

# Bond Graphs

**un outil pour la modélisation et  
la simulation en CPGE**

---

Journées UPSTI – 2006 – Grenoble

Philippe Fichou, UPSTI, 2006

## **Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE**

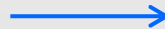
---

- **Bref rappel sur les éléments et la technique des Bond Graphs ;**
- **Première modélisation : un exemple mécanique élémentaire ;**
- **Modélisation et simulation avec le logiciel 20sim ;**
- **Seconde modélisation : partie 6 de l'épreuve SIA 2005 de la banque PT.**

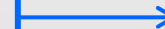
## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

---

Systeme  
réel



**Représenter  
graphiquement  
l'articulation des  
transferts d'énergie**



Représentation  
fonctionnelle &  
opérationnelle des  
transferts d'énergie au  
sein du système

**Bond Graph**

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

---

## Langage graphique


- ◆ **unifié** pour tous les domaines physiques et techniques ;
- ◆ **fondé** sur une étude des transferts de puissance au sein d'un système ;
- ◆ **modélisant** les systèmes à paramètres localisés.

## Permettant les approches

- ◆ **fonctionnelle** : bond graphs à mots ;
- ◆ **structurelle** : visualisation des propriétés de causalité ;
- ◆ **comportementale** : déduction des modèles mathématiques.

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Rappel : éléments de base

 Bond = lien (de puissance) acausal

◆ 2 éléments **actifs** (fournissent de la puissance)

- **Se** , **Sf** : source d'effort , source de flux

◆ 3 éléments **passifs** (reçoivent la puissance)

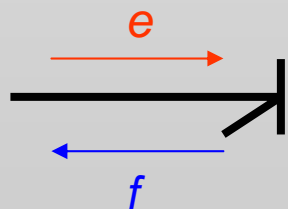
- **C** , **I** : stockage d'énergie
- **R** : dissipation d'énergie

◆ 4 éléments **de jonction** (conservent la puissance)

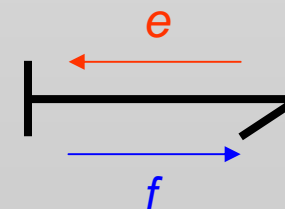
- **0** , **1** , **TF** , **GY**

1-port

n-port

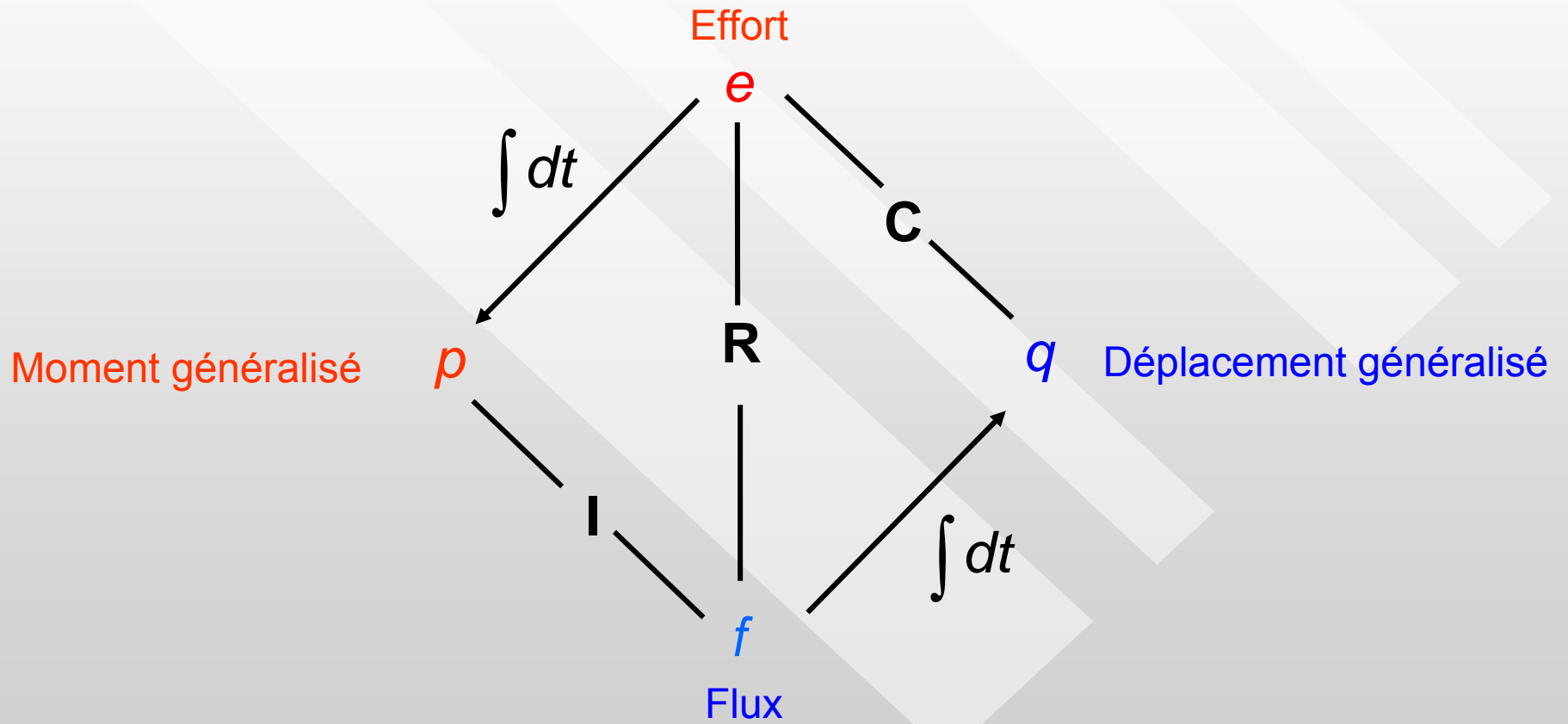


Lien causal



## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

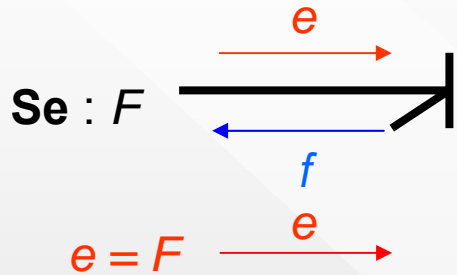
### Tétraèdre de Paynter



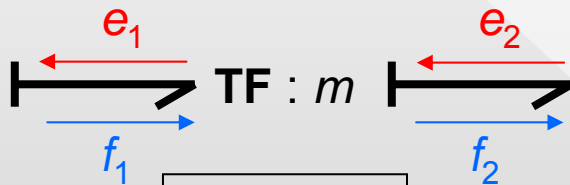
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## éléments de base & schémas blocs

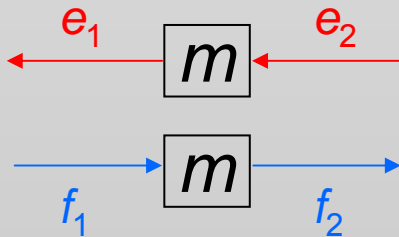
Source d'effort



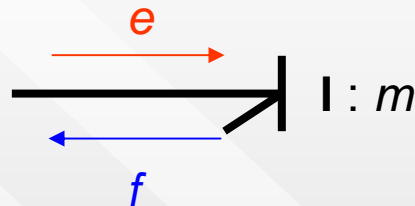
Transformateur



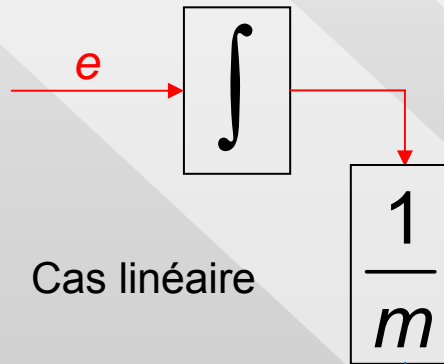
$$\begin{aligned} e_1 &= me_2 \\ f_2 &= mf_1 \end{aligned}$$



