

**Enseigner les Sciences de l'Ingénieur en CPGE**

# Enseigner les Sciences de l'Ingénieur en CPGE

**Séminaire  
Lycée Raspail  
Juillet 2011**

**Claude BERGMANN, IGEN**

**Paris, mercredi 6 juillet 2011**

# Sommaire

**9h30 – 10 h**

Ouverture du séminaire – Claude Bergmann

**10h – 12h**

Enseignement des SII en CPGE – Jacques Aiache

Compétences en CPGE – Jacques Aiache

Enseignement des SII en ATS – Christel Izac

Enseignement des SII en TSI – Pascale Costa

**Questions Réponses**

**12h30 – 13h45**

**Repas**

**13h45 – 14h15** Présentation de l'UPSTI

Méthodologie pour définir son organisation pédagogique quand on est débutant -

Séverine Blanc-Serrier

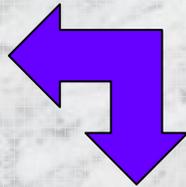
**14h15 - 15h00**

**15h00 15h30** TIPE – Pascale Costa

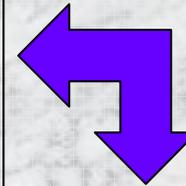
**15h30 16h00** Ouverture sociale en CPGE – Christel Izac

# Synthèse des exigences

**La demande  
des  
entreprises**



**Les concours  
et les écoles  
d'ingénieurs**



**La demande des  
professeurs des  
CPGE**

# Exigence des écoles d'ingénieur

- L'ingénieur doit être plus performant.
  - Un entrepreneur, un innovateur.
  - Un communicant (anglais, ...)
- Aborder des systèmes technologiques complexes
- Capacité à s'organiser (travail en groupe projet).
- Analyse critique.
- Évaluation et expertise.
- Adaptation rapide.

# objectifs des Professeurs CPGE

- Donner les connaissances de base scientifiques et technologiques.
- Structurer et organiser les savoirs et compétences
- Acquisition de la culture technologique
- Identifier rapidement les deux chaînes information et énergie dans un système.
- Utiliser les outils informatiques et être capable de passer du réel au modèle, revenir au réel
- Préparer les épreuves écrites et orales des concours

# Les enjeux pédagogiques

- Étapes clés de l'évolution des technologies
- Les enjeux des métiers de demain
- Recherche de cohérence des contenus de formation
- Une pédagogie pour la voie technologique
- Constats fondateurs des sciences industrielles pour l'ingénieur

## Étapes clés de l'évolution des technologies

- La maîtrise de l'énergie
- La maîtrise de l'information, et des techniques de communication.
- L'évolution des constituants et systèmes, aujourd'hui pluri techniques
- L'élargissement des marchés et des échanges, le phénomène de mondialisation de l'économie
- L'impact des évolutions technologiques doit prendre en compte les contraintes humaines et environnementales

## Les enjeux des métiers de demain

Les activités s'organisent de plus en plus en **équipe pluridisciplinaire**

Les acteurs doivent prouver un équilibre entre **maîtrise technique du spécialiste** et capacité à **dialoguer avec les autres domaines**.

Pour les **ingénieurs**, on attend :

- **L'organisation et l'assimilation critique** des connaissances plutôt que leur accumulation
- La capacité à **réinvestir ses savoirs et savoir-faire** dans des situations nouvelles, concrètes, évolutives

# Recherche de cohérence des contenus de formation

## La rénovation des programmes des collèges et lycées:

Technologie en collège

Enseignements de détermination en seconde:

- Initiation aux sciences de l'ingénieur (ISI)
- Informatique et systèmes de production (ISP)

Sciences de l'ingénieur dans la filière scientifique

Baccalauréat STI2D

Classes préparatoires aux grandes écoles

# Une pédagogie pour la voie technologique - les moteurs de l'évolution

**Sur la base d'un corpus de connaissances de base et d'outils méthodologiques,**

Les moteurs des évolutions de la formation sont:

## **L'émergence de la modélisation**

- Interactions, compatibilités, conjugaison des éléments d'un système plus performante que l'addition.
- Contextualisation des savoirs et savoir-faire.

## **L'idée de complexité**

- Relation « fonction – structure - comportement », modélisation, simulation
- Lien entre sciences et technologies

# Constats fondateurs des sciences industrielles pour l'ingénieur

## Les Produits

- définis par un cahier des charges
- systèmes complexes intégrant des chaînes de fonctions :  
**l'énergie,**  
**l'information**

## L'activité industrielle d'ingénierie (conception et production)

- travail en équipe (**ingénierie concourante et simultanée**)
- compétences pluri techniques (**culture des solutions**)
- maîtrise des performances (**compréhension du fonctionnement, modélisation et simulation du comportement réel, tests,....**)
- langages de communication technique

# Objectifs pédagogiques généraux

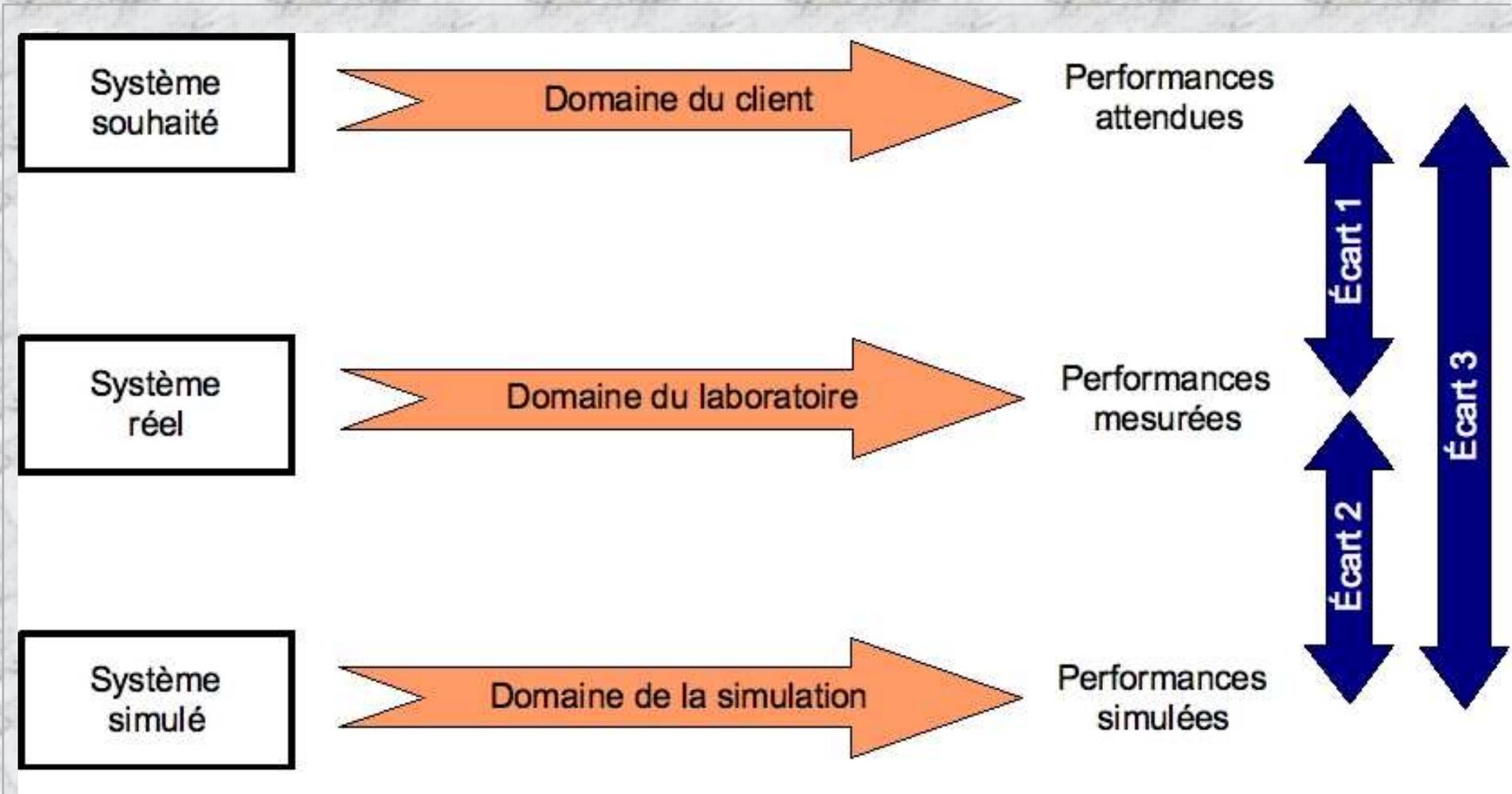
1. Analyses critiques de solutions existantes.
2. Élaboration et justification de solutions nouvelles, les étudiants doivent être capables:
  - D'analyser une solution technique
  - Concevoir la partie opérative
  - Rechercher une solution, approche multicritère
  - Exploiter les outils informatiques existants.

Pour assurer la cohérence de la formation, la totalité de la formation est assurée par un seul professeur

# Objectifs de formation

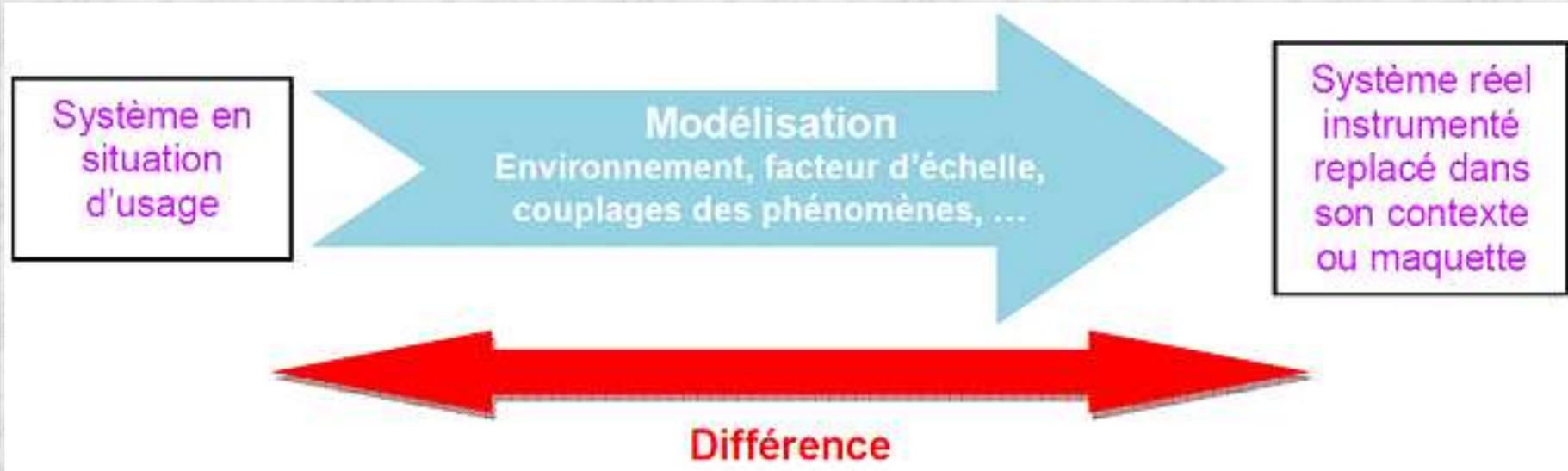
- Structurer la relation réel – Modèle
- Les systèmes sont pluri techniques
- Éléments fondamentaux: Mécanique, automatique appliqués au contexte technologique
- Préparation des étudiants aux méthodes de conception des produits.
- Développement des capacités de créativité.
- Prise en compte des la chaîne d'énergie et de la chaîne d'information.

