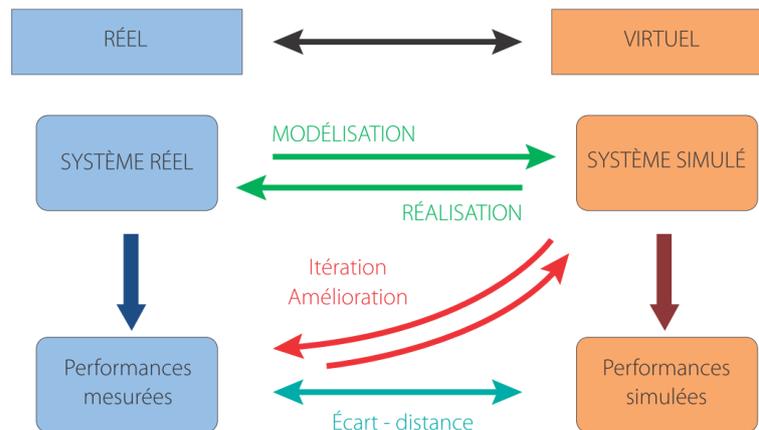
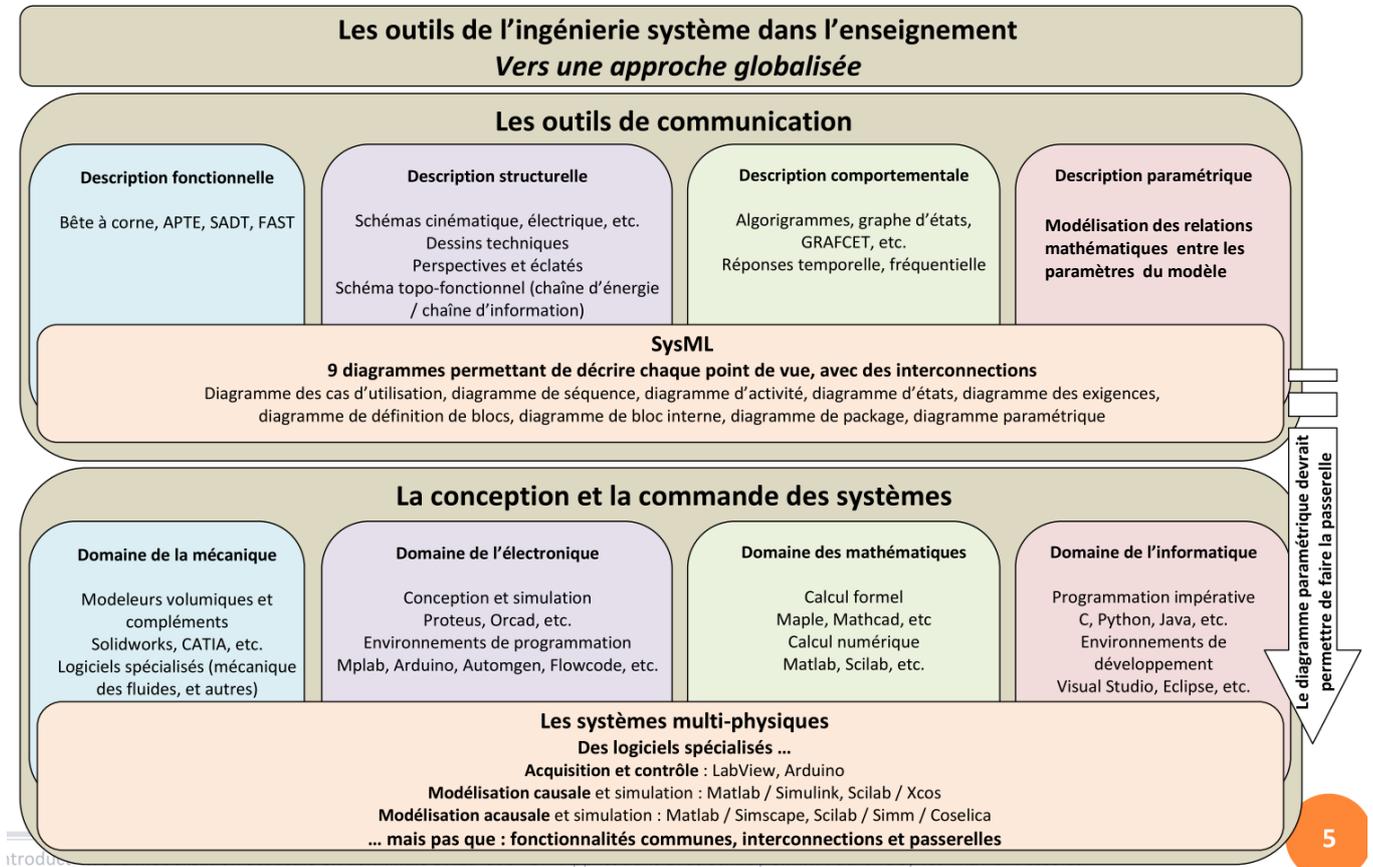


