



**HAL**  
open science

## Optimisation énergétique et commande plate en électropneumatique

Xavier Brun, A. Doria-Cerezo, Daniel Thomasset

► **To cite this version:**

Xavier Brun, A. Doria-Cerezo, Daniel Thomasset. Optimisation énergétique et commande plate en électropneumatique. Journées Doctorales d'Automatique, Sep 2001, Toulouse, France. hal-02069355

**HAL Id: hal-02069355**

**<https://hal.science/hal-02069355v1>**

Submitted on 20 Mar 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimisation énergétique et commande plate en électropneumatique.

## Energy optimisation and flatness control in electropneumatic field

Xavier BRUN, Arnau DORIA CERESO et Daniel THOMASSET

Laboratoire d'Automatique Industrielle - INSA de Lyon  
<http://www.insa-lyon.fr/Laboratoires/LAI/>  
Bâtiment Saint Exupéry, 25 Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex, France  
Tel: (33) 4 72 43 88 81 Fax: (33) 4 72 43 85 35  
Email: [xavier.brun@lai.insa-lyon.fr](mailto:xavier.brun@lai.insa-lyon.fr)

**RESUME :** Cet article présente les résultats expérimentaux obtenus en appliquant le concept de platitude à un système électropneumatique. L'opportunité d'avoir un degré de liberté est saisi pour suivre conjointement deux objectifs. Le premier étant fixé par le cahier des charges, il s'agit du positionnement d'une masse à l'aide d'un vérin commandé par deux servo-distributeurs. Le second concerne la minimisation de la consommation énergétique. Pour ce faire un algorithme d'optimisation énergétique est présenté.

**RESUM :** *This paper shows some experimental results in an electropneumatic process issued from flatness concept. Using two servo-distributors lead to a system with one degree of freedom. This opportunity is used to follow two objectives. The first one concerns positioning control and the second one relate to optimise the energy efficiency. In this aim an energy optimisation algorithm is presented.*

**Mots clés :** Système plat, Optimisation énergétique, Commande non linéaire, Electropneumatique.  
*Flatness system, Energy optimisation, Nonlinear control, electropneumatic.*

### Notations

a accélération du piston ( $m/s^2$ )  
b coefficient de viscosité ( $N/m/s$ )  
F force (N)  
j jerk ( $m/s^3$ )  
k constante polytropique  
M masse en déplacement (kg)  
p pression (Pa)  
r constante des gaz parfaits ( $J/kg/K$ )  
S section du cylindre du piston ( $m^2$ )  
t temps (s)  
T température (K)  
u tension d'entrée du servo-distributeur (V)  
v vitesse du piston (m/s)  
V volume de la chambre ( $m^3$ )  
y position du piston (m)  
 $\lambda$  coefficient de transfert thermique par convection entre le gaz et la paroi.  
 $S_{cx}$  aire totale intérieure de la chambre X (avec  $X=P$  ou  $X=N$ ).  
 $q_m$  débit massique ( $kg/s$ )  $q_m(u, p) = \varphi(p) + \psi(p, \text{sgn}(\Gamma(u))) \times \Gamma(u)$   
 $\varphi, \psi$  et  $\Gamma$  sont des fonctions polynomiales respectivement d'ordre 5, 5 et 3.  
 $\Gamma(u)$  [ $m^2$ ] est une fonction bijective représentant l'évolution de la section de restriction équivalente que le fluide traverse en fonction de la position du tiroir.  
 $\varphi(p)$  [ $kg/s$ ] représente le débit de fuite.  
 $\psi(p, \text{sgn}(\Gamma(u)))$  [ $kg/s/m^2$ ] est une fonction dépendant du signe de la commande, car l'admission ( $\Gamma(u) > 0$ ) est différente de l'échappement ( $\Gamma(u) < 0$ ).

