

Modélisation et simulation des systèmes électriques
Modélisation d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique



A But

On souhaite développer le modèle et la commande d'une chaîne de traction reposant sur l'utilisation d'une machine à courant continu (MCC) à aimant permanent (inducteur) et un réducteur de vitesse. Le couple d'entraînement est rendu variable par l'utilisation d'un hacheur réversible relié à un ensemble de batteries (fig.1).

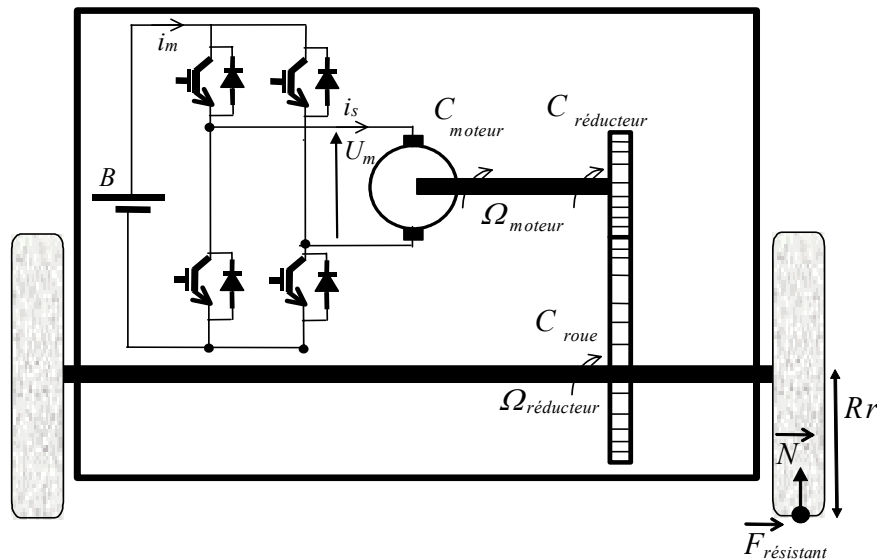


Fig. 1 :

Ce système de traction se décompose en (fig. 2) :

- _ une batterie délivrant une tension B de 48V
- _ un hacheur modulant une tension U_m appliquée aux bornes de la MCC et modulant également le courant issu du circuit d'induit de la machine (i) en un courant i_m .
- _ une machine à courant continu délivrant un couple de forces moteur (C_{moteur}) ainsi qu'une force électromotrice (e).
- _ la masse totale ramenée sur l'arbre du moteur, ce dernier tournant à la vitesse (Ω_{moteur}) et recevant un couple résistant (Cr_{moteur})
- _ un réducteur permet d'obtenir une vitesse réduite ($\Omega_{réducteur}$), il transmet au moteur, en le transformant, le couple résistant apparaissant au niveau des roues (Cr_{roue}).
- _ une roue dont la vitesse angulaire périphérique est notée Ω_{roue} et transforme la force de réaction de la chaussée (Cr_{route}) en un couple résistant.

B Modélisation du véhicule

Pour établir le modèle du véhicule, on considère chaque élément de façon séparée (figure 2). Il conviendra de valider à chaque étape que le modèle de chaque élément avant de l'assembler. La figure 3 donne une vue du modèle correspondant implanté sous Simulink.

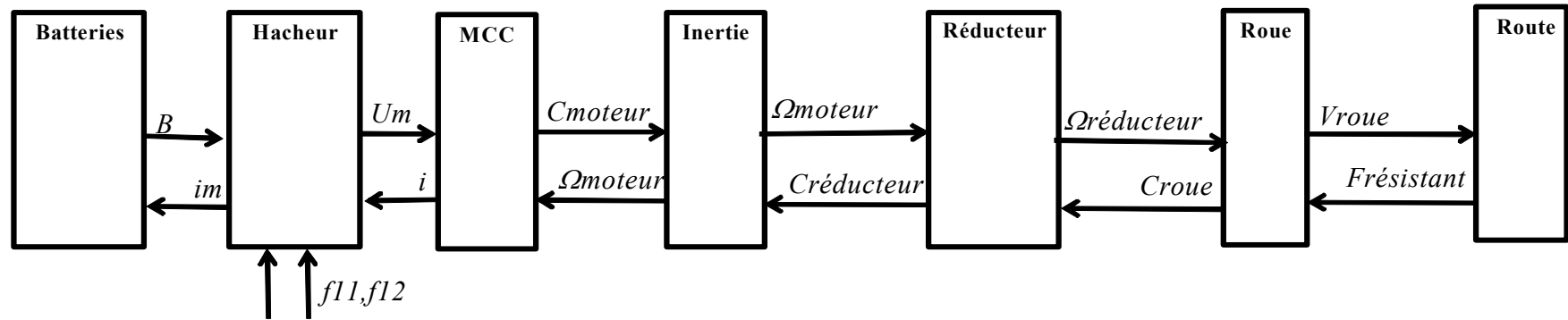


Fig. 2 :

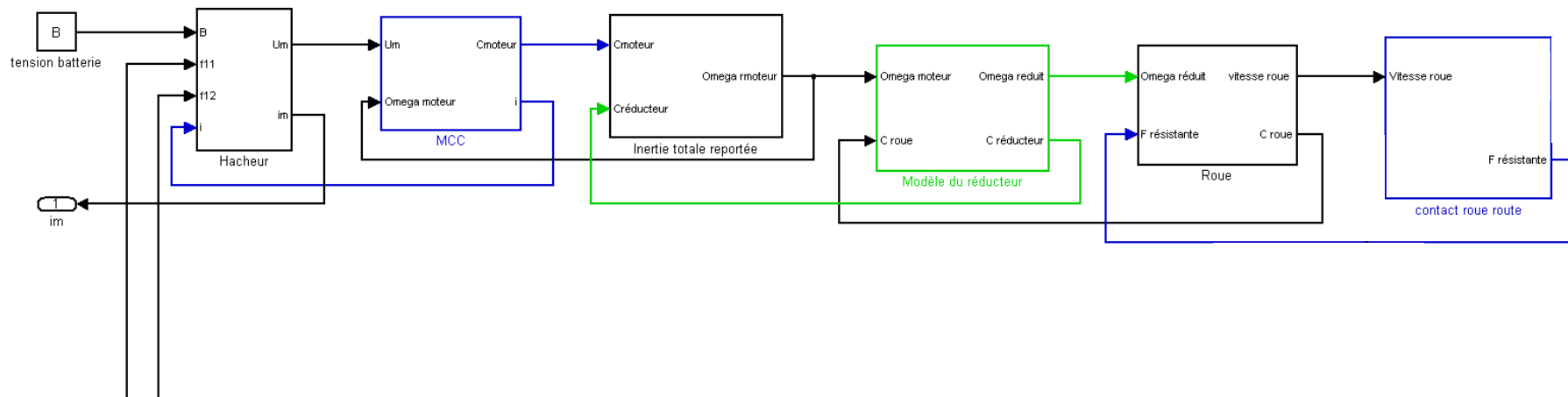


Fig. 3 : Implantation sous Simulink

1 Modèle de la machine à courant continu

1.1) Déterminez l'ensemble des relations nécessaire à la modélisation du circuit d'induit de la machine.

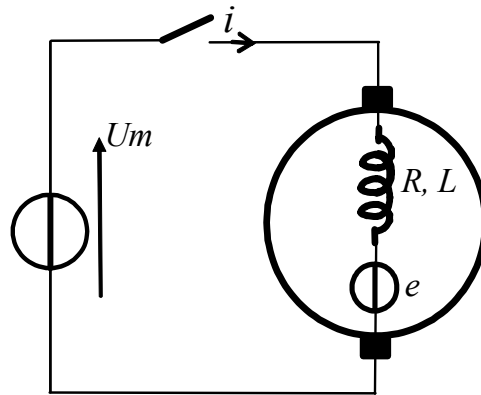


Figure 4 :

1.2) Déterminez la représentation sous forme de schémas bloc du modèle du circuit d'induit de la machine. Donnez un exemple d'implantation sous Simulink.