Outils de l'ingénierie système : Modélisation et simulation



Contenu

1	MODELE DE CONNAISSANCE.....	2
2	MODELE DE COMPORTEMENT OU EXPERIMENTAL.....	3
3	MODELE ACAUSAL.....	4
4	MODELISATION ACAUSALE MULTI-PHYSIQUE.....	5
5	SIMULATION « HARDWARE IN THE LOOP (HIL)».....	6
6	TRAVAIL DEMANDE : ROBOT COLLABORATIF COMAX.....	7

Sources et liens actifs au 03/06/2021 :

- Livret Scilab/Xcos [Lien « livret Scilab Xcos.pdf »](#)
- La modélisation multi physique des systèmes P.Fichou [Lien « modélisation multiphysique pdf »](#)
- La simulation Hardware-in-the-loop (HIL) MathWork [lien « Hardware in the loop »](#)



1 MODELE DE CONNAISSANCE

Définition et principe :

Un modèle de connaissance est établi à partir des lois de la physique ou de la chimie et s'appuie sur des équations différentielles.

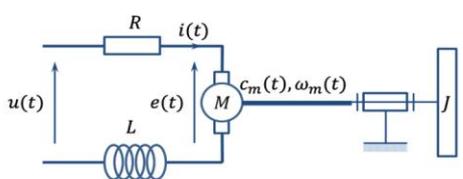
Il permet de prévoir l'évolution du comportement d'un système en faisant un calcul point par point avec un pas de calcul adapté à la vitesse d'évolution des phénomènes sur une durée de simulation permettant d'obtenir le régime établi.

La modélisation repose sur :

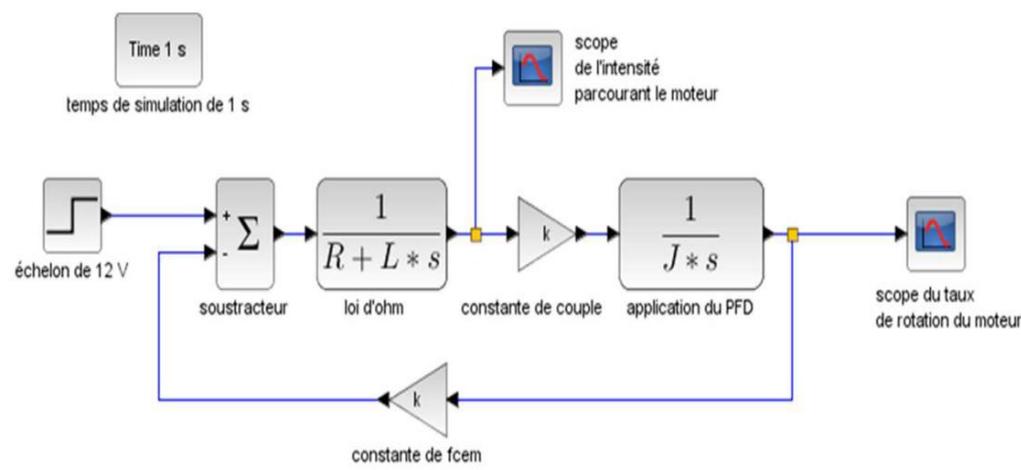
- la notion de fonction de transfert en calcul symbolique (transformée de Laplace), ou isochrone (notation complexe en régime sinusoïdal établi),
- la représentation sous forme de schémas blocs pour laquelle les conditions initiales nulles sont imposées

Exemple sur une MCC avec sa charge :

- Équations électriques
 - Loi des mailles
 - $u(t) = e(t) + L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t)$
- Équations mécaniques
 - Théorème du moment dynamique
 - $J \frac{d\omega_m(t)}{dt} = c_m(t) - c_r(t)$
 - Couple résistant
 - $c_r(t) = f_v \omega_m(t)$
- Équations électro mécanique
 - $e(t) = K_E \omega_m(t)$
 - $c_m(t) = K_C i(t)$
- Phénomène non linéaire
 - Exemple : saturation du courant $-i_S \leq i(t) \leq i_S$



The diagram shows an electrical circuit with a voltage source $u(t)$, a resistor R , an inductor L , and a motor M . The current $i(t)$ flows through the resistor and inductor. The motor is represented by a circle with a plus sign and a minus sign, and is connected to a mechanical load J . The motor's back EMF is $e(t)$, its torque is $c_m(t)$, and its angular velocity is $\omega_m(t)$.



