

# Électronique de puissance - Mécatronique

## TD 1 : Modélisation d'une Machine à courant continu

Valentin Gies

### 1 Introduction

Simulink est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs.

Dans cette introduction nous prenons le cas d'une machine à courant continu pilotée en position. Nous implantons d'abord le modèle de la machine puis les correcteurs à temps continu permettant d'améliorer le positionnement de cette machine.

La plus grande attention sera apportée à la compréhension de l'effet des correcteurs sur le fonctionnement du système bouclé.

### 2 Modélisation de la MCC (machine à courant continu)

#### 2.1 Paramètres de la MCC

Les paramètres et conventions de notations de la machine à courant continu étudiée sont les suivants :

- Moment d'inertie du rotor :  $J = 3.2284.10^{-6} kg.m^2.s^{-2}$
- Facteur d'amortissement mécanique (frottement fluide) de la MCC :  $b = 3.5077.10^{-6} Nm.s$
- Couple fourni par le moteur :  $C$
- Couple résistant :  $C_r$
- Constante électromécanique  $K = K_e = K_t = 0.0274 Nm.A^{-1}$
- Résistance induit  $R = 4\Omega$
- Inductance induit  $L = 2.75.10^{-6} H$
- Tension d'alimentation :  $U$
- Force contre-électromotrice :  $E$
- Position du rotor :  $\theta$

#### 2.2 Equations de la MCC

##### 2.2.1 Equation électrique

$$U = E + RI + L \frac{dI}{dt}$$

##### 2.2.2 Equation mécanique

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = C - C_r$$

### 2.2.3 Equations de couplage électromécanique

$$C = KI$$
$$E = K \frac{d\theta}{dt}$$

## 3 Prise en main de Simulink®

La simulation de systèmes dynamiques est une clé de la réussite dans la conception de systèmes mécatroniques. Elle permet de réduire le coût et la durée de mise au point par rapport à des tests sur système réel. Simulink® est un module de MATLAB® développé par The Mathworks (<http://www.mathworks.com>). Simulink® permet de programmer à l'aide d'une interface graphique simple un système dynamique et de visualiser les résultats. N'importe quel circuit ou système de control pour un système dynamique peut être construit en utilisant des blocs disponibles dans les bibliothèques Simulink. Les bibliothèques disponibles sont diverses : DSP, logique floue, réseaux de neurones, machines tournantes, composants électroniques...

Dans Simulink®, les informations cheminent d'un bloc à l'autre via des connections reliant ces blocs. Des signaux peuvent être générés et envoyés aux différents blocs à l'aide de *sources*. Les résultats des simulations peuvent être observés à l'aide de composants de mesures (*sinks*) pouvant être par exemple des oscilloscopes virtuels, des afficheurs ou encore un fichier ou une variable Matlab®.

Durant la simulation, les données sont transmises et traitées à temps discret. Le réglage du pas de calcul (*time step*) est donc fondamental pour assurer un bon fonctionnement du système. Sa détermination est basée sur la constante de temps la plus petite du système considéré.

### 3.0.4 Lancement de Simulink

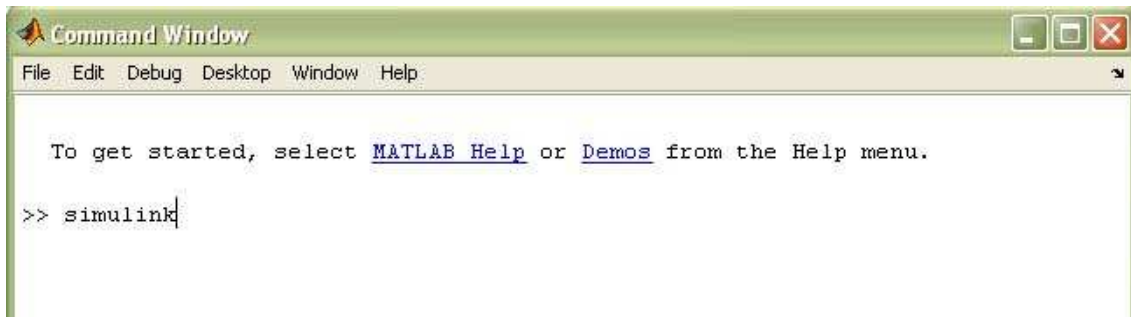


FIGURE 1 – Lancement de Simulink

⇒ Lancer Matlab. Lancer Simulink en tapant **simulink** à l'invite de commande (fig. 1). Le gestionnaire de bibliothèques est alors lancé (fig. 2).