Élément I

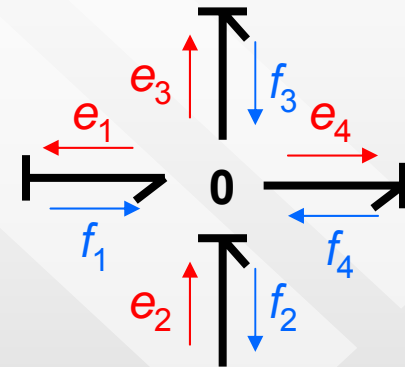


$$f = \frac{1}{m} \int e dt$$



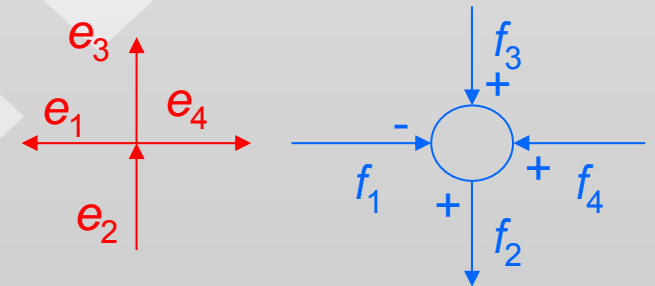
Cas linéaire

Jonction 0



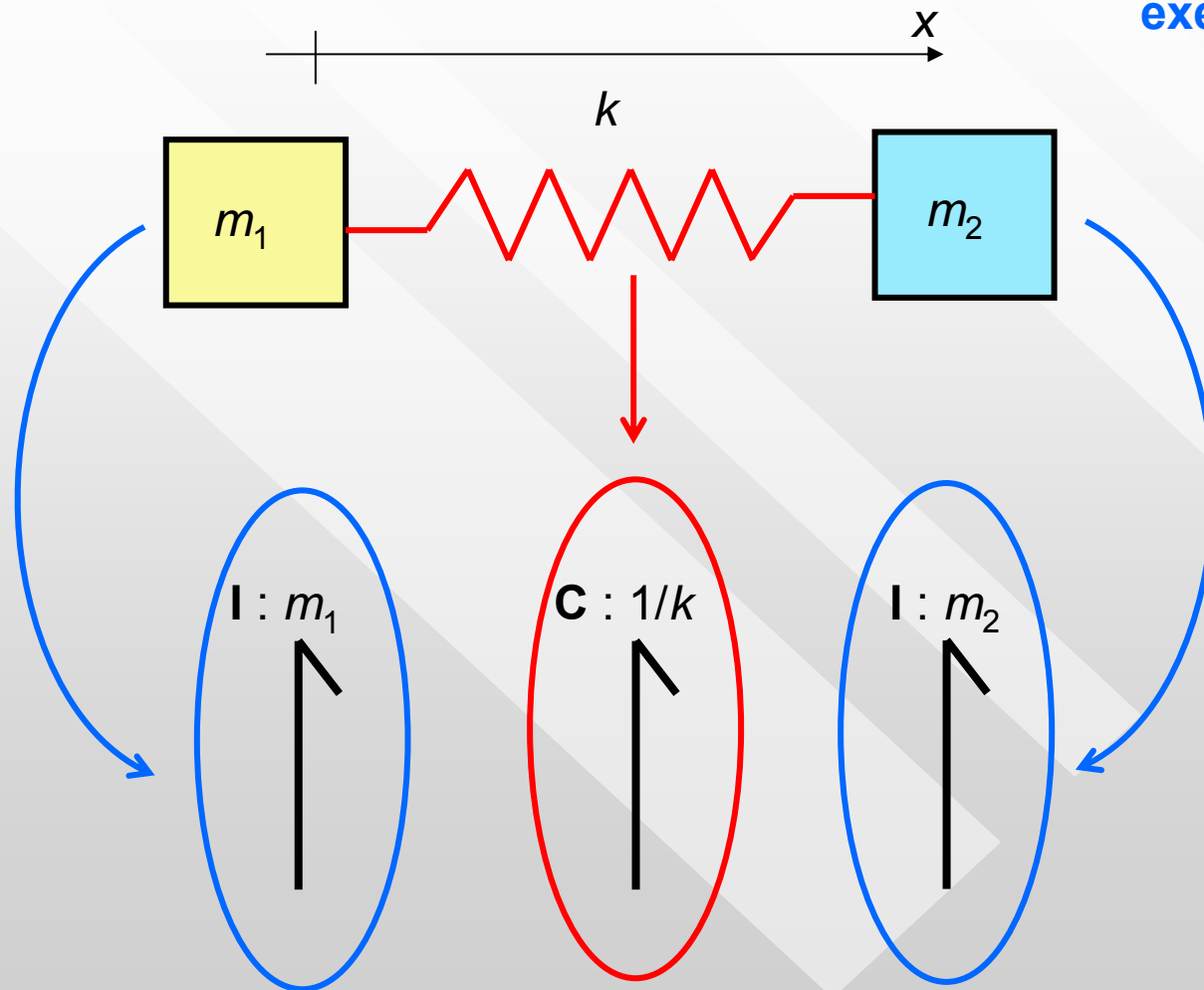
$$e_2 = e_1 = e_3 = e_4$$

$$f_2 = -f_1 + f_3 + f_4$$

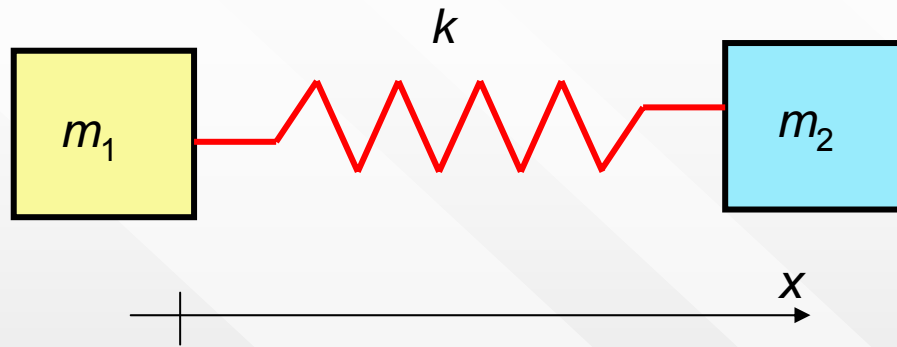


# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

exemple de base

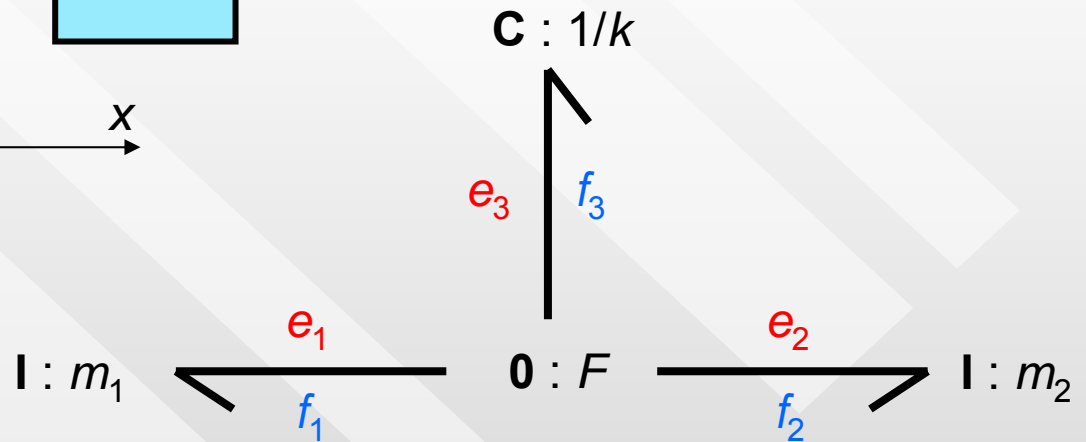


# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE



exemple de base

Système conservatif



$$P_1 + P_2 + P_3 = 0$$

$$e_1 f_1 + e_2 f_2 + e_3 f_3 = 0$$

or

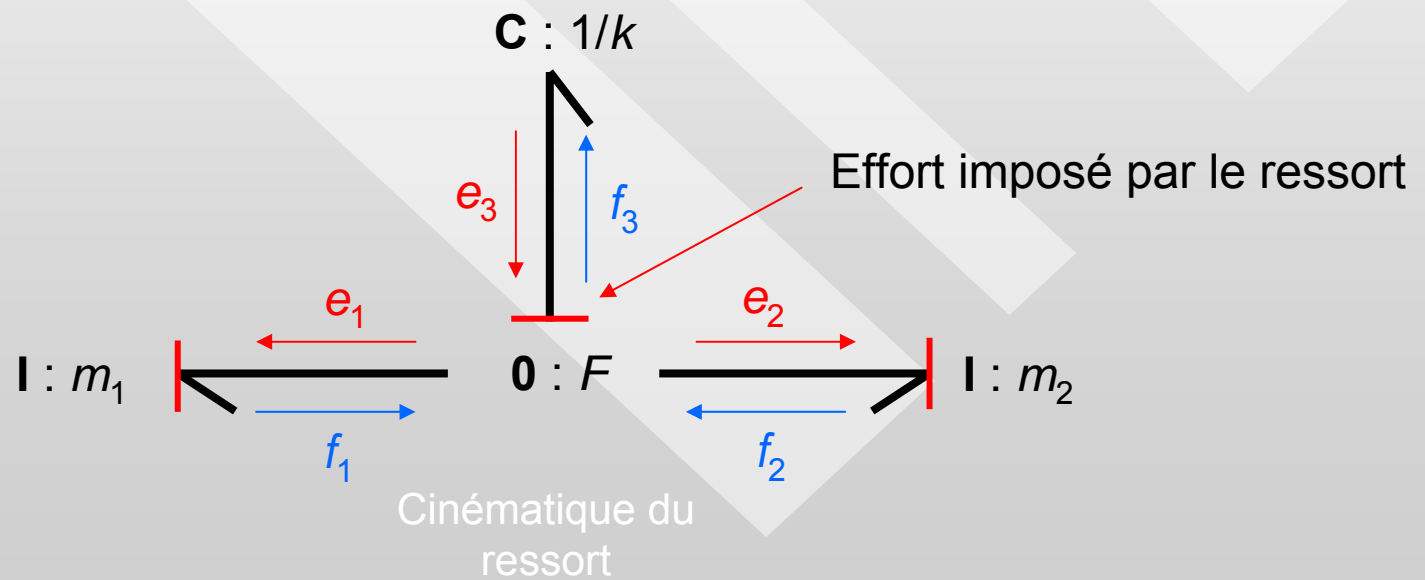
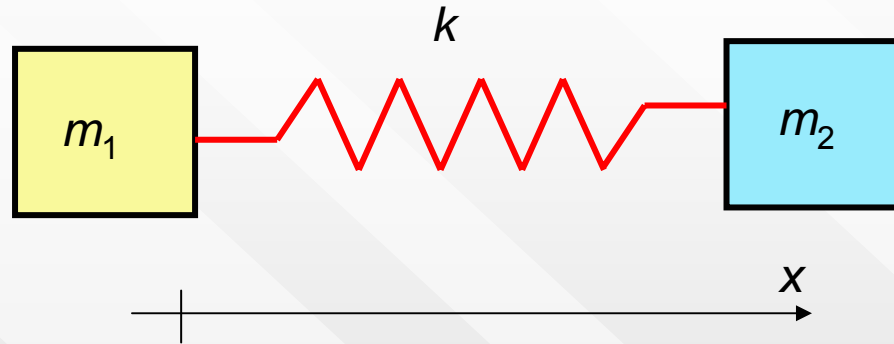
$$e_1 = e_2 = e_3 = F$$

donc

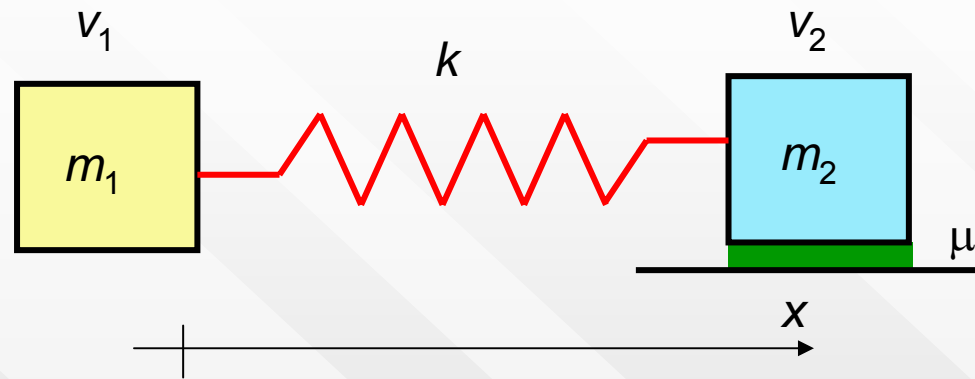
$$f_1 + f_2 + f_3 = 0$$

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

exemple de base

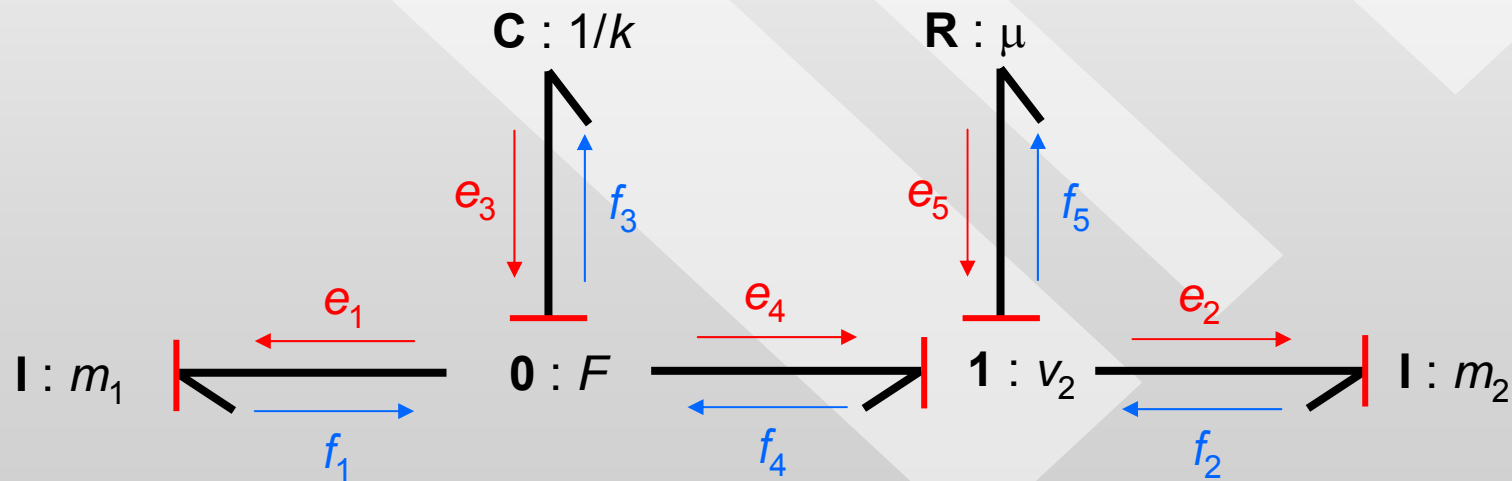


# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE



exemple de base

Prise en compte des dissipations



# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

exemple de base

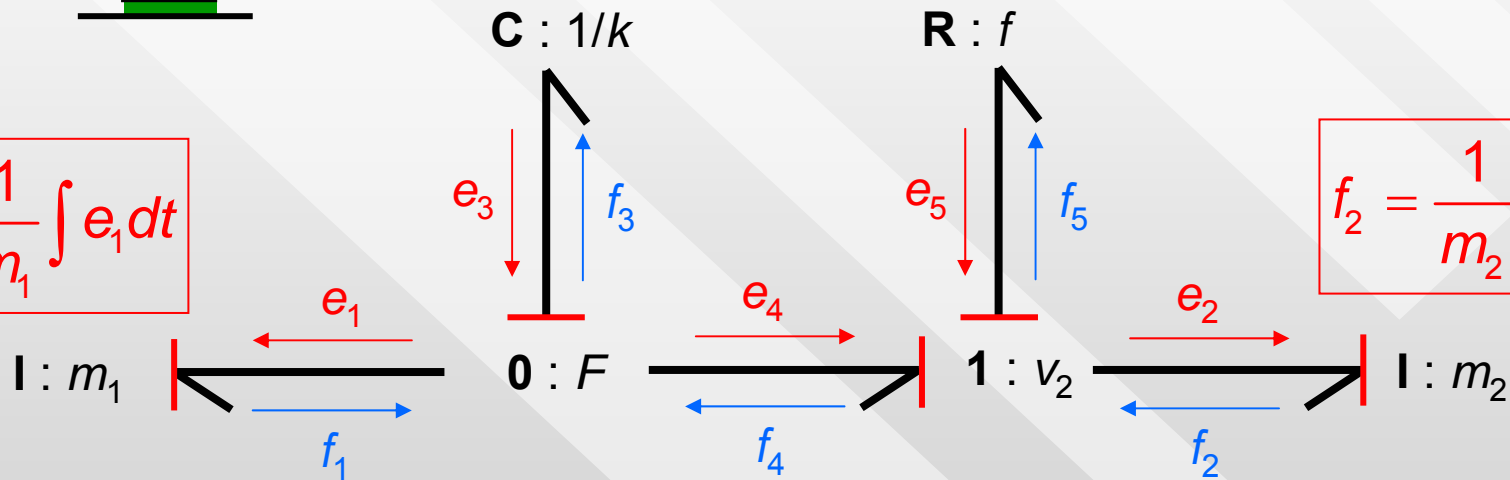


$$e_3 = k \int f_3 dt$$

$$e_5 = \mu f_5$$

$$f_1 = \frac{1}{m_1} \int e_1 dt$$

$$f_2 = \frac{1}{m_2} \int e_2 dt$$



$$\begin{aligned} e_1 &= e_4 = e_3 = F \\ f_3 &= -f_1 - f_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_4 &= f_5 = f_2 = v_2 \\ e_2 &= e_4 - e_5 \end{aligned}$$

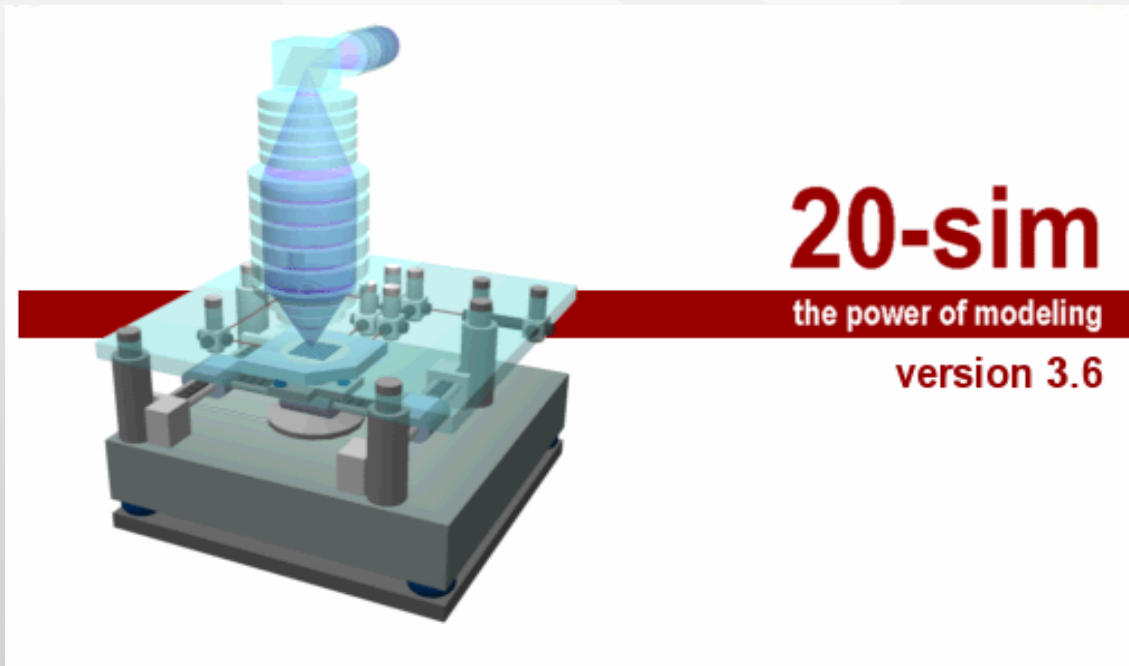
Cinématique du ressort

Théorème de la résultante dynamique à  $m_2$

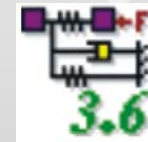
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Approche comportementale

