

Synthèse d'une commande en cascade GPC- H infinie des actionneurs électropneumatiques

Lotfi CHIKH

Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Paris
Le jeudi 8 Octobre 2009

Directeurs de thèse
Philippe Poignet
François Pierrot

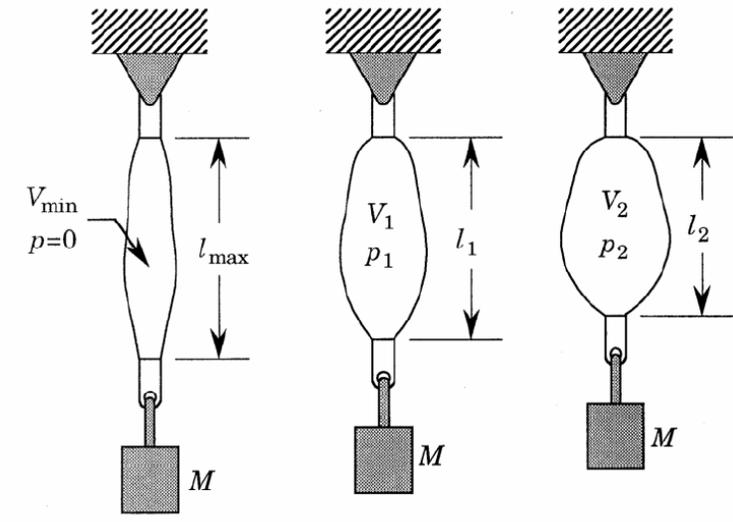
Responsables industriels:
Micaël Michelin
Cédric Baradat

Robots + Actionneurs
parallèles électropneumatiques



**Robot parallèle
Pneumatique à bas coût**

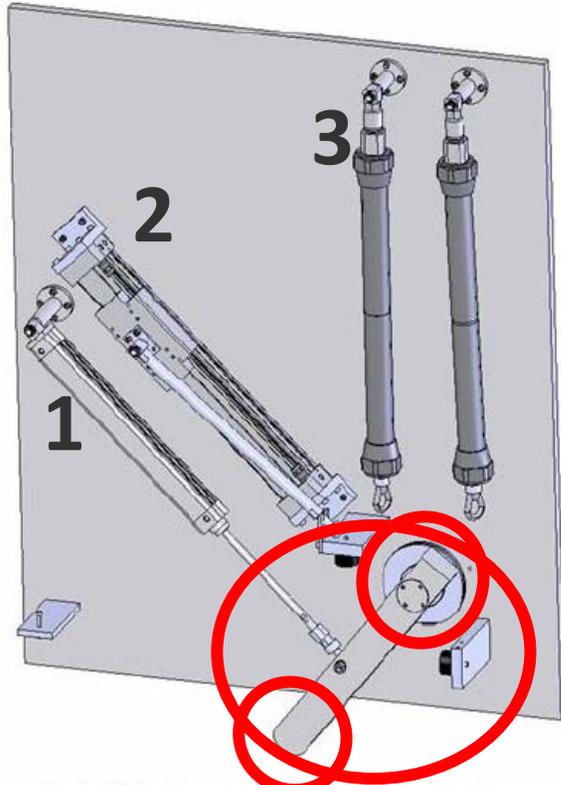
Charges de 5 à 10 Kg
1 à 2 mètres



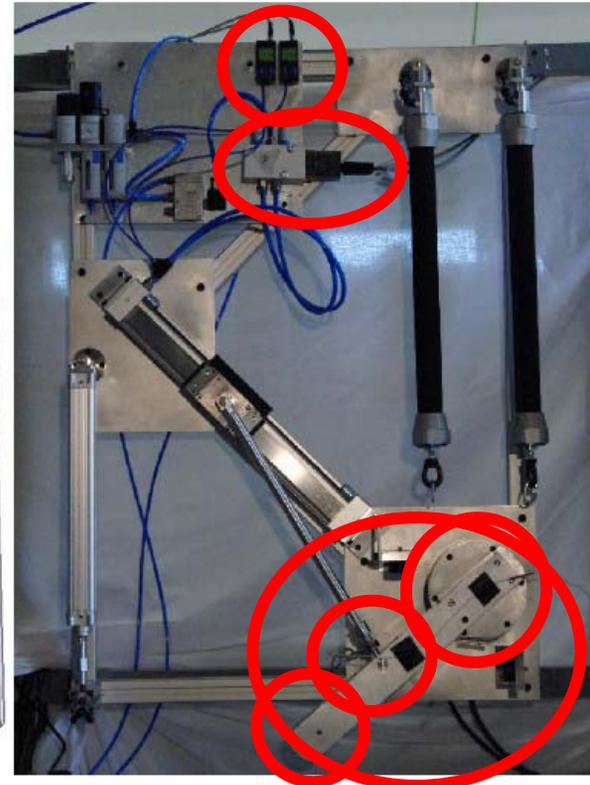
- Robot Adept Quattro -

Objectif scientifique →

Modélisation et synthèse robuste de lois de commande



(a) CAO setup representation



(b) Picture of the real setup



1. Vérin standard à double effet
2. Vérin sans tige
3. Les Muscles artificiels



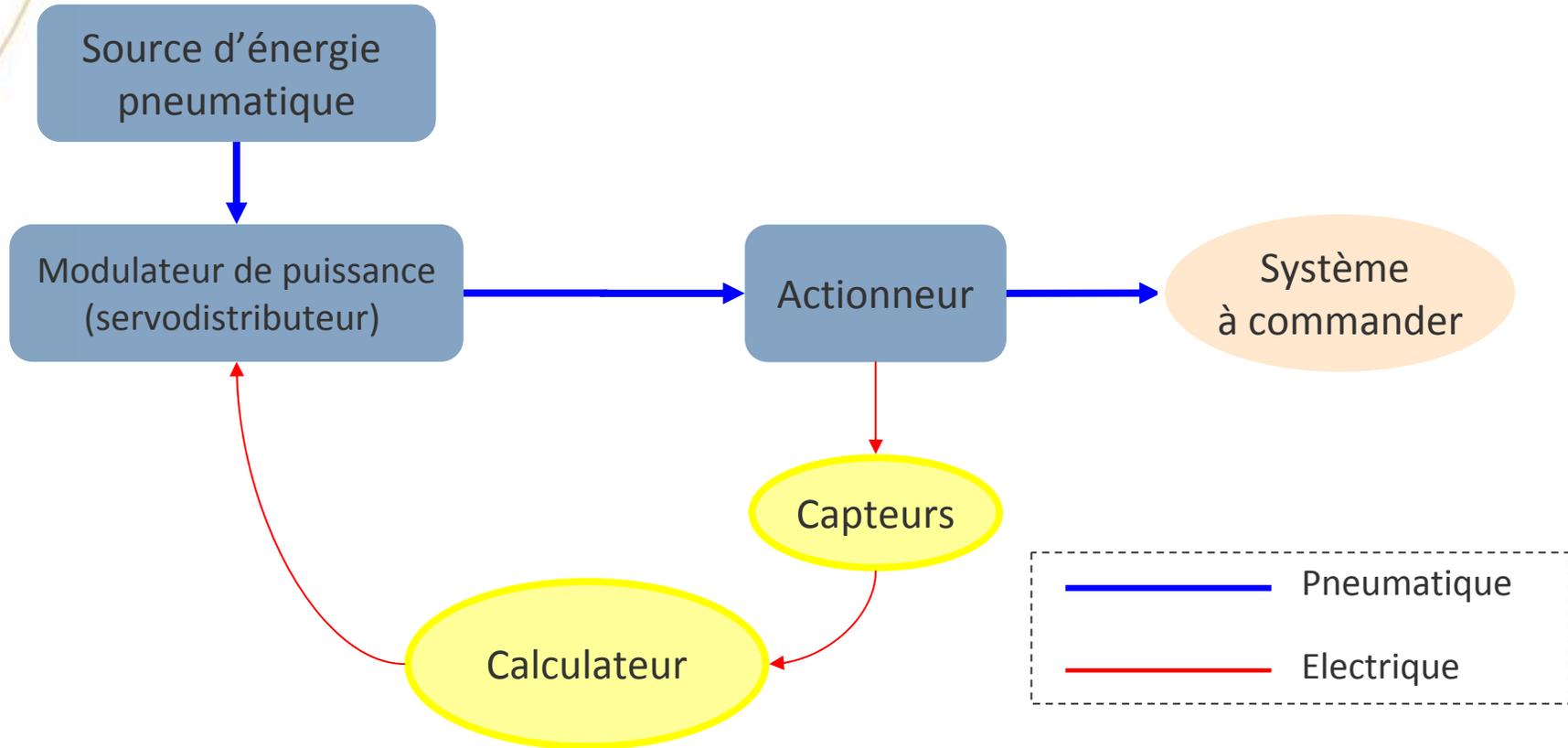
Plan de la présentation

Introduction/Problématique

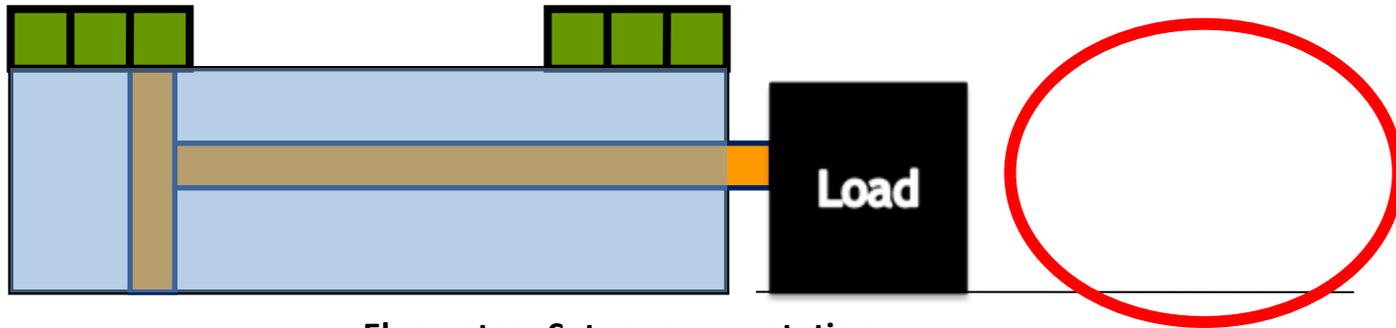
1. Modélisation du banc d'essai d'actionneurs pneumatiques
2. Synthèse de la commande et résultats expérimentaux
 1. Stratégie de commande des vérins
 2. Stratégie de commande des muscles artificiels

Conclusions et perspectives

I. Modélisation du banc d'essai



I. Modélisation du banc d'essai



- Elementary Setup representation -

Vérin à double effet

$$\frac{ds}{dt} = \dot{s}$$

$$\frac{d\dot{s}}{dt} = \frac{1}{M} [A_1 p_1 - A_2 p_2]$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{krT}{V_1(s)} [q_m(u, p) - \frac{A_1}{rT} p_1 \dot{s}]$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{krT}{V_2(s)} [q_m(u, p) + \frac{A_2}{rT} p_2 \dot{s}]$$

