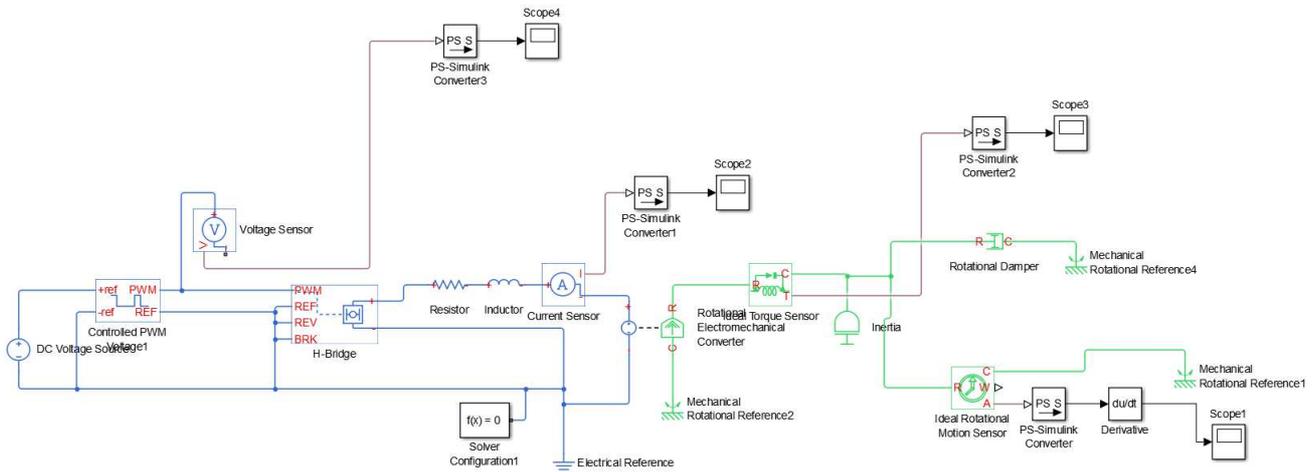


# Modélisation Multi-physique acausale du MOTEUR à courant continu avec MATLAB SIMULINK-SIMSCAPE



## Définitions générales

La modélisation multi physique et multi échelle dans la recherche et l'industrie

- La modélisation multi physique permet de prendre en compte les couplages entre phénomènes physiques différents (couplage mécanique – chimique, couplage mécanique des structures neutronique – thermo hydraulique dans la physique des réacteurs...)
- La modélisation multi échelle permet, grâce au calcul numérique, de déduire des propriétés macroscopiques à partir de modèles microscopiques

La modélisation multi physique en SII

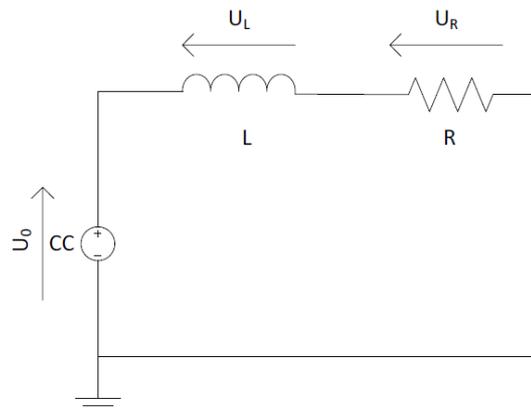
- Modélisation d'un système pluri technologique en intégrant tous les domaines de la physique nécessaires au fonctionnement de ce système

La modélisation dite « acausale »

- La modélisation acausale est une forme récente de modélisation des systèmes qui permet de décrire les équations modélisant les phénomènes physiques sans anticiper l'orientation des liens entre les composants ou phénomènes. Il n'y a notamment pas de choix particulier de variables échangées entre composants (force ou vitesse par exemple), ni de notion d'entrée / sortie. Cette particularité conduit à une très grande flexibilité des modèles de composants développés, une réutilisation des modèles sur de nouveaux projets et la possibilité de construire des bibliothèques de composants. Ces avantages en font un outil prisé en entreprise. D'un point de vue pédagogique, le modèle acausal est très proche de l'architecture matérielle et permet de simuler le comportement d'un système complexe sans avoir à écrire la moindre équation.

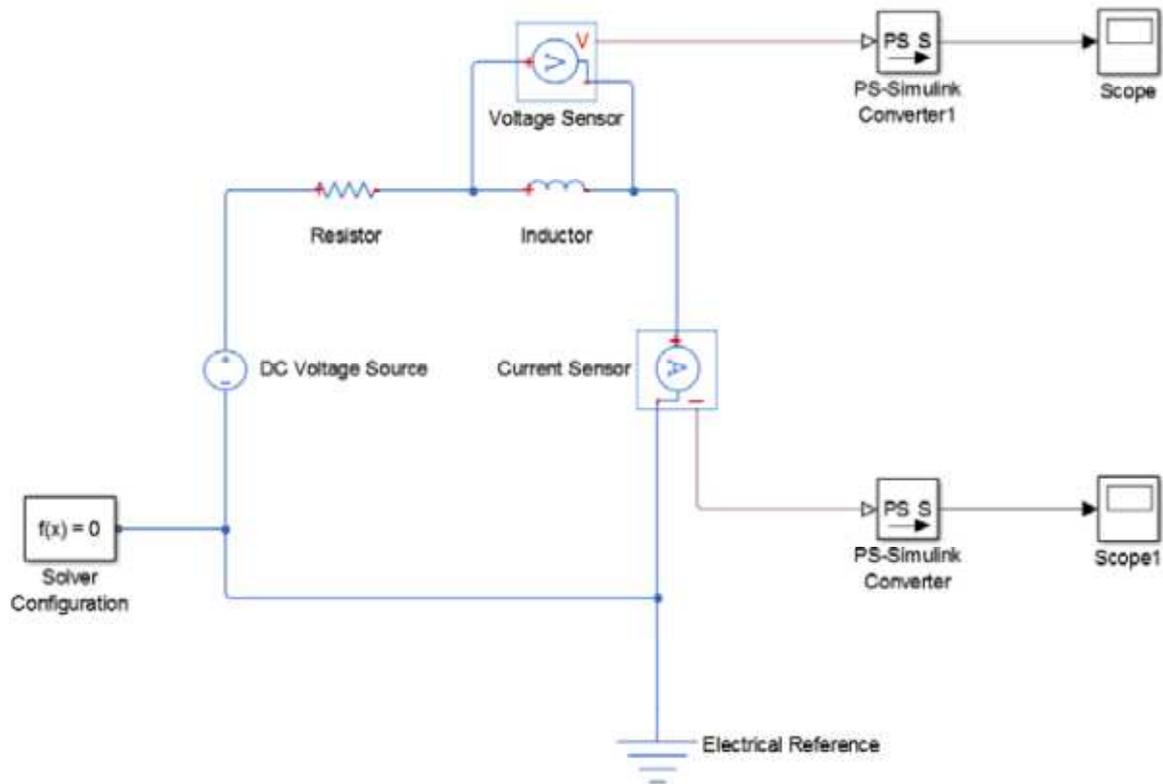
### Modélisation acausale

Le circuit RL alimenté par une source de tension  $U_0$  est représenté par le schéma électrique suivant :



$$R=20\Omega \text{ et } L=0,01\text{mH}$$

La représentation acausale ne privilégie aucune grandeur physique particulière et est basée sur la notion de composants. Ainsi, dans Matlab-Simulink, le diagramme correspondant au circuit RLC est le suivant :



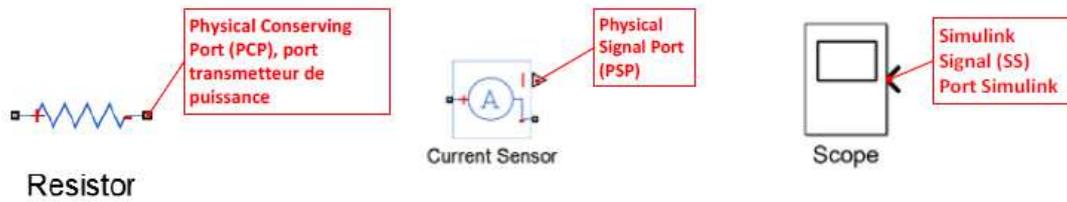
On trouve les composants dans la bibliothèque des composants :

