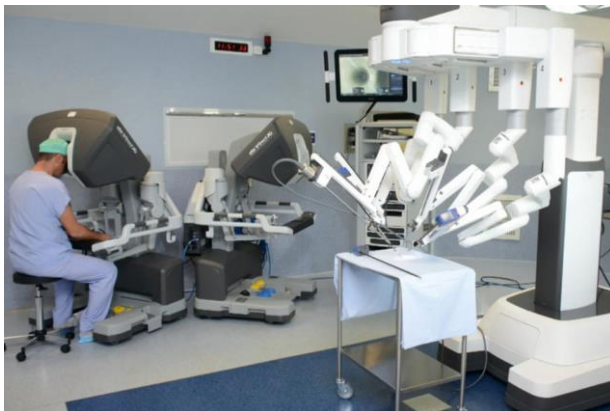


Travaux Pratiques MULTIPHYSIQUE

Les systèmes sont de plus en plus complexes et les technologies embarquées doivent cohabiter et même interagir en toute sécurité.

Le fonctionnement de nombreux produits est désormais basé sur une interaction de phénomènes physiques de natures différentes entre des constituants électriques, mécaniques, électroniques, informatiques, thermiques, pneumatiques, chimiques, etc...



Prévoir le comportement global de ces systèmes devient compliqué avec les modèles métiers pris séparément. De plus, savons-nous toujours quelle(s) grandeur(s) physique(s) faut-il extraire d'un composant pour passer à un autre et réciproquement ?

La modélisation multiphysique va permettre d'établir des liens entre les différents domaines scientifiques présents dans le système.

Parmi les logiciels de simulation numérique utilisés dans la recherche ou dans l'industrie on trouve *Matlab* et *Scilab*.

Principe

La modélisation multiphysique est le socle ou la base de la simulation multiphysique qui, en analyse numérique, va tenter de **reproduire le comportement** d'un système **dépendant de différents domaines des sciences physiques**.

La modélisation dite **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 (intensité ou potentiel par exemple pour un lien électrique) ni de notion d'entrée/sortie. La représentation acausale ne privilégie aucune grandeur physique particulière et est basée sur la notion de **composants**.

Le modèle acausal est très proche de l'architecture matérielle : composants, liens, instruments de mesure...

Il n'y a pas d'équations à écrire, les lois de comportement des composants sont déjà programmées.

La palette *SIMM* du logiciel *Scilab* permet ainsi de réaliser des modèles électrique, mécanique et thermique. Ce logiciel permet aussi de modéliser des systèmes qui couplent ces différents aspects d'où le terme de modélisation **multi-physique**.

Deux possibilités de modélisation :

1. Modèle de connaissance (modélisation causale)

On connaît la grandeur physique d'entrée et la grandeur physique de sortie de tous les composants du système ainsi que les équations entre ces grandeurs à partir des lois de la physique : *Principe fondamental de la Dynamique, loi des mailles, loi des nœuds, relations électromécanique, échanges thermiques, etc.*

2. Modèle acausal

On connaît les grandeurs physiques entre les composants du système sans préjuger des variables d'entrée et de sortie.

Le modèle acausal est très proche de l'architecture matérielle, et permet de simuler le comportement d'un système complexe sans écrire la moindre équation.

ACTIVITE 1 : Le Moteur à Courant Continu (MCC)

Modèle de connaissance (modélisation causale)

ÉQUATIONS DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement d'un moteur à courant continu peut être modélisé par les équations physiques suivantes :

D'un point de vue électrique, l'induit peut être caractérisé par une résistance en série avec une inductance et une force contre-électromotrice, ce qui conduit à l'équation de maille :

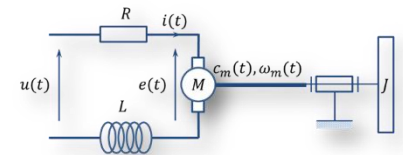
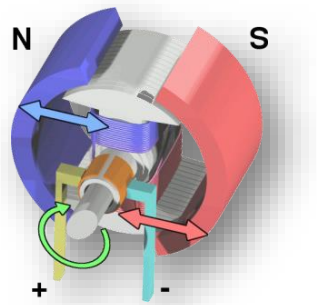
$$u(t) = e(t) + R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$\text{Ou encore } i(t) = \int \frac{1}{L} [u(t) - e(t) - Ri(t)] dt$$

D'un point de vue mécanique, l'équation du rotor en rotation conduit à :

$$J \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_{pert}(t) - f \cdot \omega_m(t)$$

$$\text{Ou encore } \omega_m(t) = \int \frac{1}{J} [C_m(t) - C_{pert}(t) - f \cdot \omega_m(t)] dt$$



Ce type de moteur répond aux équations électromagnétiques :

$$C_m(t) = K_t \cdot i(t) \quad \text{et} \quad e(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$$

Terme	Signification	Unité
$u(t)$	tension d'alimentation du moteur	V
$e(t)$	tension de la fem	V
$i(t)$	intensité du courant	A
R	résistance de l'induit	Ω
L	inductance du bobinage	mH
J	inertie du rotor	kg.m^2
f	paramètre de frottement fluide (visqueux)	N.m.s
$C_m(t)$	couple moteur	N.m
$C_r(t)$	couple résistant éventuel (perturbation)	N.m
$\omega(t)$	vitesse de rotation de l'arbre du moteur	rad.s^{-1}
K_t	coefficient de couple	N.m.A^{-1}
K_e	coefficient de vitesse	V.s.rad^{-1}

REMARQUE IMPORTANTE

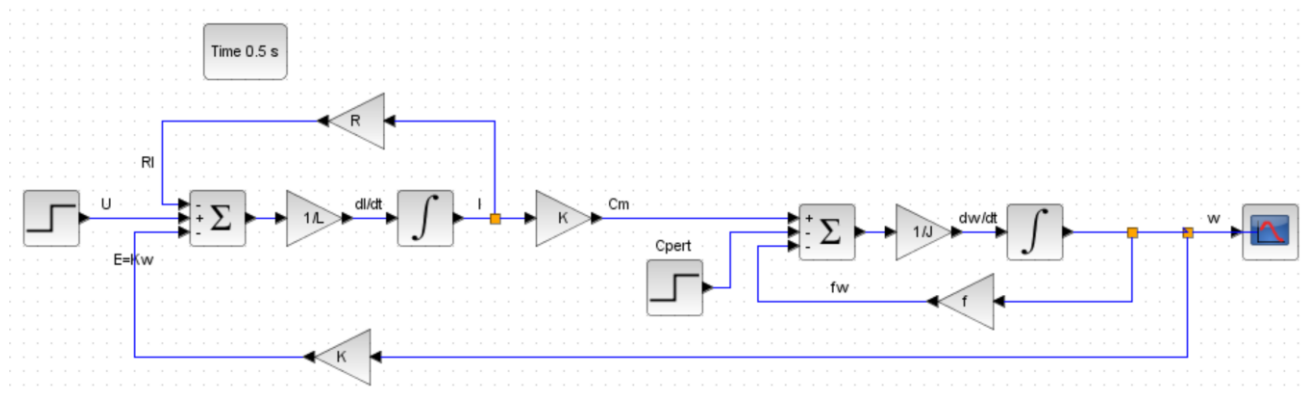
Dans les documents qui précisent les caractéristiques des moteurs, les constructeurs donnent $1/K_e$ et non pas K_e . Dans ces conditions et en respectant les unités, on vérifie aisément que $K_t = K_e$.

Pour notre exemple, le constructeur fournit les valeurs suivantes :

$$R = 2,8 \, \Omega \quad L = 3 \cdot 10^{-3} \, H \quad K = 0,23 \, N \cdot m/A \quad J = 55 \cdot 10^{-5} \, kg \cdot m^2 \quad f = 0,001 \, N \cdot m/(rad/s)$$

Le moteur est alimenté en entrée avec 12 V et on le soumet à une perturbation d'amplitude 0,1 N.m à $t=0,2 \, s$.

On obtient le schéma bloc suivant, éloigné de l'architecture réelle du système.