### Simulation du bond graph avec 20-sim



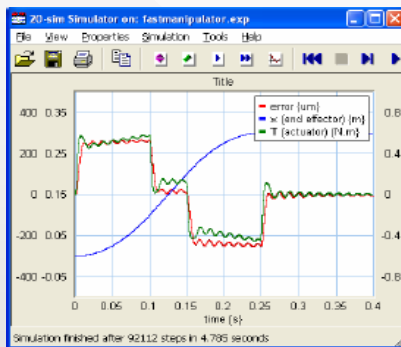
<http://www.20sim.com>



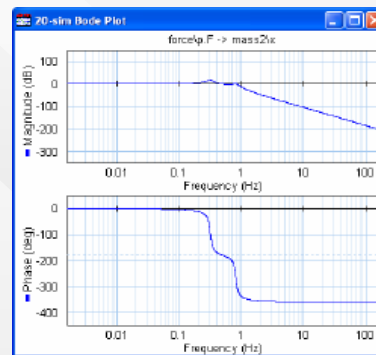
Merci à Christian Kleijn  
Université de Twente

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

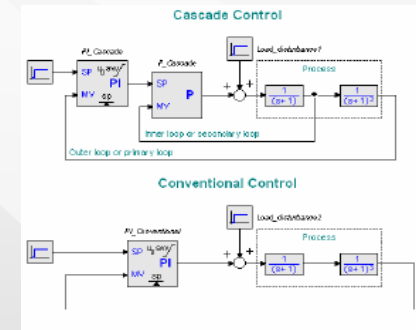
- Modélisation par bond graphs ;
- Modélisation par schémas blocs ;
- Modélisation par icônes diagrammes.



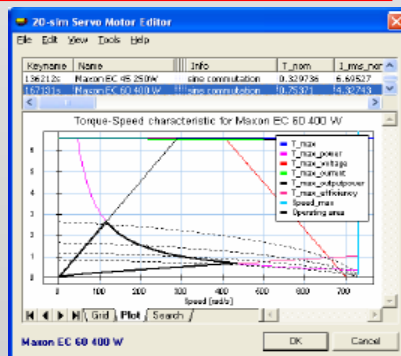
Domaine temporel



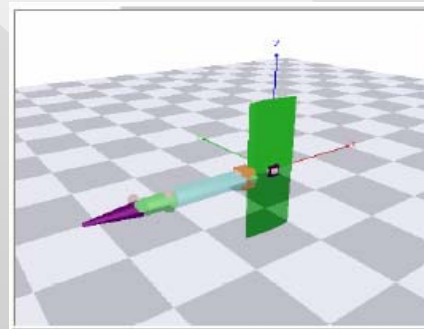
Domaine fréquentiel



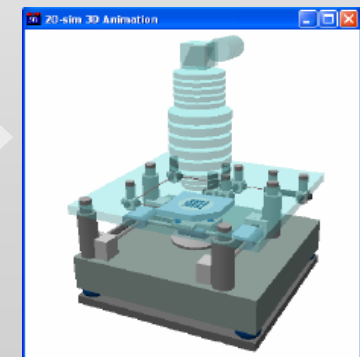
Contrôle commande



Mécatronique



Mécanique 3D

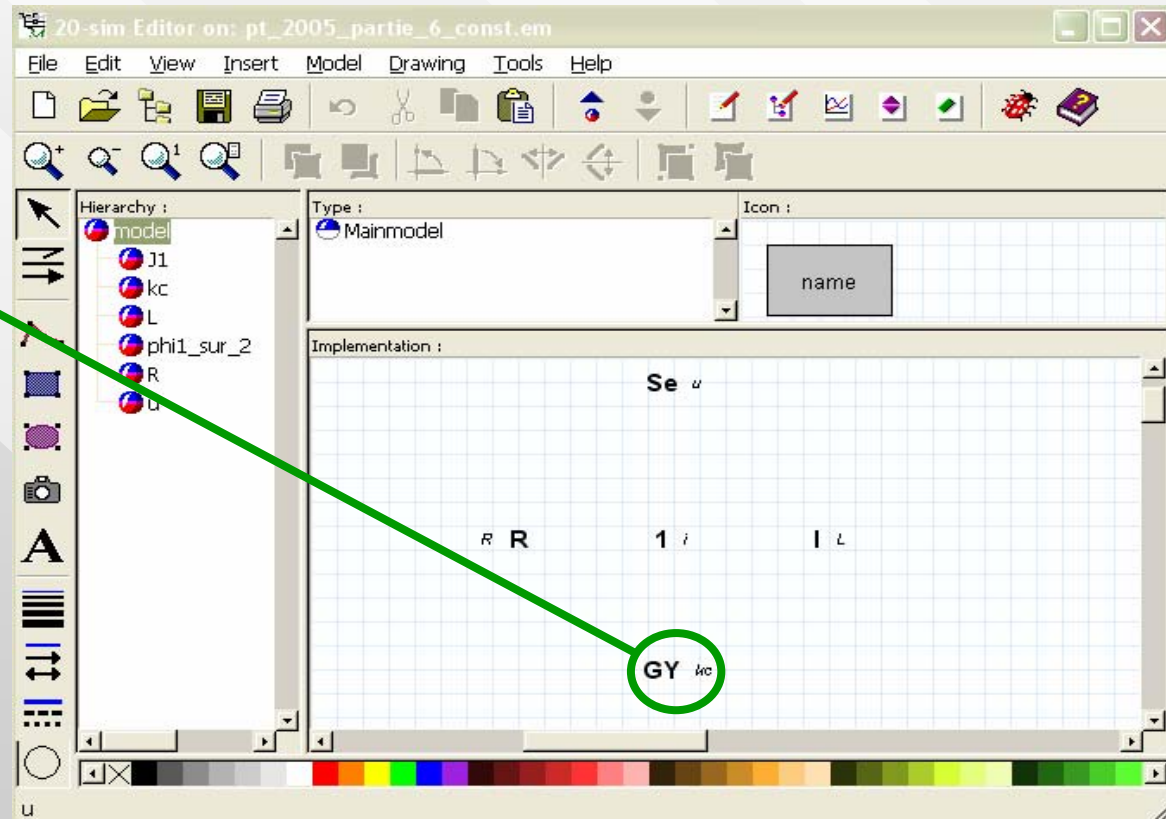
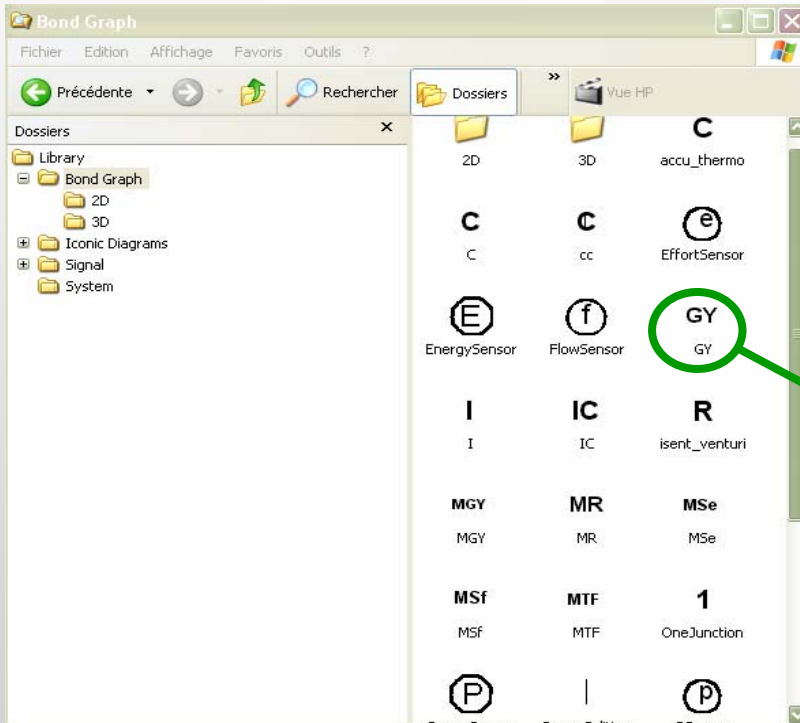


Animation

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Édition

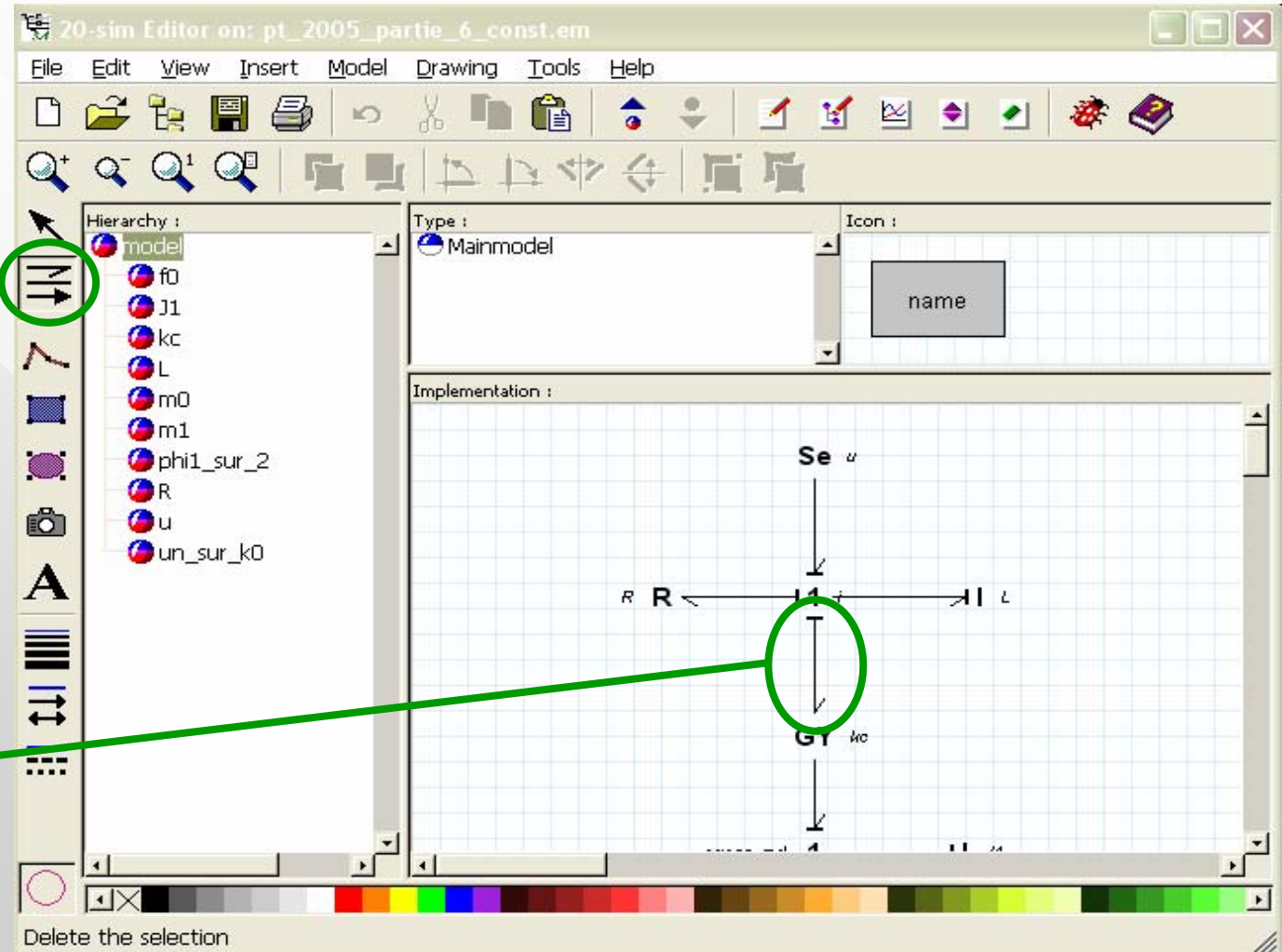
Déplacer l'élément BG de la bibliothèque vers l'éditeur