# Démarches de l'ingénieur

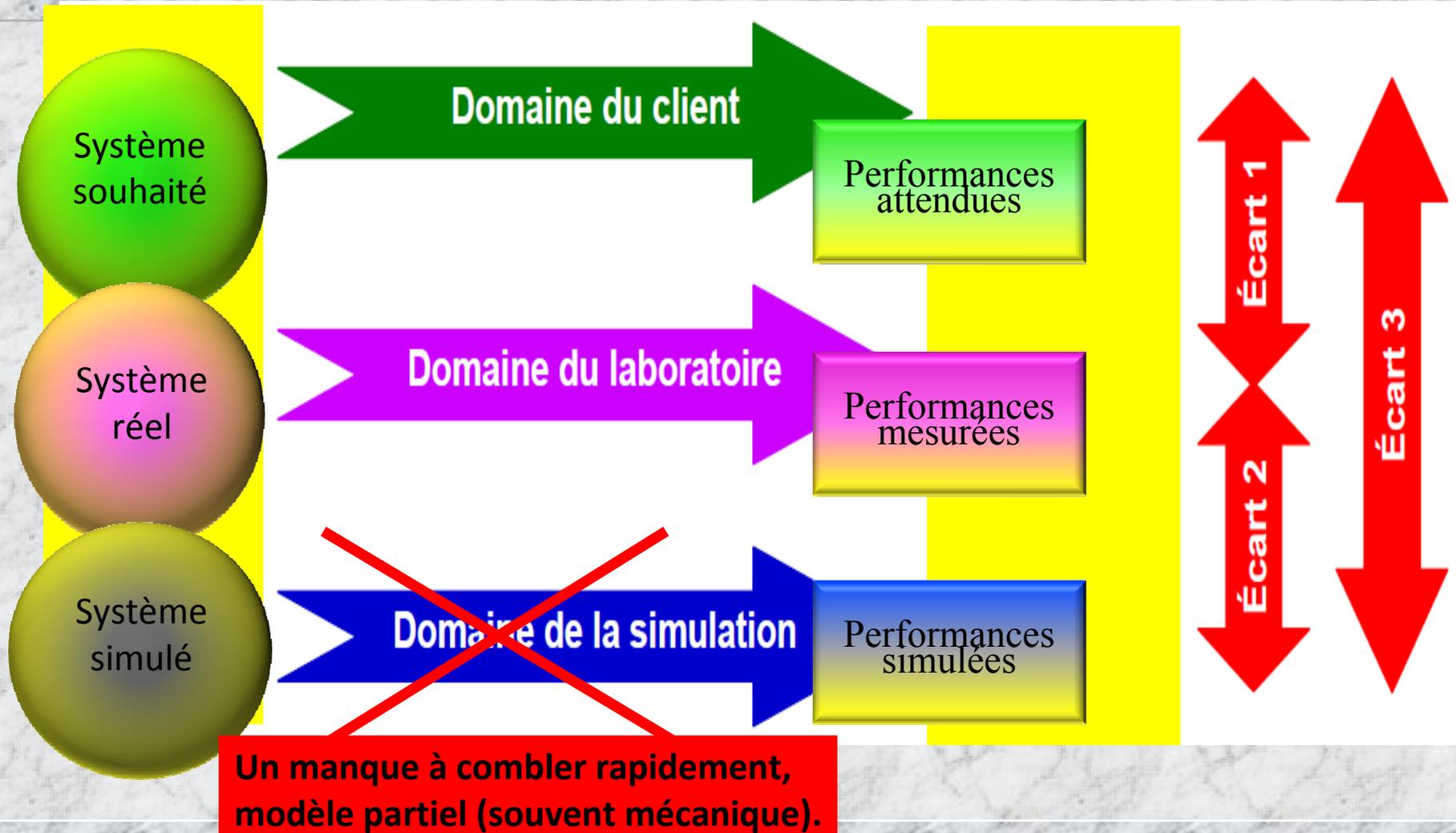


# Systemes réels

- **Systemes réels : souvent complexes, peu accessibles**
- **Analyse du comportement sur un système réel instrumenté replacé dans son contexte ou sur une maquette instrumentée présente dans le laboratoire**



# Les systèmes et le laboratoire



# **Modélisations & Simulations**

## **Sciences de l'Ingénieur**

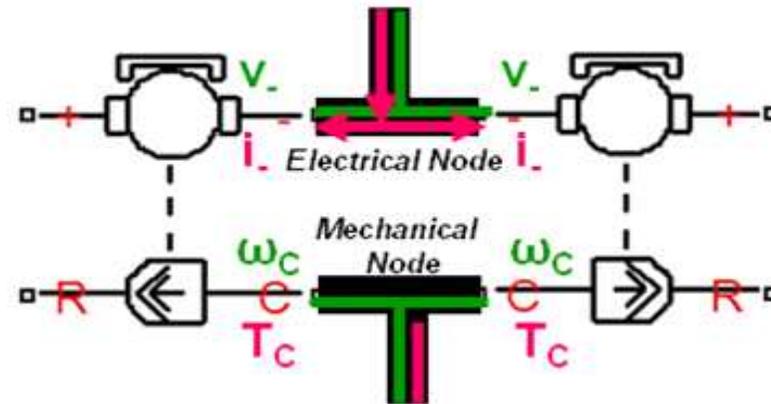
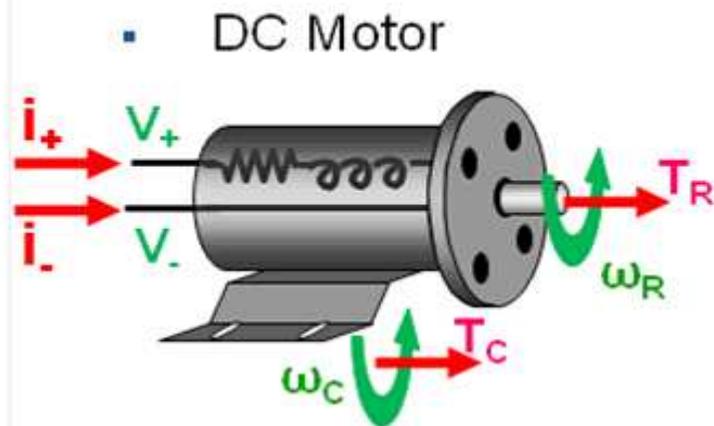
# Systemes pluridisciplinaires

Notions de variables potentielles (effort)  
dans les logiciels « non causaux » (modélica) les  
variables (« across ») sont des tensions, vitesses  
angulaires, températures.

Notions de variables traversantes (flux):  
Les variables « through » sont les courants, les  
forces, les couples

Le produit d'une variable « across »  $X$  « through »  
est une puissance transmise

# Modélisation des systèmes physiques

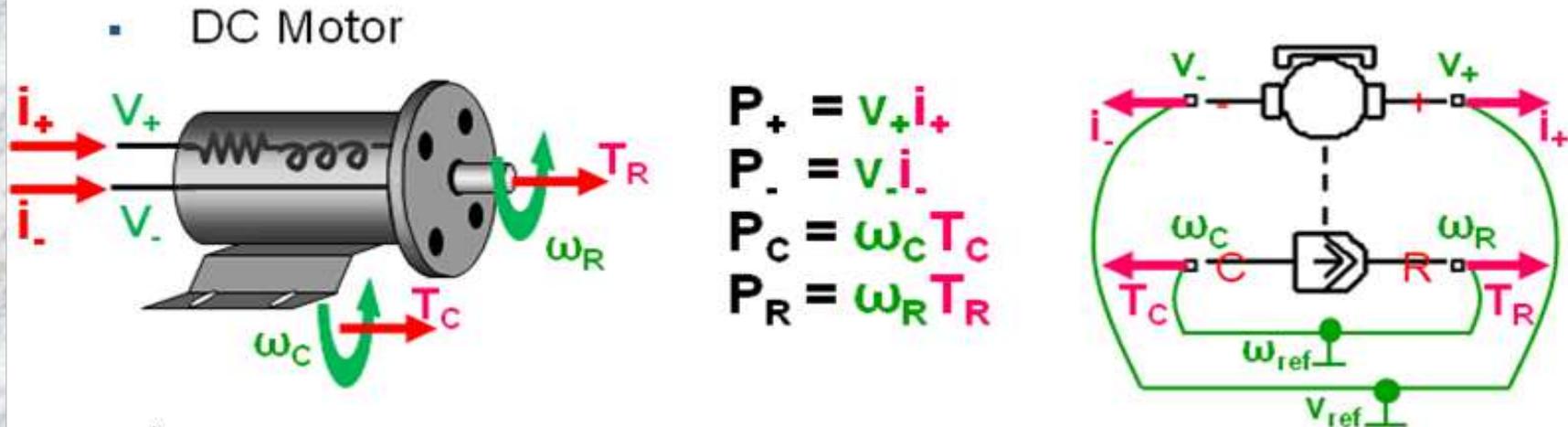


Pour la modélisation, les règles suivantes sont appliquées:

**Pour les ports connectés, les valeurs « across » sont identiques**

**La somme des variables « through » dans une branche est nulle**

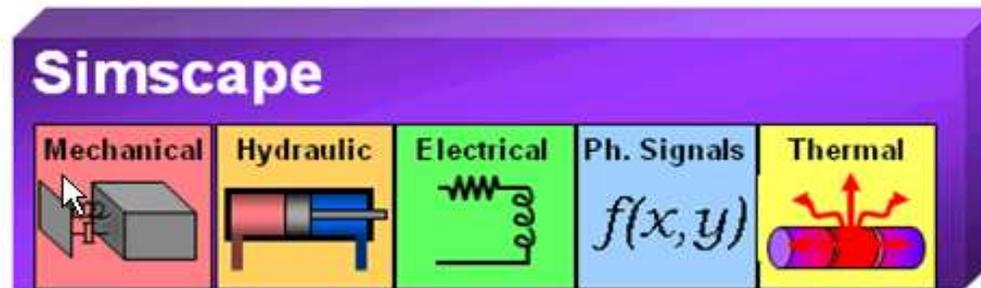
# Exemple Le moteur CC



Chaque nœud donne lieu à l'écriture d'une équation : **égalité des variables « across »** (tension pour la partie électrique et vitesse de rotation pour la partie mécanique) et **addition des variable through** (somme des courants pour la partie électrique et somme des sommes des couples pour la partie mécanique)

**La puissance est égale au produit d'une variable « across » par une variable « through » dite complémentaire.**

# Les domaines de la simulation en Science de l'Ingénieur



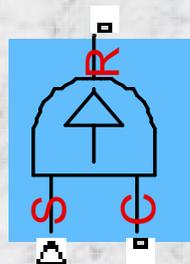
Domaines physiques	Variables « Across »	Variables « Through »
Mécanique Translation / rotation	Vitesse, vitesse angulaire	Force, couple
Hydraulique	Pression	Flux volumique
Electrique	Tension	Courant
Thermique	température	Flux thermique