Ouvrir le fichier *MCC_modele_causal_1.zcos* et lancer la simulation en appuyant sur la flèche dans la barre de menu. Analyser la courbe obtenue.



Remarque : Il est possible de vérifier les valeurs des grandeurs en cliquant sur le bloc ou en allant dans le menu « *Simulation* » puis « *Modifier le contexte* ».

Il est possible de réaliser un schéma bloc plus proche de la modélisation avec les transformées de Laplace.



Sur la page principale de *Scilab*, cliquer sur logo X-COS



Dans le navigateur de palettes (onglet « *Vue* » puis « *Navigateur de palettes* »), choisir le module **CPGE**.

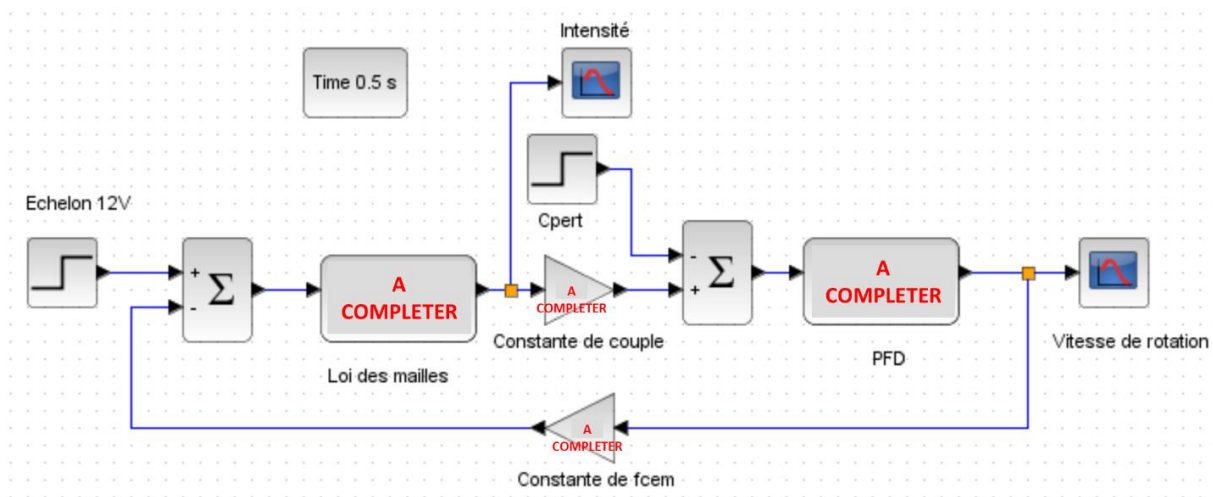
Aides :

- La variable de Laplace se note « *s* » dans *Scilab*
- Parcourir les sous-menus du module **CPGE** et faire glisser les blocs sur la page blanche pour les ajouter.

- Pour relier les blocs, il suffit de cliquer sur le triangle noir de sortie d'un bloc (lorsque le pointeur de la souris s'en approche, il s'encadre d'un cadre vert) et d'amener le pointeur de la souris sur le triangle d'entrée du bloc à relier. **Attention, dans cette manipulation, il faut toujours laisser le bouton de la souris enfoncé.**
- Pour inverser le sens d'un bloc, faire « *clic droit* » sur le bloc puis « *Format* » puis « *Miroir* »
- Pour faire un point de prélèvement, cliquer sur le fil et déplacer la souris pour agrandir le trait. Chaque clic de souris fait un angle droit du fil.
- Pour obtenir un comparateur (sommateur avec + et -), double-cliquer sur le comparateur et mettre [1,-1] pour affecter la première et la seconde entrée du sommateur.
- Pour une entrée échelon, mettre « *Instant de l'échelon* » à 0 s



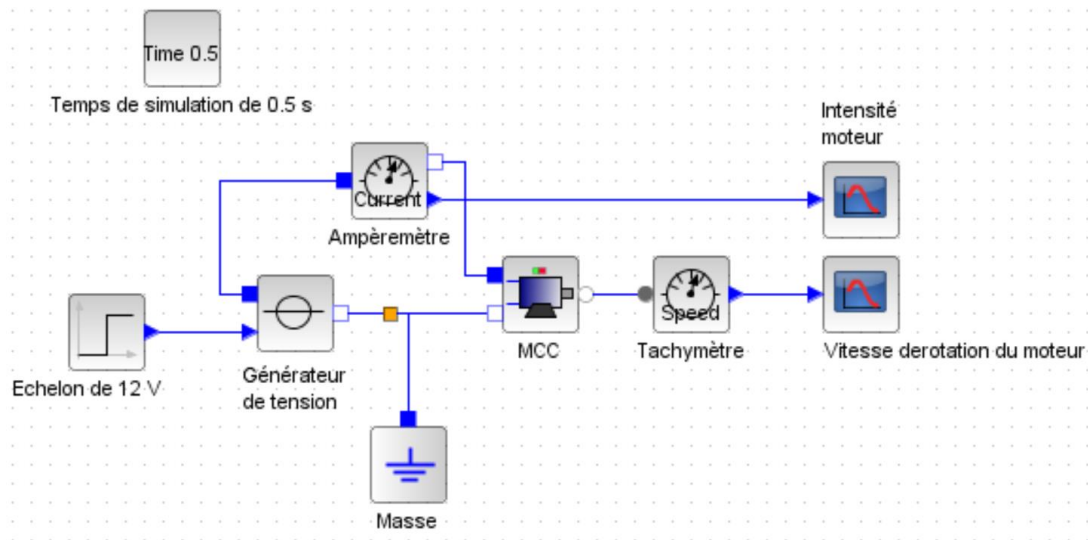
 Construire le schéma bloc ci-dessous en complétant les boîtes manquantes en utilisant les équations du MCC à mettre dans le domaine de Laplace.



 Lancer la simulation en appuyant sur la flèche  dans la barre de menu. Analyser les courbes obtenues.

Modèle acausal

Modèle réduit

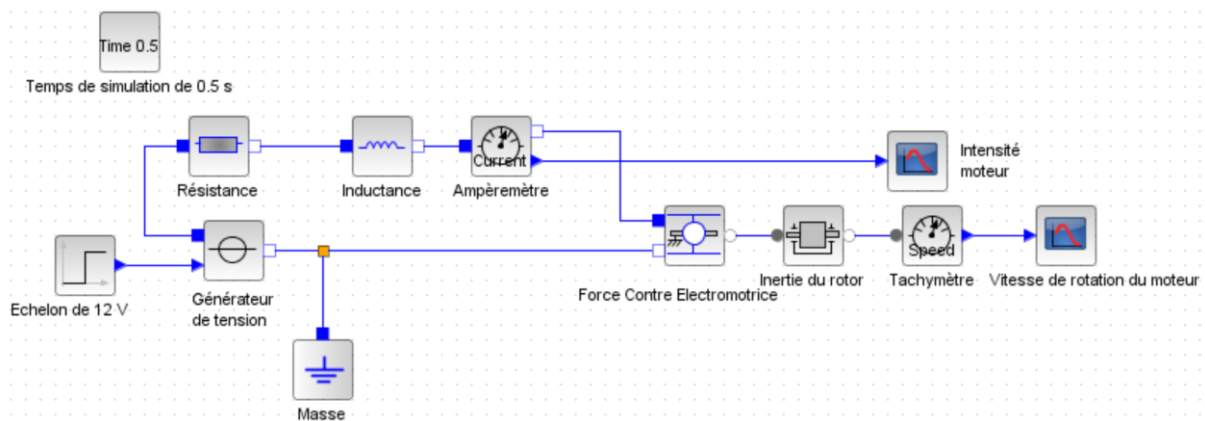


Ouvrir le fichier *MCC_modele_acausal_1.zcos* et lancer la simulation en appuyant sur la flèche dans la barre de menu. Analyser la courbe obtenue.



Remarque : Il est possible de vérifier les valeurs des grandeurs en cliquant sur le bloc ou en allant dans le menu « Simulation » puis « Modifier le contexte ».

Modèle complexe



Ouvrir le fichier *MCC_modele_acausal_2.zcos* et lancer la simulation en appuyant sur la flèche dans la barre de menu. Analyser la courbe obtenue.