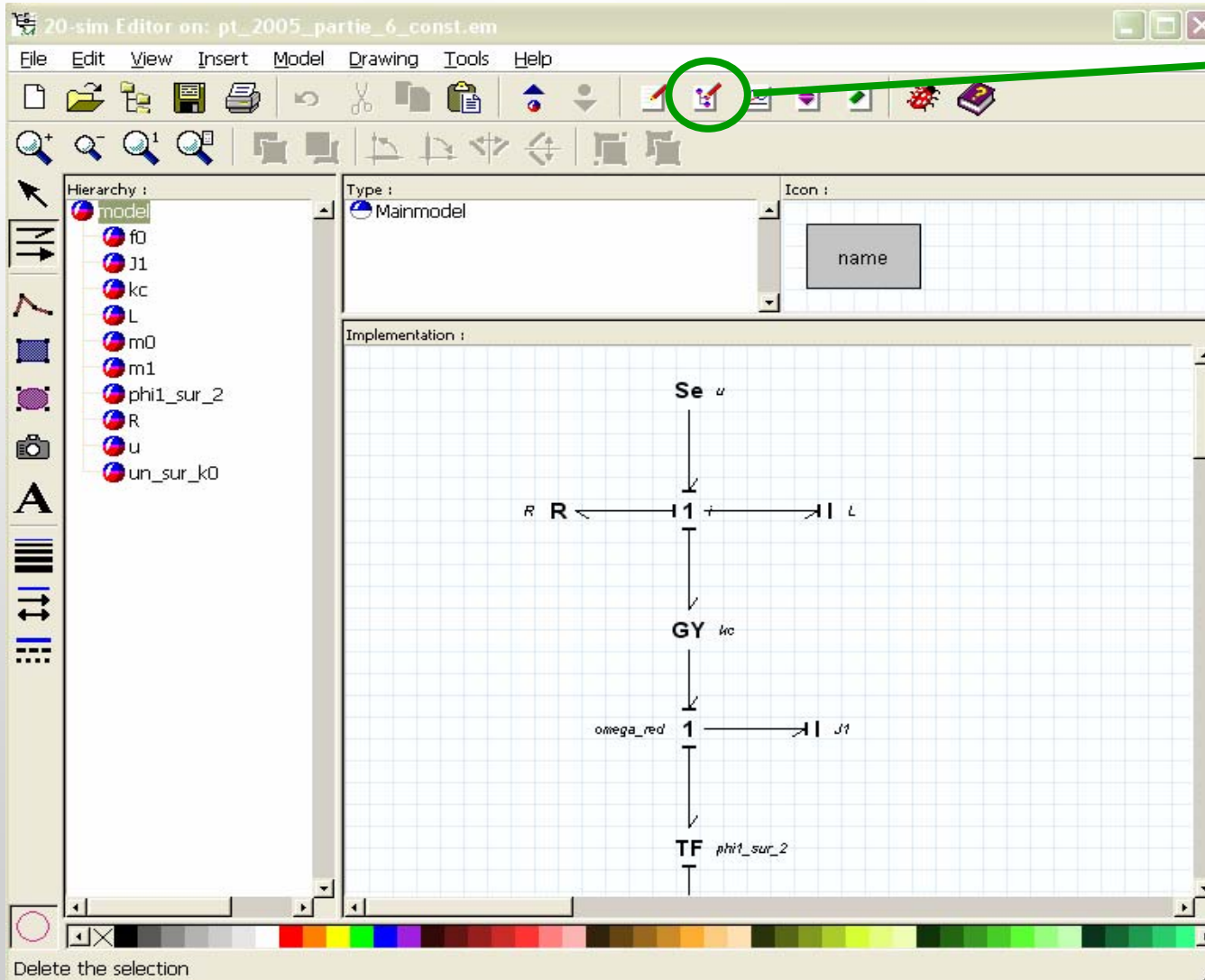
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

Sélectionner le mode  
« connections »

Connecter les  
éléments BG par  
glisser/déposer



## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

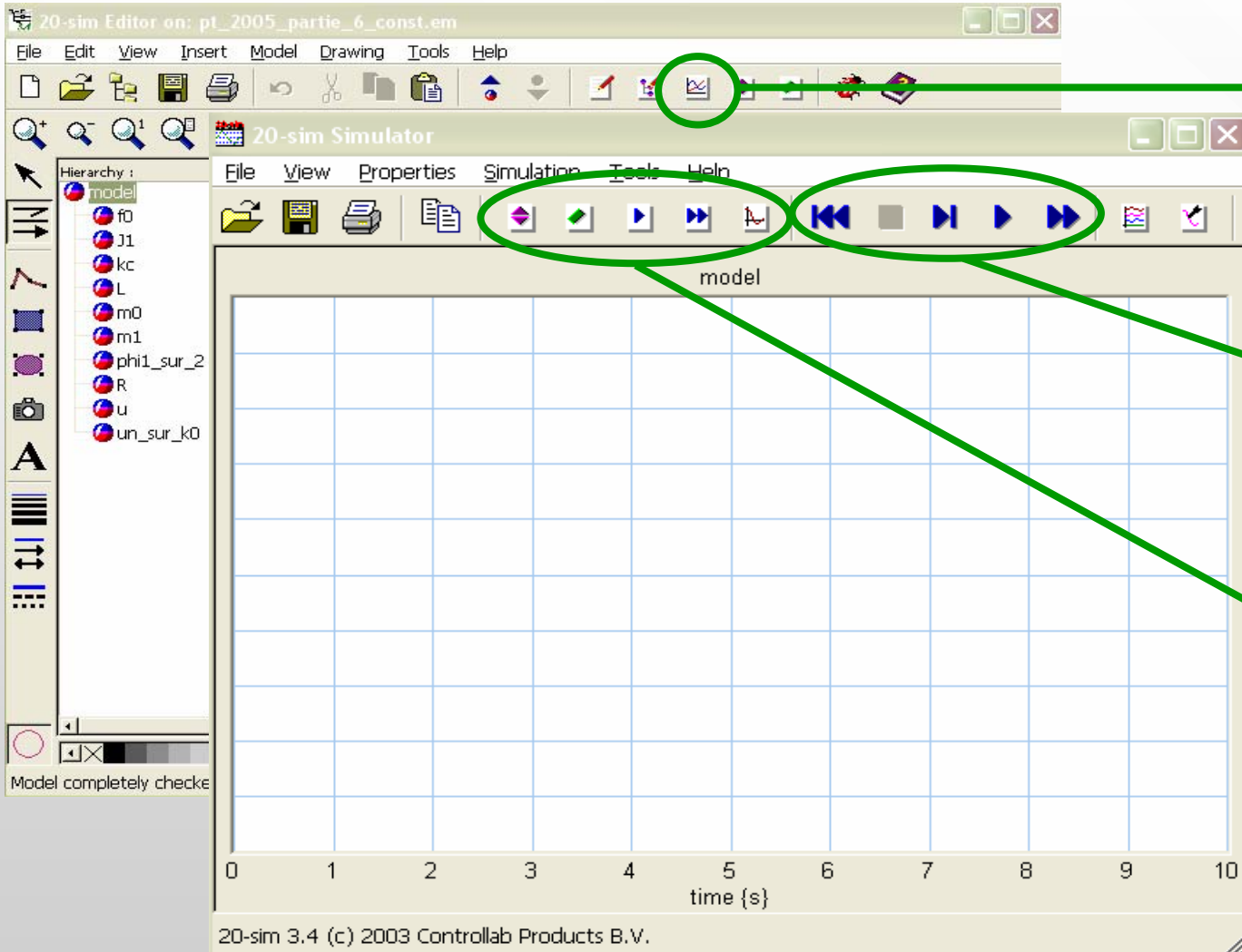


Vérifier que le modèle ne comporte pas d'erreurs

Si le modèle ne comporte pas d'erreurs, le calcul est automatique

Le cas échéant les erreurs sont listées : il suffit d'en sélectionner une pour être dirigé vers son origine

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE



Lancer la simulation

Contrôle de la simulation

Propriétés :  
- Paramètres  
- Simulations  
- Courbes

## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

Ouvrir l'éditeur de paramètres

Édition des paramètres

Model Hierarchy:

- model
  - f0
  - J1
  - kc
  - L
  - m0
  - m1
  - phi1\_sur\_2
  - R
  - u
  - un\_sur\_k0

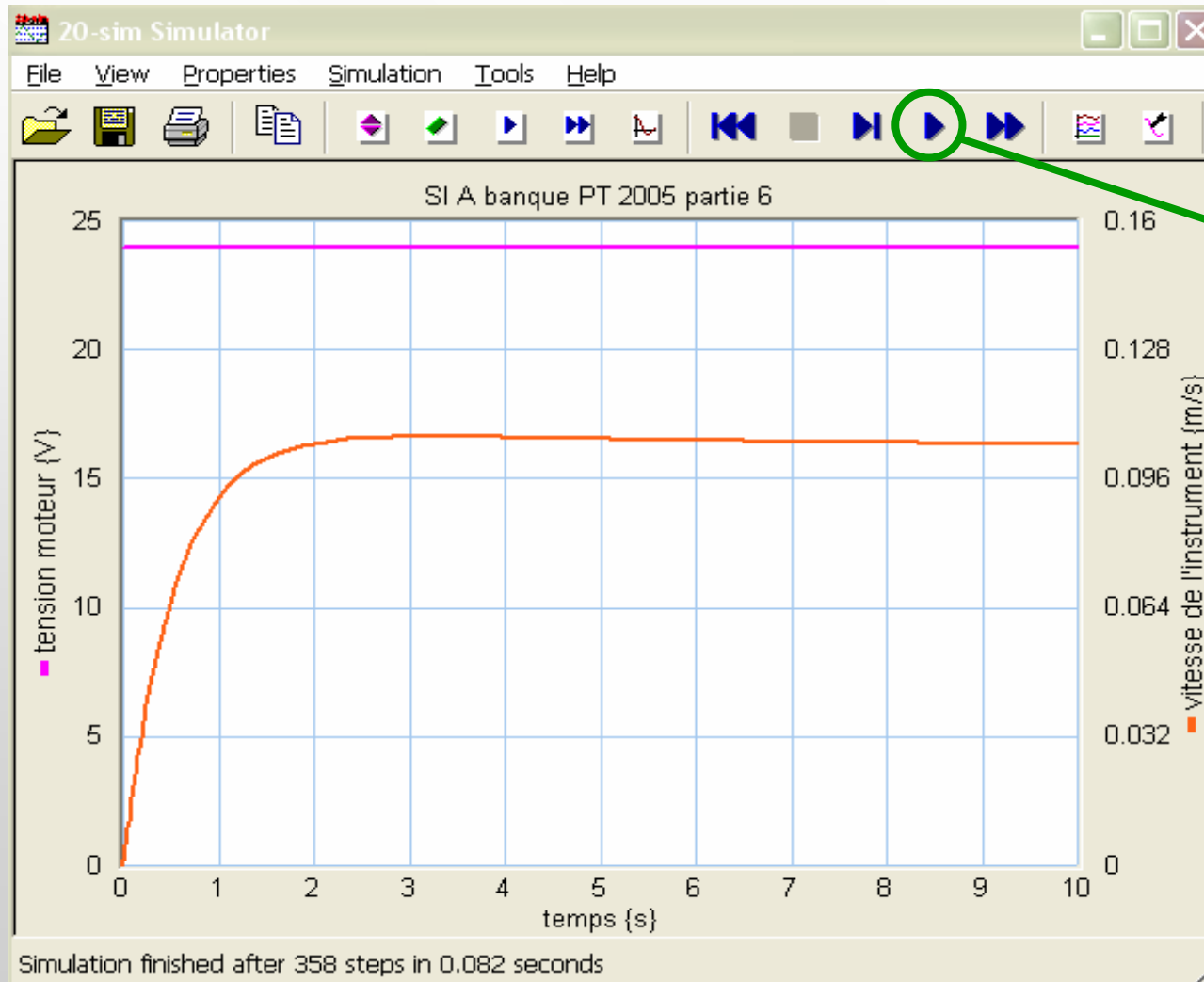
Name	Value	Quantity	Unit
u\effort	24 {V}	Electric Potential	volt
m0\i	2 {kg}	Mass	kilogram
J1\i	7 {m.N.m.s2/rad}	Moment of Inertia	newton meter second squarec
m1\i	1 {kg}	Mass	kilogram
R\r	10 {ohm}	Electric Resistance	ohm
f0\r	2 {m.s/rad}	Rotational Friction C...	meter second per radian
un_sur_k0\c	5 {N/m}	Stiffness	newton per meter
kc\r	4.5 {V.s/rad}	Motor Constant	volt second per radian
phi1_sur_2\r	19.2 {mm}	Length	meter
L\i	2.2 {mH}	Inductance	henry