1. Valve proportionnelle

Evolution du débit massique en fonction de la tension et de la pression dans l'actionneur

2. Modèle thermodynamique

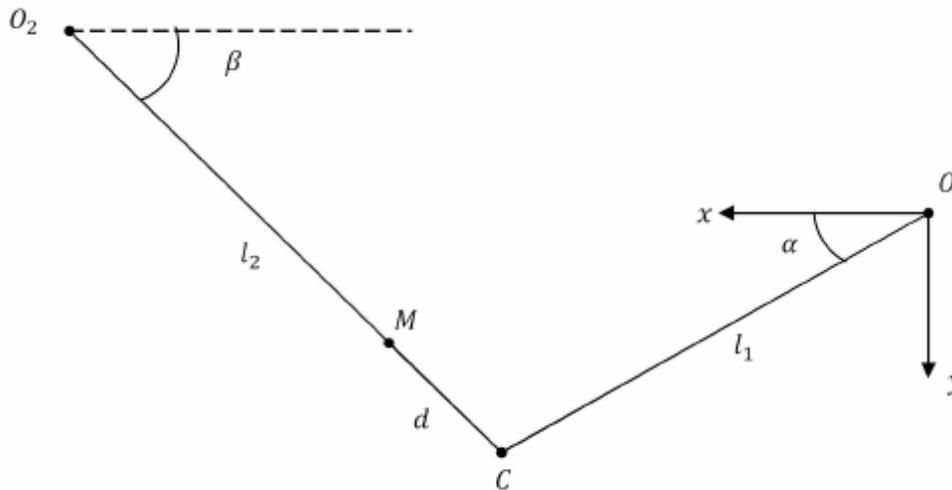
Chambre sous pression à volume variable

3. Partie mécanique

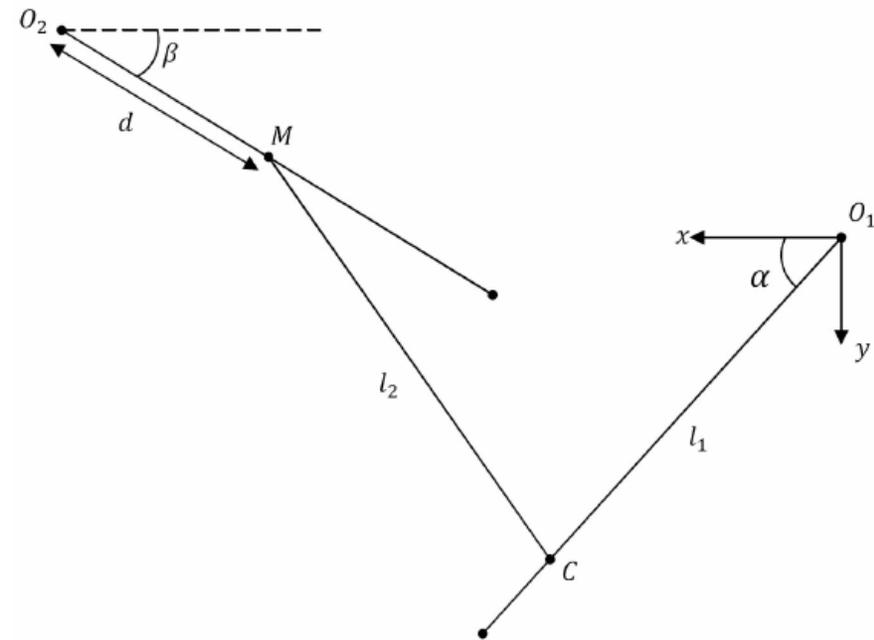
Schémas cinématiques

En négligeant les frottements, nous avons: $\ddot{s} = \frac{1}{M} [A_1 p_1 - A_2 p_2]$

DNC (vérin standard)



DGC (sans tige)

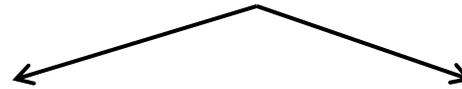


I. Modélisation du banc d'essai

Chambre à volume variable

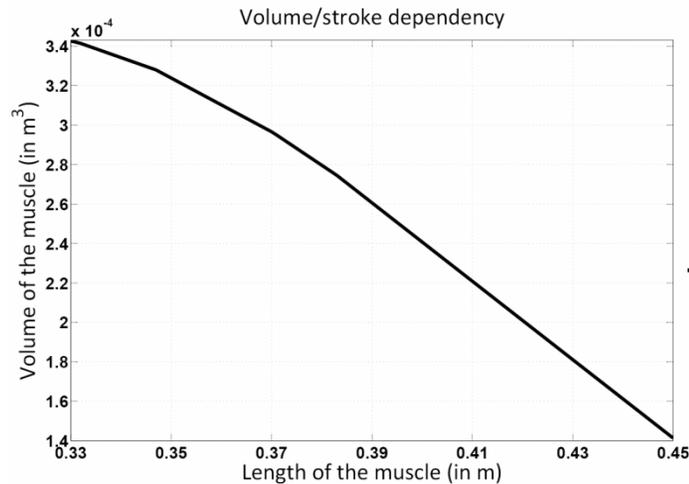
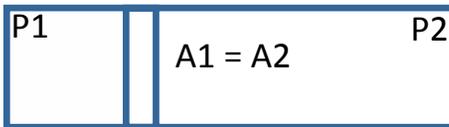
$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma}{V(s)} \left[rTq_m(u, p) - p \frac{dV}{ds} \dot{s} \right]$$

Relation volume/déplacement



$$V_i(s) = V_i(0) \pm A_i s$$

$$V_i(0) = A_i \frac{l}{2}$$



$$\rightarrow V(s) = \sum_{i=0}^3 b_i z^i$$

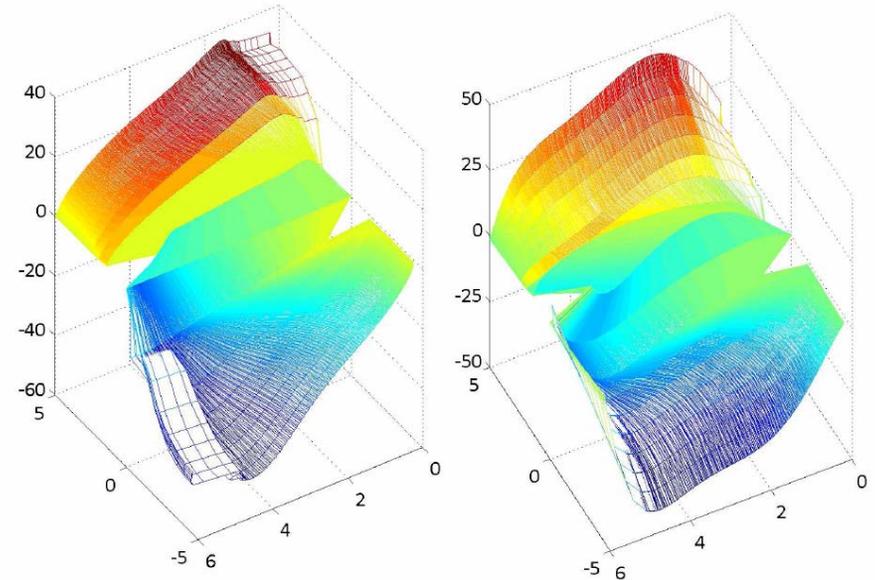
I. Modélisation du banc d'essai

Identification du modèle de la servovalve par utilisation du muscle artificiel (MAS40)

Identification des valves

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma}{V(s)} rT q_m(u, p)$$

$$q_m(u, p) = \frac{V(s)\dot{p}(u, p, s)}{\gamma rT} \Big|_{s=const}$$



Experimentally deduced characteristic(left) and identified proportional valve characteristic (right). Voltage in volt (X axis), pressure in bar (Y axis) and Mass flow rate in NI/min (Z axis)

Après optimisation

$$q_m(u, p) = \varphi(p) + \psi(p)u$$

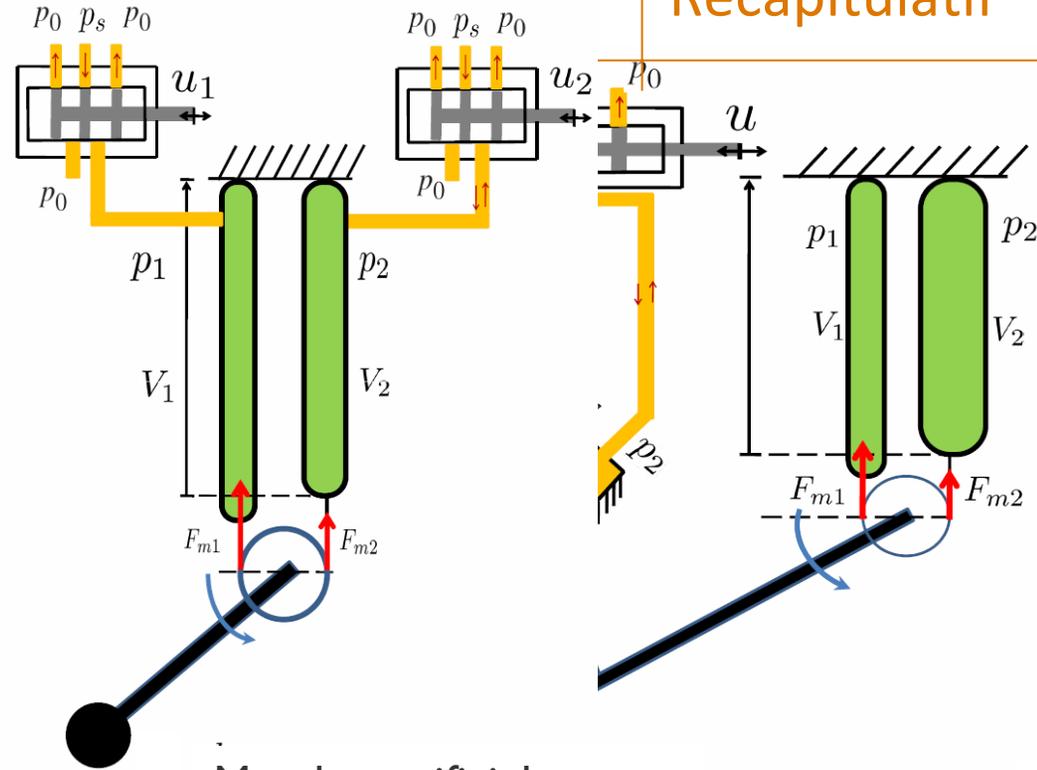
$$q_m(p, u) = a_0 + a_1p + a_2p^2 + a_3p^3 + a_4p^4 + a_5p^5 + (b_0 + b_1p + b_2p^2 + b_3p^3 + b_4p^4 + b_5p^5) u$$