1.3) Compléter le modèle de la machine en faisant apparaître les conversions électromécaniques ($k=1,2$ S.I.).

Implantez l'ensemble des équations sous Simulink et créez un macro bloc comme représenté à la figure 3.

1.4) Pour identifier la machine, on a appliqué un échelon de tension de faible amplitude (1,5v), de manière à ce que le rotor ne tourne pas et on a relevé l'évolution temporelle du courant (figure 5).

Dans les mêmes conditions de cet essai, déterminez l'expression théorique du courant.

En comparant avec le relevé expérimental, déterminer la valeur de la résistance R et de l'inductance L .

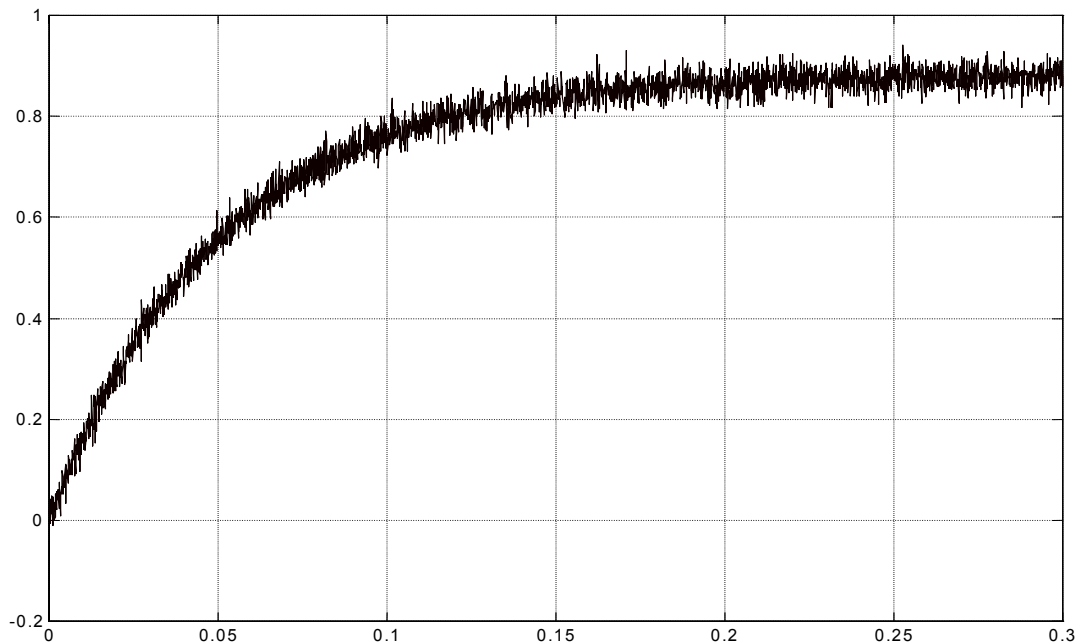


Figure 5 : Evolution temporelle de i (A) en fonction du temps t (s)

1.5) Simuler cet essai sous Simulink. Conclusion ?

2 Modèle de l'inertie

Les souplesses des arbres de transmission et des accouplements mécaniques ainsi que les jeux éventuels seront négligés. Diamètre de la roue : 0,52 m, rapport de réduction est de 1/5.

La masse du véhicule est de $M=300\text{kg}$. On supposera que toute la masse du véhicule est reportée sur l'arbre de la machine électrique : $J = M \cdot r^2 \cdot Rr^2$ avec r le rapport du réducteur, Rr le rayon de la roue. A partir de l'équation fondamentale de la dynamique, déterminez l'équation différentielle régissant la vitesse du moteur en fonction du couple entraînant et du couple total résistant.

Le couple total résistant se décompose en un couple de décollage (de 0,01 N.m), un couple de frottement et un couple résistant transmis par le réducteur. Les frottements sont modélisés par un coefficient de frottement visqueux de $f=0,1$. Déterminez la représentation sous forme de schémas bloc du modèle.

Donnez un exemple d'implantation sous Simulink.

3 Modèle du réducteur de vitesse

Déterminez la représentation sous forme de schéma bloc du modèle du réducteur.

Donnez un exemple d'implantation sous Simulink.



Figure 6 :

4 Modèle de la roue

Déterminez la représentation sous forme de schémas bloc du modèle de la roue.

Donnez un exemple d'implantation sous Simulink.

Rappel sur les unités de mesure :

Vitesse linéique en m/s, vitesse angulaire : rad/s, Couple : N.m, force : N,

5 Bilan de la force totale résistante à l'avancement

La route et son revêtement présentent des résistances externes à l'avancement du véhicule sur un plan longitudinal. Toutes les forces à l'avancement peuvent être représentées par une seule force du second ordre :

$$F_{resistant} = F_0 + F_1 v_{roue} + F_2 v_{roue}^2$$

avec F_0 la force résistive constante (15 N), F_1 les frottements visqueux (65 N/m/s), F_2 les frottements aérodynamiques (5 N/(m/s)²) et v_{roue} la vitesse du véhicule (m/s).

La route du véhicule sera représentée par une source mécanique fournissant une force de résistance $F_{resistant}$ et recevant la vitesse du véhicule v_{roue} . Déterminez la représentation sous forme de schémas bloc du modèle de la route.

Donnez un exemple d'implantation sous Simulink.

6 Evaluation des performances

On souhaite évaluer le comportement de ce véhicule lorsque l'on applique une tension de 48V pendant 3 secondes (Fig.1) sur le moteur à courant continu.

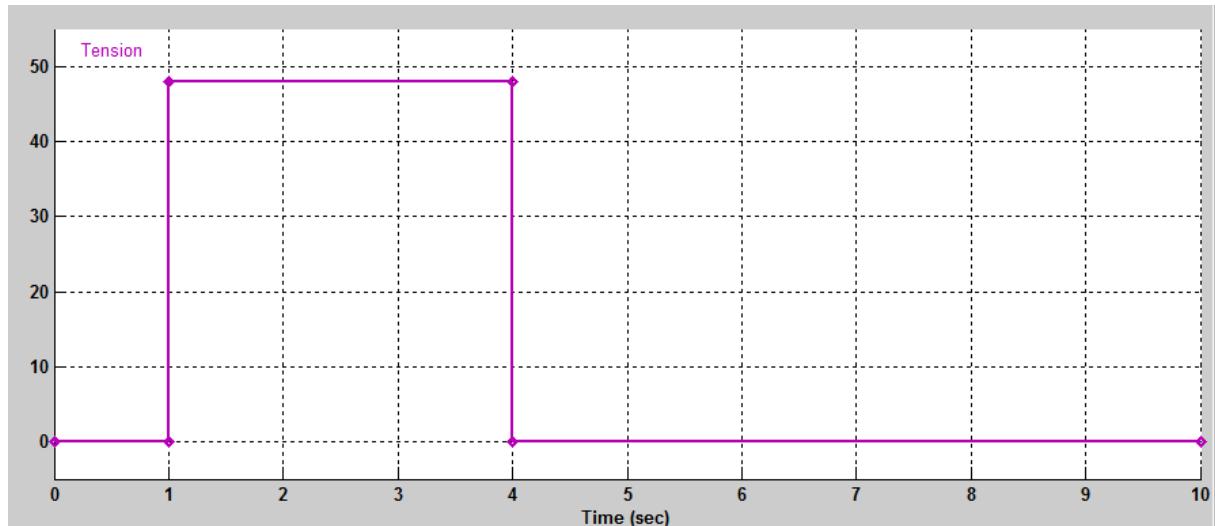


Fig. 7 : Tension imposée sur le moteur

- Quelle est la distance maximale parcourue ? Quelle est la durée ?
- Pourquoi le véhicule recule ?
- Combien vaut le couple maximal obtenu ?
- Pour dimensionner la hacheur, on a besoin de connaître le courant maximal dans la machine. Combien vaut il ?
- Combien d'énergie électrique (en W.h) est nécessaire pour dimensionner les batteries ?
- Que se passe t-il si on transporte un colis de 160kg avec ce véhicule ? Que faut il changer dans la simulation ? (Refaire les questions a) b) c) d) et e) et comparez) .