The block diagram shows a simulation model. It starts with a 12V step input (échelon de 12V) entering a summing junction (souvstracteur). The other input to the summing junction is the back EMF signal. The output of the summing junction goes through a transfer function block representing Ohm's law: $\frac{1}{R + L * s}$ (loi d'ohm). This is followed by a gain block k (constante de couple). The output then goes through another transfer function block representing the motor's inertia: $\frac{1}{J * s}$ (application du PFD). The output of this block is the angular velocity, which is shown on a scope (scope du taux de rotation du moteur). The angular velocity is also fed back through a gain block k (constante de fem) to the summing junction. A simulation time of 1 second (Time 1 s, temps de simulation de 1 s) is indicated. Another scope (scope de l'intensité parcourant le moteur) is connected to the current signal before the first gain block.

Modèle SCILAB XCOS

L'introduction de non linéarités (saturations, seuil ou jeu, relation E/S non linéaire, hystérésis...) peut être réalisée.

Limite de ce modèle :

- La complexité de certains systèmes (nombre de constituants et imbrication),
- le nombre de paramètres influant (variables de commande et perturbations),
- la connaissance des valeurs de ces paramètres et la précision nécessaire.



JC Rolin 06/2021

2

Lycée G.Eiffel Dijon

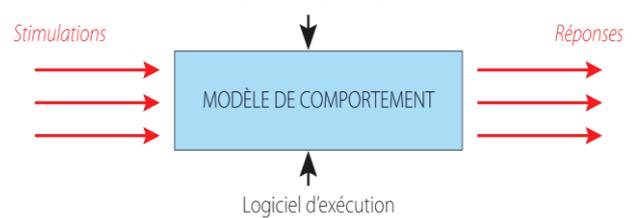
2 MODELE DE COMPORTEMENT OU EXPERIMENTAL

Définition et principe :

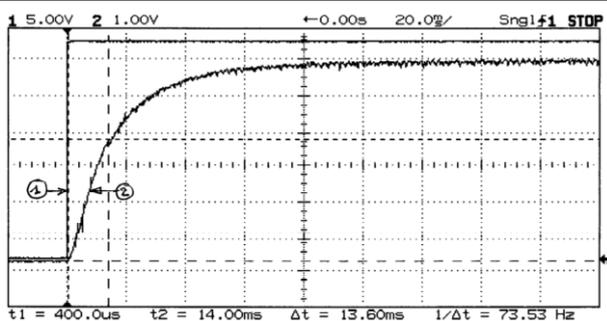
Lorsqu'un système est complexe ou inconnu, on peut à partir d'essais et de sollicitations types en entrée (temporel ou fréquentiel), observer la réponse de sa sortie et déduire globalement sa loi de comportement dominant.

Les sollicitations appliquées en entrée les plus usuelles sont :

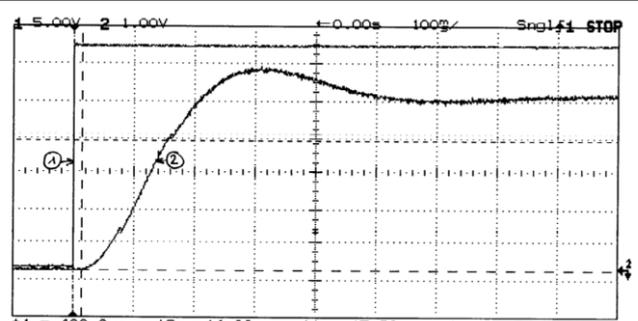
- **Essai indiciel** (échelon), parfois impulsionnel ou rampe,
- **Essai fréquentiel** avec entrée sinusoïdale à fréquence variable et amplitude connue.