# Les éléments de simulation en mécanique (les sources)

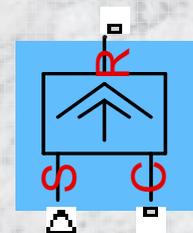
Système en rotation

Système en translation

Across

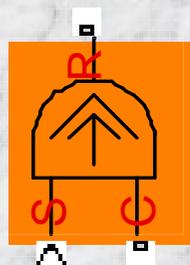


Actionneur idéal  
(vitesse de rotation)

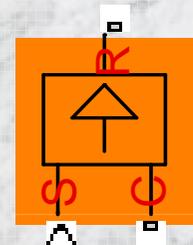


actionneur idéal (Force)

Through



Actionneur idéal  
Couple



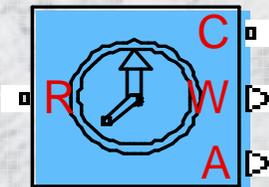
actionneur idéal Vitesse

# Les éléments de simulation en mécanique (les mesures)

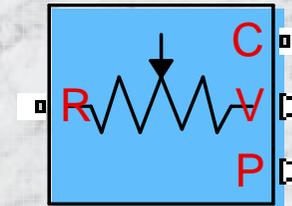
Système en rotation

Système en translation

Across

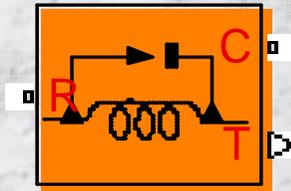


Ideal Rotational Motion Sensor

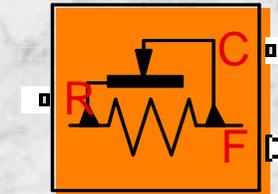


Ideal Translational Motion Sensor

Through

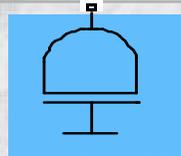


Ideal Torque Sensor

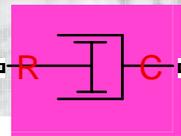


Ideal Force Sensor

# Les éléments de simulation en mécanique (rotation)



$$t == \text{inertie} * \text{l.w.der};$$

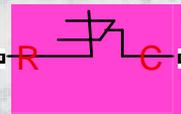


$$t == D * w;$$



$$w == \text{phi.der};$$

$$t == \text{spr\_rate} * \text{phi};$$



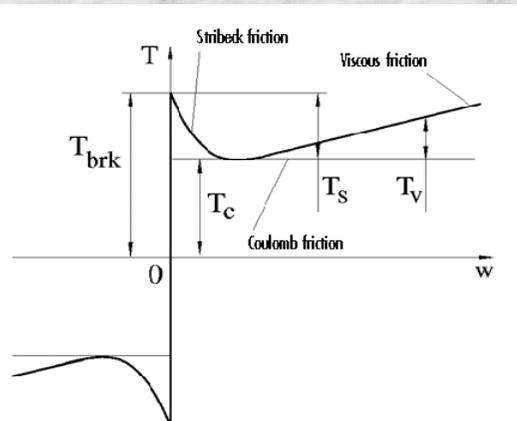
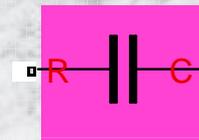
Accumulation + frottement

```

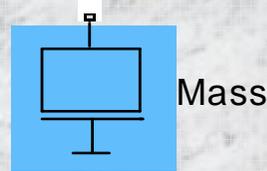
if (phi > upper_bnd
t == stiff_up * (phi - upper_bnd) + D_up * w;
elseif (phi < lower_bnd
t == stiff_low * (phi - lower_bnd) + D_low * w;
else
t == {0 'N*m'};

```

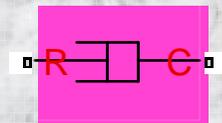
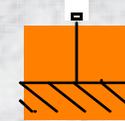
$$\text{phi.der} == w;$$



# Les éléments de simulation en mécanique (Translation)



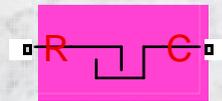
Mass



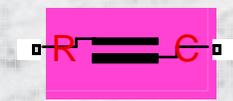
$$f == D * v;$$



Translational Spring



Accumulation + frottement

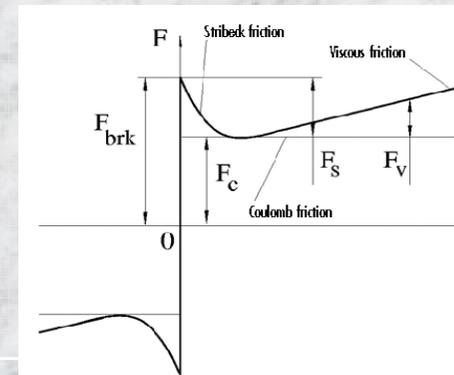


Translational Friction

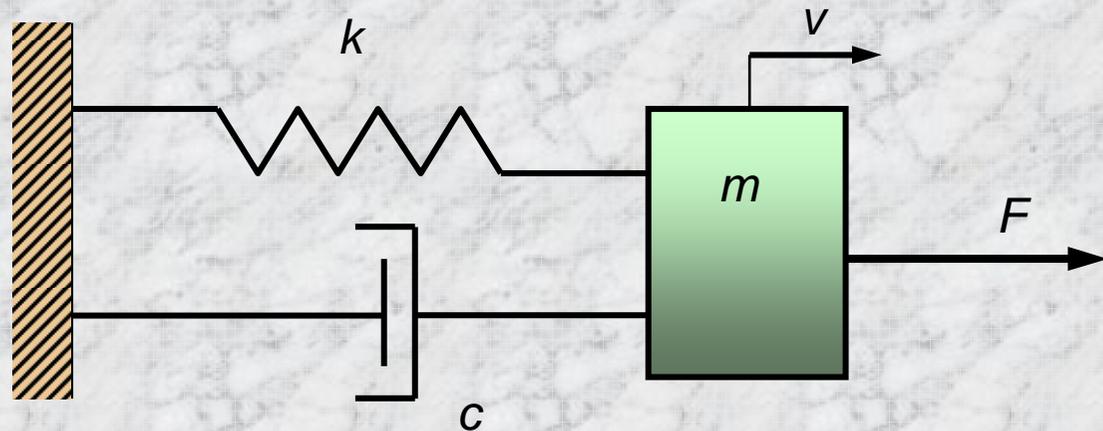
```

if (x > upper_bnd)
    f == stiff_up * (x - upper_bnd) + D_up * v;
elseif (x < lower_bnd)
    f == stiff_low * (x - lower_bnd) + D_low * v;
else
    f == {0 'N'};

x.der == v;
    
```



# Exemple : un système mécanique



Variables de puissance

- ↳ Force  $F$
- ↳ Vitesse linéaire  $v$

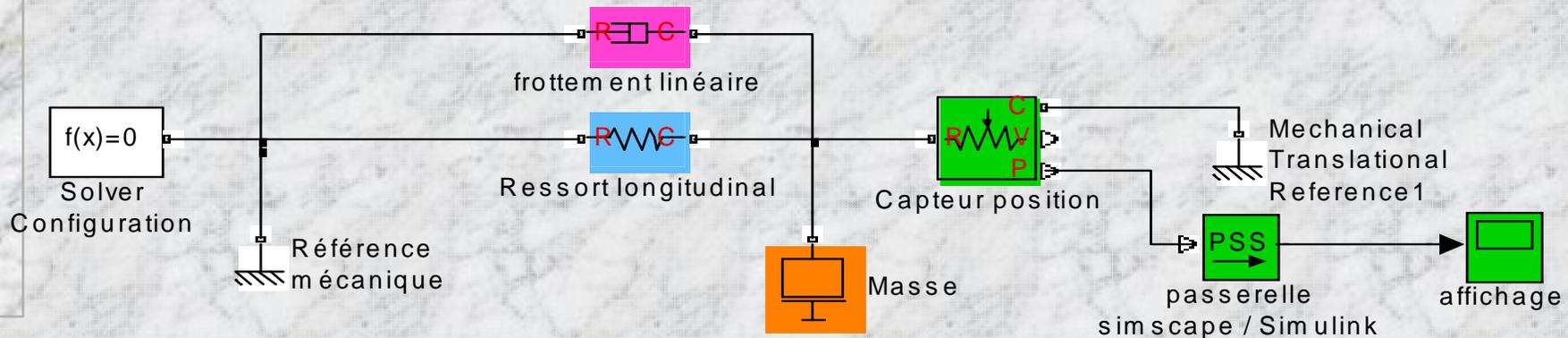
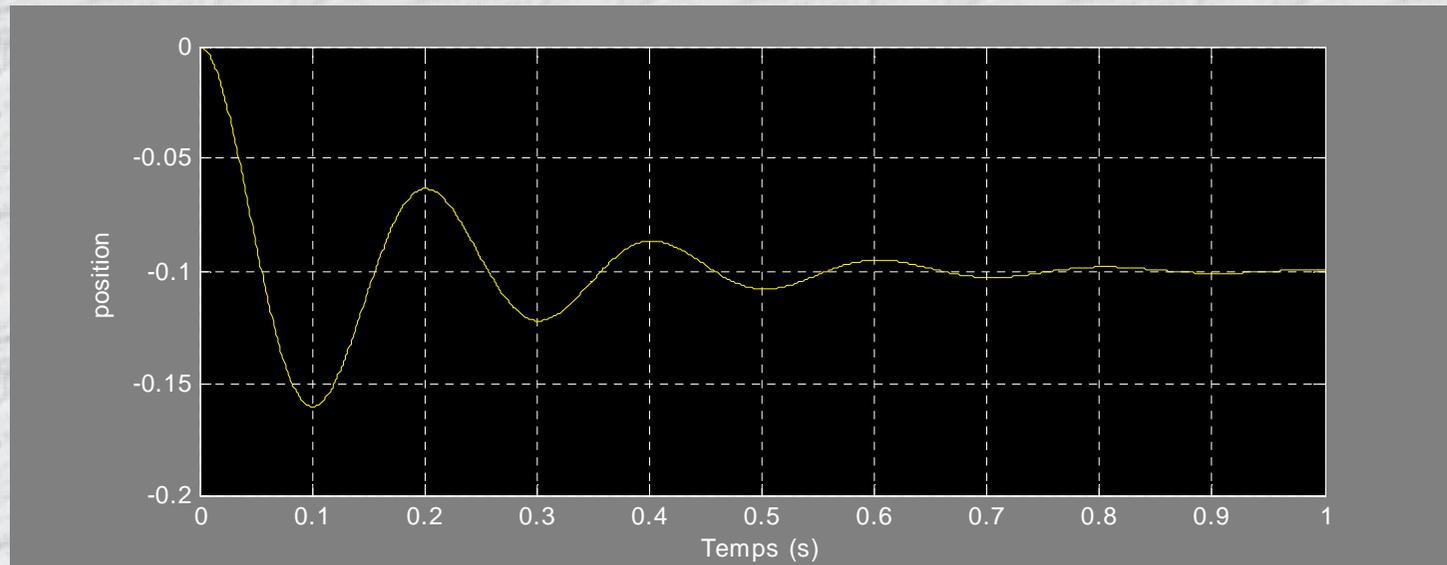
Puissance mécanique