7 Modèle du hacheur et des batteries

En considérant un convertisseur équivalent à interrupteurs idéaux, proposez un modèle du hacheur. Ajoutez le modèle des batteries comme une source de tension.

Donnez un exemple d'implantation sous Simulink.

8 Vérification de la modélisation

Après avoir finalisé la partie modélisation, vérifiez le programme avec $f_{I1}=0,75, f_{I2}=0,25$
Relevez la tension du hacheur U_m , le couple de la MCC C_{moteur} , la vitesse de la machine Ω_{moteur} et la vitesse linéaire du véhicule V_{roue} .

C Commande du véhicule

1 Commande du hacheur

Le macro bloc pour la commande du hacheur est composé par trois sous-systèmes : une linéarisation dynamique, un générateur de connexion et un modulateur.

Proposez une réalisation de chaque sous-système.

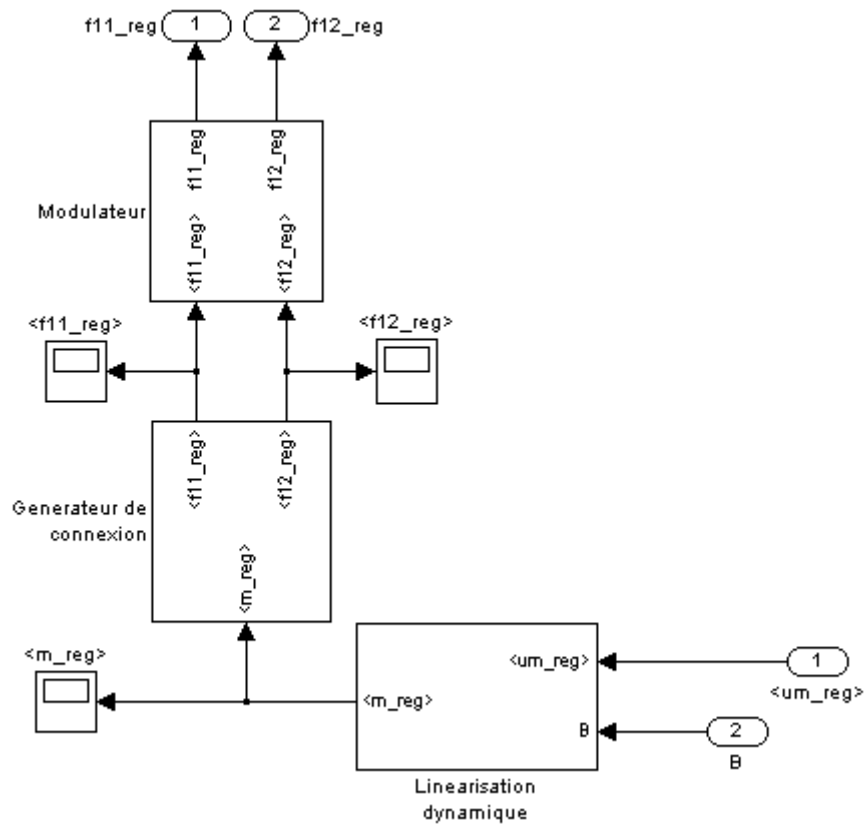


Fig. 8 : Exemple d'implantation du dispositif de commande du hacheur

Vérifiez le dispositif de commande du hacheur en isolant les macros blocs comme sur la figure suivante :

Essayez respectivement trois valeurs de la tension de référence $Um_ref = 0V, 24V$ et $48V$.

Relevez la tension Um issue du hacheur, et comparez avec Um_ref . Conclusion ?

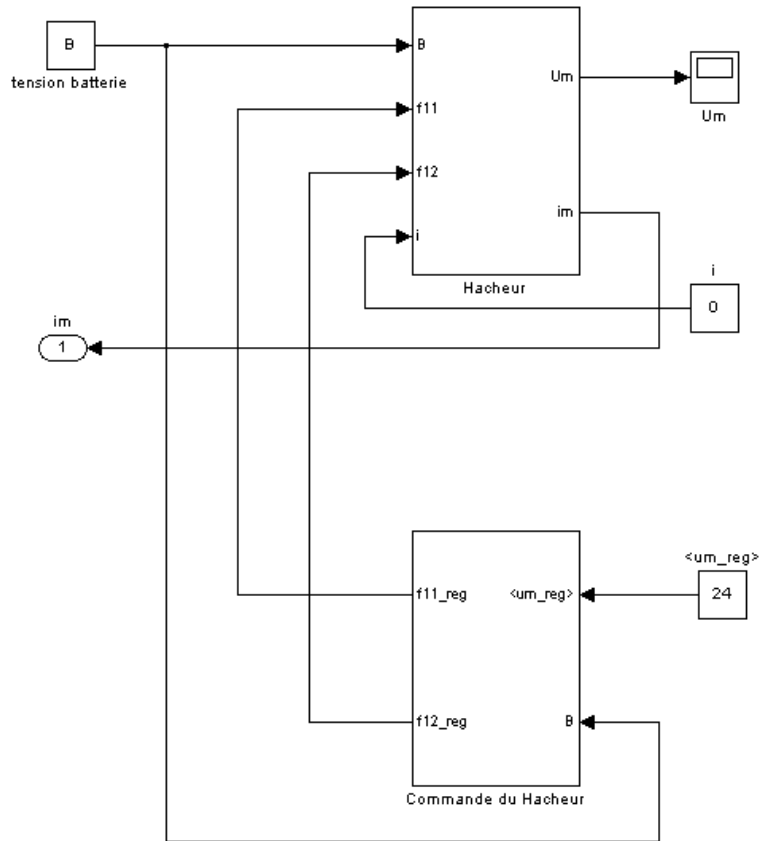


Fig. 9 :

2 Commande en couple du véhicule

En utilisant un potentiomètre monté sur une pédale, on génère une tension variant de 0V à 48V et qui sera proportionnelle à un couple de référence variant de 0 à 48N.m. Proposez un dispositif de commande de la machine pour réaliser un contrôle du couple ; c est à dire pour que le couple obtenu corresponde à sa valeur de référence issue de la pédale.

Vérifiez le dispositif de commande du hacheur en isolant les macros blocs comme la figure suivante :

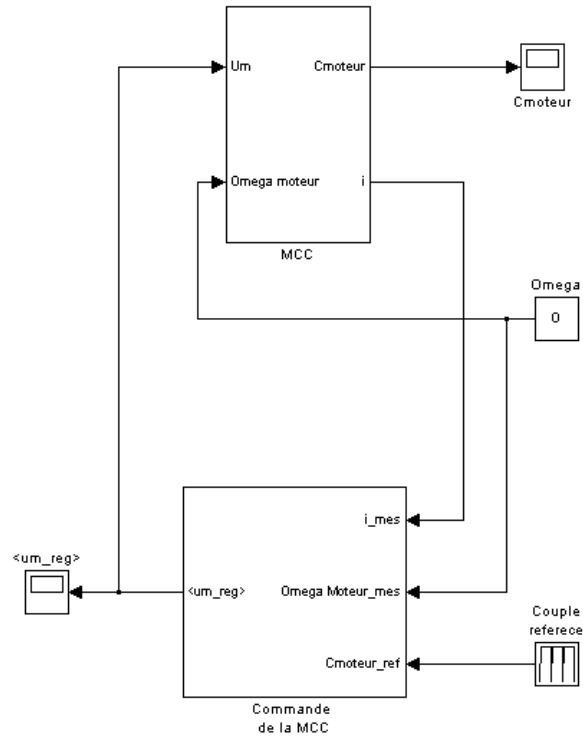


Fig. 10 :

Relevez le couple C_{moteur} , et comparez avec C_{moteur_ref} . Conclusion ?