Exemples de réponses indicielles

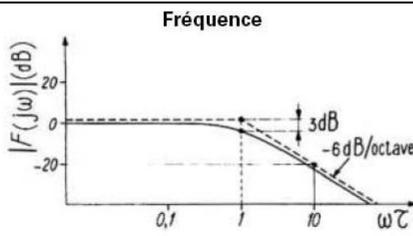


Premier ordre passe bas dominant $H(p) = \frac{K}{1+\tau p}$



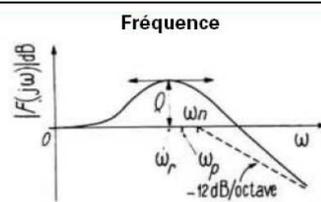
Second ordre dominant $H(p) = \frac{K}{1+\frac{2m}{\omega_0}p+\frac{p^2}{\omega_0^2}}$

Exemples de réponses fréquentielles



réponse en fréquence (plan de Bode)
 ω_c pulsation de cassure : $\omega_c = 1/\tau$

$$t_r \approx 3\tau \approx \frac{3}{\omega_c} \approx \frac{\pi}{\omega_c}$$



réponse en fréquence (plan de Bode)

pour $z = 0,43$, $Q = 2,3$ dB
 Q coefficient de surtension

ω_r pulsation de résonance : $\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2z^2}$

Pour le second ordre, distinguer :
 Réponse indiciel pseudo périodique

ω_p pseudo période

$$\omega_p = \omega_n \sqrt{1-m^2} \text{ ou } \omega_p = \omega_0 \sqrt{1-m^2}$$

Réponse fréquentielle

ω_r pulsation de résonance

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2m^2} \text{ ou } \omega_r = \omega_0 \sqrt{1-2m^2}$$

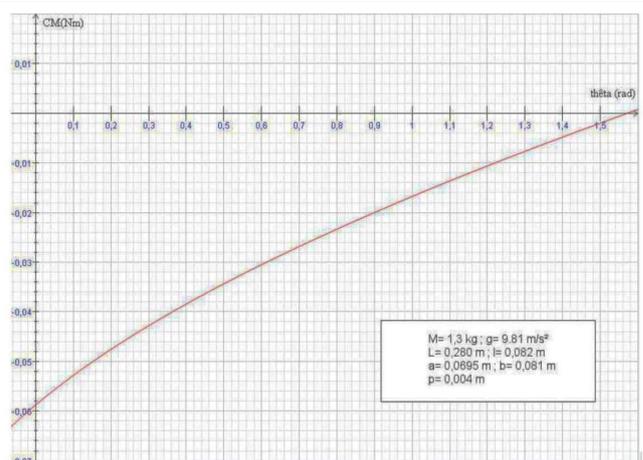
On peut aussi utiliser une loi entrée/sortie obtenue par essais

Exemple : POSITION VERTICALE DU MAXPID

Couple rapporté au moteur en fonction de l'angle du bras en radian.

On peut **linéariser** la fonction pour un angle à demi course (45°) par exemple :

- **graphiquement**,
- **numériquement** par la **méthode des moindres carrés** si on dispose du fichier numérique de points.



3 MODELE ACAUSAL

La modélisation dite « acausale », contrairement à celle vue précédemment, permet de décrire les systèmes sans anticiper l'orientation des liens entre les composants ou phénomènes.

Comme son nom l'indique, un modèle acausal ne présente pas de lien de cause à effet et 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.

Exploitation inversée d'un modèle acausal

On peut imaginer que l'on impose une forme de loi de sortie à un entraînement, position en fonction du temps par exemple, et que l'on recherche la loi d'entrée à obtenir. La trajectoire de l'extrémité du bras d'un robot peut par exemple être fixée en 3D et on déduit les tensions à fixer aux bornes des moteurs des 3 axes par simulation du modèle acausal.

Ceci est impossible avec un modèle causal mais ne pose pas de difficulté avec un modèle acausal.

Les avantages de la simulation inversée en font un outil prisé en entreprise.

Cela 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.

