

Outils pour la modélisation et la commande de systèmes multi-physiques

Exemples d'application du Graphe Informationnel Causal

Richard Béarée, Julien Gomand
richard.bearee@ensam.eu
julien.gomand@ensam.eu



Journée pédagogique pour l'enseignement des sciences industrielles
pour l'ingénieur en CPGE – 25 juin 2012



2

Outils pour la modélisation et la commande de systèmes multi-physiques

I. Contexte et objectifs :

Pourquoi les outils de représentation multi-physiques ?

II. Application 1 (J. Gomand) :

Dispositif électromécanique de positionnement rapide

III. Application 2 (R. Béarée) :

*Génération de référence basée sur la causalité
(exemple exploité en pédagogie)*

Conclusion



3

Objectif : Comprendre, prévoir, anticiper...

Exemples du domaine aéronautique :

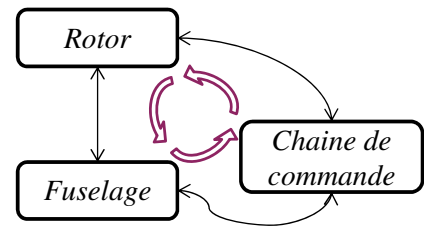
- Des phénomènes plus ou moins bien compris ;
- Des problèmes récurrents (d'une conception à la suivante).



Réinjection par le pilote (?)
(Pilot Induced Oscillations, PIO)



Résonance sol



Réinjection par la structure

→ Interactions plus ou moins complexes entre sous-systèmes

→ Besoin :

- De modélisation énergétique multi-physiques ;
- D'outils de structuration des modèles et d'analyse

→ Vers des modélisations énergétiques d'hélicoptères...
... mais c'est "un peu" complexe !

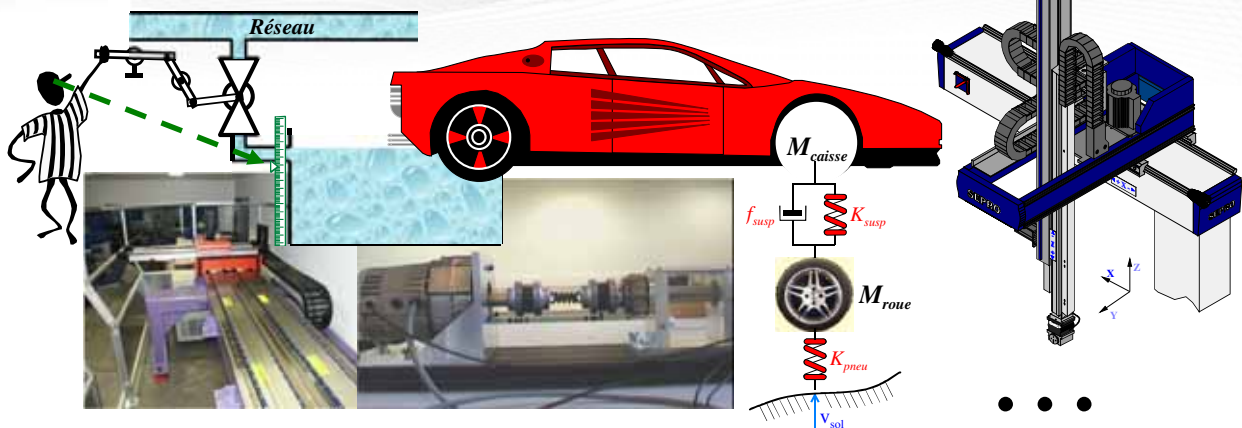
Chaire industrielle "Dynamique des systèmes mécaniques complexes"
(1^{ère} thèse en cours)



4

Des exemples de complexité plus abordable

Déjà vus ? (Pierre-Jean Barre)



De nouveaux exemples



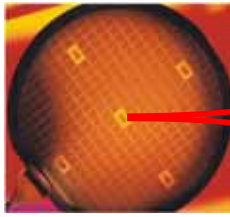
Application 1

Application 2 (R. Béarée)

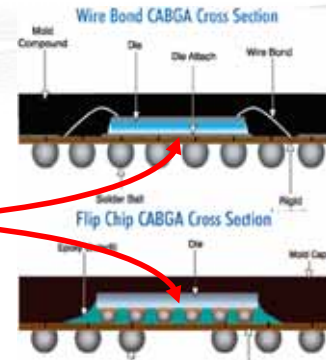


Dispositifs de positionnement rapide bi-actionné

Assemblage électronique
(Pick-and-Place)



Industrie du semi-conducteur



(Amkor Corporation)

Cahier des charges pour la technologie "flip-chip" :

→ Cadence : 10 000 cph

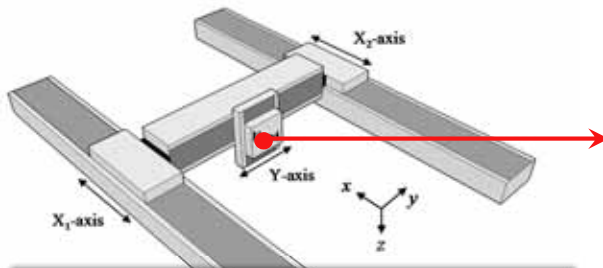
→ Accélération : 25 m/s²

→ Vitesse : 2 m/s

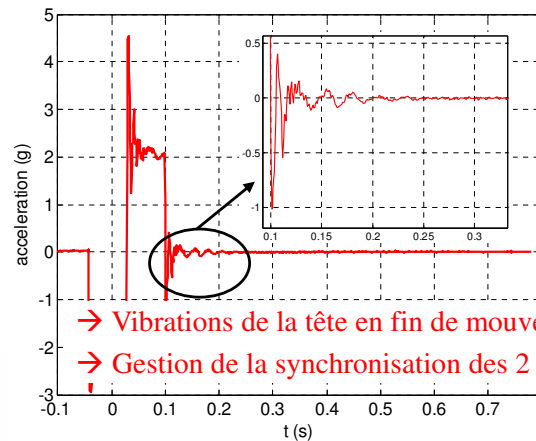
→ Précision : <10 μm

→ Répétabilité : <1.5 μm

Dispositif bi-actionné

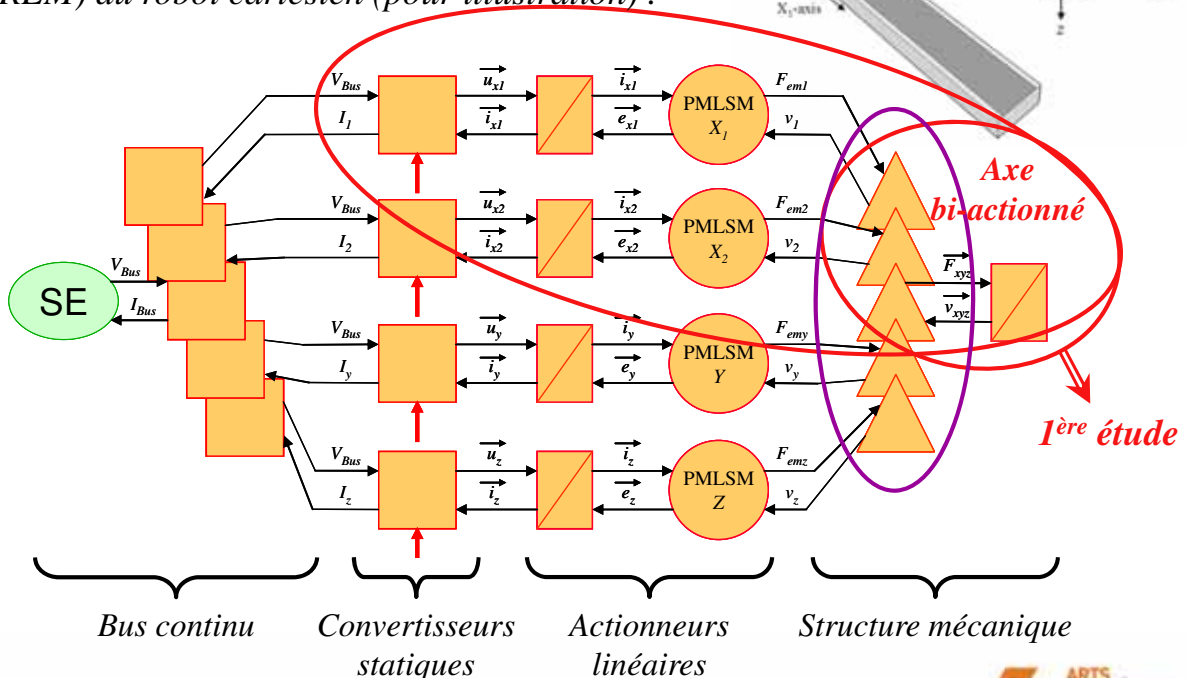


- Rigidification de la structure de l'axe x
- Augmentation de la dynamique de l'axe x



Limites pour une première étude

Représentation Energétique Macroscopique
(REM) du robot cartésien (pour illustration) :

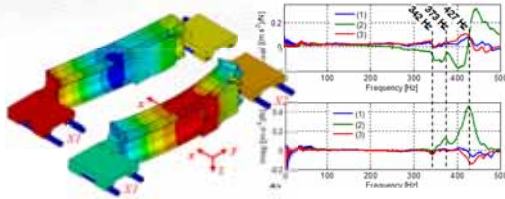


7

Aperçu d'une démarche : de la modélisation à la commande



[Gomand - 2008]

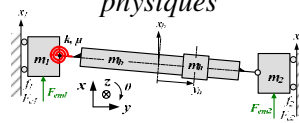


éléments finis

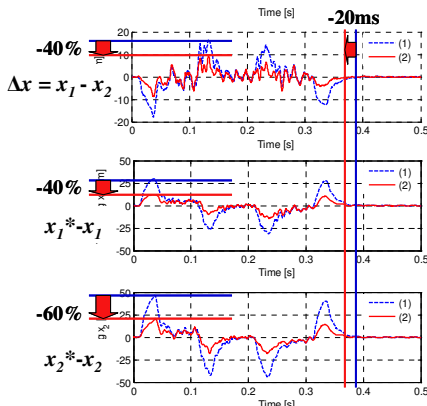
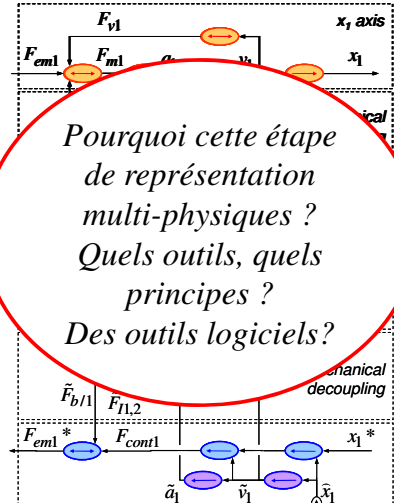
expérimentale