$$P = F v$$

Lois des constituants

$$F_r = k \int v dt \quad F_a = c v \quad F_m = m \frac{dv}{dt}$$

# Exemple d'une translation en mécanique



# Les éléments de simulation en électrique (les sources)



AC Current Source



DC Current Source



AC Voltage Source



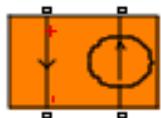
DC Voltage Source



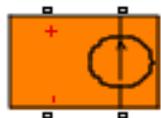
Controlled Current Source



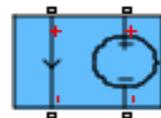
Controlled Voltage Source



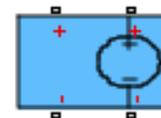
Current-Controlled Current Source



Voltage-Controlled Current Source



Current-Controlled Voltage Source

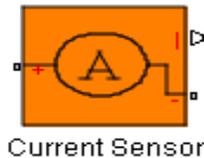


Voltage-Controlled Voltage Source

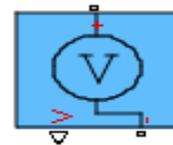
Variable "through" Courant

Variable "across" tension

# Les éléments de simulation en électrique (les mesures)



Current Sensor

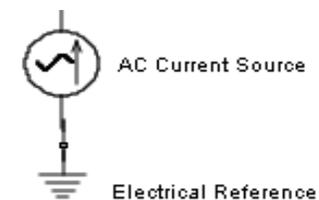
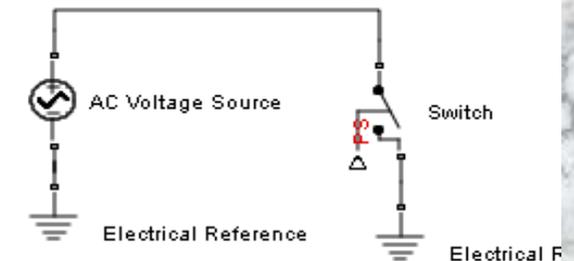


Voltage Sensor

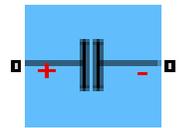
## Les interdictions

Les sources de tension ne sont pas en court circuit

Les sources de courants ne sont pas en circuit ouvert



# Les éléments de simulation en électrique (tension et courant)



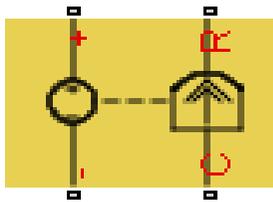
Capacitor



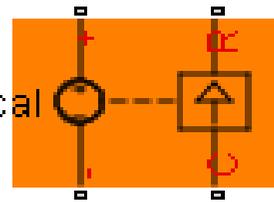
Inductor



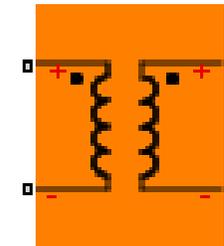
Resistor



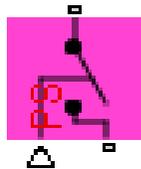
Rotational  
Electromechanical  
Converter



Translational  
Electromechanical  
Converter



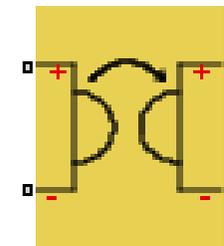
Ideal Transformer



Switch

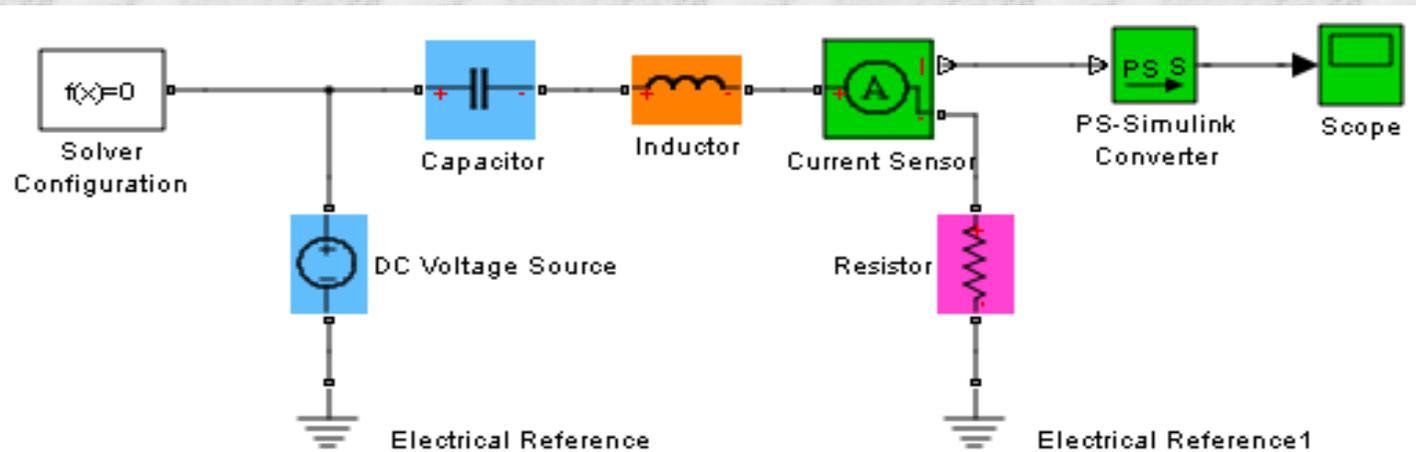
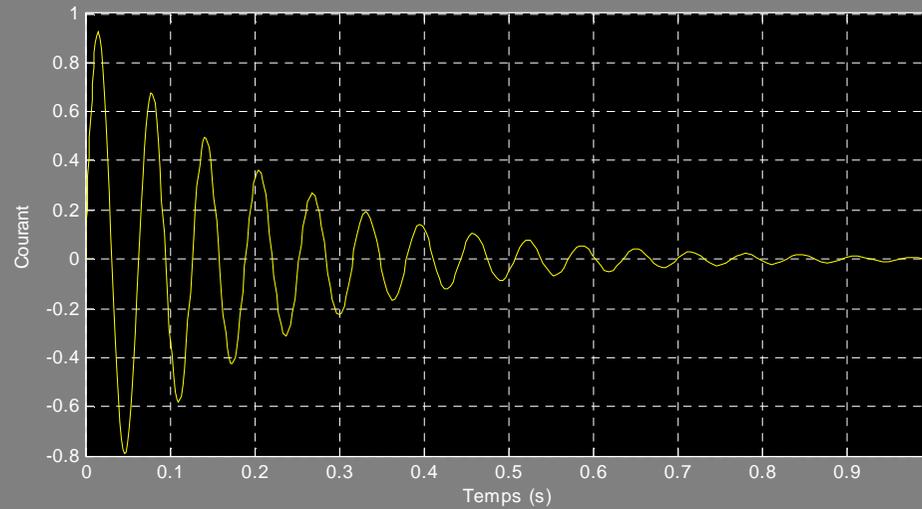


Variable Resistor



Gyrator

# Exemple: Une branche électrique



# Equations d'état des systèmes linéaires

## Équations d'état

A partir d'un modèle Simscape, il est possible de déduire les équations d'état du système

Les variables d'état sont les variables d'énergie associées aux éléments I et C

Vecteur d'état  $x = \begin{bmatrix} [p_I] \\ [q_C] \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{x} = \begin{bmatrix} [e_I] \\ [f_C] \end{bmatrix}$

System= linearize('nom du fichier',IO)

IO (conditions initiales)

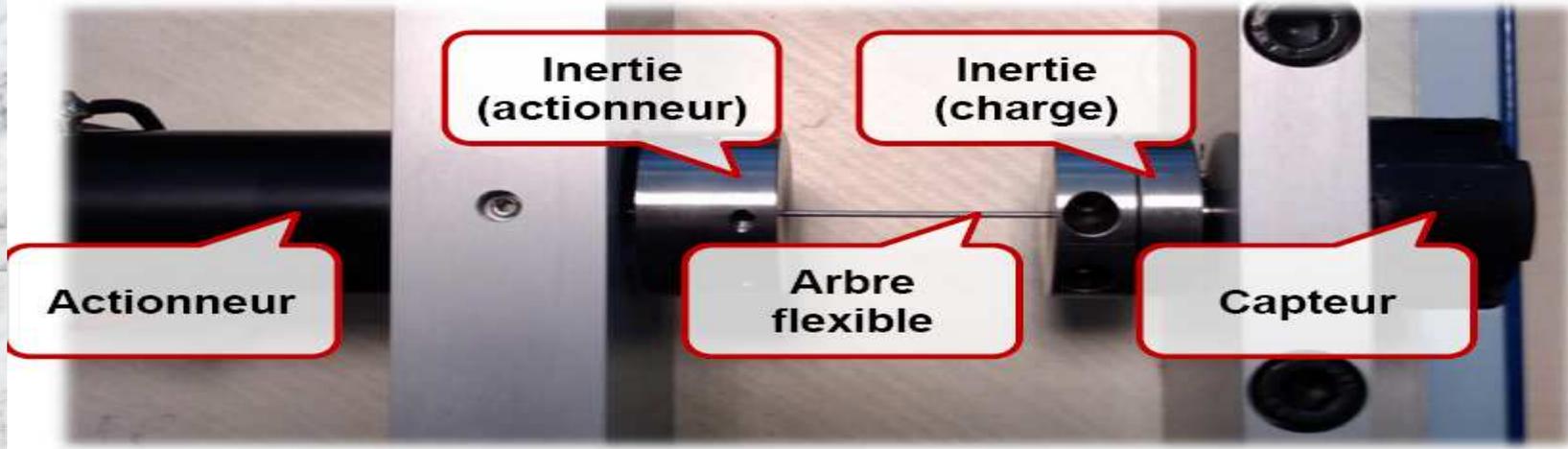
Les systèmes linéaires peuvent se décrire sous forme de quatre matrices:

**[A]** la matrice de transition

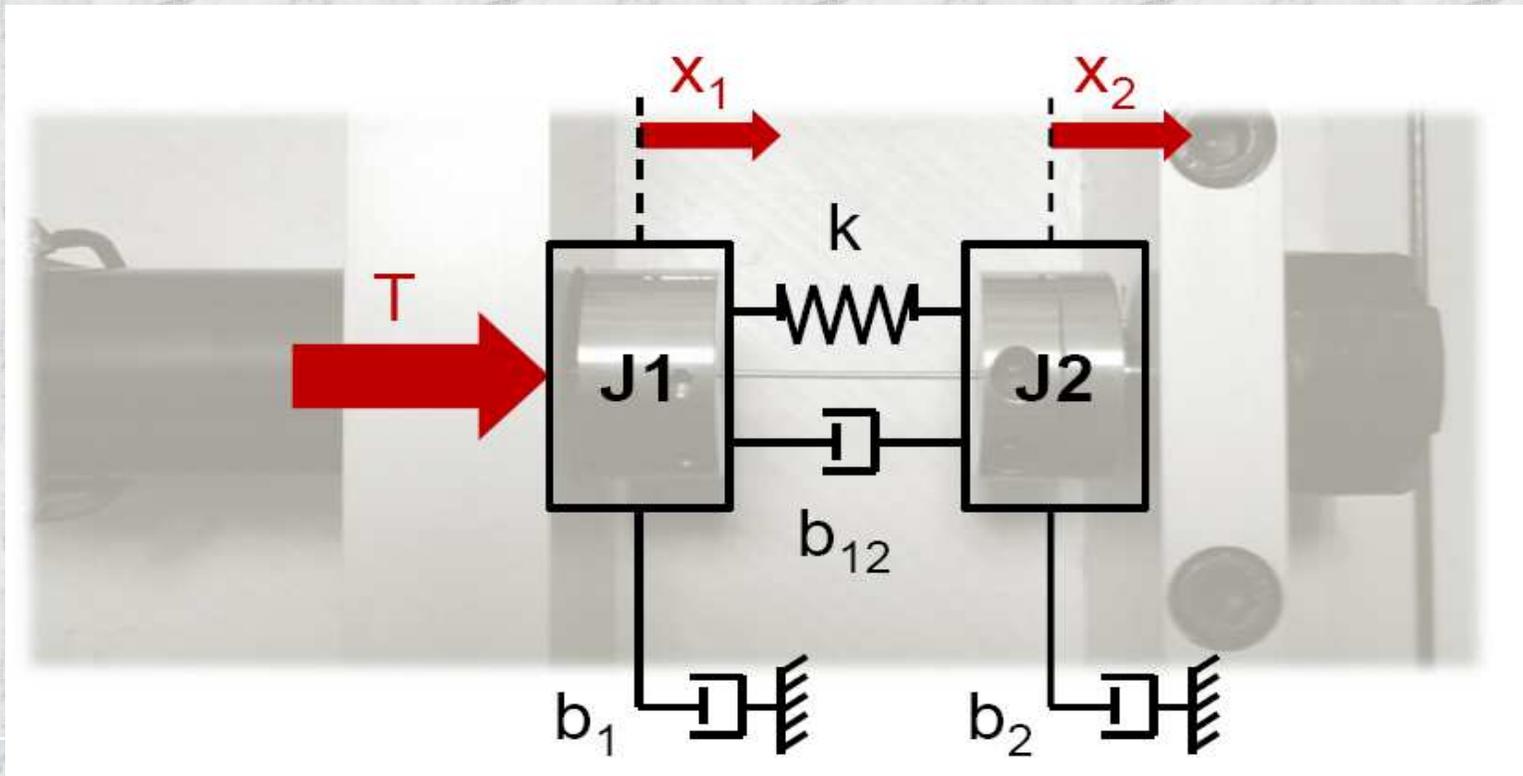
**[B]** la matrice de commande

**[C]** la matrice d'observation

**[D]** la matrice d'action directe (feedforward)

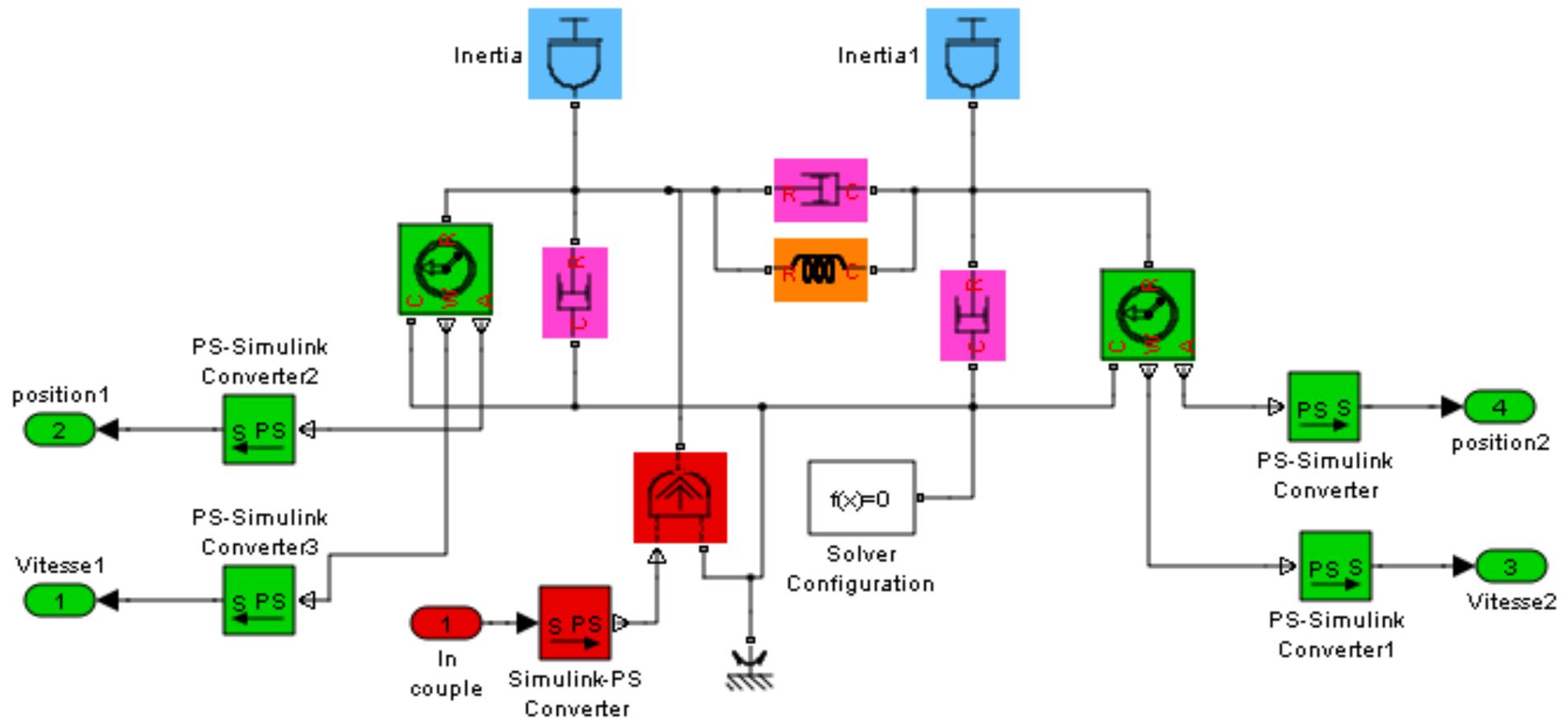


Modélisation physique



# Exemple: Transmission flexible

Meca\_0



# Mise en équation: Equations d'état système linéaire

PFD sur la partie 1 de l'arbre de transmission

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \Gamma_s - \Gamma_t - f_1 \omega_1$$

PFD sur la partie 2 de l'arbre de transmission

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \Gamma_t - f_2 \omega_2$$

PFD sur l'arbre de transmission

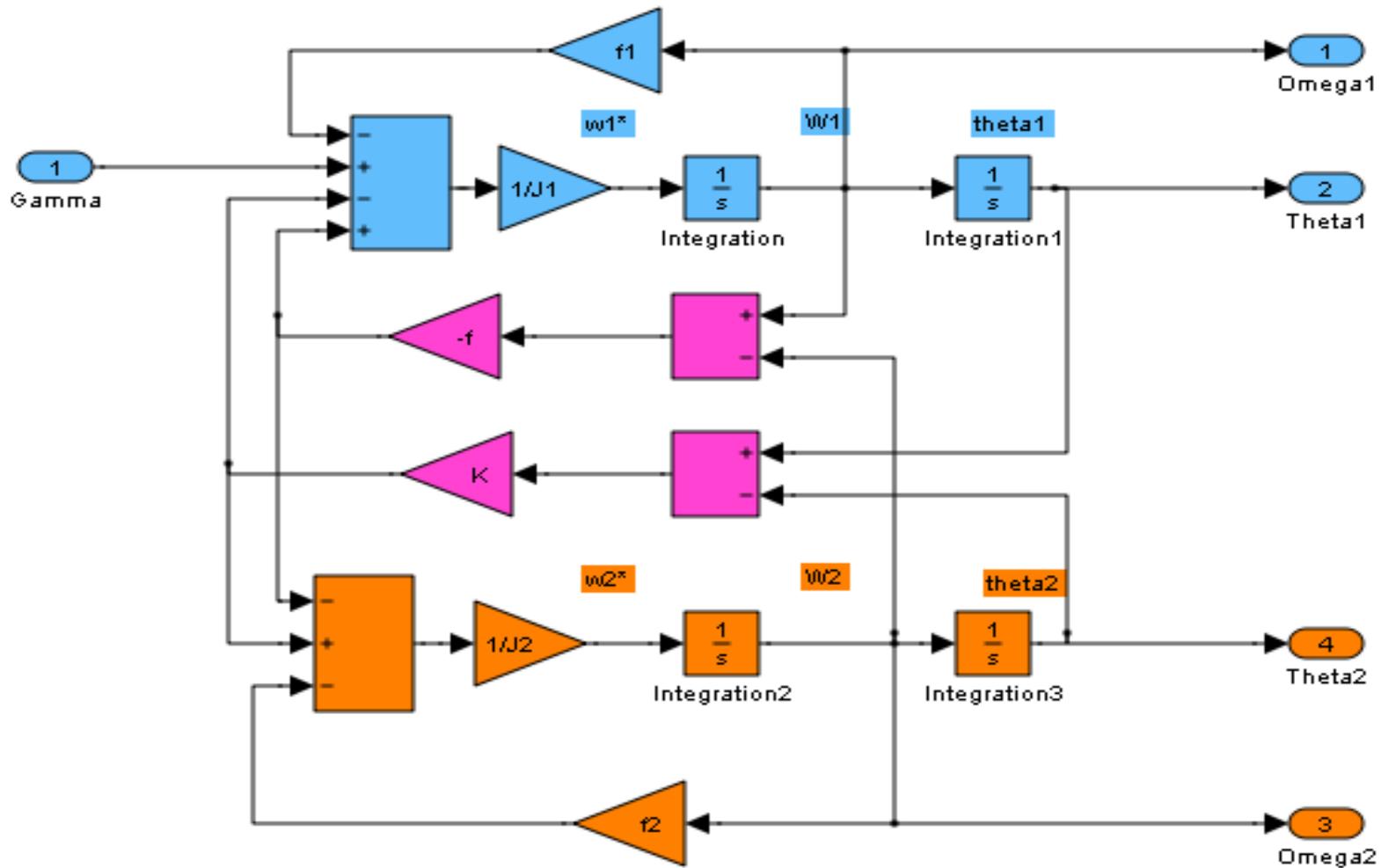
$$\Gamma_t = K(\theta_1 - \theta_2) + f(\omega_1 - \omega_2)$$