3 Simulation globale avec la commande

Réalisez la simulation sur la structure globale (la modélisation + la commande) comme sur la figure suivante.

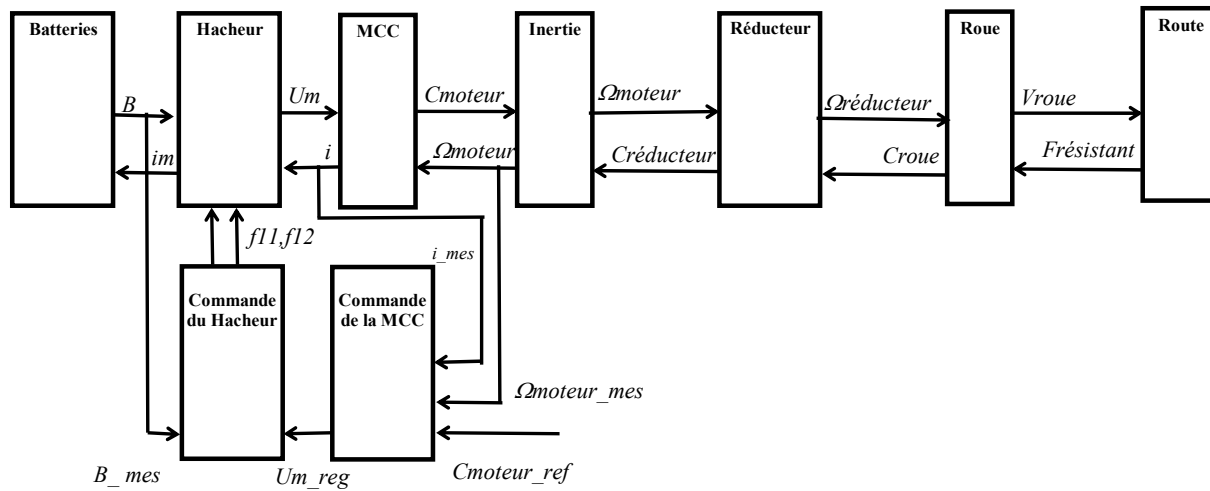


Fig. 11 :

On souhaite évaluer le comportement de ce véhicule (sans charge lourde) lorsque l'on applique une référence de couple de 35N.m pendant 3 s.

- a) Relevez la valeur moyenne de la tension du hacheur U_m , le couple de la MCC C_{moteur} , la vitesse de la machine Ω_{moteur} et la vitesse linéaire du véhicule V_{roue} . Conclusion ?
- b) Quelle est la distance maximale parcourue ? Quelle est la durée ?
- c) Combien vaut le couple maximal obtenu ?
- d) Combien d'énergie électrique (en W.h) est nécessaire pour dimensionner les batteries ?
- e) Que se passe-t-il si on transporte un colis de 160kg avec ce véhicule ? Que faut-il changer dans la simulation ? (Refaire les questions a) b) c) d) et comparez) .
- f) On veut faire le même déplacement, que faut-il faire ?
- Comparez l'énergie nécessaire dans les deux cas.

D Utilisation d'un moteur roue

Le moteur utilisé est une machine synchrone à aimant permanent à deux pôles avec un rotor à pôle lisse. Les tensions du générateur sont alternatives et de fréquence et d'amplitude variables. Le modèle ici représenté est décomposé en une modélisation de la conversion électromécanique et du circuit d'induit de la machine.

1) Transformations mathématiques

Le modèle de la machine sera écrit dans un repère de Park tournant en utilisant une première transformation. Une seconde transformation sera utilisée pour calculer les tensions simples triphasées à partir de deux tensions composées et pour déterminer les courants de deux phases à partir des trois courants de phase. L'application de la transformation de Park sur les tensions d'alimentation de la machine (Fig.2) et de son inverse sur les courants générés conduit à :

$$R26 : \begin{cases} \dot{i}_{ind_3} = P_{park}^{-1} \cdot \dot{i}_{ind_dq} \\ R27 : \begin{cases} v_{red_dq} = P_{park} \cdot v_{red} \end{cases} \end{cases}$$

où

- $\dot{i}_{ind_3} = [i_{ind1}, i_{ind2}, i_{ind3}]^T$ est le vecteur des courants triphasés dans les inducts de la machine,

- $v_{red} = [v_{red1n}, v_{red2n}, v_{red3n}]^T$ est le vecteur des tensions simples triphasées issues du redresseur.

On supposera que les systèmes électriques sont équilibrés et donc que la composante homopolaire de Park est nulle. Dans ce cas, la matrice de Park s'exprime par :

$$P_{park} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

L'angle θ est lié à la vitesse de rotation du repère (ω) et à l'angle initial (θ_0) :

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

La matrice inverse de Park s'exprime par :

$$P_{park}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

L'application des deux autres transformations conduit à :

$$R28 : \begin{cases} \dot{i}_{ind} = C_{i32} \cdot \dot{i}_{ind_3} \end{cases}$$

$$R29 : \begin{cases} v_{red} = C_{ucs} \cdot u_{red} \end{cases}$$

- $\dot{i}_{ind} = [i_{ind1}, i_{ind2}]^T$ est le vecteur des courants de deux phases dans les induits de la machine ,
- $u_{red} = [u_{red13}, v_{red23}]^T$ est le vecteur des deux tensions composées issues du redresseur.

C_{i32} est exprimée par :

$$C_{i32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

C_{ucs3} est la matrice qui permet d'adapter les tensions composées aux tensions simples triphasées :

$$C_{ucs3} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Ce modèle est représenté par le GIC, et le bloc REM nommé 'Transformation 1'.

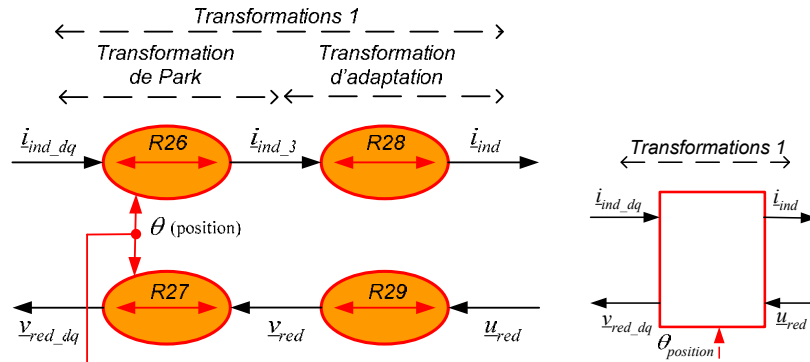


Fig. 12 : Modèles graphiques des transformations

2) Modélisation des circuits d'induit

Les équations mathématiques du modèle de Park de l'induit de la machine synchrone s'expriment par :

$$R18 : \begin{cases} \frac{di_{ind_d}}{dt} = \frac{1}{L_{s_d}} v_{ind_l_d} \\ \frac{di_{ind_q}}{dt} = \frac{1}{L_{s_q}} v_{ind_l_q} \end{cases} \begin{cases} v_{ind_l_d} = v_{1_d} - v_{ind_r_d} \\ v_{ind_l_q} = v_{1_q} - v_{ind_r_q} \end{cases}$$

$$R19 : \begin{cases} v_{1_d} = e_{ms_d} - v_{red_d} \\ v_{1_q} = e_{ms_q} - v_{red_q} \end{cases} \begin{cases} v_{ind_r_d} = R_s \cdot i_{ind_d} \\ v_{ind_r_q} = R_s \cdot i_{ind_q} \end{cases}$$

où:

- L_{s_d} (0,688 mH), L_{s_q} (0,688 mH) sont les inductances des bobines du stator pour le modèle de Park,

- R_s est la résistance du stator ($0,25 \Omega$),
- $\underline{i}_{ind_dq} = [i_{ind_d}, i_{ind_q}]^T$ est le vecteur des composantes d - q des courants issus de la machine,
- $\underline{v}_{ind_l_dq} = [v_{ind_l_d}, v_{ind_l_q}]^T$ est le vecteur des composantes d et q des tensions au bornes des bobines,
- $\underline{v}_{red_dq} = [v_{red_d}, v_{red_q}]^T$ est le vecteur des composantes d et q des tensions fournies par le redresseur,
- $\underline{v}_{ind_r_dq} = [v_{ind_r_d}, v_{ind_r_q}]^T$ est le vecteur des composantes d et q du vecteur des tensions au bornes des résistances R_s ,
- $\underline{e}_{ms} = [e_{ms_d}, e_{ms_q}]^T$ sont les composantes d et q du vecteur des forces électromotrices de la machine.