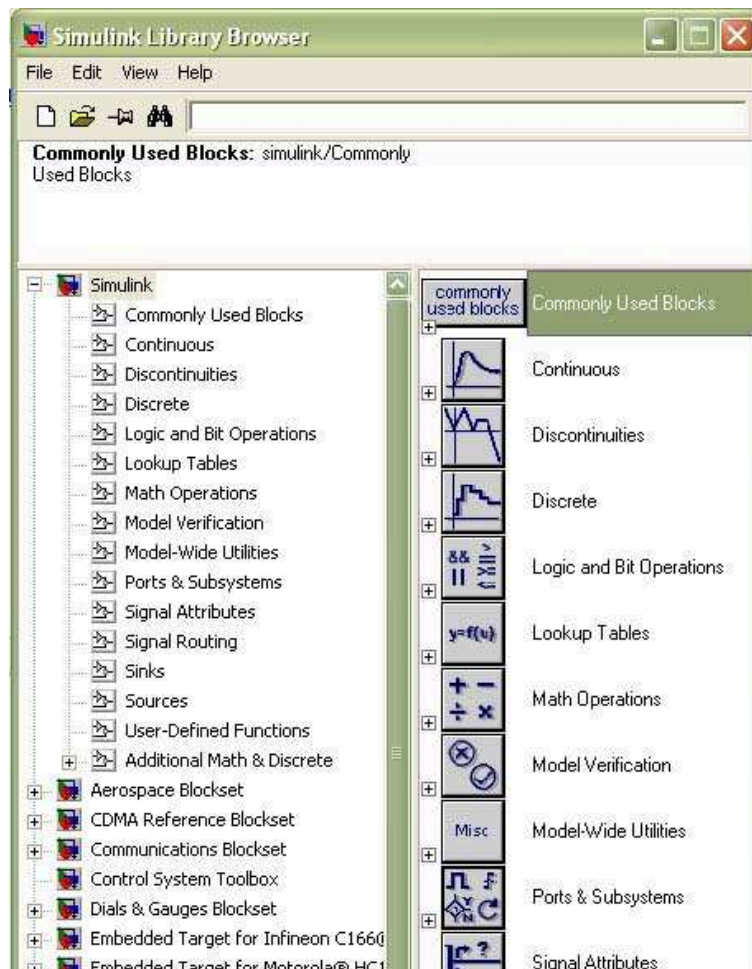


FIGURE 2 – Gestionnaire de bibliothèques

⇒ Créer un nouveau modèle Simulink, en appuyant sur l'icône **Create a new model**. Une fenêtre de modèle Simulink vierge est alors créée (fig. 3).

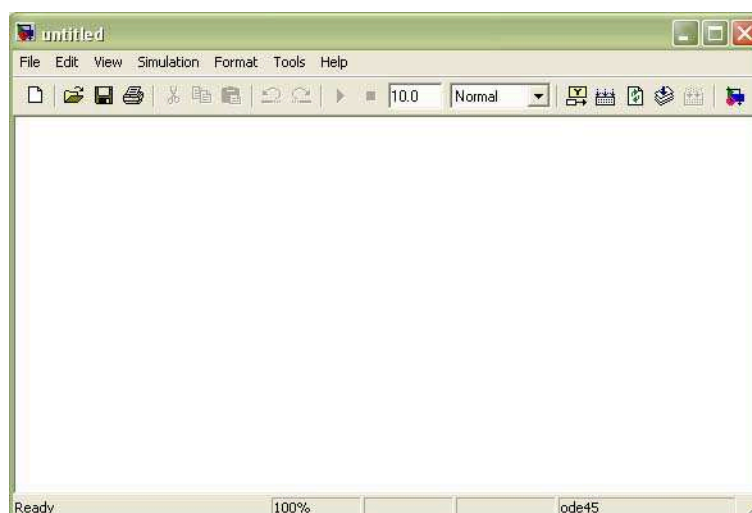


FIGURE 3 – Fenêtre Simulink

### 3.1 Implantation du modèle de la MCC

Le modèle de la MCC peut être implanté de plusieurs manières :

- forme développée : à l'aide d'opérateurs mathématiques de base (intégrateurs, sommateurs...)

– fonction de transfert : plus compacte.

Afin d'avoir accès à chacune des variables du modèle de la MCC, nous implantons le modèle sous forme développée.

### 3.1.1 Modèle électrique

$$U = E + RI + L \frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri + U - K \frac{d\theta}{dt})$$

Le courant  $i$  est l'intégrale de la somme algébrique de 3 termes multipliée par  $\frac{1}{L}$ . Dans Simulink insérer les blocs suivants (par Drag and Drop depuis le gestionnaires de librairie vers la fenêtre courante) :

– **Sommateur** : disponible dans la librairie :

*Simulink* → *MathOperations* → *Sum*

⇒ Placer le composant dans la fenêtre courante puis double-cliquer sur le composant et ajuster le paramètre **List of signs** à la valeur  $-|+|-$  (fig. 4).

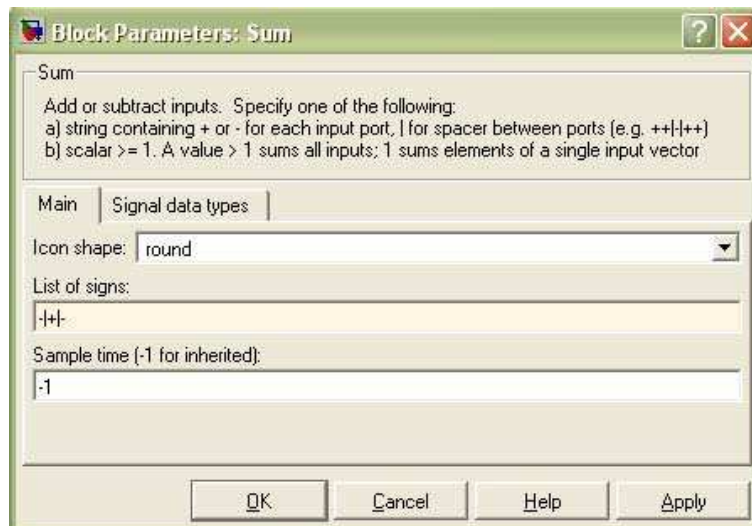


FIGURE 4 – Paramètres du bloc Sum

– **Gain** : disponible dans la librairie :

*Simulink* → *MathOperations* → *Gain*

⇒ Placer le composant et régler son paramètre *Gain* à  $1/L$ . La valeur de  $L$  sera définie ultérieurement dans un fichier Matlab de définition des constantes. Modifier le label du bloc *Gain* et le remplacer par *Inductance*.

