

**HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES**

**Approches fondées sur des modèles  
énergétiques pour l'analyse formelle  
et la commande des systèmes non  
linéaires hybrides**

présentée par Pierre-Yves RICHARD



03 octobre 2008

## Partie 1 : Parcours, activités professionnelles

1. Parcours
2. Activités d'enseignement
3. Activités de recherche
4. Activités d'intérêt général

## Partie 2 : Bilan thématique des activités de recherche

1. Synthèse de modèles énergétiques de systèmes complexes
2. Analyse formelle des modèles bond graphs
3. Commande des systèmes à commutations
4. Perspectives – Nouvelles orientations

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

## Partie 1

### Parcours, activités professionnelles

- **Diplôme d'ingénieur SUPELEC** (juin 1992)
- **Service national dans l'enseignement militaire supérieur** (août 1992 à juillet 1993)
  - Cours magistraux (optique, électronique) aux officiers élèves de l'ESAT
- **Suppléances dans l'enseignement secondaire** (septembre à décembre 1993)
  - Cours de mathématiques au niveau collège (5<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>)
- **CDD d'ingénieur-enseignant à SUPELEC** (service Automatique, janvier à octobre 1994)
  - Recherche partenariale avec PSA sur les suspensions de moteurs, préambule à la thèse
- **Thèse CIFRE dans le groupe PSA Peugeot-Citroën** (novembre 1994 à octobre 1997)
  - Titre : Application des bond graphs au calcul du modèle dynamique et au pilotage des supports de moteur hydro-élastiques
  - **Doctorat de l'Université de Rennes 1** en septembre 1997

- **Poste d'enseignant-chercheur permanent à SUPELEC (décembre 1997)**
  - Professeur assistant (décembre 1997 à décembre 2003)
  - Professeur adjoint (depuis janvier 2004)
  - Membre depuis 1998 de l'équipe de recherche ASCH (Automatique des Systèmes Continus et Hybrides), devenue en 2001 l'**équipe ASH** (Automatique des Systèmes Hybrides, EA 3572), puis intégrée en 2004 à l'**IETR** (Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes, UMR CNRS 6164) comme composante du groupe « Automatique et Communication »

### Enseignement de tronc commun

#### Cours magistral

- Commande des entraînements électriques à vitesse variable (2<sup>ème</sup> année)
  - Filière classique, campus de Rennes (depuis 2004, création)
  - Filière par apprentissage, campus de Gif (à partir de 2009)

#### Travaux dirigés

- Statistiques pour l'ingénieur (1<sup>ère</sup> année, depuis 1998)
- Électronique analogique (1<sup>ère</sup> année, depuis 1998)
- Analyse numérique et optimisation (2<sup>ème</sup> année, depuis 2003)
- Représentation aléatoire des signaux (2<sup>ème</sup> année, depuis 2005)
- Commande des entraînements à vitesse variable (2<sup>ème</sup> année, depuis 2003)

#### Études de laboratoire

- Électrotechnique et électronique de puissance (1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> années)
- Automatique (2<sup>ème</sup> année)
- Commande des entraînements à vitesse variable (2<sup>ème</sup> année)

#### Projets

- Pilotage automatique d'une grue
- Poursuite de cible mobile par caméra
- Émulation de décodeur sous SIMULINK pour la mesure de position
- ...

#### Bilan (en heures vraies)

- **CM : 18h/an**
- **TD : 30 h/an**
- **TL : 81 h/an**
- **+ projets**

### Enseignement de spécialisation (3<sup>ème</sup> année)

#### Cours magistral

- Analyse et commande des systèmes non linéaires (depuis 2000, reprise)

#### Travaux dirigés

- Systèmes non linéaires (option ISA, Rennes, depuis 2000)
- Modélisation (option ACS, Gif, depuis 2006)

#### Études de laboratoire

- Commande multivariable
- Asservissements à relais
- Régulation et conduite numériques

#### Études (internes ou industrielles)

- Commande sécurisée de pont roulant
- Automatisation d'une extrudeuse
- Commande de moteur pas à pas
- ...

#### Bilan (en heures vraies)

- **CM : 12h/an**
- **TD : 7,5 h/an**
- **TL : 45 h/an**
- **+ études (≈ 30h/an)**

### Équipe

Automatique des Systèmes Hybrides de SUPELEC  
(groupe Automatique & Communication de l'IETR, UMR CNRS 6164)

### Responsable actuel

Hervé GUEGUEN

**Approches fondées sur des modèles énergétiques pour l'analyse formelle et la commande des systèmes non linéaires hybrides**

### Production scientifique

- 1 chapitre d'ouvrage
- 10 publications dans des revues internationales avec comité de lecture + 1 en cours d'évaluation.
- 2 publications dans des revues nationales avec comité de lecture
- 1 dépôt de brevet + 2<sup>nd</sup> imminent
- 1 dépôt de logiciel
- 27 communications dans des congrès internationaux avec comité de lecture et actes
- 4 communications dans des conférences nationales

### Encadrement

#### 3 co-encadrements de thèses :

##### **Cécile Morvan**

Titre : Analyse et Commande des Systèmes Physiques à Commutations en Electronique de Puissance

Soutenue en septembre 2004

##### **Virginie Le Rolle**

Titre : Modélisation multiformalisme du système cardiovasculaire associant bond graph, équations différentielles et modèles discrets

Soutenue en décembre 2006

##### **Frédéric Mangonneaux (CIFRE PSA)**

Titre : Architecture d'actionnement et de commande générique d'un ensemble d'ouvrants pilotés pour l'automobile garantissant la sécurité des usagers

Commencée en décembre 2006

#### Domaines d'application



**Electronique de puissance**

**Physiologie intégrative**

**Mécatronique**

## Encadrement

2 encadrements de stages de master :

### **Abdelkarim Kartit**

Titre : Commande par mode glissant de systèmes à commutations

Mars à juillet 2004

### **Mihai Morarescu**

Titre : Une approche hybride pour la modélisation de phénomènes mécaniques non linéaires

Mars à juillet 2007

Domaines d'application



**Electronique de puissance**

**Mécatronique**

**Systèmes physiques à commutations**



**Problématique commune**

### Recherche partenariale

- 10 coopérations industrielles entre 1998 et 2008
- 2 formes contractuelles :
  - Conventions d'étude industrielle
  - Contrats bilatéraux
- Partenaires multiples :
  - PSA
  - Sagem
  - Michelin
  - Schneider Electric
  - Sogitec
  - Sercel
  - CF Gomma
- Sujets très divers (modélisation, commande)

#### **Activités nationales et internationales, animation**

- Collaboration avec le LAPS (Bordeaux) en 2000, dans le cadre de la thèse de Caroline Ramus-Serment : travaux en isolation vibratoire
- Contribution à des travaux dans le cadre du Réseau Européen d'excellence HyCon
  - WP4a on Energy Management : commande d'un convertisseur multiniveaux en 2006
  - WP4c on Automotive Control : commande d'un entraînement mécanique avec jeu en 2007 (en lien avec l'ETH Zürich)
- Participation au Comité d'organisation de la conférence ADHS 2003 (Saint-Malo) parrainée par l'IFAC.
- Participation à l'AS 192 en 2003-2004 : Systèmes Dynamiques Hybrides et Convertisseurs Statiques.
- Participation à un jury de thèse (Virginie Le Rolle, 2006)
- Expertise d'articles de revues et conférences internationales (JFI, RIGE, IFAC, CIFA)

### Représentation du personnel

- Secrétaire du Comité d'Établissement du campus de Rennes de SUPELEC d'avril 2001 à avril 2007 (représentant du campus au Comité de Direction de l'École et aux réunions de négociations annuelles obligatoires).
- Secrétaire de la Commission chargée de suivre le contrat de Prévoyance pour l'ensemble de SUPELEC de 2002 à 2007.

### Fonctionnement de l'école

- Participation annuelle aux jurys de passage
- Participation aux jurys d'admission sur titres
- Participation à l'encadrement des épreuves du concours Centrale-Supélec

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

## Partie 2

### Bilan des activités de recherche

-

**Approches fondées sur des modèles  
énergétiques pour l'analyse formelle  
et la commande des systèmes non  
linéaires hybrides**

## 2 grands domaines d'applications très différents :

- Mécatronique (domaine de l'ingénierie, interdisciplinaire)
- Physiologie cardiovasculaire (domaine du vivant)

➔ hétérogénéité des phénomènes

## 2 problématiques principales de portée générale :

- couplage entre phénomènes à localisation discrète et à répartition continue (hybridisme spatial)
- couplage entre dynamiques à événements discrets et à évolution continue (hybridisme temporel)

## 2 problématiques secondaires plus spécifiques :

- Systèmes mécaniques articulés
- Singularités dans les modèles de circuits électriques

## Un cadre méthodologique unificateur : **le Bond graph**

- Au 1<sup>er</sup> degré : formalisme de représentation d'équations différentielles
  - Graphique
  - Modulaire
  - Physiquement intelligible
  - Commun à tous les domaines de la physique
- Au-delà : une philosophie, un mode de structuration du raisonnement
  - Basé sur le concept interdisciplinaire d'énergie
  - Permettant d'exploiter les analogies entre domaines physiques

Angle d'attaque de la 1<sup>ère</sup> problématique générale : **modélisation en bond graph de milieux continus déformables** (linéaires ou non), avec couplage fluide/structure