Remarque : Il est possible de vérifier les valeurs des grandeurs en cliquant sur le bloc ou en allant dans le menu « Simulation » puis « Modifier le contexte ».



Rajouter sur la simulation les frottements ainsi qu'un capteur de couple afin d'afficher la courbe du couple moteur.

Remarque : Une notice avec les différentes palettes de *SIMM* sont disponible en **ANNEXE** en fin de sujet.



Lancer la simulation et analyser les courbes obtenues.



Modifier le schéma pour mesurer la puissance en sortie du moteur. Analyser la courbe obtenue.

Comparaisons des deux modélisations CAUSALE/ACAUSALE :

	Modélisation causale (avec modèle de connaissance)	Modélisation acausal
Lien avec l'architecture réelle du système	Pas forcément visible ou simple à retrouver	Visible, proche de la structure (<i>lien ibd ou chaine de puissance</i>)
Élaboration du modèle graphique	Traduction des équations de comportement nécessairement connues	Connaissance des symboles associés aux composants
Loi entrée sortie analytique	Possible mais figée	Impossible
Réversibilité	Non (sens imposé par les flèches)	Oui
Identification et accès aux grandeurs physiques	Complicquée	Très simple

ACTIVITE 2 : VTT

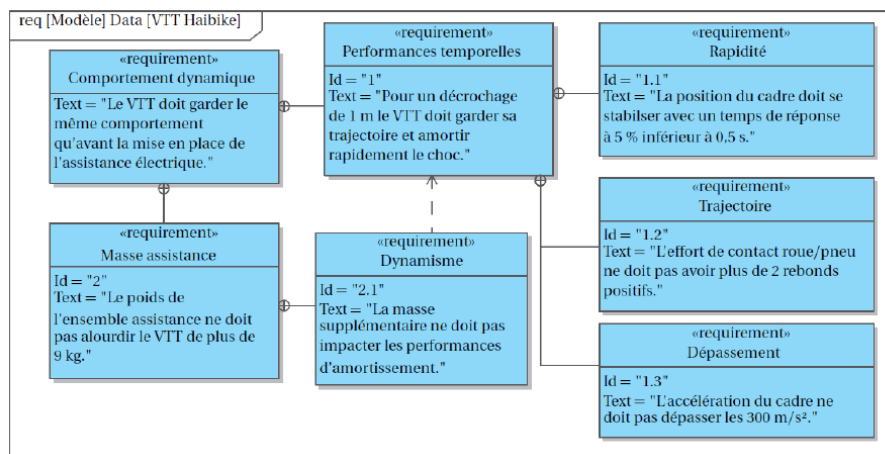
L'utilisation de VTT de descente est adaptée pour dévaler les pentes et encaisser les sauts. Par contre l'ascension est beaucoup plus laborieuse car ces modèles sont lourds.

Le VTT électrique rend la discipline VTT accessible aux personnes qui n'ont pas ou plus la capacité physique pour la pratique tout terrain sur un VTT traditionnel. La caractéristique essentielle d'un moteur électrique efficace pour le VTT est la puissance qu'il délivre face à la résistance qu'oppose une côte ou un obstacle. L'architecture la plus adaptée est de relier le moteur directement au pédalier. L'avantage de cette solution est que le travail du moteur peut être optimisé en fonction de l'obstacle à franchir en ajustant le rapport de vitesse du vélo.



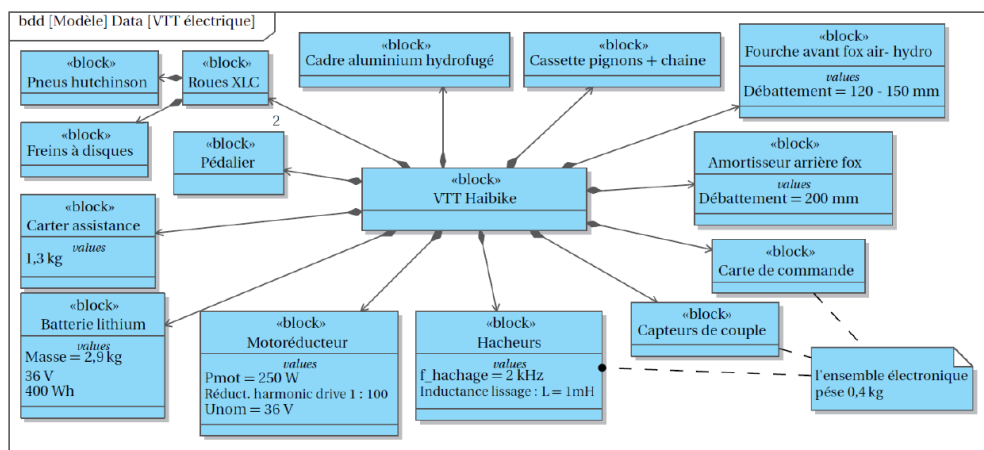
Haibike est considéré comme le leader européen sur le marché des VTT électriques, notamment avec la gamme baptisée SDuro à assistance Yamaha. Avec leurs moteurs intégrés aux cadres et l'intégration de suspension Fox, ces modèles se déclinent en version 27,5 ou 29 pouces, en tout suspendus ou semi-rigides.

Ces modèles qui se veulent haut de gamme, doivent répondre à un cahier des charges représenté par le diagramme d'exigence partiel.



L'objectif est de vérifier les performances de trajectoire, de rapidité et de dépassement décrites dans le diagramme des exigences. Une attention particulière sera apportée à la vérification de l'exigence 2.1 : « l'ensemble d'assistance ne doit pas impacter les performances dynamiques du VTT ».

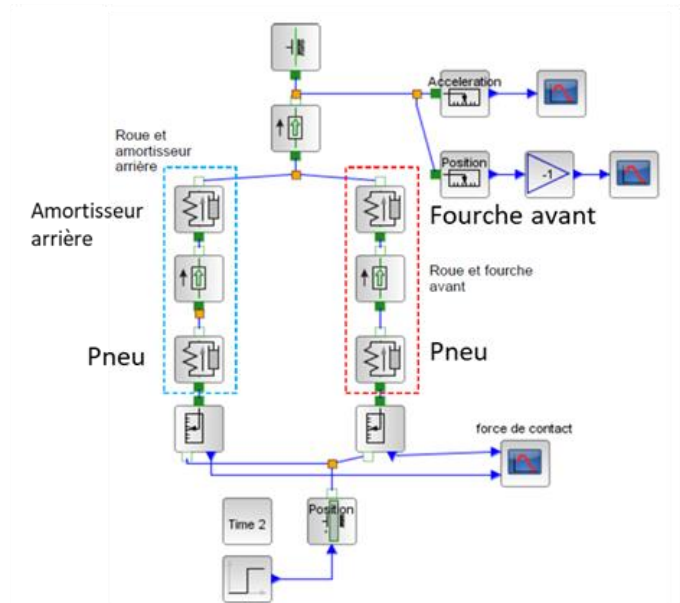
La constitution du VTT avec assistance est décrite par le diagramme ci-dessous.



On se propose de représenter dans un premier temps les masses et les suspensions, avant et après implantation de l'assistance électrique.

On modélise les jantes des roues par des masses de 0.7 kg, l'ensemble cadre (comprenant le pédalier et les autres éléments tels que potence, guidon, cassette ...) par une masse de 8.5 kg, les pneus par des ressorts-amortisseurs visqueux en parallèle ainsi que les suspensions avant et arrière avec :

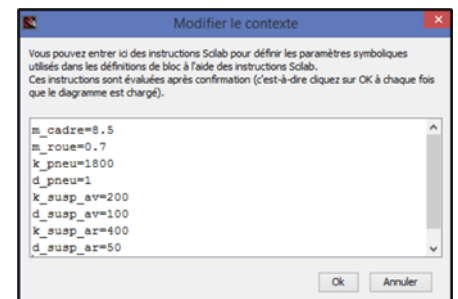
- Pneus : raideur 1800 N/m et coefficient d'amortissement 1 N.s/m.
- Suspension avant : raideur 200 N/m et coefficient d'amortissement 100 N.s/m.
- Suspension arrière : raideur 400 N/m et coefficient d'amortissement 50 N.s/m.