– **Intégrateur** : disponible dans la librairie

*Simulink* → *Continuous* → *Sum*

⇒ Placer le composant et régler sa *condition initiale* à 0.

Une fois les composants placés et réglés, les connecter entre eux.

⇒ Pour cela, cliquer sur la sortie du composant à connecter et déplacer jusqu'à l'entrée du composant suivant à connecter.

Double-cliquer sur la connexion reliant le bloc Gain au bloc intégrateur et entrer  $d/dt(i)$  comme label pour cette connexion.

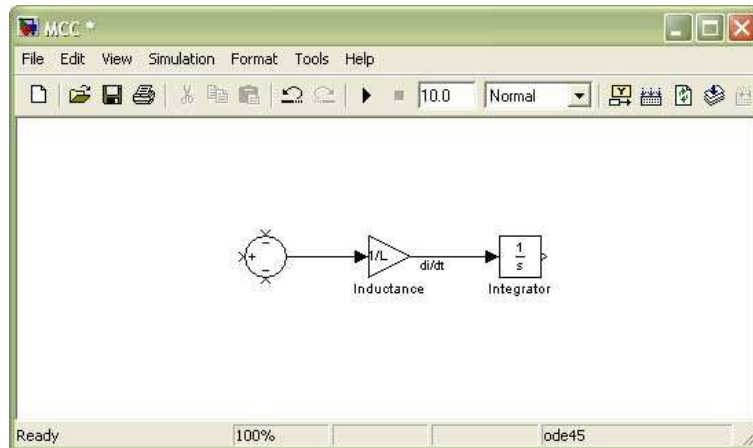


FIGURE 5 – Modèle électrique de la MCC

Votre modèle Simulink doit ressembler à celui de la figure 5.

⇒ Enregistrer le modèle sur votre compte sous le nom : **MCC.mdl**.

**Attention : Simulink a une fâcheuse tendance à se fermer de manière spontanée (en particulier dans les anciennes versions), il est donc indispensable de sauver régulièrement votre travail.**

### 3.1.2 Modèle mécanique

⇒ Faire de même avec l'équation mécanique de la MCC :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = C - Cr \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} \left( (C - Cr) - b \frac{d\theta}{dt} \right)$$

Le couple résistant  $Cr$  sera modélisé par une constante disponible dans la librairie :

*Simulink* → *Source* → *Constant*

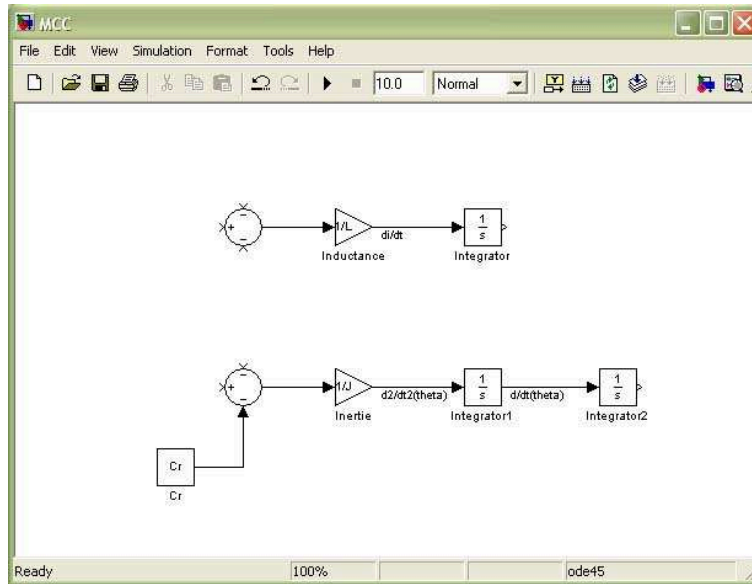


FIGURE 6 – Modèle mécanique de la MCC

On obtient alors le modèle Simulink de la figure 6.  
 Pensez à enregistrer votre fichier.

### 3.1.3 Modèle électromécanique couplé de la MCC

⇒ Coupler les deux modèles précédents de manière à obtenir un modèle complet de la MCC (fig. 7).  
 Il est important d'ajouter des commentaires en label sur le schéma de manière à pouvoir lire aisément le schéma et retrouver rapidement les grandeurs physique.

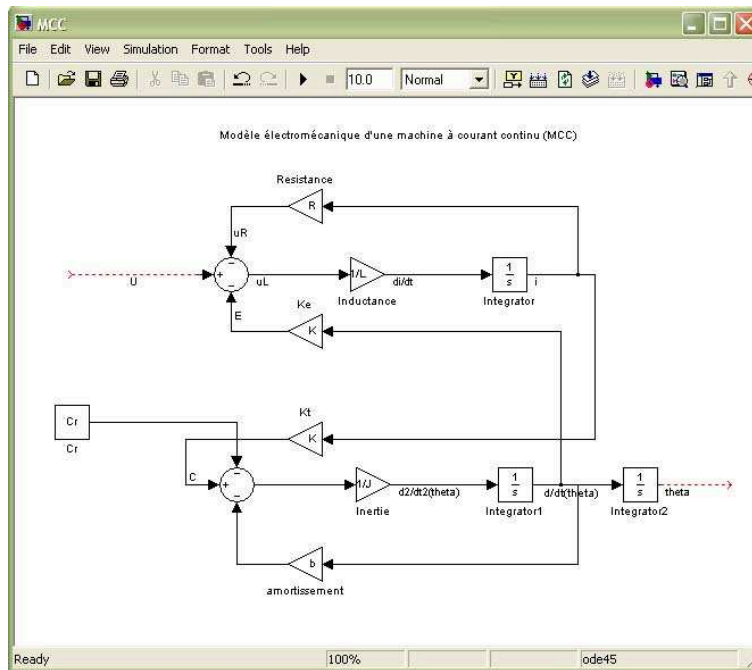


FIGURE 7 – Modèle électromécanique couplé de la MCC

### 3.2 Simulation en boucle ouverte

La réponse en boucle ouverte d'un système correspond à sa réponse en l'absence de boucle de contre-réaction externe à ce système. Dans cette simulation, nous prenons un couple résistant  $Cr = 0$ , et nous étudions la réponse de ce système à un échelon de tension  $U = 12V$ .