Fonction du composant	Représentation	Bibliothèque
Source de tension continue	 DC Voltage Source	Simscape/Fondation Library/Electrical/Electrical Sources
Résistance	 Resistor	Simscape/Fondation Library/Electrical/Electrical Element
Inductance	 Inductor	Simscape/Fondation Library/Electrical/Electrical Element
Référence électrique	 Electrical Reference	Simscape/Fondation Library/Electrical/Electrical Element
Capteur de courant	 Current Sensor	Simscape/Fondation Library/Electrical/Electrical Sensors
Capteur de tension	 Voltage Sensor	Simscape/Fondation Library/Electrical/Electrical Sensors
Conversion d'un signal physique en signal Simulink	 PS-Simulink Converter	Simscape/Utilities
Moniteur	 Scope	Simulink/Sinks
Solveur	 Solver Configuration	Simscape/Utilities

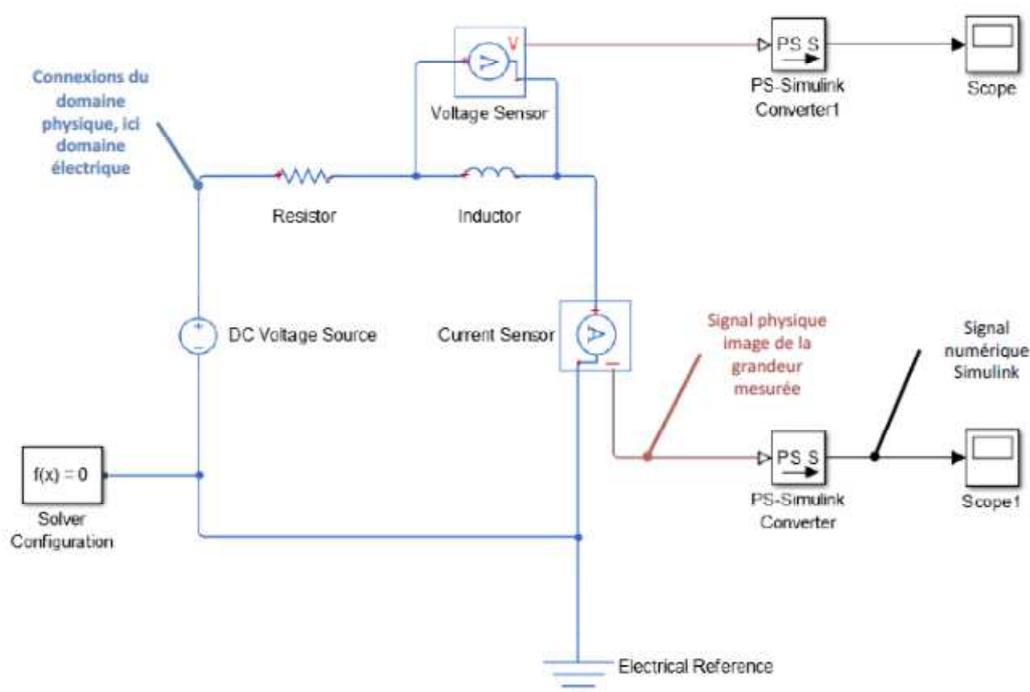
NB : commandes utiles afin de relier et placer les composants

Commandes utiles		
Fonctions	Actions	Raccourcis clavier
Rotation d'un composant sens horaire	<b>Clic droit</b> sur le composant, <b>Rotate&amp;Flip/Clockwise</b>	Ctrl+R
Rotation d'un composant sens antihoraire	<b>Clic droit</b> sur le composant, <b>Rotate&amp;Flip/CounterClockwise</b>	Shift+Ctrl+R
Inversion gauche/droite d'un composant	<b>Clic droit</b> sur le composant, <b>Rotate&amp;Flip/Flip Bloc/Left Right</b>	Ctrl+I
Inversion haut/bas d'un composant	<b>Clic droit</b> sur le composant, <b>Rotate&amp;Flip/Flip Bloc/Up Down</b>	
Copier un composant	<b>Clic droit</b> sur le composant à dupliquer, puis <b>glisser/déposer</b> en gardant le bouton droit appuyé	
Supprimer un composant	<b>Clic droit</b> sur le composant puis sélectionner <b>Delete</b>	Suppr

Avant de paramétrer les blocs et de lancer la simulation, analysons la nature des différentes connexions entre les blocs du modèle. Le modèle présenté utilise différents types de ports et de connexions. Les ports peuvent être classés en trois catégories.



- Les ports de type « **Physical Conserving Port** » (PCP) qui transmettent la puissance entre deux composants d'un même domaine. Les connexions relatives à ces ports ne sont pas orientées et sont analogues aux liens qui relient les composants dans la réalité et se situent dans le domaine de la modélisation acausale. Dans le cas de notre modèle qui ne fait intervenir que le domaine électrique, ces connexions sont des fils électriques. Ils sont donc traversés par un courant et il est possible de mesurer une différence de potentiel entre deux points appartenant à ces connexions. La mesure du courant dans le circuit se fait par un capteur de courant placé en série dans le circuit. La mesure de la tension aux bornes de la bobine se fait par un capteur de tension placé en parallèle, aux bornes de la bobine.
- Des ports de type « **Physical Signal Port** » (PSP) qui transmettent des signaux physiques prélevés à l'aide de capteurs sur le modèle. Ces signaux sont orientés et sont l'image de la grandeur physique prélevée. Ces ports et ces connexions fonctionnent selon le principe de causalité.
- Des ports de type « **Simulink Signal** » (SS), qui transmettent des signaux numériques orientés exploitables par les blocs de la bibliothèque Simulink. Ces ports et ces connexions fonctionnent selon le principe de causalité. Le type de connexion peut être identifié par le format du port qui lui est associé. La construction des modèles nécessite une parfaite compréhension de la nature des informations et des signaux qui parcourent les différentes connexions ainsi que l'identification de la nature des ports des blocs qui interviennent dans la modélisation. Des ports de natures différentes ne peuvent pas être reliés. De plus deux ports de types **Physical Conserving Port** (transmetteur de puissance) ne peuvent être reliés que s'ils appartiennent au même domaine physique. Afin d'apporter plus de lisibilité aux modèles réalisés avec Simscape, chaque domaine physique est représenté avec une couleur différente.



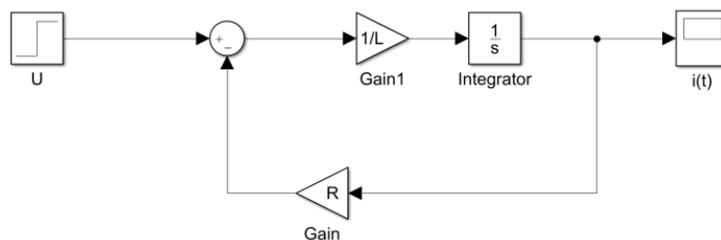
Il n'est pas nécessaire d'écrire les équations du système car chaque bloc les contient. Il suffit simplement de configurer les paramètres de chaque bloc (R, L et U) en double-cliquant dessus. Un lien entre deux blocs contient dans ce cas à la fois le potentiel et l'intensité. Cette modélisation permet d'exprimer des relations entre composants sans connaître la grandeur que l'on cherche à calculer. Pour extraire cette grandeur, on utilisera des blocs de type capteur et ainsi entrer dans le monde causal.