Ce modèle est représenté par le GIC et le bloc REM nommé 'Induit' à la Fig.3.

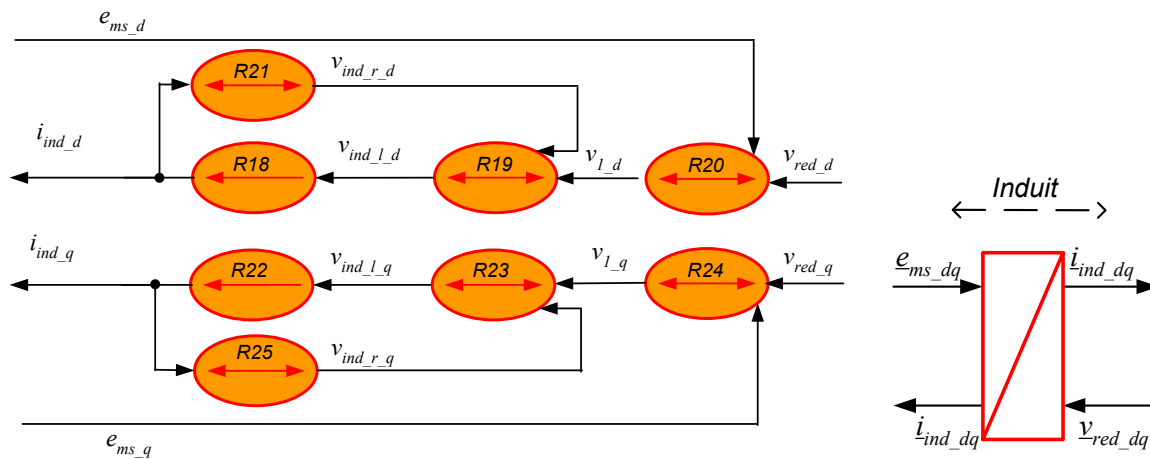


Fig. 13 : Modèles graphiques de l'induit de la machine synchrone

3) Modélisation de la partie électromécanique

En convention moteur, les force électromotrices sont exprimées en prenant en compte seulement l'harmonique fondamentale du flux d'entrefer:

$$R15: \begin{cases} e_{ms_d} = -p_m L_{sq} \Omega_{arb} i_{ind_q} \\ R16: \begin{cases} e_{ms_q} = p_m \phi_m \Omega_{arb} + p_m L_{sd} \Omega_{arb} i_{ind_d} \end{cases} \end{cases}$$

où:

- p_m est le nombre de paire de pôles (1),
- ϕ_m est le flux produit par l'aimant permanent (0,0534 Wb).

Le couple fourni par cette machine est exprimé par:

$$R17: C_{em} = p_m \phi_m i_{ind_q} + (L_{sd} - L_{sq}) p_m i_{ind_d} i_{ind_q}$$

Ce modèle de la conversion électromécanique est vu comme un système dynamique avec la vitesse et les courants comme entrées et le couple électromagnétique et les fem comme sorties. Ce modèle est représenté par le GIC, et le bloc REM nommé 'Conversion électromagnétique' à la Fig.

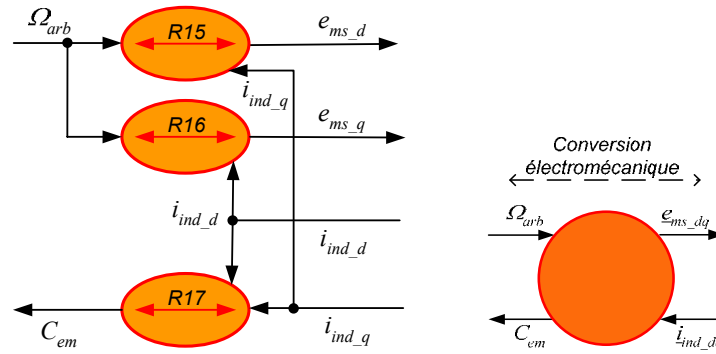


Fig.14. Modèles graphiques de la conversion électromécanique

4) Modélisation des convertisseurs statiques

Pour l'onduleur, l'analyse est identique. Les valeurs moyennes des grandeurs modulées sont exprimées par :

$$R32: \begin{cases} \langle \underline{u}_{ond} \rangle = \langle \underline{m}_{ond} \rangle \cdot v_{bat} \end{cases}$$

$$R33: \begin{cases} \langle \underline{i}_{ond} \rangle = \langle \underline{m}_{ond}^T \rangle \cdot \underline{i}_{moteur} \end{cases}$$

où $\langle \underline{m}_{ond} \rangle = [\langle \underline{m}_{ond13} \rangle, \langle \underline{m}_{ond23} \rangle]^T$ sont respectivement les fonctions de conversion pour l'onduleur.

Toutes les équations sont représentées par le GIC et le bloc REM nommés 'Onduleur' à la Fig.

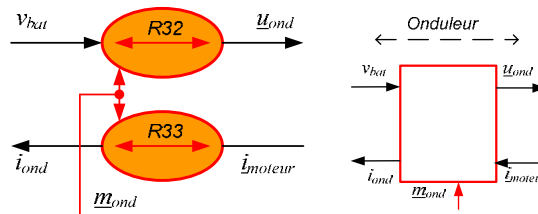


Fig.15. Modèles graphiques du modèle moyen de l'onduleur

- Complétez le modèle de la machine synchrone sous simulink.
- Relevez le couple du moteur, les courants triphasés, les courants en repère d-q et le courant issu de batterie.
- Réalisez la simulation de la structure globale avec la machine synchrone.

Annexe : Utilisation de Matlab-Simulink

1. Lancer Simulink sous Matlab.


1) Lancer Matlab

Cliquer l'icône Matlab



sur le bureau pour lancer Matlab.

2) Lancer Simulink

Soit taper 'simulink' dans la fenêtre de Matlab, soit cliquer l'icône  sur les barres d'outils pour lancer Matlab.