- Application au corps en caoutchouc de supports de moteurs (travail de thèse)
- Application au muscle cardiaque (*thèse de V. Le Rolle*)

Principale difficulté sous-jacente

- Passage EDP  $\rightarrow$  EDO

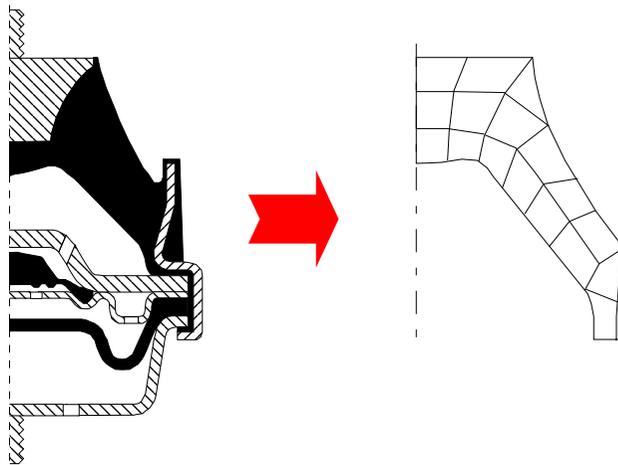
Bref état de l'art des méthodologies préexistantes

- Méthode modale (*Margolis*)  $\rightarrow$  réservée aux cas linéaires
- Méthode des différences finies (*Granda*)  $\rightarrow$  démarche complexe en dimension  $>1$
- Méthode des éléments finis (*Pelegay, Buil*)  $\rightarrow$  grande généralité et facilité d'extension aux cas multidimensionnels

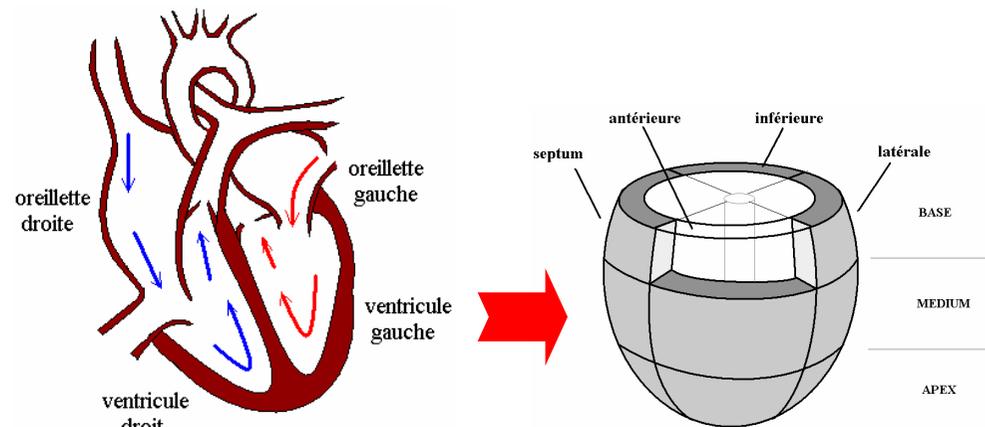
point de départ de  
l'approche retenue

## Principe de la démarche

- a) Partitionnement du continuum : discrétisation spatiale (maillage)
- assez grossier (maîtrise de la taille du modèle BG final)
  - physiquement significatif (interprétation des éléments)



suspension hydro-élastique



myocarde

## Principe de la démarche (méthode générale)

- b) Interpolation nodale du champ des déplacements dans chaque élément de découpage
- c) Substitution dans les lois locales du comportement
- d) Calcul des énergies potentielle (déformation) et cinétique de chaque élément en fonction de ses déplacements nodaux par intégration volumique de leurs densités locales

$$U^e = \frac{1}{2} q^T K^e q$$

matrice de raideur

$$T^e = \frac{1}{2} \dot{q}^T M^e \dot{q}$$

matrice d'inertie

- e) Équations de Lagrange (+ introduction empirique éventuelle d'amortissement)

$$M^e \ddot{q} + C^e \dot{q} + K^e q = F^e$$



Problème discret aux nœuds du maillage

expressions dans le cas linéaire

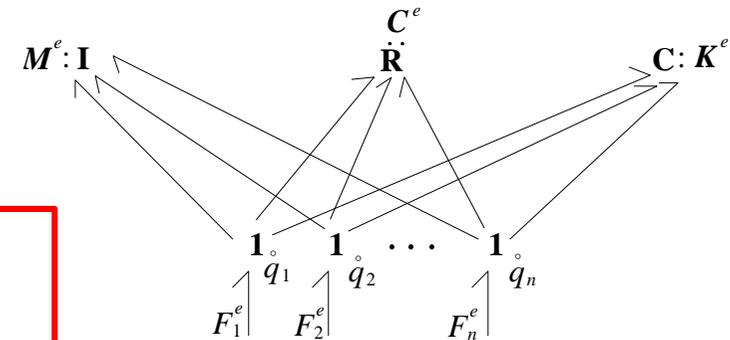
logiciel MEF

## Principe de la démarche (méthode générale)

f) Interprétation en BG au niveau élémentaire

g) Développement optionnel des champs I, R, C par diagonalisation des matrices associées

- ➔ • Modèle élémentaire avec éléments terminaux I, R, C standards à port de puissance unique + transformateurs
- Perte de généralité



$$M^e \ddot{q} + C^e \dot{q} + K^e q = F^e$$

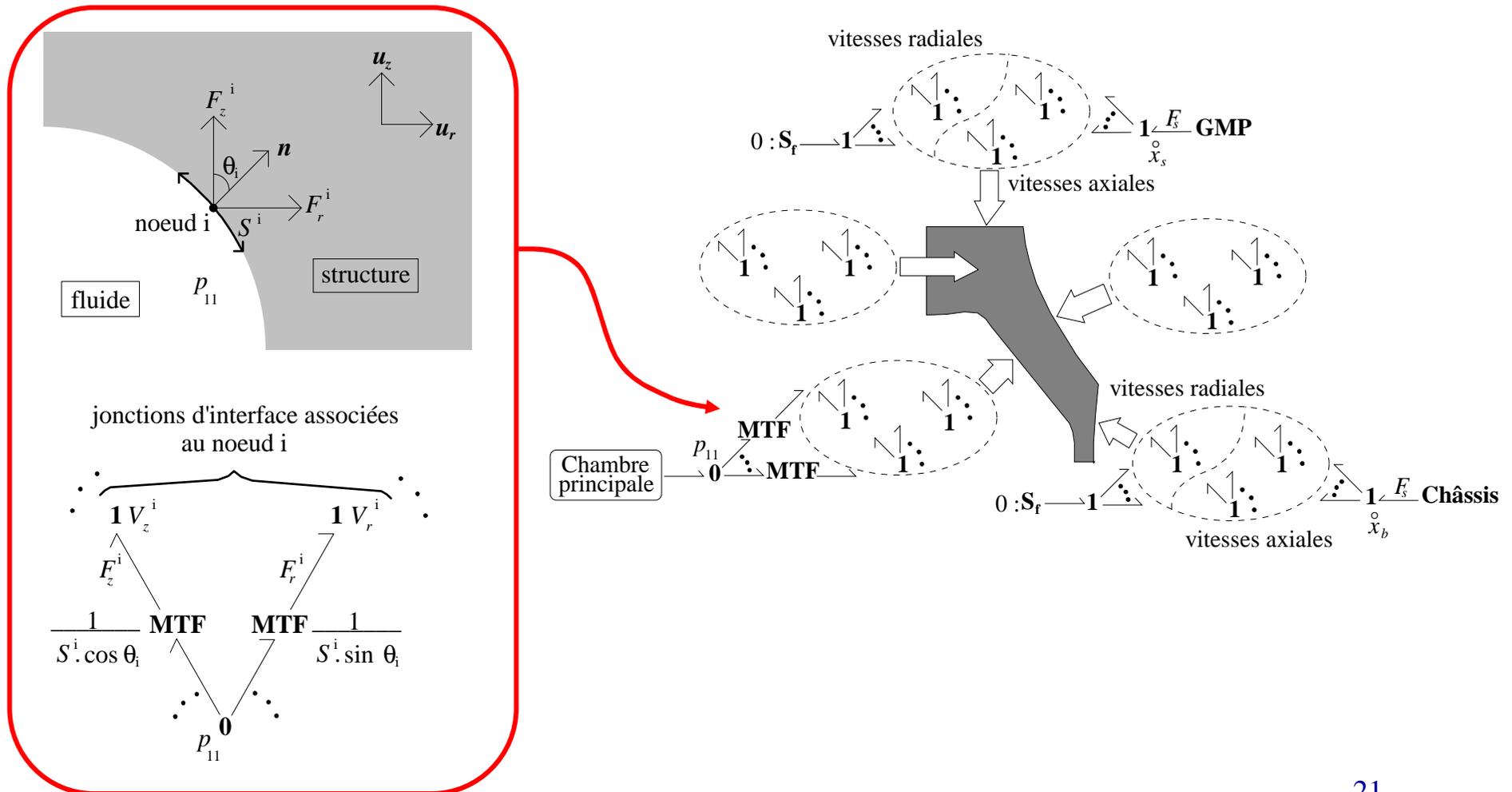
Cf Pelegay, Doblare, Buil

h) Assemblage par « jonctions d'interface » + transformateurs (dans le cas de modèles élémentaires en coordonnées locales)