I. Modélisation du banc d'essai

Récapitulatif

Modélisation

- Valve
- Dynamique des pressions
- Partie mécanique



Vérin à double effet

$$\frac{ds}{dt} = \dot{s}$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{M} [A_1 p_1 - A_2 p_2]$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{krT}{V_1(s)} [\varphi(p_1) + \psi(p_1)u_1 - \frac{A_1}{rT} p_1 \dot{s}]$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{krT}{V_2(s)} [\varphi(p_2) + \psi(p_2)u_2 + \frac{A_2}{rT} p_2 \dot{s}]$$

Muscles artificiels

$$\tau_m = I_{mov} \ddot{\alpha} + M_{mov} g d \cos(\alpha)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{krT}{V_1(s)} [\varphi(p_1) + \psi(p_1)u_1 - \frac{A_1}{rT} p_1 \dot{s}]$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{krT}{V_2(s)} [\varphi(p_2) + \psi(p_2)u_2 + \frac{A_2}{rT} p_2 \dot{s}]$$

$$V(s) = \sum_{i=0}^3 b_i z^i$$

$$u = u_1 = -u_2$$

II. Stratégies de commande et résultats expérimentaux

Avantages:

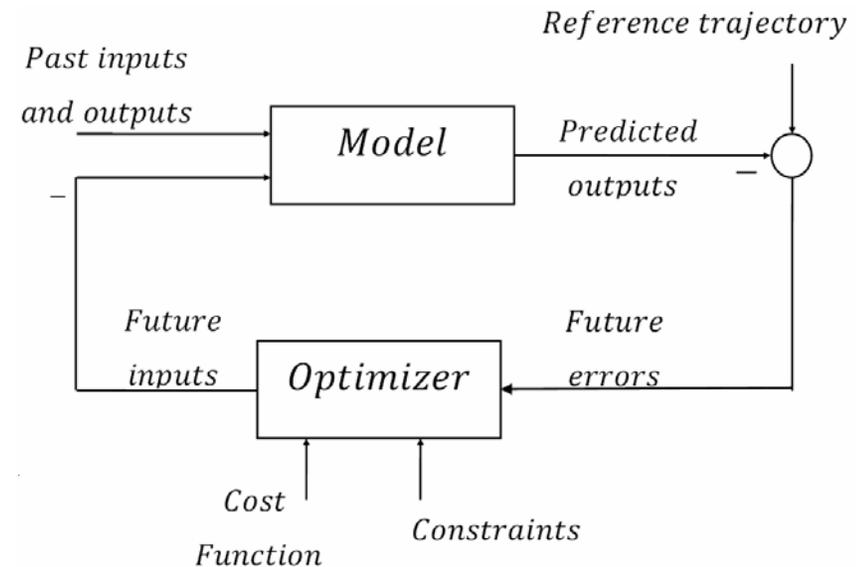
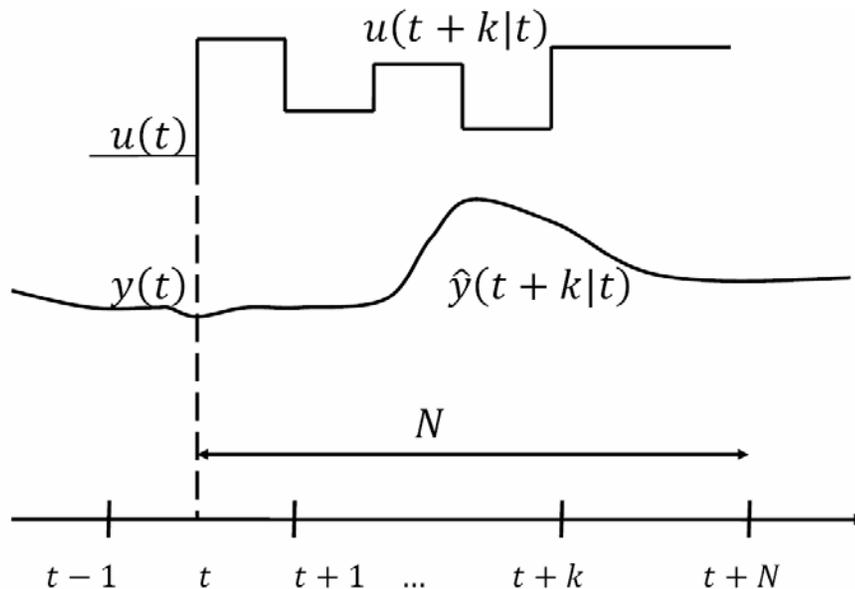
- Applicable à une grande variété de procédés.
- Ces concepts sont assez intuitifs et faciles à mettre en œuvre
- Particulièrement adaptée à la robotique

Inconvénients:

- Cas avec contraintes/non linéaire:
 - Pas de solution analytique
 - Nécessite beaucoup de calculs
- Nécessité d'un modèle approprié

Trois points essentiels:

- Utilisation d'un modèle de prédiction explicite de la sortie aux instants futurs (horizon)
- Calcul de la séquence de commande future par minimisation d'un critère
- Glissement de l'horizon (Receding strategy): à chaque instant, l'horizon est déplacé vers le futur. (Uniquement la première valeur de la séquence de commande est appliquée)

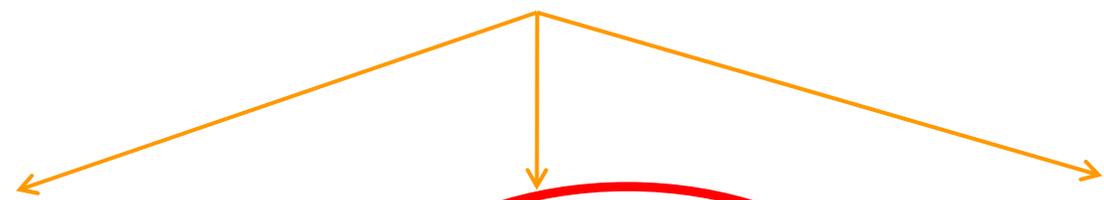


Modèle:

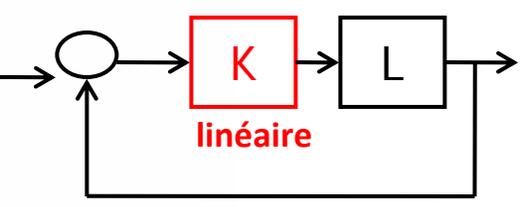
$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t)$$

Critère:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j)[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda(j)[\Delta u(t+j-1)]^2$$

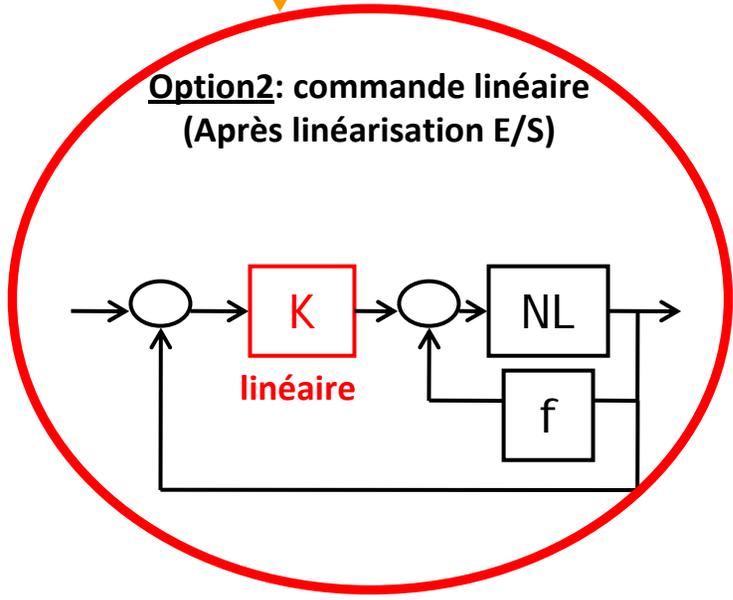


Option 1: Commande linéaire
(après Linéarisation autour
d'un point d'équilibre)



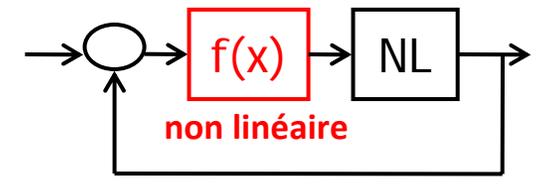
Bendov et al. 1995
Brun et al. 1999
Song et al. 2006

Option 2: commande linéaire
(Après linéarisation E/S)

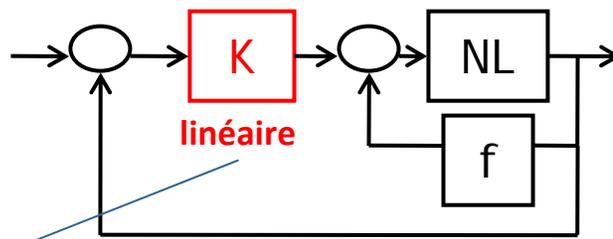


Brun et al. 1999
Khayati et al. 2004
Hildebrandt et al. 2002
Xiang et al. 2004
Kecskemethy et al 2008

Option 3: Commande non linéaire



Smaoui et al. 2006
Girin et al. 2009
Van Damme et al. 2008
Zhu et al. 2008, 2009



Commande prédictive (GPC)

$$\frac{ds}{dt} = \dot{s}$$

$$\frac{d\dot{s}}{dt} = \frac{1}{M} [A_p p_p - A_N p_N]$$

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{\gamma r T}{V_p(s)} \varphi(p_p) - p_p \frac{dV_p}{ds} \dot{s} + \frac{\gamma r T}{V_p(s)} \psi(p_p) u$$

