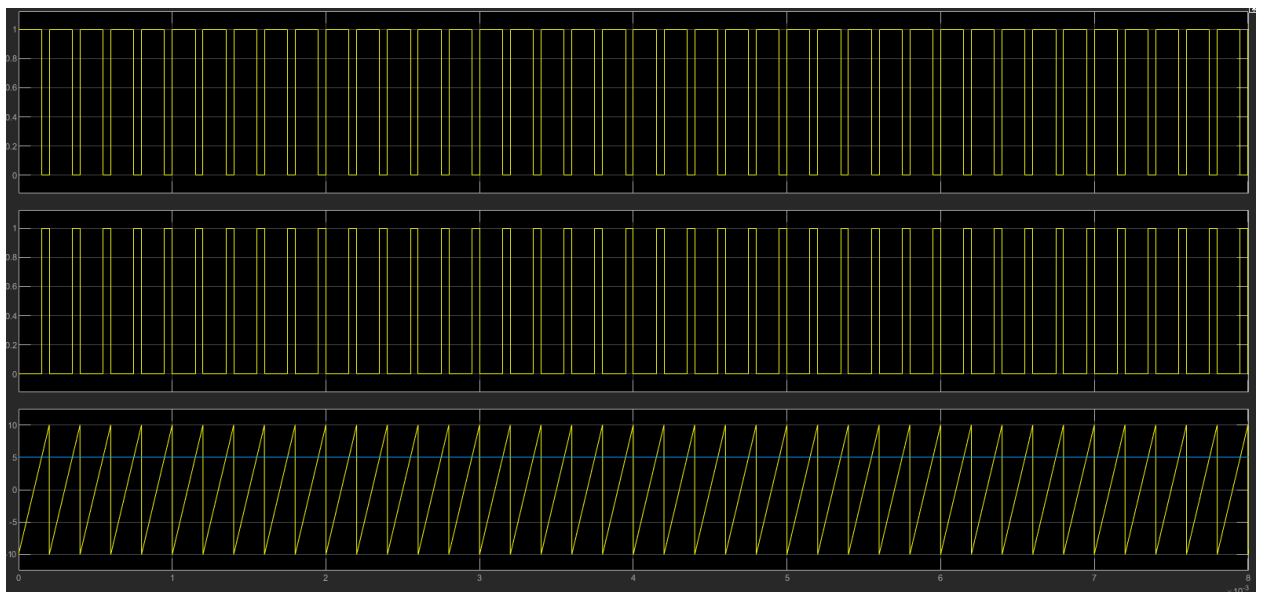
On a utilisé un générateur de signal qui s'appelle « signal builder »

Le schéma Simulink :



Les dents de scie plus le signal de commande Ucm

On a fait tous cela pour avoir la fonction logique qui nous soit 1 de  $[0 \alpha T]$  et -1 de  $[\alpha T T]$  ou bien l'opposé tout dépend de la situation qu'on a.