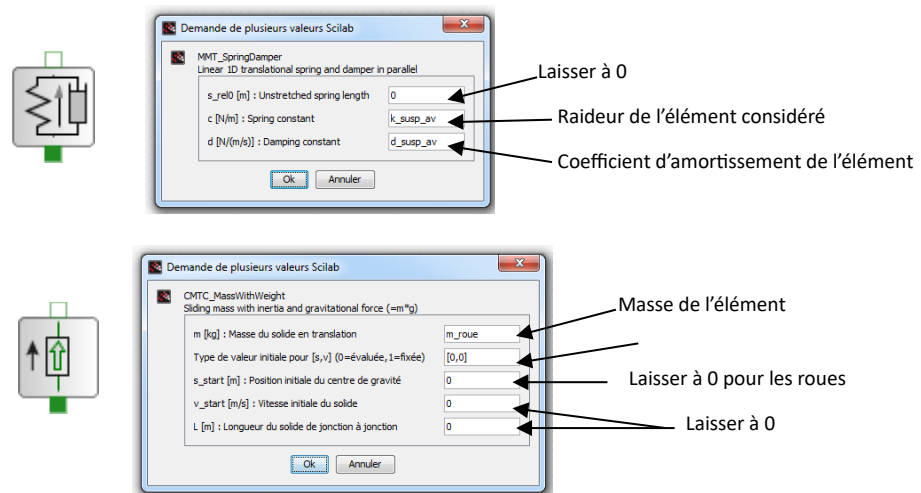
En utilisant la bibliothèque *SIMM*, compléter le modèle afin de modéliser le cadre du VTT, les roues et les suspensions sans l'ensemble d'assistance afin d'obtenir un modèle semblable à celui de la figure précédente.

Remarque : Utiliser le contexte (menu « Simulation » puis « Modifier le contexte ») pour définir l'ensemble des paramètres peut permettre de les modifier beaucoup plus rapidement et permet d'avoir une lisibilité beaucoup plus rapide.

Mettre la taille de la mémoire tampon des scopes à 2000 ou 5000 points pour avoir des courbes plus lisses.

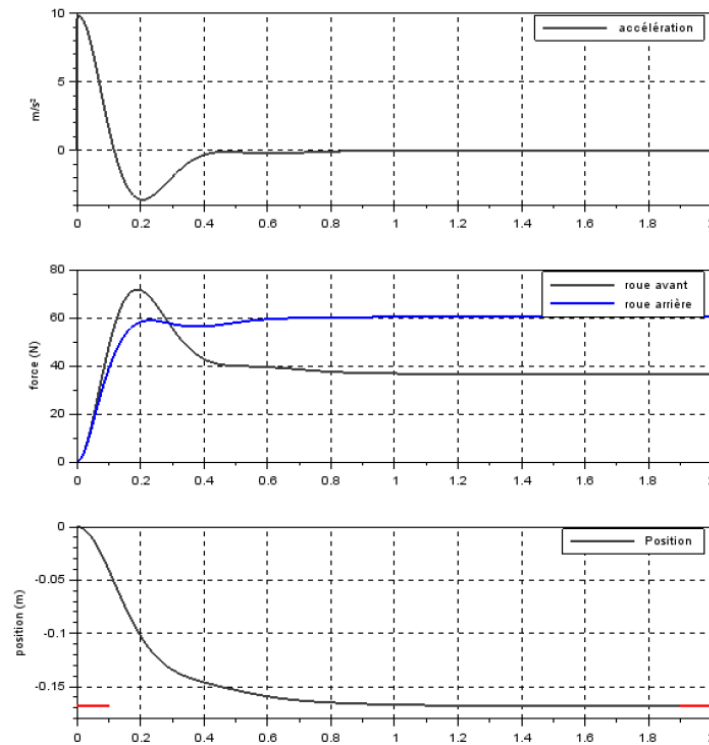


Pour compléter les différents blocs :





Vérifier que la réponse à un échelon de position nul (aucun décrochage du sol) correspond à un déplacement du cadre VTT représenté sur la figure ci-dessous.



Expliquer la position mesurée et renseignée cette valeur dans la position initiale du cadre (en valeur absolue) On ne prend pas en compte ici la masse du cycliste qui allonge le temps réponse car on souhaite étudier uniquement le comportement du VTT, indépendamment des différents cyclistes.



Mettre un échelon de position de 0.2 m (passage sur un plateau) afin d'obtenir un déplacement du cadre VTT.



Vérifier alors les performances de stabilité, de rapidité et de dépassement attendues par le cahier des charges avant l'installation de l'ensemble de l'assistance. Vérifier également l'exigence 1.2 en expliquant les conséquences des rebonds sur l'effort de contact.



Ajouter maintenant la masse de l'ensemble d'assistance à celle du cadre et relancer la simulation afin d'obtenir une courbe de déplacement du cadre et d'accélération.



Expliquer alors l'allure de la réponse obtenue. Le cahier des charges est-il toujours respecté ?

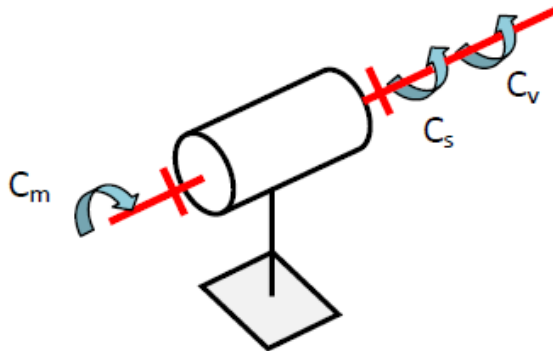
ACTIVITE 3 : Rotation d'un solide autour d'un axe fixe

On considère un solide en simple liaison pivot par rapport à un bâti. Ce solide est sollicité en rotation par un couple moteur $C_m(t)$.

Un couple résistant $C_r(t)$ s'oppose à la rotation du solide. Ce couple résistant est composé :

- d'un couple de frottement sec C_s modélisé par un échelon
- d'un couple de frottement visqueux $C_v(t)$ proportionnel à la vitesse de rotation

On peut donc écrire que $C_r(t) = C_s + f \cdot \omega(t)$



Le solide en rotation est caractérisé par son moment d'inertie J par rapport à l'axe de rotation.

L'application du principe fondamental de la dynamique au solide permet d'écrire :

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t)$$

Avec $J = 2 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ $C_m = 0,2 \text{ N.m}$ $C_s = -0,01 \text{ N.m}$

et $f = 10^{-3} \text{ N.m/(rad.s}^{-1}\text{)}$ (coefficient de frottement visqueux)

Analyse du modèle



Réaliser le modèle acausal de ce problème de mécanique (on utilisera la palette *SIMM/Mécanique/Rotation 1D*).



Affecter les différentes valeurs numériques



Lancer la simulation

Exploitation du modèle



Faire varier l'intensité du couple moteur C_m et conclure sur son influence sur la vitesse de rotation atteinte en régime permanent et sur le temps de réponse à 5%.



Déterminer de la même façon l'influence de l'inertie J sur la vitesse en régime permanent et sur le temps de réponse à 5%.

Lien avec le modèle causal



Ecrire l'équation différentielle régissant la vitesse de rotation $\omega(t)$ du solide en fonction de C_m , C_s , J et f .



En déduire la fonction de transfert $\frac{\Omega(p)}{C_m(p) - C_s(p)}$ et identifier ses paramètres caractéristiques.



Retrouver les résultats constatés avec la simulation numérique du modèle acausal.

ACTIVITE 4 : Angiographie Bi-Plan

L'étude sera faite sur le déplacement en translation de l'armature suspendue au plafond d'une chaîne image d'un angiographe bi-plan (voir figure ci-contre) permettant la création d'images tridimensionnelles de la structure veineuse d'un patient afin de prévenir les risques de rupture d'anévrisme.

La prise de vue est réalisée en positionnant de manière très précise une tête et un récepteur à rayons X longitudinalement et angulairement, un logiciel dédié se chargeant de la création d'une image colorisée à destination du médecin.