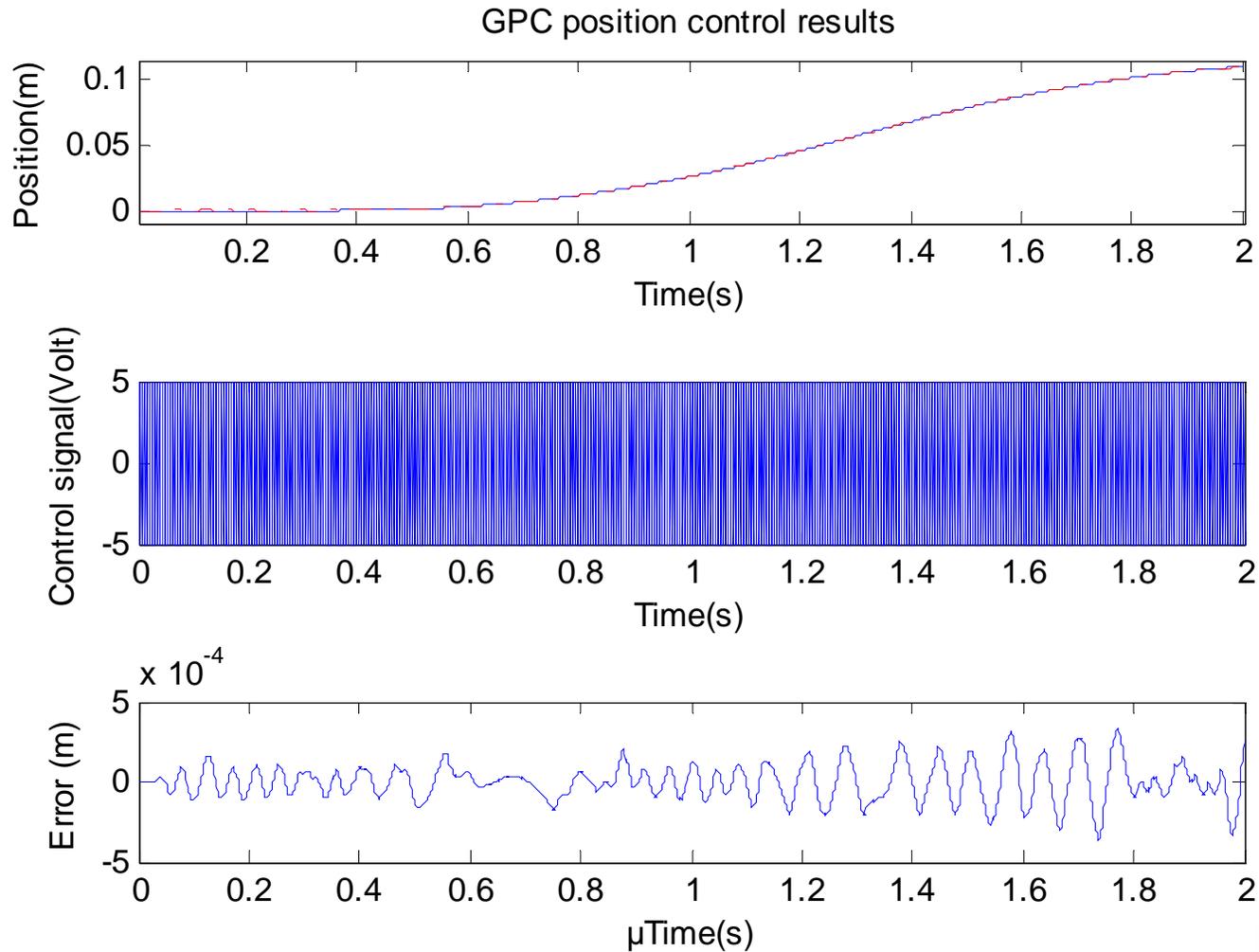
$$\frac{dp_N}{dt} = \frac{\gamma r T}{V_N(s)} \varphi(p_N) - p_N \frac{dV_N}{ds} \dot{s} - \frac{\gamma r T}{V_N(s)} \psi(p_N) u$$

En dérivant la sortie une troisième fois, nous obtenons:

$$s^{(3)} = \frac{A}{M} \left[\frac{\gamma r T}{V_p(s)} \phi(p_p) - \frac{\gamma A}{V_p(s)} p_p \dot{s} - \frac{\gamma r T}{V_N(s)} \phi(p_N) - \frac{\gamma A}{V_N(s)} p_N \dot{s} \right] + \frac{A}{M} \left[\frac{\gamma r T}{V_p(s)} \psi(p_p) + \frac{\gamma r T}{V_N(s)} \psi(p_N) \right] u$$

$$\longrightarrow s^{(3)} = u_{aux}$$

Résultats obtenus (schéma classique)



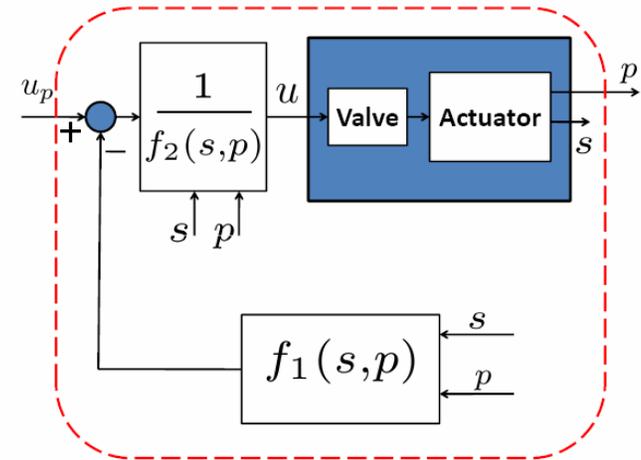
Sortie du système: pression (ou différence de pression)

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma r T}{V(s)} q_m(u, p) - \frac{\gamma}{V(s)} p \frac{dV}{ds} \dot{s}$$

$$q_m(u, p) = \varphi(p) + \psi(p)u$$

$$\frac{dp}{dt} = \underbrace{\frac{\gamma r T}{V(s)} \varphi(p)}_{f_1(s,p)} - p \frac{dV}{ds} \dot{s} + \underbrace{\frac{\gamma r T}{V(s)} \psi(p)}_{f_2(s,p)} u$$

(Modèle affine en la commande)



En appliquant:

$$u = \frac{V(s)}{\gamma r T \psi(p)} \left[-\frac{\gamma r T}{V(s)} \varphi(p) + p \frac{dV}{ds} \dot{s} + u_p \right]$$

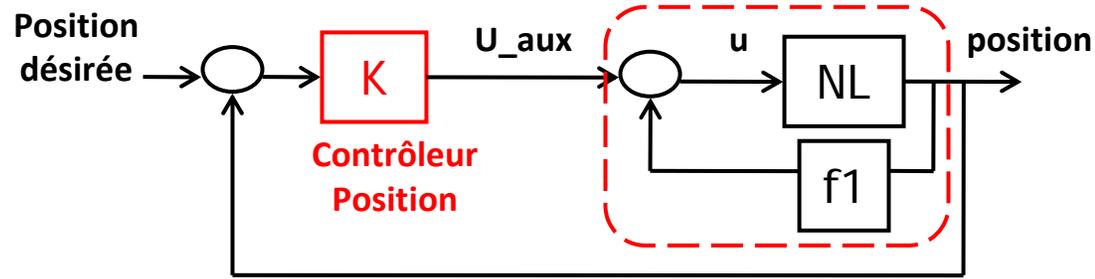
On aboutit à $\dot{p} = u_p$

Pour les cylindres:

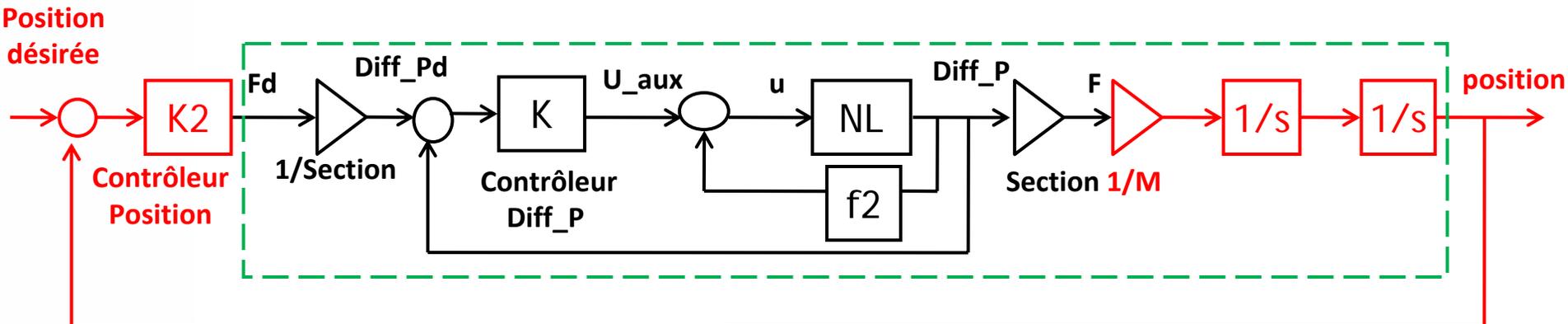
$$\dot{p}_P - \dot{p}_N = \underbrace{\gamma r T \left[\frac{\varphi(p_P)}{V_P(s)} - \frac{\varphi(p_N)}{V_N(s)} \right]}_{f'_1(s, p_P, p_N)} - \left[p_P \frac{dV_P}{ds} - p_N \frac{dV_N}{ds} \right] \dot{s} + \underbrace{\gamma r T \left(\frac{\psi(p_P)}{V_P(s)} - \frac{\psi(p_N)}{V_N(s)} \right)}_{f'_2(s, p_P, p_N)} u$$

II. Stratégies de commande

Commande classique vs. Commande en cascade



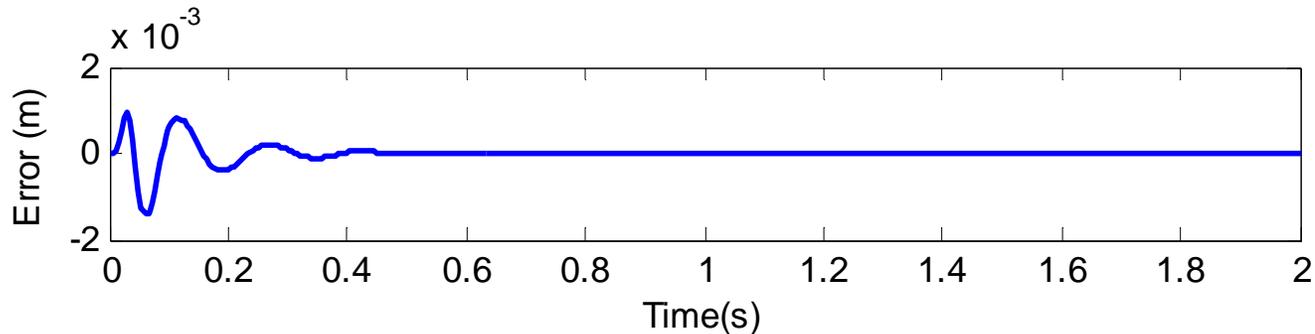
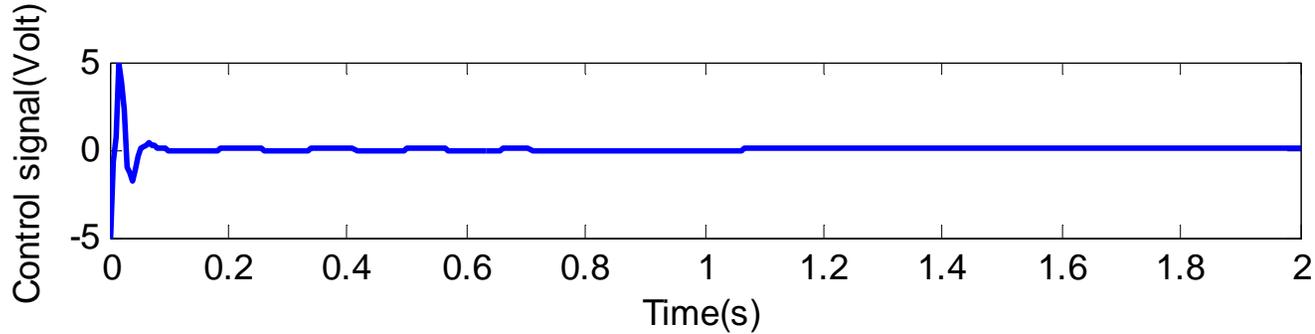
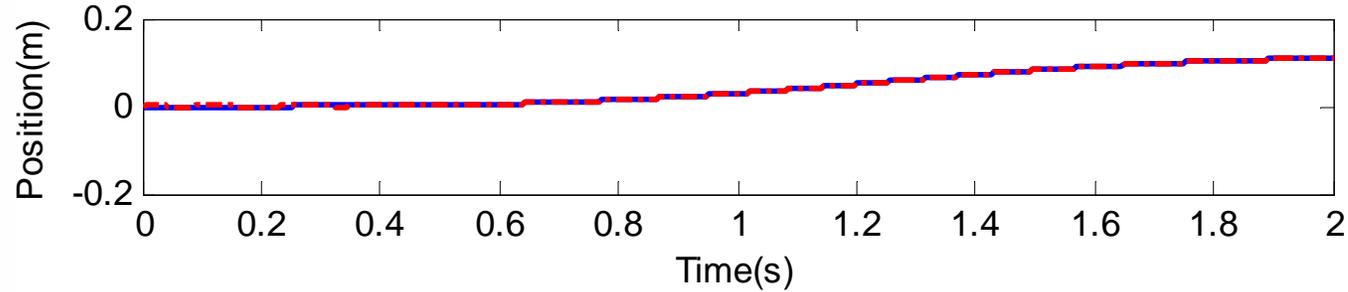
- Schéma classique -



