



# La méthodologie bond graph - Principes et applications

Geneviève Dauphin-Tanguy

**Laboratoire d'Automatique Génie Informatique et Signal  
L.A.G.I.S. UMR CNRS 8146  
École Centrale de Lille  
Cité Scientifique, BP 48  
59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, France  
E-mail : [gdt@ec-lille.fr](mailto:gdt@ec-lille.fr)**

# Plan

- Introduction
- Principes et langage bond graph
- Exemples d'applications industrielles
- Conclusion

# Introduction

- **Père des bond graphs : Henry Paynter (MIT Boston)**  
**1er ouvrage : 1961 (« birthday » : 25 avril 1955)**
- **arrivée en Europe : fin des 70s**
  - Pays-Bas (Twente Univ.)
  - France (Alstom)



R. Rosenberg H. Paynter D. Karnopp D. Margolis

International Conference on Bond Graph Modelling  
Phoenix, Arizona, Janvier 2001

**Enseigné de façon récurrente à ECLille, INSA Lyon, INSA Toulouse, Sup Elec Rennes, ENSAM Paris,...**

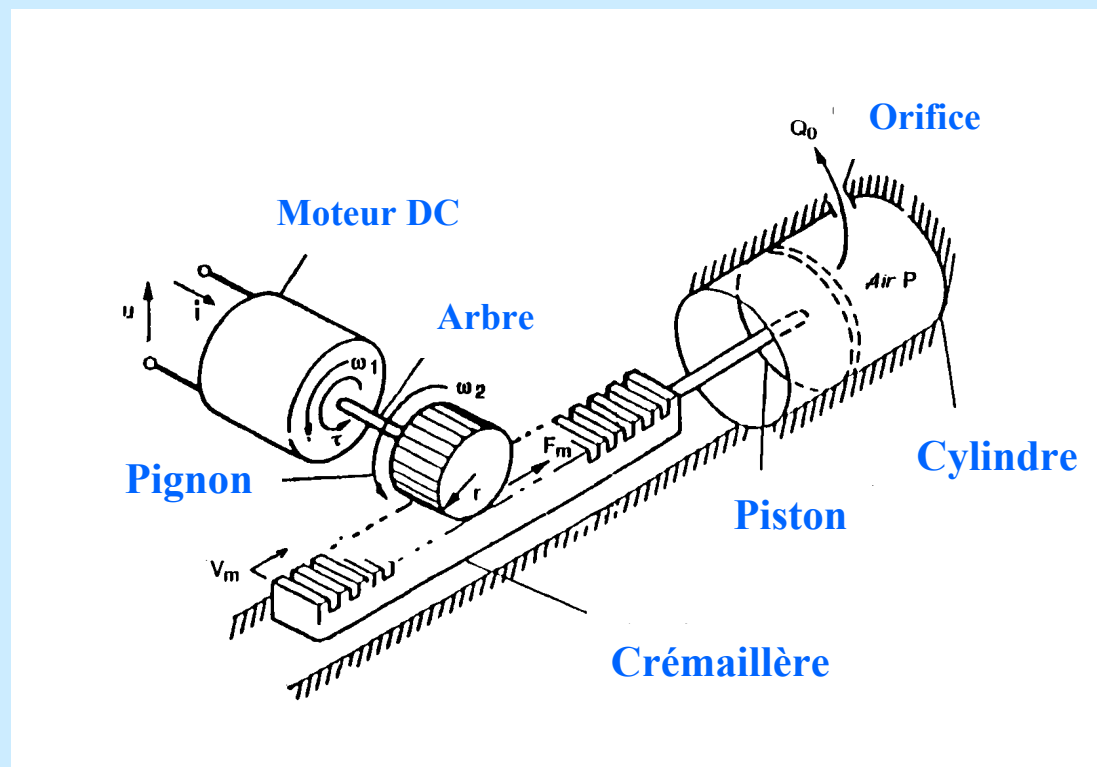
**Des conférences d'initiation dans de nombreuses écoles d'ingénieurs**

**De nombreuses formations continues et séminaires pour ingénieurs**

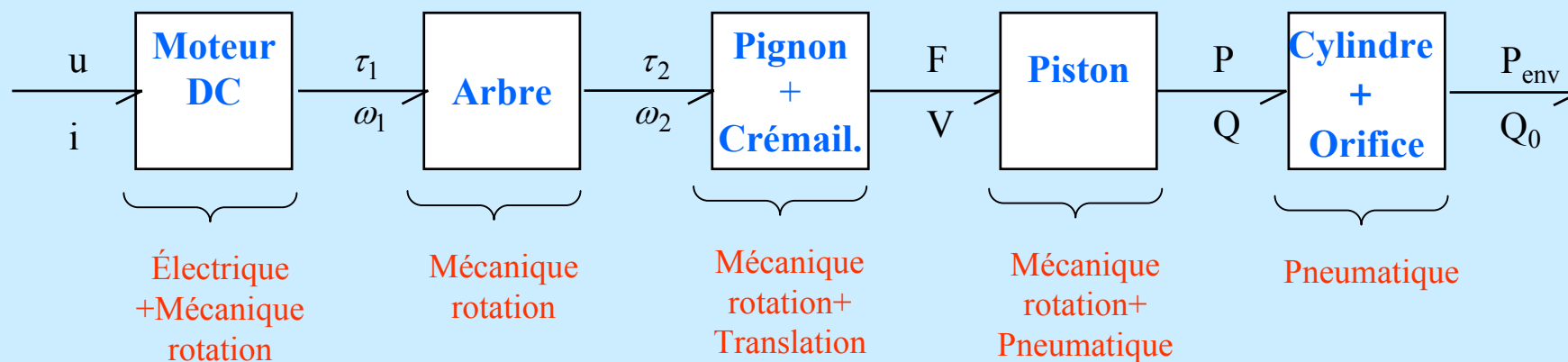
# Principes de base de la modélisation bond graph

- Représentation graphique des transferts de puissance
- Langage unifié pour tous les domaines physiques (analogie)
- Modèle BG d'un système :
  - ✓ entre le schéma physique et les modèles mathématiques
  - ✓ visualisation de la causalité

Hypothèse : **paramètres localisés**



bond graph à mots



# Variables généralisées

Variables de puissance

Variables d'énergie

Domaine	Effort $e$	Flux $f$	Moment $p = \int edt$	Déplacement $q = \int fdt$
Mécanique Translation Rotation	force couple	vitesse vitesse angulaire	moment moment angulaire	déplacement angle
Electrique	tension	courant	flux magnétique	charge
Hydraulique	pression	débit volumique	moment de pression	volume
Chimique	potentiel chimique	flux molaire		nombre de moles
Thermodynamique	température	flux d'entropie		entropie

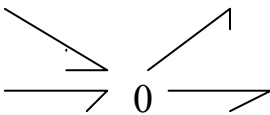
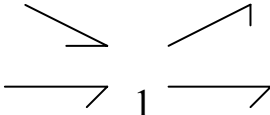
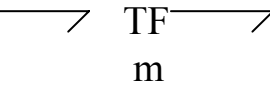
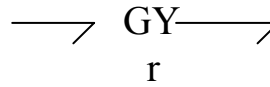
## Eléments du langage bond graph