### Modélisation acausale (rappel)

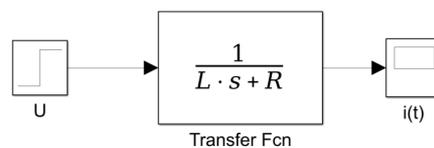
Dans une représentation purement causale, les liens représentent une grandeur physique particulière et le diagramme est alors une traduction des équations plutôt qu'une représentation des composants. Lors de la modélisation, la grandeur de sortie est donc exprimée dans une relation directe contenant des blocs « intégrale » pour chacune des équations contenant une dérivée. Cela donne :

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) = R i(t) + L \frac{d i(t)}{dt} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} U(p) &= (R + Lp) I(p) \\ I(p) &= \frac{1}{(R + Lp)} U(p) \end{aligned}$$

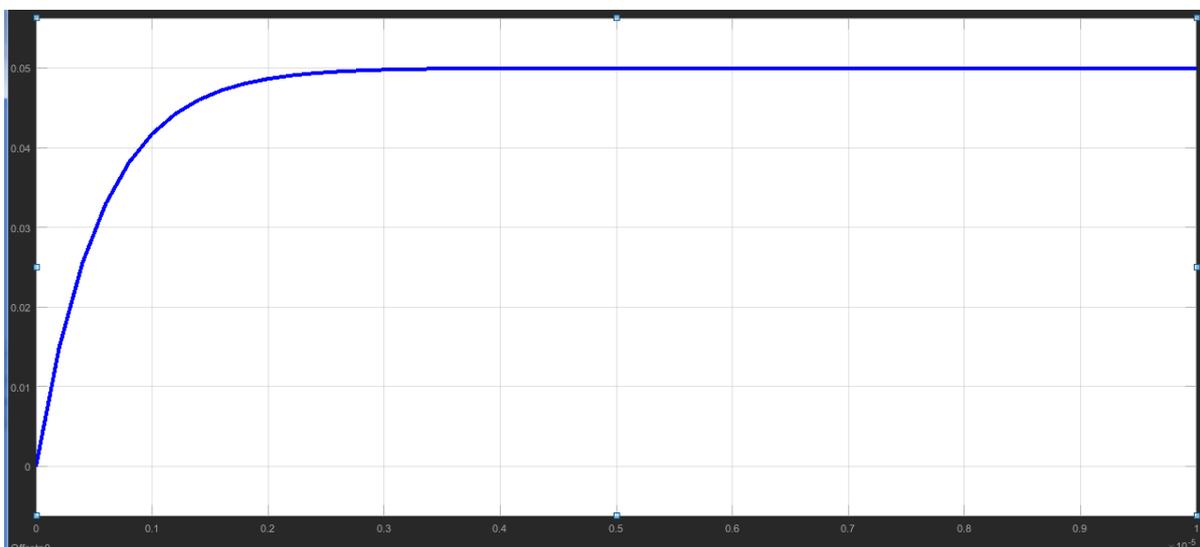
On peut alors modéliser les équations par un diagramme de ce type :



Celui-ci est plus compliqué que dans le diagramme de la modélisation acausale (et surtout moins explicite). On a aussi perdu la signification physique. L'utilisation de la transformée de Laplace permet, entre autre, de simplifier la représentation causale par le diagramme suivant en supprimant la boucle avec R par exemple.



On obtiendra fort heureusement une réponse simulée identique dans les deux cas de simulation.



# LANCEMENT DU LOGICIEL

Lancer Matlab , cliquez sur SIMULINK et ouvrir un nouveau modèle SIMULINK .

The image illustrates the process of launching Simulink and creating a new model in MATLAB R2017a. It consists of three sequential screenshots:

- Top Screenshot:** The MATLAB R2017a interface is shown. The **SIMULINK** icon in the ribbon is highlighted with a black box. A black arrow points from this icon to the next screenshot.
- Middle Screenshot:** The **Simulink Start Page** is displayed. The **Blank Model** template is highlighted with a black box. A black arrow points from this template to the final screenshot.
- Bottom Screenshot:** The **Simulink Library Browser** and the **untitled** workspace are shown. The **Simulink** tab in the workspace is highlighted with a black box. A black arrow points from this tab to the final screenshot. The workspace contains a large empty rectangle labeled **ESPACE DE TRAVAIL**. The **Simulink Library Browser** is labeled **BIBLIOTHEQUE DE COMPOSANTS**.

## PRESENTATION DU PROBLEME

La plupart des systèmes développés par les élèves en projet nécessite le pilotage d'un moteur à courant continu. Il est indispensable de modéliser ces moteurs à courant continu pour être capable de réaliser par exemple un asservissement ou bien pour évaluer les performances du système.

Le moteur à courant continu est modélisé, dans son régime linéaire, par les quatre équations :

N°	Équation	En régime transitoire et phase motrice :
1	électrique :	$u(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$
2	mécanique :	$C_m - C_R - f\omega(t) = J_{eq} \frac{d\omega(t)}{dt} \quad C_R \geq 0$
3	mécatronique :	$e = K_e \omega(t)$ $C_m = K_i i(t)$

L'équation de la mécanique issue de la dynamique est obtenue en isolant l'arbre moteur et en lui appliquant le théorème de l'énergie cinétique sachant qu'il est soumis au couple moteur  $C_m$ , à un couple résistant  $C_R = C_C + C_s$ .

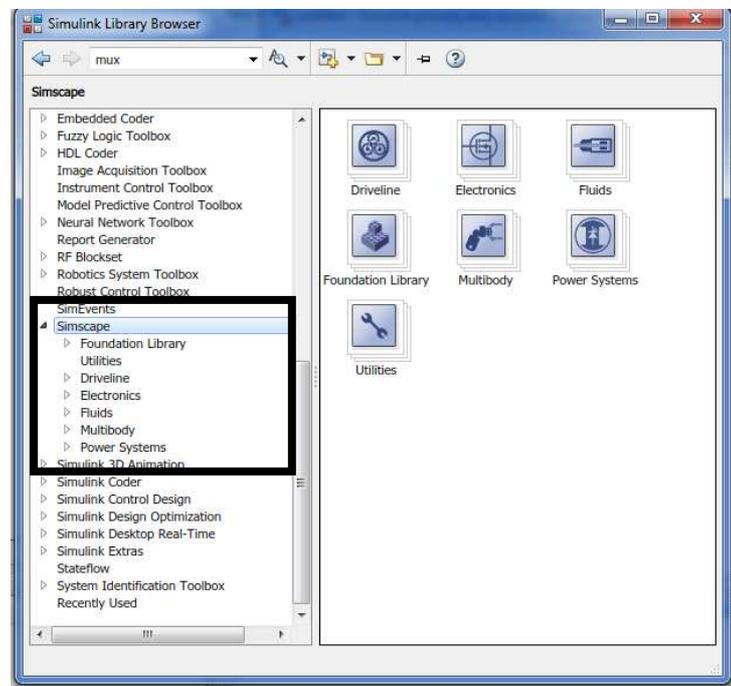
- ✓  $C_C$  : Couple de charge
- ✓  $C_s$  : Couple de frottement sec

**L'objectif du TP est de montrer comment modéliser le moteur sous le module SIMULINK-SIMSCAPE en utilisant un modèle acausal et une modélisation multi-physique**

## MODÉLISATION MÉCANIQUE

La structure cinématique du moteur soumis à des actions mécaniques peut directement être traduite dans **SIMULINK-SIMSCAPE**

La bibliothèque de SIMULINK de bibliothèques sous MATLAB vous propose plusieurs sous dossier et pour ce TP on va utiliser les blocs définis dans le dossier SIMSCAPE qui est lui-même décomposé en plusieurs sous dossiers. La copie d'écran ci-dessus vous donne la structure.



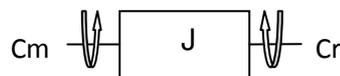
Pour commencer, on considère le rotor en liaison pivot soumis à un couple  $C_m$  et un couple  $C_R$ . Un solide en rotation autour d'un axe fixe est caractérisé mécaniquement par son moment d'inertie autour de l'axe de rotation

### ⇒ Modèle sans frottement visqueux

Mettre en place les blocs suivants comme indiqué sur le schéma ci dessous :



Ce schéma mécanique se traduit par



On utilisera les composants suivants :

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Solide en rotation autour d'un axe fixe	 Inertia1	Simscape/Foundation Library/Mechanical	$J = 0,00002 \text{ kg.m}^2$
2 Couples extérieurs Couple moteur $C_m$	 Ideal Torque Source3	Simscape/Foundation Library/Mechanical	$C_m$ $C_R$

Ne pas lancer de simulation à ce stade car il manque des éléments.

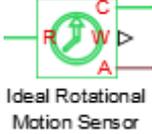
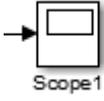
☞ **Question n°1 : A quelle équation correspond ce schéma ?**

☞ **Réponse :**

Sur un tel schéma on ne spécifie pas **les évolutions des grandeurs**. De la même manière, il faut indiquer dans SIMSCAPE comment évoluent les couples  $C_m$  et  $C_R$ .