- Schéma en cascade diff_P/Position-

Commande combinée GPC/H infinie (cascade position/pression)

GPC controller position tracking results



Vérins

F. Xiang and J. Wikander. Block-oriented approximate feedback linearization for control of pneumatic actuator system. *Control Engineering Practice*, 12:387–399, 2004.

H.K. Lee, Choi G.S., and Choi G.H. A study on tracking position control pneumatic actuators. *Mechatronics*, 12:813–831, 2002.

Muscles

Joachim. Schröder, Kazuhiko. Kawamura, Tilo. Gokel, and Rüdiger. Dillmann. Improved control of a humanoid arm driven by pneumatic actuators. In *International Conference on humanoid Robots*, 2003.

A. Hildebrandt, O. Sawodny, and R. Neumann. Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four artificial pneumatic muscle actuators. In *American Control Conference. June 8-10, 2005. Portland, OR, USA.*, 2005.

Synthèse de commande multi-objectifs (H infinie + placement de pôles)

Deux fonctions essentielles d'un asservissement

- Imprimer un comportement désiré au système.
- Maintenir ce comportement face aux différentes fluctuations qui l'affectent.

Utilisation de Normes:

- Aussi bien des outils d'analyse (stabilité) que de synthèse de commande
- Le choix d'une norme au profit d'une autre obéit à des motivations physiques



Norme \mathcal{H}_∞

$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{\omega \geq 0} \bar{\sigma}(G(j\omega))$$

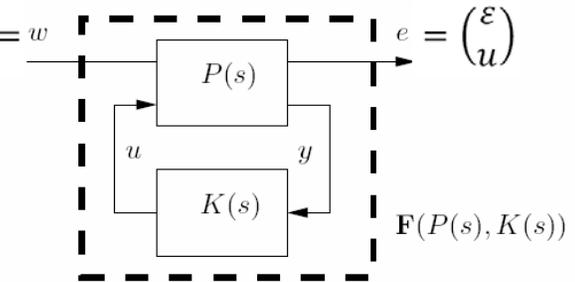
L'effort de minimisation est centré sur une seule fréquence, *la pire*, les performances qui en découlent sont assurées pour toutes les autres fréquences, a priori.

Norme \mathcal{H}_2

$$\|G(s)\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}} \text{trace}(G^*(j\omega)G(j\omega))$$

L'effort de minimisation est distribué sur toutes les fréquences.

w : vecteur des entrées extérieures (référence, bruit, perturbation..)
 $\begin{pmatrix} r \\ b \end{pmatrix} = w$
 u : représente les commandes
 e : signaux choisis pour représenter le bon fonctionnement du système
 y : représente les mesures disponibles pour élaborer la commande



Problème H infinie standard:

$P(s)$ et $\gamma > 0$ étant donnés, déterminer $K(s)$ qui stabilise le système bouclé de la figure précédente et qui assure :

$$\|F_l(P(s), K(s))\|_{\infty} < \gamma$$

Equation de Riccati
(Algorithme de Glover Doyle)

4 conditions à satisfaire

Inégalités Matricielles Affines (LMI)

1 condition à satisfaire

Rajout de contraintes se fait de façon naturelle

Définition: Une Inégalité Matricielle Linéaire (LMI) est toute contrainte de la forme:

$$A(x) = A_0 + x_1 A_1 + \dots + x_N A_N < 0 \quad (1)$$

Problème/Inconvénient de la commande H-infinie:

Elle opère dans le domaine fréquentiel ce qui laisse peu de maîtrise du comportement temporel en régime transitoire (localisation des pôles en boucle fermée)



Combiner des objectifs de placement de pôles et des performances H infinie

$$\begin{pmatrix} A^T X + X A & X B & C^T \\ B^T X & -\gamma I & D^T \\ C & D & -\gamma I \end{pmatrix} < 0 \quad (1)$$

(Théorème borné réel)

Notion de région LMI (approche développée par Chilali et al. 1996)

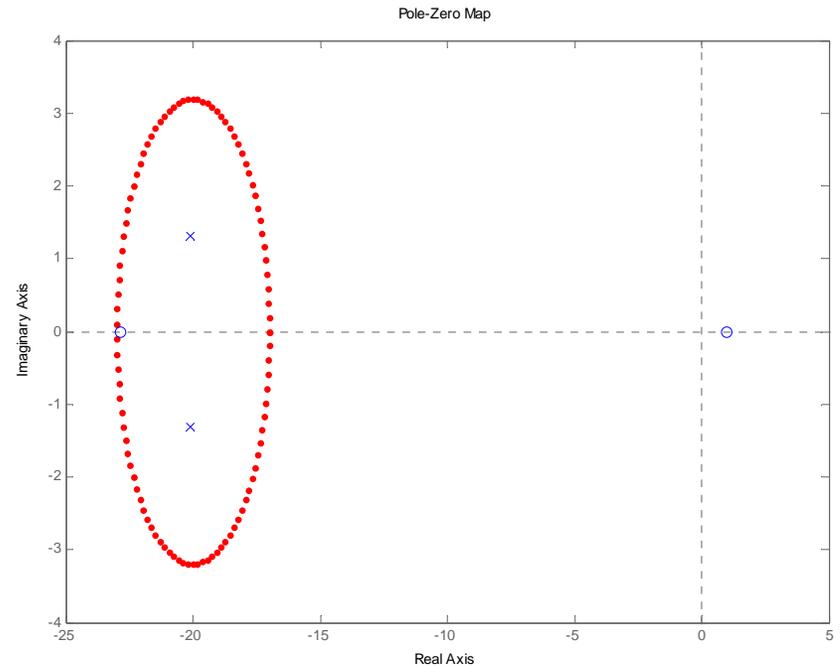
M. Chilali and P. Gahinet. H-infinity design with pole placement constraints: an LMI approach. IEEE Transactions on Automatic Control, 41(3):358-367, March 1996.

Exemple:

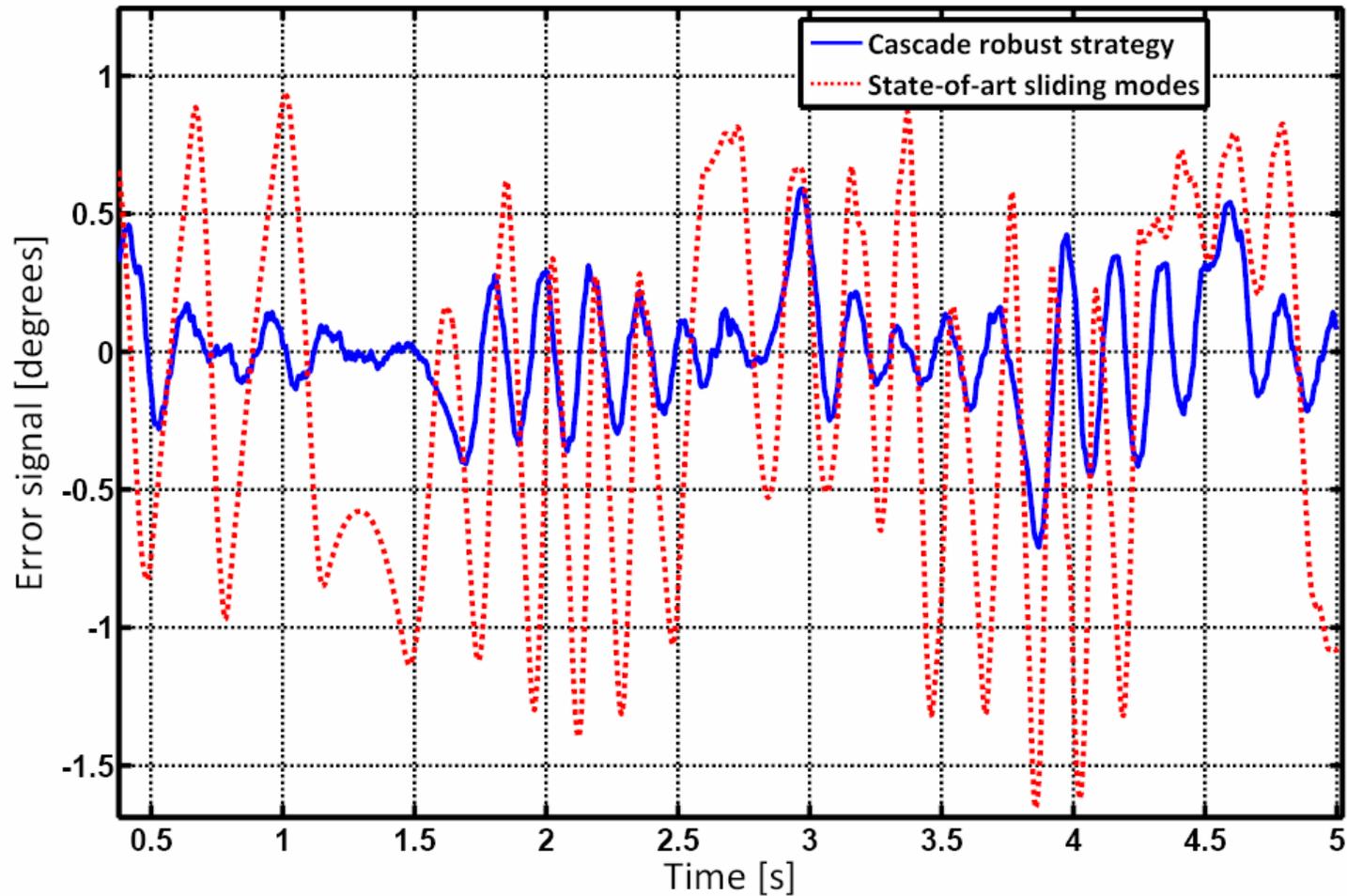
q = 20 et r = 3



$$K(s) = \frac{-17.72 s - 405.2}{s + 22.46}$$

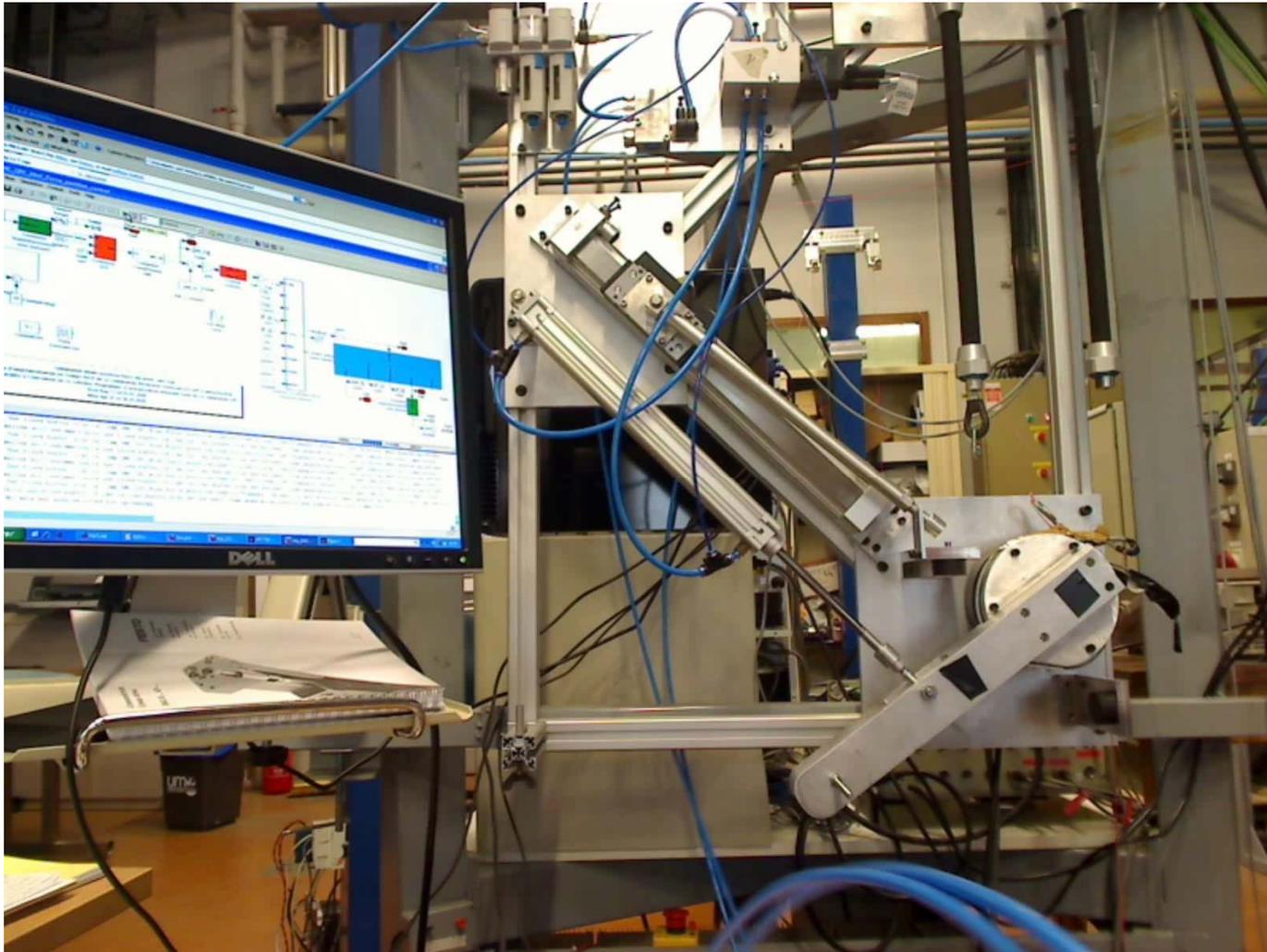


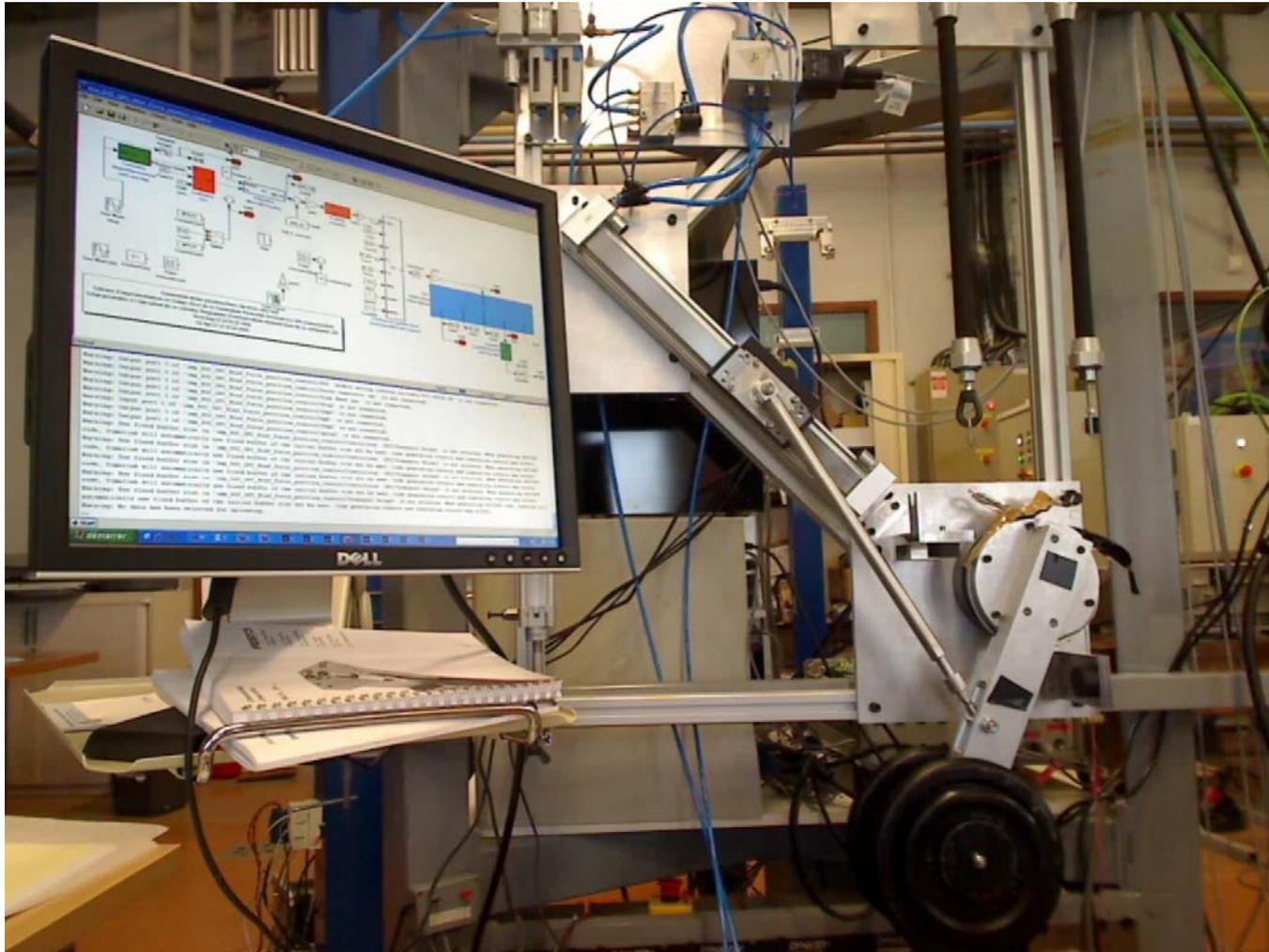
Robustness tracking result comparison



II. Stratégies de commande

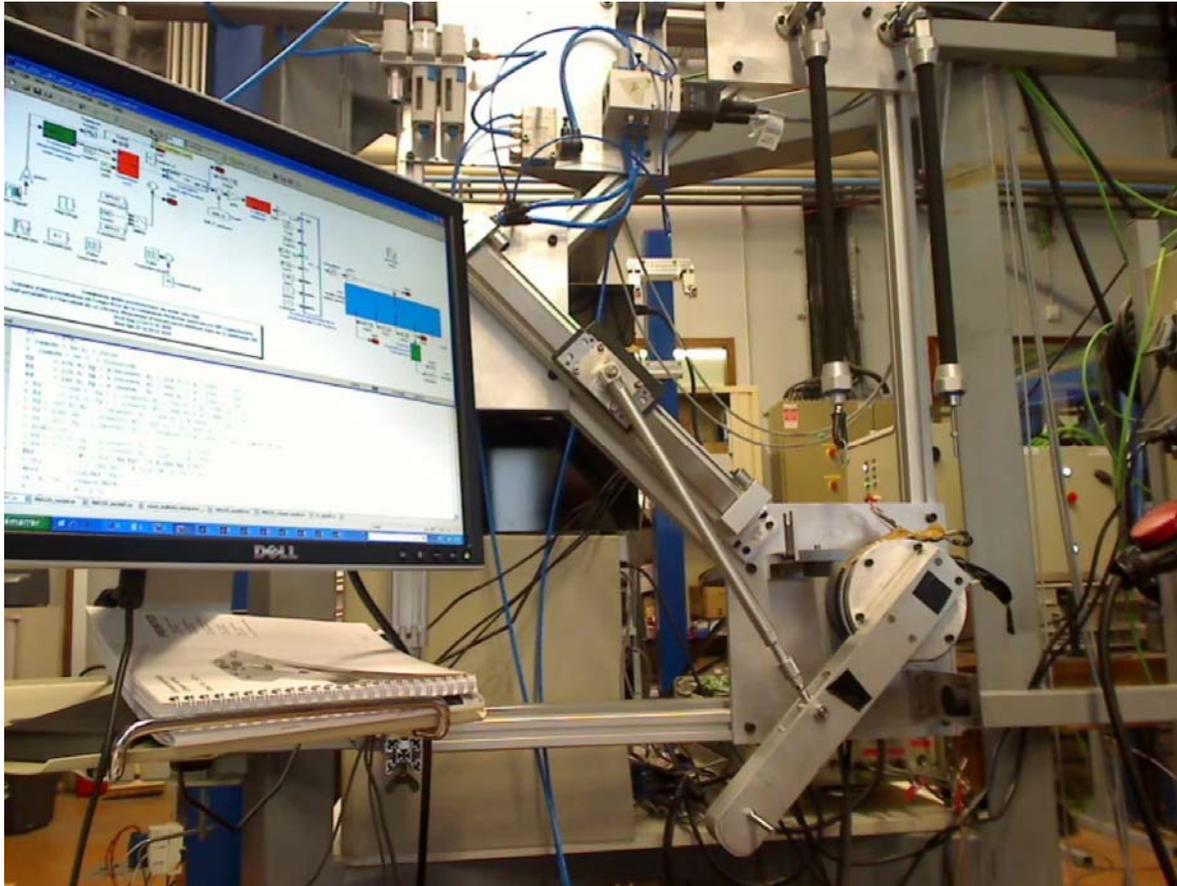
Quelques vidéos des vérins





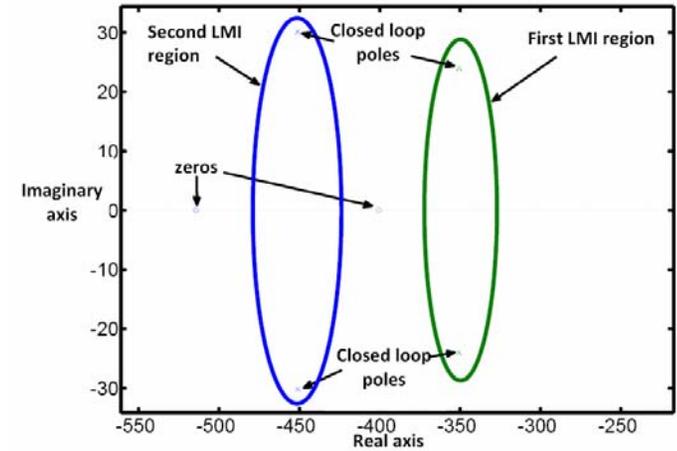
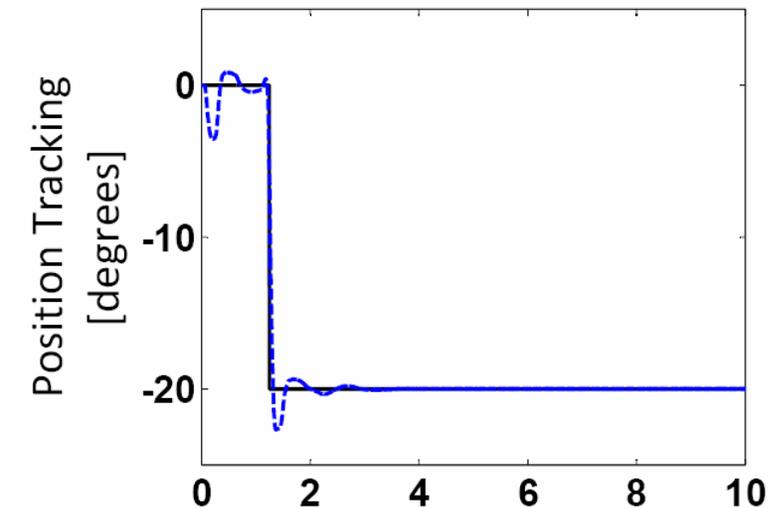
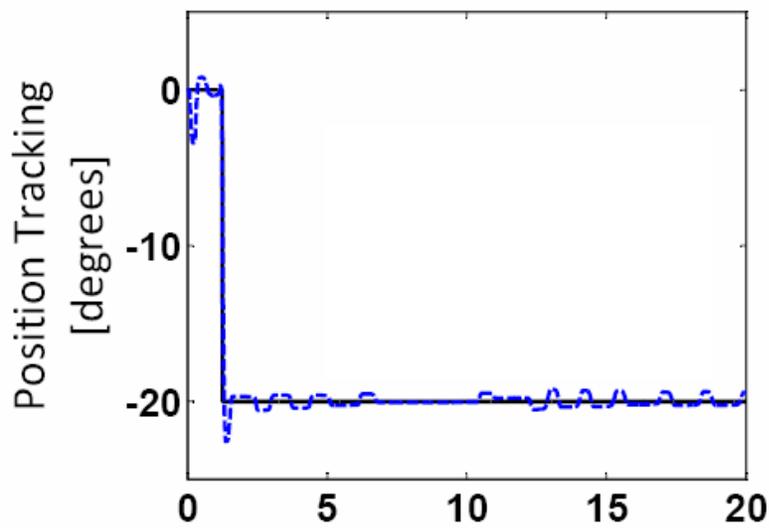