L'ensemble est constitué d'un chariot supportant l'armature (S2) et mis en mouvement par un moteur à courant continu suivi d'un réducteur roue-vis qui entraîne les roues du chariot.

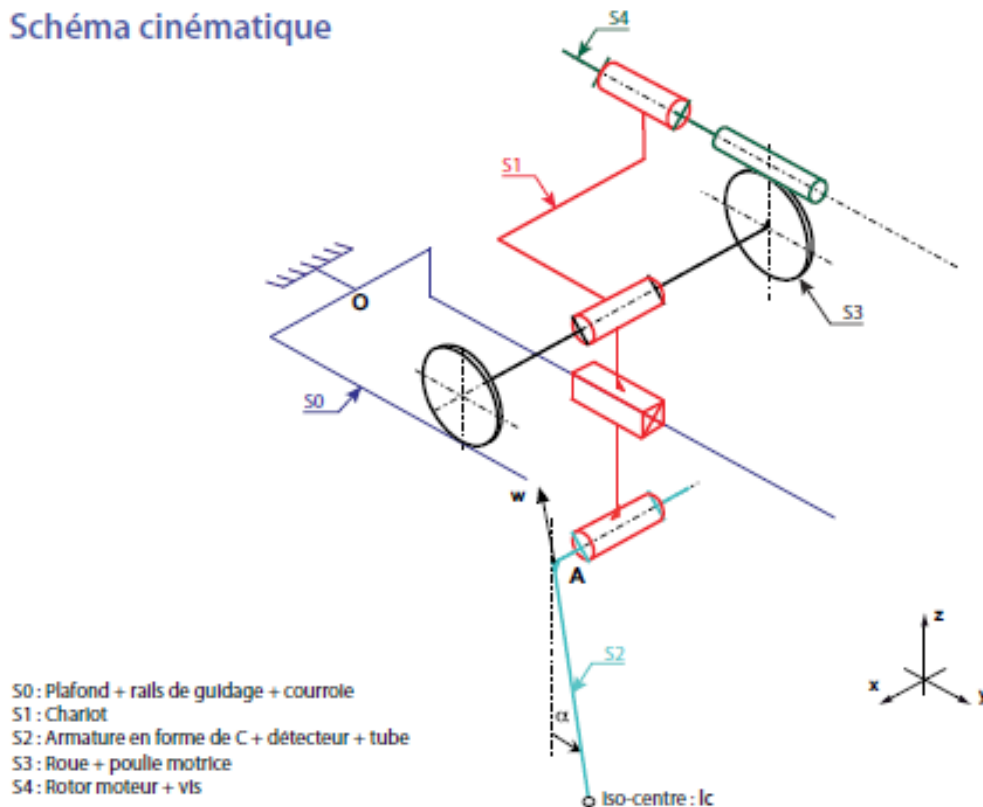
Compte-tenu de la masse de l'armature (S2) et de son encombrement, le mécanisme possède deux degrés de liberté : la position du chariot $y(t)$ et la position angulaire de l'armature (S2) $\alpha(t)$ qui apparaît suite à la déformation de l'armature lors du déplacement.

On appelle LP (Lateral Plan) l'ensemble constitué de la chaîne image latérale et de son armature suspendue au plafond.

Le mouvement de translation est commandé par le médecin à l'aide d'un joystick. La position voulue étant atteinte, le médecin lâche le joystick et déclenche la prise de vue à l'aide d'une pédale de commande. Le médecin exige que la prise de vue puisse commencer dès la demande d'arrêt du mouvement de translation. Le tableau ci-dessous propose un extrait du cahier des charges.

Exigences	Critères	Niveaux
Déplacer le LP en translation	Être rapide sans mettre en danger le personnel médical	Vitesse maximale 100 mm.s^{-1}
Pouvoir commencer la prise de vue dès l'arrêt du mouvement de translation	1. Arrêter le mouvement en temps masqué (le temps masqué est lié au temps de réaction du médecin) 2. Limiter l'amplitude et la durée des oscillations du LP au niveau de l'iso-centre	1. Temps masqué : 0.3 s 2. Premières oscillations < à 1 mm d'un extremum à l'autre < à 0.2 mm d'un extremum à l'autre après 1 s
Assurer la sécurité du patient	Limiter la distance d'arrêt du LP, pour ne pas blesser le patient	Distance d'arrêt réglementée inférieure à 10 mm

Schéma cinématique



Données géométriques, cinétiques et grandeurs caractéristiques du moteur

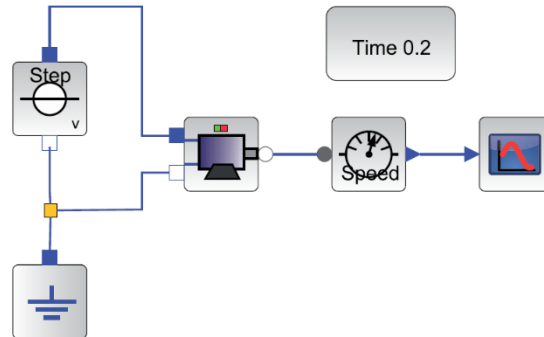
Poulie motrice	Dispositif roue et vis sans fin
Rayon de la poulie motrice S3 : $R_p = 0.0318 \text{ m}$	Rapport de réduction : $r = 1 / 50$
Chariot (S1)	Armature (S2) : armature en forme de C
Masse : $m_1 = 270 \text{ kg}$	$Al_C = d = 1.4 \text{ m}$ Centre d'inertie G_2 : $AG_2 = l_2 = 0.85 \text{ m}$ Masse : $m_2 = 490 \text{ kg}$ $J_2 = 620 \text{ kg.m}^2$
Moteur (inclus dans la masse du chariot S1)	
$R = 2.8 \Omega$ (résistance) $L = 3.10^{-3} \text{ H}$ (inductance) $K = 0.23 \text{ N.m.A}^{-1}$ (constante de couple ou de f_{cem}) $J = 0.25.10^{-3} \text{ kg.m}^2$ (moment d'inertie axe moteur + vis) $f = 10^{-5} \text{ N.m.s}$ (frottement visqueux)	

On s'intéresse dans un premier temps au déplacement de l'ensemble en supposant l'armature fixe par rapport au chariot.

Modélisation du moteur



Représenter le schéma suivant sous *Scilab*.



Choisir pour le bloc d'alimentation un échelon d'amplitude 80 V (tension maximale du moteur).

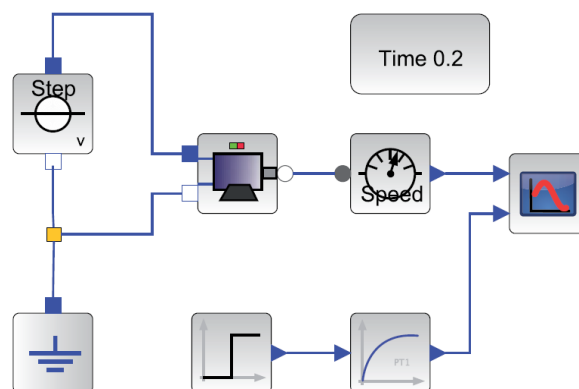


Lancer une simulation sur 0.2 s (en prenant 1000 points) et observer l'allure de la réponse.



A partir de la courbe obtenue par simulation, identifier l'ordre du système et les caractéristiques de la réponse.

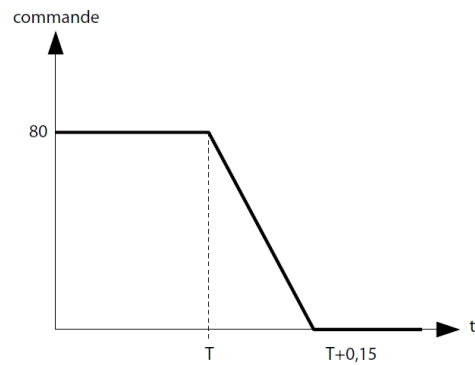
On peut alors chercher les paramètres qui s'approchent au mieux du modèle du moteur puis les tester avec un bloc de premier ordre (voir palette *Signaux/Continu* puis *MBC_FirstOrder*) et une source échelon d'amplitude 80 V.