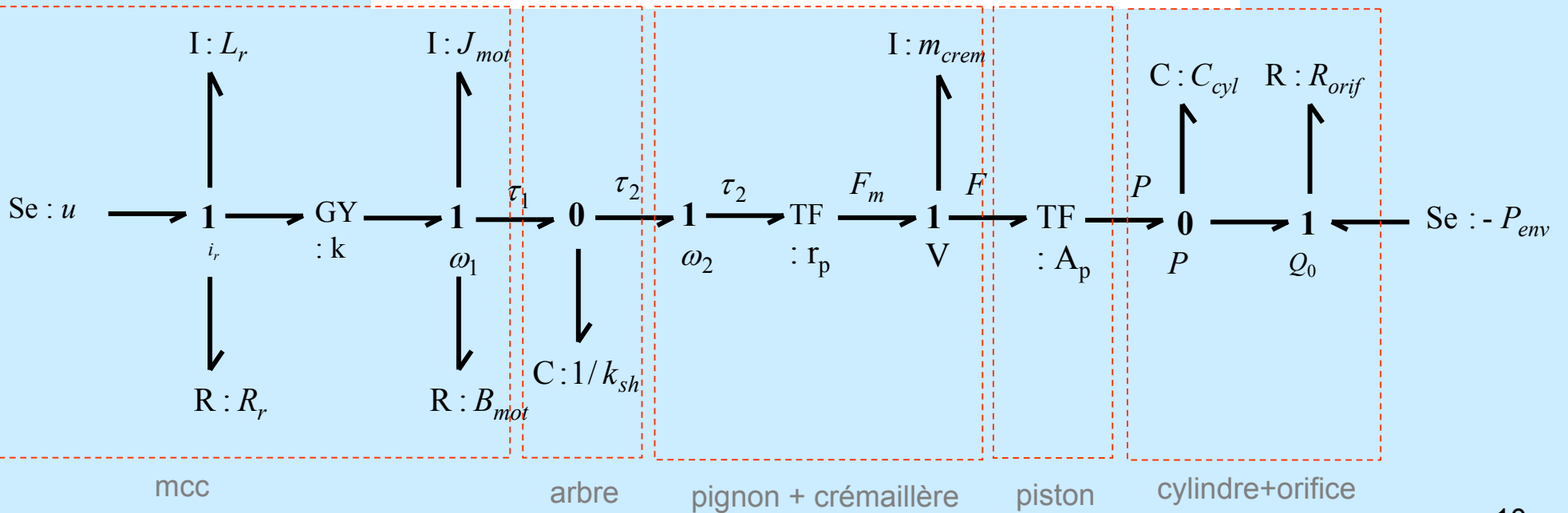
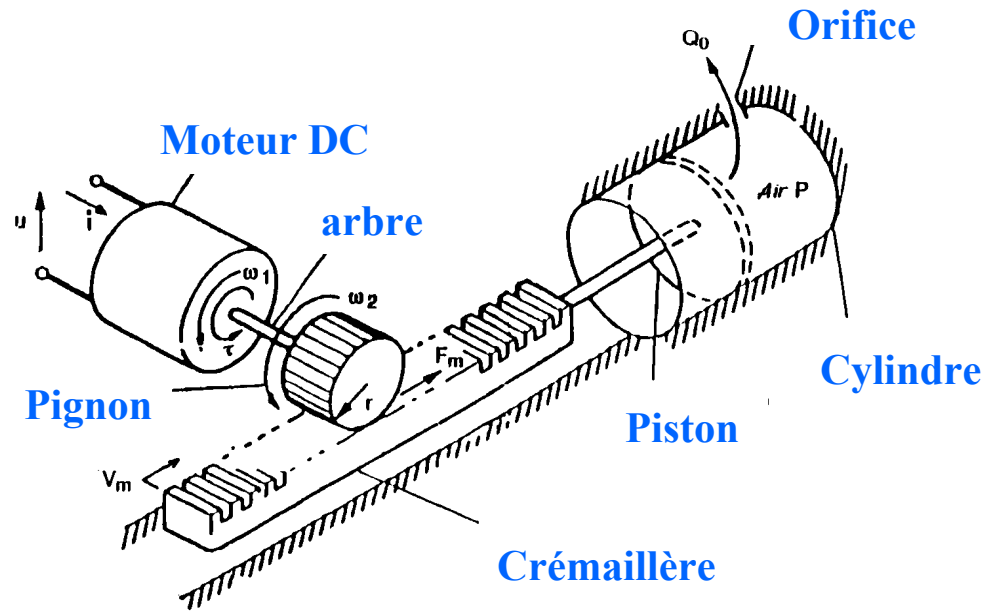
- 3 éléments passifs (reçoivent la puissance)
  - R : dissipation d'énergie
  - C , I : stockage d'énergie
- 2 éléments actifs (fournissent de la puissance)
  - Se , Sf : source d'effort , source de flux
- 4 éléments de jonction (conservatifs de puissance)
  - 0, 1, TF, GY

## Eléments actifs et passifs

Elément	Symbole	Loi générique	Exemples	Comportement Énergétique
Eléments actifs	Se $\longrightarrow$	$e$ indep de $f$	gravité, générateur de tension	Apport de puissance
	Sf $\longrightarrow$	$f$ indep de $e$	pompe générateur de courant	
Eléments Passifs	$\longrightarrow$ R	$\Phi_R(e, f) = 0$	damping, friction, résistance électrique restriction hydraulique	<i>Dissipation d'énergie (chaleur)</i>
	$\longrightarrow$ C	$\Phi_C(e, q) = 0$	ressort, réservoir condensateur élasticité, compressibilité	<i>stockage d'énergie (potentielle, électrique)</i>
	$\longrightarrow$ I	$\Phi_I(p, f) = 0$	masse, inertie, bobine	<i>stockage d'énergie (cinétique, magnétique)</i>

# Eléments de Jonction

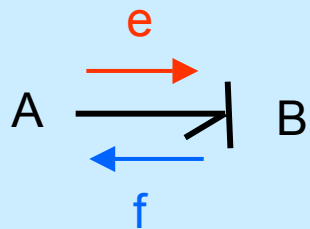
Elément	Symbole	Loi générique	Exemples
Eléments de Jonction		$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $\sum a_i f_i = 0$	même force, pression, tension, ...
		$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $\sum a_i e_i = 0$	même vitesse, débit vol, courant, ...
(conservative de puissance)		$e_1 = m \cdot e_2$ $f_2 = m \cdot f_1$	levier, poulies embrayages, transfo elect. transducteur
		$e_1 = r \cdot f_2$ $e_2 = r \cdot f_1$	moteur, capteur à effet Hall transducteur



# Causalité

- visualisation, au sens schéma - bloc, des relations
  - de cause à effet
  - entrée - sortie
  - donnée – inconnue
- un des avantages majeurs de la technique bond graph
  - pour écrire systématiquement les équations
  - pour détecter des incohérences dans les équations
  - pour parcourir le bond graph comme un graphe
    - chemin causal, boucle causale

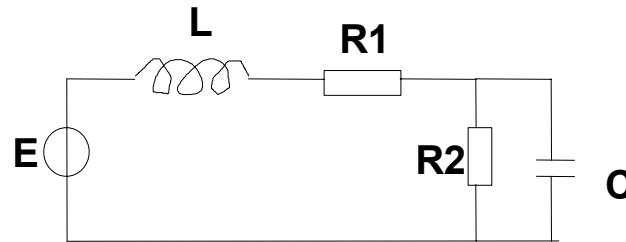
# Causalité



$$P = e \cdot f$$

$$B \quad f := g_B(e)$$

$$A \quad e := g_A(f)$$



## \* Lois de structure

### Jonction 1:

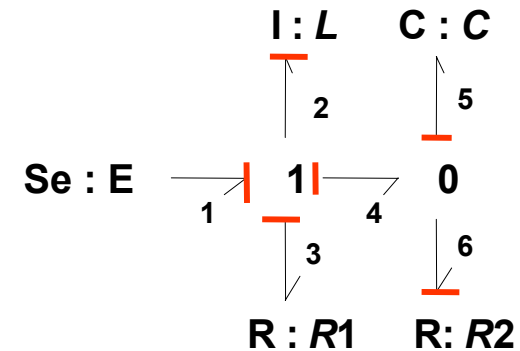
$$i_{R1} = i_L \quad i_E = i_L \quad i_4 = i_L$$