→ Analyse modale

→ Modélisation à
paramètres localisés
physiques

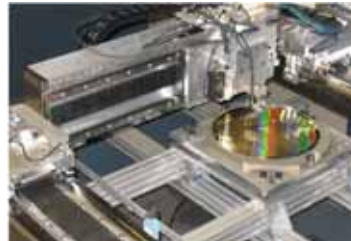


→ Représentation causale (GIC)
→ Propriétés graphiques

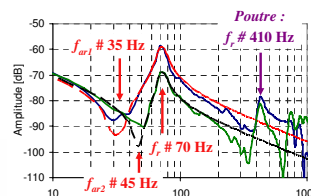


→ Validations expérimentales

→ Brevet (ETEL)



→ Banc d'expérimentation
(dSPACE, xPC-Target)



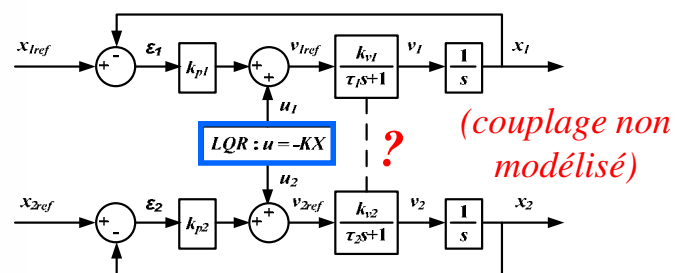
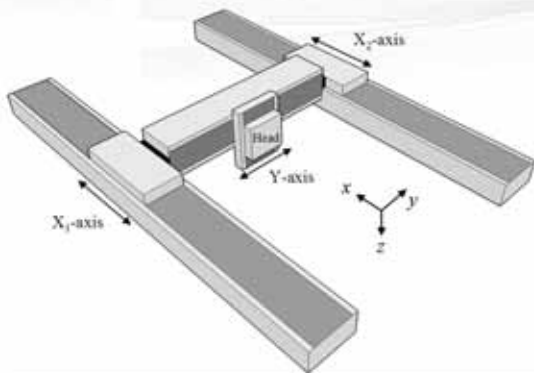
→ Identification expérimentale

→ Commande par inversion



8

Pour commencer : Un exemple de structure de commande



Contrôle optimal [Kim S. - 2003]

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} \cdot \Delta x + K_{d1} \cdot \Delta v \\ -K_{p2} \cdot \Delta x - K_{d2} \cdot \Delta v \end{bmatrix}$$

norme quadratique à minimiser : $J_{\infty} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left[(q \cdot \Delta x)^2 + \rho^2 \cdot (u_1^2 + u_2^2) \right] dt$

Que penser de cette solution de synchronisation ? Semble-t-elle logique ?

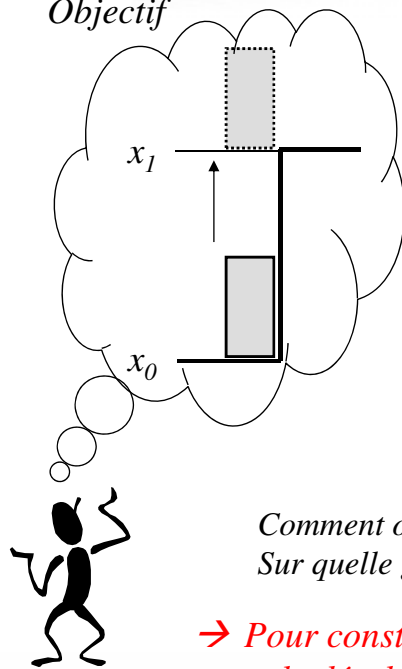
→ Manque d'analyse physique du système à contrôler ?



Pourquoi des outils de représentation multi-physiques ?

De l'objectif à la pratique :

Objectif



Puissance

Vitesse Courant

Couple

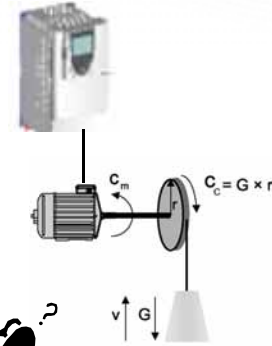
Force

Tension

Position

Accélération

Moyens



Système

Comment organiser les moyens pour atteindre les objectifs ?
Sur quelle grandeur agir pour en contrôler une autre ?

→ Pour constituer un **support méthodologique pour l'analyse et le développement de la commande des systèmes.**



Pourquoi des outils de représentation multi-physiques ? (2)

Exemple d'un système "complexe" :

Besoin de visions globales, macroscopiques pour l'étude :

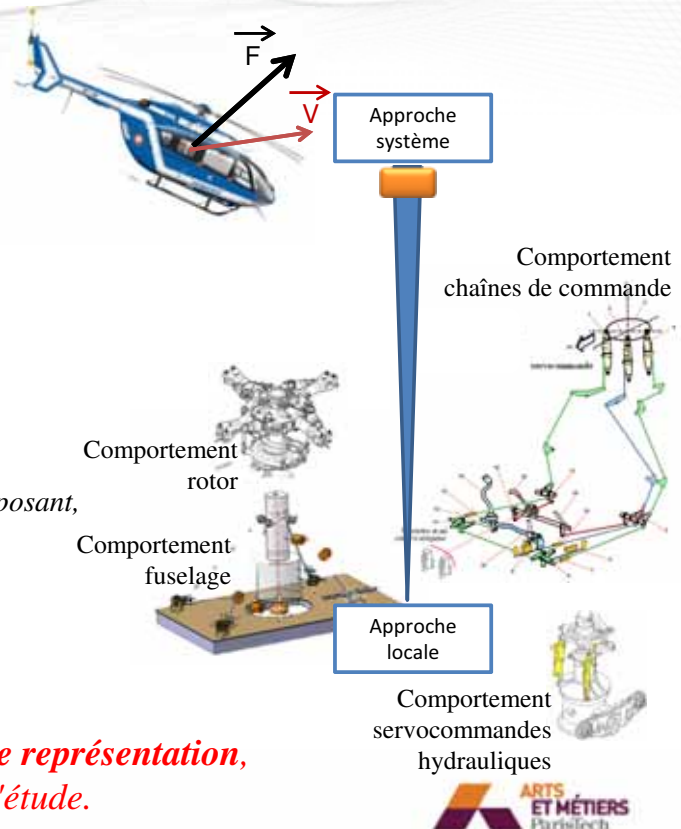
- De la dynamique du vol ;
- Du contrôle d'attitude, de trajectoire ;
- etc.

Besoin de visions "intermédiaires" pour l'étude :

- Des chaînes de commande ;
- D'une pale, du rotor ;
- etc.

Besoin de visions locales détaillées, jusqu'au composant, pour l'étude :

- D'éléments de liaisons ;
- De la dynamique vibratoire d'un élément spécifique ;
- etc.

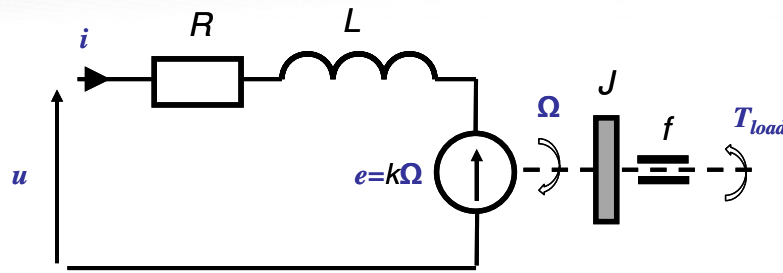


→ Pour accéder à différents **niveaux de représentation, de détail, en fonction des objectifs d'étude.**



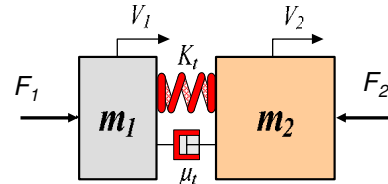
Pourquoi des outils de représentation multi-physiques ? (3)

Ex. de système multi-physiques simple :



Modèles à paramètres localisés :

- électrique (inductances, capacités, résistances)
- mécanique (masses, ressorts, amortisseurs)

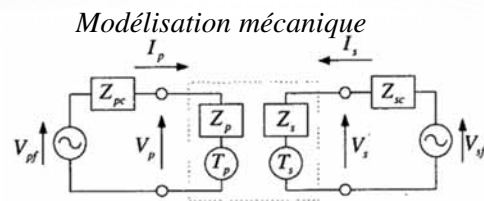
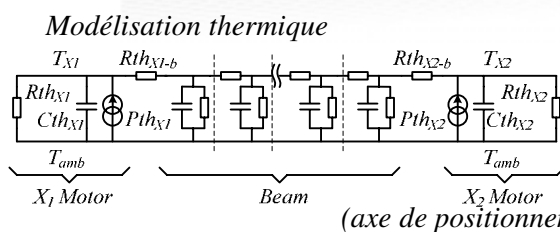


à chaque domaine ses propres symboles de modèle à paramètres localisés...

→ Pour représenter de manière unifiée des **systèmes multi-physiques** avec des principes et des symboles indépendants du domaine traité

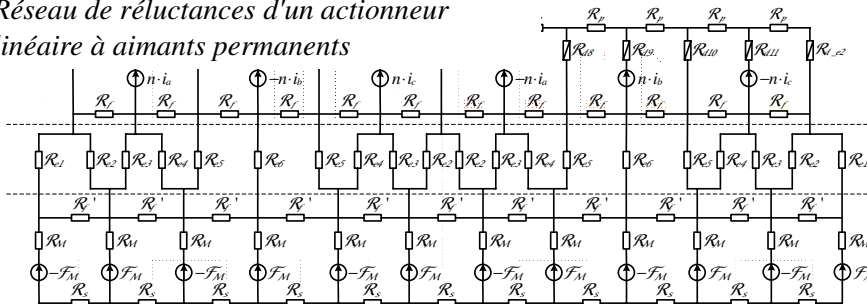
Pourquoi des outils de représentation multi-physiques ? (3b)

Ex. d'approche en génie électrique : les schémas électriques équivalents :

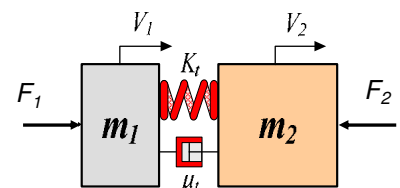


Modélisation magnétique :

Réseau de réluctances d'un actionneur linéaire à aimants permanents



Ex. d'exercice :
proposez un schéma électrique équivalent de ce système mécanique...



→ Pour représenter de manière unifiée des **systèmes multi-physiques** avec des principes et des symboles indépendants du domaine traité

Pourquoi des outils de représentation multi-physiques ? (4)

Ex. d'un système mécanique simple :

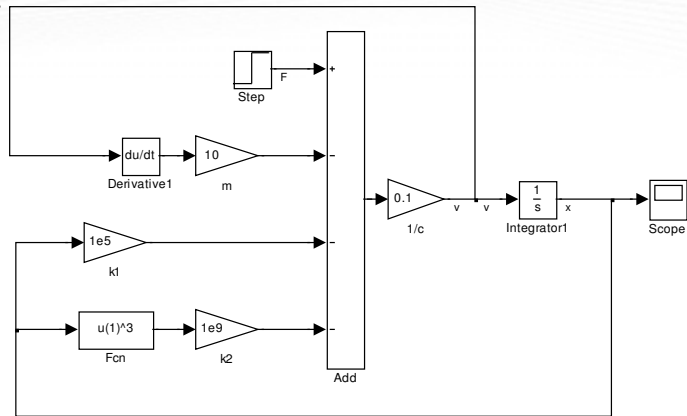
$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + \underbrace{k_1 \cdot x + k_2 \cdot x^3}_{\text{(ressort non linéaire)}} = F$$

→ Résolution ?