#### 3.2.1 Réglage des paramètres du modèle

Le réglage des paramètres du modèle peut être effectué de plusieurs manières :

- En insérant directement les valeurs dans les blocs du modèle Simulink : ne pas utiliser cette méthode en particulier lorsque certains paramètres sont communs à plusieurs blocs du système !
- En entrant la valeur de ces paramètres en ligne de commande Matlab, par exemple :

$$J = 3.2284E-6;$$

- En entrant les paramètres via un fichier MATLAB *.m*, et en chargeant ce fichier automatiquement avant chaque simulation.

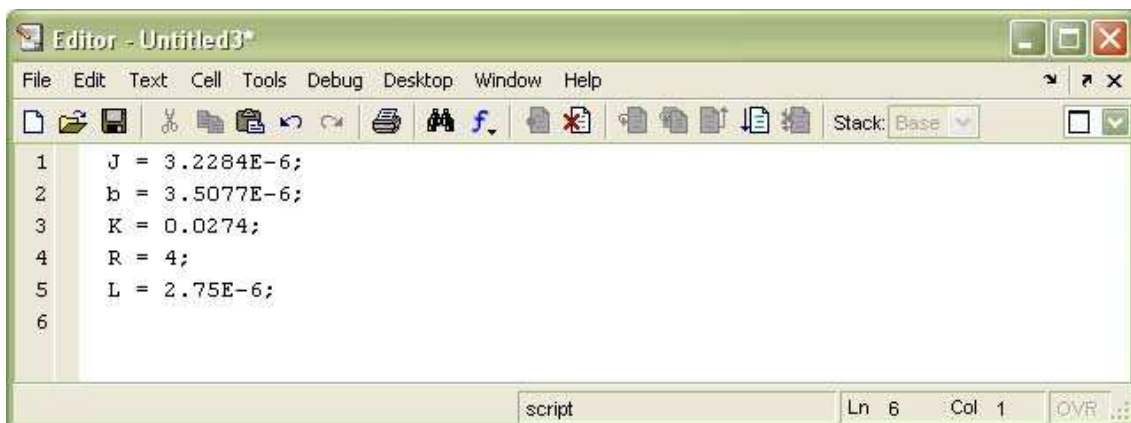
Cette dernière méthode étant la plus propre et la plus efficace, nous l'utiliserons.

⇒ Commencer par créer un nouveau fichier *.m* depuis la fenêtre MATLAB (pas Simulink). Entrer la séquence d'initialisation des paramètres (fig. 8). Enregistrer le fichier de définition sur votre compte sous le nom *MCC\_constants.m*.

⇒ Changer le répertoire de travail (*current directory* dans la fenêtre Matlab) et indiquer le répertoire dans lequel vous avez enregistré vos fichiers.

⇒ Dans le modèle Simulink, aller dans le menu

*File* -> *ModelProperties* -> *CallBack(onglet)*



```

1  J = 3.2284E-6;
2  b = 3.5077E-6;
3  K = 0.0274;
4  R = 4;
5  L = 2.75E-6;
6

```

FIGURE 8 – Définition des paramètres de la MCC

⇒ Dans le champ *Model Initialisation function*, entrer le nom du script de configuration à charger : *MCC\_constants* (fig.9).

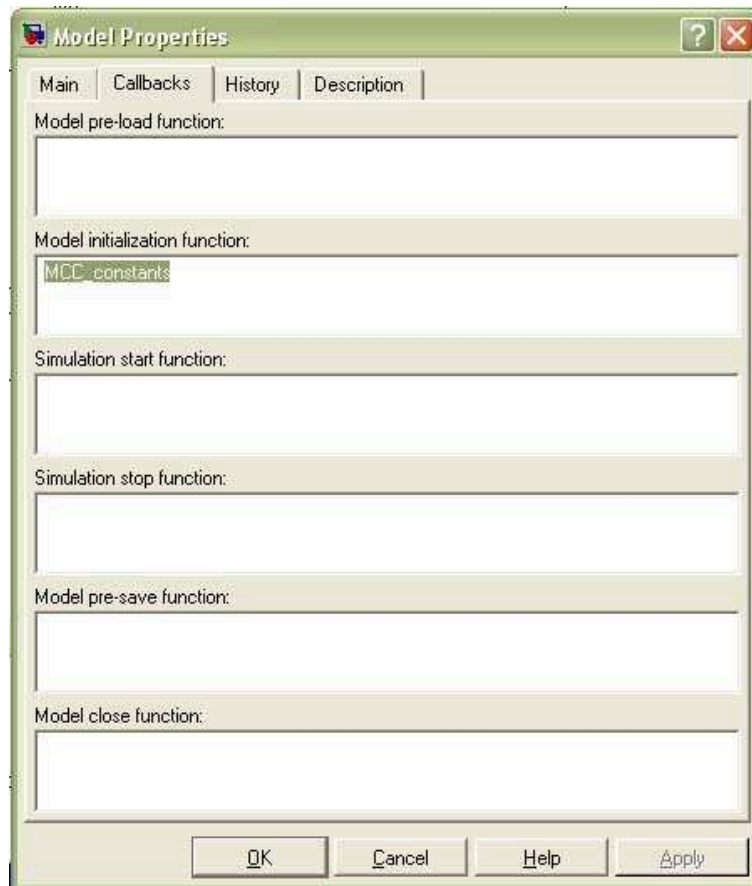


FIGURE 9 – Chargement automatique du script de configuration

### 3.2.2 Insertion d'un échelon de tension

L'échelon est disponible dans la librairie :

*Simulink* → *Sources* → *Step*

⇒ Placer l'échelon dans la fenêtre courante puis ajuster son paramètre **Final value** à la valeur 12(V).