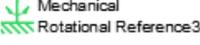
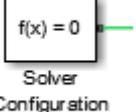
Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Deux valeurs Constantes		Simscape/Foundationlibrary/Physicalsignals/sources	$C_m = 0.11\text{Nm}$ $C_R = -0.01\text{Nm}$

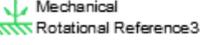
De plus, on veut visualiser **les grandeurs qui transitent sur chaque lien** entre les composants. Pour cela il faut choisir l'outil de mesure en fonction du type de signal qui parcourt ce lien (électrique, mécanique ou autre) et lui associer un oscilloscope.

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Capteur de position		Simscape/Foundation Library/Mechanical	
Oscilloscope		Simulink/Commonly Used Blocks	
PS-Simulink Converter (changement de format de la constante vers la source)		Simscape/Utilities	

RQ : Dans un modèle mécanique 1D de type rotation, ces grandeurs sont l'accélération, la vitesse et la position angulaires ainsi que le couple. Le Capteur nous restituera l'angle avec le port A et la vitesse avec le port W.

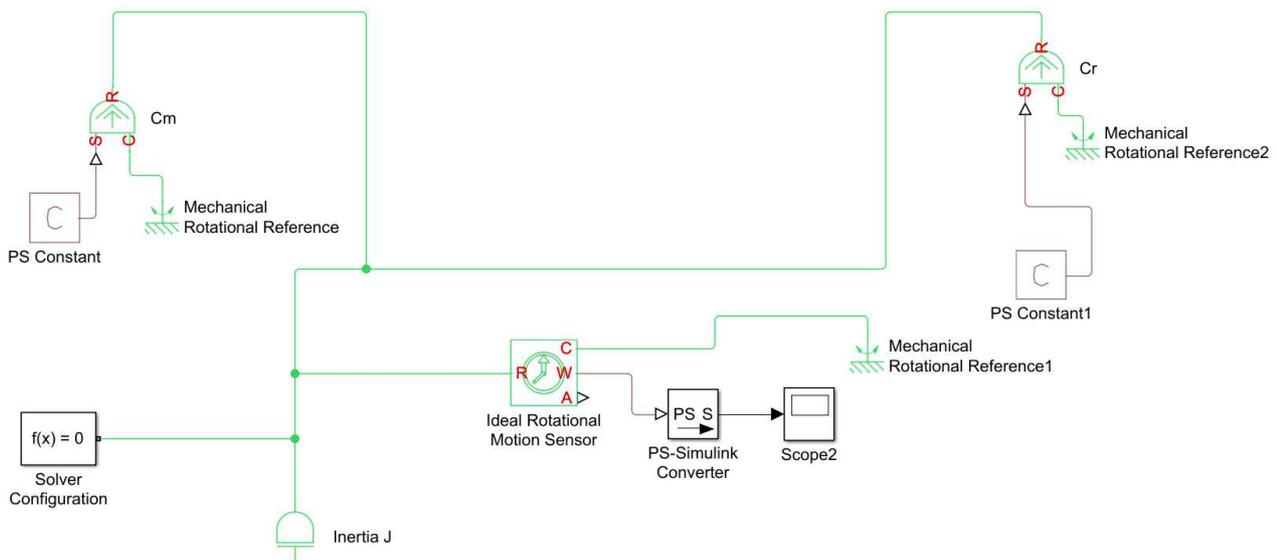
Quelques composants supplémentaires sont nécessaires pour compléter le tout :

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Référence mécanique (références communes ici : <b>bâti</b> )		Simscape/Foundation Library/Mechanical	
Solver(la connection du circuit avec un solver est indispensable dans Matlab , sous Scilab c'est implicite)		Simscape/Utilities	

RQ : le bâti doit toujours être spécifié dans une étude mécanique (référentiel galiléen d'étude) : 

Ici les couples  $C_r$  et  $C_m$  sont exercés par le **bâti** !!!

Vous obtenez le schéma ci-contre. Lancer la simulation.



**Question n°2 :** Expliquer la forme et les caractéristiques de la courbe obtenue par simulation pour la vitesse. Retrouver par le calcul de résultat.

**Réponse :**

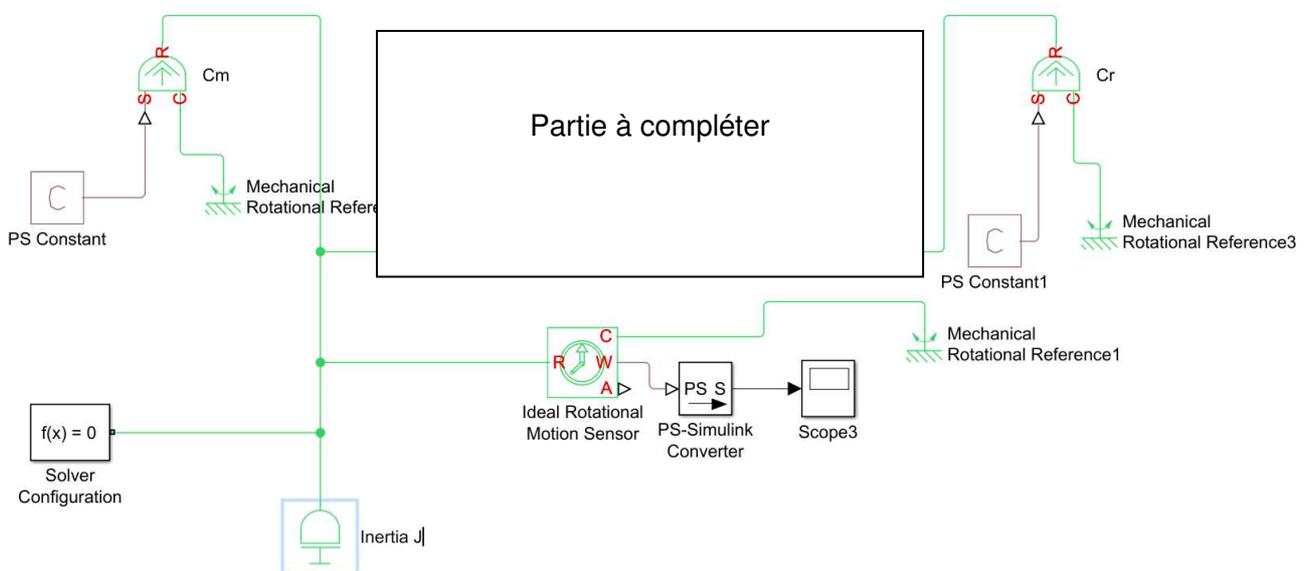
⇒ **Modèle avec frottement visqueux**

Cependant ce modèle ne prend pas en compte la limitation de l'apport en énergie, ni les frottements...

Le couple de frottement visqueux existe **entre le bâti et le rotor**. Pour le modéliser, il suffit d'ajouter sur le lien représentant l'axe :

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Viscosité	 Rotational Damper	Simscape/Foundation Library/Mechanical	$f = 0.0001\text{Nm.s}$

On attend le modèle suivant :



Lancer la simulation.

☞ Question n°3 :

- ***Expliquer la forme et les caractéristiques de la courbe de vitesse obtenue par simulation. Retrouver par le calcul le résultat.***

☞ Réponse :

- ***Donner le modèle causal équivalent, créer le schéma bloc équivalent et faire une simulation avec Matlab ; Comparer les résultats entre modélisation causale et acausale***

☞ Réponse :

## MODELISATION ELECTRIQUE ET COUPLAGE

Le moteur à courant continu est modélisé, dans son régime linéaire, par les quatre équations :

N°	Équation	En régime transitoire et phase motrice :
1	électrique :	$u(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$
2	mécanique :	$C_m - C_R - f\omega(t) = J_{eq} \frac{d\omega(t)}{dt} \quad C_R \geq 0$
3	mécatronique :	$e = K_e \omega(t)$ $C_m = K_i i(t)$

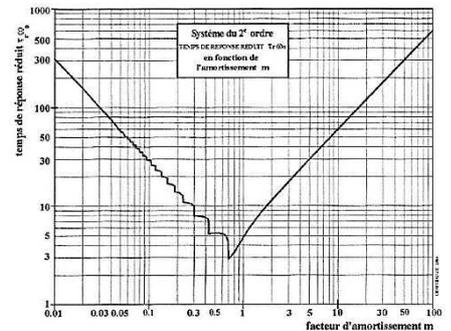
Dans la représentation multi physique, le schéma électrique est à nouveau comparable au circuit électrique. Il ne faut pas oublier de mettre une masse dans le circuit. De la même manière le bâti doit toujours être spécifié dans une étude mécanique (référentiel galiléen d'étude).