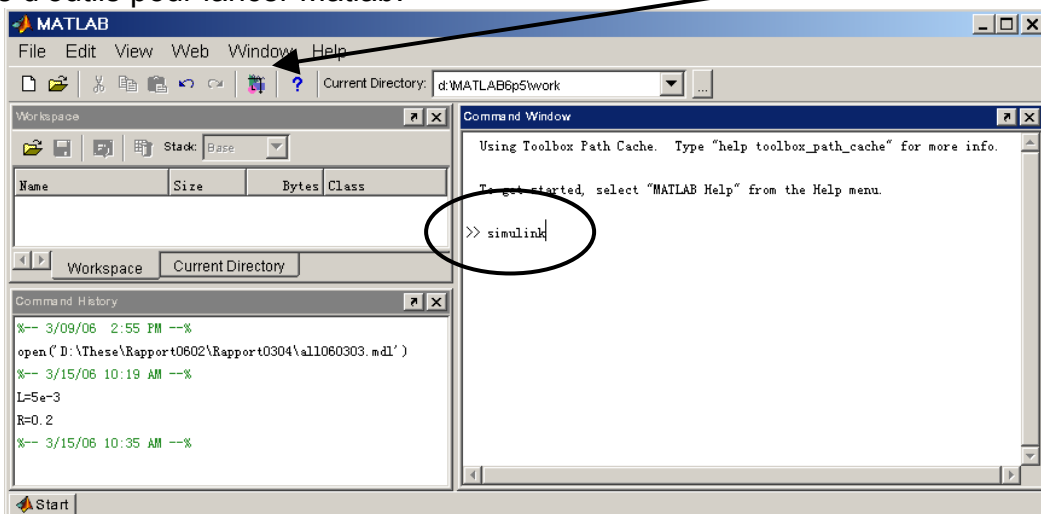

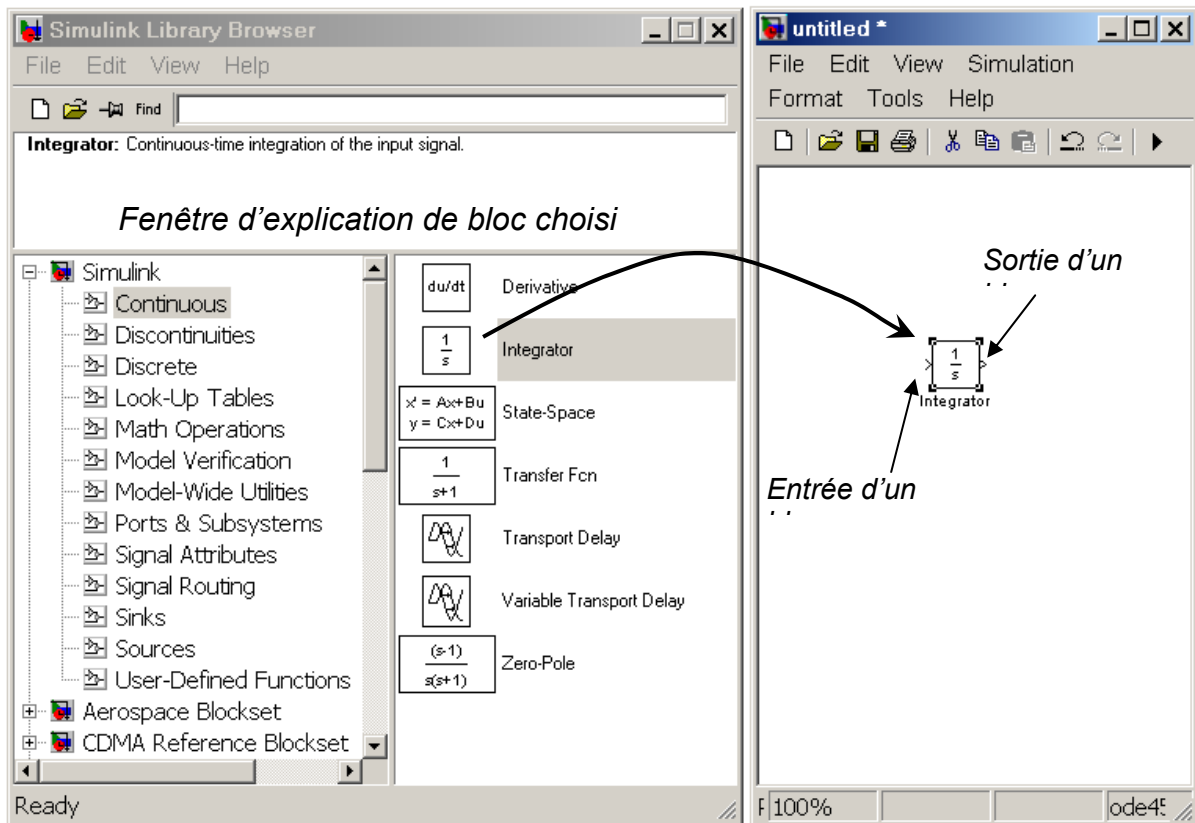


Figure 1. Lancer Simulink sous Matlab

2. Fenêtre de Simulink et les blocs à base de simulation

Utilisez l'icône  pour créer un nouveau programme de simulation.

On peut entraîner un bloc de la bibliothèque au programme créé.












Catégories des

Blocs de simulation
dans cette catégorie

Le programme de simulation créé

Figure 2. Fenêtre de Simulink

Table 1. Les blocs utilisés.

Fonctionnement	Catégorie	Symbole
Constant	[Simulink] -> [Sources]	 Constant
Echelon	[Simulink] -> [Sources]	 Step
Sinusoïde	[Simulink] -> [Sources]	 Sine Wave
Plus (ou moins)	[Simulink] -> [Math Operations]	 Sum
Multiple par un constant	[Simulink] -> [Math Operations]	 Gain
Intégrateur	[Simulink] -> [Continuous]	 Integrator
Miniscopie	[Simulink] -> [Sinks]	 Scope
Multiplex des signales	[Simulink] -> [Signal Routing]	 Mux
Division d'un vecteur	[Simulink] -> [Signal Routing]	 Demux

Remarque : Il faut changer les paramètres d'un bloc pour satisfaire notre besoin.

Exemple 1 :

Cliquez avec le bouton droit de la souris sur l'icône 'Sine Wave', et puis choisissez 'Sin paramètres...' (ou directement double-cliquez sur cet icône) pour modifier les valeurs.

$$v(t) = A \sin(\omega t) = 100 \sin(2\pi f \times t) \text{ avec } f=50 \text{ Hz}$$

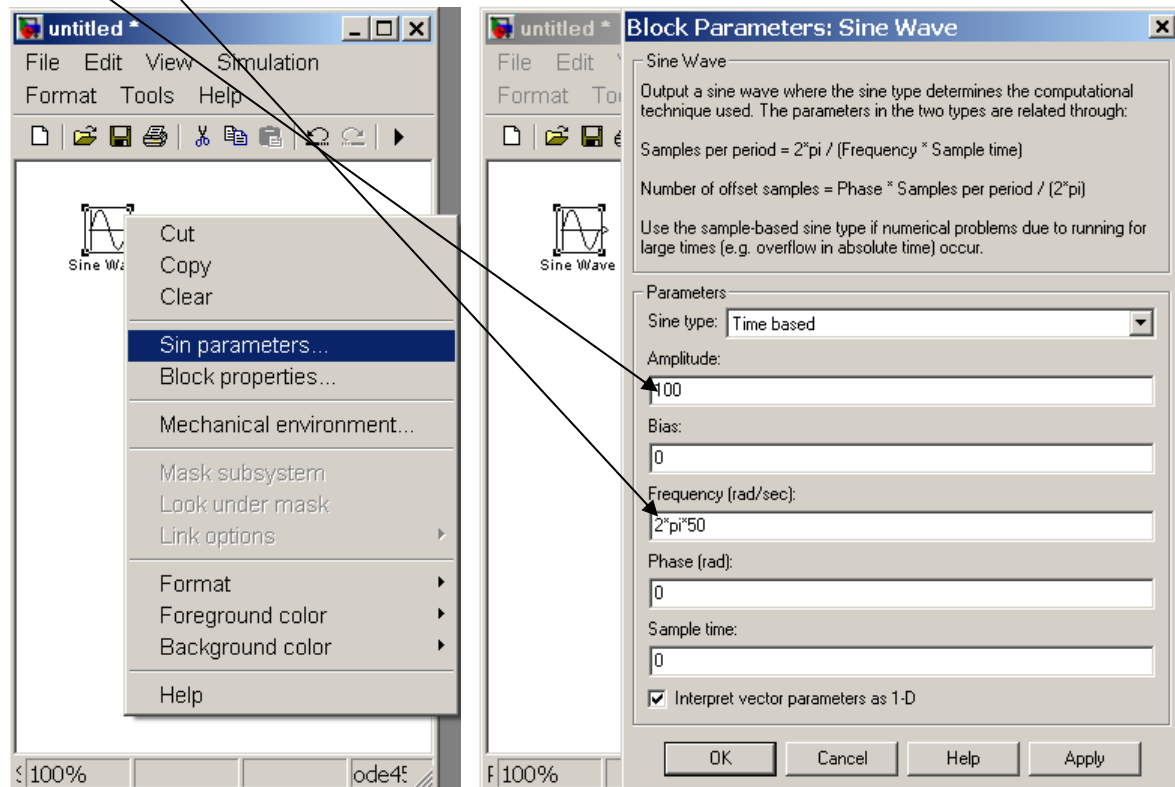
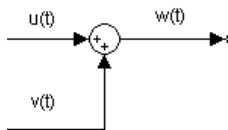


Figure 3. Modification des paramètres d'un bloc

Remarque : 'pi' est une constante sous Simulink, elle est égale à π .