### Indices et Exposants

cyl cylindre  
ext externe  
f frottements secs  
N chambre N  
P chambre P

S source d'alimentation  
d désiré  
in entrée: correspond à la valeur positive  
out sortie: correspond à la valeur négative

## 1 Introduction

L'objectif de ces travaux concerne la mise en œuvre d'une méthode de commande moderne de l'Automatique sur un procédé industriel et ce dans le but d'améliorer la consommation énergétique. La technique de commande concernée repose sur le concept de platitude [Fliess 1995]. Cette méthode a été présentée en électropneumatique lors des dernières journées doctorales d'Automatique [Brun 1999a]. Son intérêt et son efficacité ont été mise en avant en simulation. L'avancé de nos travaux nous permet de présenter ici un algorithme d'optimisation énergétique ainsi que des résultats expérimentaux venant valider notre démarche.

Après une brève présentation du système et de son modèle, l'accent est mis sur l'intérêt de la platitude dans le cadre de la commande d'un axe électropneumatique. Un algorithme d'optimisation est présenté afin d'obtenir les trajectoires maximisant le rendement énergétique. Ces dernières étant obtenues, l'implantation sur le procédé expérimental permettra de valider notre méthode.

## 2 Présentation et modélisation d'un axe électropneumatique asservi.

L'axe électropneumatique asservi (figure 1) est piloté par deux servo-distributeurs 3/2 modulant le débit d'air qui alimente chacune des chambres. Ce vérin linéaire, simple tige (32/20 mm) possède une course de 500 mm et est rigidement relié à un chariot se déplaçant sur des rails de guidage.

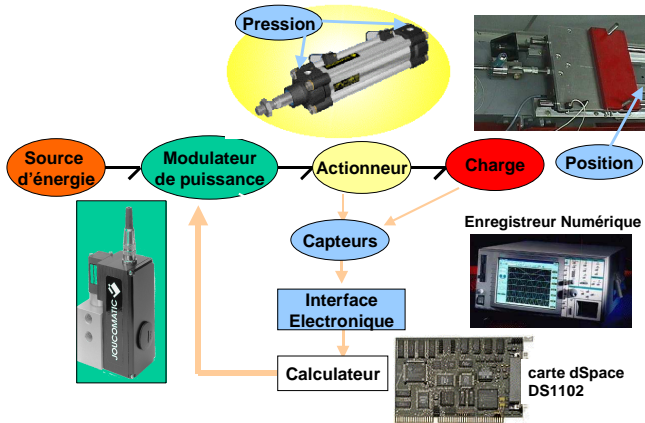


figure 1 : Système électropneumatique

En respectant les hypothèses classiques de modélisation des systèmes électropneumatiques [Mc Cloy 1980] et à partir des travaux effectués dans [Brun 1999b], le modèle de commande du système étudié peut être mis sous la forme du système (1).

$$\begin{cases} \frac{dp_p}{dt} = \frac{krT_s}{V_p(y)} \left[ \varphi(p_p) - \frac{S_p}{rT_s} p_p v \right] + \frac{krT_s}{V_p(y)} \psi(p_p, \text{sgn}(\Gamma(u_p))) \times \Gamma(u_p) \\ \frac{dp_N}{dt} = \frac{krT_s}{V_N(y)} \left[ \varphi(p_N) + \frac{S_N}{rT_s} p_N v \right] - \frac{krT_s}{V_N(y)} \psi(p_N, \text{sgn}(-\Gamma(u_N))) \times \Gamma(u_N) \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{M} \left[ S_p p_p - S_N p_N - b \frac{dy}{dt} - F_f - F_{ext} \right] \end{cases} \quad (1)$$

### 3 Intérêts de la platitude

La pression dans la chambre P et la position y sont des sorties plates [Brun 1999a]. En effet, la somme des indices caractéristiques associés à  $p_p$  et y, respectivement égaux à un et trois, est égale à la dimension du système. Cette condition est suffisante pour affirmer que le modèle (1) est différentiellement plat [Fliess 1995]. Ainsi les commandes  $u_p$  et  $u_N$  peuvent s'exprimer uniquement en fonction des sorties y,  $p_p$  et de leurs dérivées successives (cf. équation 2). Elles sont donc obtenues à partir des trajectoires de référence sans intégration ni résolution des équations différentielles.