II. Stratégies de commande

Quelques vidéos des vérins



II. Stratégies de commande

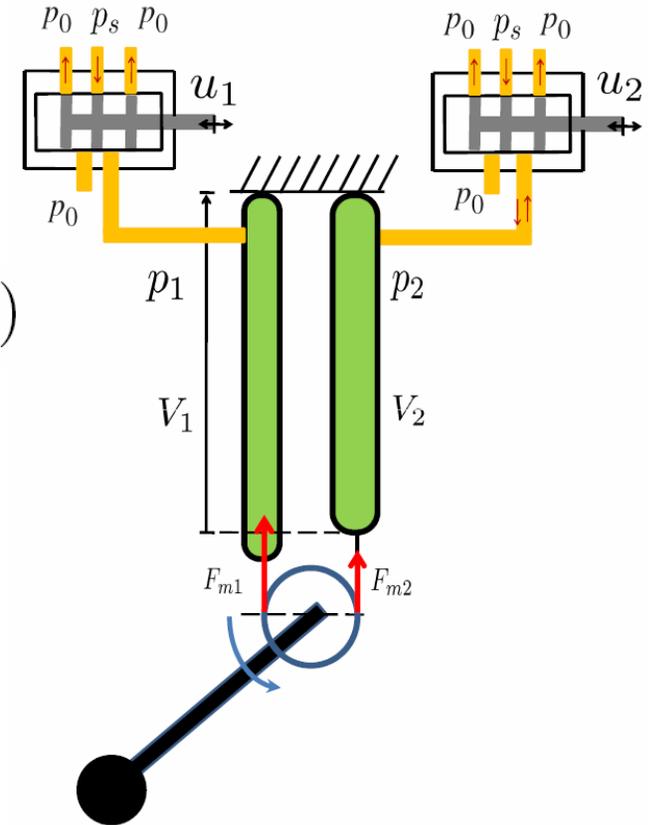
Compensation de frottements



Bloc de compensation de frottements

Ning et al.2002 High steady-state accuracy pneumatic servo positioning system with PVAPV control and friction compensation. *Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics and Automation*. Washington DC, 2002.