$$u_L = E - u_{R1} - u_4$$

### Jonction 0 :

$$u_{R2} = u_C \quad u_4 = u_C$$

$$i_C = i_4 - i_{R2}$$



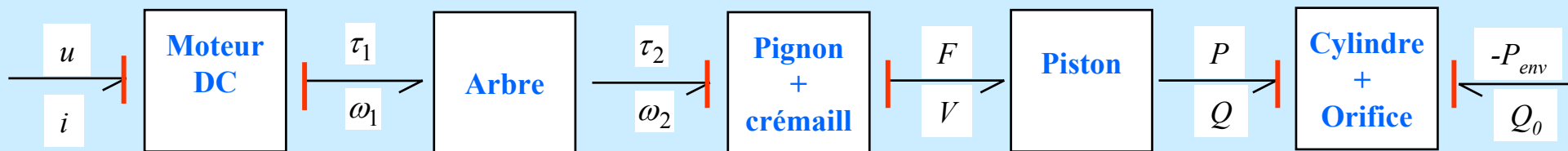
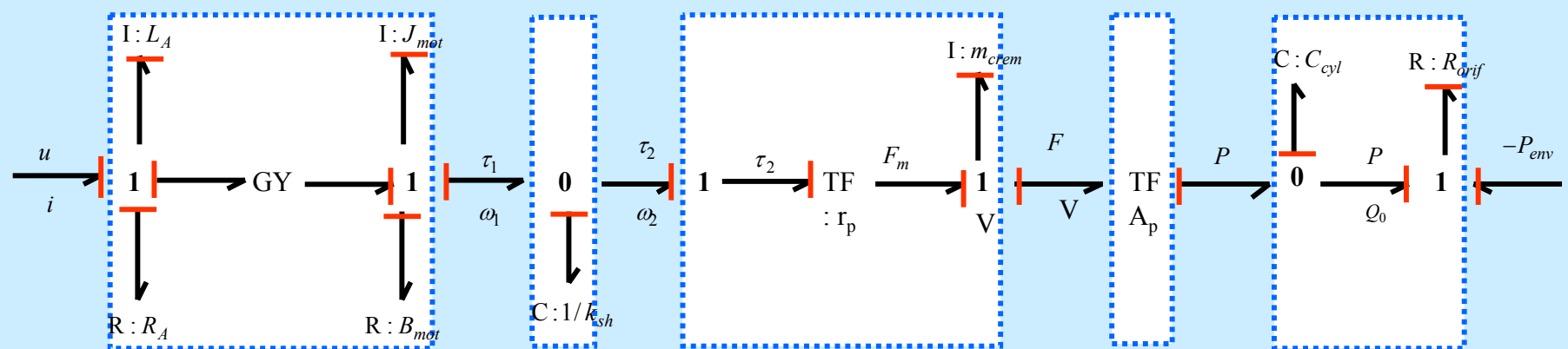
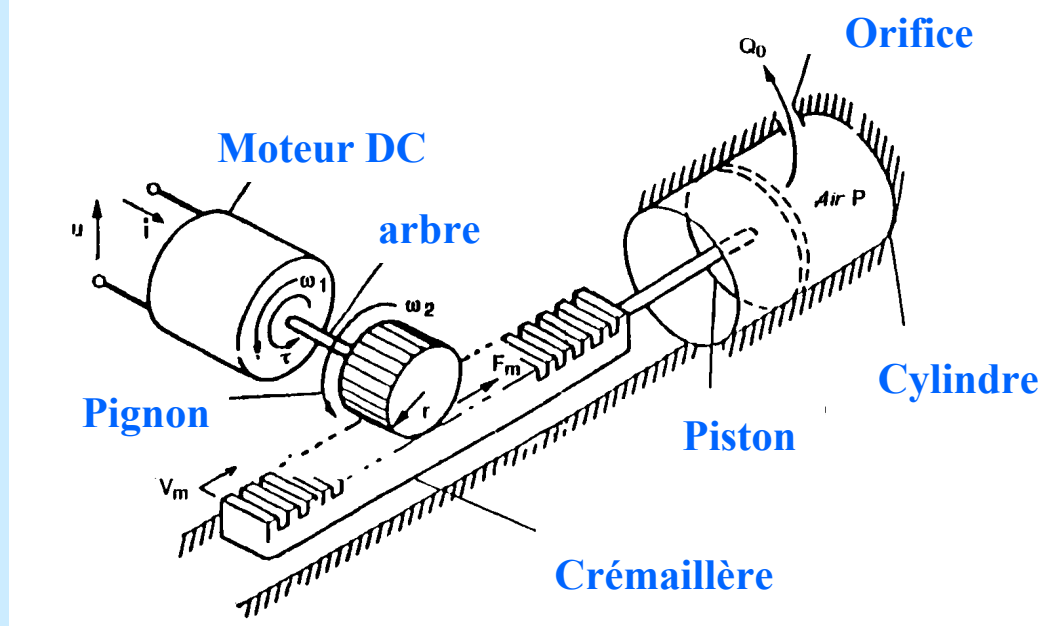
## \* Lois des éléments

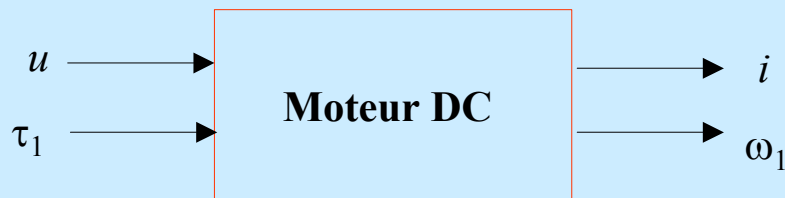
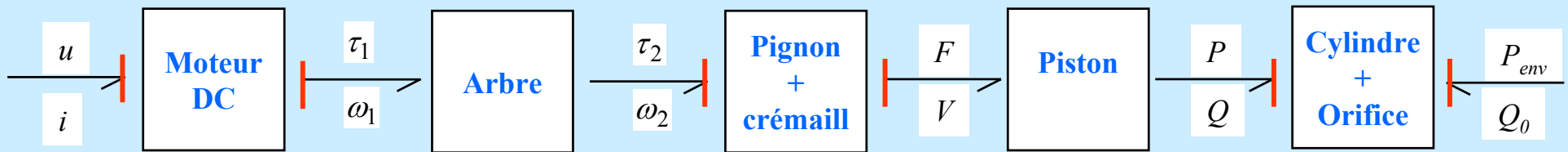
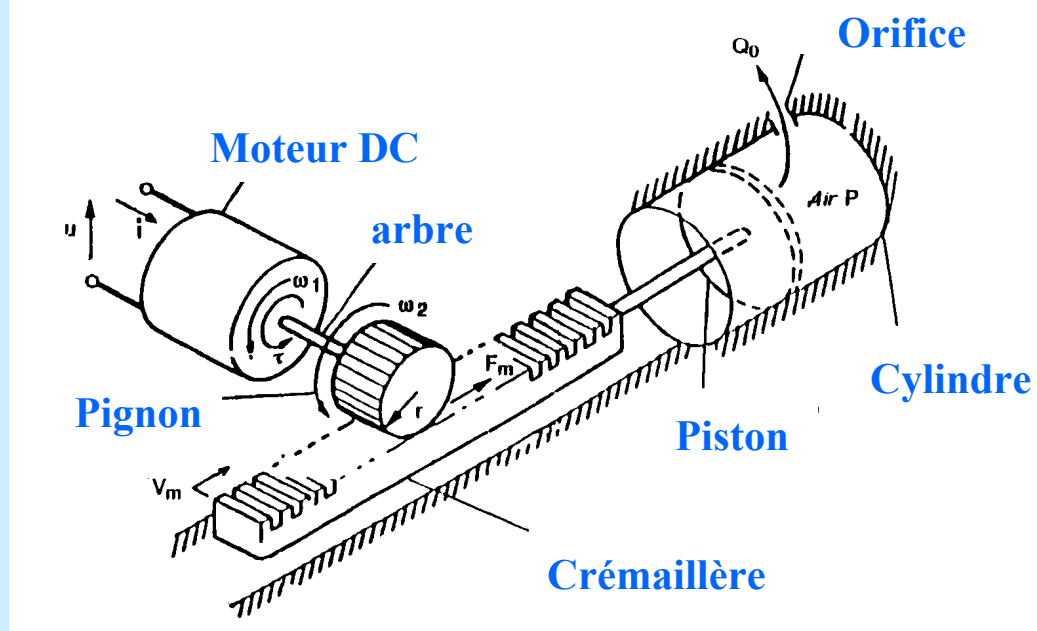
$$u_{R1} = R_1 \cdot i_{R1}$$

$$i_{R2} = 1/R_2 \cdot u_{R2}$$

$$i_L = 1/L \int u_L dt$$

$$u_C = 1/C \int i_C dt$$



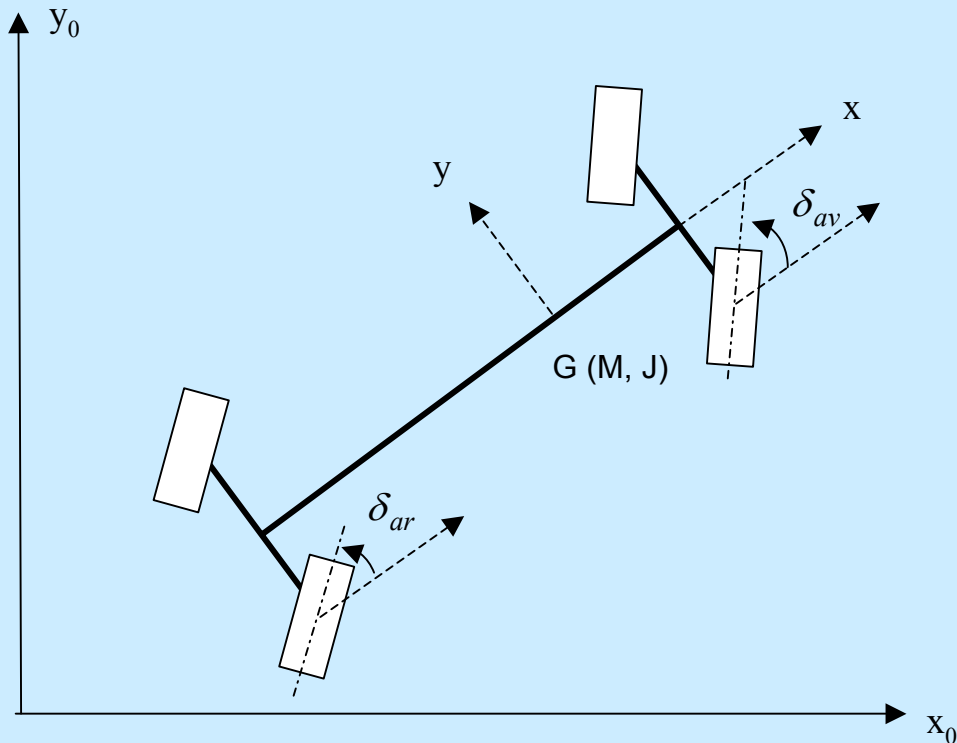


**Bibliothèque de modèles : Sous-modèles avec**  
 → un environnement énergétique défini  
 → un choix cohérent de variables de couplage  
 → une détermination systématique des variables d'entrées-sorties