$$u_p = \Gamma^{-1} \left[ \frac{\frac{S_p}{rT_s} p_p^d v^d - \varphi(p_p^d)}{\psi(p_p^d, \text{sgn}(U_p))} + \frac{V_p(y^d)}{krT_s} w_1 \right] \quad (2)$$

$$u_N = \Gamma^{-1} \left[ \frac{\frac{S_N}{rT_s} p_N^d v^d + \varphi(p_N^d) + \frac{V_N(y^d)}{krT_s} b a^d}{\psi(p_N^d, \text{sgn}(U_N))} + \frac{krT_s}{V_N(y^d)} \left( -\frac{S_p}{S_N} w_1 + \frac{M}{S_N} w_2 \right) \right]$$

avec 
$$p_N^d = \frac{1}{S_N} (S_p p_p^d - b v^d - F_{ext} - F_f - M a^d) \quad (3)$$

Cette commande directe permet de linéariser le système (cf. figure 2), de le découpler et de le transformer en un système intégrateur représentant la dynamique de la pression dans une chambre et un autre système triple intégrateur liant le jerk (dérivée de l'accélération) à la position de la masse en mouvement.

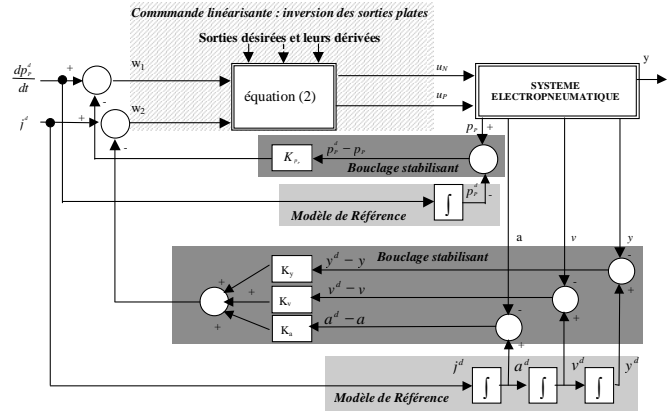


figure 2: Principe de la linéarisation directe et stabilisation par retour d'erreur

Ces deux sous systèmes sont stabilisés par retour d'erreur (cf. équation 4 et figure 2). Une propriété importante des systèmes plats concerne cette linéarisation qui est complète et ne comporte donc aucune dynamique résiduelle, ce qui entraîne la stabilité asymptotique globale du système bouclé.

$$\begin{cases} w_1 = \frac{dp_p^d}{dt} - K_{p_p} (p_p - p_p^d) \\ w_2 = j^d - K_a (a - a^d) - K_v (v - v^d) - K_y (y - y^d) \end{cases} \quad (4)$$

En considérant la trajectoire de position fixée par le cahier des charges, l'avantage d'avoir un degré de liberté offert par l'utilisation de deux servo-distributeurs 3/2 en place d'un servo-distributeur 5/2 permet de fixer la trajectoire de pression en se fixant par exemple comme objectif un rendement énergétique bien meilleur que ce qu'offre actuellement les procédés électropneumatiques [Bachmann 1997].

### 4 Bilan énergétique

Le premier principe de la thermodynamique exprime que la variation de l'énergie totale du fluide contenu dans un domaine est égale à la somme du travail des forces extérieures au domaine et de la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur. A la fin de chaque cycle, l'équilibre complet est atteint : la valeur des pressions, températures et volumes initiaux et finaux dans chaque chambre sont égaux. Ainsi, les variations d'énergie interne sont nulles. Sur un cycle de fonctionnement de durée  $T_{cycle}$ , l'énergie pneumatique délivrée par la source (notée  $W_{PNEU}^{in}$  et définie par l'équation 6), se transforme en travail

mécanique (noté  $W_m$  et défini par l'équation 8), est perdue par convection à travers les parois (énergie calorifique, notée  $Q$  et définie par l'équation 10) et est également perdue dans l'atmosphère ( $W_{PNEU}^{out}$  définie par l'équation 11) comme le montre la figure 3 lors de la sortie de la tige et comme le résume l'équation 5.