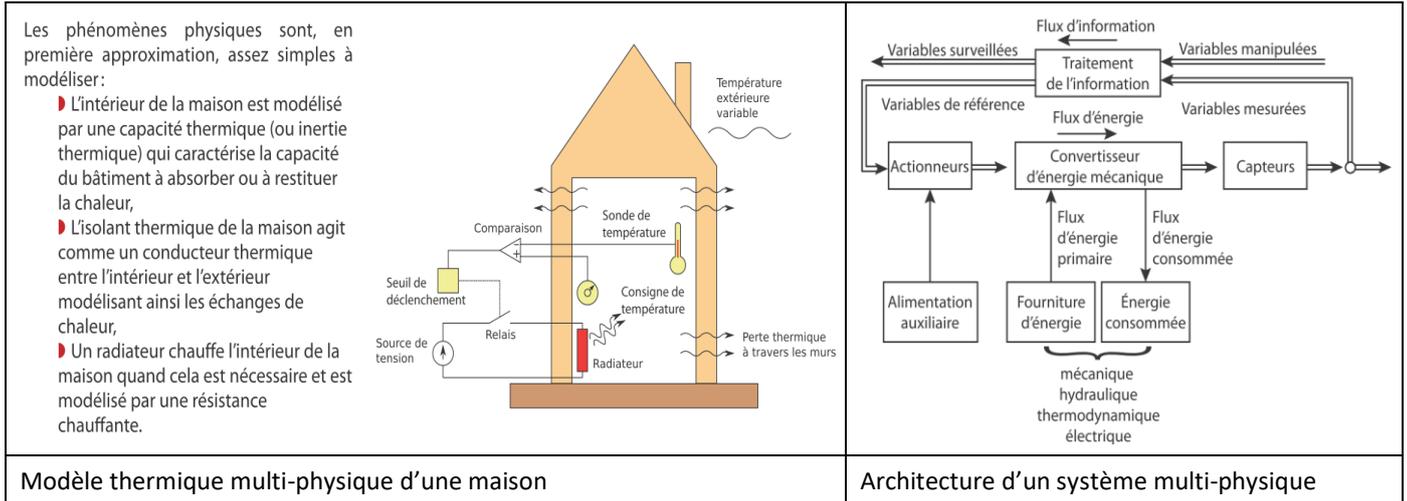
D'un point de vue pédagogique, le modèle acausal est très proche de l'architecture matérielle et permet de simuler le comportement d'un système complexe sans avoir à écrire la moindre équation.

Cette modélisation offre une très grande souplesse et adaptabilité.

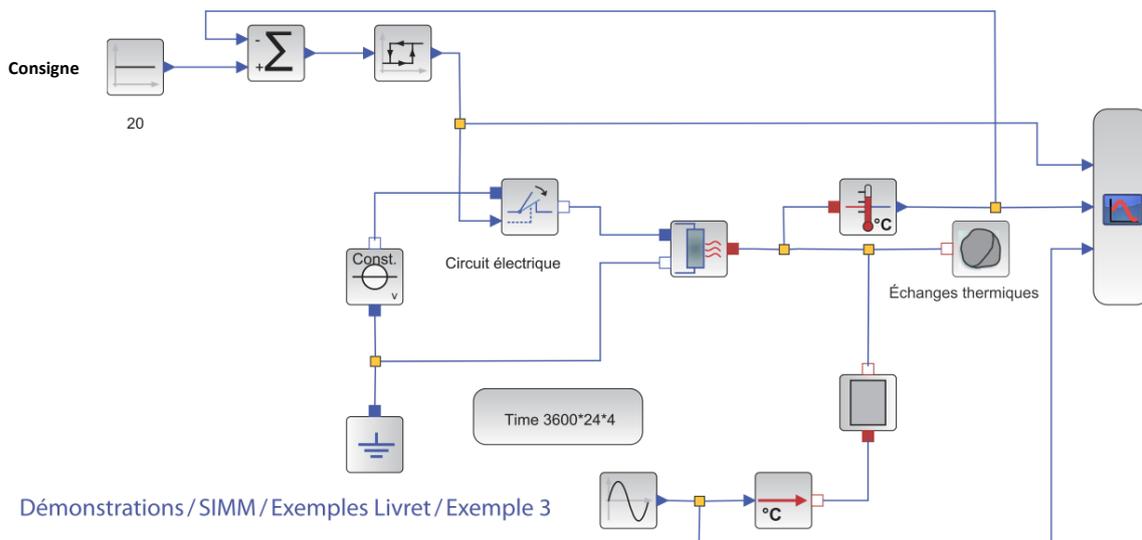
	$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}, u_R(t) = R i(t)$ $i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$ $U(t) = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t)$	
	$u_C(t) = \int \frac{1}{C} \cdot i(t)$ $i(t) = \int \frac{1}{L} \cdot (U(t) - u_C(t) - R i(t))$	
<p>Système RLC série : Approche causale et schémas causaux (ou causaux) (SCILAB/ XCOS)</p>		<p>RLC série : Schéma acausal (SCILAB/XCOS/SIMM)</p>
<p>Système de suspension : modélisation causale...</p>	<p>...et acausale</p>	

4 MODELISATION ACAUSALE MULTI-PHYSIQUE

La modélisation acausale ouvre la porte à la modélisation multi-physique, qui associe les variables énergétiques en mécanique, électricité, thermique et les variables de mesures.