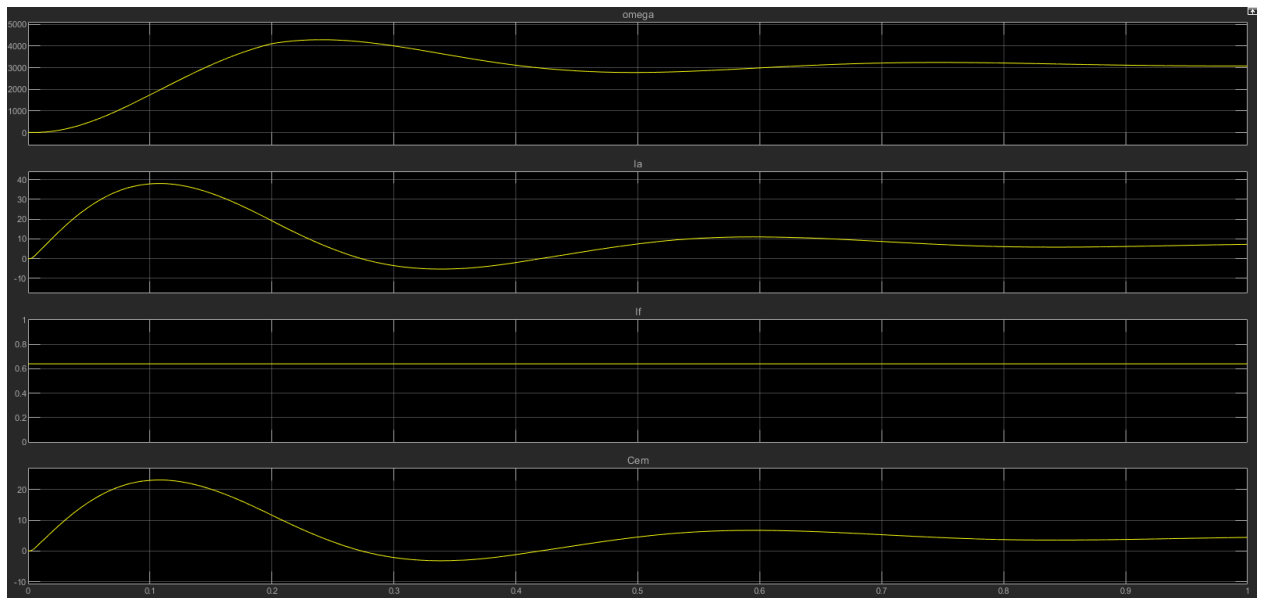


La fonction logique pour Ucm =5.3

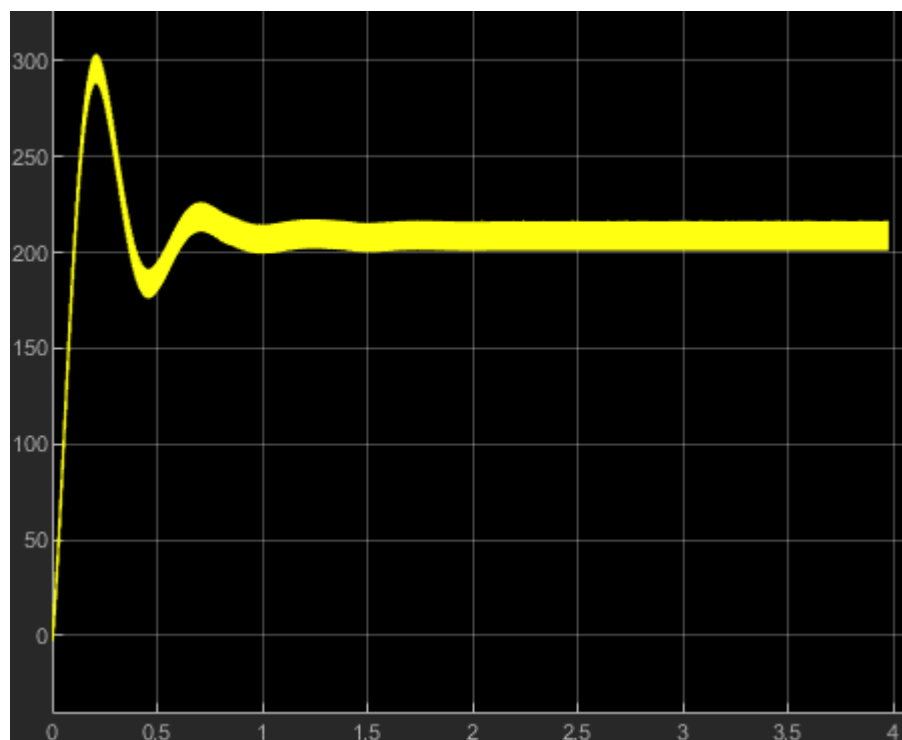
La fonction logique pour Ucm =1

Multiplions cette tension avec la tension à la sortie du redresseur on va avoir la tension à la sortie du hacheur quand  $U_{cm} = 7$  donc au borne de la machine.