### 3.2.3 Insertion d'un oscilloscope

Les oscilloscopes sont disponibles dans la librairie :

*Simulink* → *Sinks* → *Scope*

⇒ Placer un oscilloscope (le renommer *Osc Angle*) en sortie du montage de manière à visualiser l'évolution de  $\theta$  en fonction du temps.

Il est possible de visualiser simultanément plusieurs signaux, pour cela il faut utiliser un multiplexeur disponible dans la librairie :

*Simulink* → *SignalRouting* → *Mux*

⇒ Placer un multiplexeur à 4 entrées dans le modèle, connecter ses entrées aux tensions  $U$ ,  $E$ ,  $U_R$  et  $U_L$ , puis connecter sa sortie à un second oscilloscope appelé *Osc Tensions*. La sortie du multiplexeur est un ensemble de 4 signaux, pour le mettre en évidence de manière plus claire dans le montage, aller dans le menu :

*Format* → *Port/SignalDisplays*

Activer les options :



- Signal Dimensions
- Wide Nonscalar Lines

Le modèle obtenu doit ressembler à celui de la figure 10.

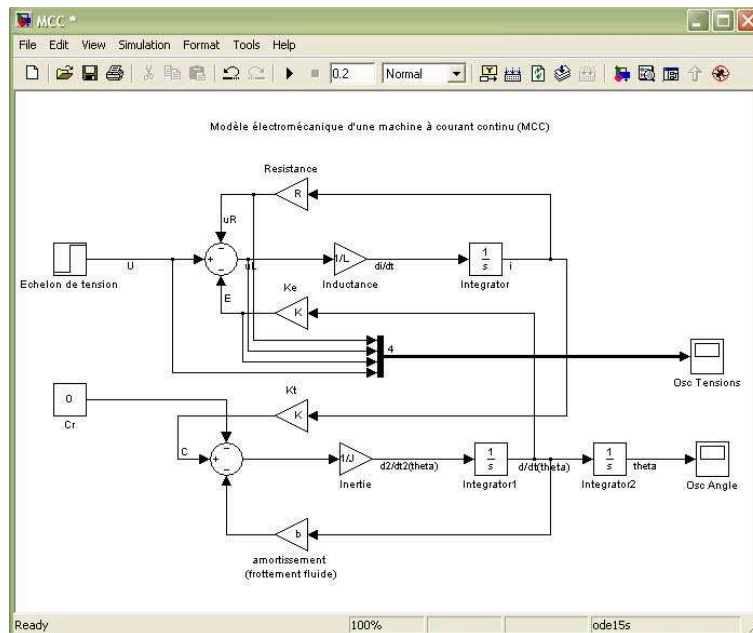


FIGURE 10 – Modèle de la MCC avec oscilloscopes

### 3.2.4 Réglage des paramètres de simulation

Le réglage des paramètres de simulation est une étape cruciale du processus de simulation. Un pas d'échantillonnage trop important conduit à des erreurs de calculs (la condition de Shannon n'est plus respectée), un pas trop petit conduit à une perte de temps inutile. Les dernières versions de Simulink permettent une gestion quasi-automatique assez performante de ces paramètres de simulation à condition de choisir des modèles convergents dans la plus-part des cas (pas forcément les modèles les plus précis, mais amplement suffisants pour les applications standards telles les problèmes abordés en mécatronique).

⇒ Pour régler les paramètres du modèle de simulation, aller dans le menu

*Simulation* – > *ConfigurationParameter*

ou utiliser le raccourci CTRL+E au clavier. Choisir *ode15s (stiff/NDF)* comme solver avec un pas variable, les valeurs max et min étant réglées automatiquement. Régler le temps de simulation à 0.2 secondes (*stop time*) (fig. 11).

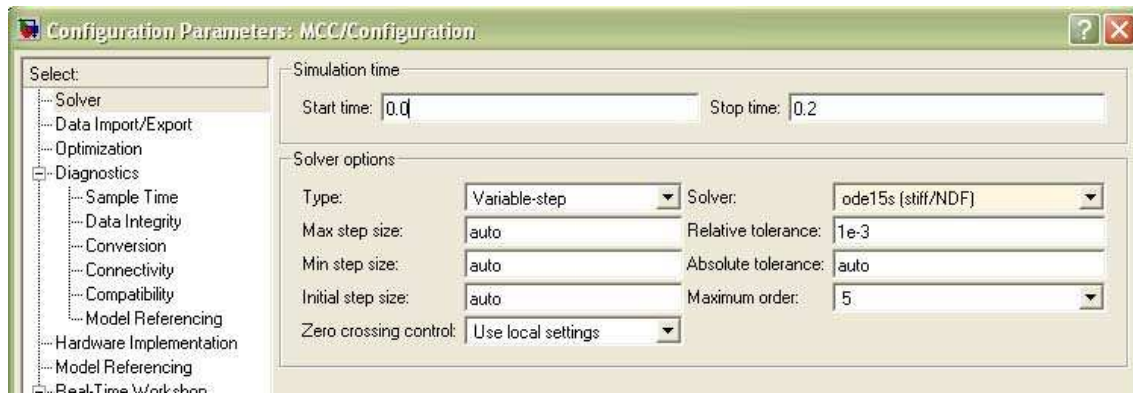


FIGURE 11 – Réglage des paramètres de simulation

### 3.2.5 Simulation

⇒ Lancer la simulation via l'icône *Start Simulation* ou bien à l'aide du raccourci CTRL+T au clavier. Observer le résultat de la simulation en double-cliquant sur les oscilloscopes (fig. 12).