⇒ **Modèle de connaissances du système**

☞ **Question n°4 : Trouver la fonction de transfert  $H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)}$  et déterminer**

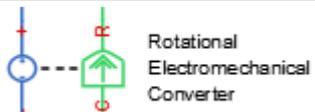
**le temps de réponse à 5% avec l'abaque du temps réduit  $T_{r5\%} \omega_0$  ou avec Psyslic.**

☞ **Réponse :**

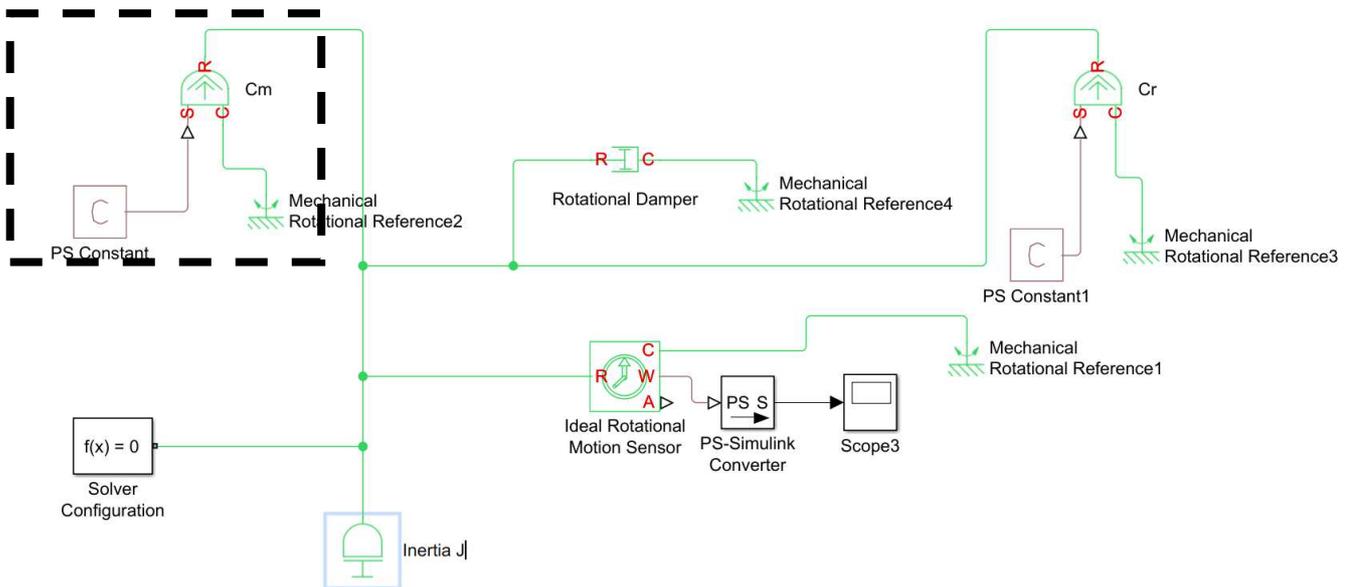


Afin de réaliser la modélisation, on utilisera les composants suivants et on prendra  $C_r=0$  N.m

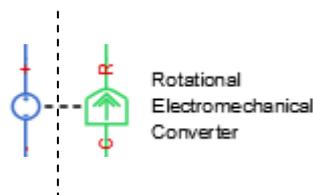
⇒ **Modélisation multi physique**

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Source de tension		Simscape/Electrical	<b>12 Volts</b>
Résistance		Simscape/Electrical	$R = 1$ Ohm
Inductance		Simscape/Electrical	$L = 0,001$ H
MCC		Simscape/Electrical	$K_e = 0,01$ Nm.A <sup>-1</sup>
Référence électrique (masse)		Simscape/Electrical	

On partira du dernier schéma et on remplacera la partie concernant  $C_m$  par la modélisation électromécanique du moteur :



NB : le solver peut être indifféremment relié à la partie électrique ou la partie mécanique, car ces deux dernières sont reliées par le composant convertisseur électromécanique :



Partie électrique (E,i)

Partie mécanique ( $\omega$ m,  $C_m$ )

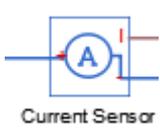
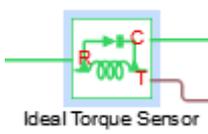
Lancer la simulation.

☞ **Question n°5 : Expliquer la forme et les caractéristiques de la courbe de vitesse obtenue par simulation.**

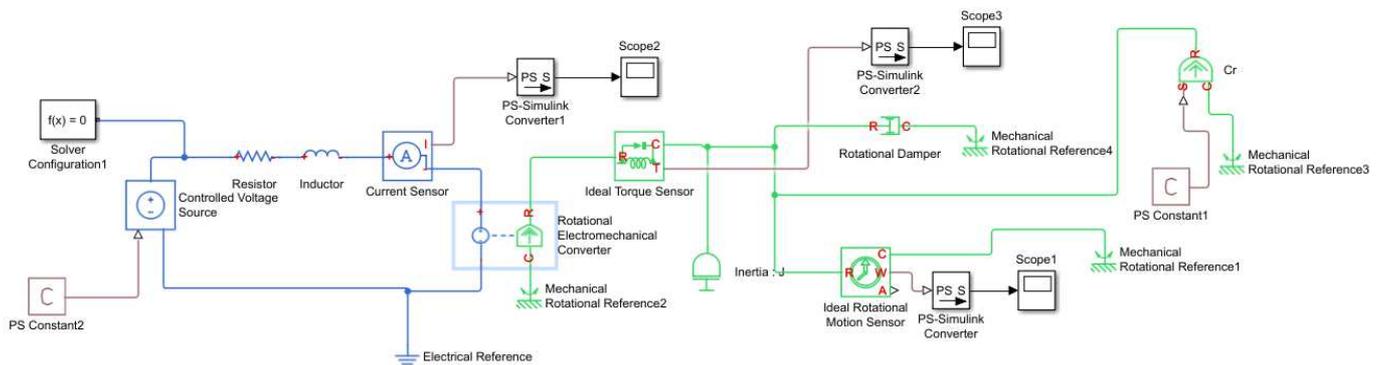
☞ **Réponse :**

PS : Vous pouvez refaire une simulation avec un temps de simulation plus court pour voir l'évolution de la vitesse dans le régime transitoire.

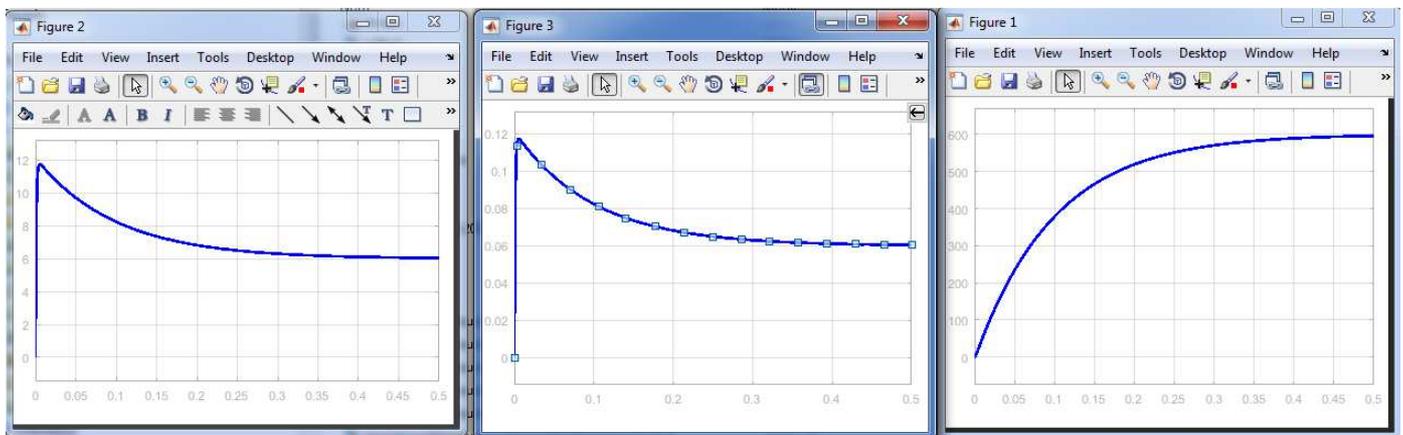
On veut développer davantage l'instrumentation et mesurer l'intensité parcourant le circuit et le couple moteur :

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Ampèremètre		Simscape/Electrical	Le port I mène à l'oscillo. Le capteur est monté en série
Capteur de couple		Simscape/Mechanical	Le port T mène à l'oscillo. Le capteur est monté en série

N'oubliez pas l'oscilloscope permettant de visualiser les courbes. Lancer une simulation et optimiser le temps de simulation.