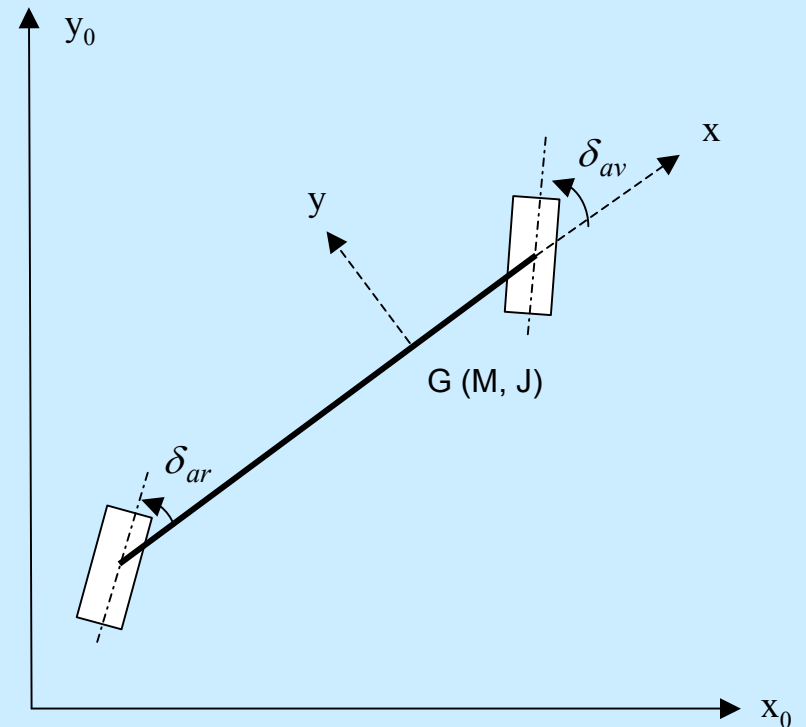
# Simulation du BG

Logiciels dédiés BG:

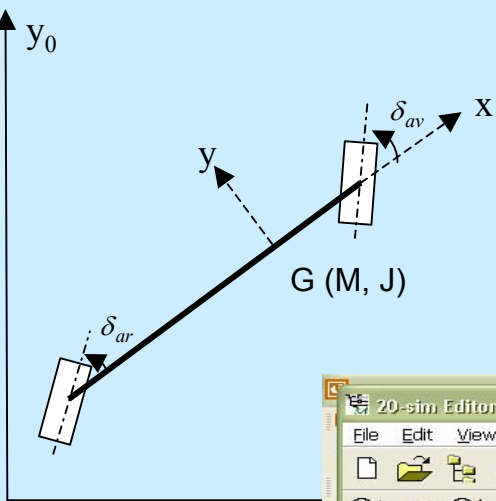
20Sim, CAMPG+Matlab, CAMPG+ACSL, Symbols, MTT...



Modèle véhicule plan horizontal



Modèle bicyclette



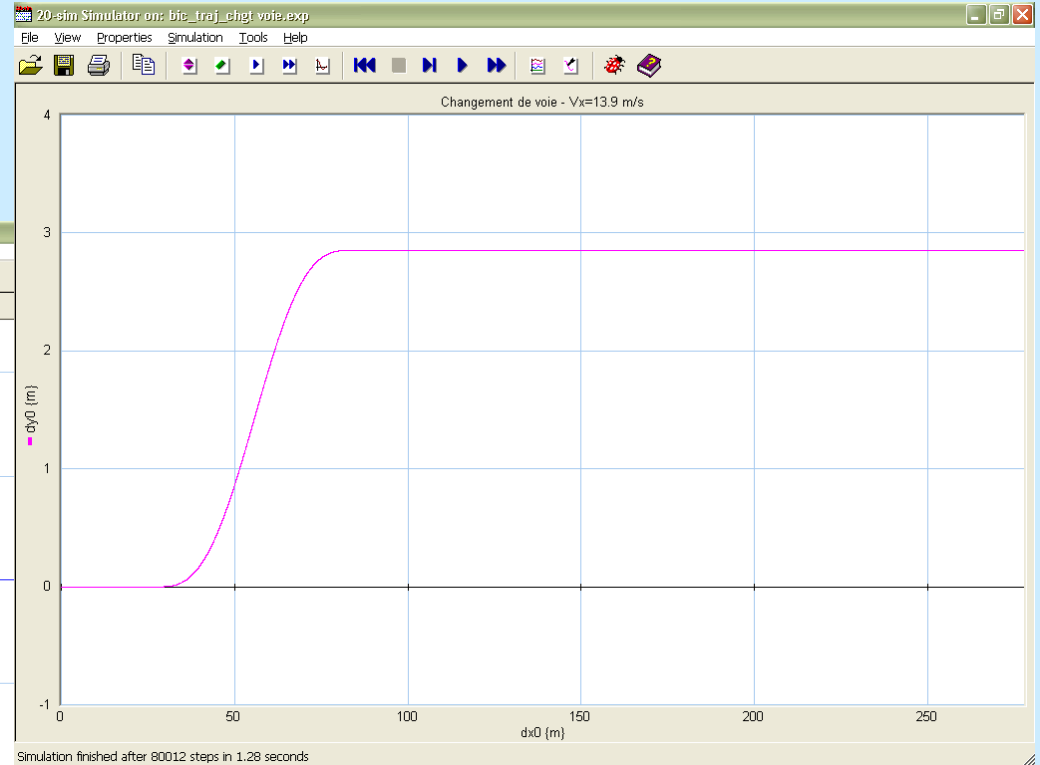
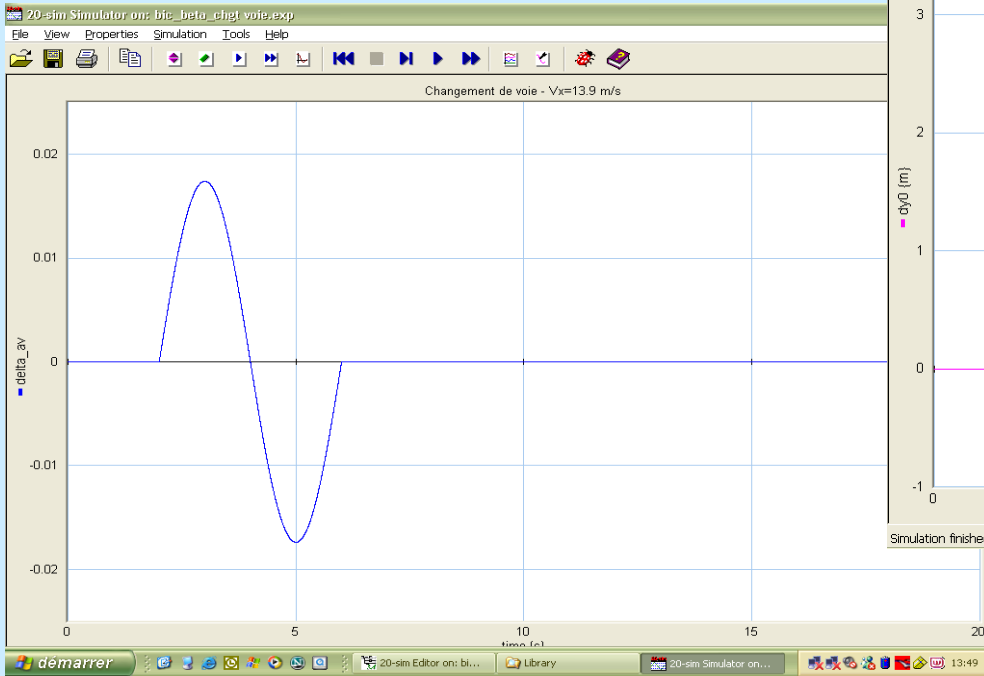
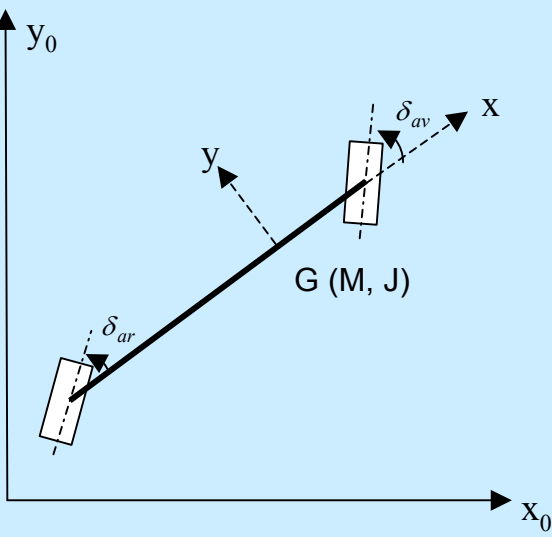
# Simulation avec 20sim