(par ex. avec Simulink)

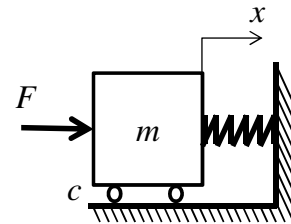
$$\dot{x} = \frac{1}{c} \cdot (F - k_1 \cdot x - k_2 \cdot x^3 - m \cdot \ddot{x})$$

Est-ce le meilleur schéma pour simuler ce système ?



Uniquement à partir du schéma proposé (sous Simulink) :

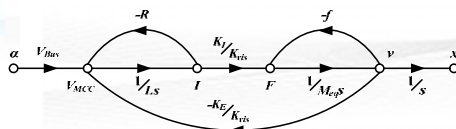
- A quoi cela correspond-t-il ?
- Comment asservir ce système en position ?
- Où sont localisés les éléments accumulateurs ?
- Quel est l'ordre du système ?
- Le système est-il commandable, observable ?
- ...



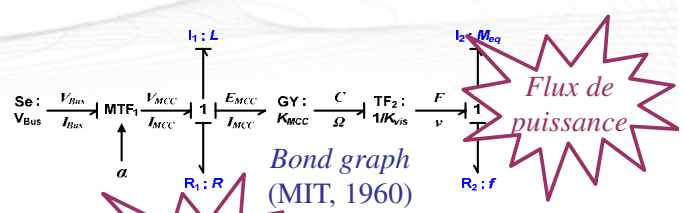
→ Pour analyser le fonctionnement des systèmes représentés, extraire leurs propriétés



Des outils de représentation multi-physiques...



Graphe de fluence
(MIT, 1950)



Bond graph
(MIT, 1960)

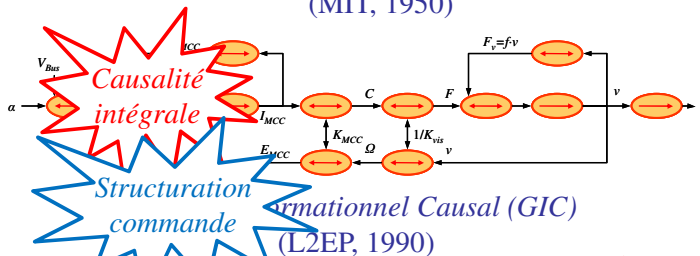
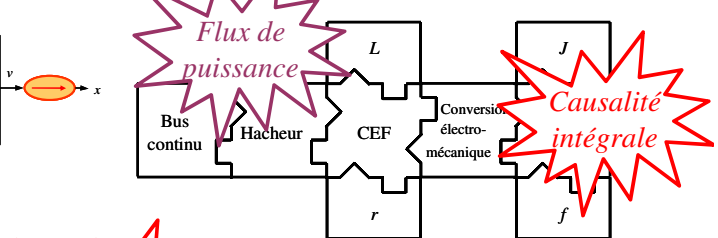
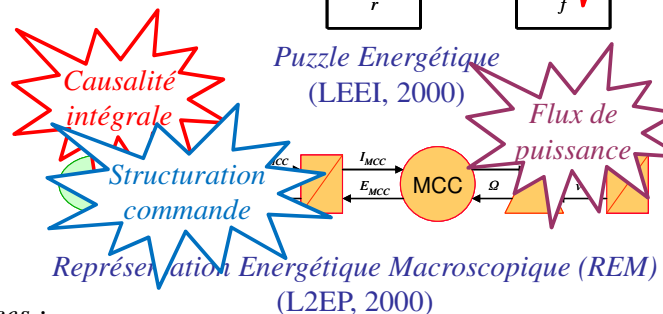


Schéma fonctionnel



Puzzle Énergétique
(LEEI, 2000)



Représentation Énergétique Macroscopique (REM)
(L2EP, 2000)

Rien n'impose la causalité intégrale ;
Rien n'impose de faire apparaître les puissances ;
... mais rien ne l'interdit non plus !

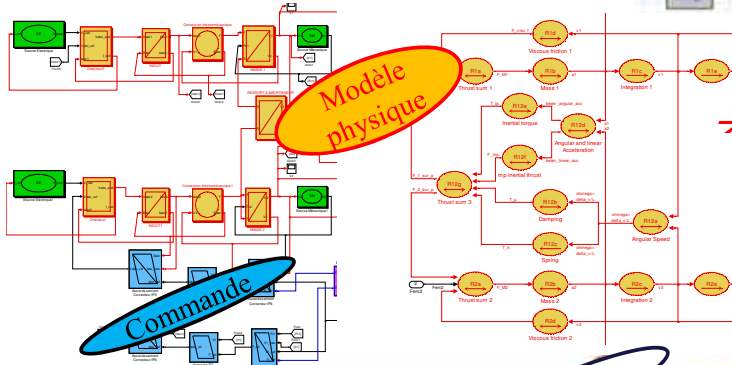
...

Représentations "signal"

Représentations "énergétiques"

... Et des outils logiciels

→ Solution logicielle propre à l'outil scientifique
(ex. : Bond Graph et 20sim)



Modèle physique

Eléments
génériques
multi-
physiques

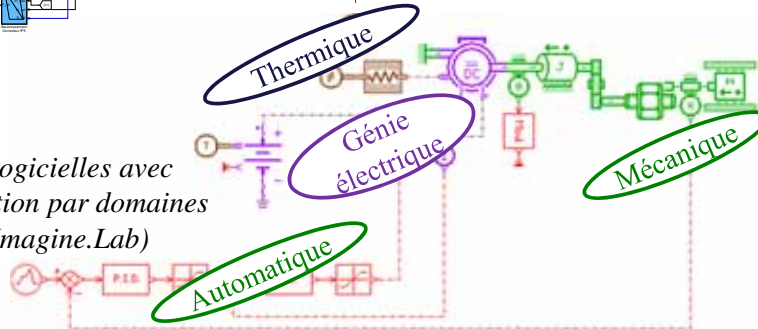
→ Du schéma bloc, avec mise en
forme graphique éventuelle :
ex. bibliothèques GIC et REM
sous Matlab/Simulink



[Site L2EP]

Abstraction scientifique

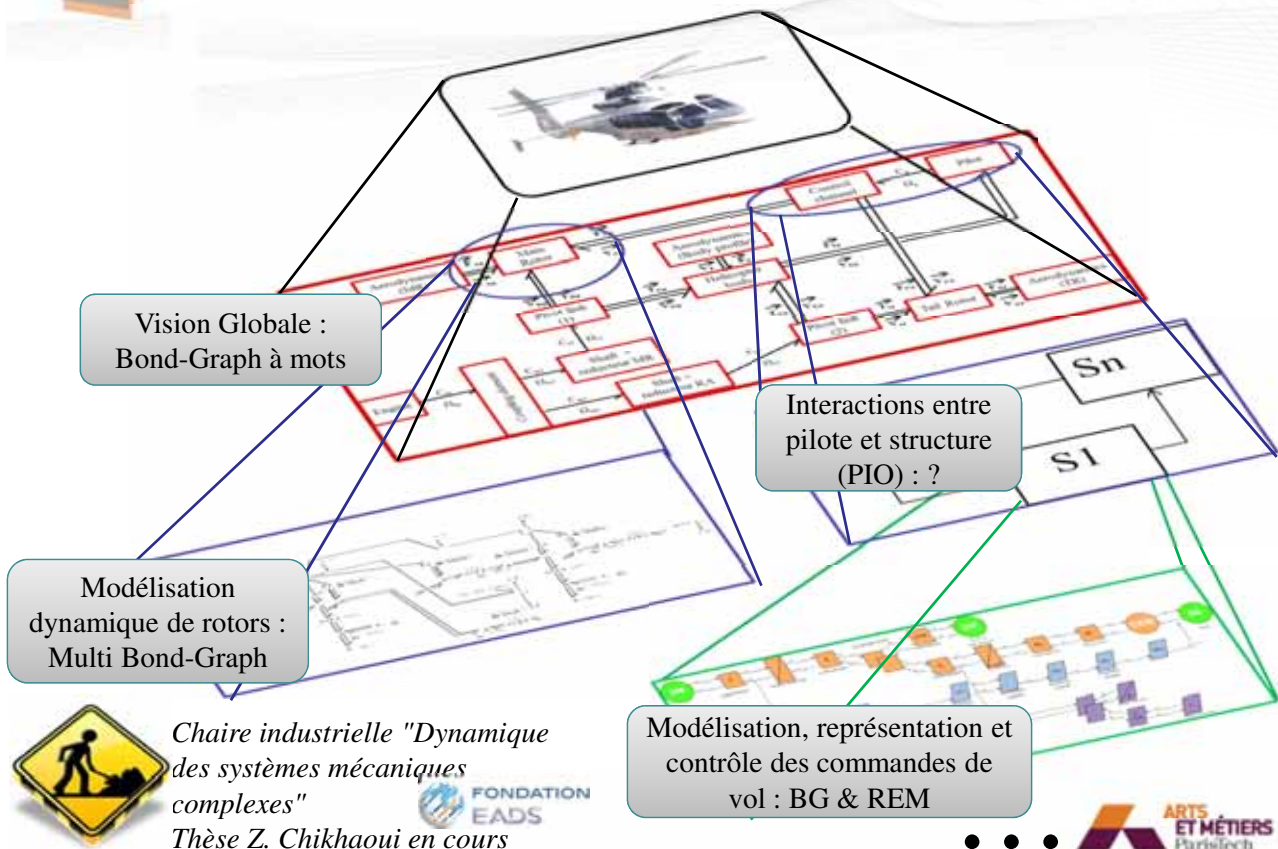
→ Solutions logicielles avec
spécialisation par domaines
(ex. LMS Imagine.Lab)



Eléments
spécifiques
par
domaine



Quid des systèmes vraiment très complexes ?



Vision Globale :
Bond-Graph à mots

Modélisation
dynamique de rotors :
Multi Bond-Graph

Interactions entre
pilote et structure
(PIO) : ?

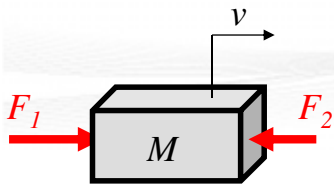
Modélisation, représentation et
contrôle des commandes de
vol : BG & REM



Chaire industrielle "Dynamique
des systèmes mécaniques
complexes"
Thèse Z. Chikhaoui en cours



Notion de causalité



Equation différentielle
(loi de Newton)

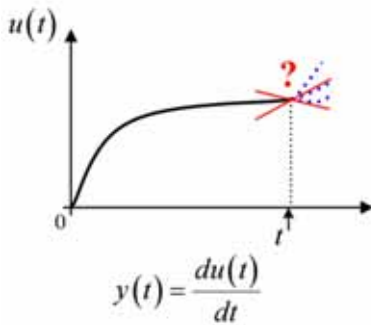
$$\sum F = M \cdot \frac{dv}{dt}$$



OU

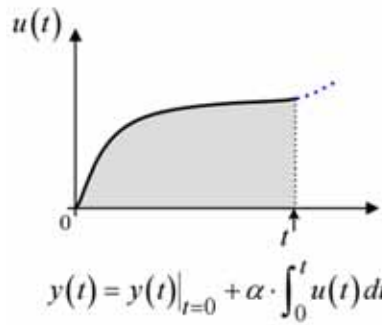
$$\sum F \Rightarrow v$$

?