- ➔ jonctions de type 1 surnuméraires représentant chaque composante de vitesse nodale dans la structure de manière unique en coordonnées globales

i) Attribution de sources BG aux jonctions d'interface associées aux noeuds contraints (conditions aux limites et sollicitations externes)

## Illustration sur le corps de suspension hydro-élastique



couplage fluide/structure

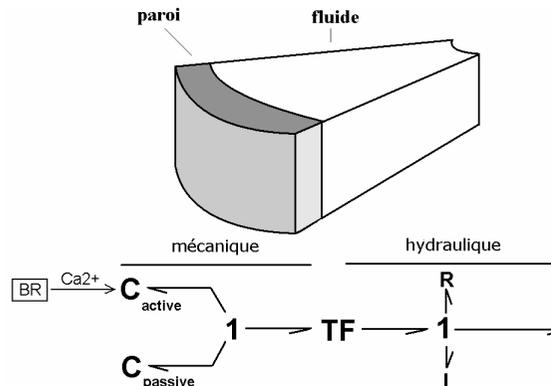
## Principe de la démarche (variante simplifiée)

hypothèses :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{loi d'élasticité non linéaire (hyperélasticité)} \\ \text{déformations exclusivement radiales, effets inertiels négligés} \end{array} \right.$

- b) Expression locale du tenseur des contraintes en fonction de l'élongation moyenne de chaque élément
- c) Intégration surfacique de la contrainte radiale pour obtenir la pression externe en fonction de l'élongation moyenne de chaque élément ( $\rightarrow$  relation capacitive)

- $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Problème discret aux centres de gravité des mailles} \\ \quad \text{(1 déplacement/élément, taille du modèle réduite)} \\ \bullet \text{ Continuité géométrique de la structure non garantie} \\ \quad \text{à l'état déformé} \end{array} \right.$

- d) Interprétation en BG



Cas du ventricule gauche de cœur humain

### Bilan sur la modélisation BG de milieux continus

#### Avantages

- Méthodologie en grande partie générique
- Approche multidimensionnelle, utilisable en non linéaire
- Modélisation de comportements dynamiques à particularités locales
- Modèles aptes à une analyse par régions

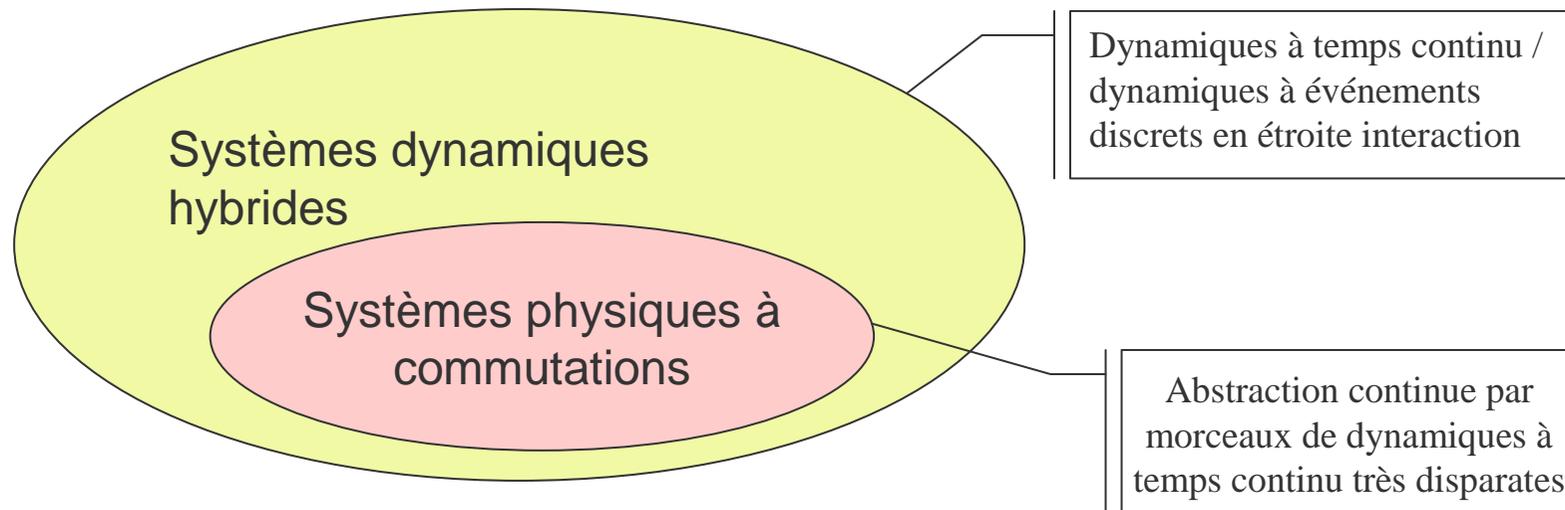
#### Limites

- Taille des modèles
- Faible aptitude à la commande
- Mise en œuvre assujettie à la disponibilité de logiciels de type MEF assez « ouverts »

➡ accès explicite aux matrices caractéristiques élémentaires

Angle d'attaque de la 2<sup>ème</sup> problématique générale : modélisation de systèmes physiques à commutations

- Application à l'électronique de puissance (convertisseurs statiques)
- Application à la mécanique (non linéarités dures)



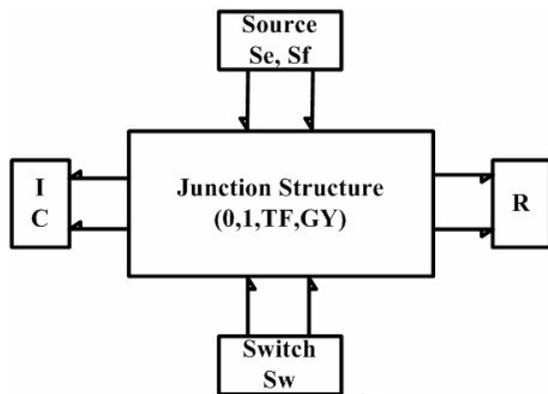
État de l'art succinct des approches méthodologiques adaptées au problème posé

- **LCP** (linear complementarity problem, *Heemels*)
  - ⇒ modèles implicites (solveurs spécifiques requis)
  - ⇒ aucune méthodologie de commande associée
- **Automates hybrides** (état discret  $\Leftrightarrow$  forme d'état continue, *Henzinger*)
  - ⇒ manque d'intelligibilité physique
  - ⇒ défaut de modularité (approche compositionnelle de la modélisation peu envisageable...)
- **Bond Graph standard** (*G. Dauphin-Tanguy*)
  - ➔ **représentation non idéale des commutations par résistances non linéaires et/ou transformateurs modulés**
  - ⇒ modèles à topologie invariante (mais à paramètres variables)
  - ⇒ risque de difficultés numériques (dispersion des constantes de temps, gradients élevés)

Approches  
hybrides

Alternative méthodologique proposée : **Bond Graph Hybride**

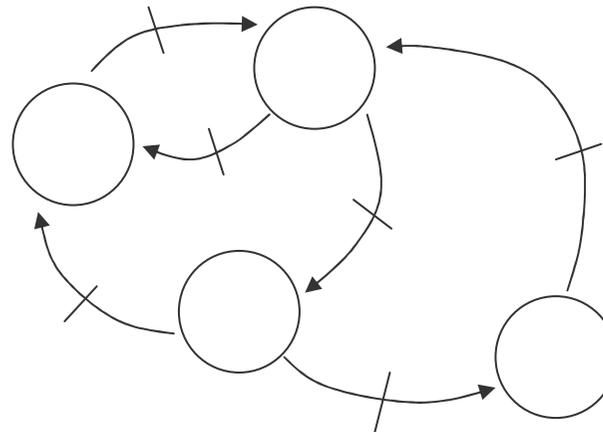
**Modèle Bond Graph à commutations**



interrupteurs idéaux

$n$  interrupteurs

**Automate d'état fini**



Modèle multiformalisme à topologie variable

**Gestion des commutations**

1 automate global à  $2^n$  états discrets

ou

$n$  automates à 2 états discrets

### Spécificité et intérêt du BG à commutations

- basé sur le concept d'**interrupteur idéal**
- structure de **représentation acausale unique** commune à toutes les dynamiques continues du système (différentiation via les  $\neq$  configurations causales)
- sous sa forme acausale, **agrégation directe** possible avec d'autres modèles bond graph dans une démarche de modélisation compositionnelle (par assemblage de sous-modèles établis séparément)

### Concept d'interrupteur idéal

- du point de vue énergétique : **élément dissipatif** (au moins aux instants de commutation)
- du point de vue causal : **comportement d'une source** (impose sa causalité en fonction de son état)
- **2 états** de fonctionnement :  $E$  (causalité source d'effort) et  $F$  (causalité source de flux)
- **commutations instantanées**  **transitoires rapides négligés**
- interprétation : abstraction d'un phénomène discontinu

Illustration : modélisation de non linéarités dures en mécanique (stage master *M. Morarescu*)

➔ Définition : phénomènes à **caractéristique non inversible**

Cas les plus courants :

- Frottement sec
- Jeu

Conséquences pratiques :

- Difficulté de modélisation
- Difficulté de commande

Multiplicité de modes, discontinuités,  
ordre potentiellement variable

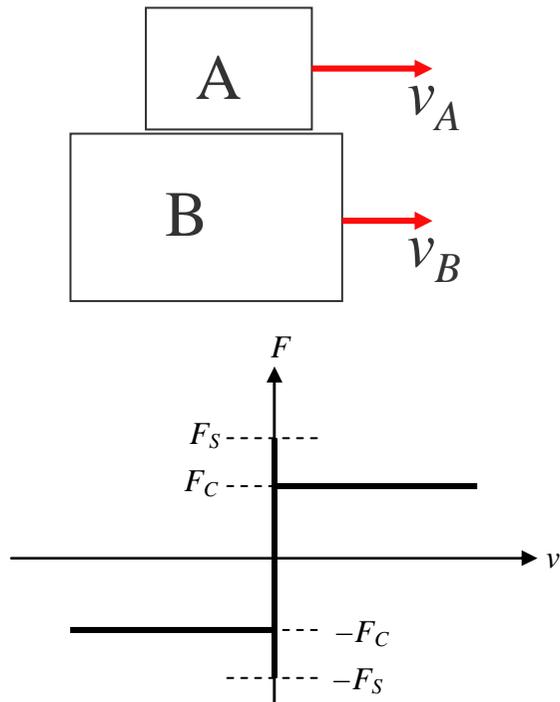
Non linéarités non compensables  
par inversion

Objectif : modèle de connaissance...

