

# BE Systèmes embarqués critiques

## Commande d'un système de conversion électromécanique

### Séance 1 (fichier be1.slx)

## Introduction

### 1) La machine à courant continu

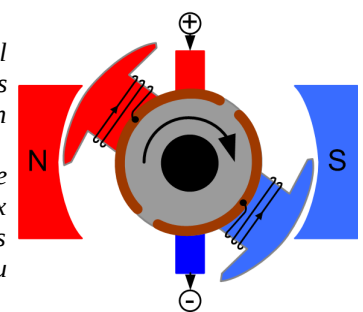
On s'intéresse dans ce BE à la modélisation via Simulink d'un système de conversion électromagnétique et à définir une loi de commande continue pour imposer le courant dans la machine afin de contrôler le couple électromagnétique.

"Une **machine électrique à courant continu** est constituée :

- d'un stator qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanent. Il est aussi appelé « inducteur » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine.

- D'un rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité de chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément « induit » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine."

[Wikipédia, Machine à courant continu](#)



Machine à courant continu

"Le **hacheur** ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence élevée."

[Wikipédia, Hacheur](#)

Basiquement ici, nous considérerons le moteur ainsi :

- Un rotor alimenté en courant avec une tension  $V$  placé dans un champ magnétique  $B$  constant qui induit la rotation.
- La tension  $V$  s'inverse périodiquement grâce à un hacheur placé avant le moteur.
- Il existe des frottements visqueux des parties tournante (constant et permanent) et un frottement représentant la charge (apparaît lors de la rotation).

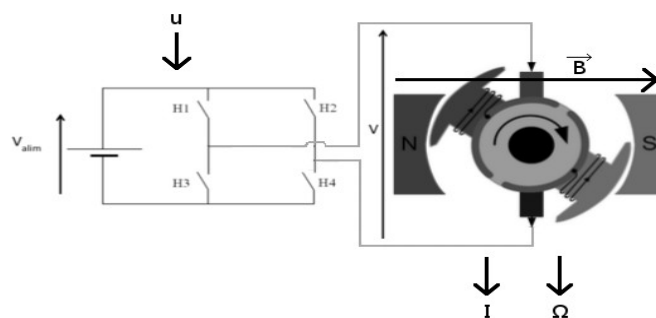


Schéma du système

## 2) Equations de modélisation du moteur à courant continu

### 2.1 Equations de la partie électrique de la machine

$$V(t) = R.I(t) + L \cdot \frac{dI(t)}{dt} + E(t) \quad (Eq. Courant)$$

Avec : -  $E(t) = K_{fem} \cdot \Omega(t)$  Force électromotrice (d'après la loi de Lenz)

- $V$  tension d'alimentation de l'induit en Volts
- $I$  courant d'alimentation de l'induit en Ampères
- $\Omega$  Vitesse de rotation du rotor en  $\text{rad.s}^{-1}$

### 2.2 Equations de la partie mécanique de la machine

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C(t) - f_0 \cdot \Omega(t) - Cr(t) \quad (Eq. Méca)$$

Avec : -  $C(t) = K_m \cdot I(t)$  Couple moteur (d'après la force de Laplace)

- $Cr(t) = f_1 \cdot \Omega(t)$  Couple résistant

### 2.3 Paramètres de la machine

$L = 2,3 \cdot 10^{-3} H$  inductance de l'induit (ici le rotor)

$R = 1,2 \text{ Ohm}$  résistance de l'induit (ici le rotor)

$K_m = 60 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \cdot A^{-1}$  Constante de couple

$K_{fem} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ V.s.rad}^{-1}$  Constante de vitesse

$J = 9,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$  Moment d'inertie

$f_0 = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2 \cdot s^{-1}$  Coefficient de frottement visqueux des parties tournantes

$f_1 = 0 \text{ à } 3 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2 \cdot s^{-1}$  Coefficient de frottement représentant la charge

## 3) Objectifs :

- Représenter sous Simulink un système physique et sa commande
- Valider le modèle de la partie physique du système de conversion. (Moteur + Hacheur)
- Comprendre les bases de la MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion)

## I Mise en place du modèle du moteur à Courant Continu

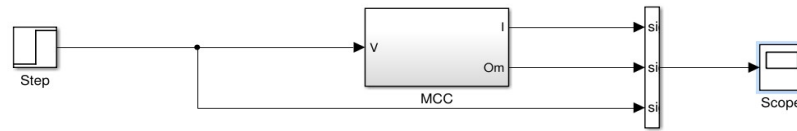
Pour commencer nous allons modéliser le moteur à courant continu sous la forme d'un schéma Simulink. Pour cela, commençons par effectuer une transformée de Laplace des Equations de modélisations du moteur :

$$(Eq. Courant) \Rightarrow V = R.I + p.L.I + E \quad \text{Avec : } E = K_{fem} \cdot \Omega$$

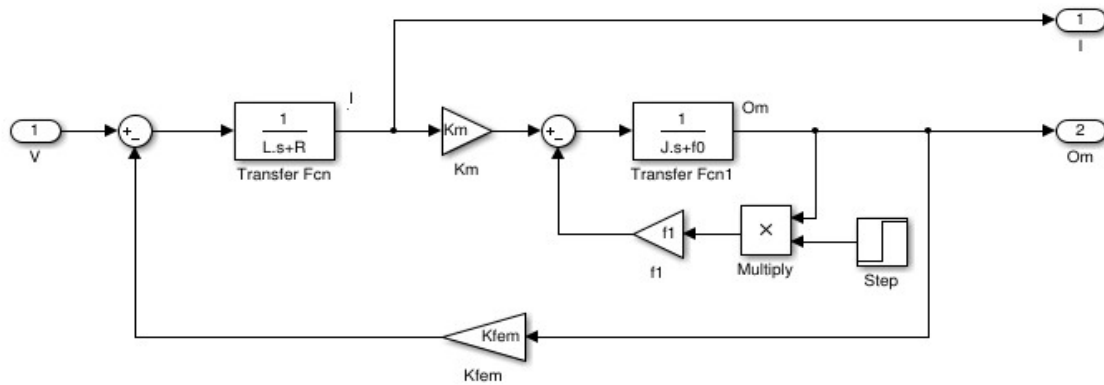
$$(Eq. Méca) \Rightarrow p.J.\Omega = C - f_0 \cdot \Omega - Cr \quad \text{Avec : - } C = K_m.I$$
$$\text{- } Cr = f_1 \cdot \Omega$$