Value : 24 V

Expand Vectors/Matrices

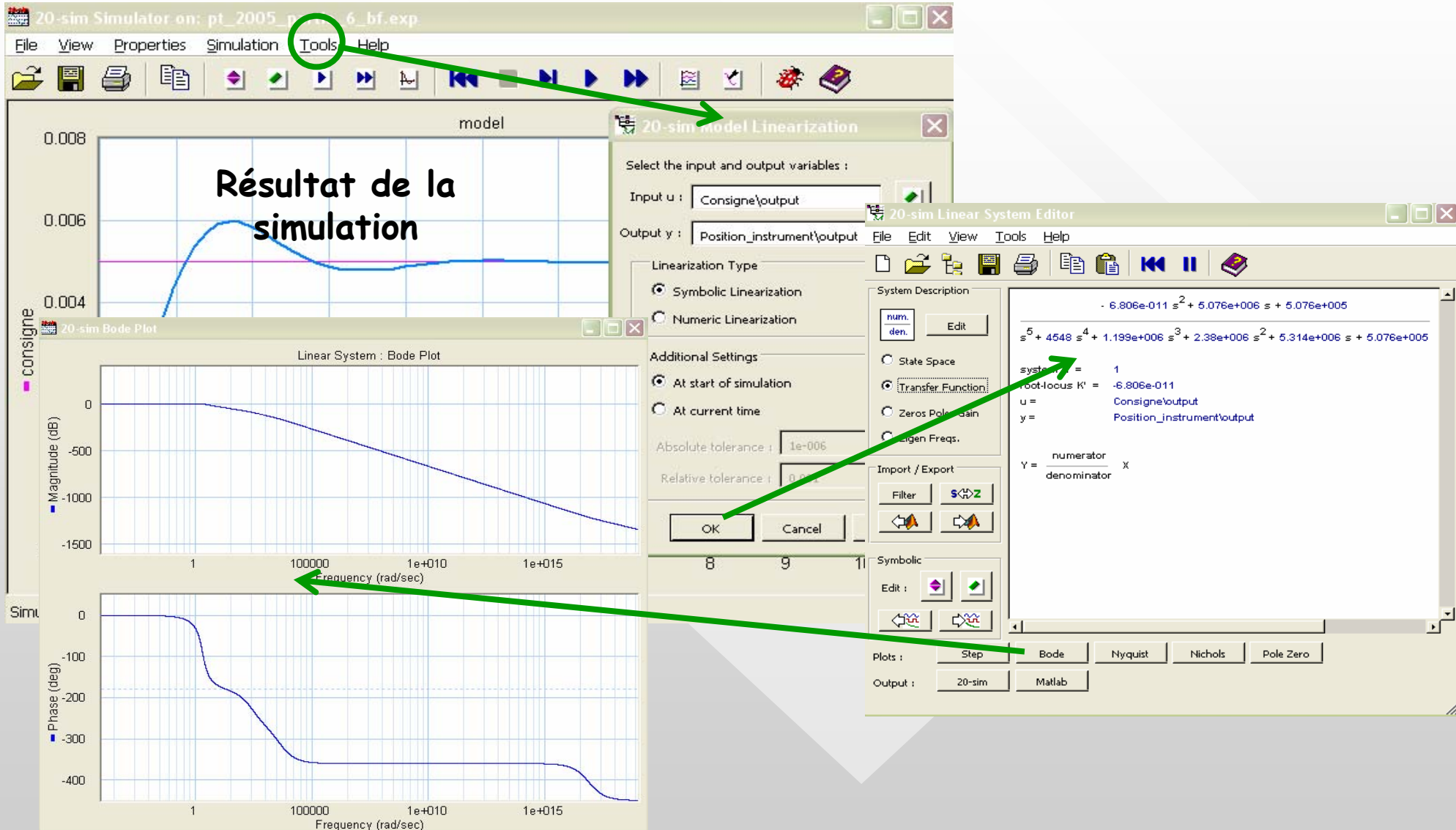
Import Apply OK Cancel Help

## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE



Tracer les courbes choisies

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE



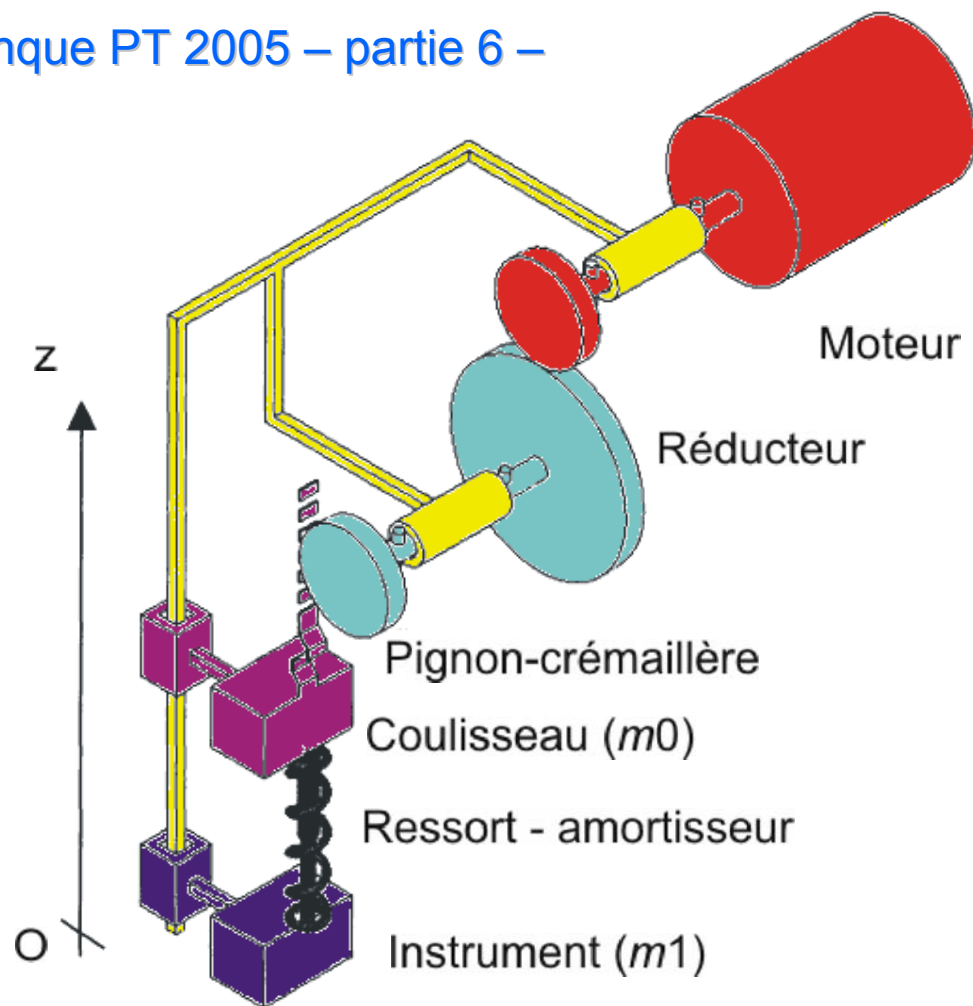
## **Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE**

---

**Application à l'exemple élémentaire avec 20-sim**

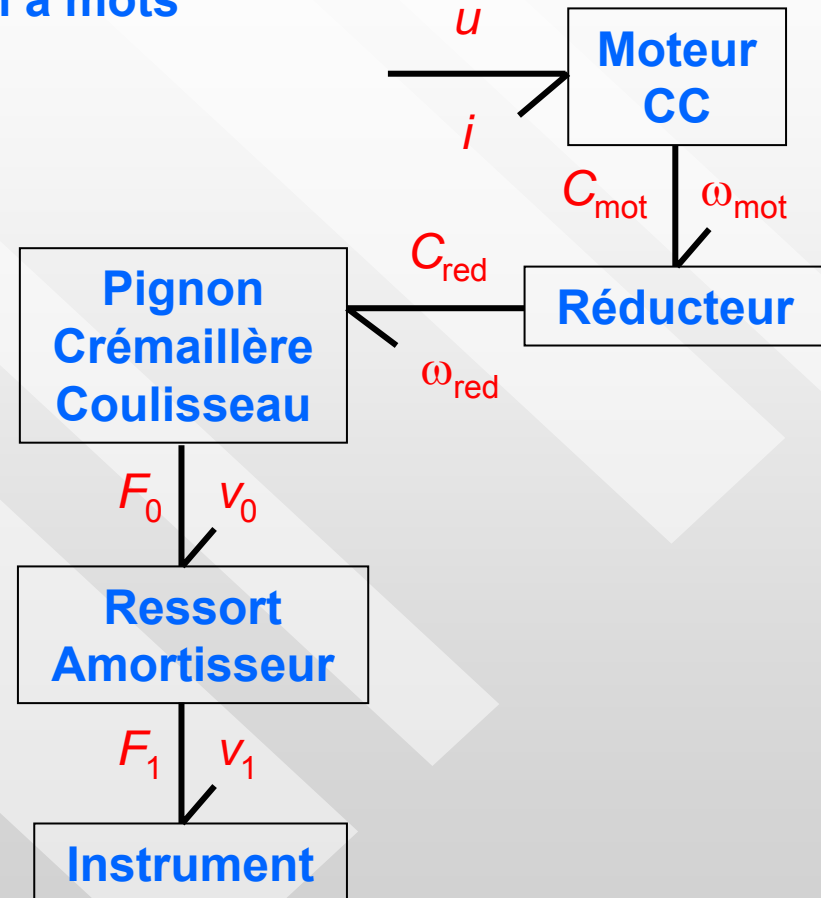
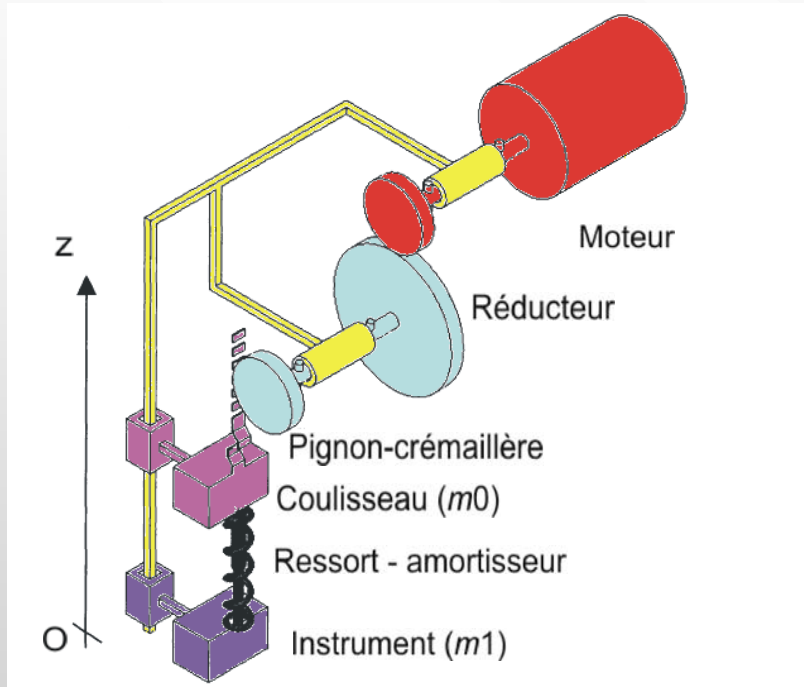
## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

Épreuve SI A Banque PT 2005 – partie 6 –



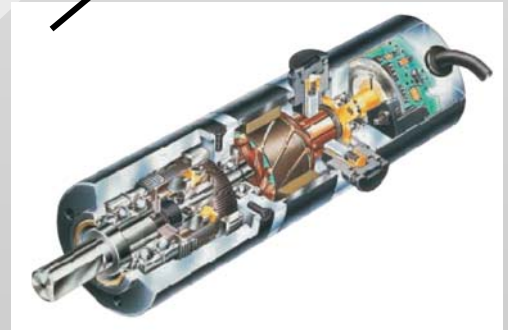
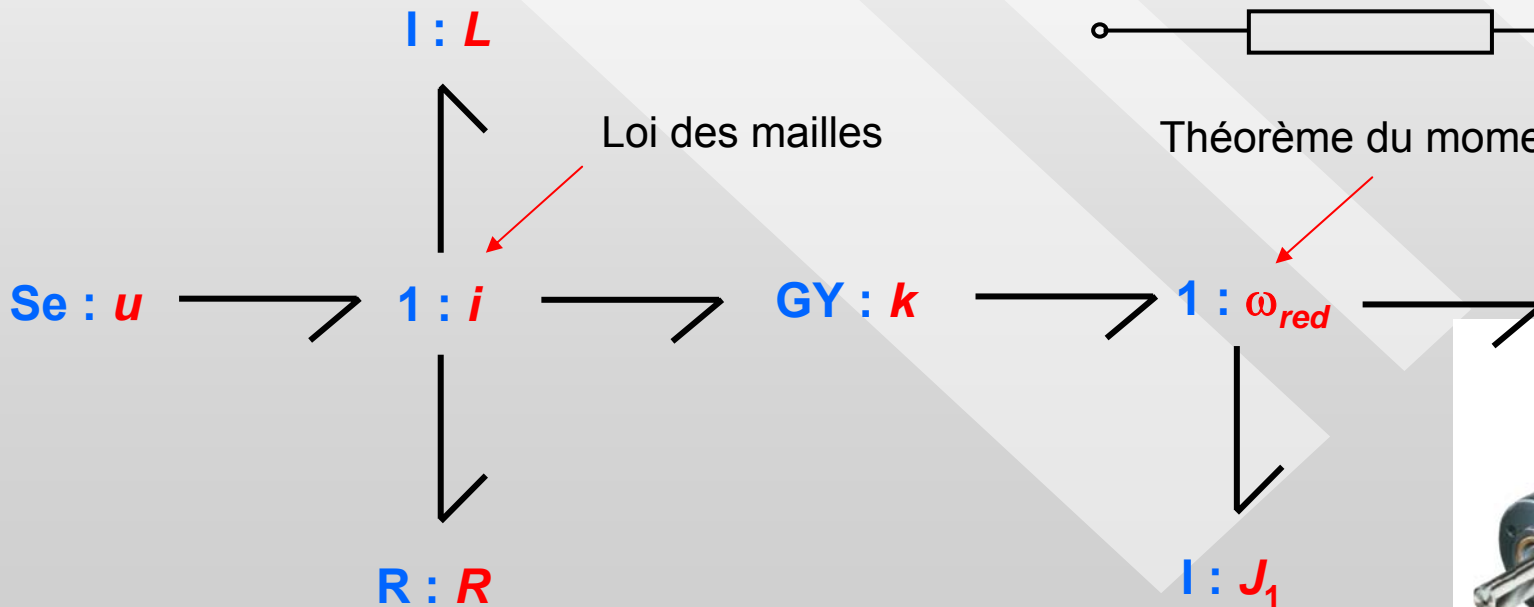
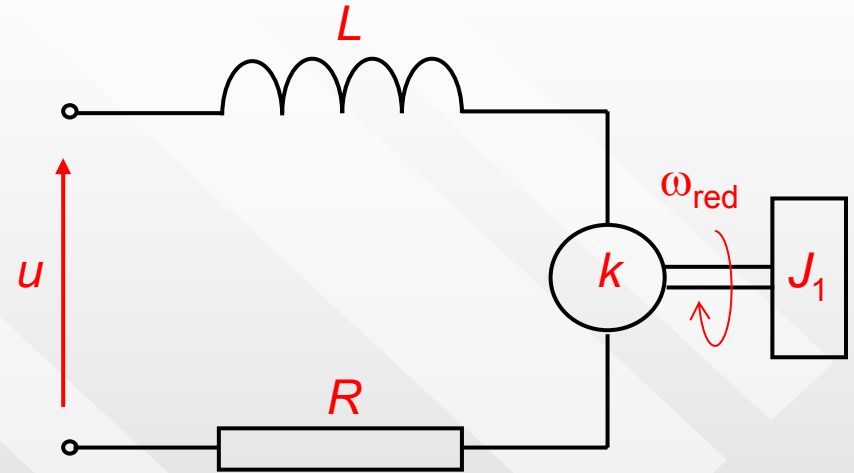
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Approche fonctionnelle : Bond graph à mots