On doit trouver les résultats suivants :



Intensité (en A)

Couple (en N.m)

Vitesse de rotation (rad/s)

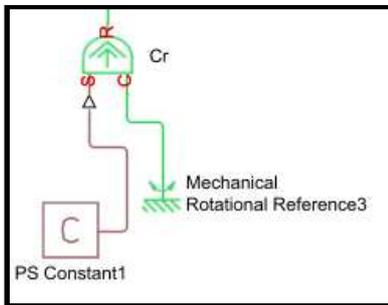
☞ **Question n°6 : Que peut-on dire des courbes obtenues? A quelle équation correspond ce résultat? Retrouver par calcul les valeurs de  $C_m$  et  $I$  en régime permanent**

☞ **Réponse :**

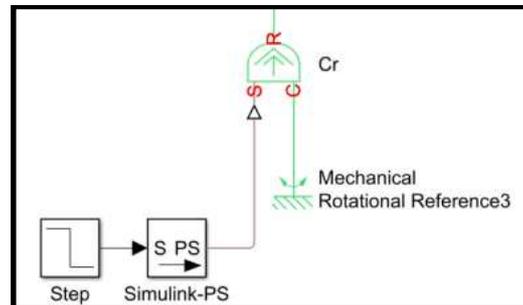
⇒ **Prise en compte d'un couple résistant**

On veut simuler le fonctionnement du moteur avec un couple résistant  $C_r$  de **-0.05Nm** en échelon avec un temps de décalage de **0.5s**.

On procédera pour ce faire de la manière suivante :

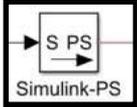


sera remplacé par



On veillera à paramétrer correctement l'échelon.

Lancer la simulation et optimiser le temps de simulation.

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage <i>Double click</i>
Simulink Converter-PS- (changement de format de la constante vers la source)		Simscape/Utilities	

☞ **Question n°7 : Expliquer la forme et les caractéristiques des courbes obtenues par simulation. Retrouver par le calcul  $\omega$ ,  $I$  et  $C_m$  en régime permanent.**

☞ **Réponse :**

## MODELISATION DU PILOTAGE PAR HACHEUR

### ⇒ Principe du hacheur

Le hacheur est le préactionneur le plus courant pour l'asservissement des moteurs à courant continu. Il permet, en moyenne, de doser le niveau de tension aux bornes du moteur. Associé à une mesure de courant et une régulation, il peut aussi doser le niveau d'intensité dans le moteur.

Le pilotage d'un hacheur se fait par l'intermédiaire d'un PWM (Pulse Width Modulation, MLI comme Modulation de Largeur d'Impulsions en français).

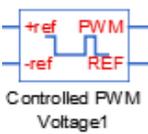
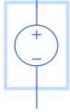
Le principe est simple : un signal créneau de 0 (État logique bas) à 1 V (État logique haut) dont le rapport cyclique est variable est généré. Comme la fréquence de ce signal est élevée (environ **500 Hz** fréquemment), si le système connecté à la sortie PWM est « lent », il ne voit à ses bornes que la tension moyenne du signal PWM (il fonctionne ainsi comme un filtre).

Le hacheur fonctionne selon le même principe que le signal PWM : il hache la tension issue d'une l'alimentation externe grâce à des transistors (modélisé ici par des interrupteurs commandés) ; la tension moyenne dépend alors du rapport cyclique. C'est le signal PWM qui est utilisé pour commander ces transistors.

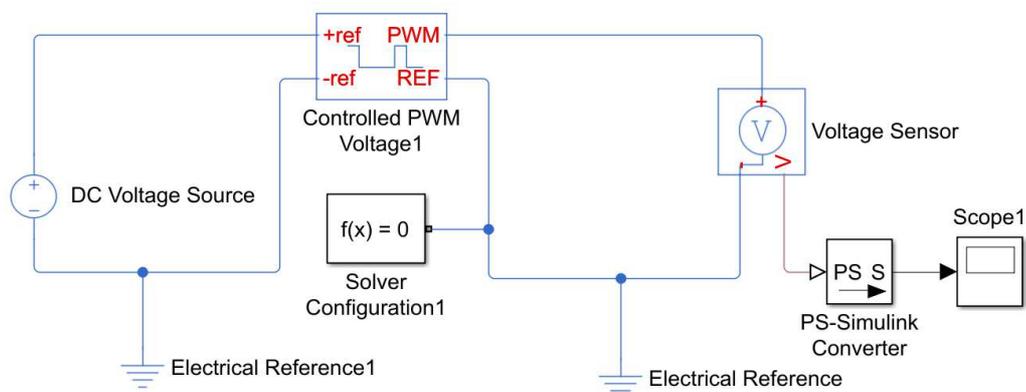
### ⇒ Signal PWM

- ✓ Créer une nouvelle fenêtre
- ✓ Placer dans cette fenêtre les blocs indiqués pour réaliser le schéma-bloc ci-contre

On utilisera les composants suivants :

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage
Voltmètre	 Voltage Sensor	Simscape/Electrical	
PWM	 Controlled PWM Voltage1	Simscape/Electronics	<b>f = 500 Hz</b> Input value Vmin for 0% duty cycle:0V Input value Vmax for 100% duty cycle:8V <b>Output voltage amplitude:1V</b>
DC voltage Source	 DC Voltage Source	Simscape/Electrical	U=4V

On effectuera la modélisation suivante :



Lancer une simulation avec un temps d'étude permettant de visualiser 10 périodes et observer le signal.

☞ **Question n°8 : Quel est le rapport cyclique de ce signal?**

🔗 **Réponse :**

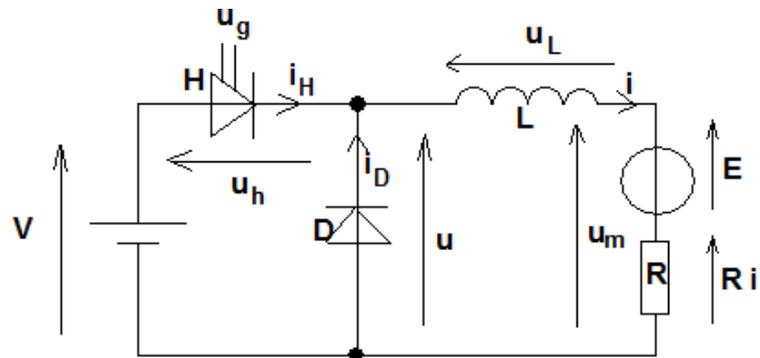
☞ **Question n°9 : Modifier la valeur de  $U$  pour obtenir un rapport cyclique de 1/8.**

☞ **Réponse :**

⇒ **Le hacheur : modélisation 1 (bloc Matlab)**

Le hacheur le plus simple est le hacheur série 1 quadrant.

Reprendre la modélisation du moteur:



- Modifier le couple résistant  $C_r=0.001\text{N.m}$
- Copier et coller la structure du signal PWM avec **un rapport cyclique de 1/2**
- Rajouter les éléments suivant correspondant au hacheur :

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage Double click
Pont en H	 H-Bridge	Electrique/Composant basique/Passif	Modifier selon les images suivantes

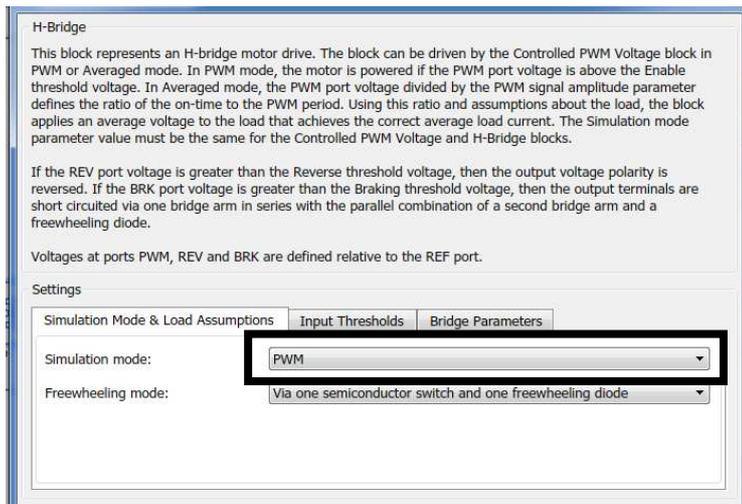
Présentation du composant :

Ce composant modélise un pont en H. Il possède 6 ports de type PCP du domaine électrique.