Pour ajouter une certaine réalité physique au modèle, le frottement représentant la charge (de coefficient  $f_1$ ) n'apparaîtra qu'au bout d'un certain temps, on va donc la faire apparaître avec un certain retard et pour cela la multiplier à une rampe d'amplitude 1 démarrant au bout de 1.2 secondes.

Nous avons choisi pour simplifier la suite de placer tout le schéma du moteur dans un sous-système qui prend en entrée  $V$  et renvoie  $I$  et  $\Omega$ . On obtient alors les schéma Simulink suivant :

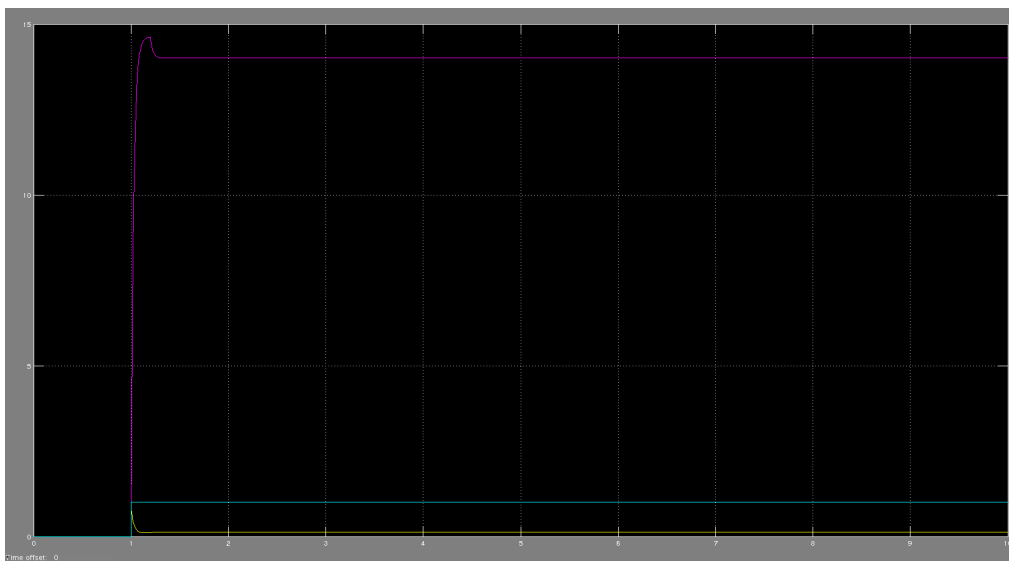


Modèle principal



Sous-système : Moteur à Courant Continu

Pour tester, visualisons la sortie de ce modèle avec en entrée une rampe d'amplitude 1 démarrant au bout d'une seconde :



Visualisation de tension, intensité et vitesse de rotation

On observe sur cette visualisation l'arrivée à un état de stabilité du moteur et de l'intensité et on peut également remarquer la diminution de la vitesse de rotation lorsque le frottement représentant la charge arrive.

## II Mise en place du modèle du hacheur

Le hacheur va permettre de faire alterner la tension d'alimentation du moteur. Il comporte 4 interrupteur qui feront passer la tension dans un sens ou un autre selon la valeur de la commande en entrée.

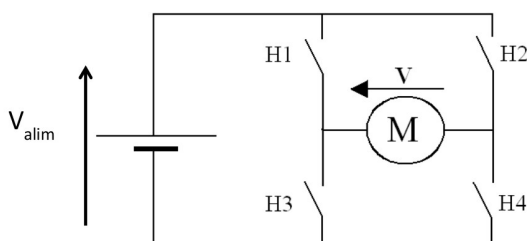


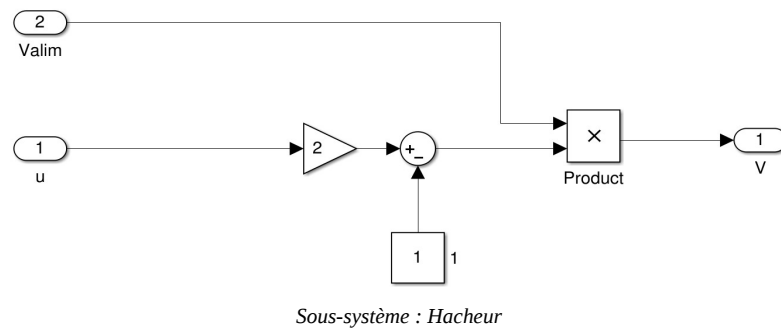
Schéma du hacheur

Valim est la tension d'alimentation du hacheur.