Modifier le schéma. Lancer la simulation et visualiser les courbes obtenues.

En réalité, la tension délivrée au moteur ne peut pas être constante car la commande est gérée par un joystick. C'est pourquoi, une commande en trapèze est plus représentative de la commande réelle obtenue lorsque le médecin lâche le joystick. Elle est modélisable par le signal ci-contre.

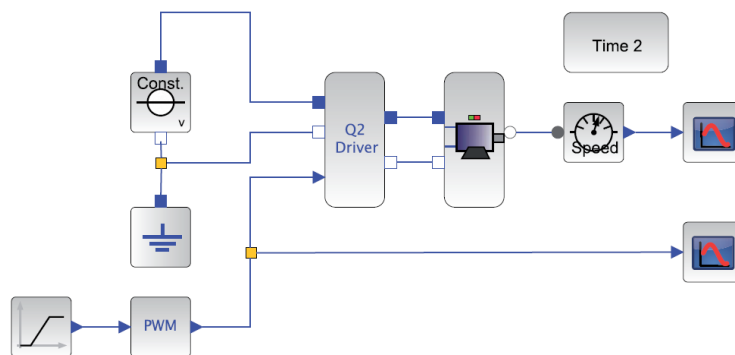
Pour faire varier la tension d'alimentation du moteur, il est nécessaire d'utiliser un hacheur. Comme pour le moteur, des blocs prédéfinis sont disponibles pour les hacheurs et évitent ainsi d'avoir à détailler leur comportement.



Ces composants se situent dans la sous-palette *Composants/PréActionneurs*. Le hacheur demi-pont *MEMC_Q2driver* que nous avons choisi pour ce test, est piloté par un PWM ayant une commande sur 8 bits à une fréquence de 500 Hz.



Réaliser le diagramme ci-dessous et paramétrer le signal de consigne du PWM pour obtenir une tension de commande du moteur comme indiqué sur la figure précédente (on prendra $T = 2$ s et 20 000 points de simulation). Ajouter un bloc pour visualiser le signal du PWM.



Remarque : Les blocs à rajouter ou paramétrer à nouveau sont rappelés ci-dessous :

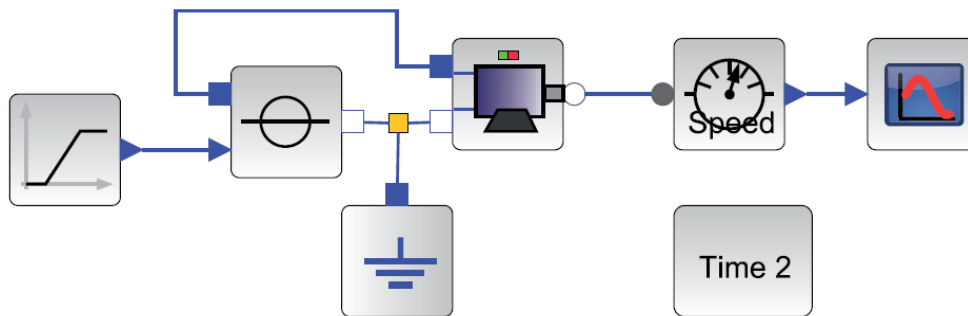
Désignation	Représentation	Sous-palette SIMM	Paramétrage
Ramp		Signaux/Sources/MBS_Ramp	Amplitude: -255 Durée: 0.15 s Décalage: 255 Temps de début: 1 s
PWM		Signaux/Sources/CCP_PWM	8 bits Fréquence: 500 Hz Temps de début: 0 s
Étude temporelle		Utilitaires/Analyses/IREP_TEMP	Durée: 2 s 10 000 points Grille affichée: oui Afficher les courbes pendant la simulation: non
Affichage du signal		Utilitaires/Visualisation/ISCOPE	Nombre de courbes: 1 Nom de la courbe: vitesse PWM
Hacheur demi-pont		Composants/PréActionneurs/MEMC_Q2driver	



Ouvrir une nouvelle fenêtre d'édition X-COS et copier le diagramme précédent.



Supprimer les blocs hacheurs, PWM, source d'alimentation et les remplacer par une alimentation variable pilotée *MEAS_SignalVoltage* (sous-palette *Électrique/Sources*).



Modifier le bloc *Trapèze* pour obtenir directement la tension de commande du moteur (*Amplitude -80, Décalage 80 V*). Rajouter une visualisation de la commande en rampe (pour vérification).



Lancer la simulation en prenant 2000 points. Comparer la courbe obtenue avec la précédente.

La partie suivante va permettre la modélisation des différents transmetteurs.



Ajouter un réducteur à engrenages et un système de transformation de mouvement de rotation en translation. Configurer les blocs à l'aide des données initiales.

Remarque : Pour le bloc engrenage, le rapport renseigné est le rapport de l'entrée sur la sortie.



Intercaler juste avant le capteur de vitesse linéaire un bloc « *masse en translation* » (de la sous-palette *Mécanique/Translation 1D/Basique*).

Remarque : Seule la masse est importante (760 kg). Il est également possible de définir les positions et vitesses initiales, etc...



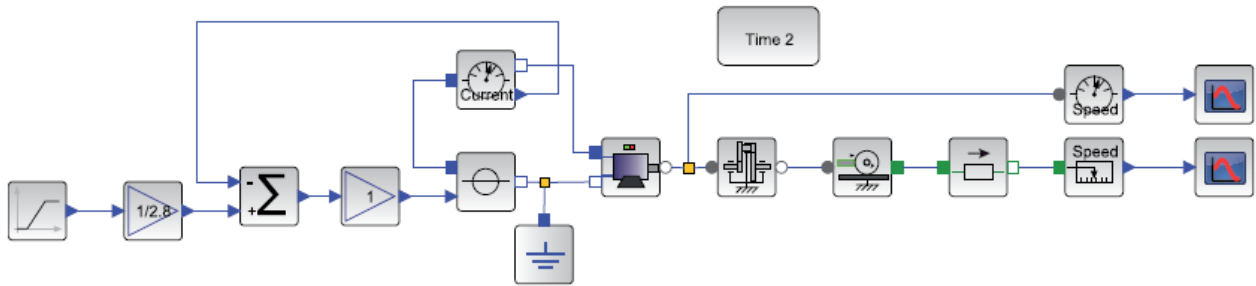
Ajouter un ampèremètre au niveau de l'alimentation du moteur et visualiser l'intensité.



Faire varier la masse et visualiser l'influence sur l'intensité.