Erreur statique : 0.01°

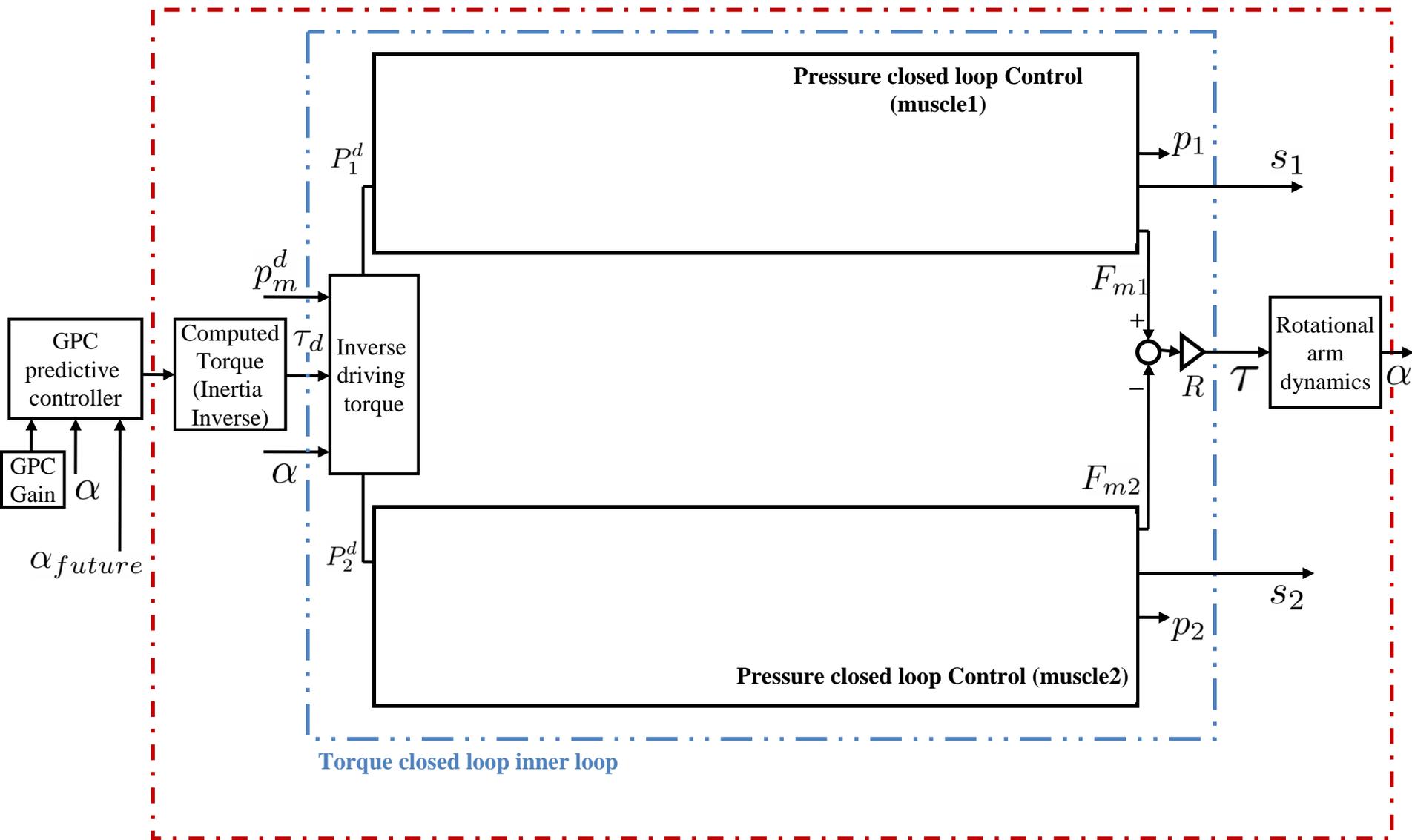


$$\tau_m = F_{m1}(s_1, p_1)s_1(\alpha) - F_{m2}(s_2, p_2)s_2(\alpha)$$

$$s_i = \alpha R$$

$$P_m = (P_{m1} + P_{m2})/2$$

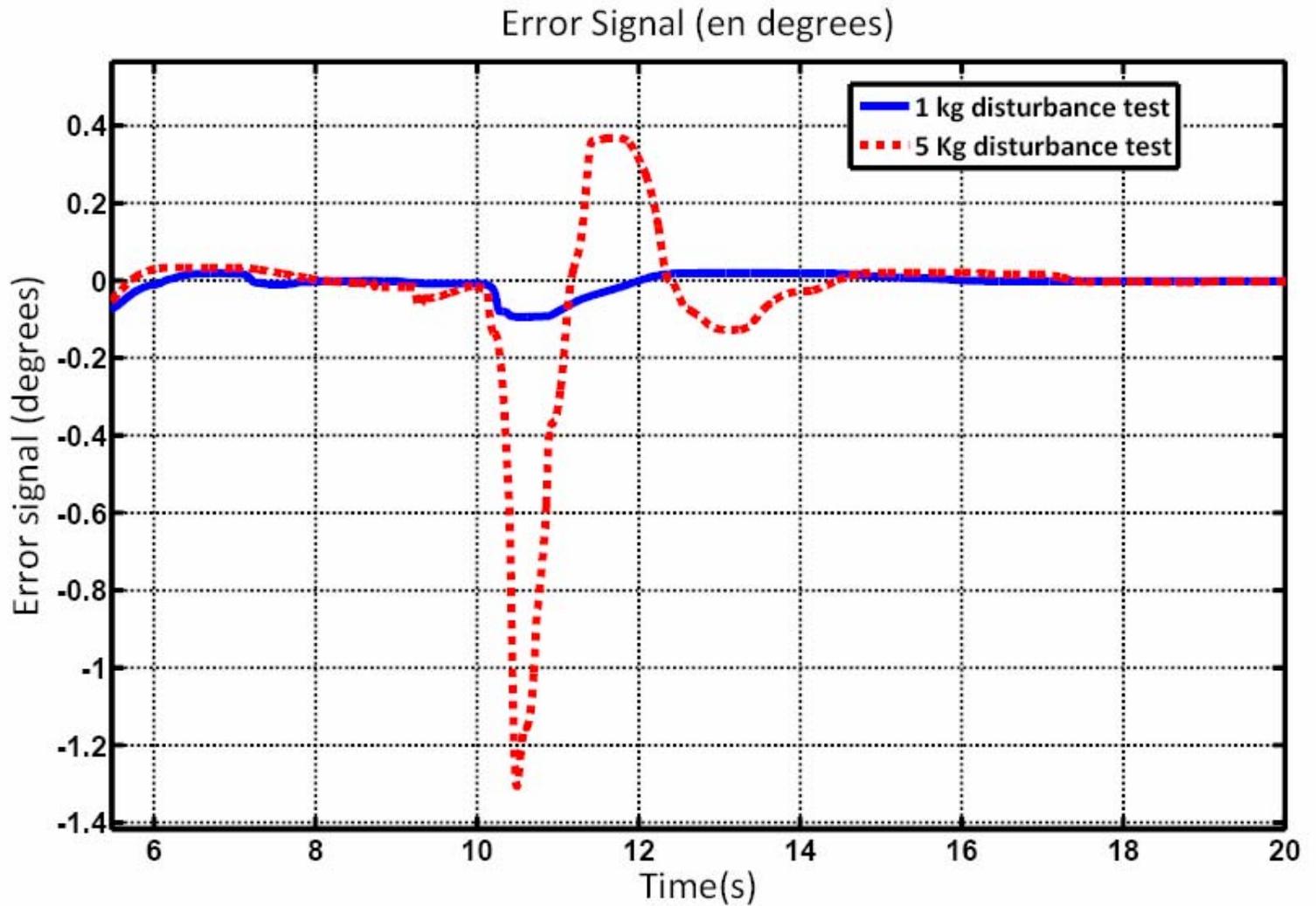
$$P_{2ref} = p_{mref} - \frac{T_{ref}}{2R \sum_{i=0}^5 c_i s^i}$$



Closed loop plant = double integrator

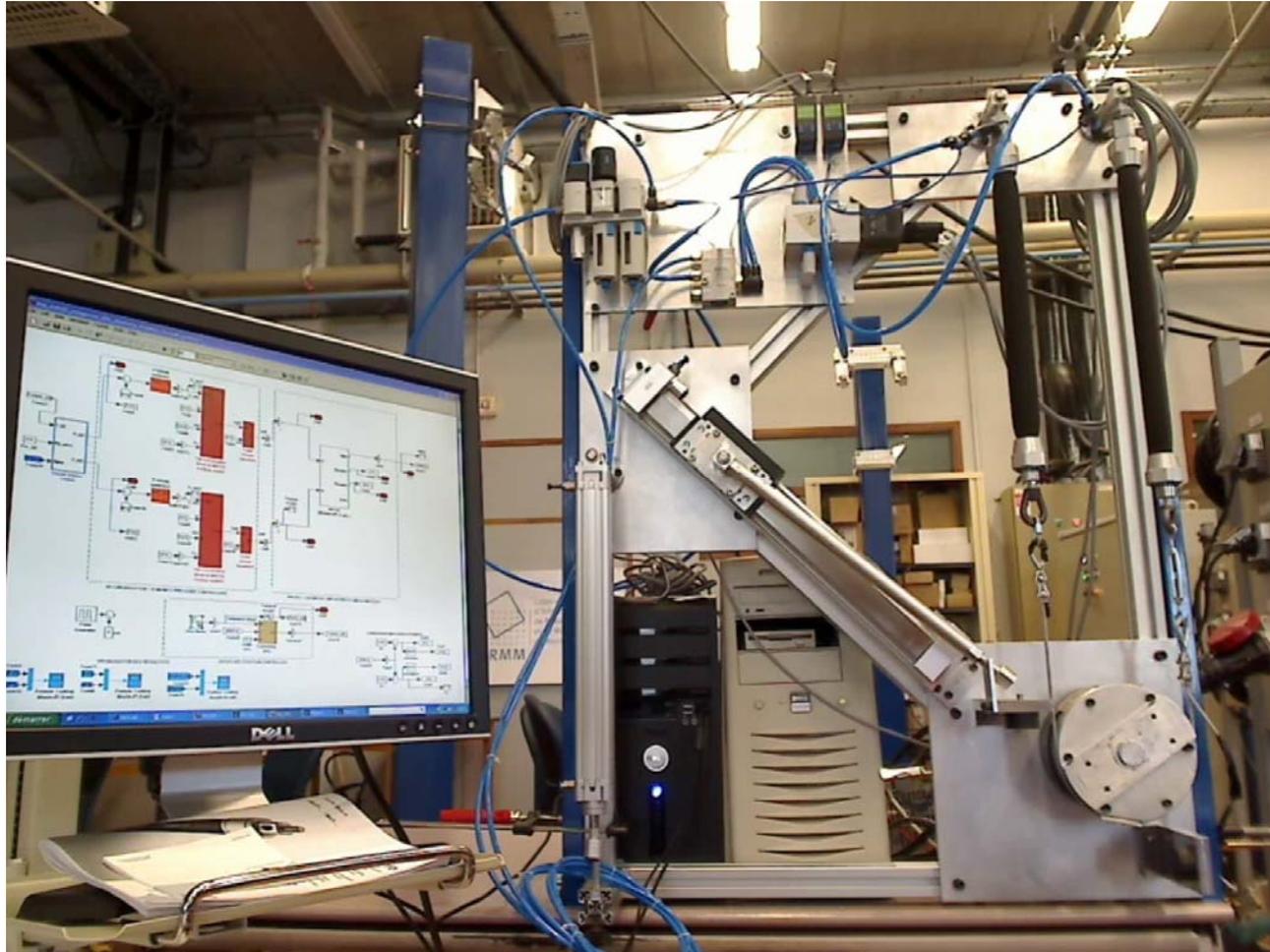
$$\tau_m = I_{mov}\ddot{\alpha} + M_{mov}gdcos(\alpha)$$

Predictive position outer loop



II. Stratégies de commande

Quelques vidéos des muscles



Récapitulatif général

Critère	DNC (standard)		DGC (sans tige)	MAS (Muscles artificiels)
	Temps de réponse	-	0.22 (0.265)	0.24 (0.3)
+		0.21 (0.33)	0.26 (0.32)	0.638
Précision (Erreur statique)	<0.01°		<0.01°	<0.3°
Dépassement (%)	10.4		13.9	23.47
	12.17		17	0
T montée	-	0.045 (0.11)	0.045 (0.1)	0.352
	+	0.05 (0.16)	0.05 (0.11)	0.494
Suivi dynamique	+		+	- (+ sans bras)
Charge embarquée	+		++	-
Robustesse	+		+	-
Bruit/temps de calcul	+/5ms		+/5ms	-/1ms

	DNC	DGC	MAS
Prix (~)	450	1000	1100
Durée de vie	++	-	+++
Plage de variation	+	++	-
Bruit	+	+	-
Facilité d'intégration	+/-	+++	+/-

La conception et la réalisation d'un prototype de robot parallèle

Avancées actuelles

- Modélisation du banc
- Commande en pression et en force (H infinie et GPC)
- Vérins: Commande combinée GPC/H infinie pour la position (avec boucle interne de pression/force)
- Muscles artificiels: Commande combinée GPC/H infinie pour la position (avec boucle interne de pression/couple)

| Amélioration de la commande

| Conception et réalisation du prototype de robot parallèle

| Modélisation et commande du prototype

Merci de votre attention



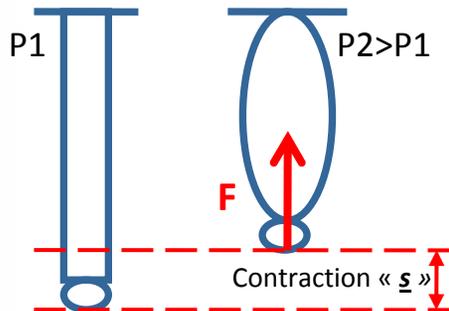
Dépendance force/pression



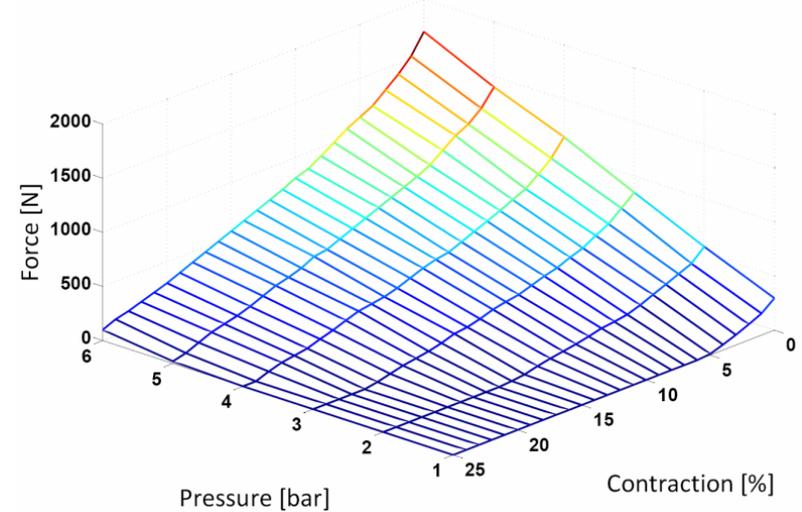
$$F = (P2 - P1)A$$



$$F = P2 A1 - P1 A2$$



Measured force characteristic of the MAS20 muscle (Festo)



$$F_m(p, s) = p \sum_{i=0}^5 c_i s^i$$