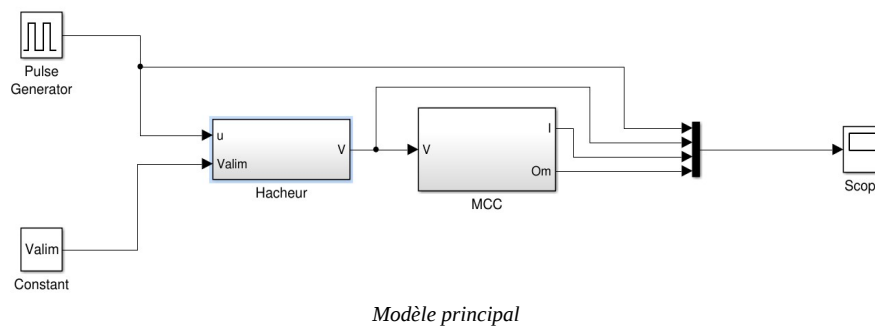
Soit  $u$  la commande binaire sur les interrupteurs du hacheur :

- Si  $u = 1$  alors les interrupteurs H1 et H4 sont fermés, H2 et H3 ouverts.  $V = V_{alim}$
- Si  $u = 0$  alors les interrupteurs H2 et H3 sont fermés, H1 et H4 ouverts.  $V = -V_{alim}$

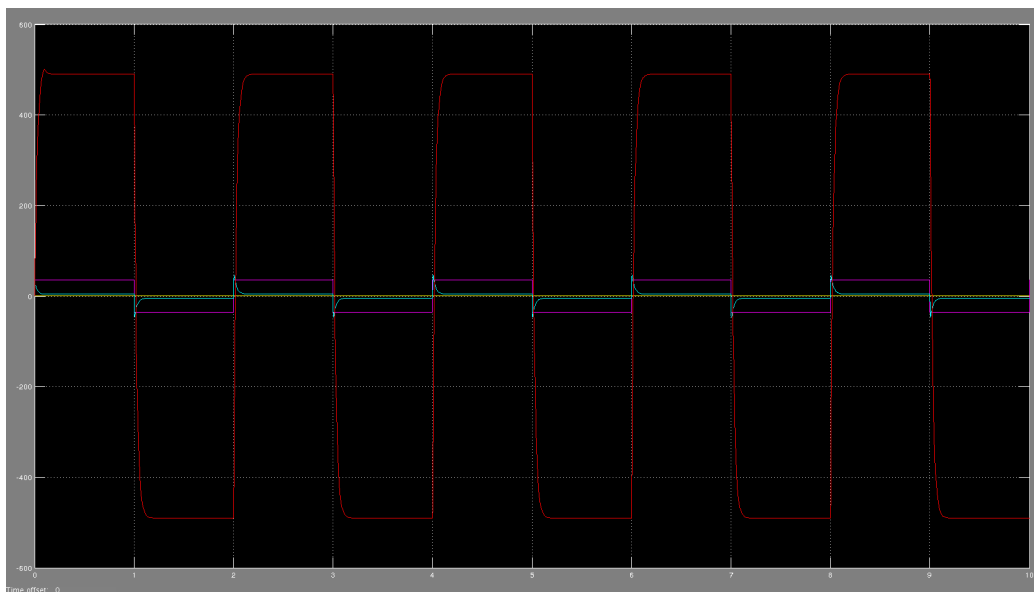
Comme précédemment nous avons créé le hacheur en tant que sous-système pour une intégration simple.  
Modélisation du hacheur :



Plaçons le hacheur en entrée du moteur avec comme commande un signal carré d'amplitude 1 :



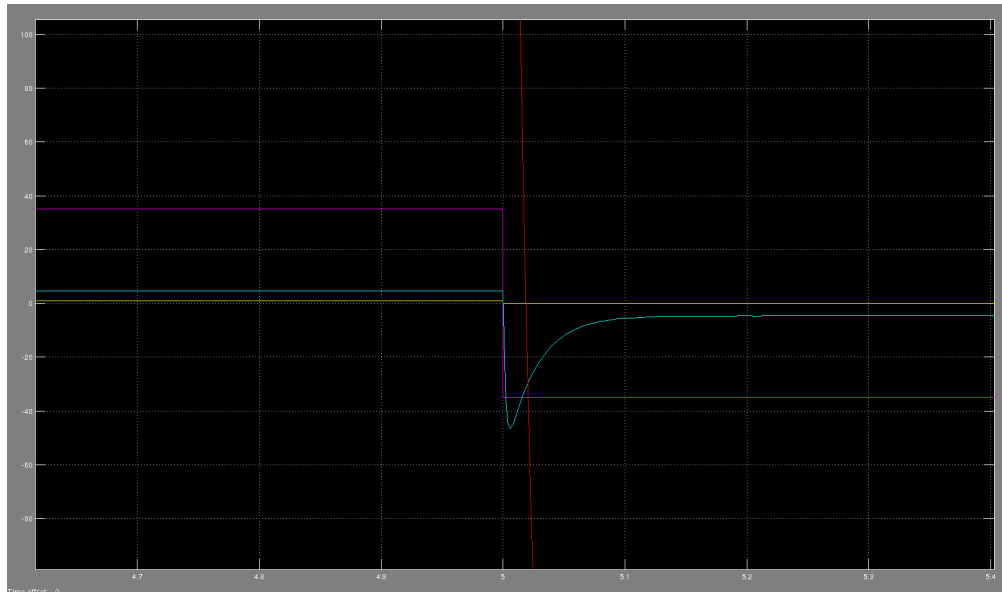
Pour tester, visualisons la sortie du hacheur et son impact sur le système avec en commande un signal carré d'amplitude 1 :



*Visualisation de la commande, tension, intensité et vitesse de rotation*

- Légende :
- Rouge : vitesse de rotation  $\Omega$
  - Rose : tension  $V$
  - Jaune : commande  $u$
  - Bleu : intensité  $I$

Après zoom sur le centre du graphe (même légende) :



Visualisation de la commande, tension, intensité et vitesse de rotation

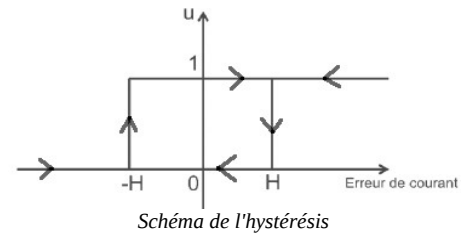
On observe bien l'inversion de la tension (ainsi que des autres grandeurs puisque liées) lors du passage de 1 à 0 de la commande.