$$W_{PNEU}^{in} = W_{PNEU}^{out} - W_m - Q \quad (5)$$

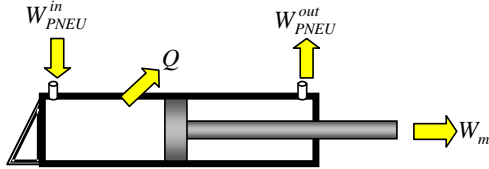


figure 3 : Transferts énergétiques lors d'un cycle de fonctionnement.

Les débits enthalpiques entrant (délivrés par la source) et sortant (mise à l'échappement) des chambres P et N sont respectivement définis par :

$$W_{PNEU}^{in} = \int_0^{T_{cycle}} [H_{P_m}(t) + H_{N_m}(t)] dt \quad (6)$$

$$\text{avec } \begin{cases} H_{P_m}(t) = q_{m,P}(t) c_p T_S \\ H_{N_m}(t) = q_{m,N}(t) c_p T_S \end{cases} \quad (7)$$

$$W_m = - \int_0^{T_{cycle}} [F(t) \cdot v(t)] dt \quad (8)$$

$$\text{avec } F(t) = S_P p_P(t) - S_N p_N(t) - b v(t) - F_f - F_{ext} \quad (9)$$

$$Q = Q_P + Q_N \text{ avec } \begin{cases} Q_P = \lambda \int_0^{T_{cycle}} S_{cP}(t) (T_{cyl} - T_P(t)) dt \\ Q_N = \lambda \int_0^{T_{cycle}} S_{cN}(t) (T_{cyl} - T_N(t)) dt \end{cases} \quad (10)$$

$$W_{PNEU}^{out} = \int_0^{T_{cycle}} [H_{P_{out}}(t) + H_{N_{out}}(t)] dt \quad (11)$$

$$\text{avec } \begin{cases} H_{P_{out}}(t) = q_{m,P}(t) c_p T_P(t) \\ H_{N_{out}}(t) = q_{m,N}(t) c_p T_N(t) \end{cases} \quad (12)$$

## 5 Optimisation énergétique

L'algorithme d'optimisation se résume en 7 points comme le décrit la figure 4.

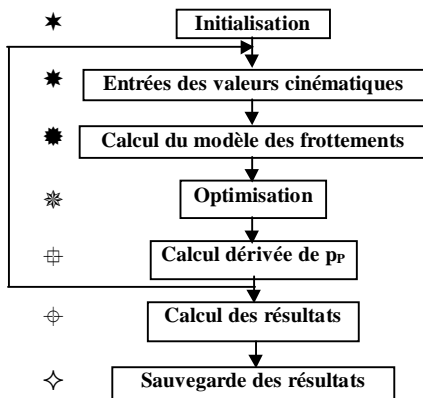


figure 4 : Algorithme d'optimisation

La fonction à optimiser est obtenue à partir du bilan énergétique précédent. Il s'agit de minimiser le travail énergétique entrant dans le système c'est à dire le débit enthalpique délivré par la source de pression (équation 7). Grâce aux propriétés de platitude du système il est possible d'exprimer cette énergie uniquement en fonction des trajectoires désirées.

$$H_{P_m}(t) + H_{N_m}(t) = f \left( y^d, v^d, a^d, j^d, p_p^d, \frac{dp_p^d}{dt} \right) \quad (13)$$