⇒ Relever la valeur de la constante de temps dominante dans le système (il se comporte à la manière d'un premier ordre en première approximation).

⇒ Déterminer par le calcul (à partir des équations différentielles) les constantes de temps mécanique et électrique du système.

⇒ La constante de temps relevée est-elle mécanique ou électrique ?

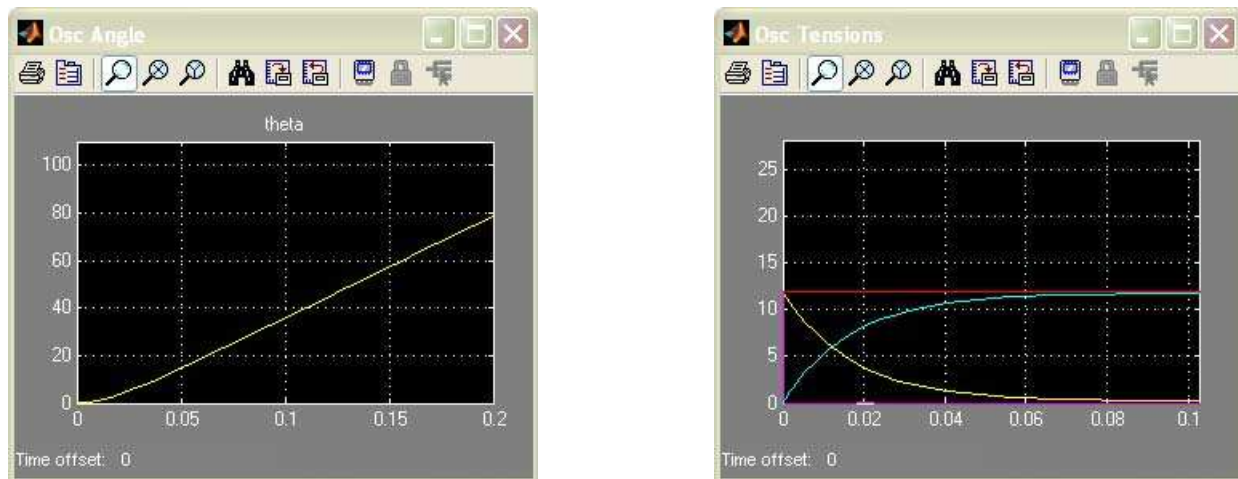


FIGURE 12 – Résultats de la simulation

### 3.2.6 Visualisation de la fonction de transfert

Il est également possible sous Simulink de visualiser la fonction de transfert à l'aide de diagrammes de Bode, de diagramme de Nyquist ou de Black.

⇒ Pour cela aller dans le menu :

*Tools* – > *Control Design* – > *Linear analysis*

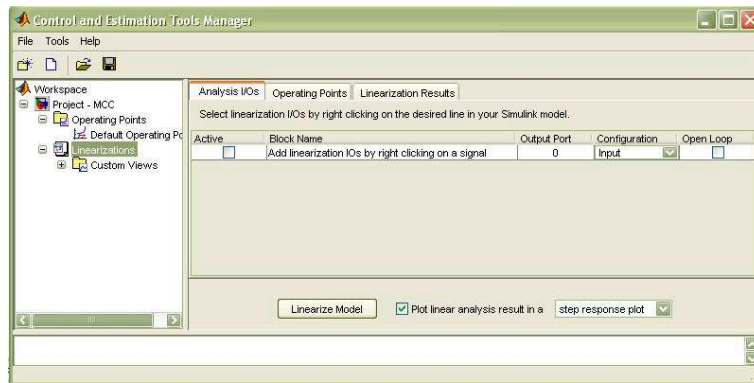


FIGURE 13 – Control and Estimation Tool Manager

⇒ Sélectionner ensuite les signaux d'entrée et sortie de la fonction de transfert en revenant dans la fenêtre du modèle et en cliquant-droit sur la connexion désirée : choisir ensuite dans le sous-menu contextuel (fig. 14).

*Linearization point* – > *Input Point* ou *Output Point*

Un petit symbole apparaît à côté de la connexion configurée en entrée ou en sortie et celles-ci apparaissent également dans le Control and Estimation Tool Manager.