### III Validation de modèle par boucle de courant par Hystérésis

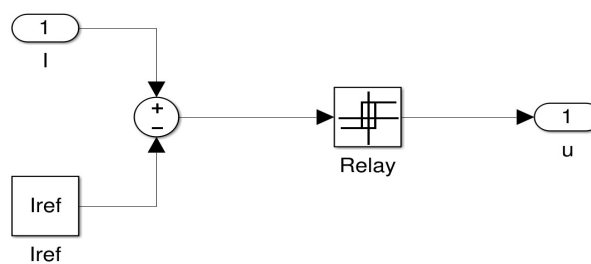
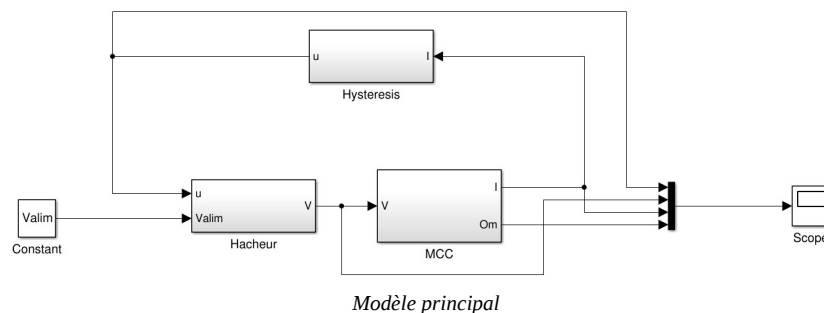
Régler le courant dans le moteur revient à contrôler le couple moteur. Plutôt que de considérer que l'on a une source de courant à la valeur souhaitée très précise (ce qui est en pratique compliqué et coûteux), on va plutôt réguler ce courant par hystérésis. Ainsi, on comparera le courant mesuré à la consigne de courant pour agir sur la commande en conséquence :

- si le courant est au dessus de la consigne plus une borne  $H$ , on passe la commande  $u$  à 0.
- si au contraire il est en dessous de la consigne plus une borne  $-H$ , la commande est passée à 1.

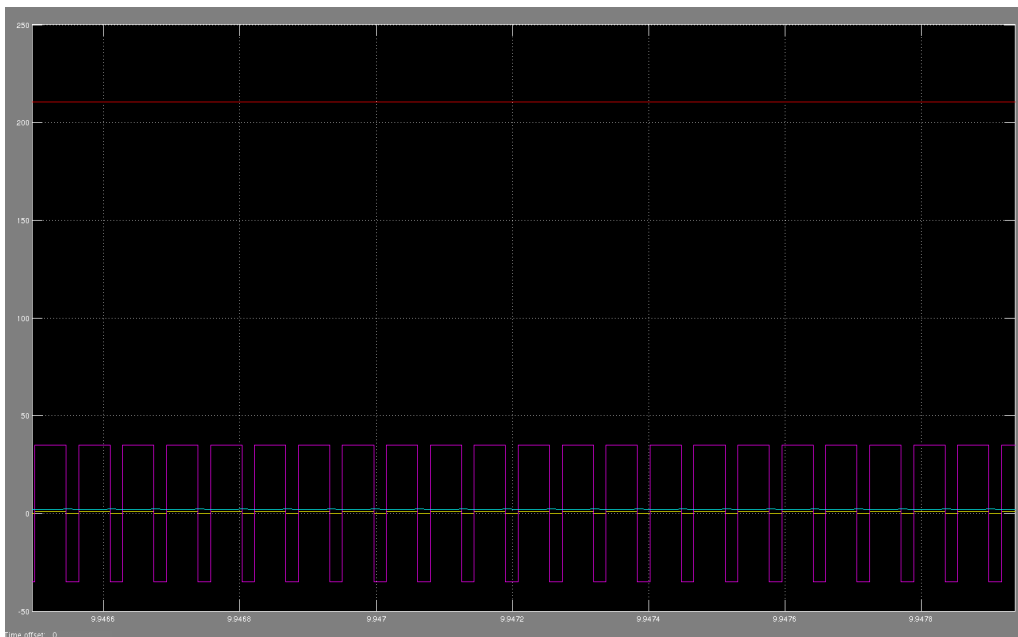
On utilisera  $H \pm 0,2$  A comme bornes pour l'hystérésis.



Nous avons modéliser la boucle de courant avec régulation par hystérésis :