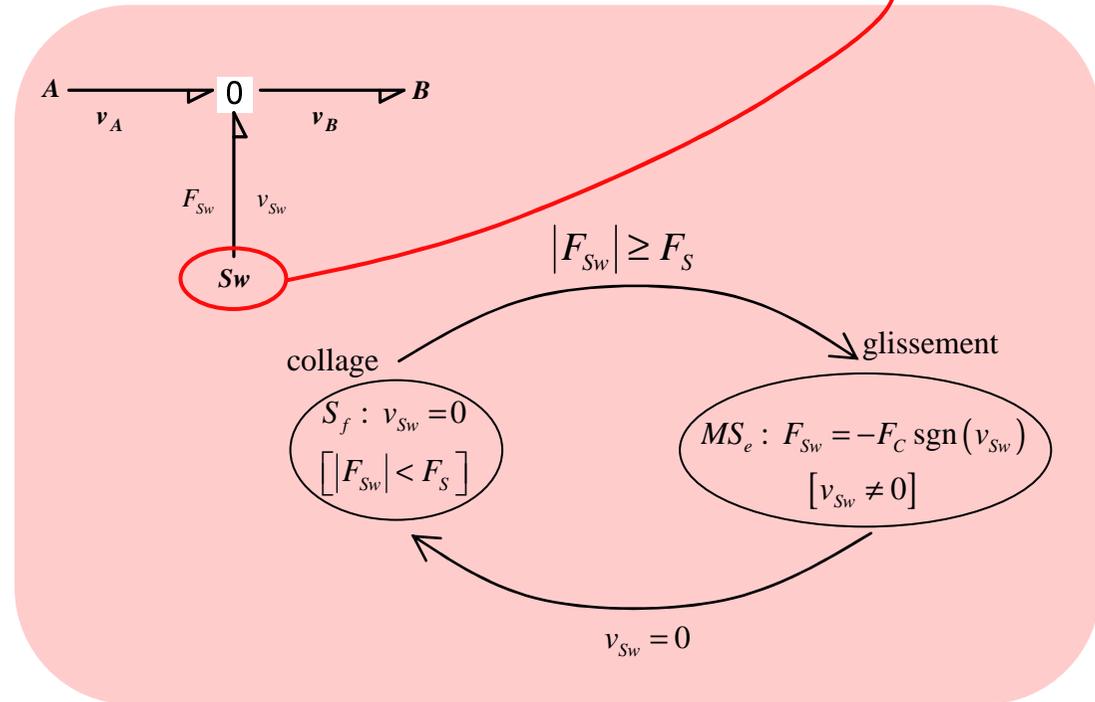
- conforme à l'abstraction discontinue de leur dynamique (caractère hybride, multimodalité)
- le plus élémentaire possible
- générique (réutilisable, approche compositionnelle)
- physiquement intelligible
- dans une double perspective simulation/commande

## Cas du frottement sec

Interrupteur idéal généralisé :  
dissipatif en mode de glissement



Modèle de Coulomb avec stiction



Modèle bond graph hybride

commutations autonomes !

Axe fondé sur une propriété intrinsèque fondamentale de l'approche Bond graph :

*Aptitude des modèles à l'analyse formelle*

➔ existence de procédures d'analyse systématiques,  
basées sur la notion centrale de **causalité opératoire**

Suite logique du premier axe centré sur la modélisation

Objectif : extension ou définition de nouvelles méthodologies **génériques** pour l'analyse formelle de modèles BG

2 enjeux distincts :

- Transformation de modèles
- Analyse de propriétés

*Vers d'autres formes de caractérisation dynamique :*

➤ Calcul de fonctions de transfert (analyse harmonique)

→ règle de Mason

➤ Calcul de formes d'état explicites (en présence de causalités dérivées)

→ dérivation des contraintes

- Comparaison de l'approche idéale sous-jacente à ces modèles avec l'approche semi-idéale (résistances variables) via les perturbations singulières

Principaux résultats établis :

- Dynamique idéale = solution lente de la dynamique non idéale au sens des perturbations singulières
- Convergence uniforme de la dynamique non idéale vers cette solution lente

- ➔
- Modèle idéal = approximation légitime du modèle non idéal (pris comme référence)
  - Complexité numérique moindre
  - Validation de l'approche idéale

### ➤ Détermination formelle de schémas de calcul pour la simulation...

- À partir de tout BG à commutations acausal (directement issu d'une démarche de construction compositionnelle)
- Moyennant le préalable d'une mise en équations implicite dans l'une des configurations causales (parmi les  $2^n$  possibles si  $n$  interrupteurs idéaux), choisie comme **référence**
- Par une démarche systématique, intégralement automatisée sous Mathematica
- Sous une forme finale explicite, incluant la gestion de tous les modes continus et des transitions entre eux (discontinuités potentielles comprises)
- Bénéficiant d'un cadre de simulation générique développé sous Simulink et Stateflow (basé sur la commutation de modèles d'état)

### Cas particulier des systèmes où les interrupteurs commutent dans leur ensemble ou avec des résistances, sans affecter l'ordre du modèle

- Représentation d'état unique à paramètres booléens (indice de nilpotence  $\leq 1$ )
- 2 méthodes d'obtention :
  - **Matrices de passage** (*Buisson, Cormerais, Richard*)
  - **Cellules de commutation** (*Allard*)

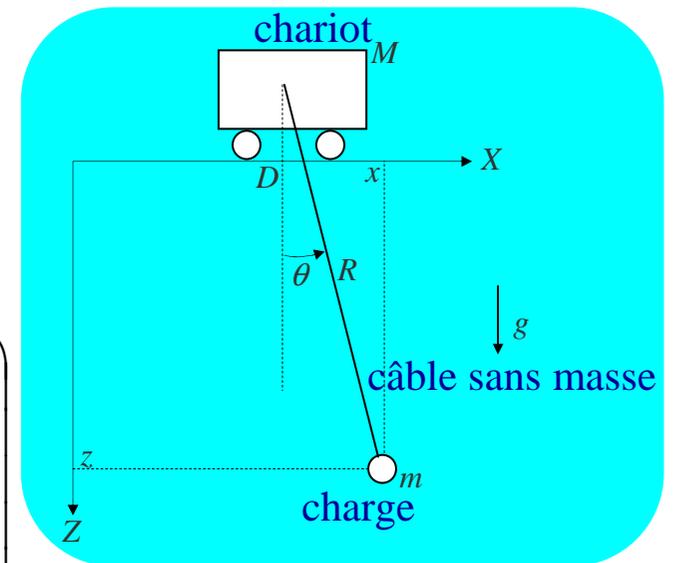
➤ **Preuve de platitude par bicausalité** (IFAC WC 2002)

**Platitude différentielle** : extension au non linéaire de la commandabilité selon Kalman

- ➔
- Propriété structurelle, liée à la notion d'inversibilité (E/S, X/S)
  - Partagée par de nombreux systèmes physiques
  - À l'origine de stratégies de commande non linéaires en BO ou BF
- (*Fliess*)

Possibilité d'exprimer l'entrée et l'état comme des fonctions différentielles d'une variable unique appelée **sortie plate**

