



**MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE CAUSALE ET ACAUSALE**

**DÉCOUVERTE DU LOGICIEL SCILAB – MODULE XCOS –  
SIMM**

**SIMULATION DU COMPORTEMENT DES SYSTÈMES**

**Démonstrations et applications**

# PROGRAMME (PRÉVISIONNEL) DE LA JOURNÉE

---

- Matin
  - Présentation « Modélisation multiphysique »
  - Découverte de l'utilisation du module Xcos de scilab
- Après midi
  - Proposition d'applications pédagogiques
    - TP – Modélisation multiphysique du pilote électrique de bateau
    - TP – Modélisation multiphysique du panneau solaire électrique (SET)
    - TD – Fonctionnement de la commande d'une machine à courant continu



# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

3

# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

## TENTATIVES DE DÉFINITIONS

---

- La modélisation multiphysique et multi échelle dans la recherche et l'industrie
  - La modélisation multiphysique 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 multiphysique en SII
  - Modélisation d'un système pluri technologique en intégrant tous les domaines de la physique nécessaires au fonctionnement de ce système

# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

## POSITIONNEMENT DANS L'ENSEIGNEMENT DES SII

### Les outils de l'ingénierie système dans l'enseignement Vers une approche globalisée

#### Les outils de communication

##### Description fonctionnelle

Bête à corne, APTE, SADT, FAST

##### Description structurelle

Schémas cinématique, électrique, etc.  
Dessins techniques  
Perspectives et éclatés  
Schéma topo-fonctionnel (chaîne d'énergie / chaîne d'information)

##### Description comportementale

Algorigrammes, graphe d'états, GRAFCET, etc.  
Réponses temporelle, fréquentielle

##### Description paramétrique

#### SysML

##### 9 diagrammes permettant de décrire chaque point de vue, avec des interconnexions

Diagramme des cas d'utilisation, diagramme de séquence, diagramme d'activité, diagramme d'états, diagramme des exigences, diagramme de définition de blocs, diagramme de bloc interne, diagramme de package, diagramme paramétrique

#### La conception et la commande des systèmes

##### Domaine de la mécanique

Modeleurs volumiques et compléments  
Solidworks, CATIA, etc.  
Logiciels spécialisés (mécanique des fluides, et autres)

##### Domaine de l'électronique

Conception et simulation  
Proteus, Orcad, etc.  
Environnements de programmation  
Mplab, Arduino, Automgen, Flowcode, etc.

##### Domaine des mathématiques

Calcul formel  
Maple, Mathcad, etc.  
Calcul numérique  
Matlab, Scilab, etc.

##### Domaine de l'informatique

Programmation impérative  
C, Python, Java, etc.  
Environnements de développement  
Visual Studio, Eclipse, etc.

#### Les systèmes multi-physiques

##### Des logiciels spécialisés ...

Acquisition et contrôle : LabView, Arduino

Modélisation causale et simulation : Matlab / Simulink, Scilab / Xcos

Modélisation acausale et simulation : Matlab / Simscape, Scilab / Simm / Coselica