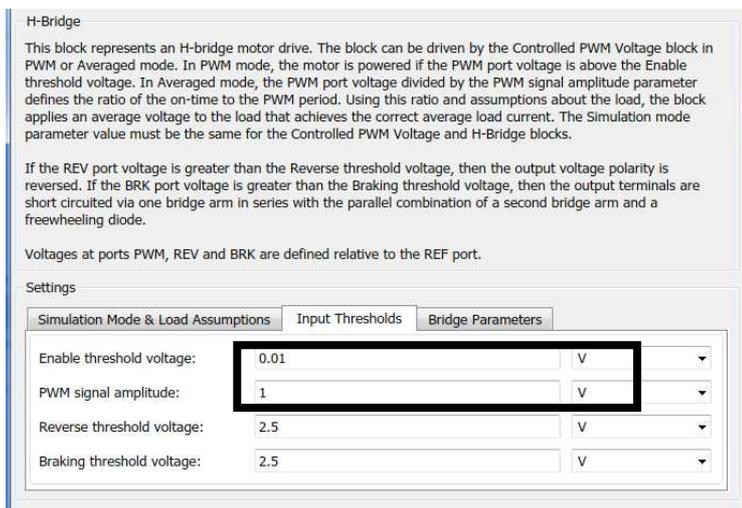
- **PWM** : signal d'entrée PWM en provenance du bloc « Controlled PWM Voltage Source »
- **REF** : référence de la tension du signal PWM (souvent relié à la masse)
- **REV** : commande de l'inversion du sens de rotation
- **BRK** : commande de l'arrêt du moteur
- + et - : ces deux ports sont reliés aux bornes du moteur

Le pont en H reçoit, la tension PWM sur le port d'entrée **PWM** et alimente le moteur directement avec cette tension. Si la tension de l'entrée **REV** dépasse un seuil fixé dans les paramètres du composant, le sens de rotation s'inverse. Si la tension de l'entrée **BRK** dépasse un seuil fixé dans les paramètres du composant, l'alimentation du moteur est coupée.

Réglage du pont en H



Mode de simulation sans approximation



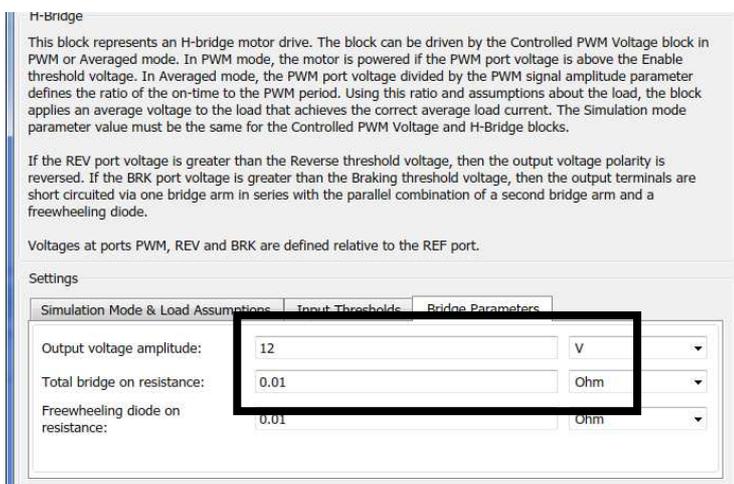
C'est ici que sont entrés les différents seuils qui caractérisent le fonctionnement du pont en H.

**Enable thresholds voltage** : niveau de tension que doit atteindre l'amplitude du signal PWM pour déclencher l'alimentation du moteur (uniquement valable si le **Simulation mode** est sur **PWM**)

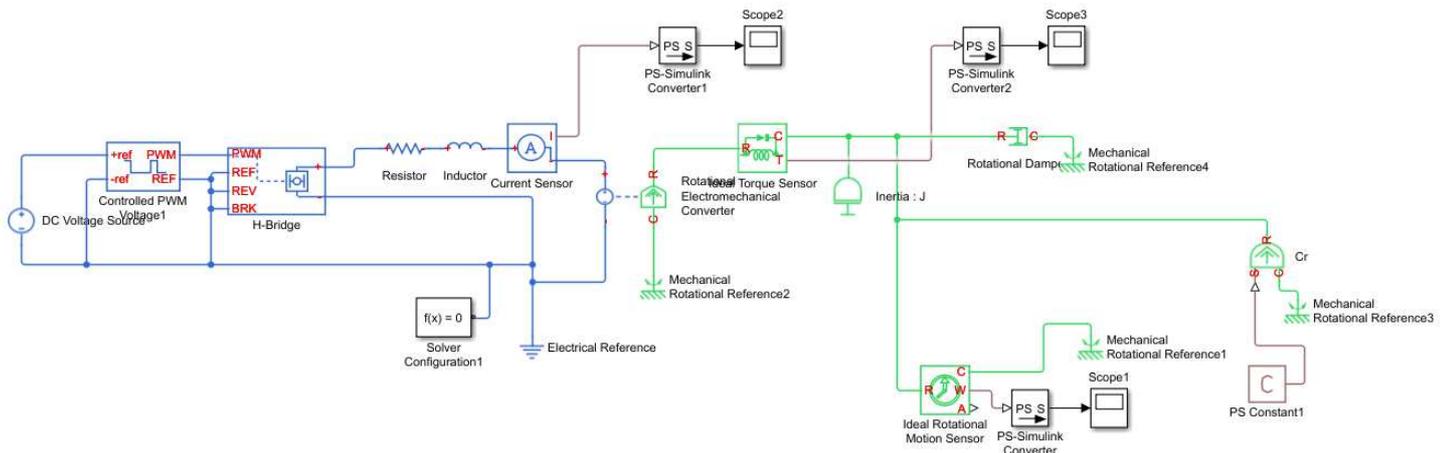
**PWM signal amplitude** : amplitude du signal PWM qui doit correspondre avec l'amplitude du signal PWM généré par le bloc « Controlled PWM voltage source »

**Reverse thresholds voltage** : niveau de tension relevée sur le port **REV** qui provoque l'inversion du sens de rotation du moteur

**Braking thresholds voltage** : niveau de tension relevée sur le port **BRK** qui provoque l'arrêt du moteur.

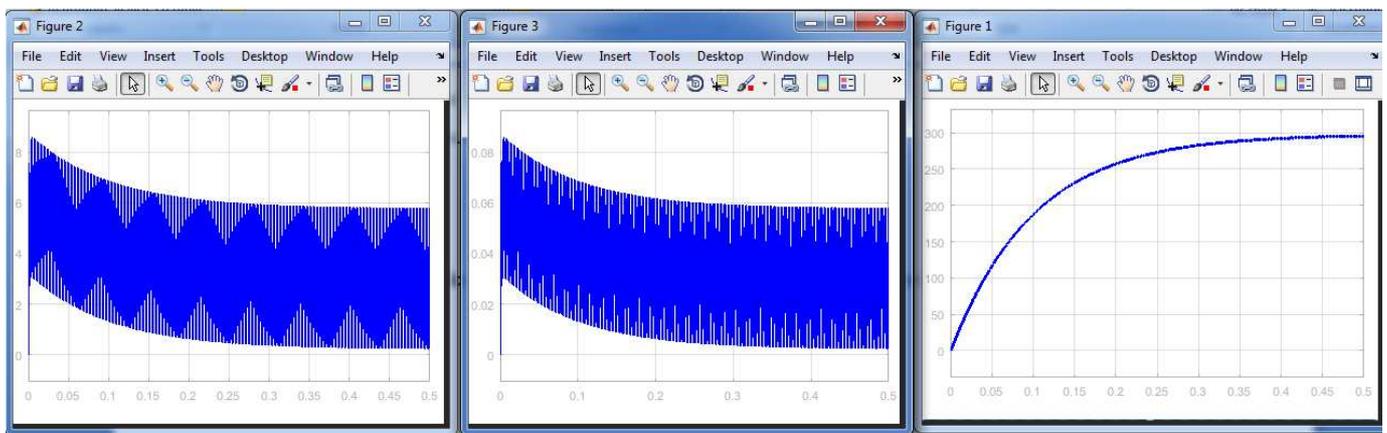


On aboutit à ce schéma :



Lancer une simulation sur une durée de 0,5s .