The screenshot shows the 20-sim Editor interface for a bicycle model simulation. The main workspace contains a block diagram with the following components and connections:

- Inputs:**  $\delta_{ar}$  and  $\delta_{av}$  (represented by blue boxes).
- Block Diagram:**
  - Two **MTF** blocks receive  $\delta_{ar}$  and  $\delta_{av}$  as inputs. Their outputs are  $\delta_{ar\_Vx}$  and  $\delta_{av\_Vx}$ .
  - A central **MGY** block receives  $\delta_{ar\_Vx}$  and  $\delta_{av\_Vx}$  as inputs. Its output is  $\text{moins\_M\_wz}$ .
  - Two **TF** blocks (Transfer Functions) are present:
    - One **TF** block receives  $\text{moins\_M\_wz}$  as input and outputs  $\text{psi\_dot}$ .
    - Another **TF** block receives  $\text{psi\_dot}$  as input and outputs  $\text{inv\_a}$ .
  - Two **IO** blocks (Input/Output) are connected to the **TF** blocks and the **MGY** block.
  - Two **Sf** blocks (Summing junctions) are used to combine signals. One **Sf** block receives  $\text{psi\_dot}$  and  $\text{inv\_a}$  as inputs and outputs  $V_x$ .
  - Another **Sf** block receives  $V_x$  as input and outputs  $V_{x\_out}$ .

The interface also shows a Hierarchy panel on the left with 'model', 'deplacement\_repere', and 'modele' items. The Type panel on the right shows 'Submodel' with signals 'psi\_dot', 'Vx\_out', and 'Vy\_out'. The Implementation panel shows the detailed block diagram.

# Simulation avec 20sim



$$\text{Trajectoire } y_0(G) = f(x_0(G))$$

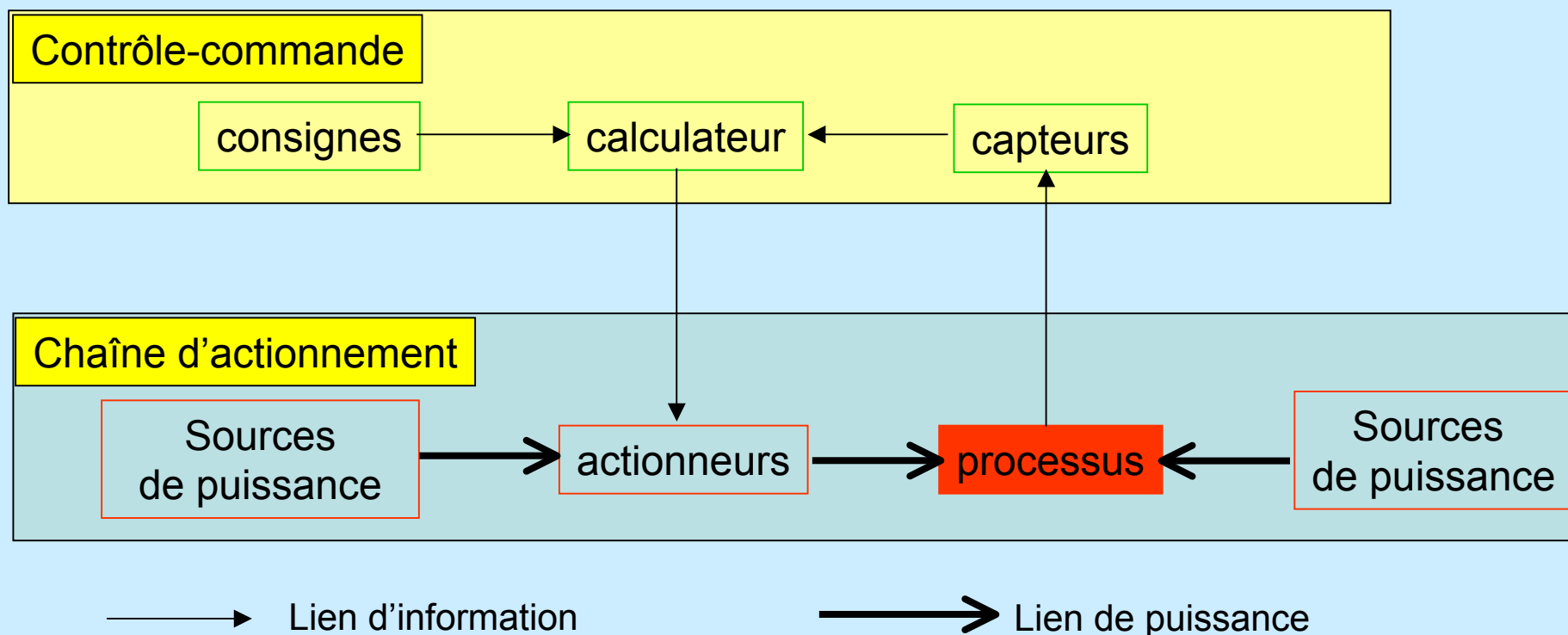
Braquage roue avant

## Modèles mathématiques déduits du bond graph

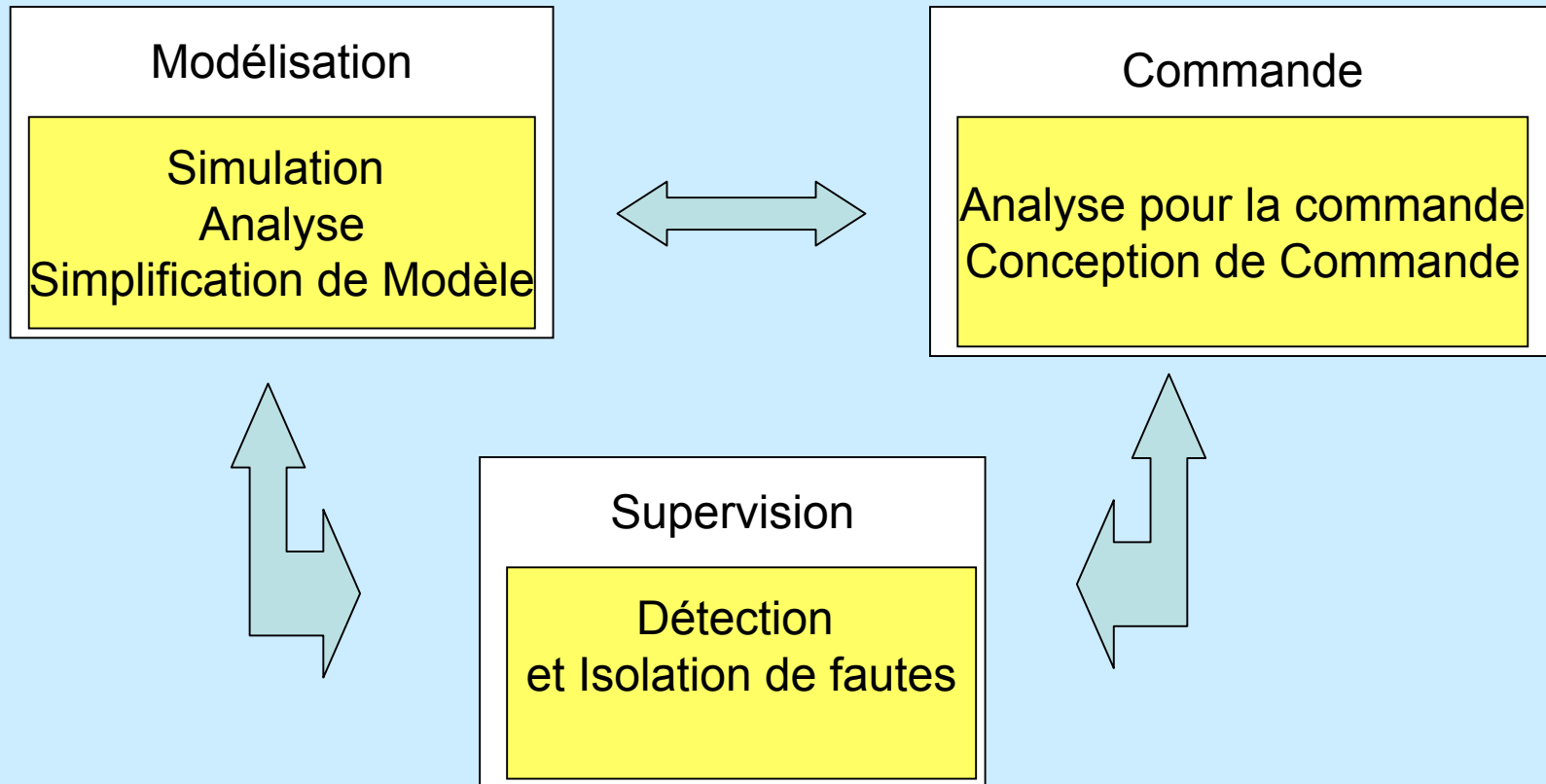
- Fonction de transfert
  - Equation d'état linéaire ou non linéaire
    - Variables d'état:
      - \* associées aux éléments de stockage d'énergie I et C
      - \* variables d'énergie
        - $p$ : moment généralisé sur les I
        - $q$ : déplacement généralisé sur les C
- Simulation avec des logiciels « généralistes »  
(Matlab/Simulink, ...)