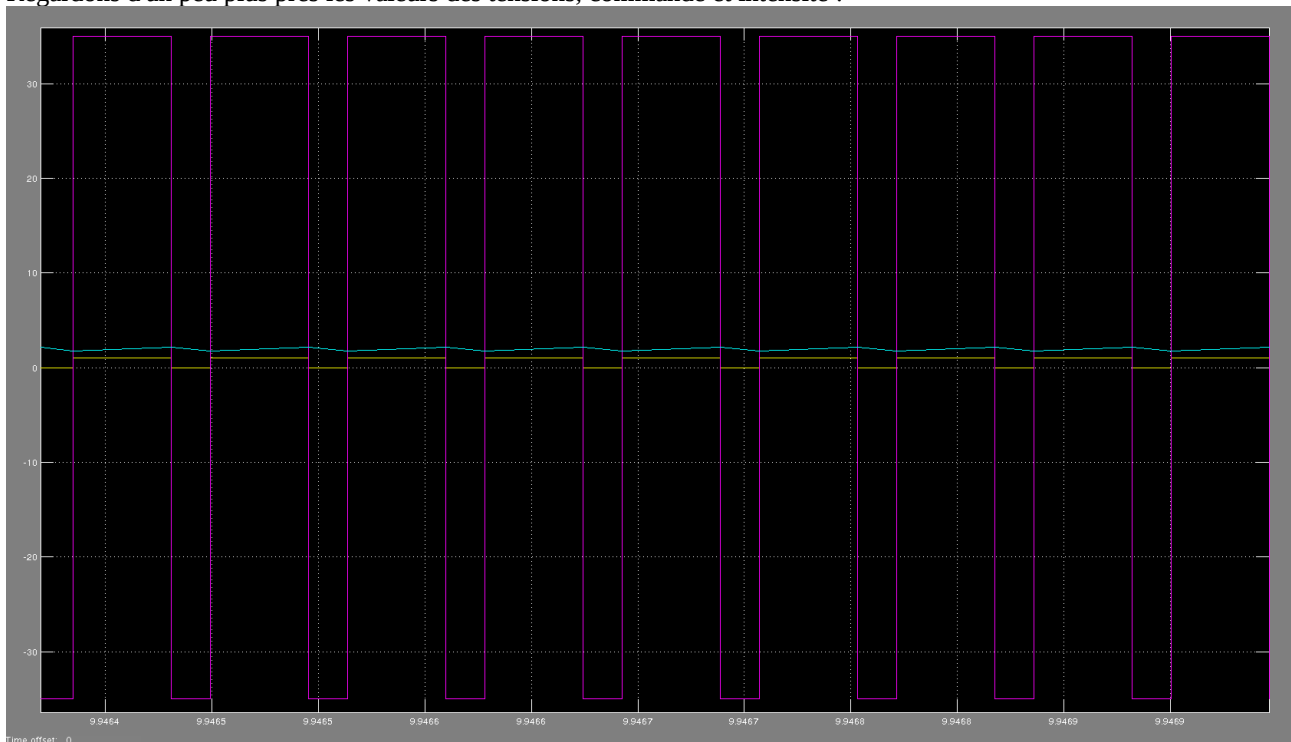


Visualisons l'évolution des grandeurs de ce système en régime permanent :



- Légende :
- Rouge : vitesse de rotation  $\Omega$
  - Rose : tension  $V$
  - Jaune : commande  $u$
  - Bleu : intensité  $I$

Regardons d'un peu plus près les valeurs des tensions, commande et intensité :

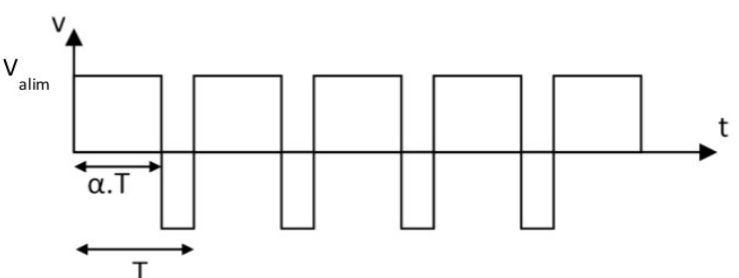


On observe bien une vitesse de rotation stable en régime permanent ainsi qu'une intensité qui oscille autour de la valeur de consigne avec une erreur comprise entre -H et H (la commande s'inverse périodiquement pour le permettre). Le modèle est donc valide et applicable dans la réalité.

## IV Régulation de courant par MLI (Modulation de la largeur d'impulsion)

On va maintenant (à la place de l'hystérésis) commander la tension via la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ . ( $0 \leq \alpha \leq 1$  et  $\alpha = \langle u \rangle$ ) et d'un modulateur générant un signal carré de période T grâce à ce rapport.

On a  $\langle V \rangle = V_{\text{alim}} \cdot (2\alpha - 1)$   
avec  $\langle V \rangle$  tension moyenne

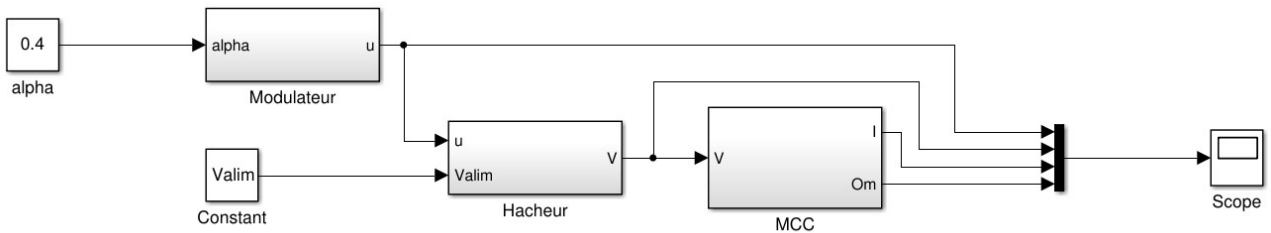


*Schéma tension en sortie du modulateur*

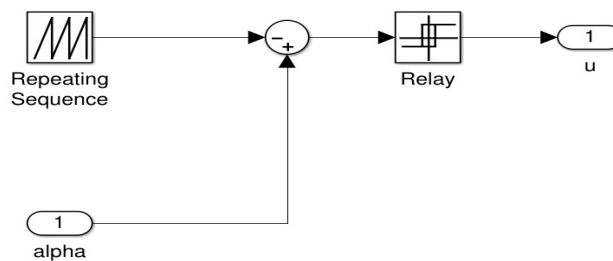
## 1) Mise en place du modulateur

On choisit la fréquence de découpage  $F_d = 4000$  Hz, soit  $250 \mu s$  de période de découpage. La fréquence d'échantillonnage sera égale à la fréquence de découpage.