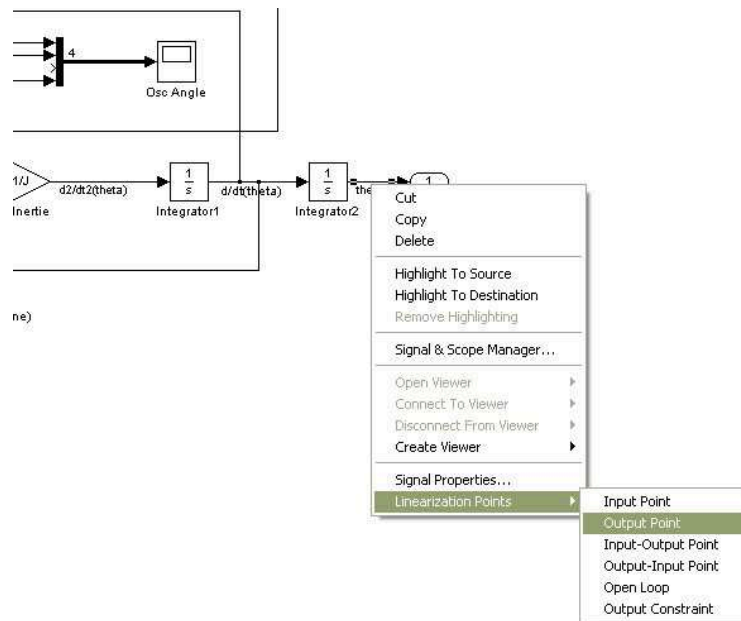


FIGURE 14 – Lancement de l'analyse fréquentielle

⇒ Choisir Bode response plot et lancer la simulation fréquentielle en cliquant sur Linearize Model dans le Control and Estimation Tool Manager (fig. 15).

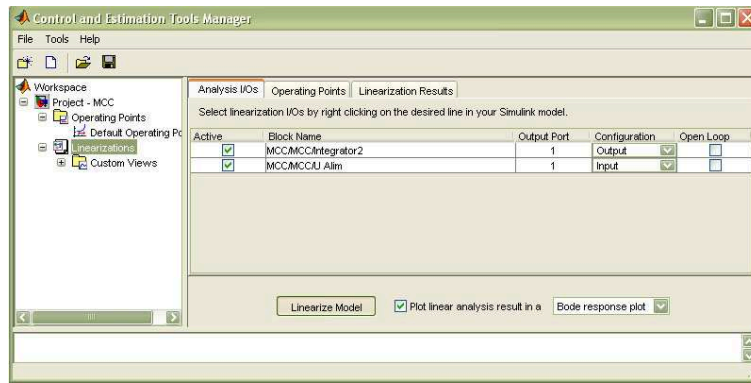


FIGURE 15 – Lancement de l'analyse fréquentielle

⇒ Visualiser le résultat (fig. 16) : il est possible d'ajouter sur le diagramme de bode la grille semi-log à l'aide du menu contextuel accessible par un clic-droit, il est également possible d'observer les réponses indicielle, fréquentielles dans un diagramme de Black-Nichols (fig. 17), fréquentielles dans un diagramme de Nyquist. Noter que dans ce dernier cas, le menu contextuel permet aussi de zoomer sur le point critique -1 (fig. 18).