Causalité dérivée

Indétermination à l'instant t :
Nécessite la connaissance de
l'évolution future de la grandeur

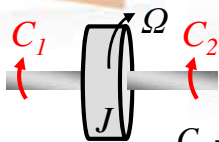


Causalité intégrale

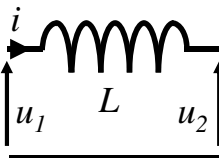
Notion d'accumulation
d'énergie (ici, cinétique) \Rightarrow

$$v = \int_t \frac{1}{M} \sum F dt$$

Accumulation d'énergie



$$C_1 + C_2 = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$



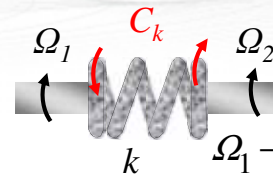
$$u_1 - u_2 = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Grandeurs
de flux
(Gf)

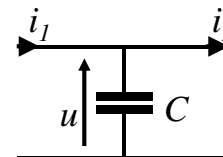
Vitesse
Courant
Débit

Grandeurs
d'effort
(Ge)

Effort, couple
Tension
Pression



$$\Omega_1 - \Omega_2 = \frac{1}{k} \frac{dC_k}{dt}$$



$$i_1 - i_2 = C \frac{du}{dt}$$

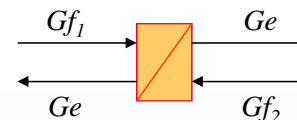
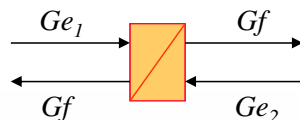
Accumulateurs d'énergie cinétique

Accumulateurs d'énergie potentielle

Graphe
Informationnel
Causal (GIC)



Représentation
Energétique
Macroscopique
(REM)

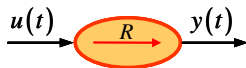


Eléments
en
causalité
intégrale

Graphe Informationnel Causal (GIC) (Causal Ordering Graph (COG))

- L2EP, années 1990, J.P. Hautier
- Représentation des flux de signaux, d'informations => proche du graphe de fluence
- Causalité intégrale imposée !
- Deux principaux symboles :

Processeur causal



$$R \rightarrow y(t) = y(t)|_{t=0} + \alpha(u, t) \cdot \int_0^t u(t) dt$$

Relation causale

Processeur rigide



$$R \rightarrow y(t) = \alpha(u, t) \cdot u(t)$$

Relation rigide

- Localisation des accumulateurs d'énergie et d'information à contrôler
- Structuration de la commande par inversion (*nous verrons un peu plus tard...*)

Outils pour la modélisation et la commande de systèmes multi-physiques

I. Contexte et objectifs :

Pourquoi les outils de représentation multi-physiques ?

II. Application 1 (J. Gomand) :

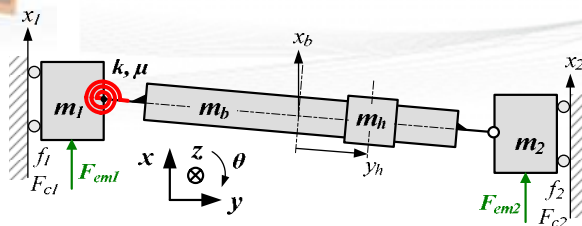
Dispositif électromécanique de positionnement rapide

III. Application 2 (R. Béarée) :

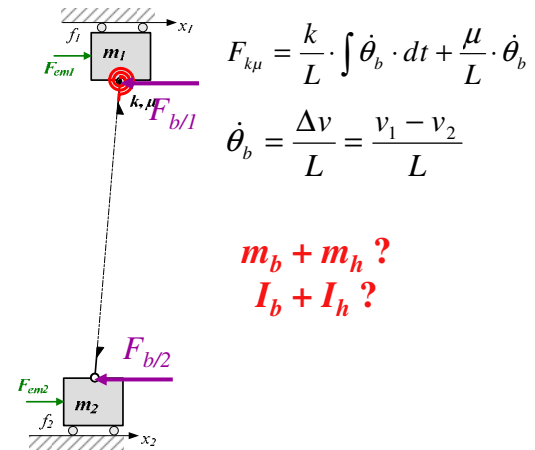
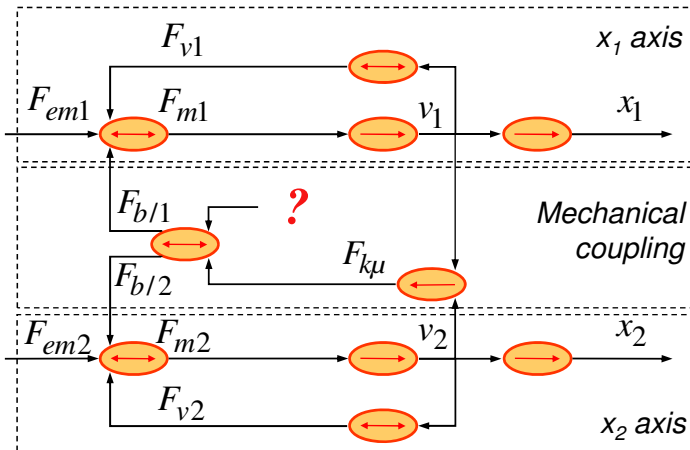
*Génération de référence basée sur la causalité
(exemple exploité en pédagogie)*

Conclusion

GIC de l'axe bi-actionné en gantry (axe x)



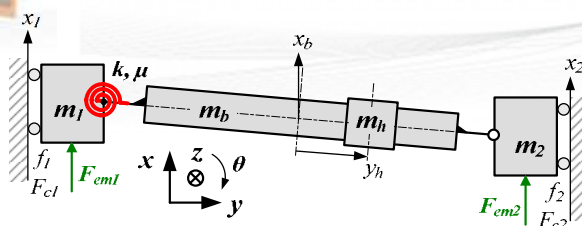
Contrainte de représentation dans la base des positions x_1 et x_2 .



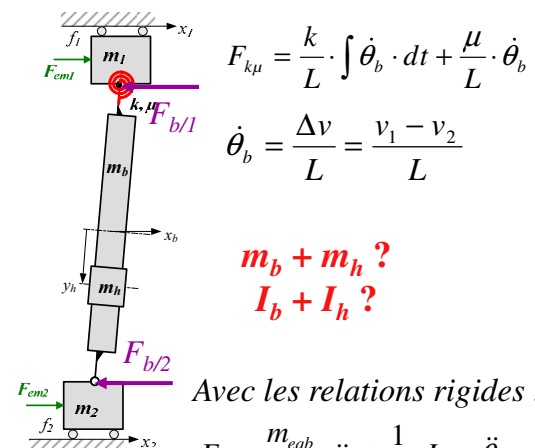
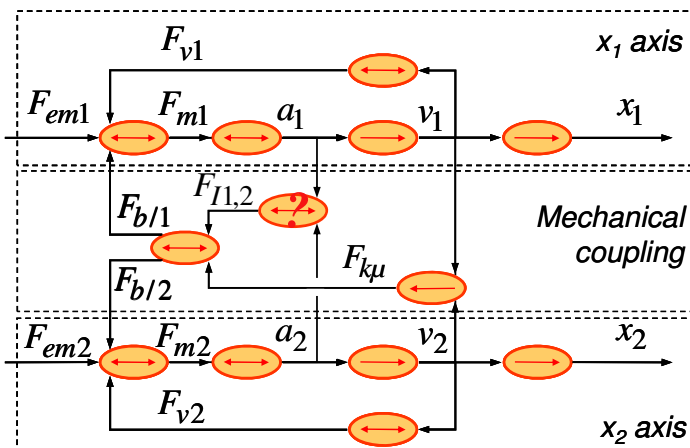
$$m_b + m_h ?$$

$$I_b + I_h ?$$

GIC de l'axe bi-actionné en gantry (axe x)



Contrainte de représentation dans la base des positions x_1 et x_2 .



$$m_b + m_h ?$$

$$I_b + I_h ?$$

Avec les relations rigides :

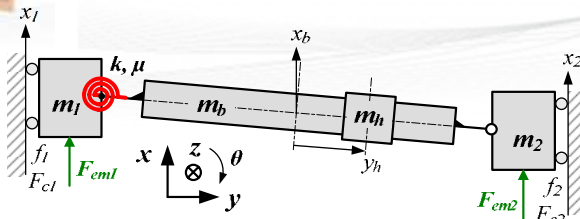
$$F_{I1} = \frac{m_{eqb}}{2} \cdot \ddot{x}_b + \frac{1}{L} \cdot I_{eqb} \cdot \ddot{\theta}_b$$

$$F_{I2} = \frac{m_{eqb}}{2} \cdot \ddot{x}_b - \frac{1}{L} \cdot I_{eqb} \cdot \ddot{\theta}_b$$

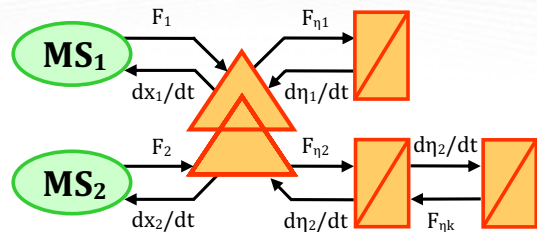
Csq : 2 boucles algébriques !

$$\left(\ddot{x}_b = \frac{a_1 + a_2}{2} ; \ddot{\theta}_b = \frac{a_1 - a_2}{L} \right)$$

REMarque : REM de l'axe bi-actionné en gantry



REM → représentation **énergétique fonctionnelle**
(= non structurée)



→ Impossible de respecter la contrainte de représentation dans la base des positions x_1 et x_2 !