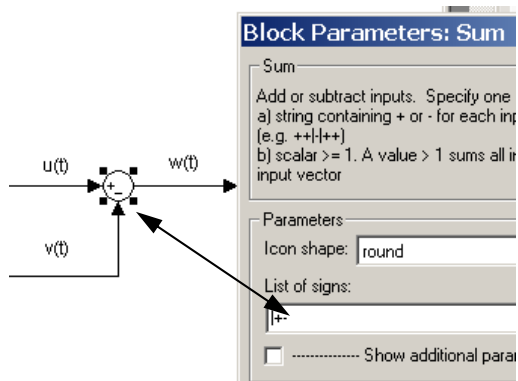
Exemple 2 :

$$w(t) = u(t) + v(t)$$



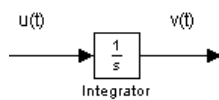
Exemple 3 :

$$w(t) = u(t) - v(t)$$



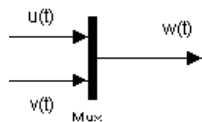
Exemple 4 :

$$v(t) = \int_0^t u(t) + u(0)$$



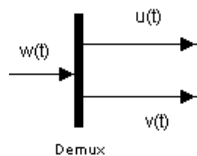
Exemple 5 :

$$w(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$$



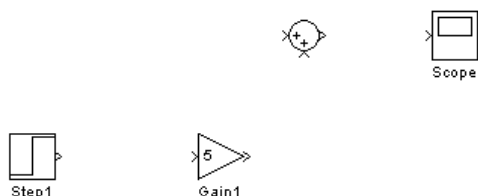
Exemple 6 :

Si $w(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$, nous avons

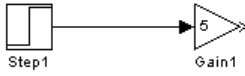


Exemple 7 : Liaison entre les éléments :

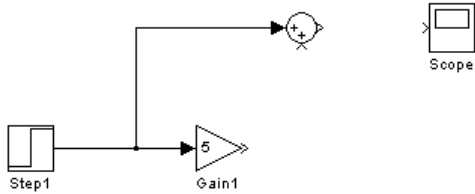
1) Placez les éléments



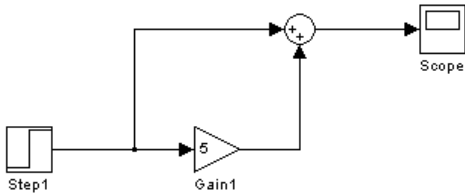
2) Saisissez la sortie de l'échelon en cliquant dessus et en maintenant le bouton droit de la souris enfoncé, puis déplacez-la jusqu'à l'entrée du gain.



3) Saisissez n'importe quel point dans la ligne en cliquant dessus et en maintenant le bouton droit de la souris enfoncé, puis déplacez-la jusqu'à l'entrée de l'opération plus.



4) les restes...



3) Lancer la simulation.

Avant de lancer la simulation, il faut spécifier les paramètres de la simulation. Sélectionnez 'Simulation parameters' montré comme la figure 4.

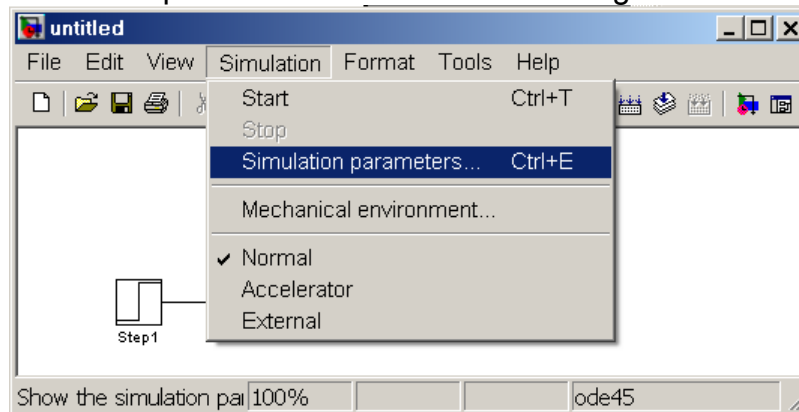


Figure 4. Paramètres d'une simulation

On change le type de pas en 'Fixed-step', comme montré dans la figure 5.

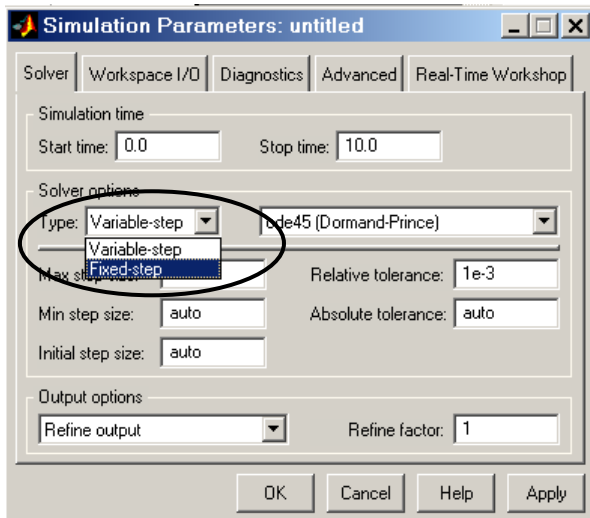


Figure 5. Changer le type de pas

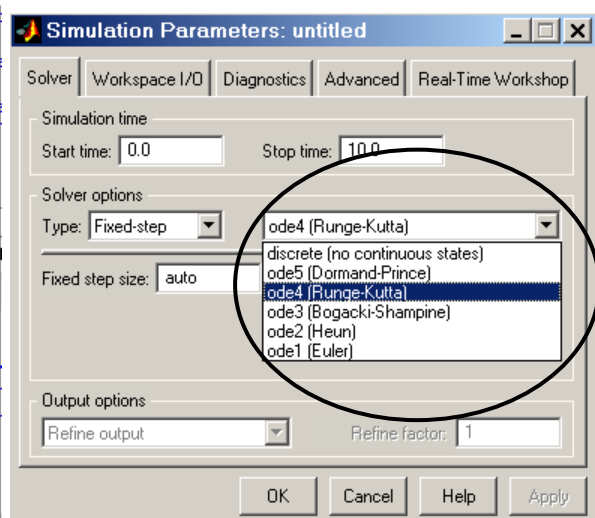


Figure 6. Changer la méthode de calcul

Ensuite, choisissez l'algorithme d'intégration 'ode4 (Runge-Kutta)' comme montré dans la figure 6. Enfin, spécifiez la durée de la simulation et le pas de la simulation par les valeurs désirées, comme montré dans la figure 7 pour cet exemple.

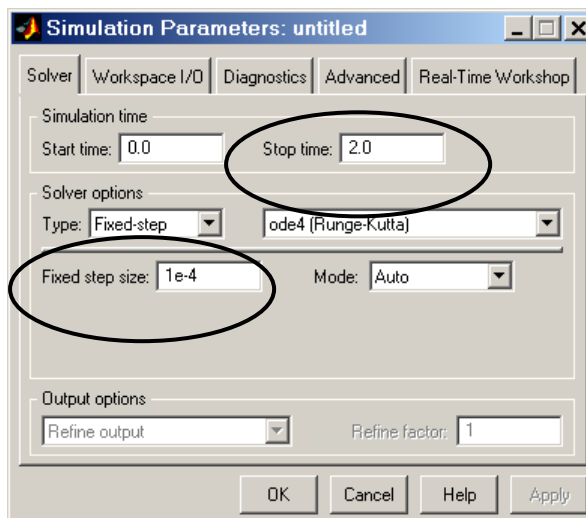



Figure 7. Changer la durée et le pas de la simulation

On peut alors lancer la simulation par l'icône  dans la barre des outils, ou sélectionner 'Simulation'->'Start' par le menu.