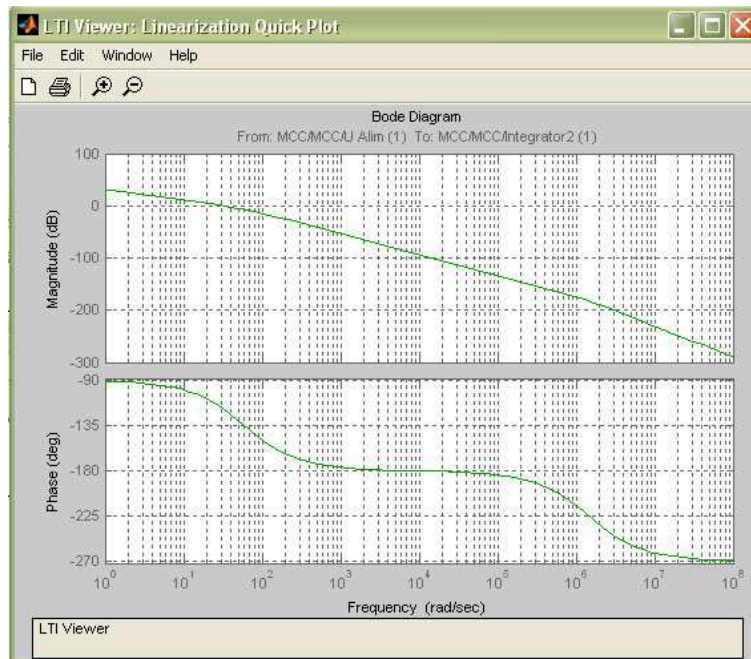


FIGURE 16 – Diagramme de Bode

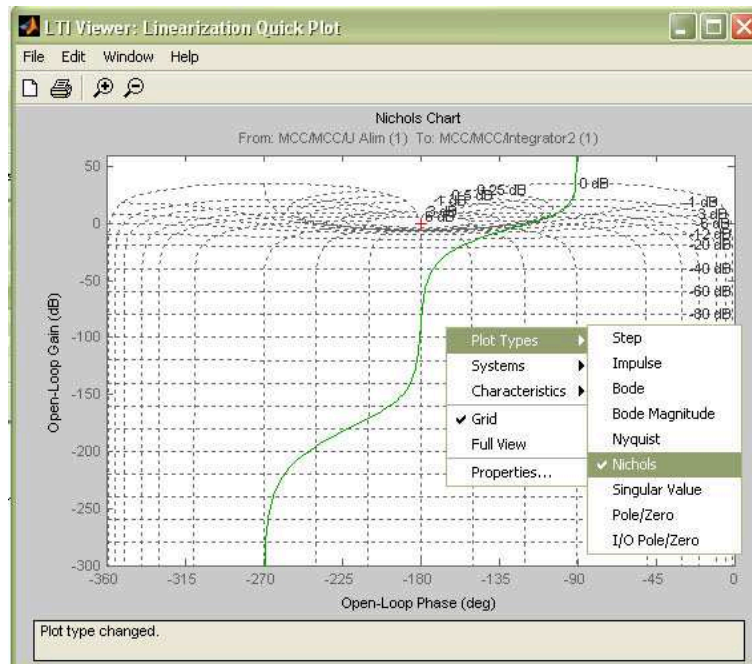


FIGURE 17 – Diagramme de Black-Nichols

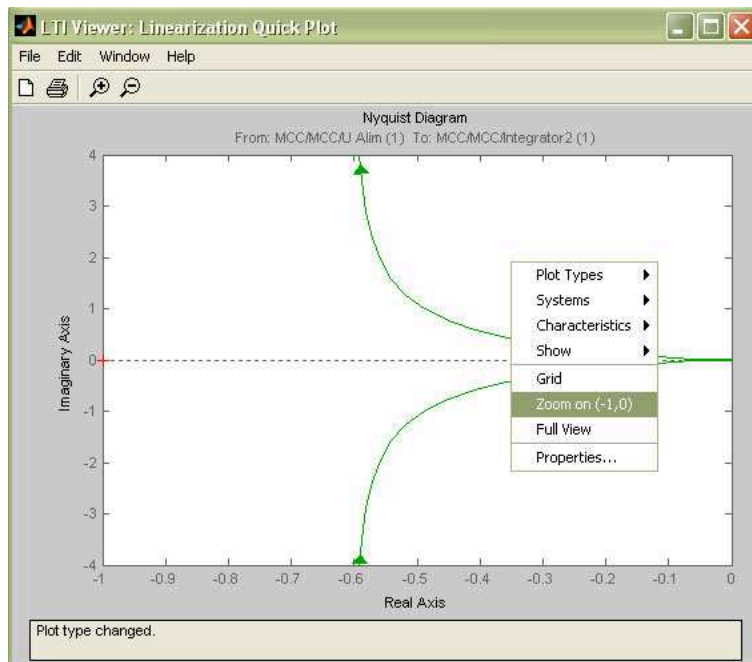


FIGURE 18 – Diagramme de Nyquist

### 3.2.7 Enregistrement du modèle de la MCC dans un sous-système

Le modèle interne de la MCC est à présent achevé, il est temps de le stocker dans un sous-système qui sera plus simple à appeler ensuite pour travailler sur la partie commande et asservissement de cette machine. Pour cela sélectionner à l'aide de la souris un rectangle englobant l'ensemble du modèle à l'exception des entrées et de la sortie  $\theta$  vers l'oscilloscope (fig. 19).

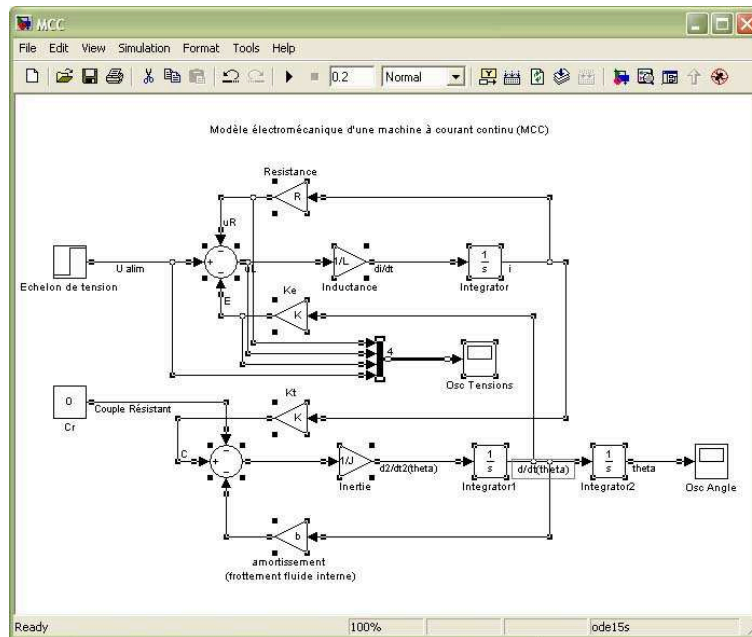


FIGURE 19 – Sélection du modèle pour en faire un sous-système

Transformer la sélection en sous système à l'aide du menu :

*Edit* -> *CreateSubsystem*

ou du raccourci clavier **CTRL+G**. Renommer le sous-système *MCC*, l'éditer et changer le nom des ports d'entrée et sortie pour les rendre explicites (par exemple : *U\_alim* et *C\_Resist* pour les entrée et *Angle* pour la sortie. Le modèle principal doit avoir l'allure de la figure 20.

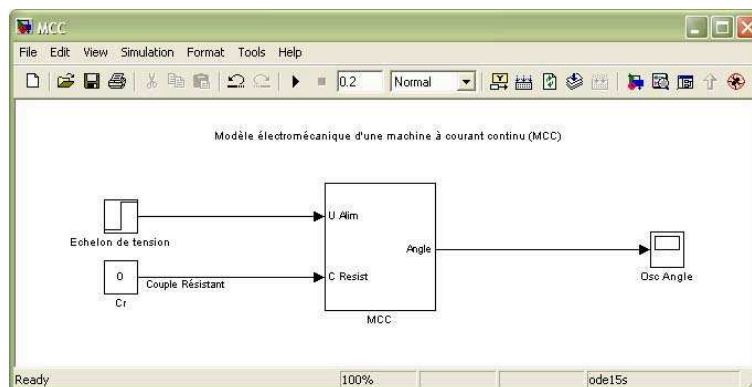


FIGURE 20 – Sous-système MCC

⇒ Sauvegarder votre travail, il sera réutilisé au prochain TD.

**FIN DU TUTORIEL**