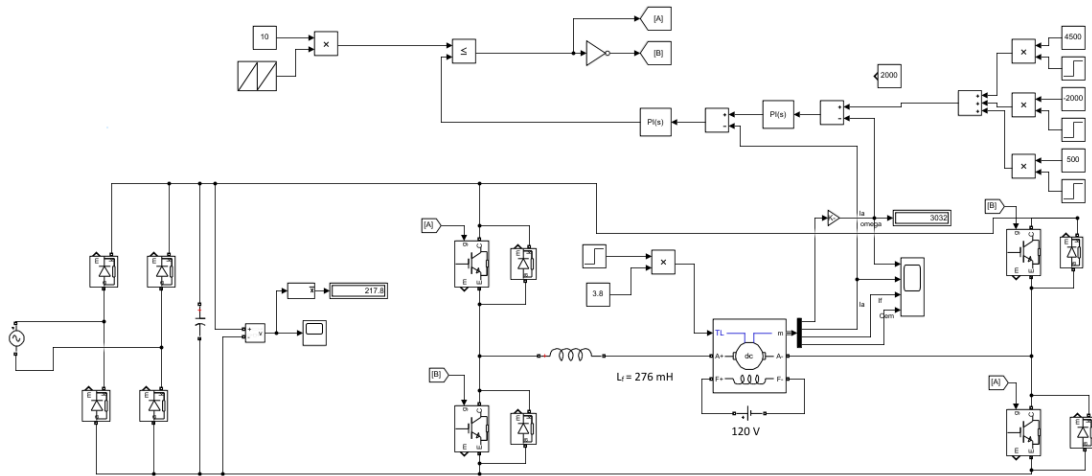




La vitesse en (rad/s), le courant d'induit, le courant d'inducteur et le couple electromagnetique pour  $U_{cm}=7$   
 La tension au borne de machine :



Simulation en boucle fermé :

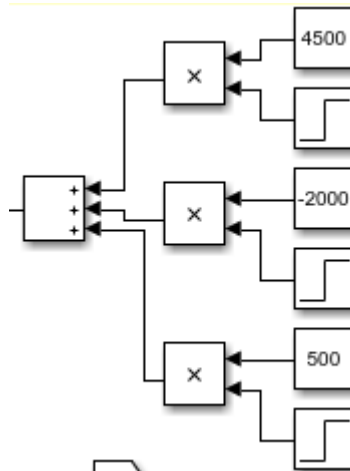


$$T_n = T_m = 0.0486 \text{ s.}$$

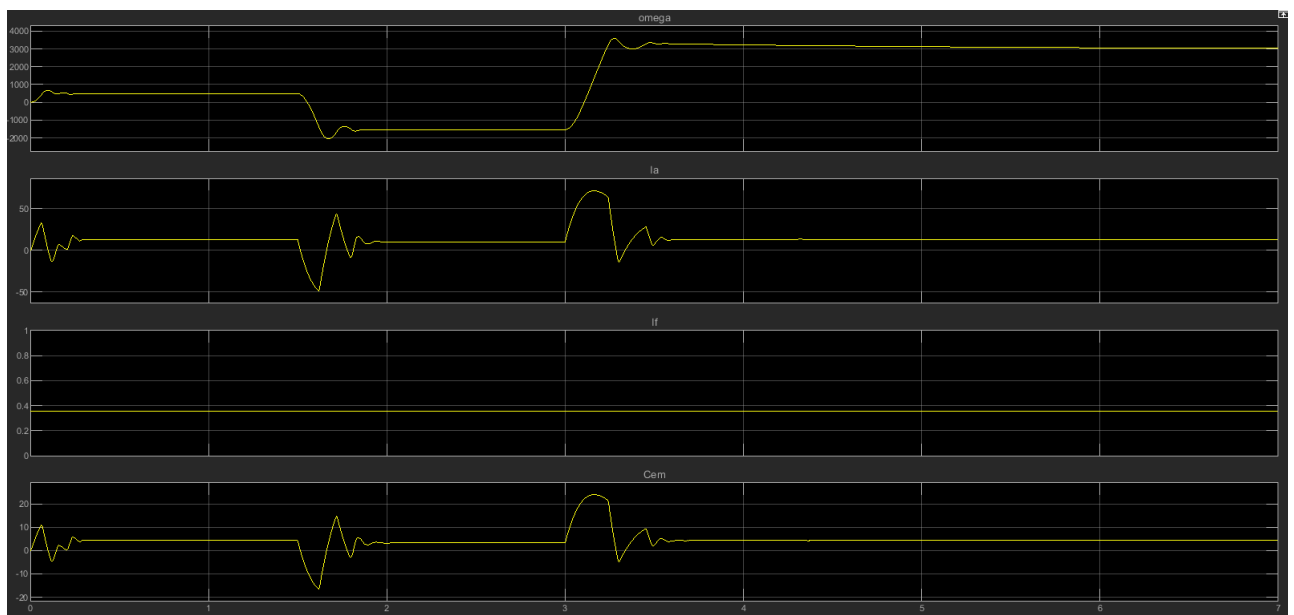
$$Ti = \frac{2T_e'}{T} = 0.1242$$

On fait trois consignes :