# Applications : Ingénierie des Systèmes

- *Système mécatronique* : Système pluridisciplinaire piloté, avec des transferts d'information et de puissance



## Conception intégrée



# Exemples d'applications industrielles



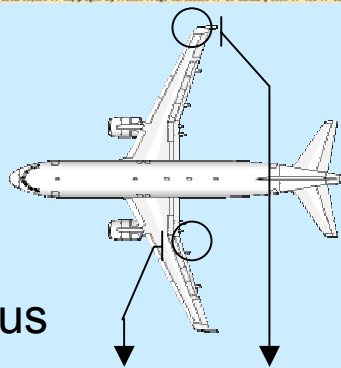
Airbus



Aerospatiale



IFP



Airbus



Alstom

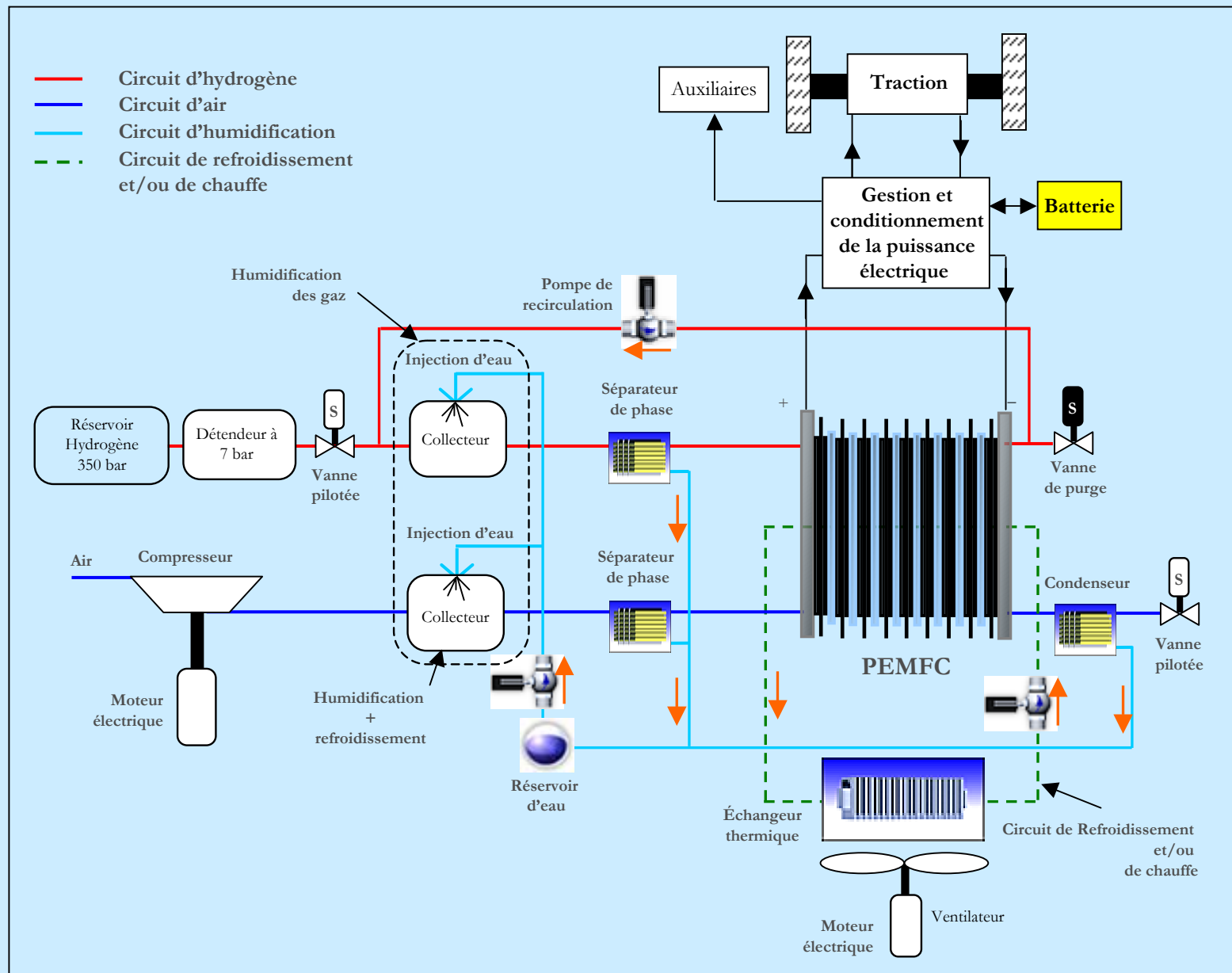
Renault, Ford, Toyota,  
General Motors, EDF,  
Thalès, CEA, Bosch,  
Valeo, Siemens..  
Sherpa Eng., CERTIA,  
Virtual Dynamics...

# Applications Automobile PSA

- *Modélisation et commande*
  - **BVA**
  - **Suspension**
  - **Embrayage piloté**
  - **Climatisation habitacle**
  - **PAC**
  - **ESP**
- *Modélisation et dimensionnement*
  - **Pompes volumétriques**
  - **Injecteurs diesel**
  - **Système de freinage**
  - **Amortisseurs**
  - **Moteur thermique**
  - **Chaînes de traction conventionnelles et hybrides**
  - **Direction à assistance électrique**
- *Diagnostic*
  - **PAC**