# Mise en équation: Equations d'état système linéaire

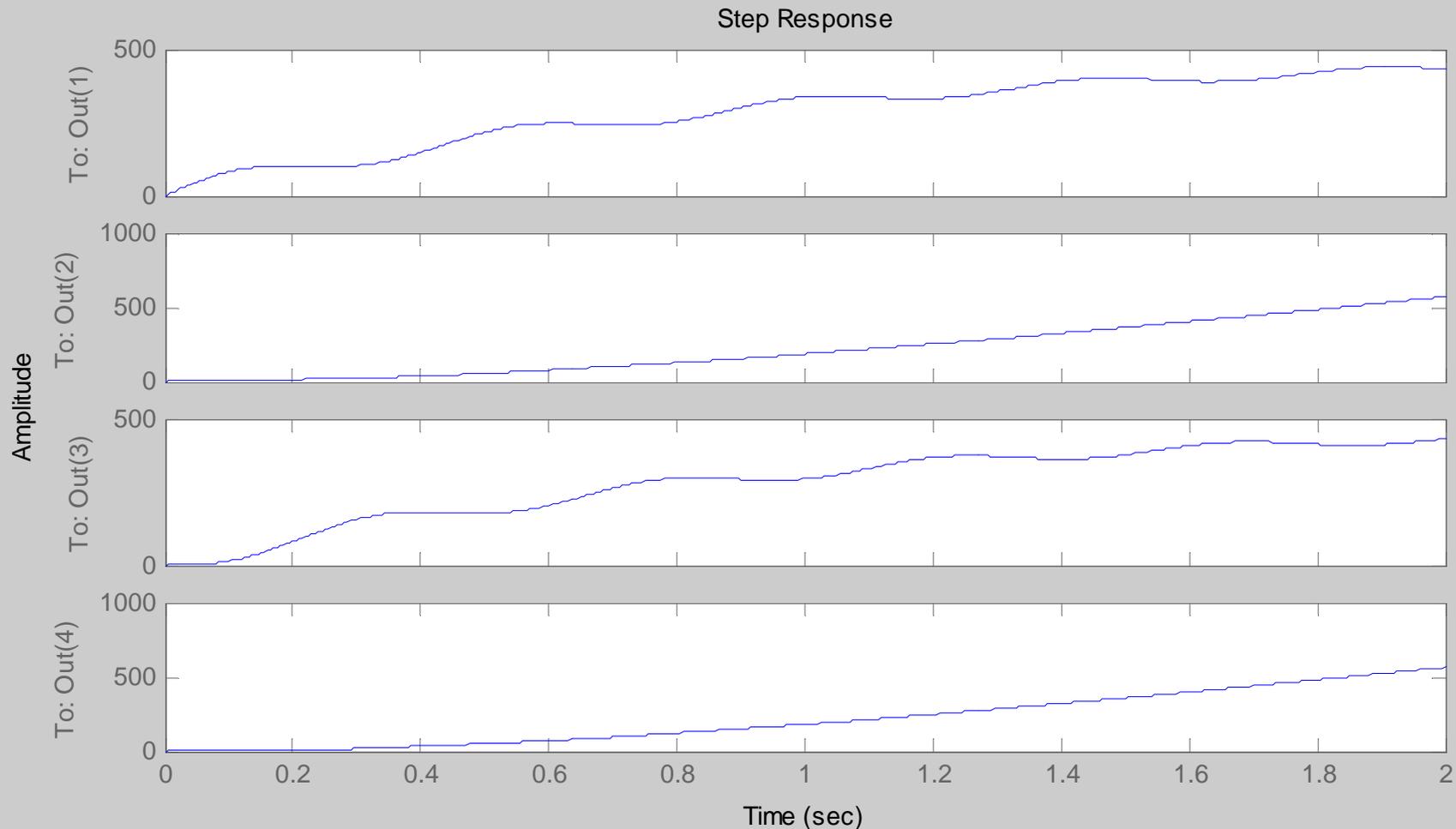
En posant :  $x_1 = \theta_1; \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt} = \omega_1; \quad x_3 = \theta_2; \quad x_4 = \frac{dx_2}{dt} = \omega_2$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-K}{J_1} & -\frac{(f_1 + f)}{J_1} & \frac{K}{J_1} & \frac{f}{J_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K}{J_2} & \frac{f}{J_2} & \frac{-K}{J_2} & -\frac{(f_2 + f)}{J_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Gamma_s$$

# Mise en équation: Equations d'état système linéaire (meca\_1)

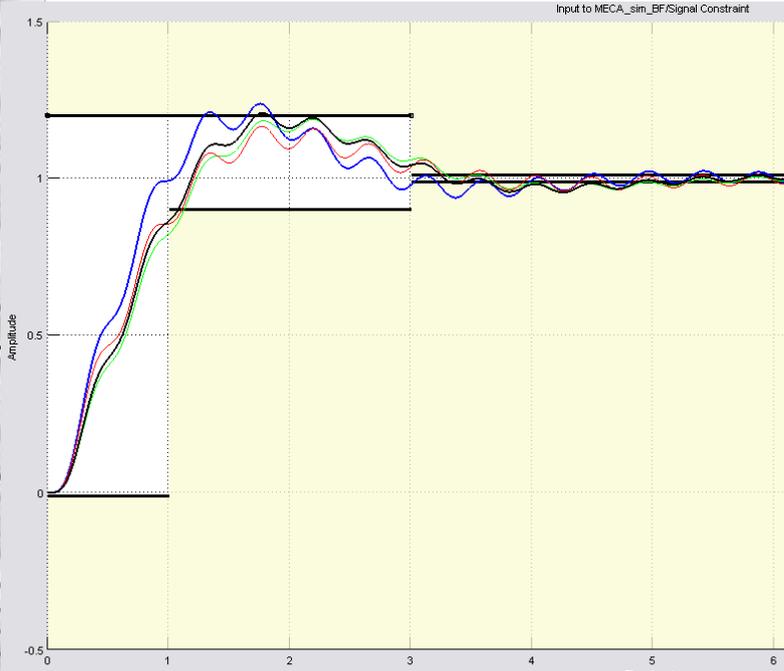
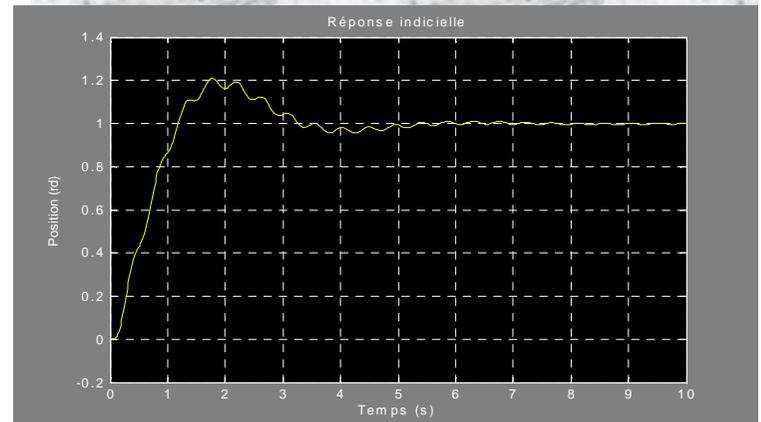
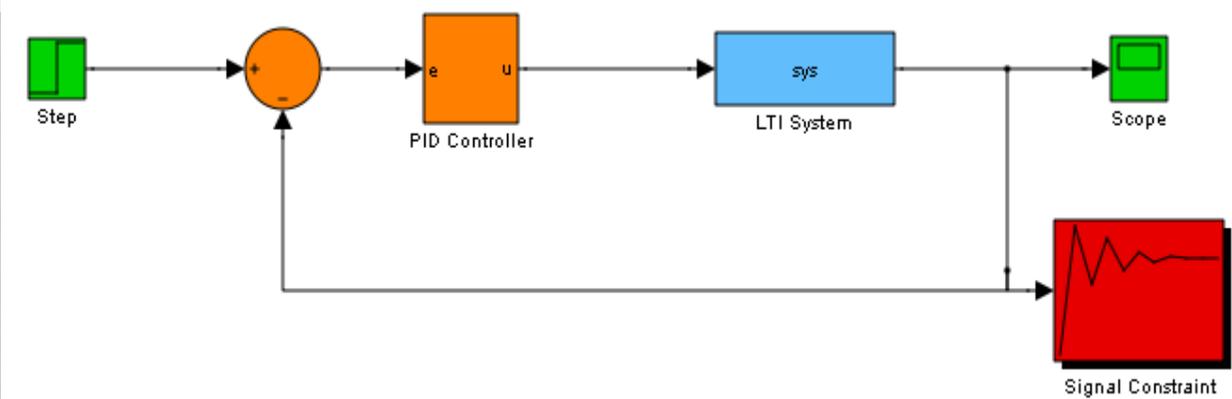


# Simulation: Equations d'état système linéaire



# transmission flexible: réglage PID

## asservissement en position meca\_sim\_BF



Iter	S-count	f(x)	max constraint	Step-size	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	1	0	0.3315				
1	15	0	0.2092	0.00198	0	0.0115	
2	24	0	0.1955	0.000505		0.0066	Hessian mod
3	32	-4.13752e-020	0.1991	0.000497	-8.33e-017		1 Hessian mc

Could not find a solution that satisfies all constraints.  
Relax the constraints or increase the constraint tolerance to find a feasible solution.