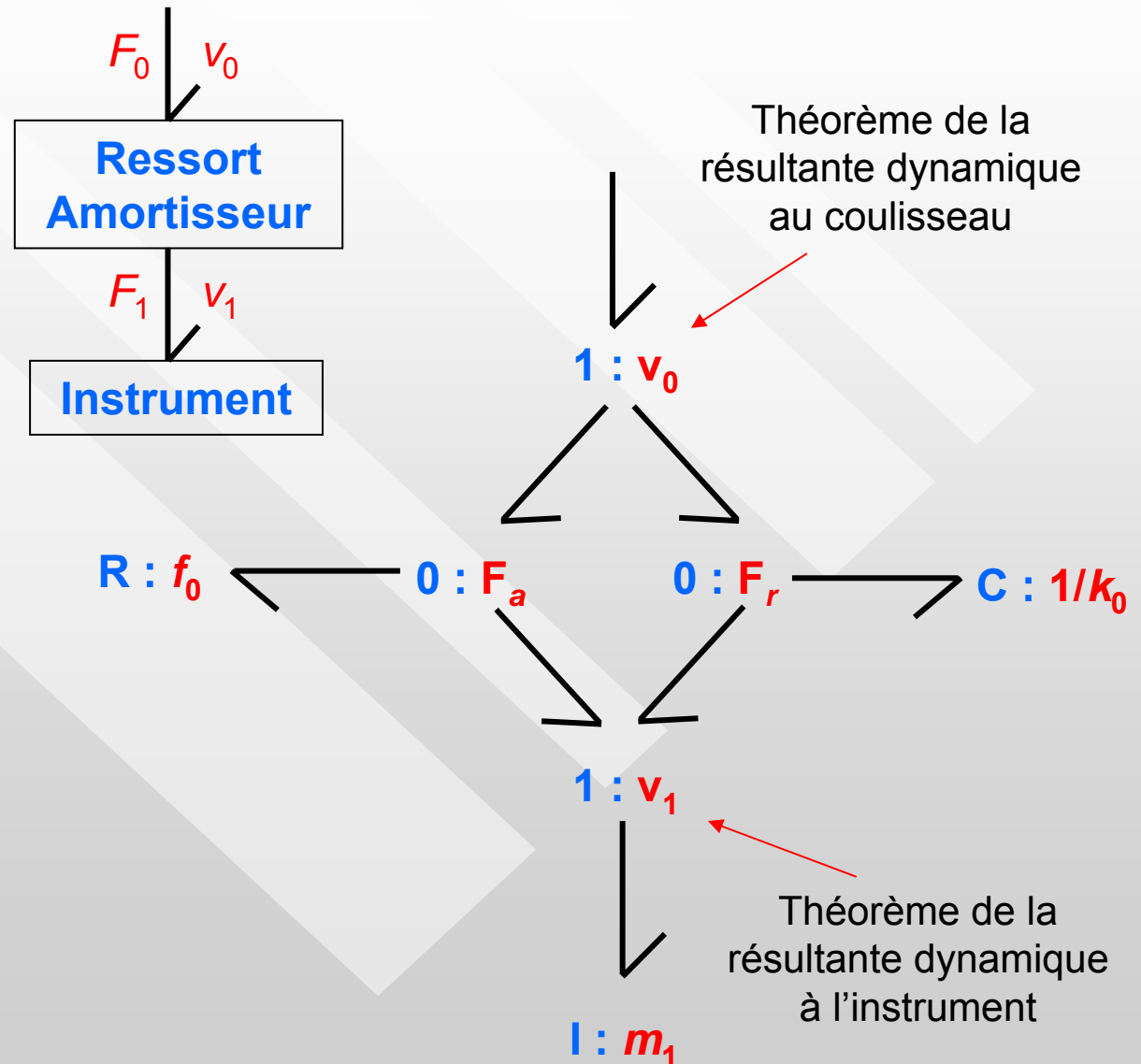
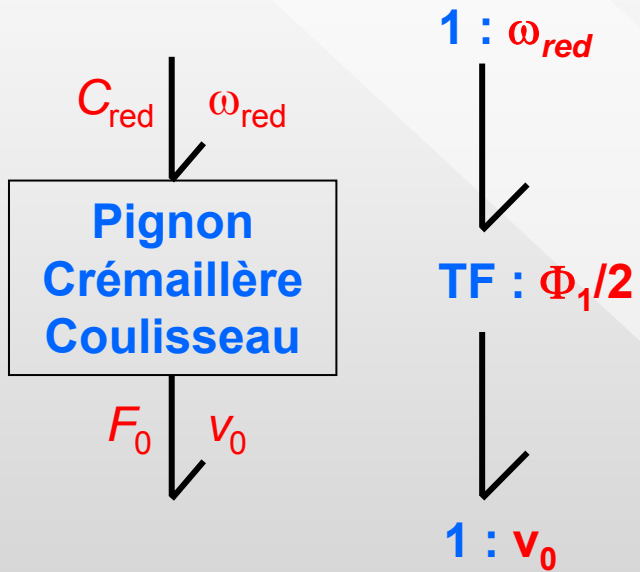
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Approche structurelle



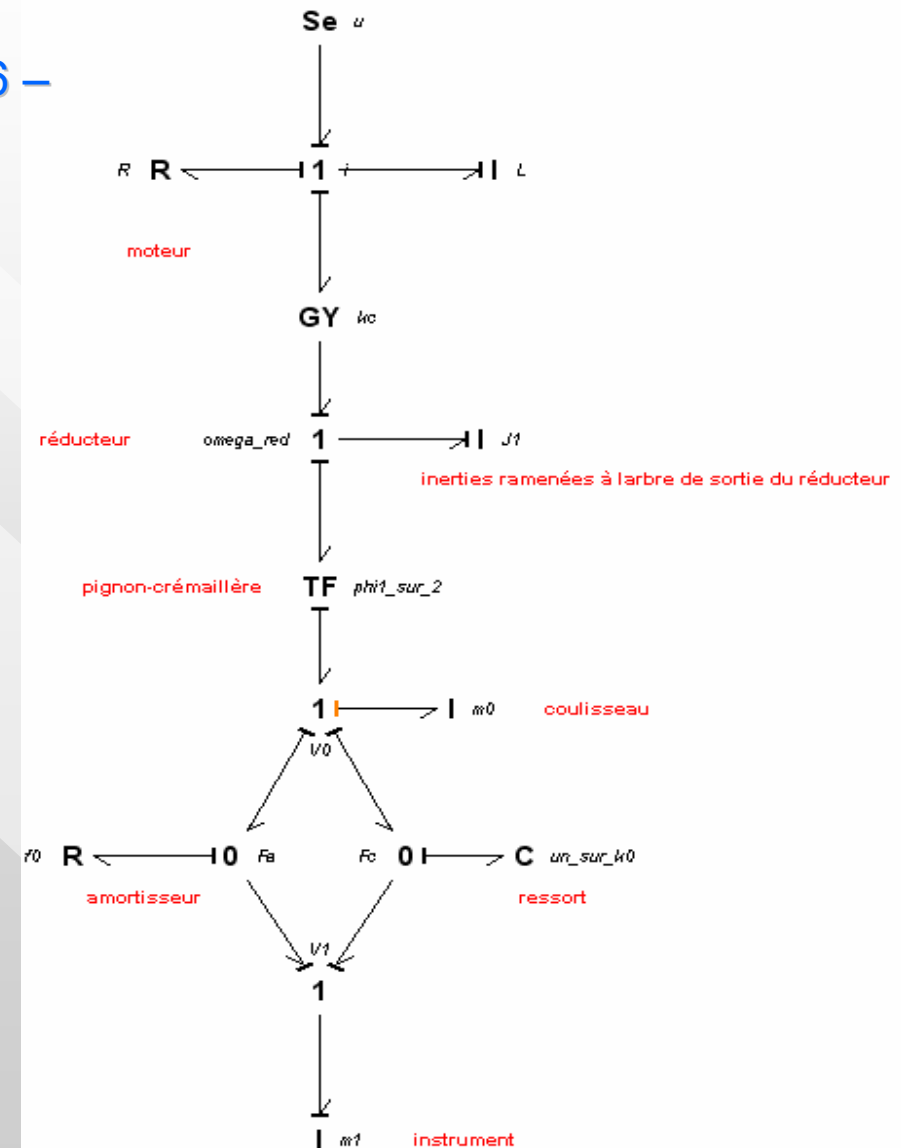
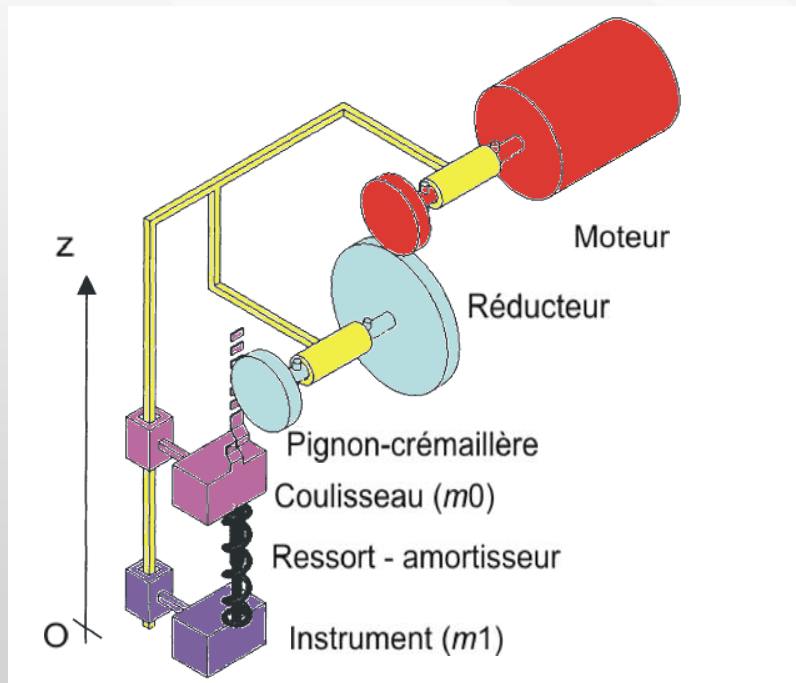
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Approche structurelle



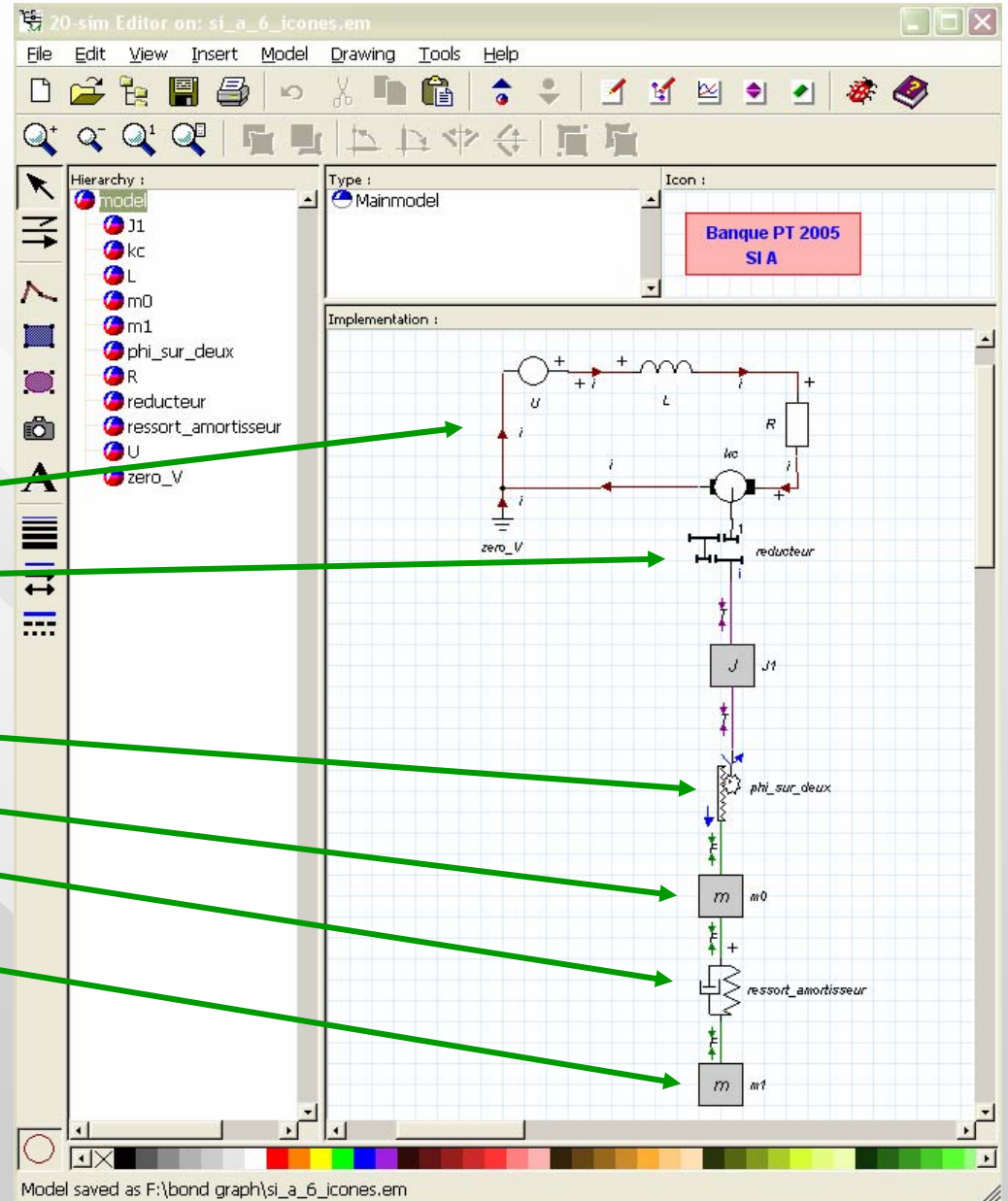
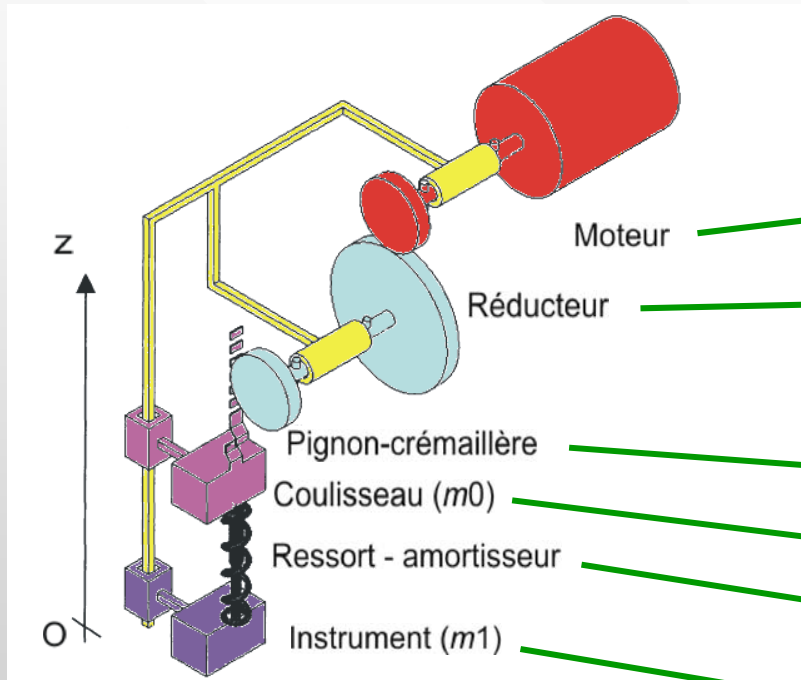
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Épreuve SI A Banque PT 2005 – partie 6 –