→ Deux dynamiques distinctes

Translation : $\tau_{d0} \sim 1,3$ s

Rotation : $\tau_{d1} \sim 0,3$ s

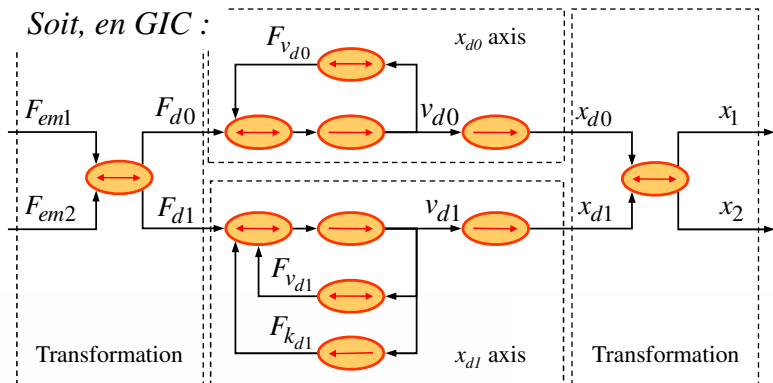
(autour du centre d'inertie = $f(y_h)$)

→ Pas de boucle algébrique

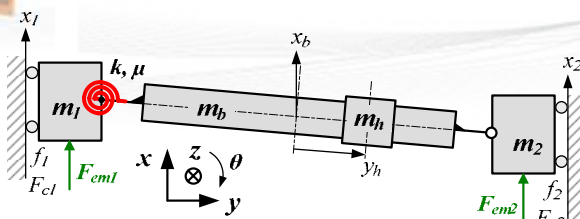
→ La REM :

- Outil plus contraignant,
- Représentation "plus physique"

Soit, en GIC :

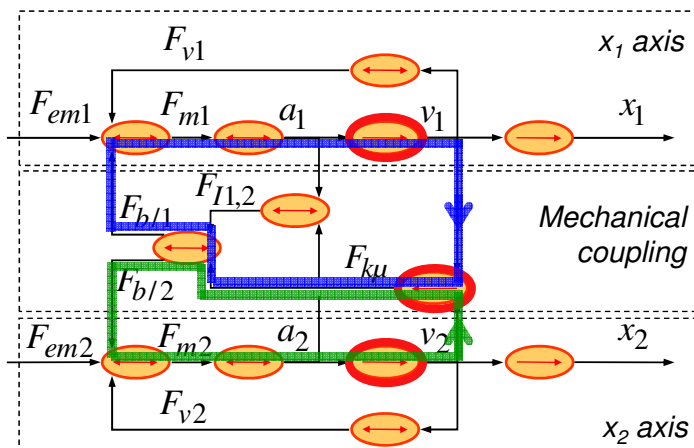


Analyse graphique d'une représentation causale

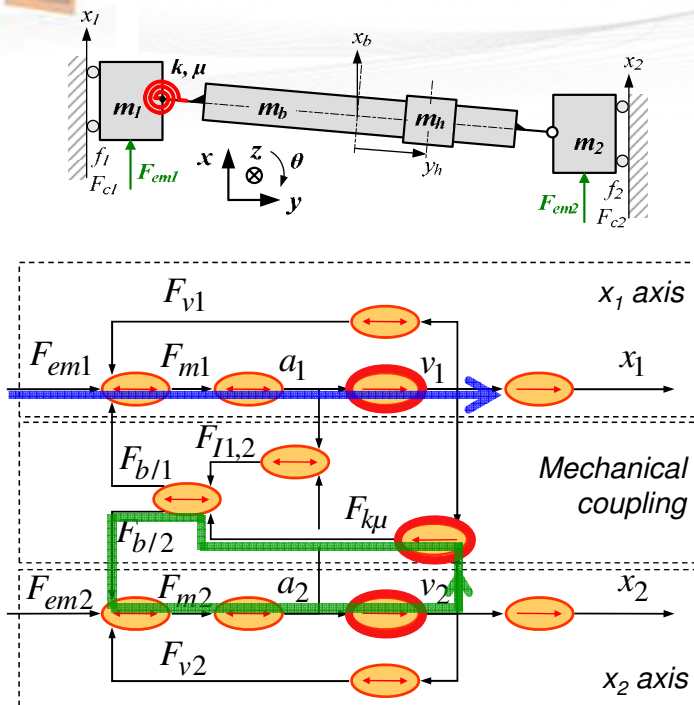


Exemple : v_1/F_{em1}

- Degré Dénominateur : 3 pôles
- 2 boucles causales d'ordre 2 interdépendantes
- 1 résonance possible



Analyse graphique d'une représentation causale



Exemple : v_1/F_{em1}

- Degré Dénominateur : 3 pôles
- 2 boucles causales d'ordre 2 interdépendantes
→ 1 résonance possible
- Degré Numérateur : 2 zéros
- 1 boucle causale d'ordre 2 indépendante du chemin causal
→ 1 antirésonance possible
- Calcul de fonctions de transfert
→ Règle de Mason applicable

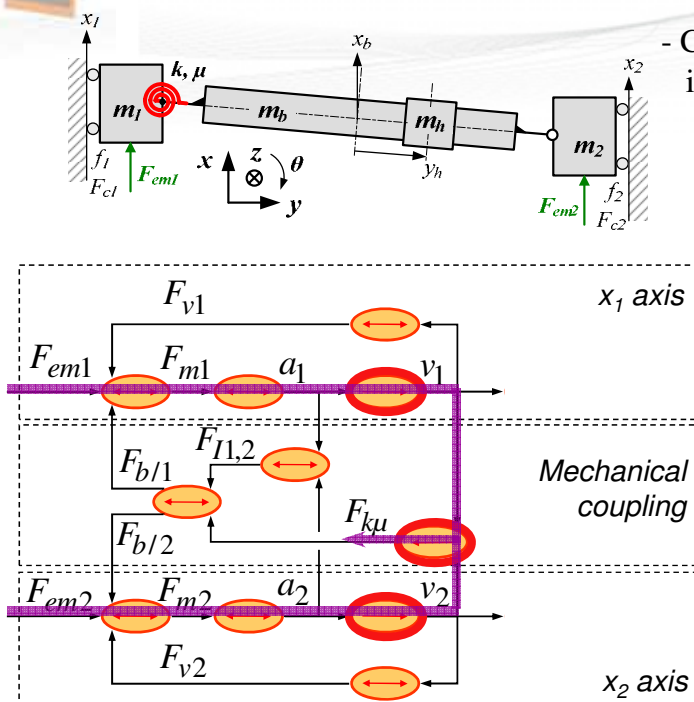


[Mason - 1956]

[Hautier - 1997]



Commandabilité structurale de la représentation



- Commandabilité **structurale** initialement définie pour le bond graph



[Dauphin-Tanguy - 2000]

→ Vecteur d'état : $[v_1 \ v_2 \ F_k]^T$ (Sorties des processeurs causaux)

Sur une représentation GIC :

1- Etats accessibles depuis les entrées par un chemin causal

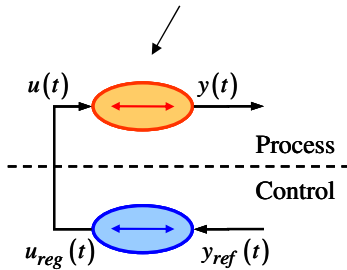
- si 2 entrées : F_{em1}, F_{em2} ✓

Rq : recherche de propriétés graphiques → ne s'appliqueront qu'à la structure de la représentation graphique → commandabilité **structurale**



Notion de commande par inversion de modèle (en GIC)

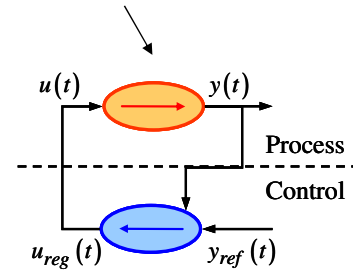
relation non causale ("rigide")
 $y(t) = R \cdot u(t) \rightarrow$ inversible



→ inversion directe

$$u_{reg} = R^{-1} \cdot y_{ref} \rightarrow \text{Nécessite la connaissance parfaite de } R \text{ (identification)}$$

relation causale → non inversible
 (causalité intégrale imposée)

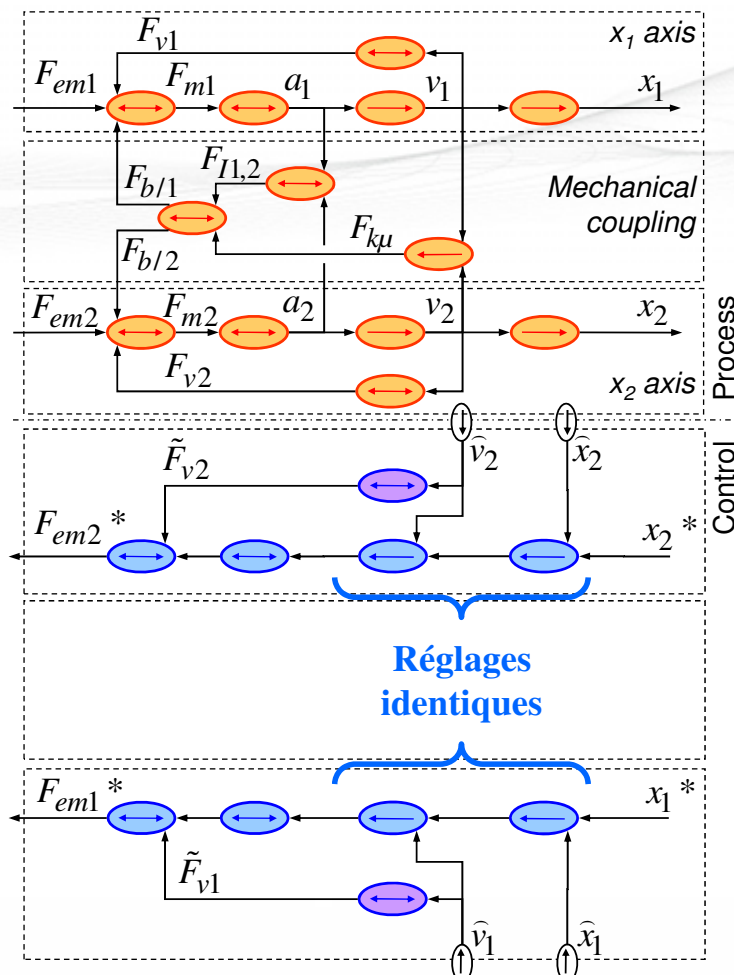


→ inversion indirecte = asservissement

$$u_{reg} = C(s) \cdot (y_{ref} - y_{mes})$$

Cas de l'axe bi-actionné en gantry :
 Inversion des axes x_1 et x_2

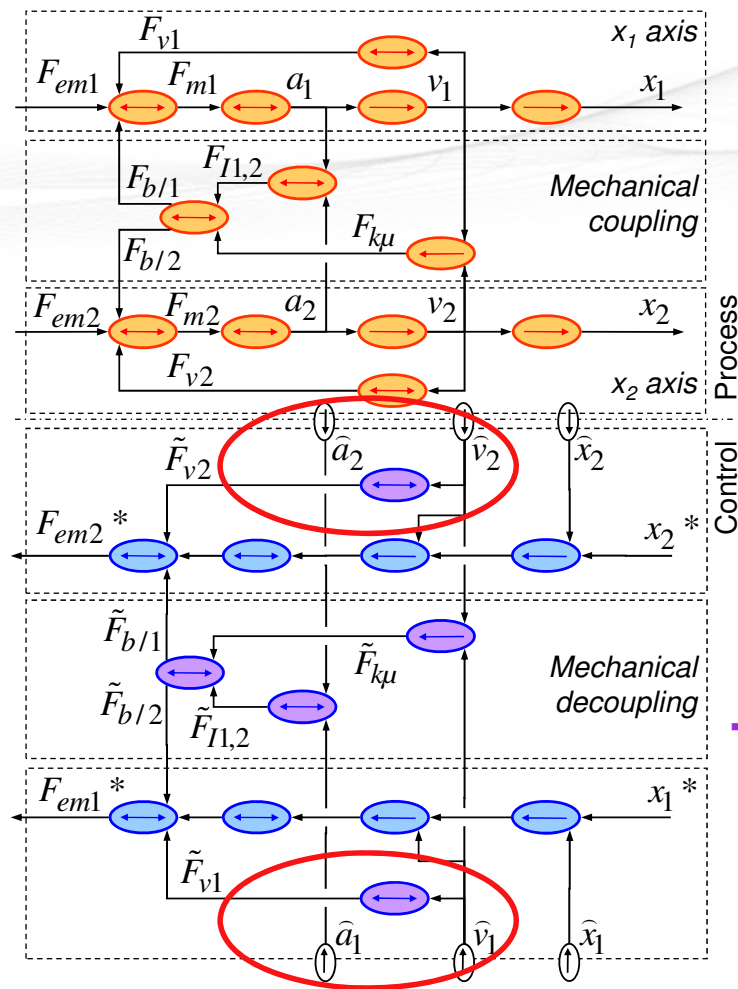
Commande industrielle initiale
 (référence de comparaison)



$$x_1^* = x_2^*$$

Inversion du couplage

Structure dite "Maximale" de Commande (SMC) : toutes les grandeurs sont considérées comme mesurables.