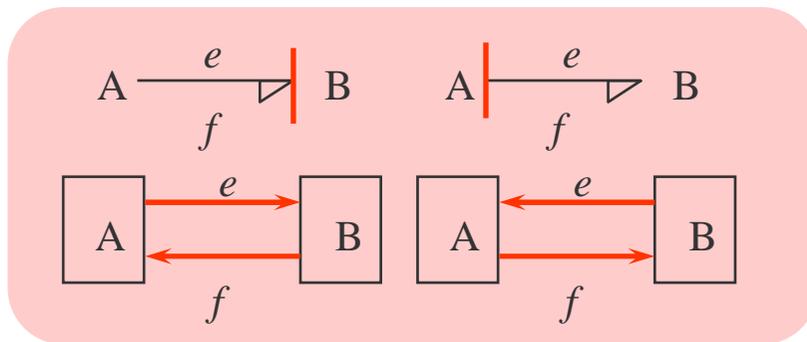
$x, z$  sorties plates de la grue



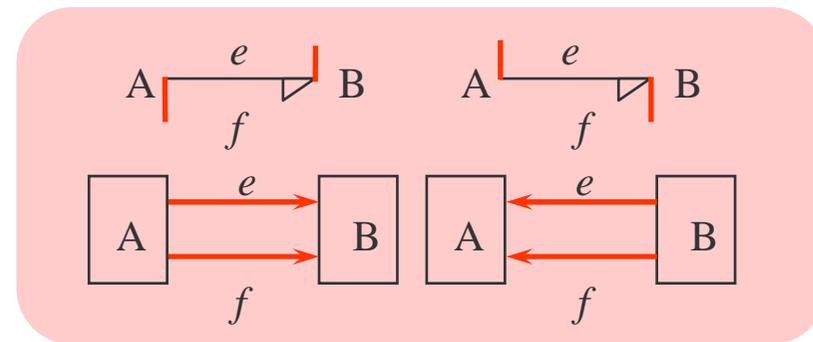
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entrées de commande} \\ D = x - z \frac{\ddot{x}}{\ddot{z} - g} \\ R = \sqrt{\left( z \frac{\ddot{x}}{\ddot{z} - g} \right)^2 + z^2} \end{array} \right. \quad \theta = \arcsin \left( \frac{z \frac{\ddot{x}}{\ddot{z} - g}}{\sqrt{\left( z \frac{\ddot{x}}{\ddot{z} - g} \right)^2 + z^2}} \right) \quad \text{état}$$

**Bicausalité** : extension de la causalité à des schémas d'entrée-sortie non standards

- Découplage des sens de transit informationnel respectifs de l'effort et du flux sur les liens BG
- Règles de propagation spécifiques (*Gawthrop*)
- Possibilité de représenter une dynamique inverse



liens unicaux : situation standard



liens bicaux

**Proposition** : utilisation du concept de bicausalité comme clé d'analyse de la platitude des systèmes modélisés en BG

- Preuve de platitude
- Dérivation systématique de lois de commande en BO (inversion E/S)

### Démarche :

- Connexion d'éléments de type source/capteur (SS) aux  $\neq$  ports d'entrée et de sortie
- Attribution de la double causalité source d'effort/flux aux **éléments SS de sortie**
- Construction du modèle inverse (bicausal)
  - propagation de l'information bicausale
  - estimation des paramètres inconnus (éléments modulés) à partir de l'information bicausale acquise ou de contraintes physiques connues externes au BG

imposent désormais les sorties plates, + grandeurs duales nulles

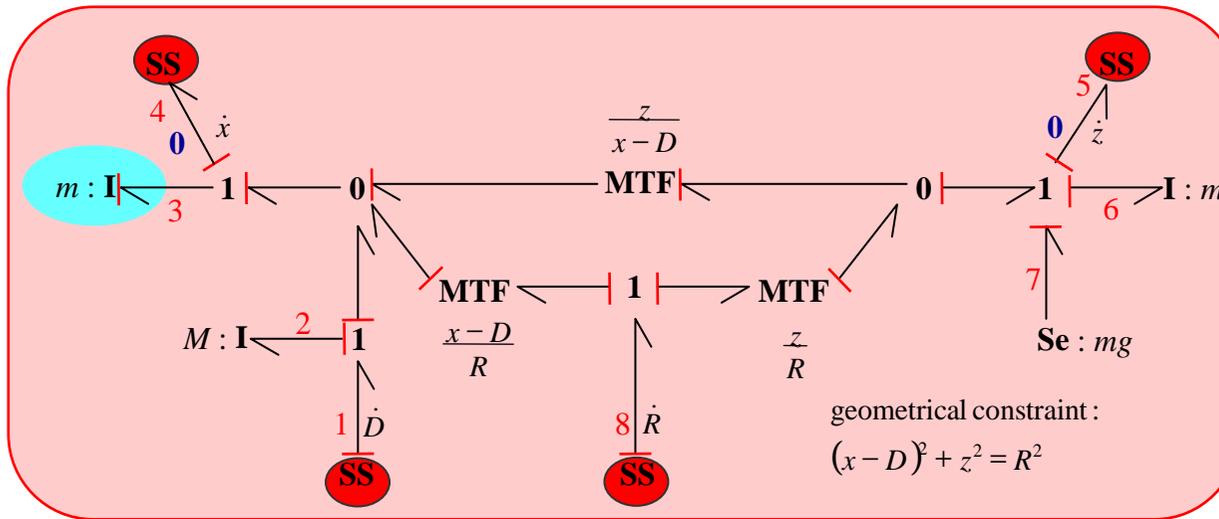
### Condition de platitude vérifiable une fois le modèle causalement complet :

- **Absence de conflit** (2 demi-barres sur chaque lien)
- **Ordre 0** (pas de causalité intégrale)
- **Causalité telle que chaque variable d'entrée du système initial est devenue une variable de sortie pour la structure de jonction bicausale**

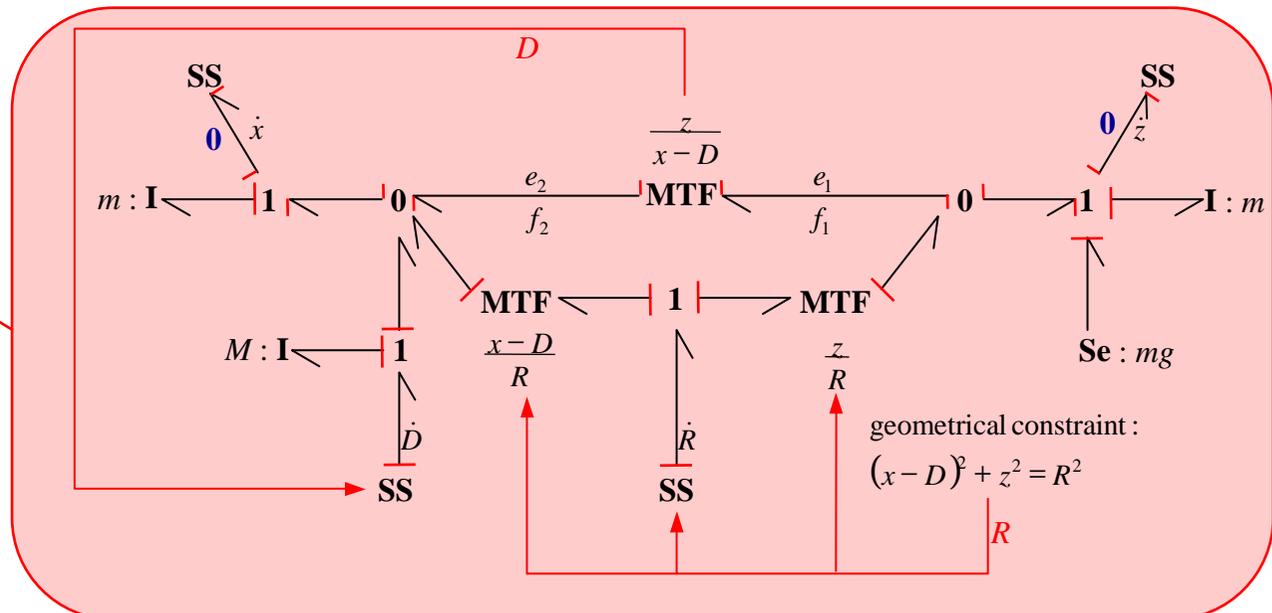
➔ Lois d'inversion déduites systématiquement du BG bicausal

### Exemple de la grue :

modèle direct avec éléments hybrides source/capteur de sortie (plates) et d'entrée (de commande)



modèle inverse



Axe centré sur 2 principes de commande non linéaires :

- Commande par passivation (*Ortega, Sira-Ramirez*)
- Commande par mode glissant (*Edwards, Spurgeon, Barbot*)

Développement de méthodologies spécifiques de mise en œuvre dans le cas de systèmes à commutations...

- modélisés avec un point de vue idéal
- commutations complètement commandées (non autonomes)
- commutations sans effet sur la causalité des éléments de stockage du modèle BG

➔ assimilables à des systèmes continus à entrées de commande booléennes

Forme d'état (dérivable d'un modèle BG) :

$$\dot{x} = f(x, U, \rho)$$

vecteur d'état ←

entrée continue (entrée de puissance par exemple, le + souvent constante)

entrée de commande booléenne (configuration des interrupteurs)

#### Commande par passivation

$$\dot{\rho} = g(\rho, x, x_{consigne}, U)$$

**Principe** : retour d'état (dynamique) pour rendre la **BF passive** (ou dissipative : stockage interne d'énergie < apport extérieur)

**Moyen utilisé** : introduction artificielle d'**amortissement** dans la dynamique de l'erreur d'asservissement  $x - x_{consigne}$  ( $\Rightarrow$  stabilisation asymptotique)

**Intérêt** : large champ d'application, intelligibilité physique

**Contribution méthodologique** : formalisation **générique** d'une démarche de synthèse de correcteur passif à partir d'une expression port-hamiltonienne du modèle (au lieu de l'expression lagrangienne du standard PBC)

↳ directement identifiable à partir du BG

**Matrice d'interconnexion**  
Anti-symétrique

$$\dot{x} = [J(\rho) - R(\rho)] \frac{\partial H_t(x, \rho)}{\partial x} + G(\rho)U$$