Modélisons le modulateur, intégré au modèle principal :



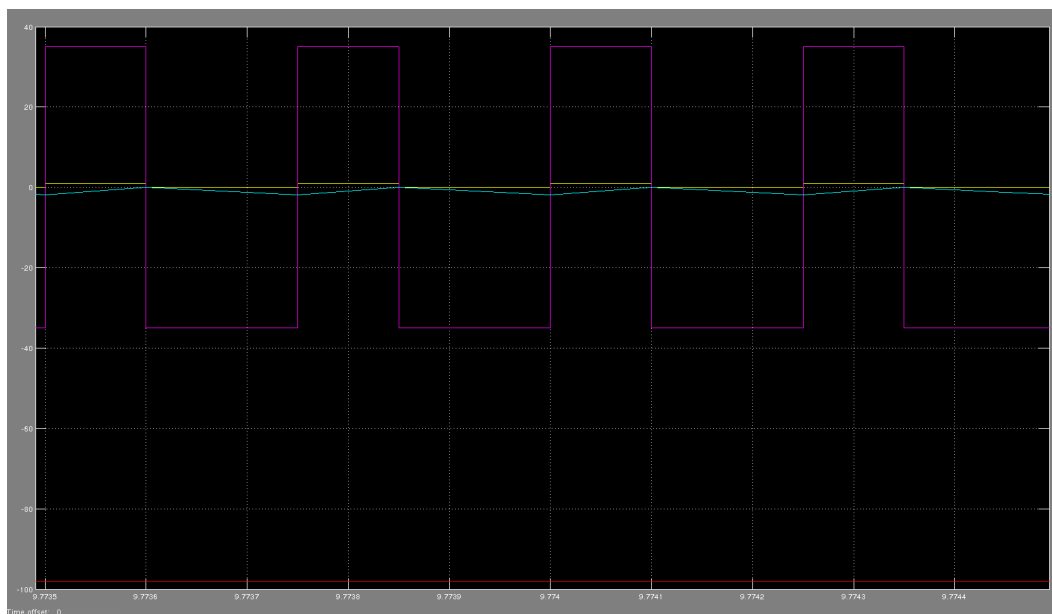
Modèle principal



Sous-système Modulateur

Visualisons l'évolution des grandeurs pour différentes valeurs du rapport cyclique  $\alpha$  :

- Pour  $\alpha = 0.4$ ,



Visualisation de la commande, tension, intensité et vitesse de rotation pour  $\alpha = 0.4$

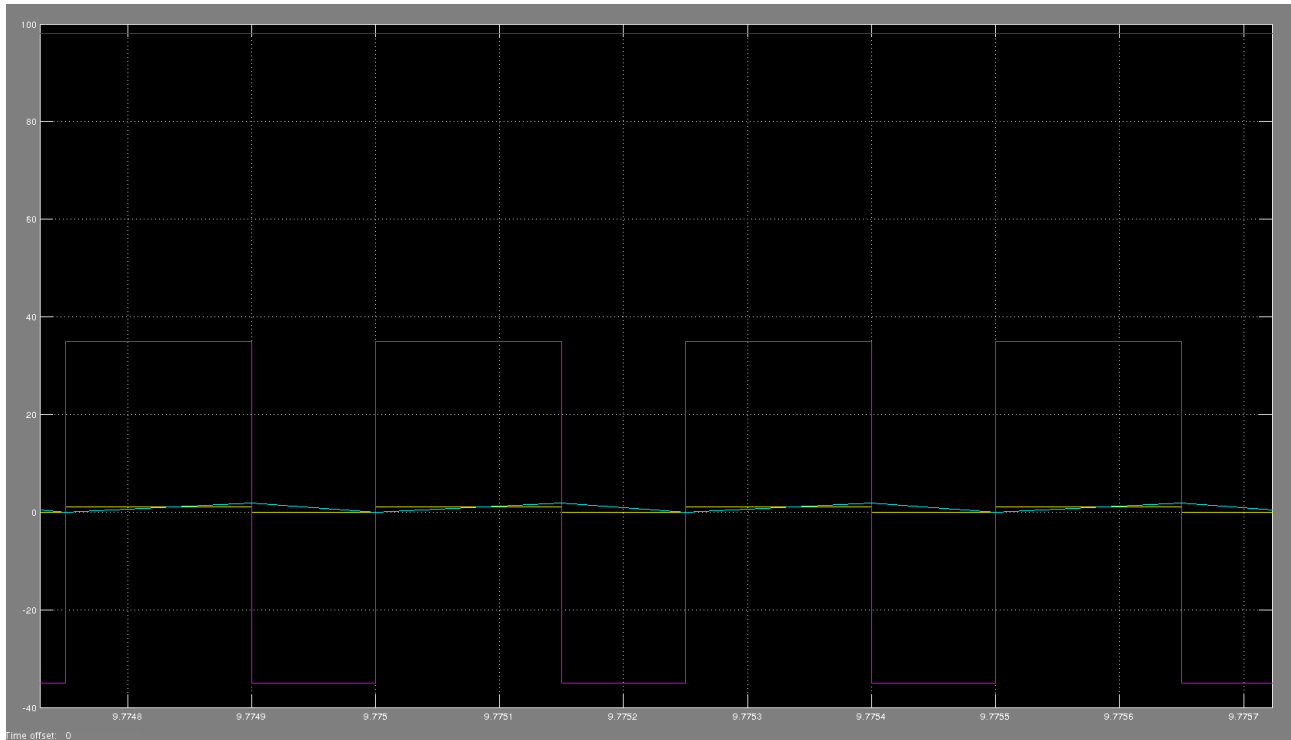
- Légende :
- Rouge : vitesse de rotation  $\Omega$
  - Rose : tension  $V$
  - Jaune : commande  $u$
  - Bleu : intensité  $I$

Vérification de la valeur de  $\alpha$  dans la simulation grâce à la première période visible :

- début à 9s77350
- fin à 9s77375
- inversion à 9s77360

$$\text{Alors : } \frac{\text{Temps à 1}}{\text{Période}} = \frac{9,77360 - 9,77350}{9,77375 - 9,77350} = 0.4 = \alpha$$