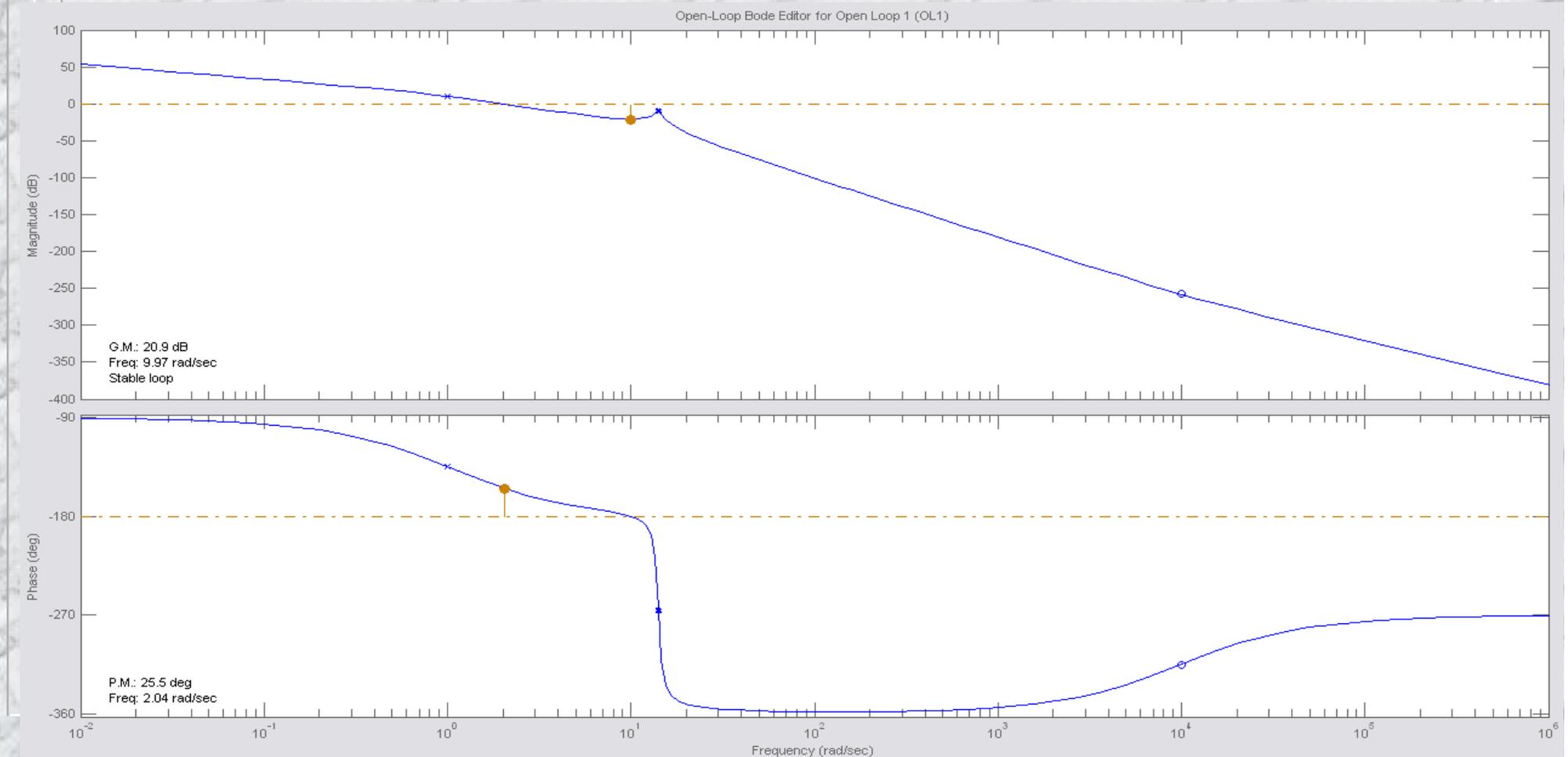
Kd = 0.0012

Ki = -1.7751e-005

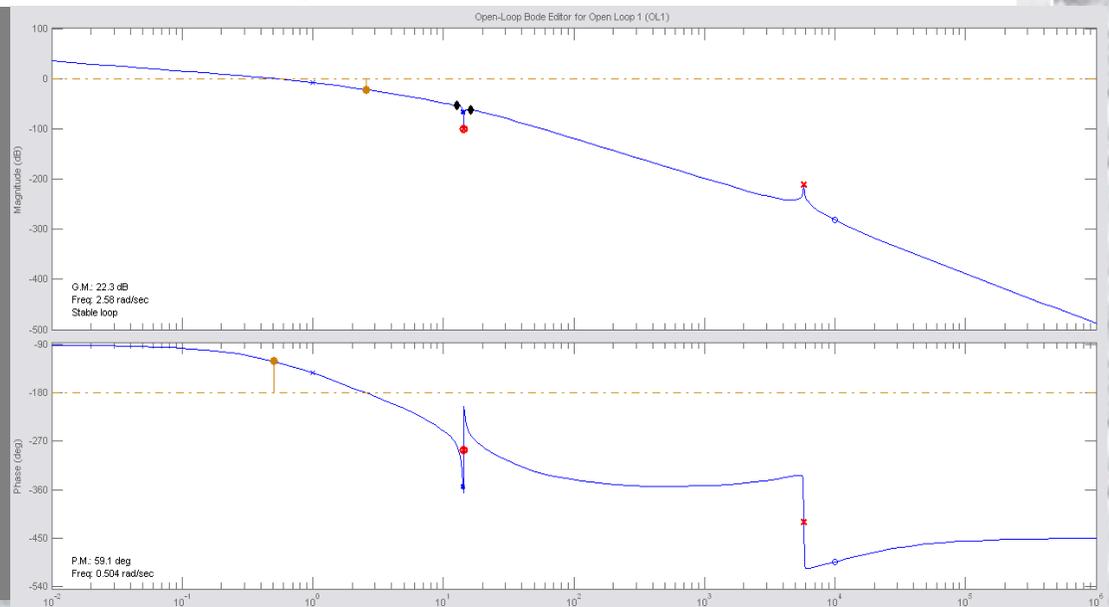
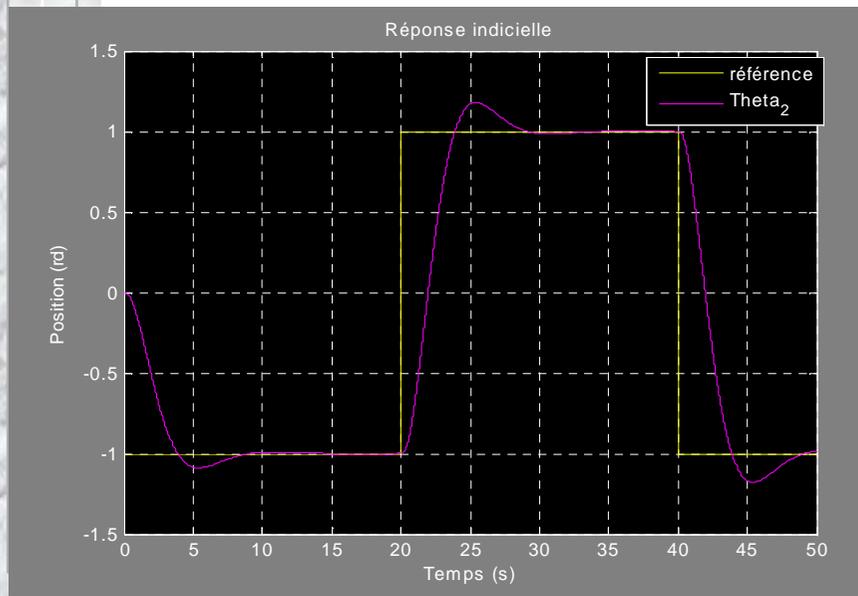
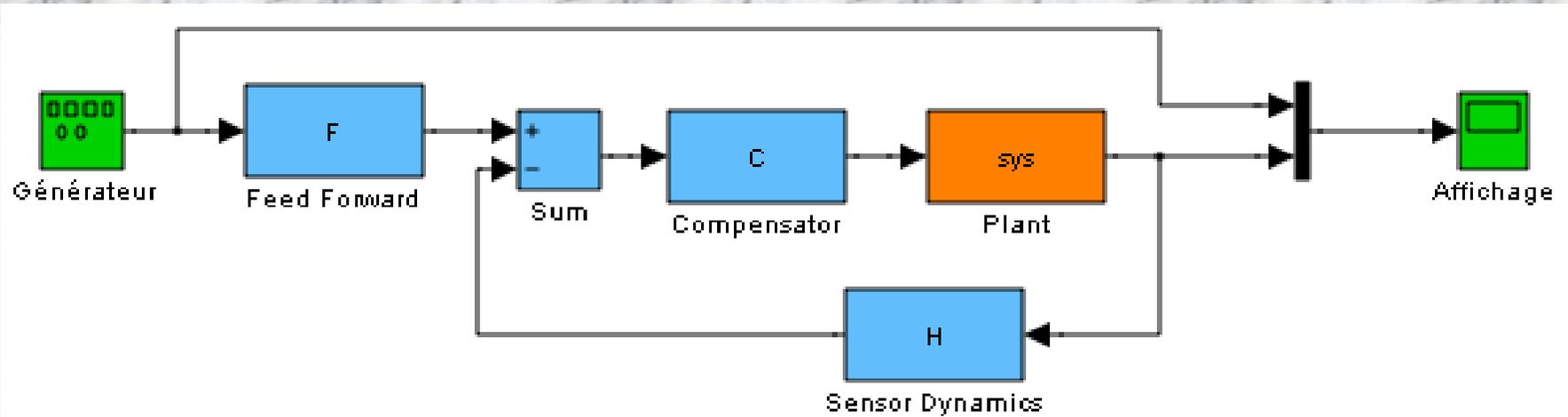
Kp = 0.0052

# Asservissement avancé: approche fréquentielle

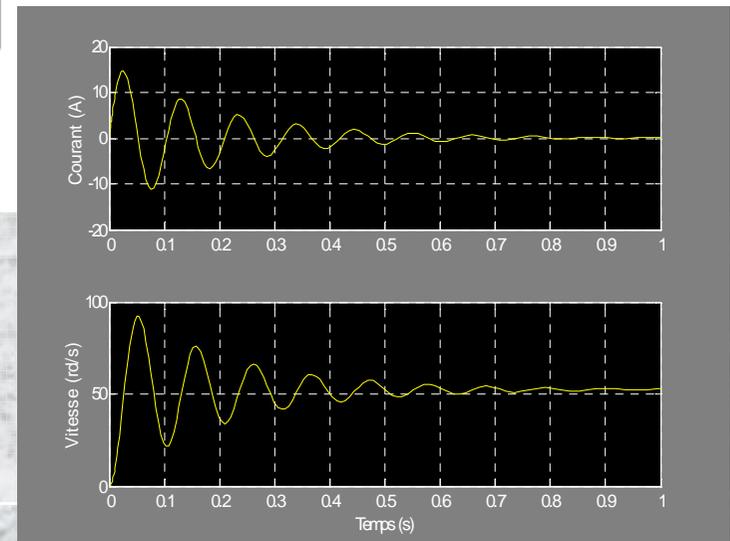
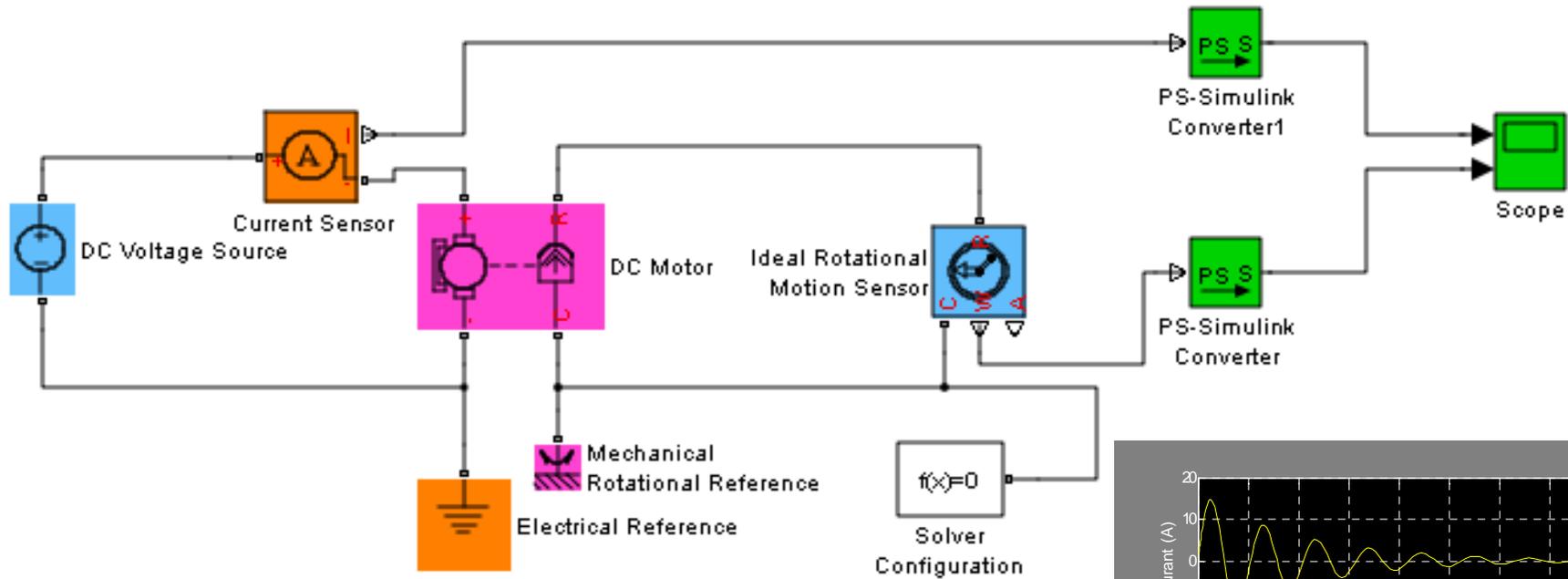
Diagramme de Bode en Boucle ouverte