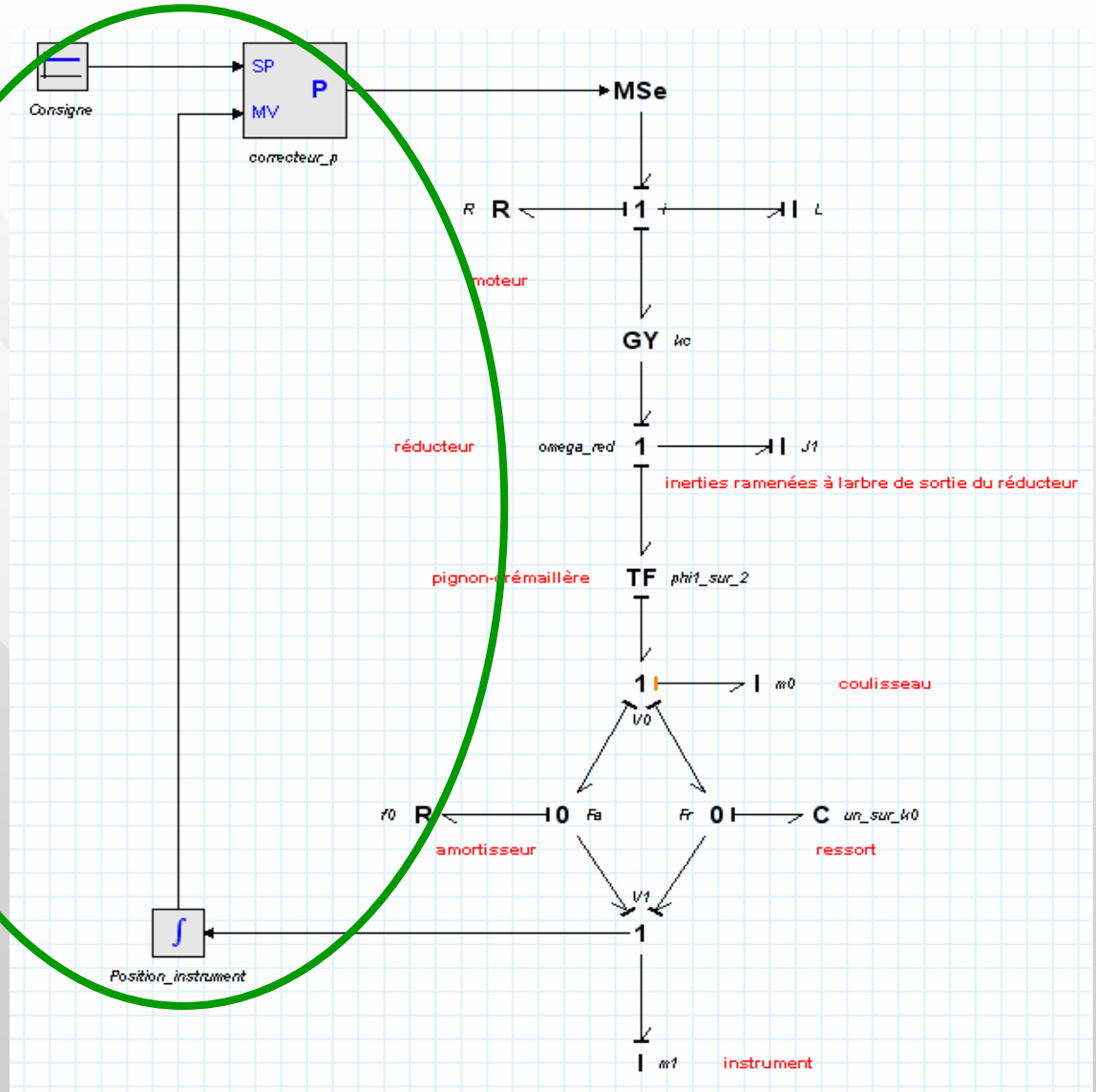
# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Icônes-diagramme dans 20-sim

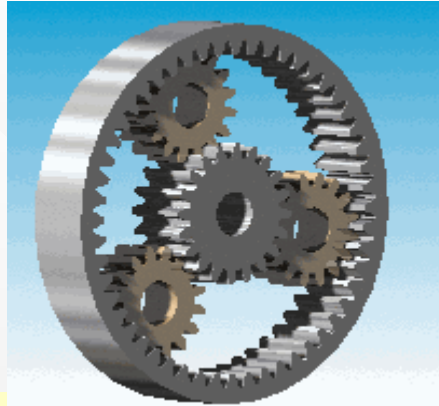


# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

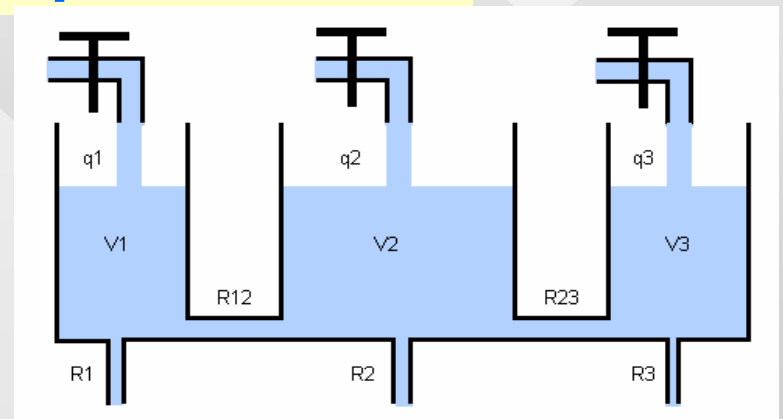
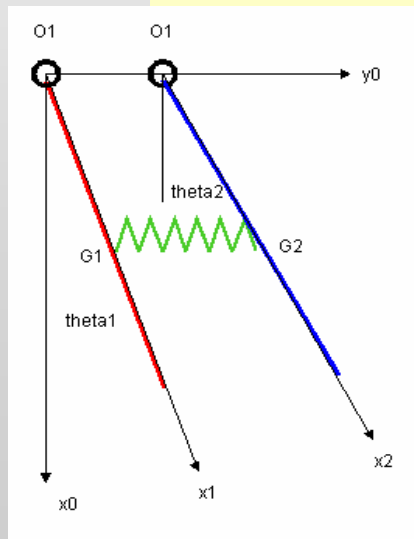
Intégration de la chaîne d'information (signaux) et de la chaîne d'énergie (BG) dans 20-sim



## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

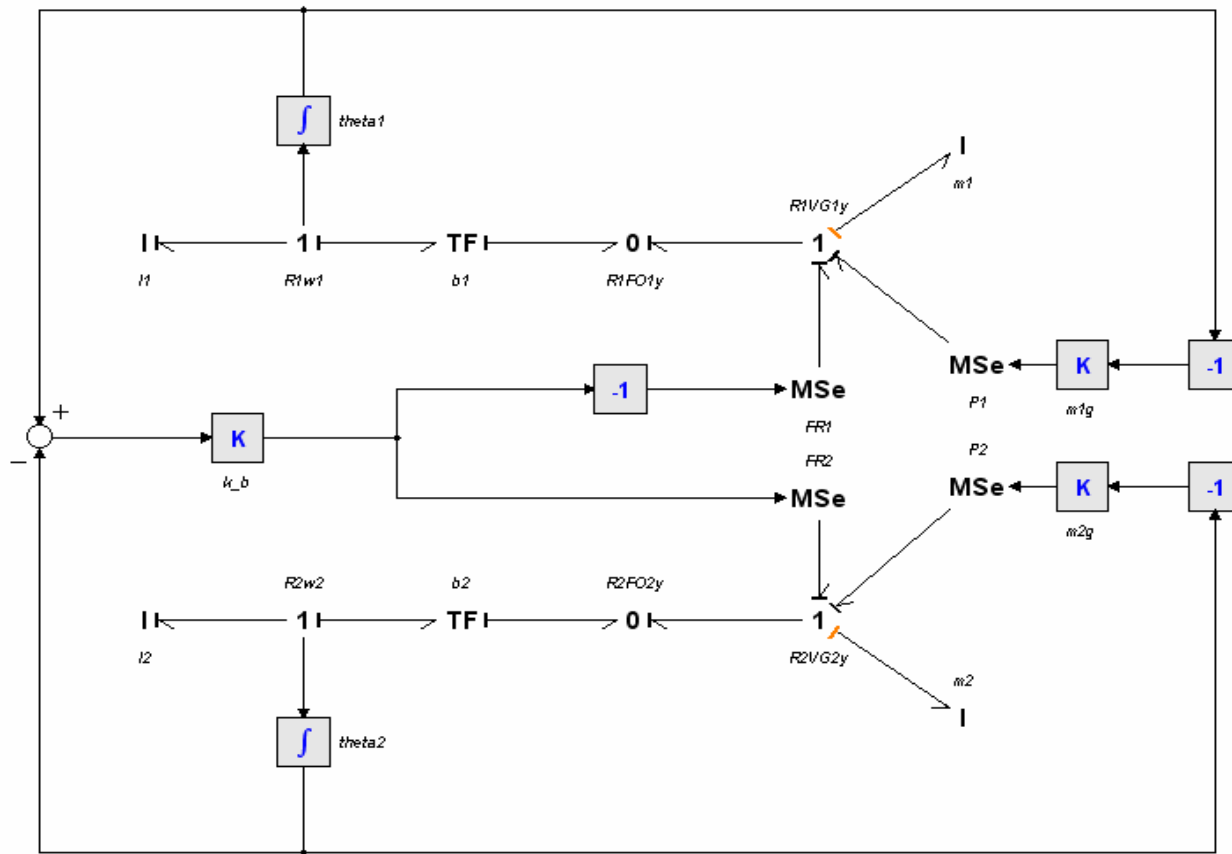


## D'autres exemples...

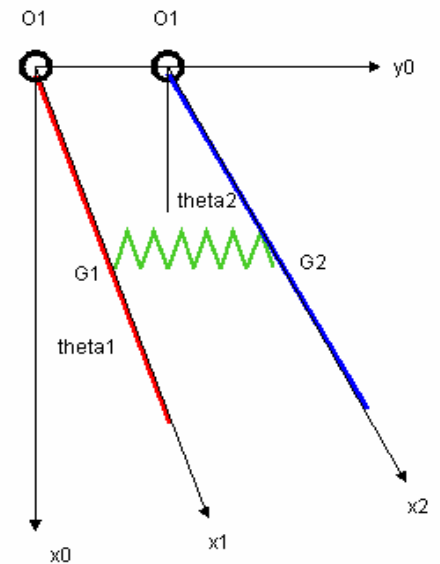


# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

Deux pendules + ressort

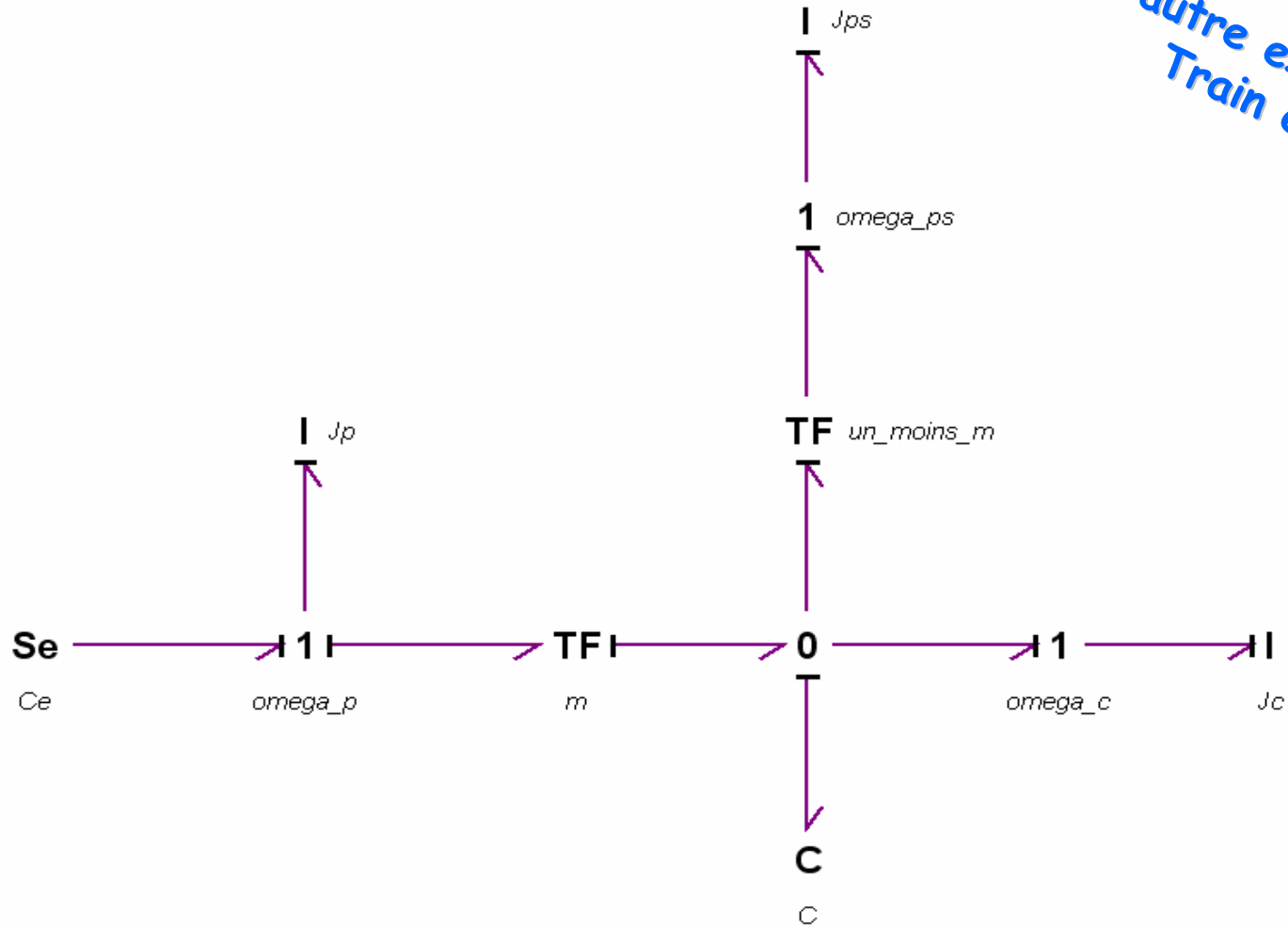
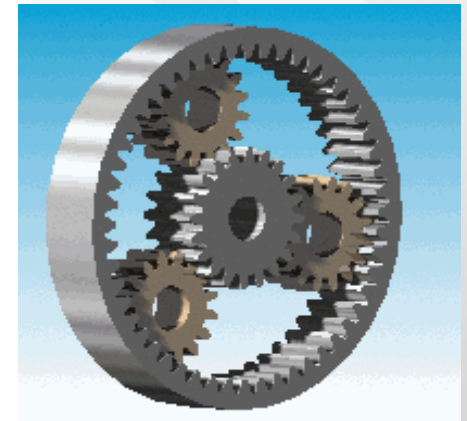


Un autre exemple mécanique  
Deux pendules

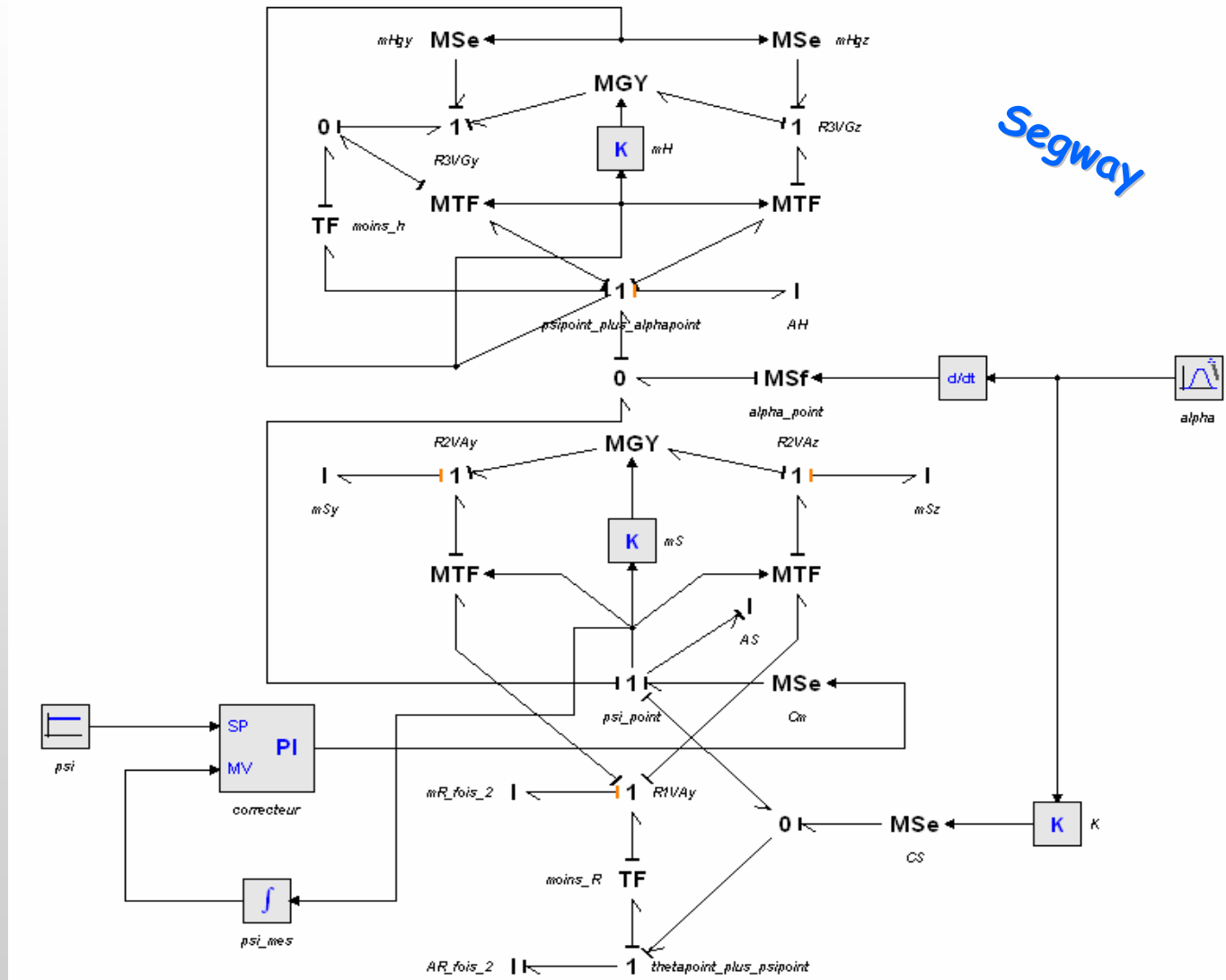


# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

Un autre exemple mécanique  
Train épicycloïdal



# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE



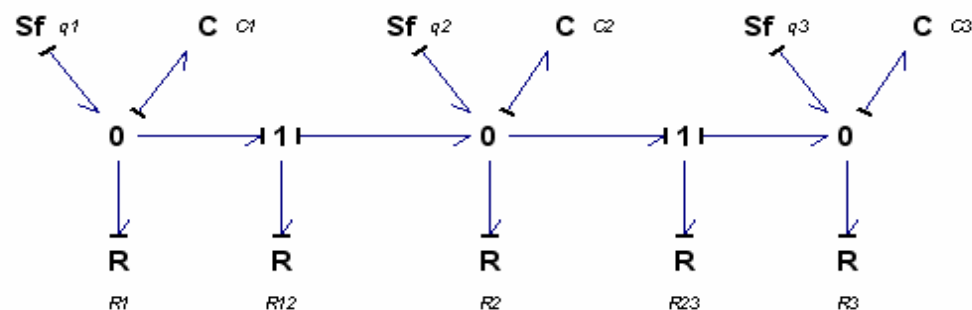
Segway



Centrale-supelec  
2005 PSI

## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

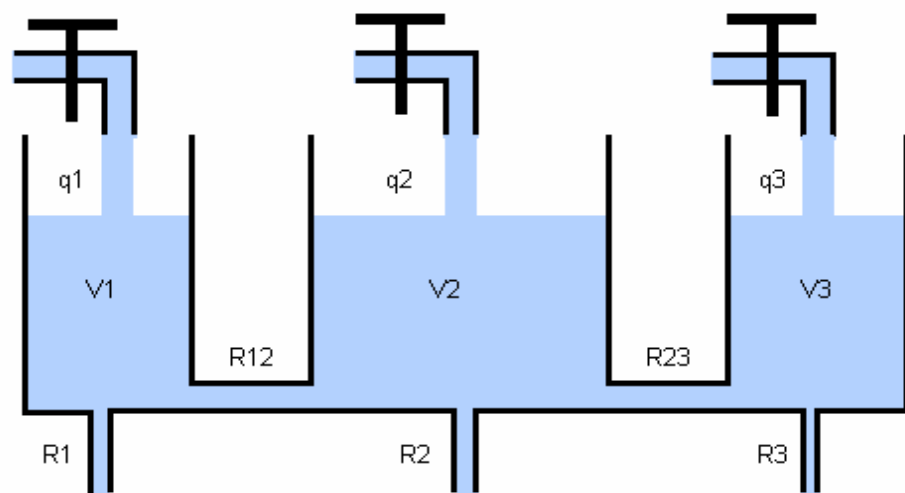
Trois réservoirs



$q_i$  : débit volumique entrant dans le réservoir  $i$

$C_i$  : accumulateur hydraulique de volume  $V_i$

$R_i$  : dissipation d'énergie dans les restrictions

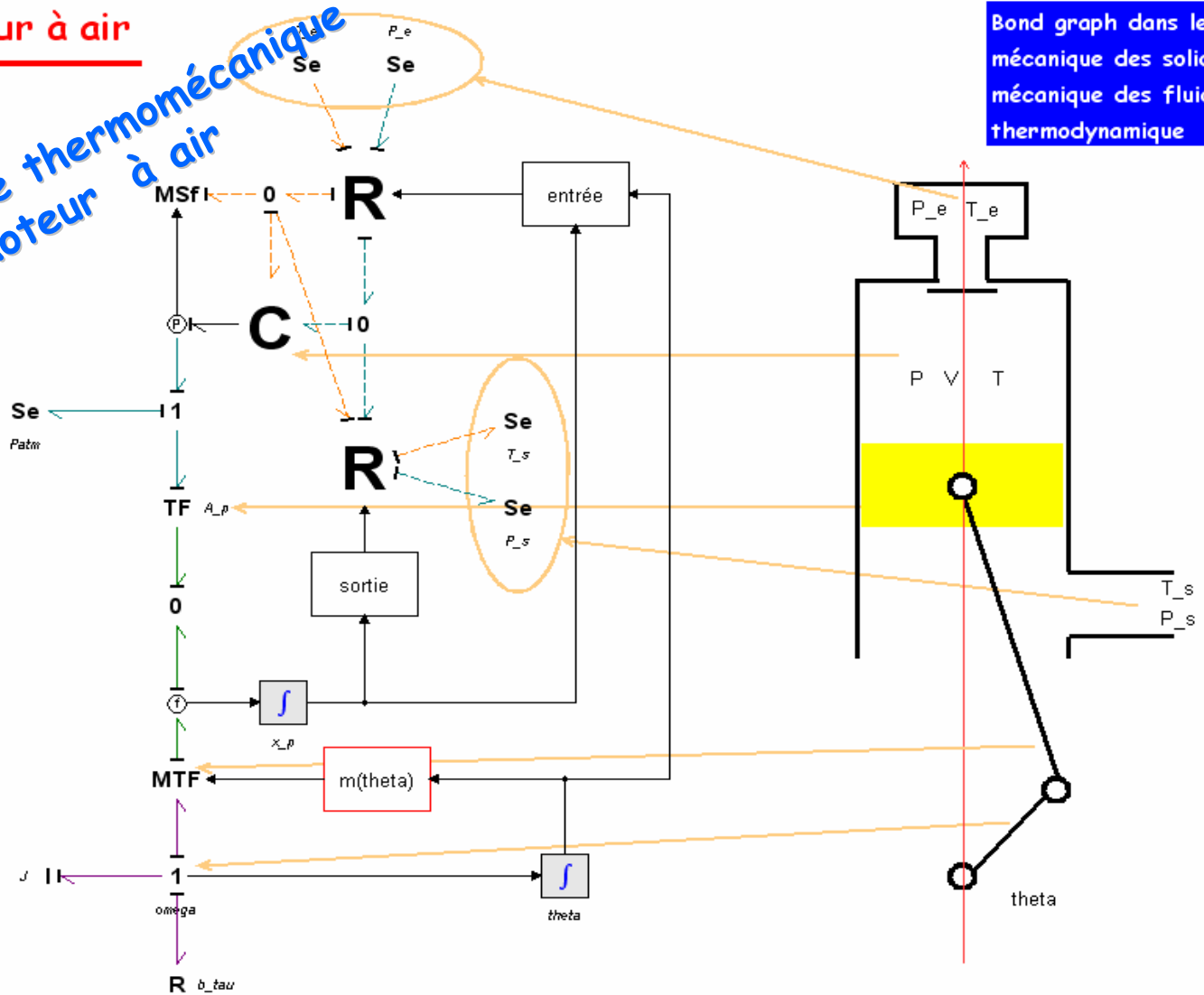


Un exemple hydraulique  
Trois réservoirs

# Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

## Moteur à air

Un exemple thermomécanique  
Moteur à air



Bond graph dans les domaines suivants :  
mécanique des solides indéformables  
mécanique des fluides anisothermes  
thermodynamique

## Bond Graphs : un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE

---

### En CPGE

Le langage des Bond Graphs permet de :

- ◆ Comprendre les transferts d'énergie (topologie des échanges) ;
- ◆ S'intéresser plus particulièrement aux propriétés structurelles des systèmes ;
- ◆ S'affranchir des vicissitudes de la modélisation mathématique & fournir un schéma de calcul associé au graphe ;
- ◆ Mettre en évidence la causalité dans le modèle obtenu ;
- ◆ Simuler simplement un système pluritechnique.