- Pour  $\alpha = 0.6$  (même légende),



Visualisation de la commande, tension, intensité et vitesse de rotation pour  $\alpha = 0.6$

Vérification de la valeur de  $\alpha$  dans la simulation grâce à la première période visible :

- début à 9s77475
- fin à 9s77500
- inversion à 9s77490

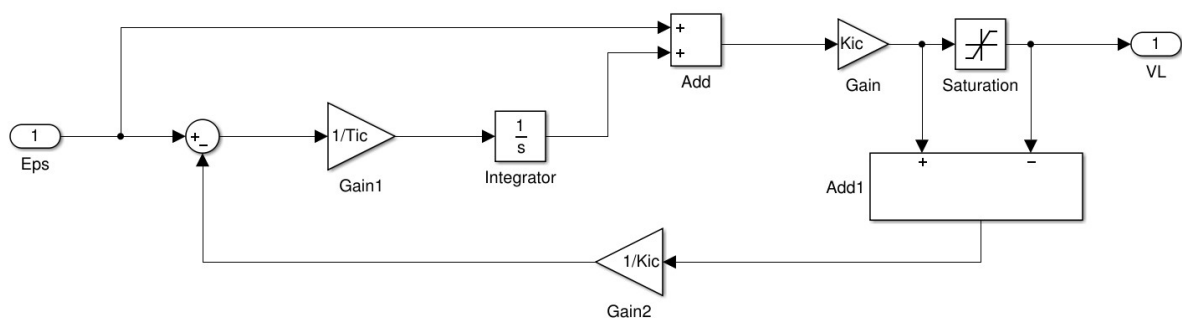
Alors : 
$$\frac{\text{Temps à 1}}{\text{Période}} = \frac{9,77490 - 9,77475}{9,77500 - 9,77475} = 0.6 = \alpha$$

On observe toujours une intensité qui oscille autour d'une valeur constante grâce à la commande qui s'inverse en suivant le rapport cyclique  $\alpha$ . De plus, la vitesse de rotation prend des valeurs constantes en régime permanent et ces valeurs sont les opposées pour  $\alpha = 0.4$  et  $0.6$ . Cela est normal puisque ces rapports sont "symétriques" par rapport à la valeur médiane  $0.5$  qui induit une valeur moyenne de tension nulle.

## 2) Mise en place de la régulation de courant

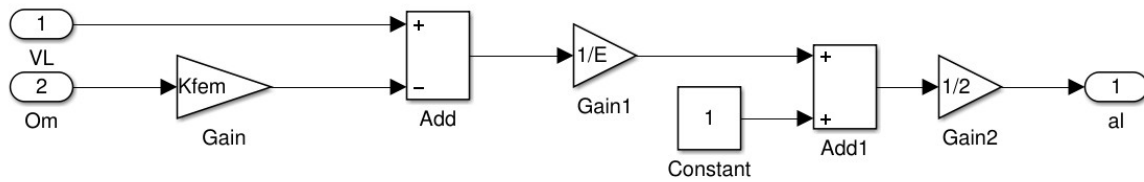
On réalise ici une régulation de courant par modulation de largeur d'impulsion (MLI) de la tension. On compare le courant mesuré avec la consigne de courant. On calcule la tension à appliquer au moteur à grâce à l'erreur de courant. On en déduit le rapport cyclique de consigne pour le modulateur.

Les sous-systèmes Correcteur et Compensateur sont fournis :