**Matrice de dissipation**  
Symétrique définie positive

**Nature de la loi de commande obtenue** : retour d'état continu

- interprétable comme la loi de commande du **modèle moyen** (CN :  $0 \leq \rho \leq 1$ )
- nécessité d'une MLI pour l'appliquer aux systèmes à entrées logiques (loi théorique assurée en moyenne, à partir de **commutations périodiques** des commandes binaires d'interrupteurs, réglage via le **rapport cyclique**) <sup>39</sup>

### Commande par mode glissant

**Principe** : Commande en **BF à structure variable** (ensemble de lois de commande associé à une règle de décision qui permet de sélectionner à chaque instant la loi courante en fonction de l'état du système)

**Intérêt** : robustesse

**Démarche standard** :

1. Détermination d'une fonction de commutation

$$s(x, t) = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{équation d'un lieu de glissement}$$

2. Détermination d'une loi de commande discontinue sur ce lieu et qui le rend attractif pour les trajectoires d'état

- choix arbitraire, guidé par le cahier des charges
- dynamique d'ordre réduit, indépendante de la commande

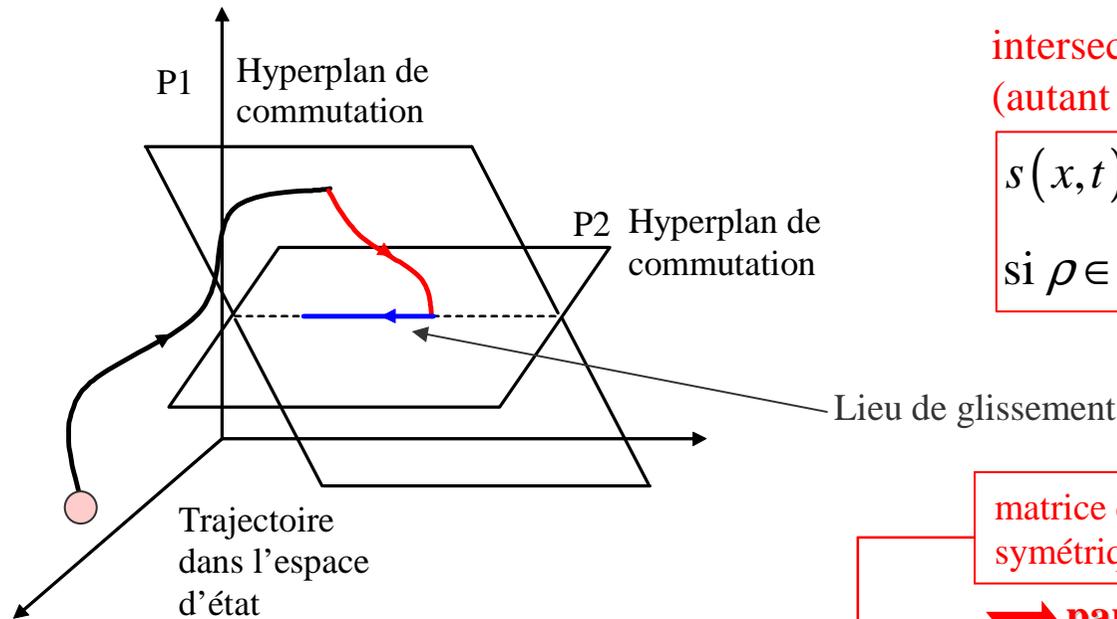
**2 approches possibles pour une application aux systèmes à commutations** :

- Approche continue par morceaux  $\rightarrow$  commande rapprochée par MLI
- Approche directe (pilotage instantané de l'état des interrupteurs, et non de leur rapport cyclique dans le cadre de commutations périodiques)

**Contribution méthodologique** : formalisation **générique** d'une démarche de synthèse de correcteurs par mode glissant pour les **systèmes affines en la commande**, et plus spécifiquement ceux **à entrées logiques**

$$\longrightarrow \quad \dot{x} = f(x, t) + g(x, t)\rho$$

Objectif de la loi de commande : **amener puis maintenir l'état sur le lieu de glissement**



intersection d'hypersurfaces de commutation  
(autant que de commandes scalaires)

$$s(x, t) = [s_1(x, t), \dots, s_m(x, t)]^T \in \mathbb{R}^m$$

$$\text{si } \rho \in \{0, 1\}^m$$

matrice de pondération,  
symétrique définie positive

➔ **paramètre de réglage pour la loi de commande**

**Condition d'atteignabilité :**  $V(x, t) = s^T(x, t)W s(x, t)$  fonction de Lyapunov

- ➔
- constamment positive ou nulle
  - décroissante
  - nulle sur le lieu de glissement

**Commande continue équivalente** (maintien sur le lieu de glissement  $\rightarrow \dot{s}(x, t) = 0$ )

$$\rho_{eq}(x, t) = - \left[ \frac{\partial s}{\partial x} g(x, t) \right]^{-1} \left[ \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} f(x, t) \right]$$

**Dynamique du glissement**

$\rightarrow$  matrice Jacobienne

$$\dot{x} = \left[ I - g(x, t) \left[ \frac{\partial s}{\partial x} g(x, t) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} \right] f(x, t) - g(x, t) \left[ \frac{\partial s}{\partial x} g(x, t) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial t}$$

indépendante de la commande (de loi encore indéterminée)

**Condition nécessaire pour avoir une fonction de Lyapunov**

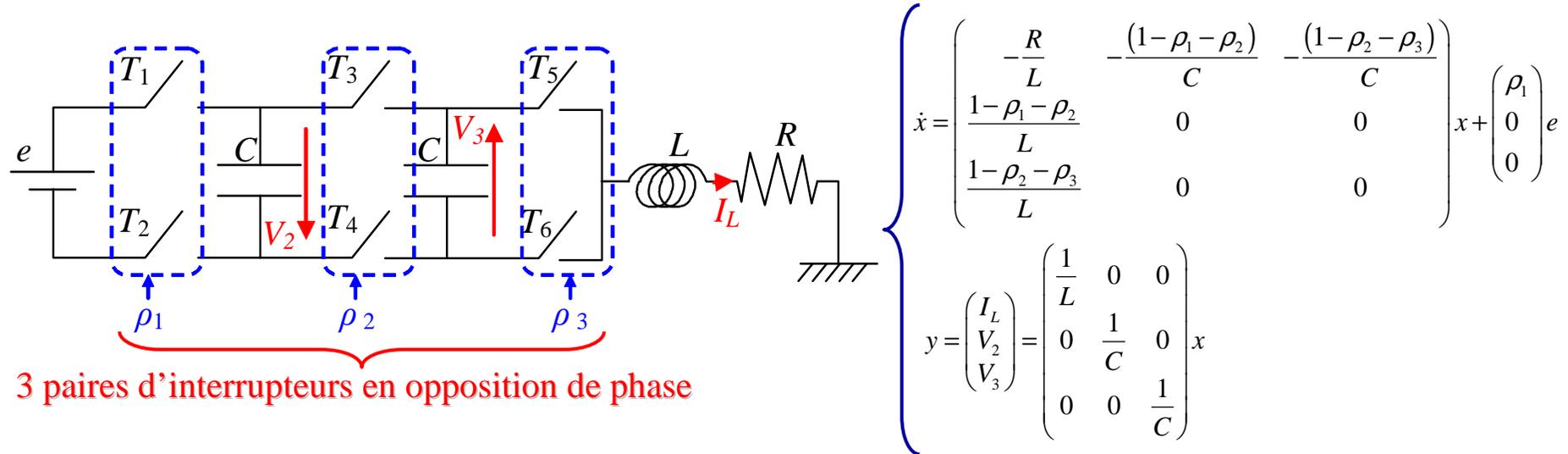
$$\frac{d}{dt} [V(x, t)] = 2 \sum_{i=1}^m s^T(x, t) W \frac{\partial s}{\partial x} g_i(x, t) [\rho_i(x, t) - \rho_{i, eq}(x, t)] < 0$$

**Exemple de commande directe**

$$\forall i \in \{1, \dots, m\} \quad \rho_i(x, t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{sgn} \left[ s^T(x, t) W \frac{\partial s}{\partial x} g_i(x, t) \right] \right)$$

stratégie garantissant une négativité maximale de  $dV/dt$

### Application à la commande d'un convertisseur de puissance à 3 niveaux

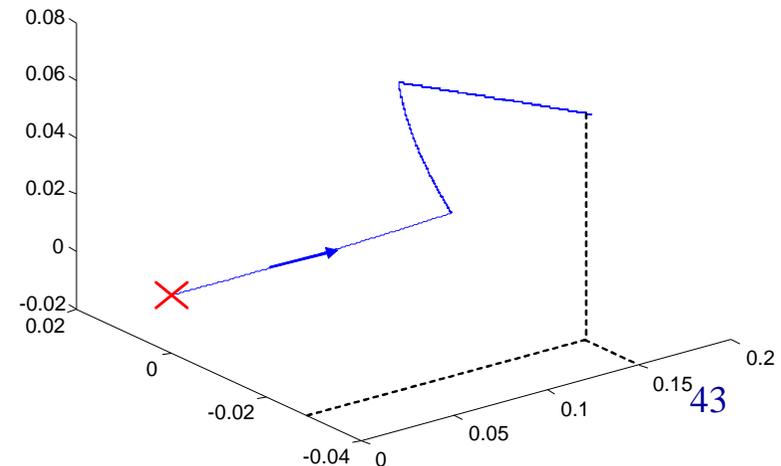


Paramétrage :  $W = I$

$$\begin{cases} \rho_1(x,t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \text{sgn} \left[ (x_1 - x_{r1}) \left( e + \frac{x_2}{C} \right) - (x_2 - x_{r2}) \frac{x_1}{L} \right] \right) \\ \rho_2(x,t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \text{sgn} \left[ (x_1 - x_{r1}) \frac{x_2 + x_3}{C} - (x_2 - x_{r2} + x_3 - x_{r3}) \frac{x_1}{L} \right] \right) \\ \rho_3(x,t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \text{sgn} \left[ (x_1 - x_{r1}) \frac{x_3}{C} - (x_3 - x_{r3}) \frac{x_1}{L} \right] \right) \end{cases}$$