Vérifier que les courbes obtenues sont les suivantes :



Intensité (A)

Couple (en N.m)

Vitesse de rotation (rad/s)

**Question n°10 :** Quelle est la valeur finale de la vitesse de rotation? Retrouver ce résultat par le calcul

**Réponse :**

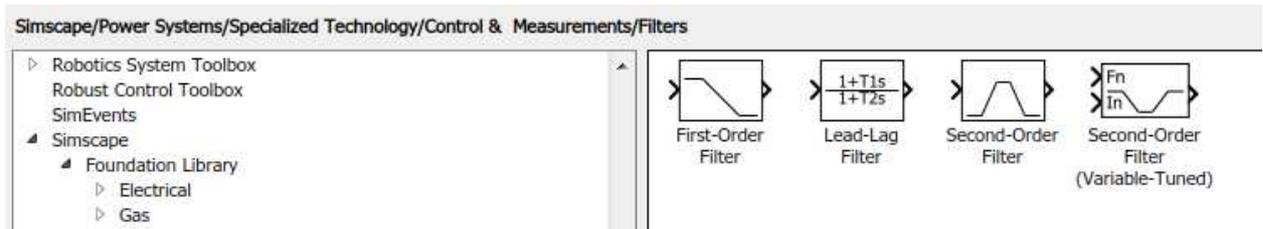
**Question n°11 :** Commenter la courbe de l'intensité

**Réponse :**

**Question n°12 :** Pourquoi la courbe de la vitesse est-elle aussi lisse?

**Réponse :**

On veut lisser la courbe de l'intensité afin de la visualiser sur l'oscilloscope, pour cela insérer un bloc parmi les propositions suivantes, le paramétrer correctement et relancer la simulation.



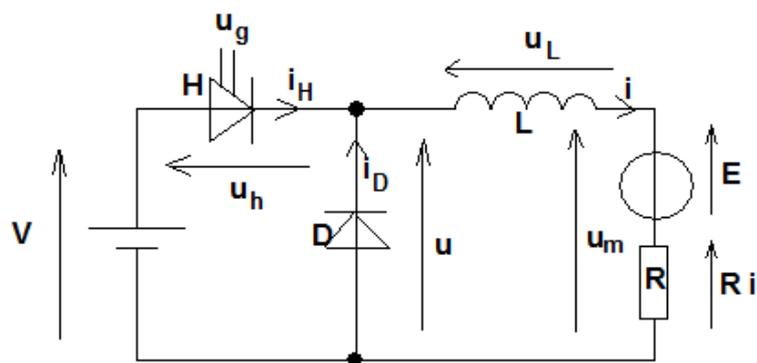
**Question n°13 :** Justifier le paramétrage du filtre. Comparer la dernière modélisation avec hacheur et avec grandeur intensité filtrée et une modélisation sans hacheur pour laquelle vous choisirez une valeur de la tension d'alimentation cohérente.

**Réponse :**

⇒ **Le hacheur : modélisation 2 (sans utiliser les blocs prédéfinis)**

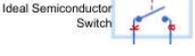
Le hacheur le plus simple est le hacheur série 1 quadrant. Il est constitué d'un transistor commandé (**modélisé par un interrupteur commandé**) et d'une diode. Si l'on souhaite rentrer davantage dans la modélisation du hacheur, on peut remplacer le bloc hacheur prédéfini par une modélisation plus détaillée.

Reprenre le schéma-bloc du moteur :

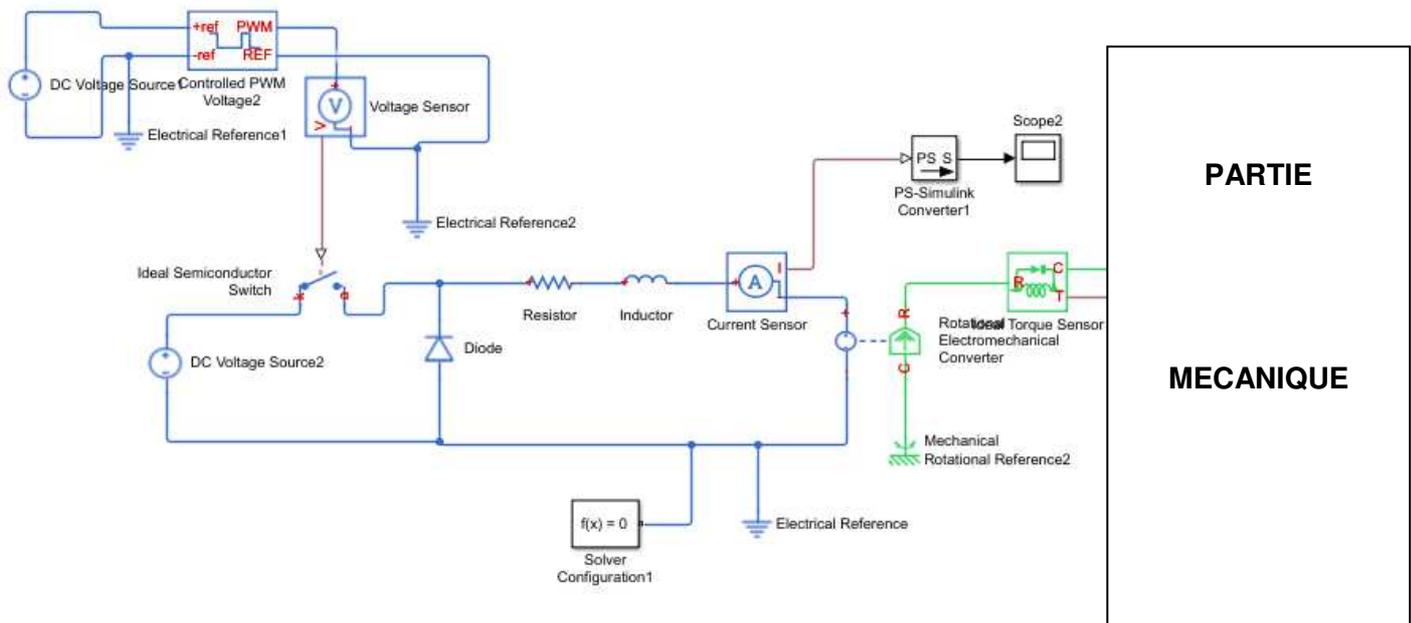


- $C_r = 0.001 \text{ N.m}$
- Rajouter les éléments suivant correspondant au hacheur (cf. liste ci dessous) :
  - Conserver le PWM précédent avec le même paramétrage.
  - Mettre en place dans le détail le circuit électrique du hacheur (diode , interrupteur commandé...)

Désignation	Représentation	Localisation (bibliothèque)	Paramétrage Double click
-------------	----------------	-----------------------------	--------------------------

<b>Interrupteur commandé : ideal semiconductor switch</b>		<b>A chercher manuellement</b>	<b>On state resistance :0.001Ω Off state conductance <math>1^{-6} \Omega^{-1}</math> Threshold voltage <math>V_{th} : 0.5V</math></b>
<b>Diode</b>		<b>A chercher manuellement</b>	<b>Forward voltage :0.1V On resistance : 0.01 Ω Off conductance : <math>1^{-8} \Omega^{-1}</math></b>

On obtient le schéma suivant :



**Question n°14 : vérifier que les deux modélisations de la commande du moteur incluant le hacheur (modèle avec bloc prédéfini et ce dernier modèle) sont cohérentes. En analysant la cohérence et la compatibilité des types de signaux, justifier l'utilisation du voltmètre afin de commander en tension le thyristor du circuit de découpage.**