... mais pas que : fonctionnalités communes, interconnexions et passerelles

Le diagramme paramétrique devrait permettre de faire la passerelle

# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

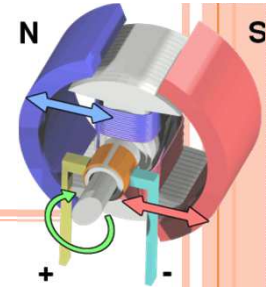
## LE MODÈLE DE CONNAISSANCE

---

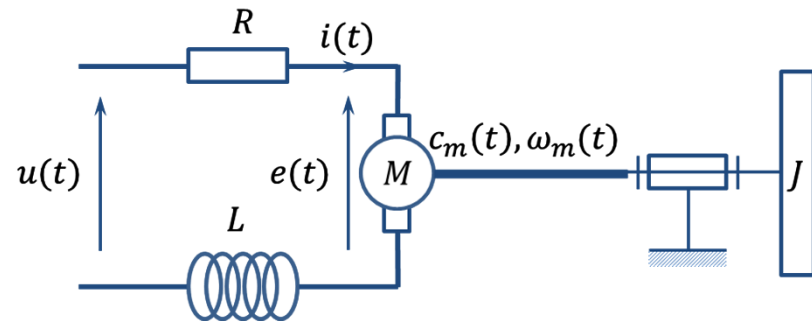
- Définition
  - Le modèle est établi à partir des lois de la physique ou de la chimie
- Objectif
  - Prévoir le comportement d'un constituant d'un système
- Problèmes
  - Complexité de certains systèmes
  - Identification nécessaire
    - Du nombre de paramètres influant (liés à la précision du modèle)
    - De la valeur de ces paramètres

# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

## LE MODÈLE DE CONNAISSANCE - EXEMPLE



- 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  $-i_S \leq i(t) \leq i_S$



# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

## MODÉLISATION CAUSALE – MISE EN SITUATION

---

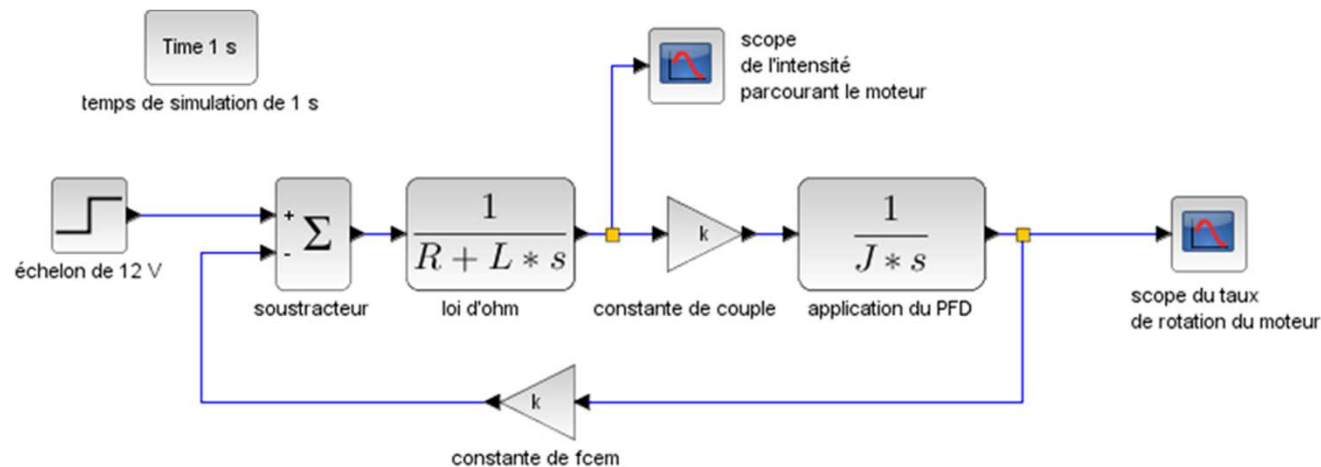
- La modélisation causale permet de modéliser des phénomènes linéaires
  - Loi de comportement régit par une application linéaire
    - $s(t) = k \cdot e(t)$
    - Exemples
      - Évolution de l'effort dans un ressort
      - Évolution de la tension aux bornes d'une résistance
  - Loi de comportement régit par une équation différentielle à coefficients constants ( $n \geq m$ )
    - $$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^{(i)}s(t)}{dt^{(i)}} = \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^{(j)}e(t)}{dt^{(j)}}$$
    - Exemples
      - Évolution de la tension aux bornes d'un condensateur
      - Évolution de l'effort dans un système en mouvement
- Certaines non linéarités sont prises en compte par les logiciels (saturations, seuils, hystérésis ...).
- Les phénomènes non linéaires peuvent être étudiés autour d'un point de fonctionnement après linéarisation.



# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

## MODÉLISATION CAUSALE – RÉOLUTION DES PROBLÈMES

- En causal
  - La modélisation repose sur le calcul symbolique :
    - la transformée (de Laplace)
    - L'algèbre de schémas blocs
  - La résolution se base sur une transformation des équations dans un domaine symbolique puis une transformation inverse permet de revenir dans le domaine temporel
  - Des conditions initiales nulles sont imposées



# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

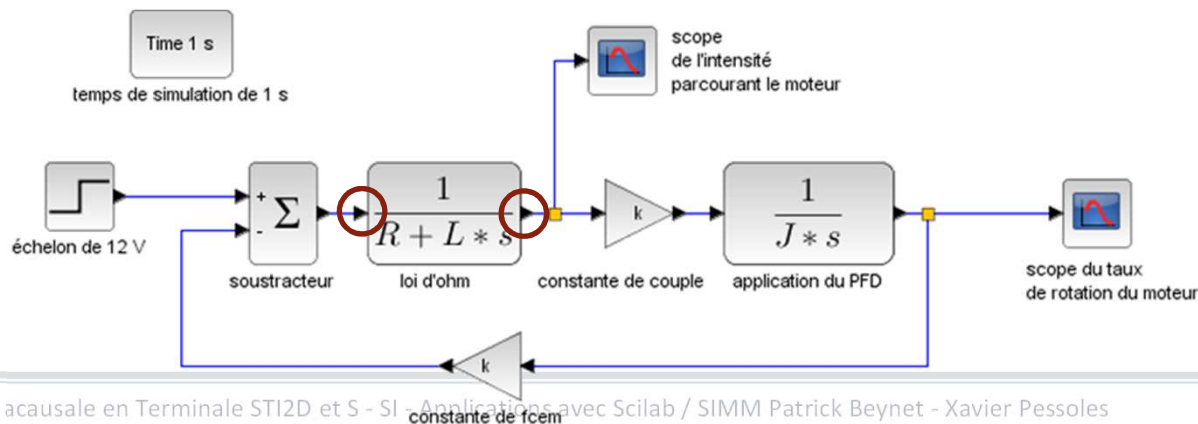
## MODÉLISATION CAUSALE – QUELQUES AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

### ○ Inconvénients

- Pas de réversibilité du modèle
  - $S \leftarrow F \cdot E$
  - Sens imposé par les flèches
- L'architecture du système n'est pas forcément respectée
- Le schéma impose une démarche de résolution au solveur.

### ○ Avantages

- La connaissance des symboles technologiques n'est pas exigée
- Recherche des solutions analytiques simplifiée
- Analyses fréquentielles simplifiées dans le domaine symbolique (Diagrammes de Bode, Black, Nyquist)



# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

## MODÉLISATION ACAUSALE – MISE EN SITUATION

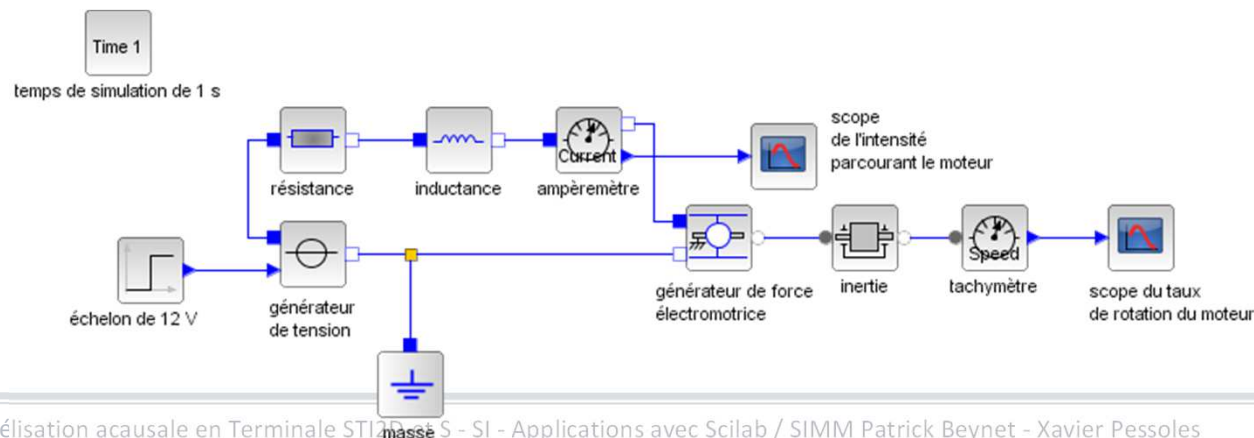
---

- D'un point de vu utilisateur :
  - le modèle de connaissance d'un composant n'est pas indispensable à la modélisation d'un système
  - il faut maîtriser les paramètres influant sur le comportement d'un constituant.
- La résolution des équations de comportement d'un système est obtenue à l'aide de solveurs qui optimisent les calculs.
  - Attention : le solveur peut être perçu comme une boîte noire qui peut conduire à une non – résolution du système d'équations.

# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

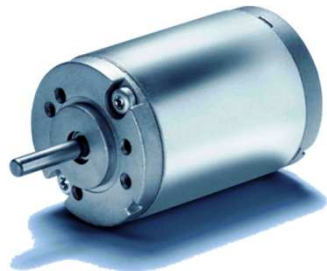
## MODÉLISATION ACAUSALE – MISE EN SITUATION

- Le modèle acausal respecte la symbolisation des composants qui constituent le système
- Les connecteurs utilisés sont adaptés à des grandeurs physiques, la polarité est respectée
- Les liens entre les blocs ne sont pas orientés
  - Le modèle acausal est réversible.
- L'analyse fréquentielle demande beaucoup plus de calculs que dans le cas d'une fonction de transfert globale (dans le domaine symbolique) :
  - Elle peut être réalisée à partir de plusieurs analyses temporelles