➡ surfaces de commutation non linéaires

Objectif de régulation :  $x_r = (0.15 \quad -0.03 \quad 0.06)$



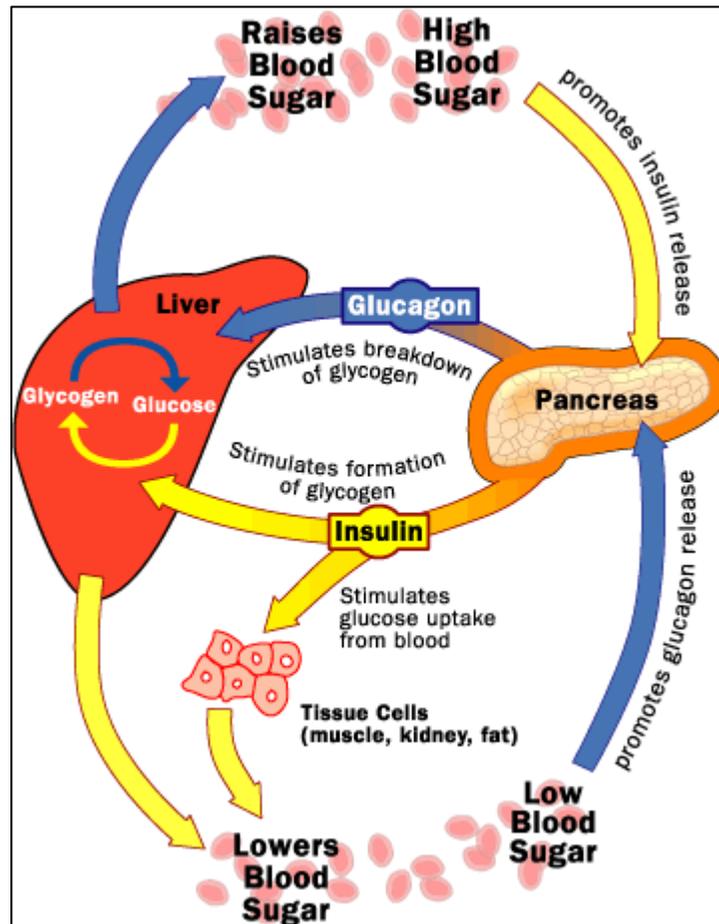
- Analyse de l'influence de la matrice de pondération  $W$  sur la convergence vers le lieu de glissement (vers des critères de choix moins empiriques...)
- Poursuite de trajectoire par mode glissant
- Extension de la méthodologie générique de synthèse aux modes glissants d'ordre supérieur
- Commande des systèmes à commutations autonomes
- Modélisation dynamique et commande de systèmes physiologiques

Prolongement de  
travaux existants

➔ Nouvelle orientation centrée sur un domaine applicatif

➔ 1<sup>ère</sup> problématique ciblée : traitement du diabète par insulinothérapie en boucle fermée (régulation artificielle de la glycémie)

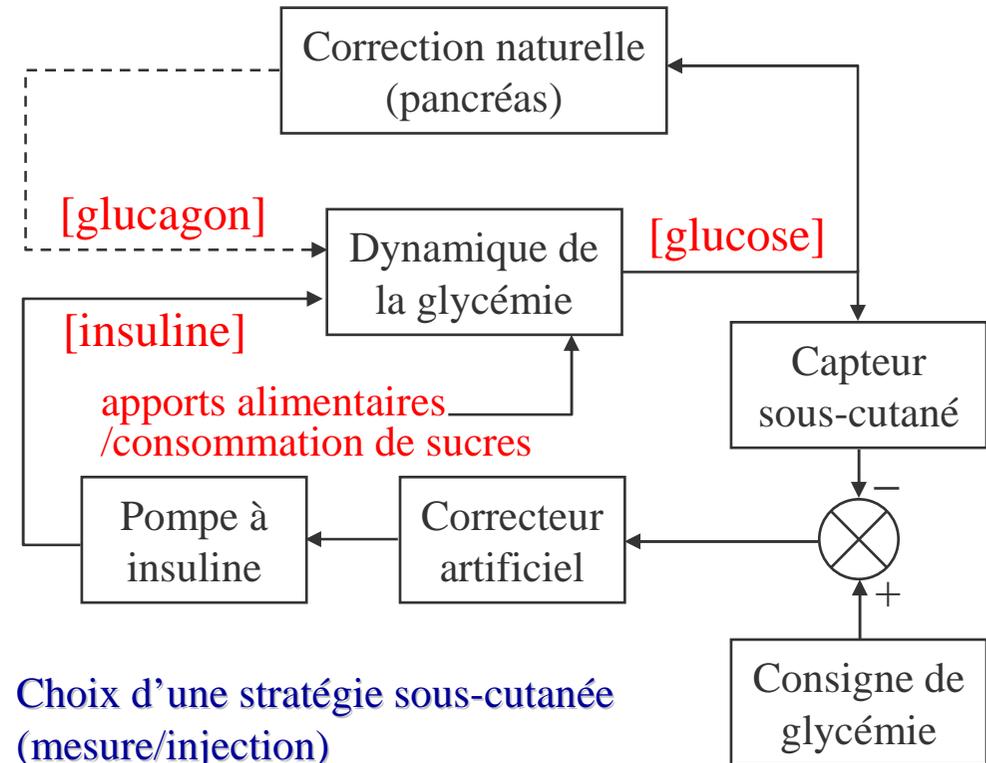
Collaboration avec le CHU de Rennes



Métabolisme du glucose d'un sujet sain

➔ Auto-régulation à double action

## Cas du diabète de type 1



## Choix d'une stratégie sous-cutanée (mesure/injection)

- Facilité d'implantation (peu invasif)
- Difficulté de modélisation (diffusion)
- Difficulté de commande (retards, non linéarités, fortes perturbations)

Repas, efforts physiques

### Axes d'étude

- Modèle de connaissance du métabolisme humain du glucose, conforme à la stratégie sous-cutanée envisagée } état de l'art vs mesures cliniques
- Modèle des perturbations (apports alimentaires, efforts musculaires)
- Stratégies de commande adaptées aux propriétés du modèle et aux contraintes de mise en œuvre (limitations des capteurs, actionneurs)

Non linéarités  
Retards  
Incertitudes, variations paramétriques  
Positivité



Commande non linéaire robuste aux incertitudes paramétriques et/ou structurelles

Passivation, Backstepping, SMC, MPC, voire flou...

### Positionnement

- Thème de recherche actif (publications nombreuses, Cf IFAC 2008)
- Aucune solution cliniquement exploitable
- Peu d'acteurs nationaux (équipe du Pr. E. Renard, au CHU de Montpellier : Pancréas artificiel, stratégie intra-péritonéale/intra-veineuse)
- Au plan international, recherche très liée à quelques grands laboratoires pharmaceutiques (Medtronic Minimed)
- 2 approches concurrentes: MPC/intra-veineux (Hovorka, Cambridge), PID/sous-cutané (Steil, USA)

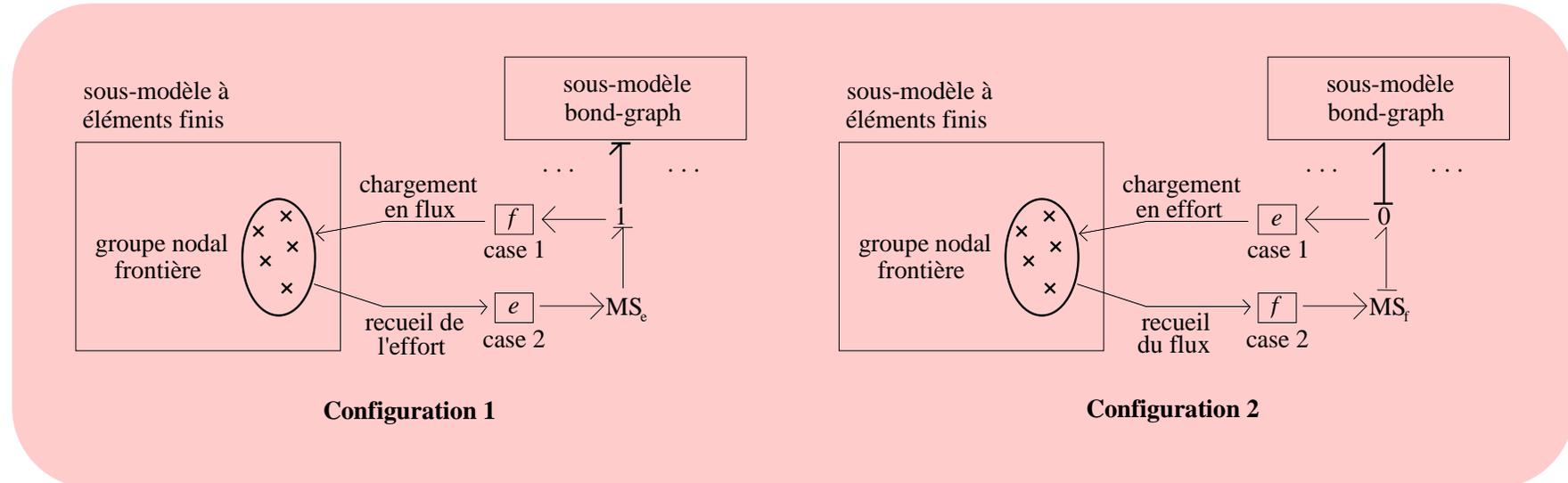
Reproduction artificielle de l'action naturelle du correcteur existant chez un sujet sain (pancréas) après identification