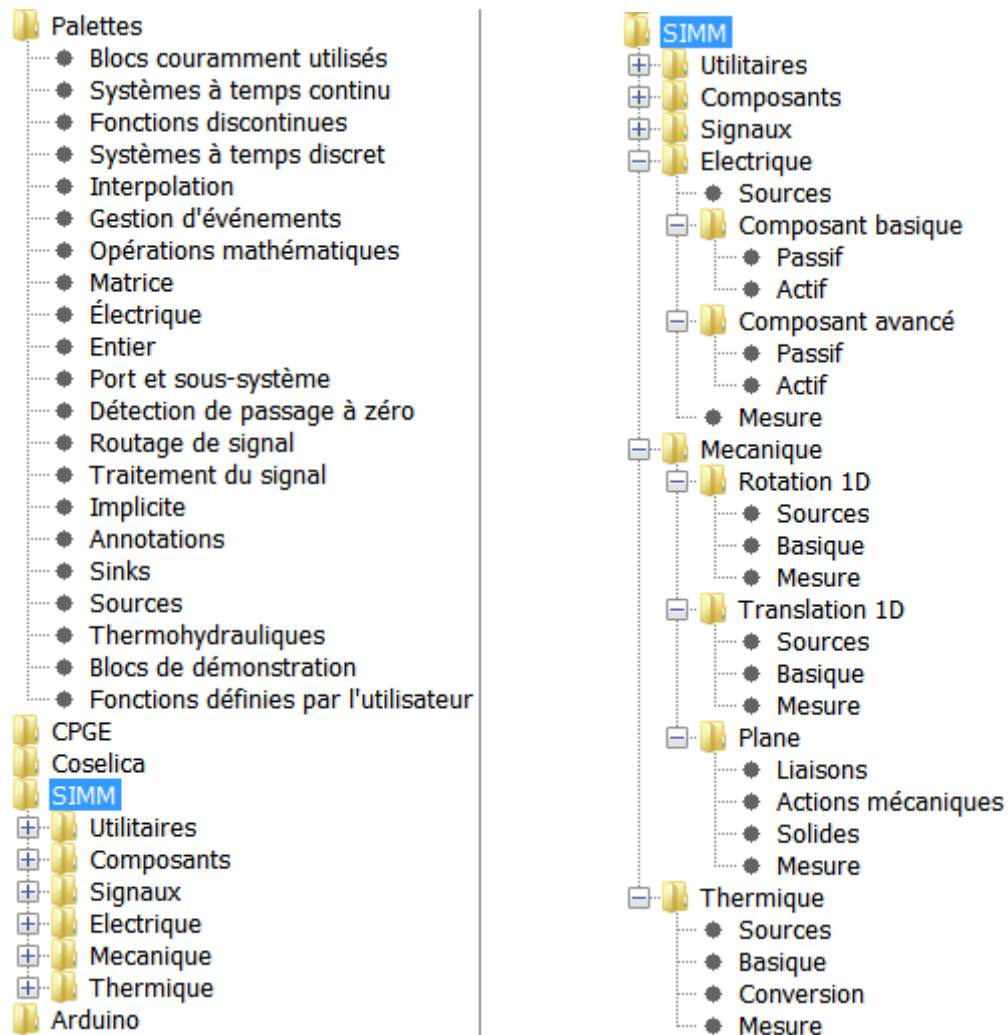
Réaliser le schéma ci-dessous et expliquer quel est son intérêt.



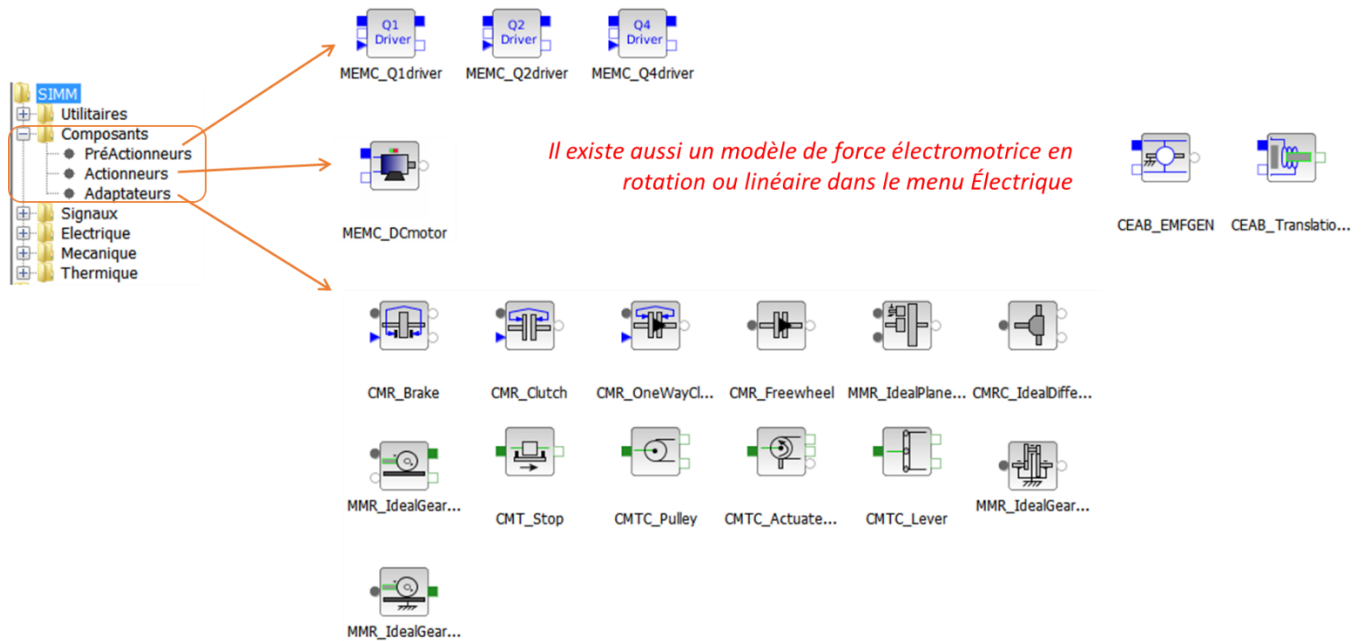
ANNEXE

Blocs dans le module *SIMM*

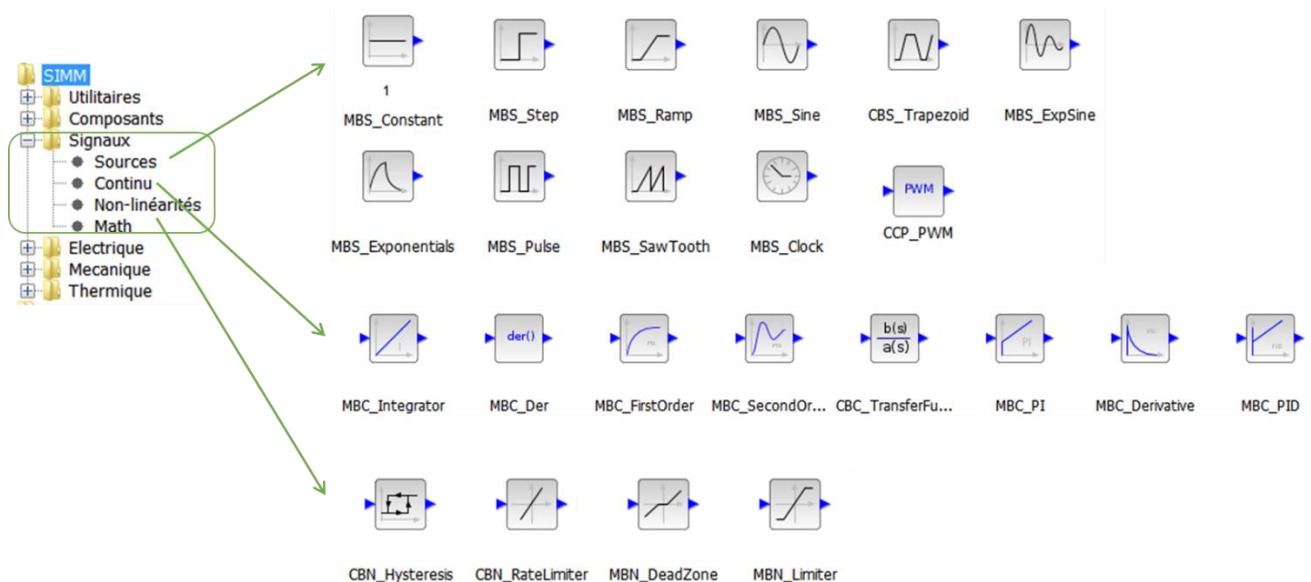
La librairie SIMM offre différents blocs spécifiques à des domaines multiphysiques variés.