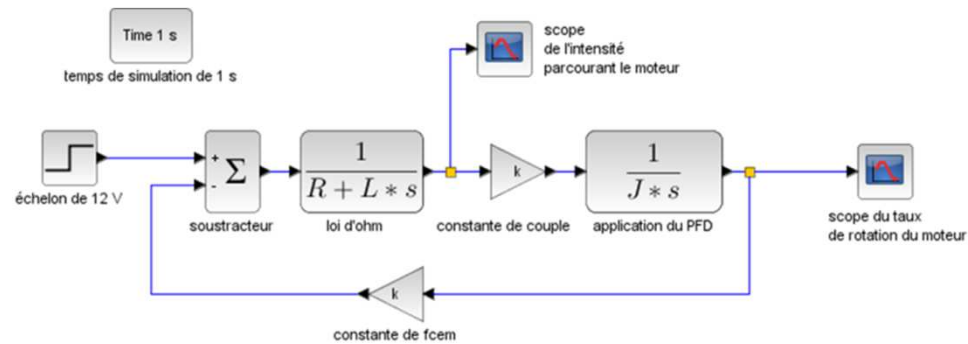


# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

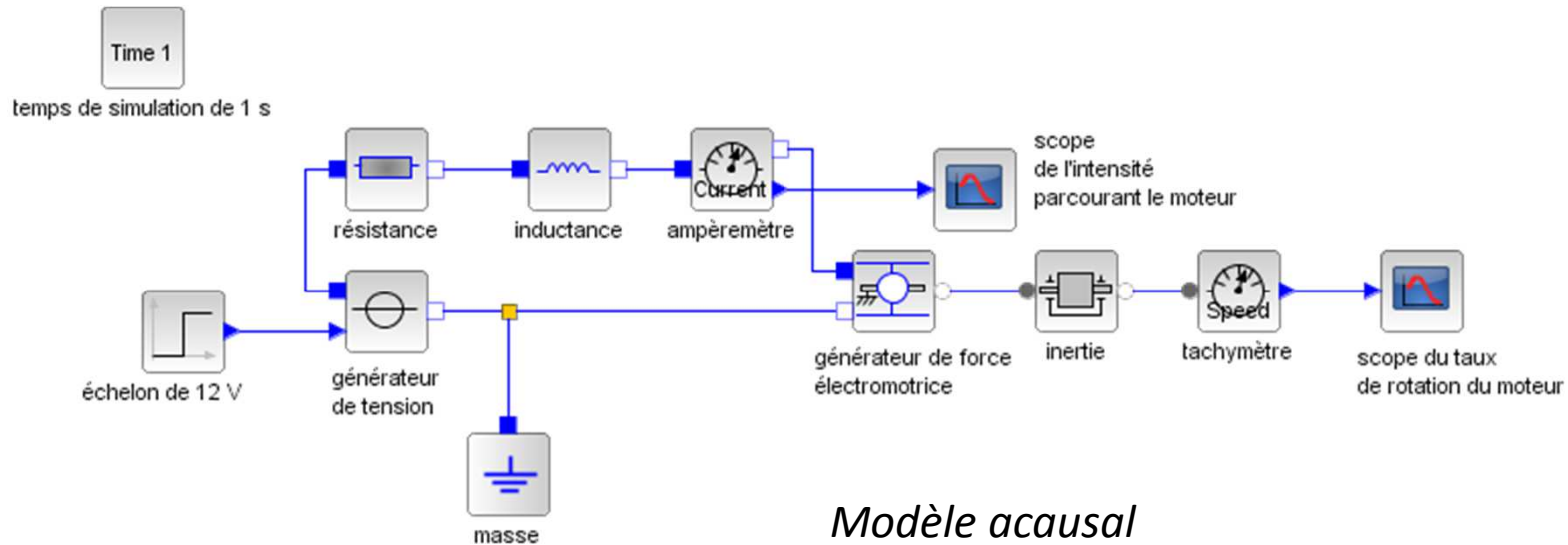
## COMPARAISON DES MODÈLES



*Système réel*