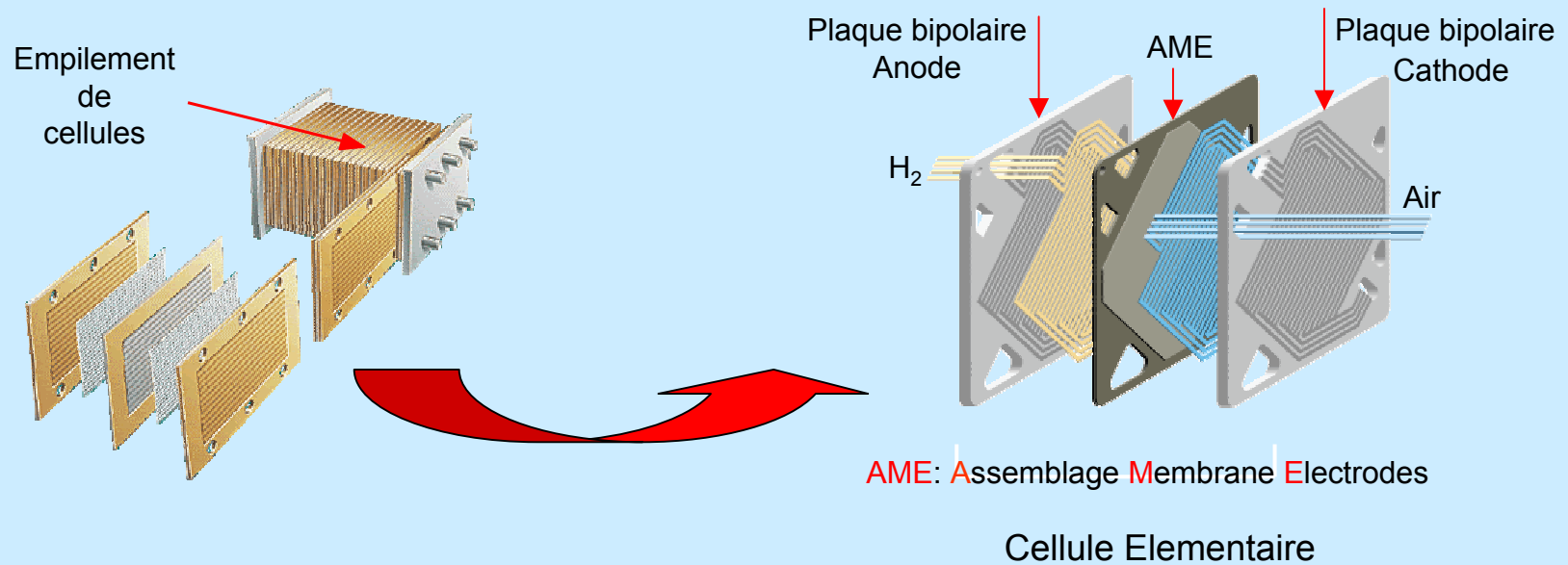
## Exemple : Pile à combustible PEMFC



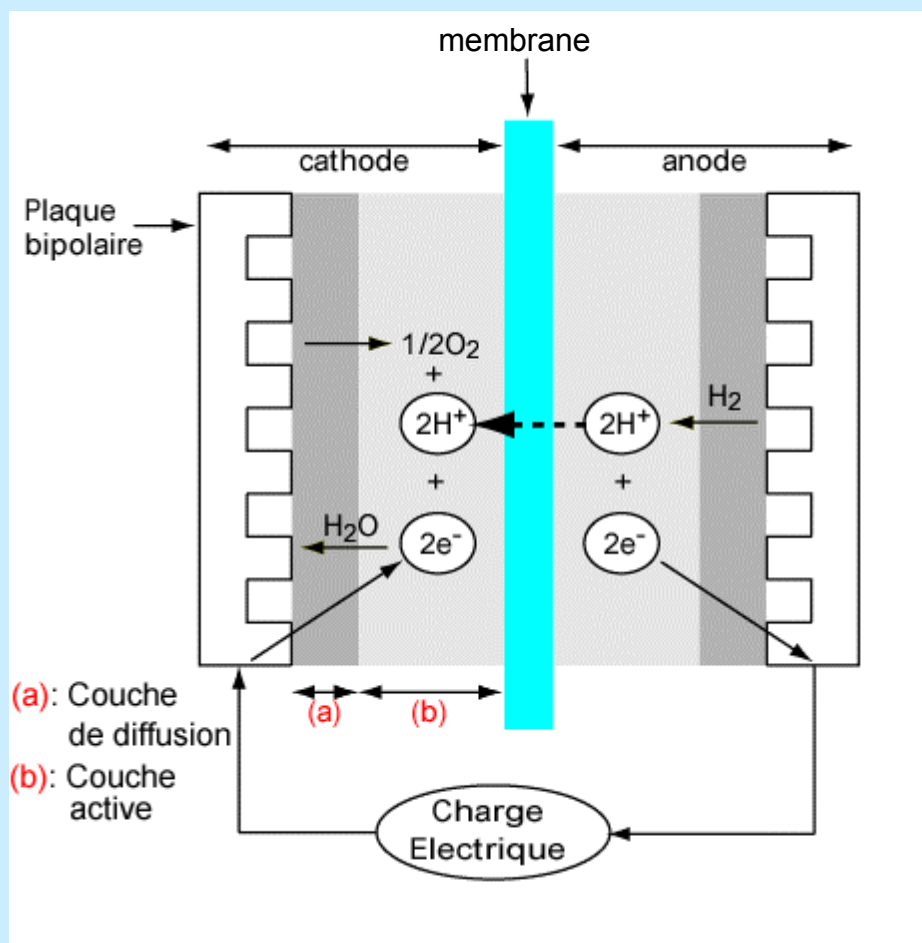


## Exemple : PAC PEM Fuel Cell

« PEM » Proton Exchange Membrane



## Exemple : PEM Fuel Cell



Différents domaines physiques

$(P, \dot{n}$  ou  $\dot{m})$  : **Hydraulique**

$(T, \dot{H}$  ou  $\dot{Q})$  : **Thermique**

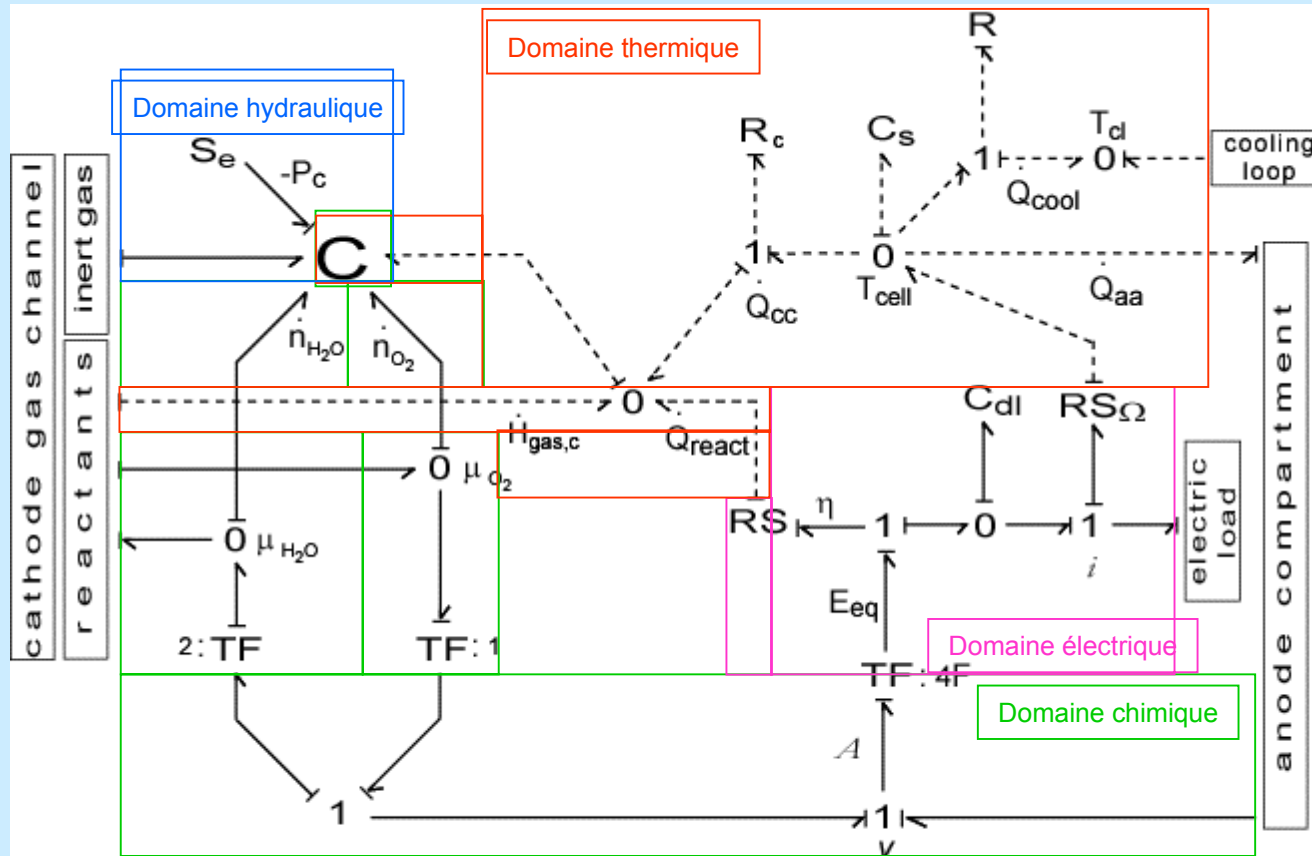
$(\mu, \dot{n})$  : **Chimique**

$(E, i)$  : **Electrique**



Traction

# Exemple : PEM Fuel Cell



Modèle bond graph de la réaction électrochimique à l'électrode cathode

$A$  : L'affinité chimique de la réaction

$$A = \mu_{O_2} + 2\mu_{H_2} - 2\mu_{H_2O}$$

$\mu_i$  : Le potentiel chimique de l'espèce  $i$

$$\mu_i = \Phi \left( \int_0^t \dot{n}_i dt, \int_0^t \sum_j \dot{n}_j dt, P, T \right)$$

$E_{eq}$  : Le potentiel d'équilibre

$$E_{eq} = \frac{A}{4F}$$

$E$  : La tension aux bornes de l'AME

$$E = E_{eq} - \eta - R_{\Omega}i$$

$j$  : La densité de courant faradique

$$j = j_0 \left( \exp\left(\alpha \frac{4F}{RT} \eta\right) - \exp\left(- (1-\alpha) \frac{4F}{RT} \eta\right) \right)$$