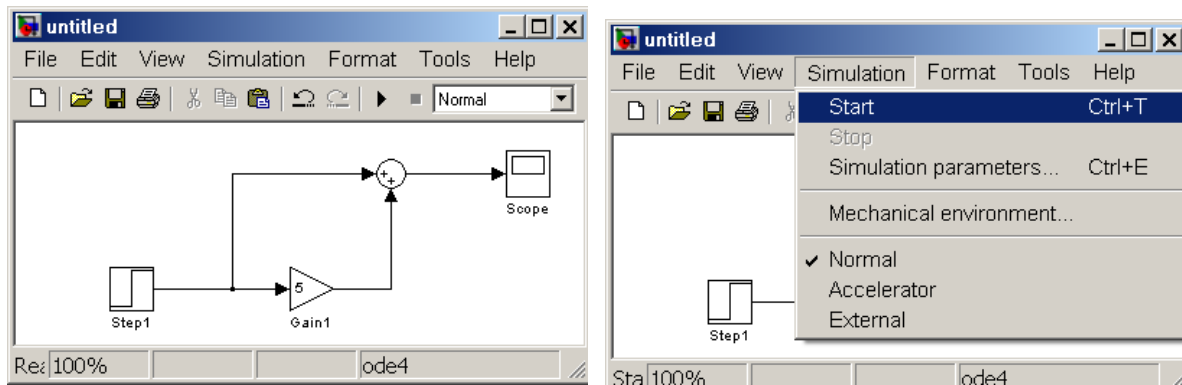


Figure 8. Lancer un programme de simulation

Après la simulation, on peut observer le résultat de la simulation par microscope en double-cliquant sur le symbole de microscope.

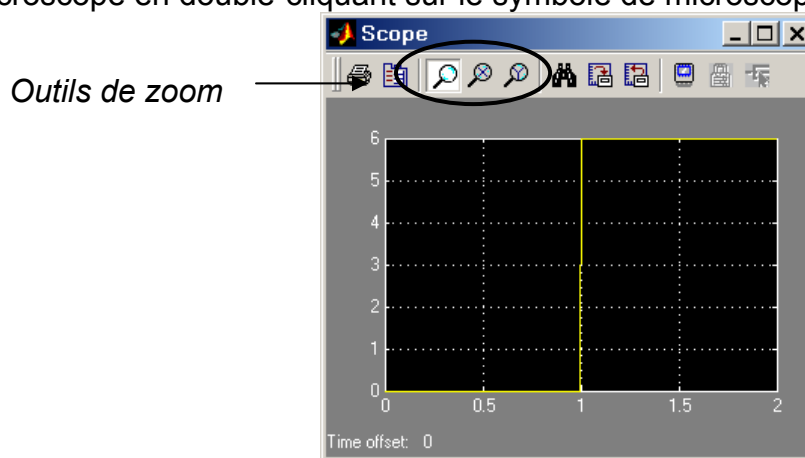


Figure 9. Observer le résultat de la simulation par un microscope

On peut utiliser les outils de zoom dans la barre des outils pour changer le zoom d'un microscope, à fin d'obtenir une image claire ou une valeur mesurée précise.

Remarque :

Le microscope n'enregistre que 5000 points par défaut. Si on veut enregistrer plus de point que 5000, il nous faut annuler la limitation des données enregistrées par 'Parameters' -> 'Data history' -> 'limit data points to last', montré dans la figure 10.

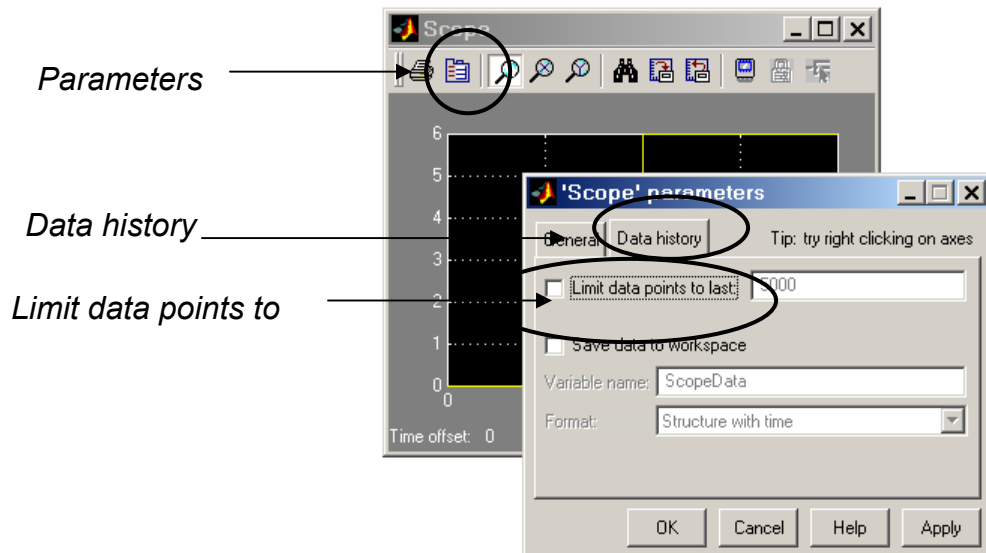


Figure 10. Annuler la limitation des données

Pour avoir plus d'information, sélectionnez 'Help' par le menu ou cliquez le bouton 'Help' si nécessaire.

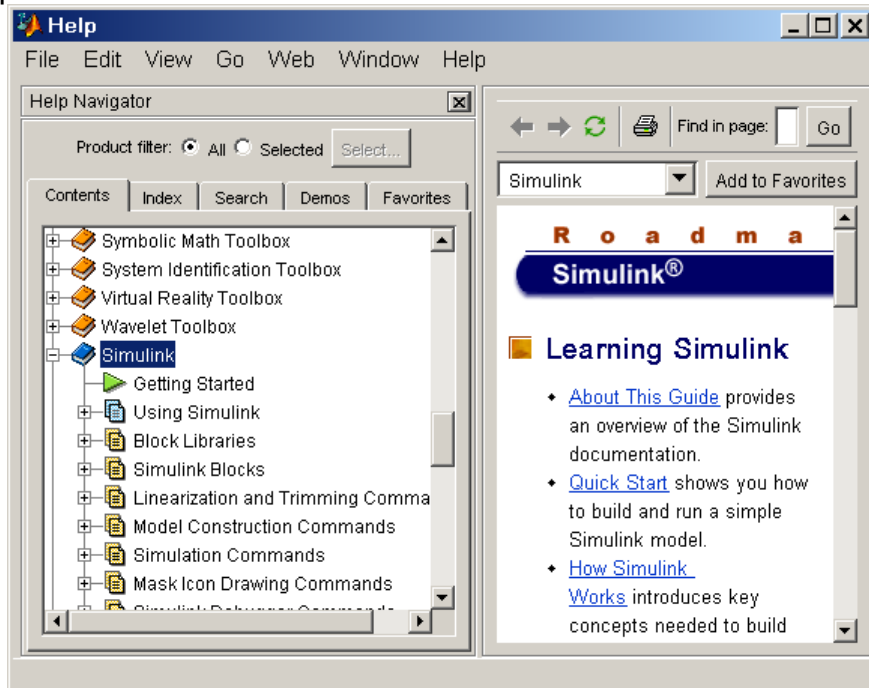


Figure 11. Aide sur Matlab