Pour aller plus loin dans la gestion de l'hétérogénéité : **le multiformalisme**

Association BG + autres formalismes de modélisation dynamique

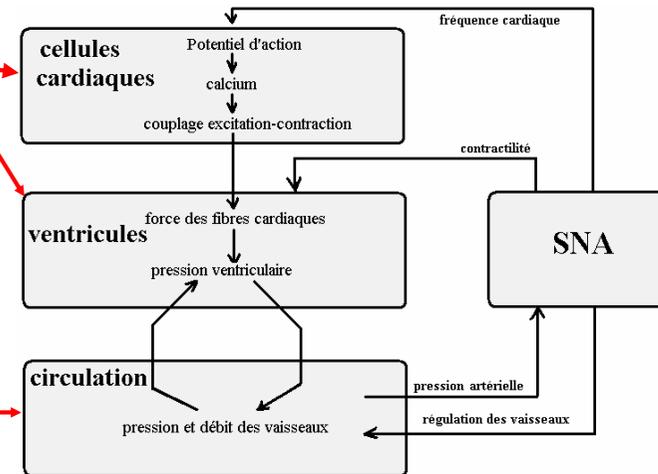
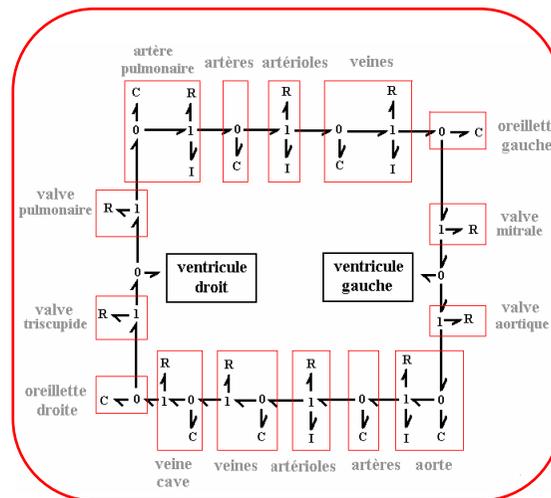
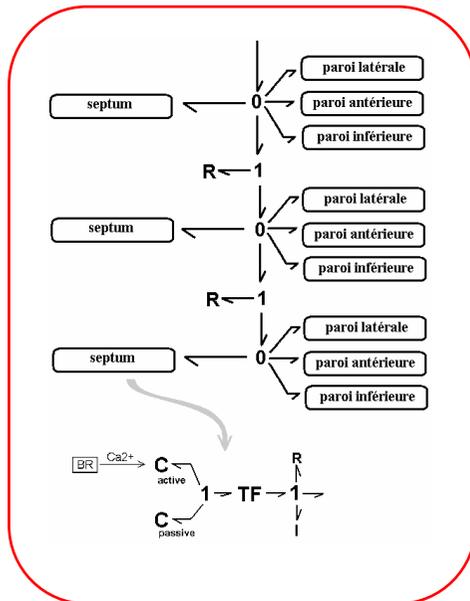
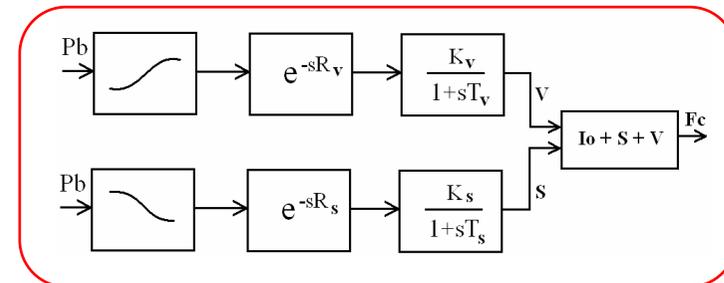
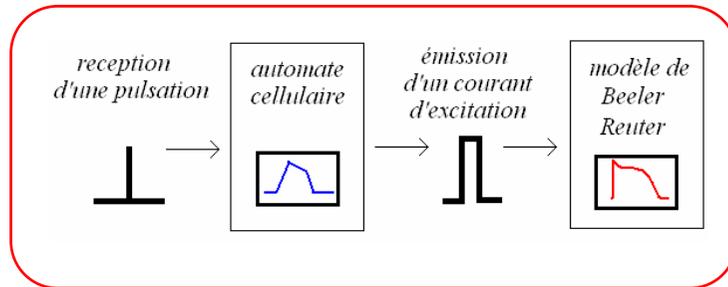
- BG + MEF  solution possible à l'hybridisme spatial



# 1. Synthèse de modèles énergétiques de systèmes complexes – Multiformalisme

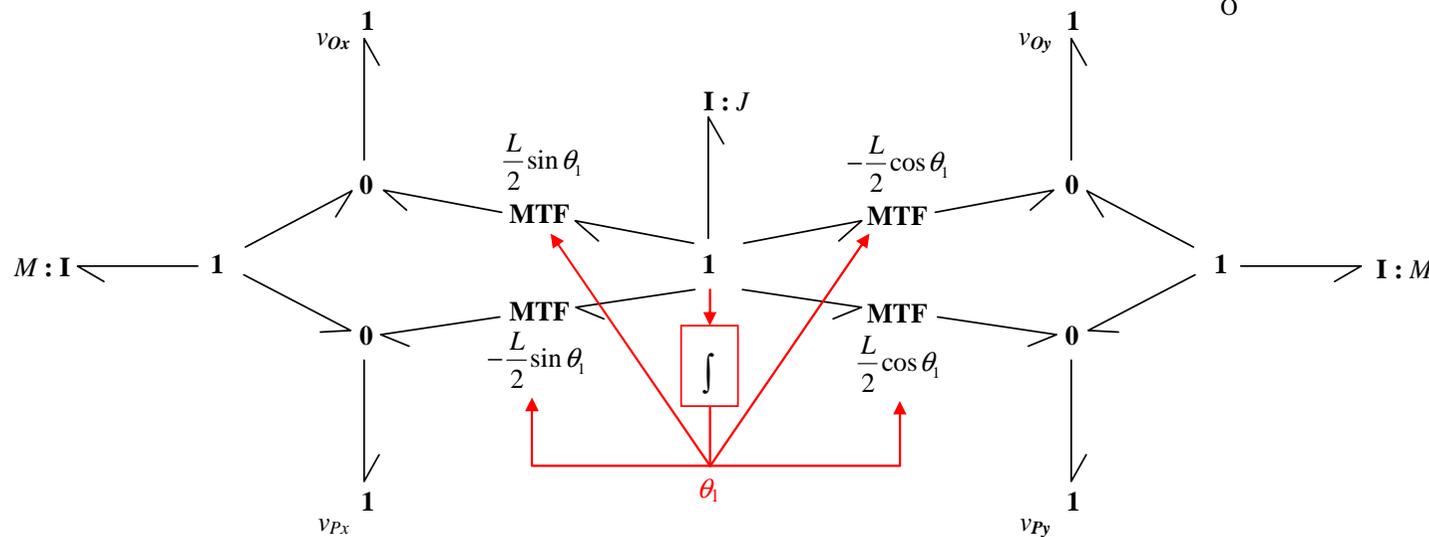
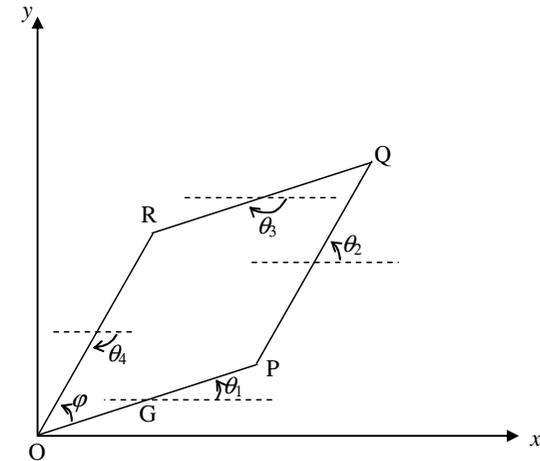
## Le multiformalisme comme réponse à l'hétérogénéité

- illustration à partir d'un modèle de système cardiovasculaire (thèse *V. Le Rolle*)



## Systèmes mécaniques articulés à chaîne fermée

Quadrilatère plan déformable



Sous-modèle de la tige (OP)

# 1. Synthèse de modèles énergétiques de systèmes complexes

Modèle complet du quadrilatère



2 boucles causales  
de gain 1 !