Modèle multi-physique du chauffage de la maison (SCILAB/XCOS/SIMM) et conventions sur les liaisons



- Triangle bleu : signal de données (sans dimension)
- Triangle rouge : événements (ex : horloge)
- Carré bleu : signal électrique
- Carré rouge : donnée thermique
- Carré vert : mécanique 1D en translation
- Rond gris : mécanique 1D en rotation
- Carré gris : mécanique 2D plane

**Perturbation journalière sur 24h
(Alternance diurne / nocturne)**



Chacune des formes des connecteurs correspond à une grandeur physique. Une validation des liens entre connecteurs est réalisée lors de la simulation afin de garantir une modélisation cohérente.

Reliez les blocs entre eux en respectant obligatoirement les formes et couleurs des connecteurs. Relier un connecteur carré-rouge à un connecteur carré-bleu revient à écrire une égalité entre l'électrique et le thermique sans conversion. Ce type de connexion ne générera pas d'erreur lors de l'édition du diagramme mais une erreur de compilation sera retournée lors de la simulation.

Modèle multi-physique électromécanique d'un angiographe

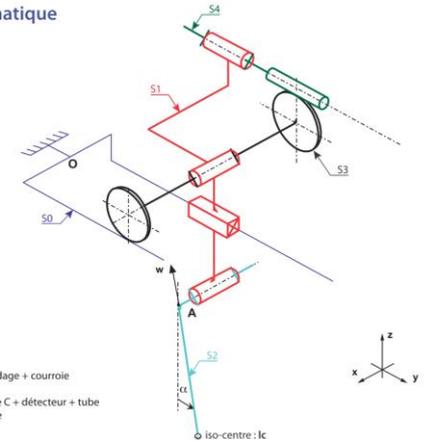
L'ensemble est constitué d'un chariot supportant l'armature (S2), mis en mouvement par un **moteur à courant continu suivi d'un réducteur roue-vis qui entraîne les roues du chariot.**

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.

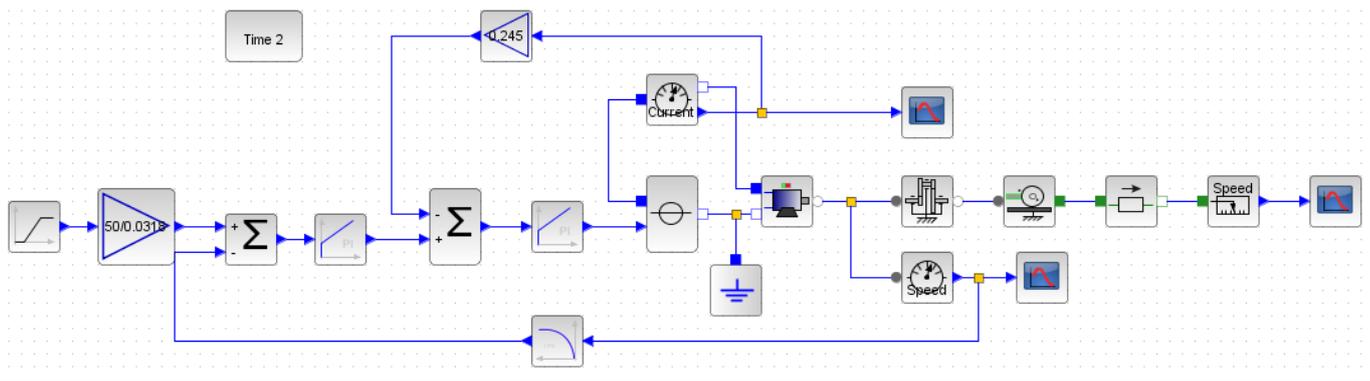
L'ensemble constitué de la chaîne image latérale et de son armature suspendue est au plafond.

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.