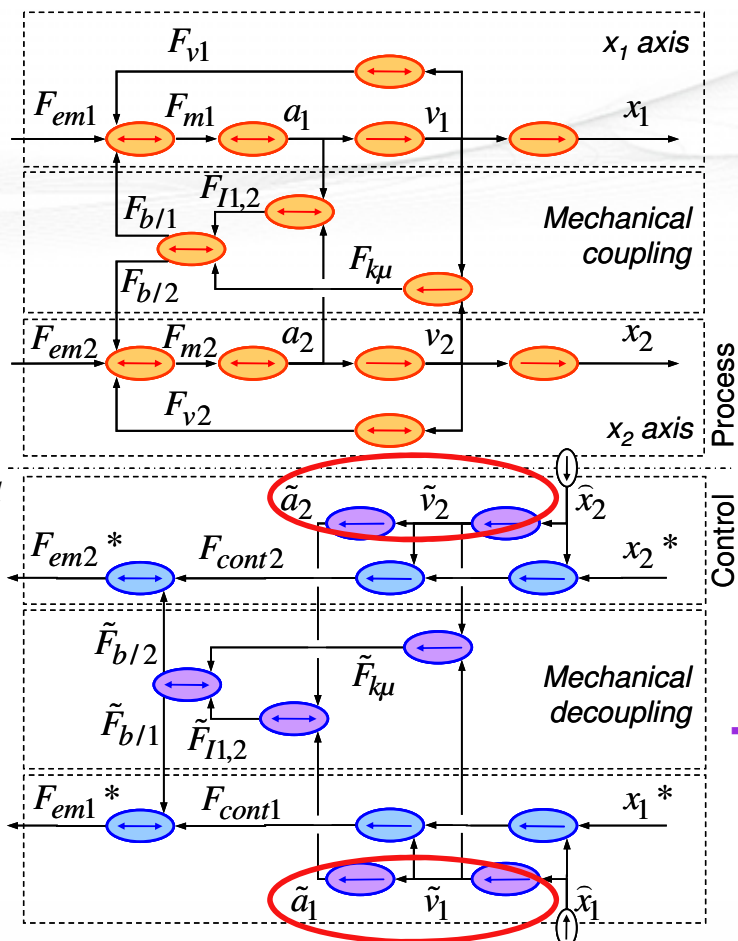


$$x_1^* = x_2^*$$

Structure d'estimation
→ Compensation des effets du couplage sur les deux axes

Structure "Pratique" de Commande

NB : Limite d'une estimation = retard introduit entre le phénomène compensé et la compensation
→ structure d'anticipation possible (ex : $M \cdot a_{ref}$)

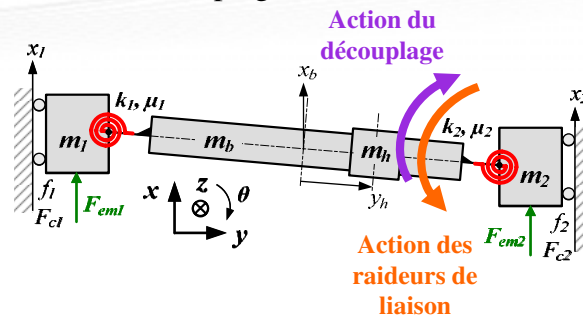


$$x_1^* = x_2^*$$

Structure d'estimation
→ Compensation des effets du couplage sur les deux axes

Réglage des asservissements de position ?

→ Analyse de l'effet du découplage :



→ Découplage parfait \Rightarrow deux axes théoriquement indépendants avec $m_1 \neq m_2$

→ Objectif = minimiser $\Delta x = x_1 - x_2$

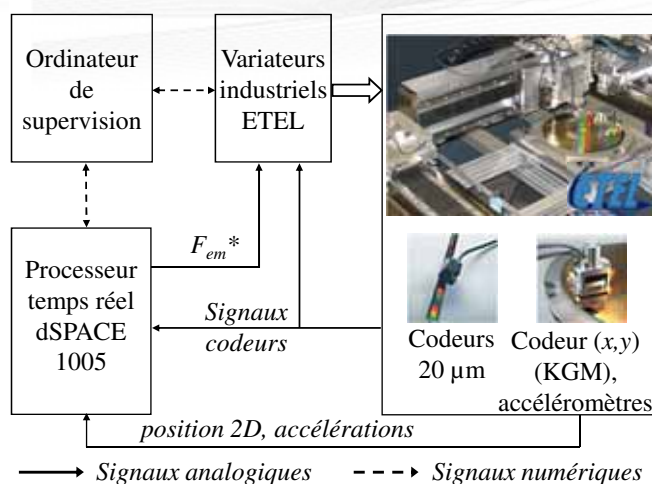
→ Symétriser les dynamiques des 2 asservissements

↳ Exploitation des paramètres **identifiés** du modèle

[B 1] J. Gomand, X. Kestelyn and P. J. Barre, "Einrichtung zum Regeln eines Portalrahmens mit zweifachem Antriebsmittel" ("Système de Régulation d'un Portique à Double Moyen d'Entraînement"), Deutsches Patent DE 10 2009 008 900 A1, Oct. 2009.

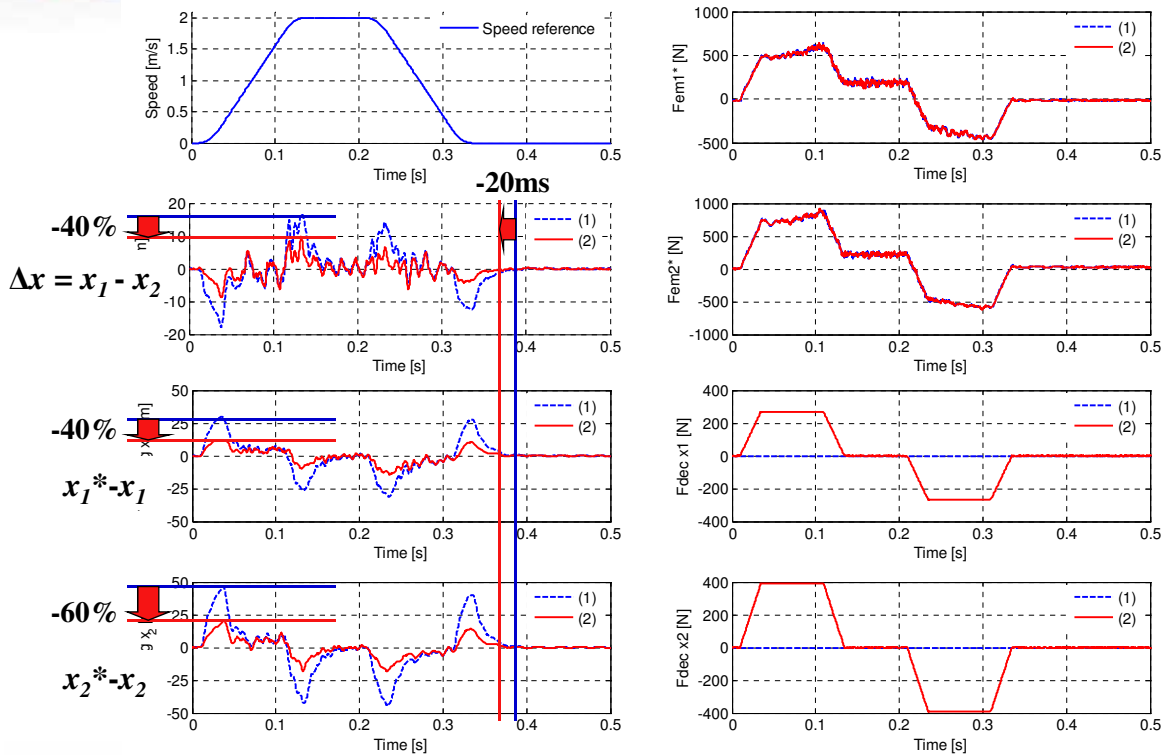


Banc d'expérimentation



Validation expérimentale avec anticipation

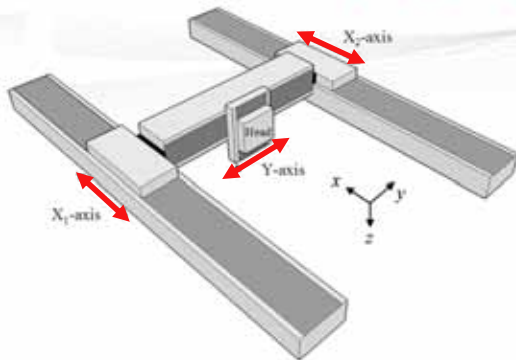
($M \cdot a_{ref}$) et Jerk ($T_j = 26.5$ ms)



(1) – Commande industrielle initiale (sans découplage)

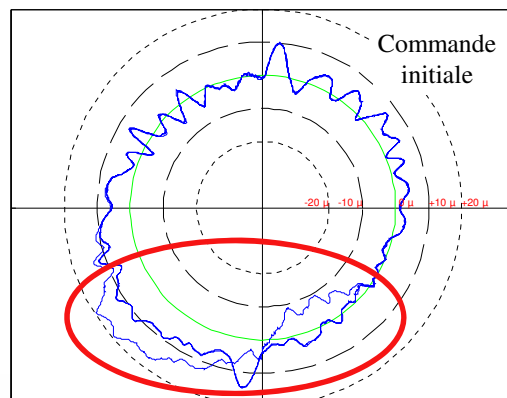
(2) – Commande avec compensation du couplage et symétrisation des dynamiques

Influence du couplage dynamique entre axes



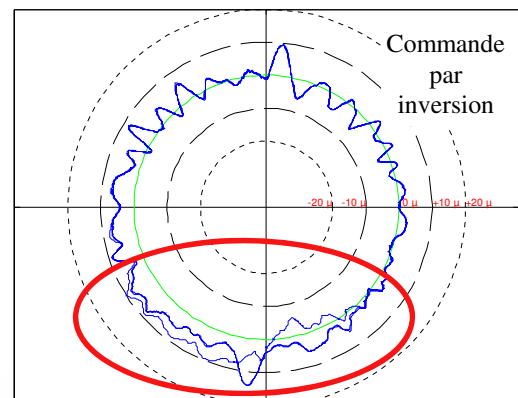
→ Génération de trajectoire de référence
[Béarée - 2005]

BALL BAR LINÉAIRE : R=100 mm, deltaR max=19.6 μ.