# Asservissement avancé: réglage fréquentiel

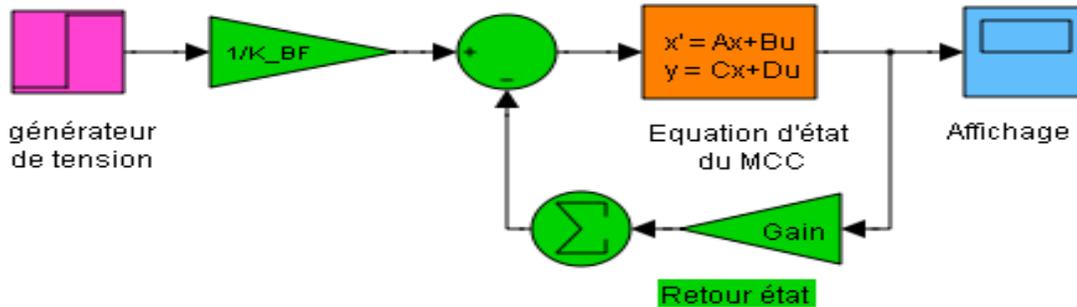


# Exemple: Le moteur CC



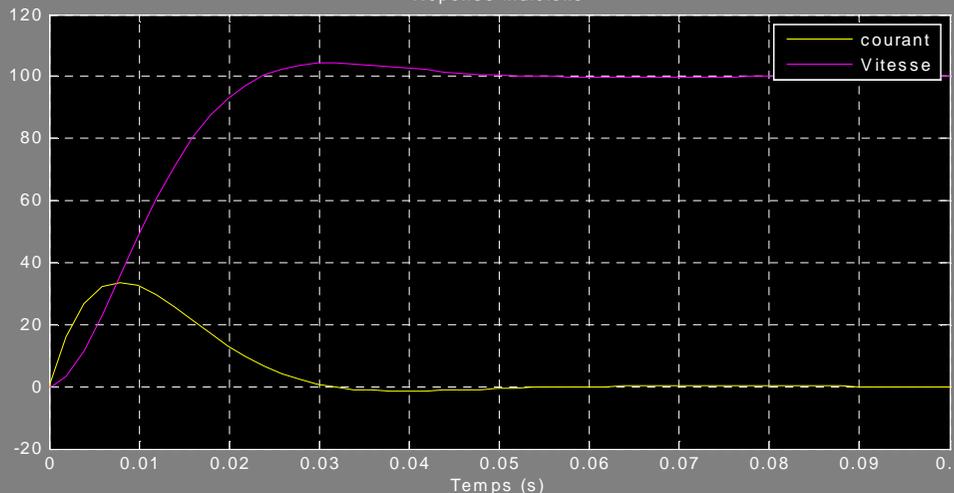
# Le moteur CC: réglage par retour d'état

Simulation de MCC à partir de l'équation d'état



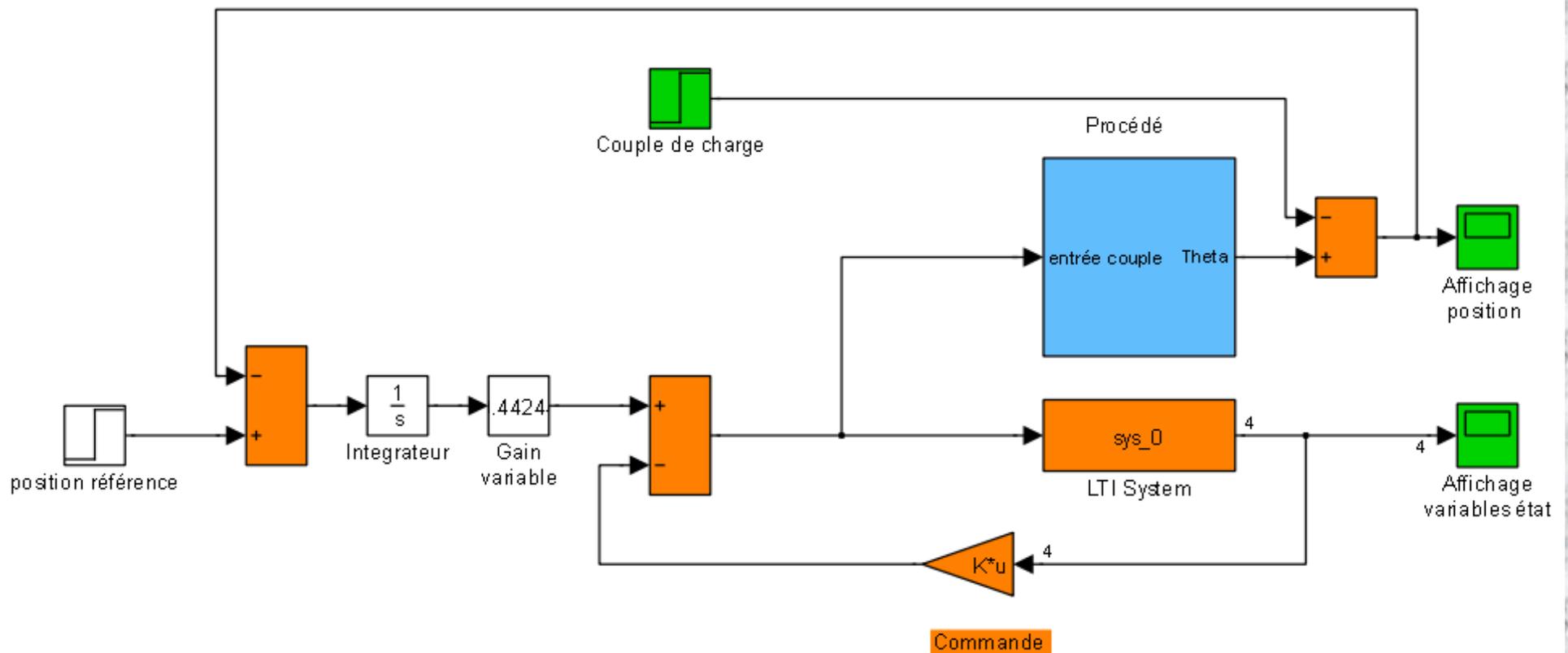
```
% pôles en boucle fermée  
pole=100*[-1+i;-1-i];  
% Calcul du gain de retour  
d'état%  
Gain=place(A,B,pole);  
% matrice de transition en boucle  
fermée%  
A_BF=A-B*Gain;  
% calcul d'un gain unitaire%  
K_BF=[0,1]*inv(B*Gain-A)*B;
```

Réponse indicielle

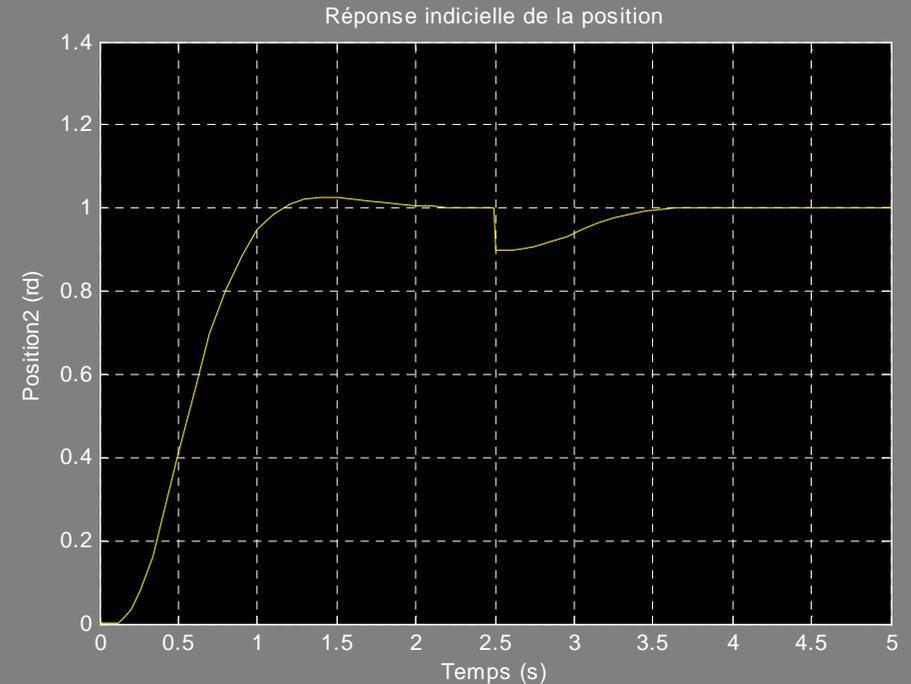
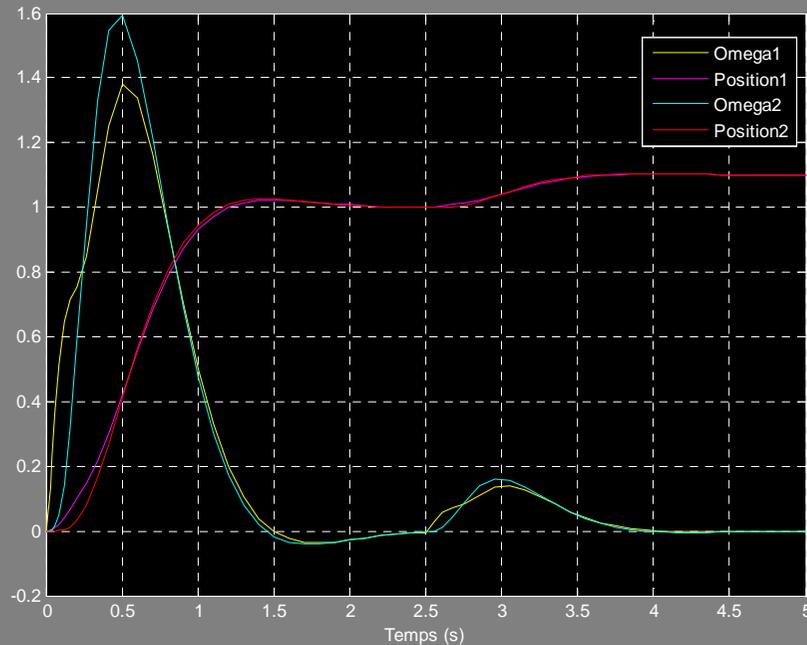


# La transmission flexible: réglage par retour d'état et observateur

## Commande avancée



# Le moteur CC: réglage par retour d'état et observateur



Le réglage est réalisé à partir d'une technique de placement de pôles, les grandeurs physiques nécessaires aux réglages sont reconstituées par le système linéaire. Les perturbations sont exercées directement sur le système réel et sont prises en compte par la commande. La commande doit être réalisée à pas fixe pour être implantée sur une commande « temps réel ».