COMPOSANTS

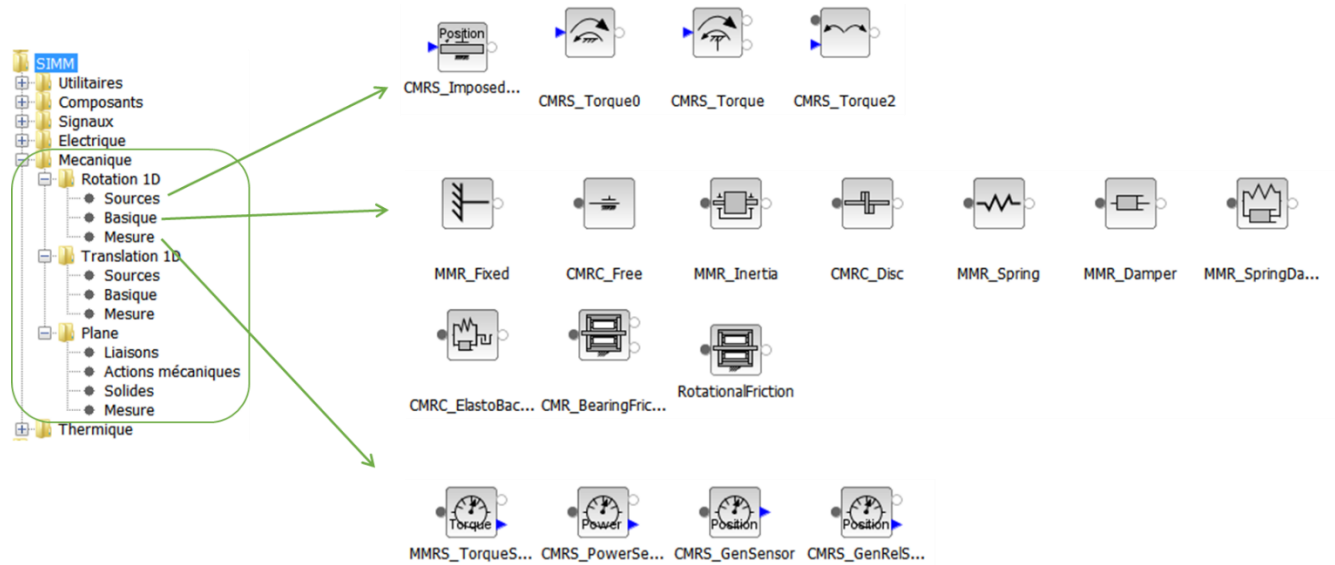


SIGNAUX

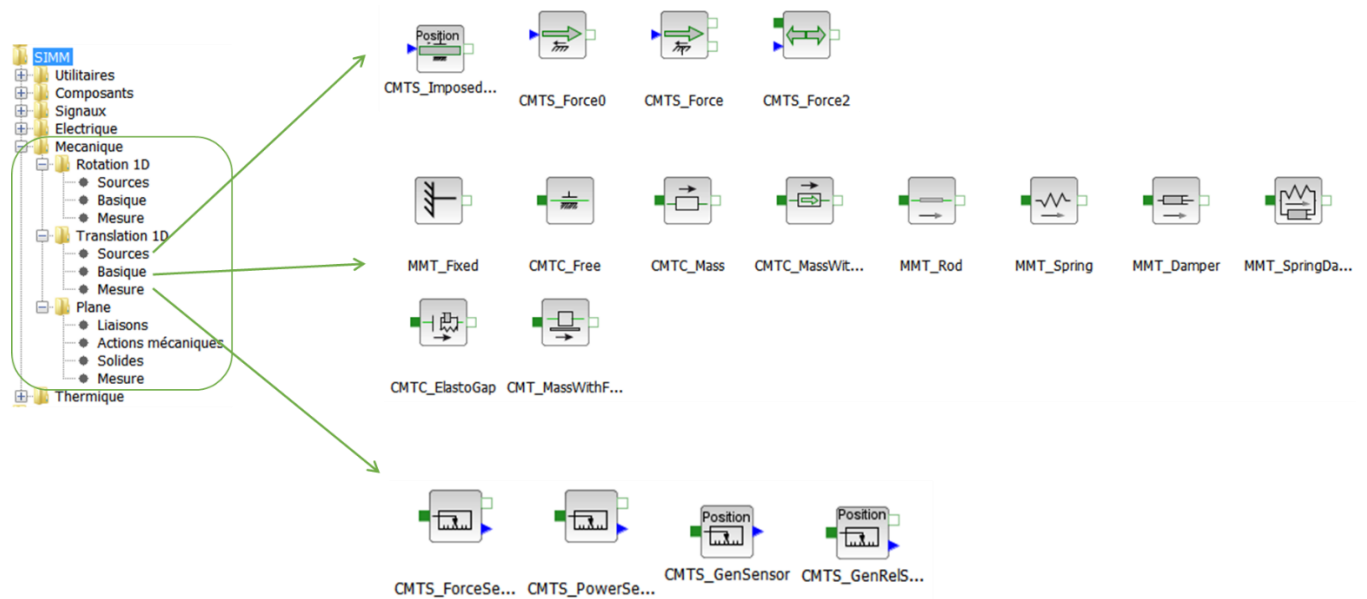


MECANIQUE

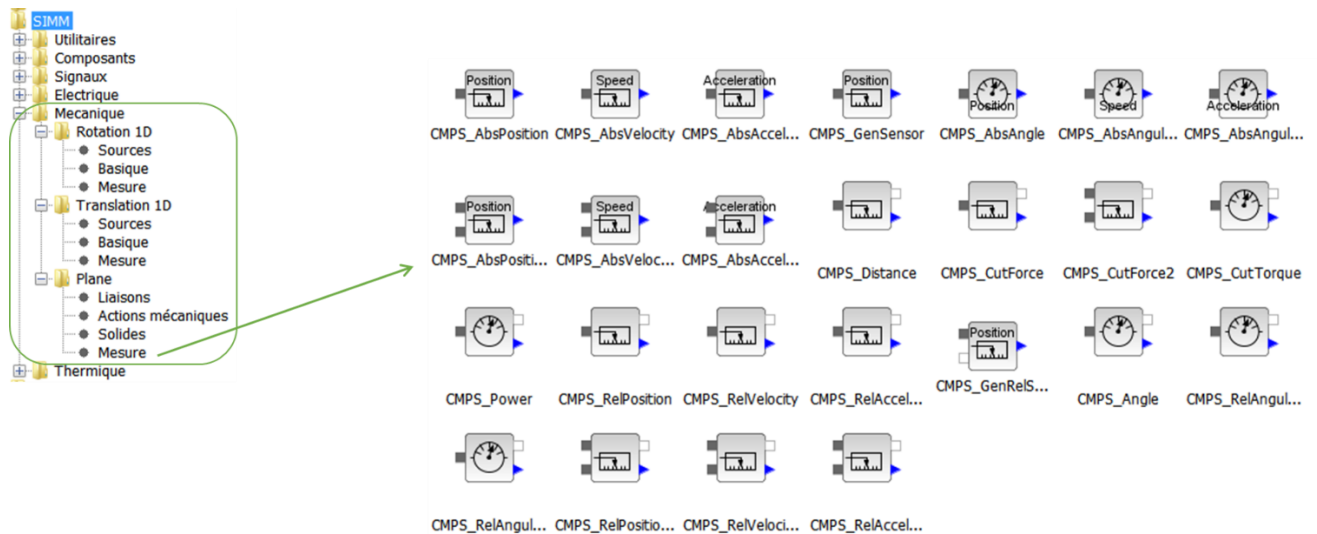
ROTATION 1D



TRANSLATION 1D



PLANE









CONNECTEURS PHYSIQUES

Les blocs sous SIMM possèdent des connecteurs à gauche et à droite qui représentent une connexion physique possible. Chaque connecteur fait transiter des grandeurs de type flux ou de type potentiel.

Lorsque deux blocs sont reliés, il faut s'assurer que les connecteurs soient de même type. Un fil représente une contrainte d'équipotentialité.

Le tableau suivant liste les symboles utilisés dans SIMM ainsi que les noms des grandeurs physiques qui transitent dans chaque connecteur.

Symboles	Type de connecteur	Raccourcis pour les types	Grandeurs accessibles dans le connecteur noté c
	Electrique	El+, El-	c.v : potentiel en V c.i : courant en A
	Rotation 1D	Ro+, Ro-	c.phi angle en rad c.tau couple en Nm
	Translation 1D	Tr+, Tr-	c.f force en N c.s position en m
	Mécanique plane	Pl+, Pl-	c.f force 2D en N c.t couple en Nm c.r_0 position absolue en m c.phi angle en rad
	Thermique	Th+, Th-	c.T température en Kelvin c.Q_flow flux thermique en W
	Signaux	Si+ (Si-)	c.signal (sans unité)

Remarque importante : Il faut relier les blocs entre eux en respectant obligatoirement les formes et couleurs des connecteurs.