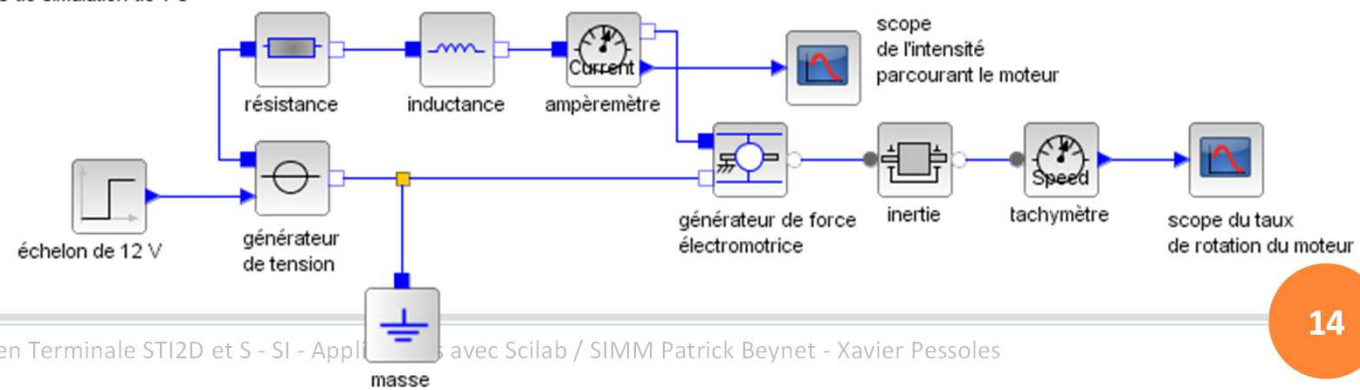
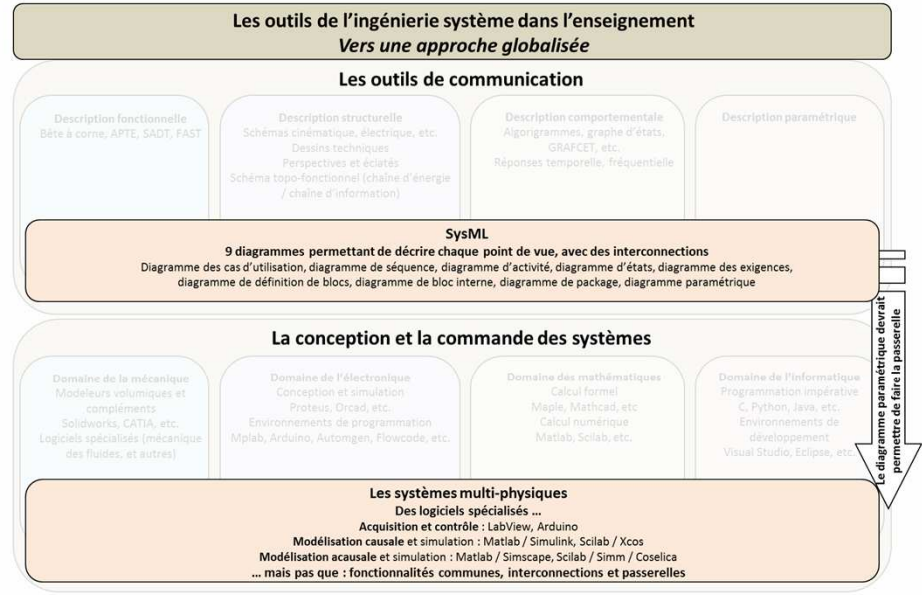
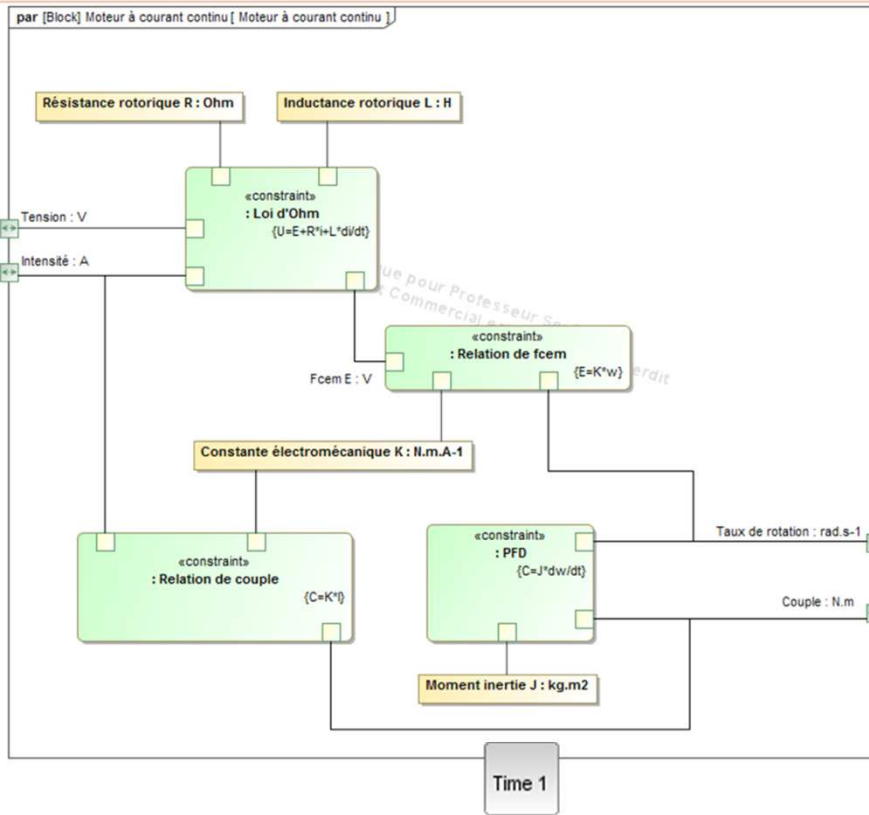
*Modèle causal*