$i$  : La densité de courant global

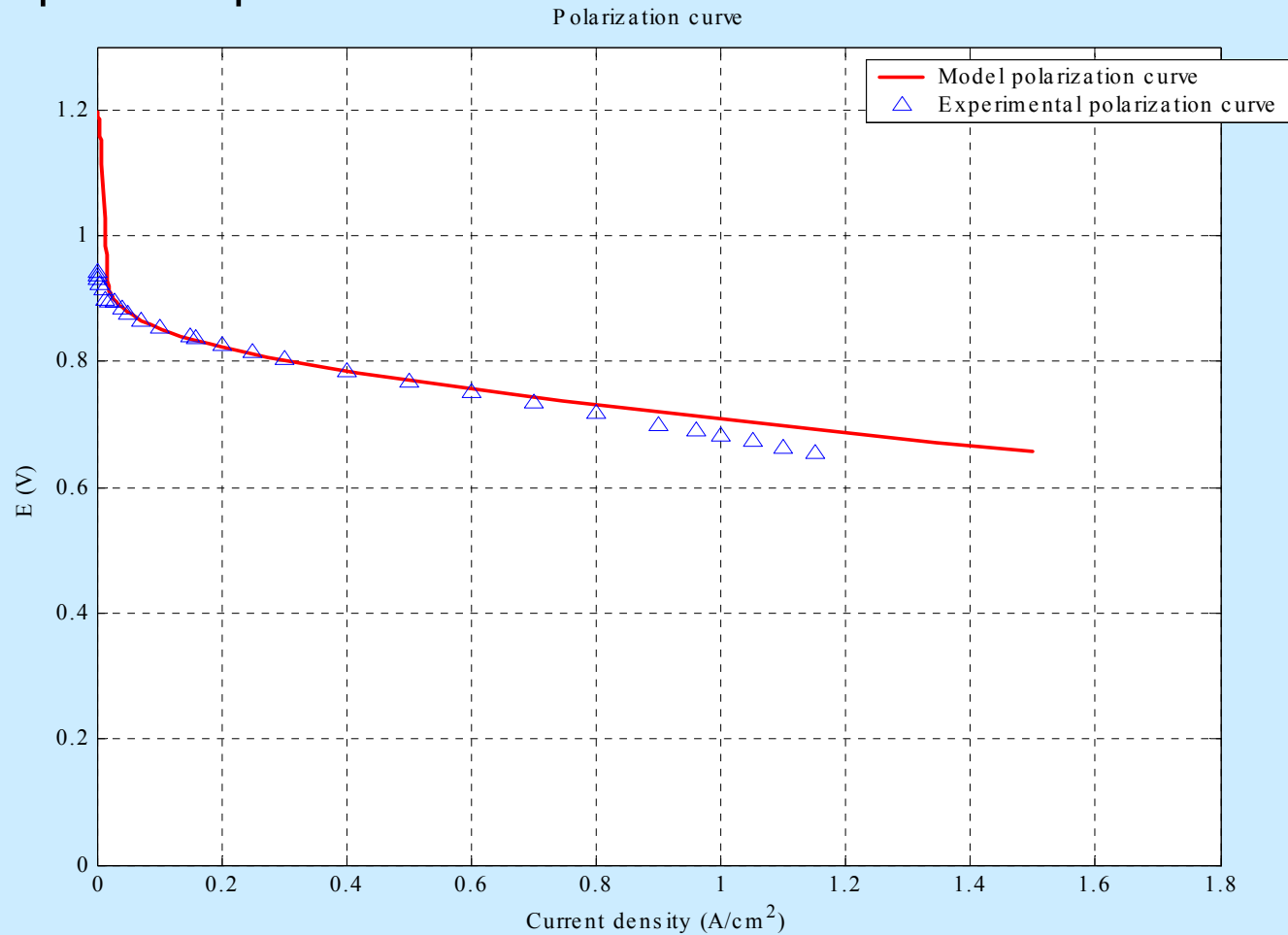
$$i = j - i_{dc}$$

$T_{cell}$  : La température de la cellule

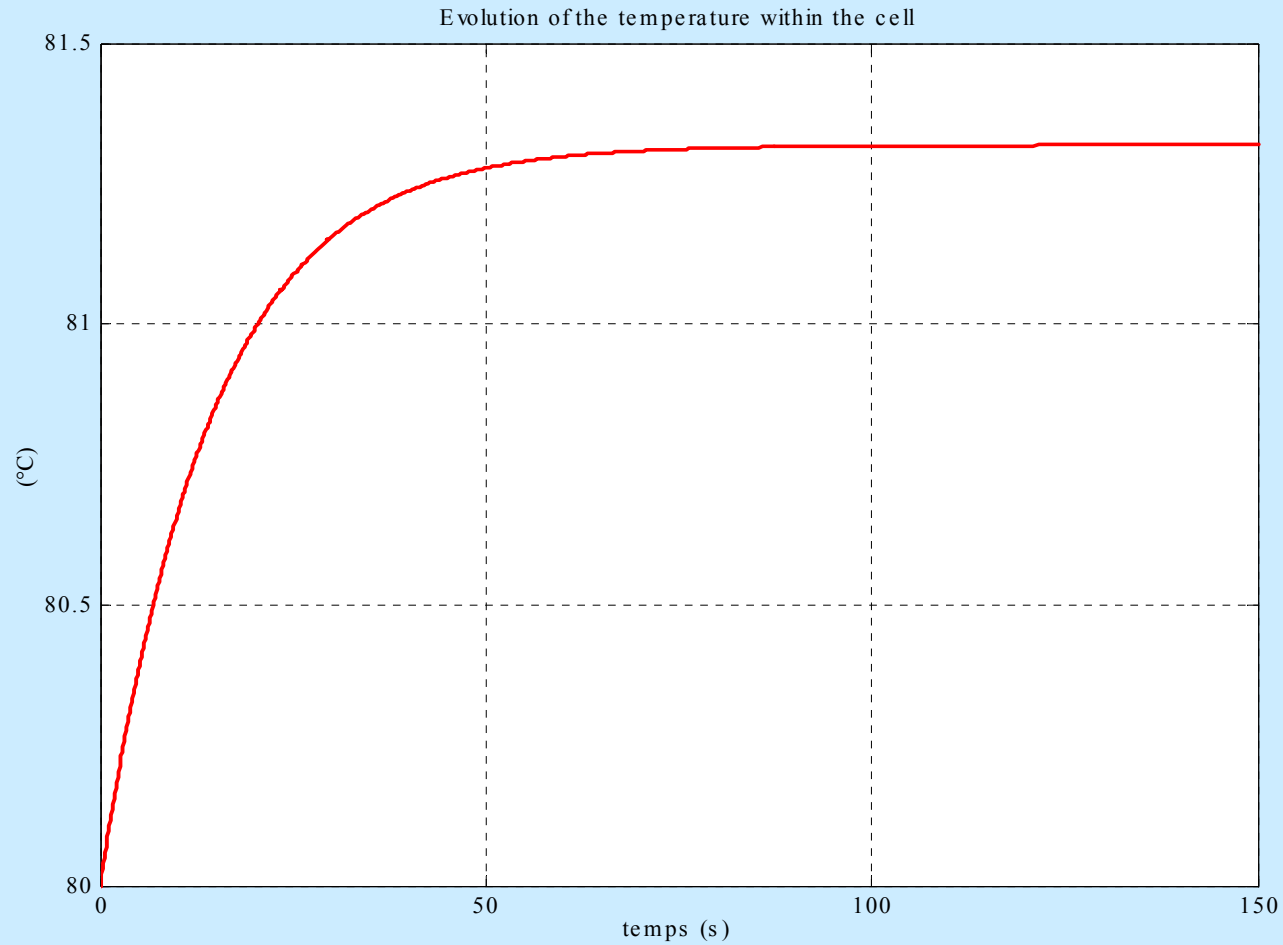
$$T_{cell} = \frac{1}{C_s} \int_0^t (\dot{Q}_{\Omega} - \dot{Q}_{aa} - \dot{Q}_{cc} - \dot{Q}_{cool}) dt$$

# Exemple : PEM Fuel Cell

## Caractéristique statique



## Exemple : PEM Fuel Cell



## Apports de l'outil BG

- **Pour la modélisation**
- **Pour l'identification**
- **Pour l'analyse**
- **Pour la commande**
- **Pour le diagnostic de pannes**
- **Pour la simulation**

- **le langage demande un apprentissage (comme l'informatique)**
- **l'utilisateur de l'outil bond graph ne peut rien sans la connaissance PHYSIQUE du système**

## Quelques références bibliographiques

- **H. Paynter "Analysis and design of engineering systems", MIT Press, 1961**
- **D. Karnopp, R. Rosenberg "Systems dynamics : a unified approach", John Wiley & sons, 1975, 1991 (2nde édition)**
- **R. Rosenberg, D. Karnopp "Introduction to physical system dynamics", series in mechanical engineering, Mac Graw Hill, 1983**
- **P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis "Modélisation et identification des processus", Méthodes et pratiques de l'ingénieur, éditions Technip, volume 3, tome 2, 1992**
- **" Les bond graphs " ouvrage collectif, G. Dauphin-Tanguy coordonnateur, collection IC2, Hermès, septembre 2000**
- **M. Vergé, D. Jaume " Modélisation structurée des systèmes avec les bond graphs « , Méthodes et pratiques de l'ingénieur, Editions Technip, 2004**