Mesures
Des règles
linéaires

BALL BAR LINÉAIRE : R=100 mm, deltaR max=14.3 μ.



Outils pour la modélisation et la commande de systèmes multi-physiques

I. Contexte et objectifs :

Pourquoi les outils de représentation multi-physiques ?

II. Application 1 (J. Gomand) :

Dispositif électromécanique de positionnement rapide

III. Application 2 (R. Béarée) :

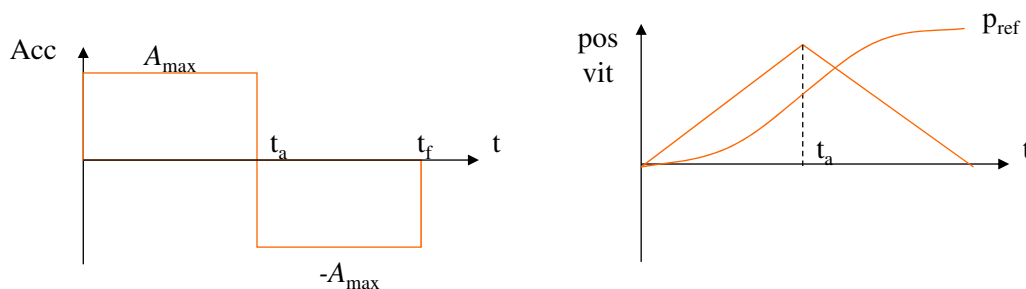
*Génération de référence basée sur la causalité
(exemple exploité en pédagogie)*

Conclusion

La génération de référence

- **Classiquement basée sur la cinématique d'un point matériel sujet à un ensemble de contraintes cinématiques**

La loi la plus usitée est la loi de commande en bang-bang d'accélération (minimise la durée du déplacement avec une contrainte sur l'accélération et la vitesse maximale)



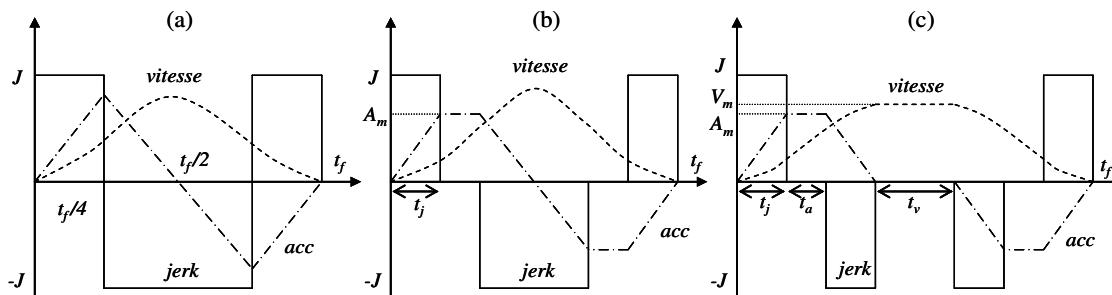
La mise en équation de ce type de loi est relativement simple

1. Déterminer t_a et t_f en fonction de $(A_{max}, V_{max}, P_{ref})$

La génération de référence

- **Mouvement plus doux = ajout de contraintes sur les dérivées de la position**

La limitation de la pente d'accélération (jerk) est répandue dans les générateurs de commandes des systèmes industriels.



La mise en équation de ce type de loi est moins simple

2. *Discuter des difficultés liées à l'implantation algorithmique de cette loi de mouvement*

Application au Val 206

- **Génération de vitesse du VAL (pas d'asservissement en position)**

Alimentation des systèmes de traction par les rails (DC voltage 750 V). Des émetteurs placés le long de la ligne indiquent la référence de vitesse (vitesse constante).



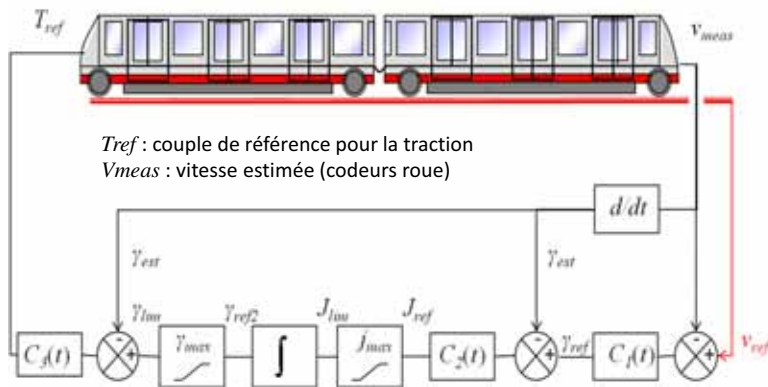
Val subway
Lille (France)

Nécessité de limiter le jerk pour assurer la stabilité et le confort des passagers lors des phases de démarrage et d'arrêt ($J = 0,65 \text{ m/s}^3$).

Application au Val 206

• Génération de vitesse du VAL

Méthode semi-empirique... et historique



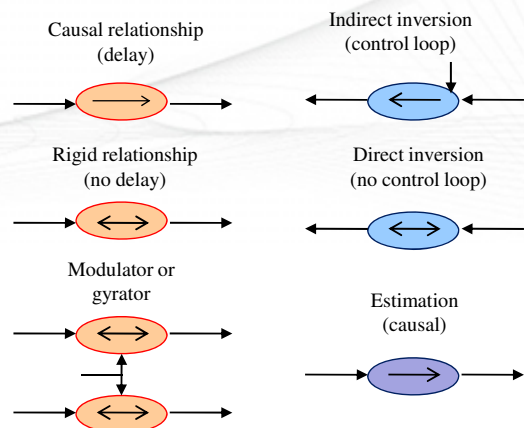
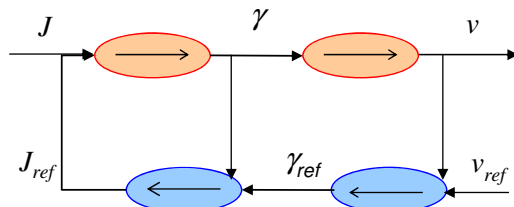
→ Combinaison (mélange!) d'aspects asservissements et génération de trajectoire

→ Bruits amplifiés par l'estimation de l'accélération

Rappel GIC

• La génération de consigne

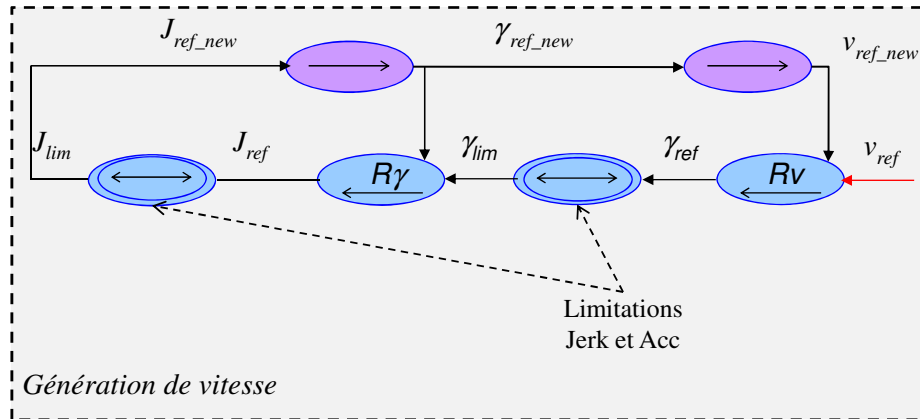
Principe de la génération causale



3. Pour des contraintes imposées sur la vitesse, l'accélération et le jerk, proposer un réglage des correcteurs de chaque boucle.

- La génération de consigne

1. On retrouve une structure par boucles imbriquées (sans mesure)
2. Les contraintes cinématiques sont intégrées par le biais de saturations
3. Le réglage des gains de boucle est analytique



Réglage :

$$R_\gamma : k_\gamma \rightarrow \infty$$

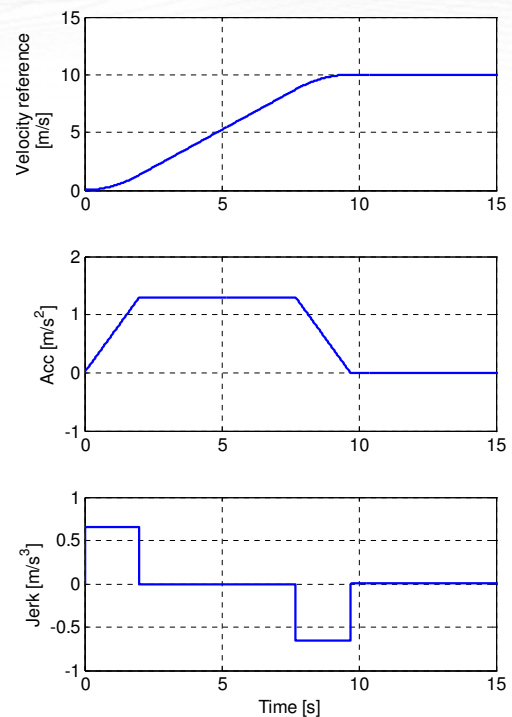
$$R_v : k_v = \frac{2J_{\max}}{\gamma_{\max}}$$