*Modèle acausal*

# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

## SysML ↔ MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE





# MODÉLISATION DES SYSTÈMES AVEC SCILAB / XCOS

15

# MODÉLISATION DES SYSTÈMES AVEC SCILAB / XCOS

## LES LOGICIELS DE SIMULATION NUMÉRIQUE

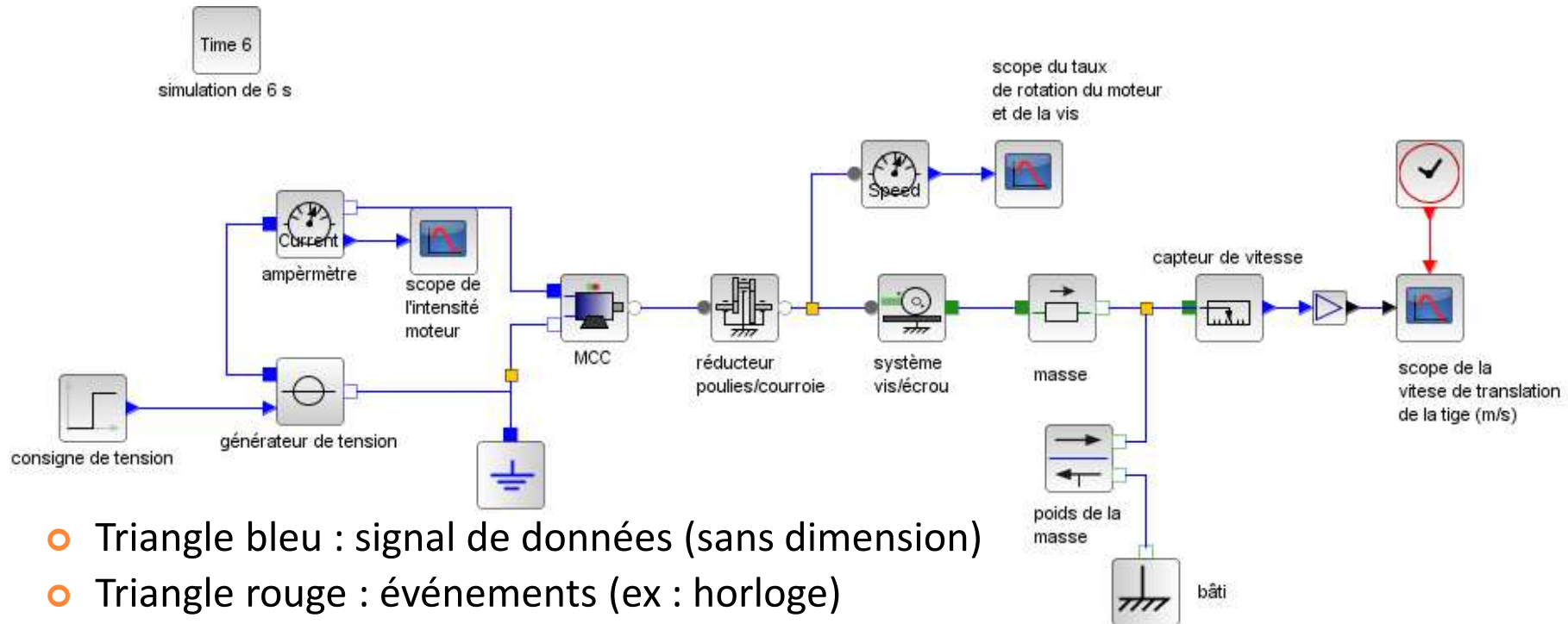
---

- Parmi les logiciels de simulation numérique utilisés dans la recherche ou dans l'industrie on trouve Matlab et Scilab.
  - Matlab et Scilab (...) sont des logiciels de calcul numérique. Ils possèdent un langage de programmation (haut niveau) permettant (entre autre) de manipuler aisément des matrices et d'afficher des courbes de résultats.
  - Simulink et Xcos sont des modules respectifs de Matlab et Scilab permettant de réaliser des modélisations graphiques de systèmes multiphysiques.
  - Des modules dédiés permettent de réaliser des modèles causaux ou acausaux.



# MODÉLISATION DES SYSTÈMES AVEC SCILAB / XCOS

## MODULES SIMM ET COSELICA



- 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
- ...

# MODÉLISATION DES SYSTÈMES AVEC SCILAB / XCOS

---

- Activité 1 : prise en main de Xcos : modélisation du moteur à courant continu
- Activité 2 : enrichissement du modèle du moteur à courant continu :