- 1-  $\Omega = 500$  tr/min de 0 à 1.5 s
- 2-  $\Omega = -1500$  tr/min de 1.5 à 3 s
- 3-  $\Omega = 3000$  tr/min a partir de 3s

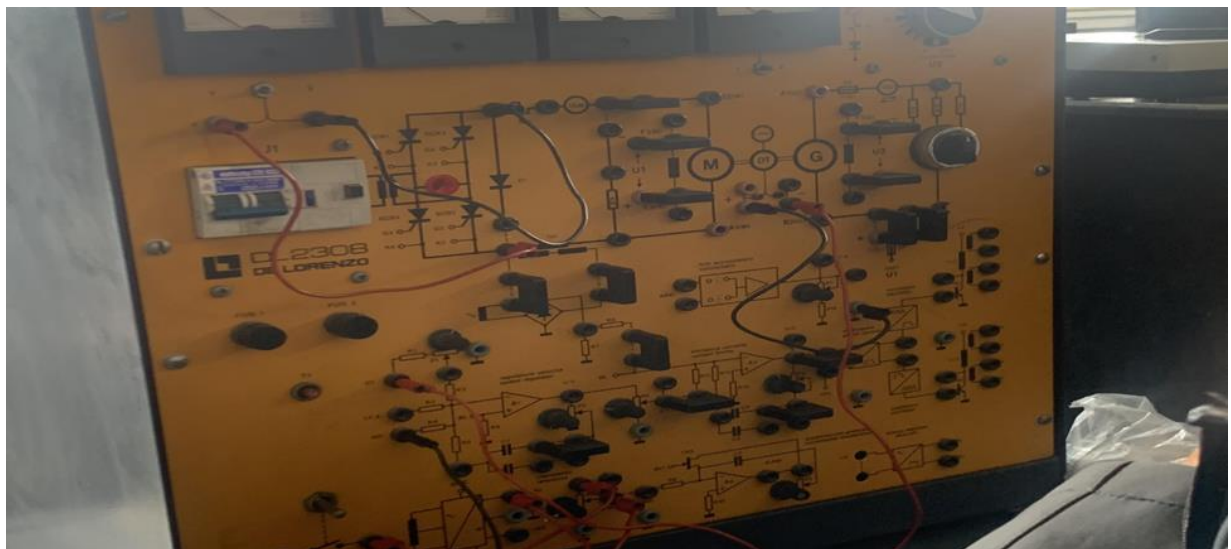


Les résultats :



Partie pratique:

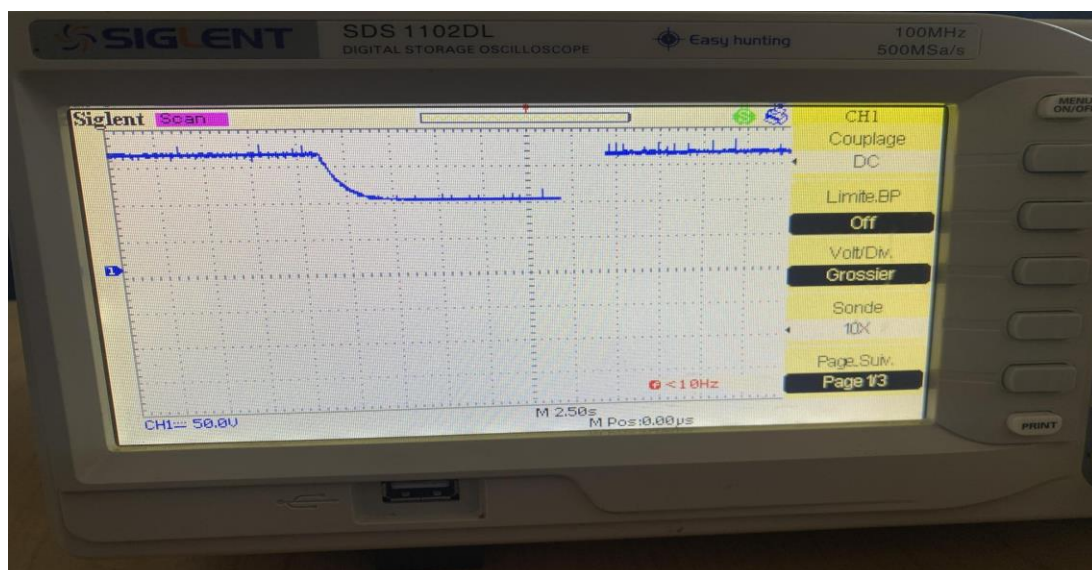
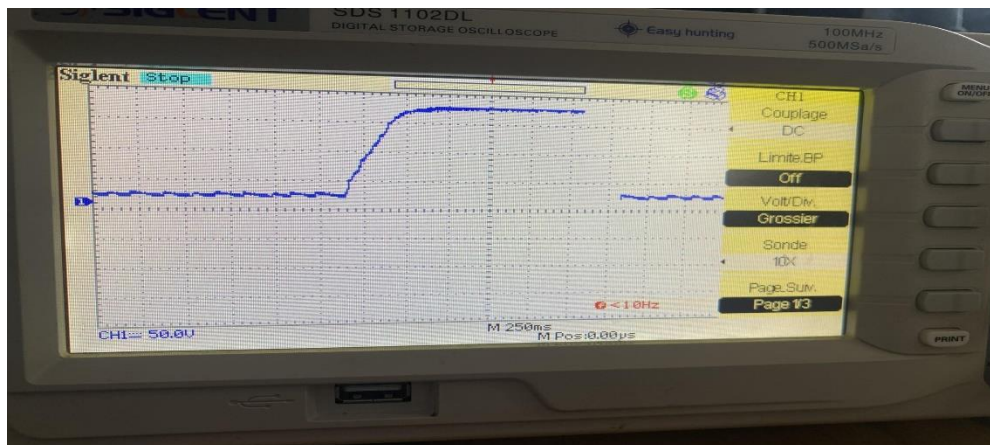
Montage pratique:



Montage pratique

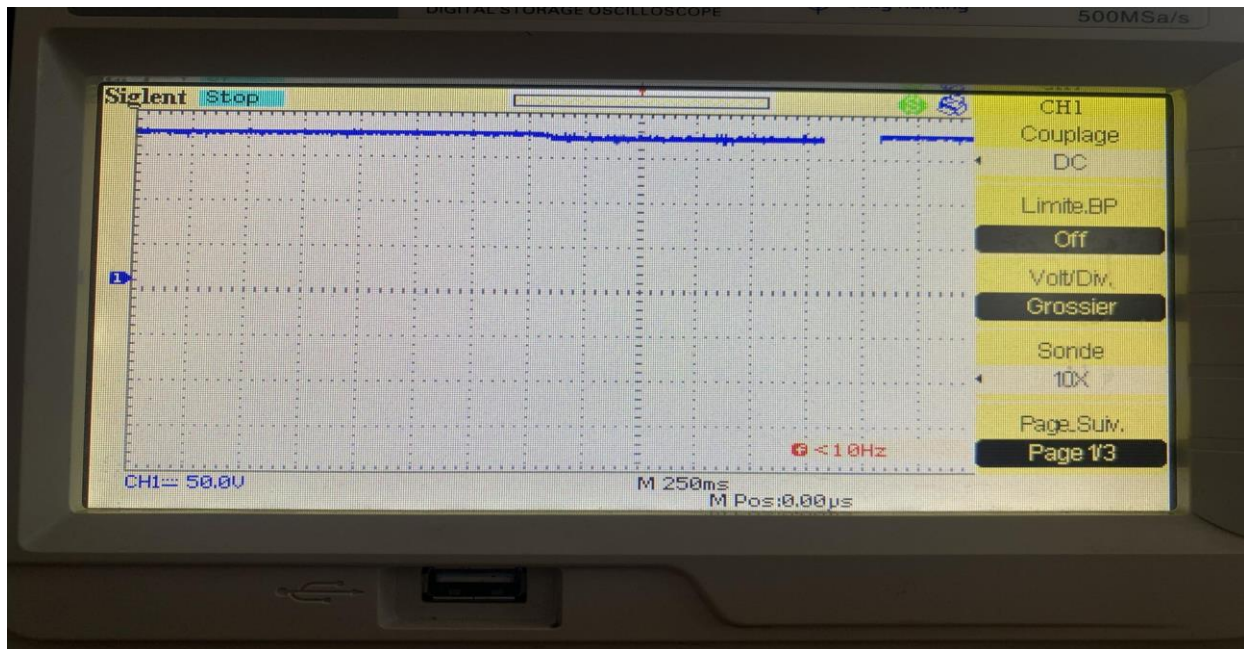
Résultats pratiques:

L'étude expérimentale a permis de relever les deux caractéristiques suivantes.





vitesse en boucle ouverte



la vitesse en boucle fermée

Lors de notre étude en boucle ouverte, nous avons remarqué que la vitesse du système fluctuait en fonction des ajustements du couple. Cependant, en utilisant une boucle fermée, qui régule à la fois le couple et la rétroaction de courant, nous avons constaté que la vitesse demeurerait constante malgré les variations du couple. Cela prouve l'efficacité de la boucle fermée pour assurer une vitesse stable, quelles que soient les modifications du couple.

## Conclusion :

Le choix d'un moteur à courant continu parmi d'autres options est justifié par son avantage de découplage naturel entre le couple et le flux, grâce à la séparation physique des deux circuits du moteur (l'inducteur et l'induit). Cela signifie que les variations de couple n'ont pas d'impact direct sur le flux magnétique du moteur, assurant ainsi une meilleure stabilité dans certaines applications.

Il est essentiel de noter que, bien que le moteur à courant continu offre des avantages, il présente aussi certains inconvénients. Par exemple, il est généralement plus onéreux que le moteur à courant alternatif et nécessite un entretien plus minutieux en raison du collecteur et des balais qui peuvent s'user avec le temps. Toutefois, ces problèmes peuvent être minimisés avec une maintenance adéquate.

Un aspect intéressant du moteur à courant continu est sa capacité à ajuster facilement sa vitesse de rotation en modifiant la tension de l'induit. Cela permet un contrôle précis de la vitesse du moteur en ajustant la tension d'alimentation. Cette flexibilité de contrôle est particulièrement utile dans de nombreuses applications nécessitant des ajustements fréquents de vitesse ou un contrôle précis.

---

En outre, notre étude sur le hacheur réversible en tension a démontré la possibilité de contrôler ce type de moteur en utilisant la technique de modulation 4Q. Cette méthode permet d'élargir la plage de vitesses du moteur, y compris les vitesses négatives, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la sélection de la plage de vitesses souhaitée, et adaptant ainsi le moteur à différents scénarios d'application.

En conclusion, la simulation de la commande de vitesse de la machine à courant continu à excitation séparée constante, alimentée par un hacheur réversible en tension, réalisée avec Matlab, a été un succès. Cette simulation nous a permis de comprendre et d'analyser le comportement de la machine dans divers scénarios de commande de vitesse.

Grâce à cette simulation, nous avons pu observer l'impact de la variation de la tension d'alimentation sur la vitesse de rotation de la machine. Nous avons constaté que l'augmentation de la tension d'alimentation entraînait une augmentation de la vitesse de rotation, tandis que la diminution de la tension d'alimentation la réduisait.

L'utilisation de Matlab pour cette simulation nous a permis de profiter des fonctionnalités avancées de ce logiciel, ce qui nous a permis d'obtenir des résultats précis et de réaliser une étude approfondie de la commande de vitesse de la machine.

En conclusion, cette simulation a été une étape cruciale dans notre compréhension et notre maîtrise de la commande de vitesse des machines à courant continu. Elle nous a permis d'acquérir des connaissances pratiques précieuses et de développer nos compétences en matière de simulation et de contrôle des systèmes électriques.

---