Schéma cinématique



S0 : Plafond + rails de guidage + courroie
 S1 : Chariot
 S2 : Armature en forme de C + détecteur + tube
 S3 : Roue + poulie motrice
 S4 : Rotor moteur + vis

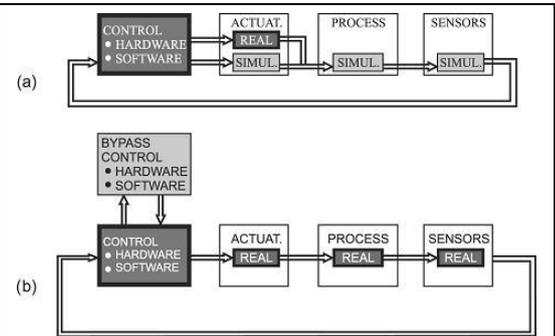


5 SIMULATION « HARDWARE IN THE LOOP (HIL) »

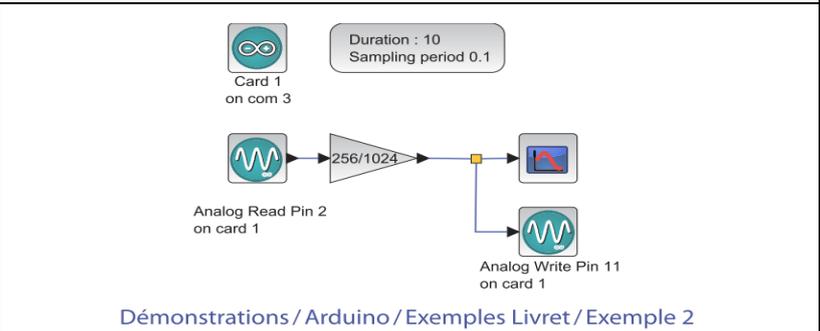
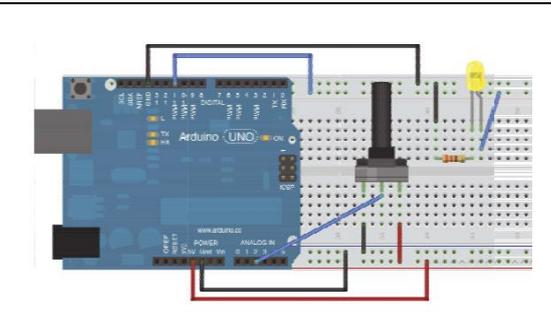
Ce type de simulation intègre du matériel physique dans une simulation logicielle. En général le matériel correspond au système à piloter, difficile à modéliser et qu'il faudra justement piloter...

Le pilotage et la correction sont sous forme logicielle, les capteurs sous forme matérielle ou logicielle (fig. a et b ci-dessous).

- Conception et tests du système de contrôle peuvent être faits sans le système réel (le travail peut s'effectuer en « labo », les expériences sont reproductibles et répétables à souhait).
- Les conditions d'essais sur système de contrôle matériel peuvent être poussées à l'extrême (haute/basse température, fortes accélérations et chocs mécaniques, CEM...).
- Essais sur les effets de défauts et pannes des actionneurs, capteurs et ordinateurs sur l'ensemble du système.
- Opérations facilitées avec différentes interfaces hommes-machines (conception de cockpit et formation des opérateurs).



Dans Scilab cette possibilité est offerte avec la librairie Arduino, l'exemple ci-dessous illustre simplement le principe.