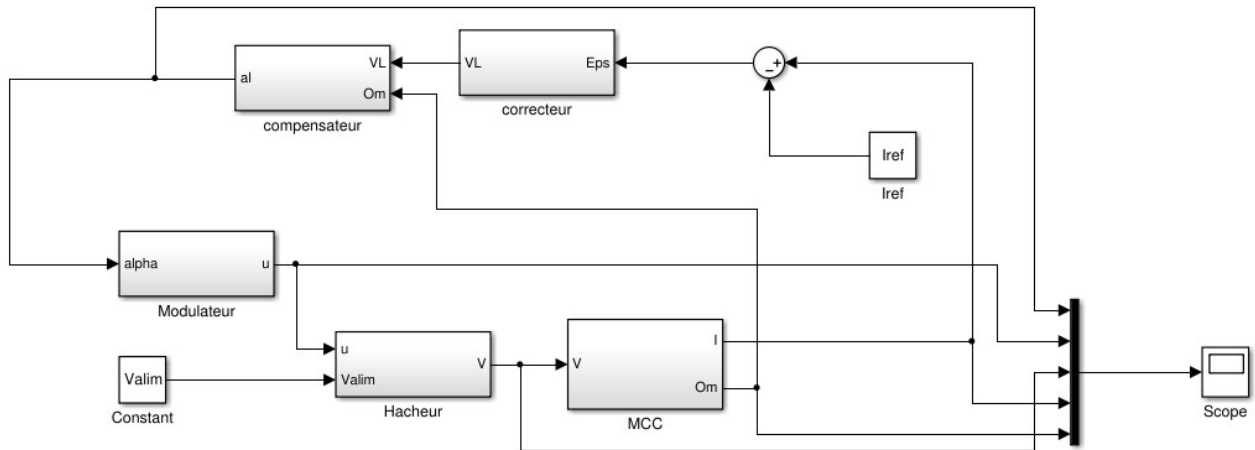
Sous-système Correcteur



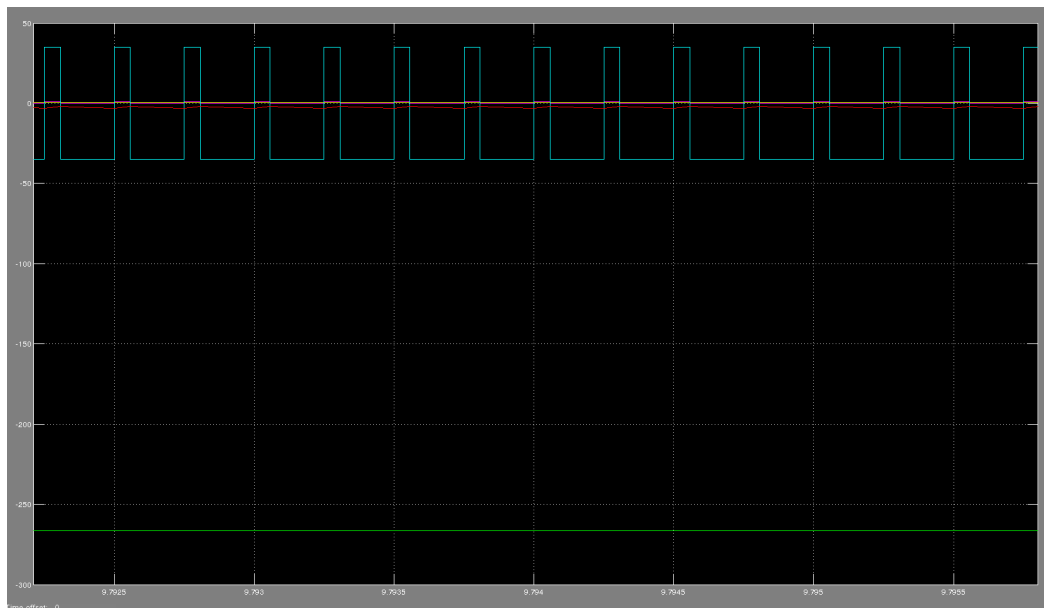


*Sous-système Compensateur*

Nous rajoutons donc au modèle principal ces deux sous-systèmes dans la boucle de régulation de courant à la valeur Iref par MLI :



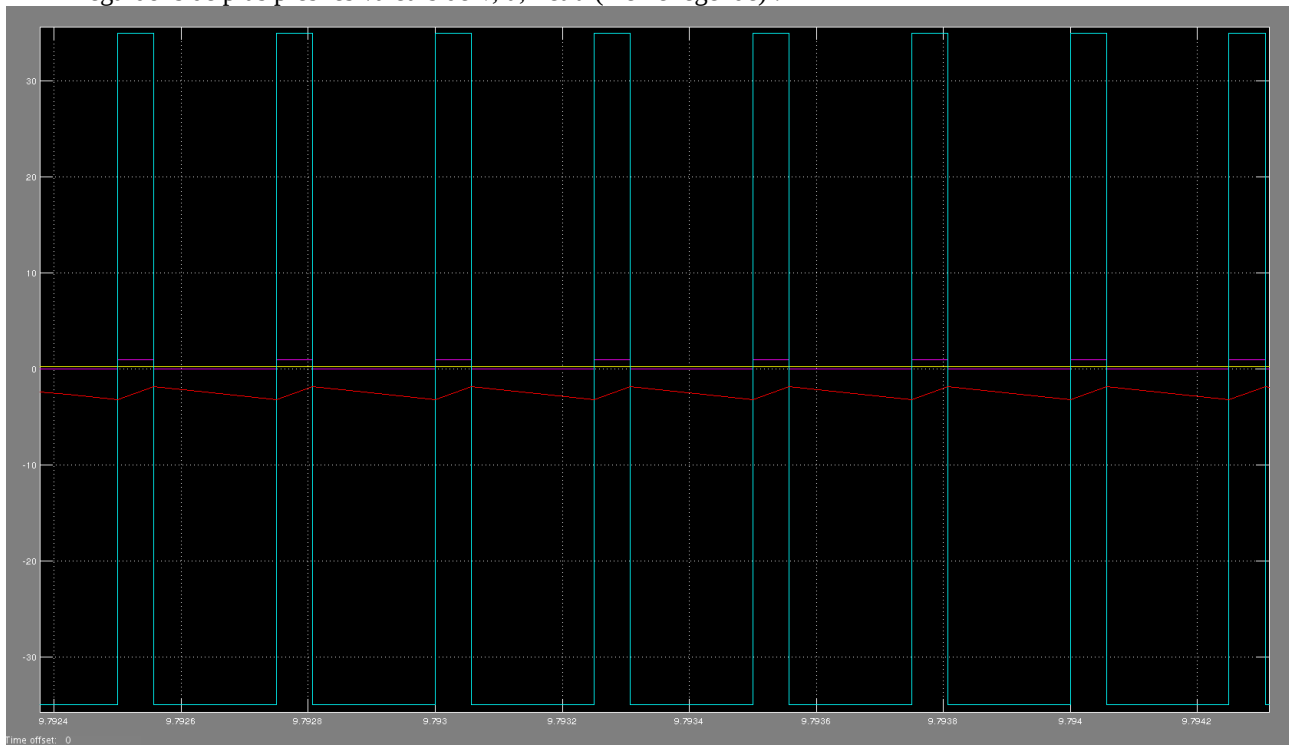
Visualisons l'évolution des grandeurs dans ce système :



- Légende :**
- Vert : vitesse de rotation  $\Omega$
  - Bleu : tension V
  - Rose : commande u
  - Rouge : intensité I
  - Jaune : rapport cyclique  $\alpha$

*Visualisation du rapport cyclique, la commande, tension, intensité et vitesse de rotation*

Regardons de plus près les valeurs de  $V$ ,  $u$ ,  $I$  et  $\alpha$  (même légende) :



On observe qu'en régime permanent,  $\alpha$  devient constant et l'intensité oscille bien autour de la valeur  $I_{ref}$  ue l'on s'est fixé. On n'a plus comme avec l'hystérésis le courant qui oscille entre 2 valeur proches mais cela ne change rien au fait que la vitesse de rotation atteint une valeur stable. La boucle de régulation atteint son objectif.