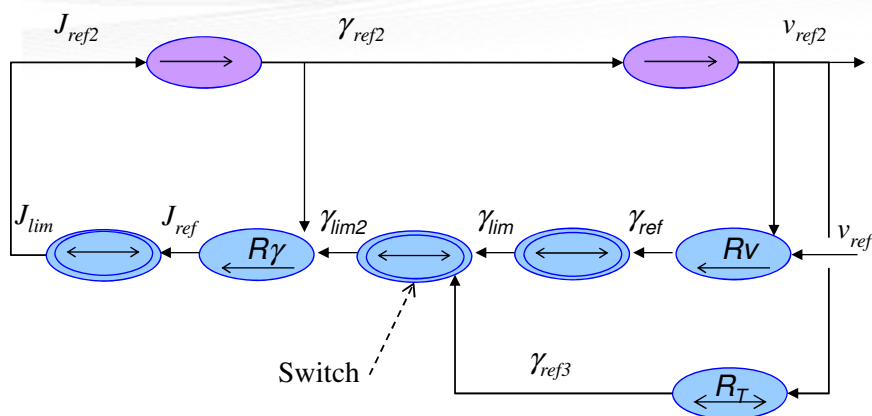
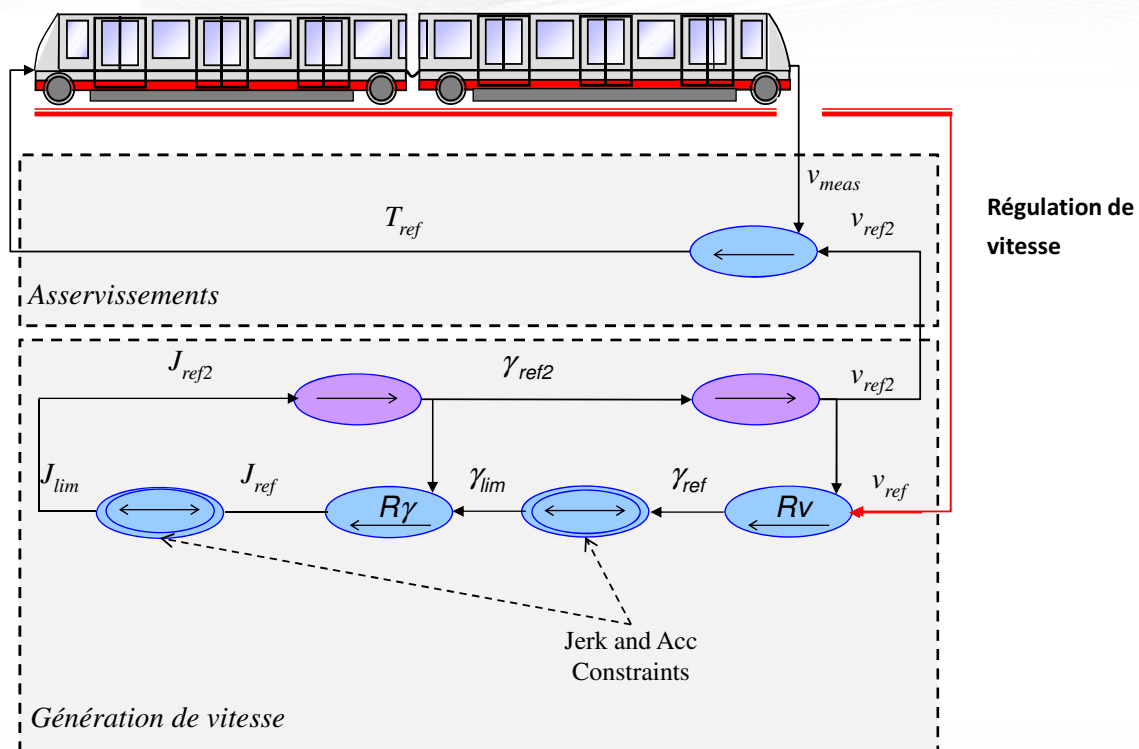
- Sortie du générateur

Exemple de planification de vitesse et ses dérivées ($v_{\text{ref}} = 10 \text{ m/s}$, $\gamma_{\max} = 1,3 \text{ m/s}^2$, $J_{\max} = 0,65 \text{ m/s}^3$).

On retrouve la loi à jerk limitée vue précédemment (Mais algorithme beaucoup plus simple).

→ L'implantation peut se faire facilement par filtre (analogique ou numérique) sans développement d'algorithme spécifique.



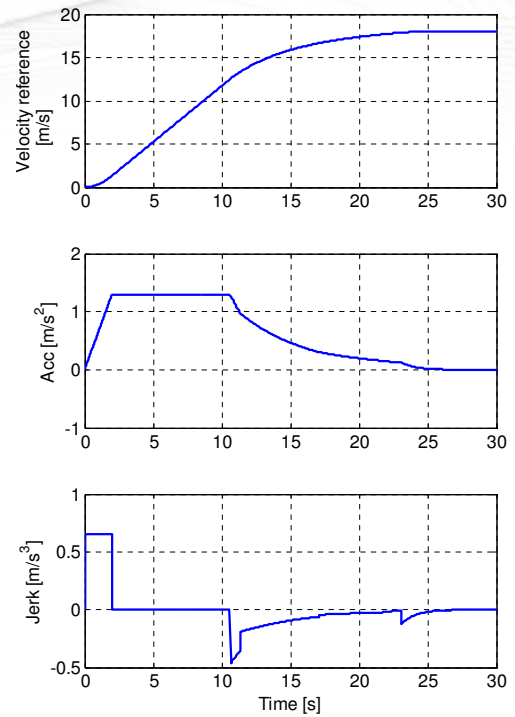


→ L'accélération est limitée en fonction du couple disponible sur les machines de traction (valeurs expérimentales issues d'une table (R_T))

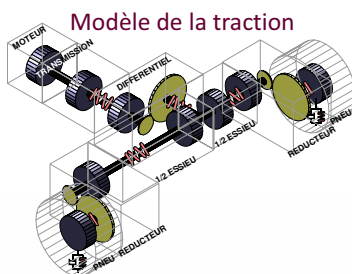
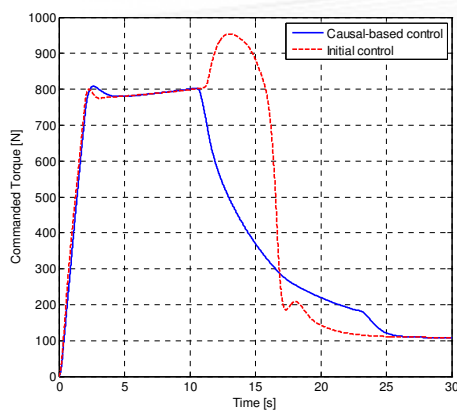
- Sortie du générateur

Exemple de planification de vitesse et ses dérivées ($v_{\text{ref}} = 18\text{ m/s}$, $\gamma_{\text{max}} = 1,3\text{ m/s}^2$, $J_{\text{max}} = 0,65\text{ m/s}^3$).

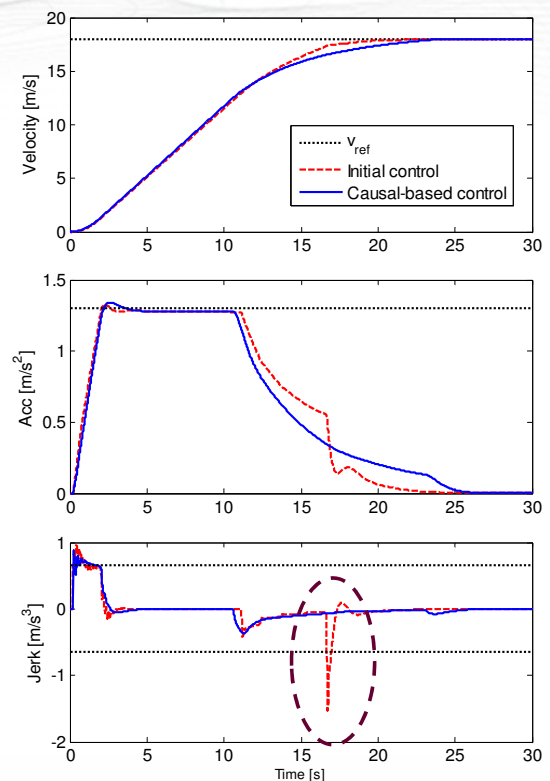
→ Ce nouveau générateur tient compte d'un modèle dynamique du système (ici la dynamique dominante des machines de traction)



4. Simulé la dynamique du VAL 206 avec cette nouvelle structure de commande



Vitesse simulée
(et ses dérivées)



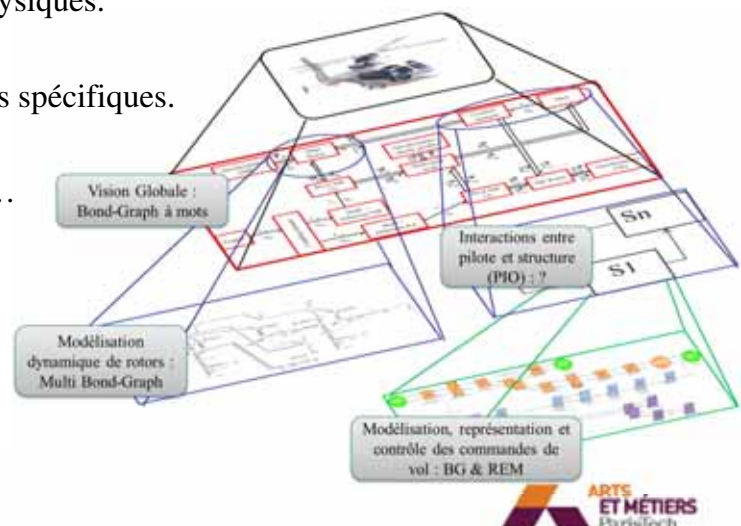
Génération de trajectoires causales

- Une méthode générique et efficace pour générer des lois de mouvement de type bang-bang.
- Aucun développement d'algorithme et réglage simple.
- Adapté au temps réel et implantation simple.

Application au VAL 206

- Les simulations confirment la validité du générateur de vitesse (contrainte de confort respectée).
- La nouvelle structure permet de dissocier génération de trajectoire et asservissement (suivi de trajectoire et rejet de perturbations)

- Deux exemples d'application du Graphe Informationnel Causal :
 - Modélisation et commande d'un axe de positionnement rapide bi-actionné ;
 - Génération de trajectoire appliqué au métro VAL.
- Le GIC (et les autres outils) : supports, aides à l'analyse et à la structuration de commande de systèmes multi-physiques.
- Des outils logiciels plus ou moins spécifiques.
- A chaque outil sa (ses) utilité(s)...





- [Béarée - 2005] R. Béarée, "Prise en compte des phénomènes vibratoires dans la génération de commande des machines-outils à dynamique élevée," Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), Déc. 2005.
- [Dauphin-Tanguy - 2000] G. Dauphin-Tanguy, "Les bond graphs," Editions Hermes Science Europe, 2000, ISBN 2-7462-0158-5.
- [Gomand - 2008] J. Gomand, "Analyse de Systèmes Multi-Actionneurs Parallèles par une Approche Graphique Causale – Application à un Processus Electromécanique de Positionnement Rapide," Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), Déc. 2008.
- [Hautier - 1997] J. P. Hautier, J. P. Caron, "Systèmes Automatiques, Tome 2 : Commande des Processus," Editions Ellipses, Paris 1997, ISBN 2-7298-9720-8.
- [Kim S. - 2003] S. Kim, B. Chu, D. Hong, H. K. Park, J. M. Park and T. Y. Cho, "Synchronizing Dual-Drive Gantry of Chip Mounter with LQR Approach," Proceeding of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003).
- [Mason - 1956] S. J. Mason, "Feedback theory: Further properties of signal flow graphs," MIT, Technical Report 303 of the Research Laboratory of Electronics, reprinted from Proc. IRE, vol. 44, pp. 920-926, July 1956.
- [Site L2EP] <http://www.univ-lille1.fr/l2ep/> > Outils, moyens, ressources > (GIC - [Bibliothèque](#))
http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/COG_Lib.zip
- [Verhille - 2010] J. N. Verhille, R. Béarée, A. Bouscayrol, Causal-based generation of velocity reference for automatic subways, Vehicle Power and Propulsion IEEE Conference - VPPC , 2010.