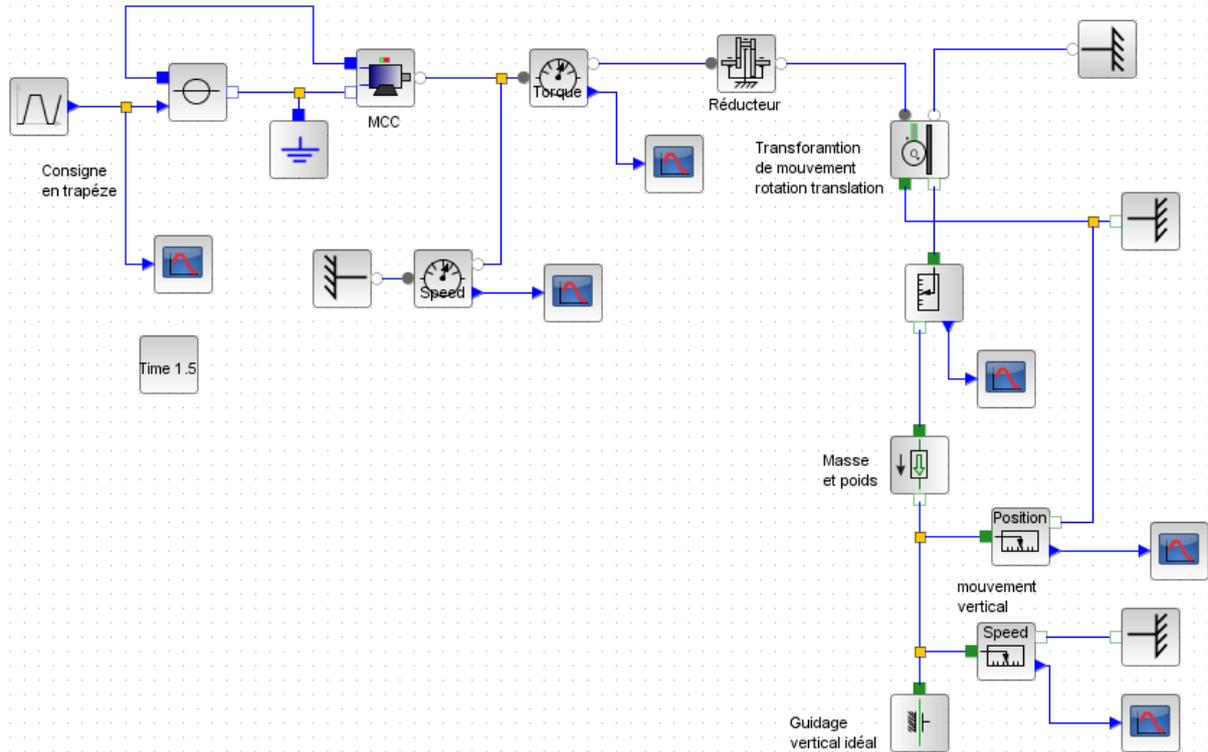
Partie matérielle : Potentiomètre relié à une entrée analogique et LED à une sortie PWM

Boucle logicielle : lecture de la tension issue du potentiomètre et écriture d'une sortie calculée sur la sortie analogique associée à la LED.

- ENREGISTRER le tracé de la réponse désirée de **la position verticale** et du courant moteur pour une montée et l'IMPRIMER et l'EXPLOITER de façon pertinente.
- FAIRE une synthèse de l'activité que vous venez d'effectuer sur les points clé que vous avez compris relatif au comportement transitoire (dynamique) du système.

2. Modèle acausal

Pour établir le modèle acausal du robot COMAX, on s'appuie sur le modèle suivant « COMAX_acausal_JCR.XCOS ».



Extrait de la palette SIMM (modélisation acausale)	Convention des connecteurs
	<p>Reliez les blocs entre eux en respectant obligatoirement les formes et couleurs des connecteurs. Relier un connecteur carré-rouge à un connecteur carré-bleu revient à écrire une égalité entre l'électrique et le thermique sans conversion...</p> <p>Ce type de connexion ne générera pas d'erreur lors de l'édition du diagramme mais une erreur de compilation sera retournée lors de la simulation.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Triangle bleu : signal de données (sans dimension) ○ Triangle rouge : événements (ex : horloge) ○ Carré bleu : signal électrique ○ Carré rouge : donnée thermique ○ Carré vert : mécanique 1D en translation ○ Rond gris : mécanique 1D en rotation ○ Carré gris : mécanique 2D plane ○ ...
<p>Pour changer l'orientation d'un bloc, sélectionnez le puis faire un clic droit et sélectionnez format / pivoter ou format / miroir ou tapez directement Ctrl+R ou Ctrl+M sous Windows et Linux / Cmd+R ou Cmd+M sous Mac OS X).</p>	

- IDENTIFIER les éléments modélisant la chaîne d'énergie du COMAX (alimenter, convertir et transmettre).
- A partir de la documentation du navigateur de palette, retrouver ces éléments et par un double clic vérifier ou/et compléter les valeurs fournies à partir des données techniques du COMAX.
- LANCER la simulation et VERIFIER le comportement en position et vitesse du système.
- AJOUTER un capteur de courant (palette SIMM > électrique > mesure) et sa visualisation.
- LANCER une nouvelle simulation et CONTROLER le niveau de courant, COMMENTER.
- IMPRIMER le résultat obtenu sur la réponse en vitesse à partir de cette consigne et COMMENTER votre tracé.
- FAIRE une synthèse de l'activité que vous venez d'effectuer sur les points clé que vous avez compris relatif à la différence entre modélisation causale et acausale et sur l'intérêt de cette dernière.