La démarche consiste après une phase d'initialisation des variables (①) et à partir du cahier des charges fixant la trajectoire de position et donc de vitesse, accélération et jerk (②) de minimiser la valeur de l'équation 13 (④). Pour ce faire, et afin d'obtenir une trajectoire restant dans le domaine physique, l'optimisation est effectuée sous contraintes (cf. équation 14) et en tenant compte d'un frottement sec (③) constant dont le signe ne dépend que du signe de la vitesse.

$$\begin{cases} 10^5 \text{ Pa} \leq p_p \leq 7 \cdot 10^5 \text{ Pa} \\ 10^5 \text{ Pa} \leq p_N \leq 10^5 \text{ Pa} \\ -10 \text{ volt} \leq u_p \leq 10 \text{ volt} \\ -10 \text{ volt} \leq u_N \leq 10 \text{ volt} \\ S_p \cdot p_p - S_n \cdot p_n - b \cdot v^d - F_f - F_{ext} = M \cdot a^d \end{cases} \quad (14)$$

A partir de la valeur de  $p_p$  obtenue, la dérivée de  $p_p$  est calculée à chaque pas de l'algorithme (⑤). Puis une fois le cycle terminé la trajectoire est filtrée pour éliminer les problèmes issus des bruits numériques (⑥). Les résultats alors obtenus sont stockés dans des fichiers (⑦, cf. figure 5) prêt à être implantés sur le procédé physique.

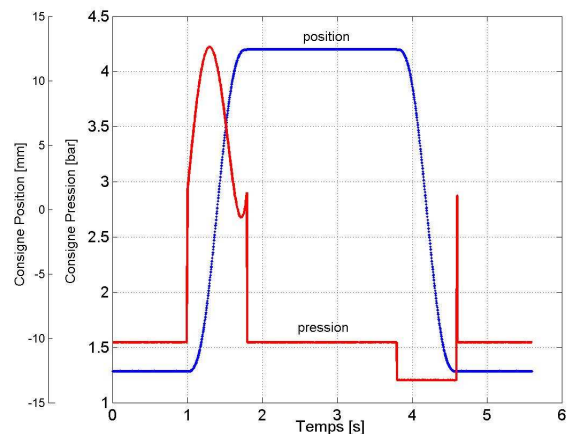


figure 5 : consigne de pression optimisée pour une consigne de position fixée.

## 6 Résultats expérimentaux

La commande non linéaire multivariables (équation 2 et 4) a été implanté sur une carte dSpace DS1102. Les résultats expérimentaux sont présentés ici en terme de répétabilité. En effet les courbes obtenues représentent la moyenne des résultats issus de 30 cycles de fonctionnement. Le suivi en position (cf. figure 6) est de qualité semblable aux résultats obtenus pour une commande non linéaire monovariante [Brun 1999c].

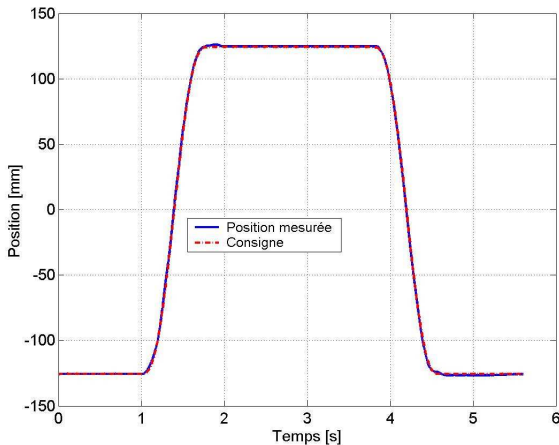


figure 6 : Suivi en position

L'erreur moyenne obtenue lors des 30 cycles de fonctionnement (cf. figure 7) n'excède pas 0.3 mm en régime statique. L'erreur de suivi est fonction du sens de déplacement de la masse en mouvement. Lors de la sortie de la tige l'erreur maximum mesurée est de 5.4 mm, elle n'est que de 3.4 mm lors de l'entrée de la tige. L'écart type est de 0.48 mm en phase statique et de 0.56 mm en phase dynamique, une bonne répétabilité est donc assurée tout au long de la trajectoire.

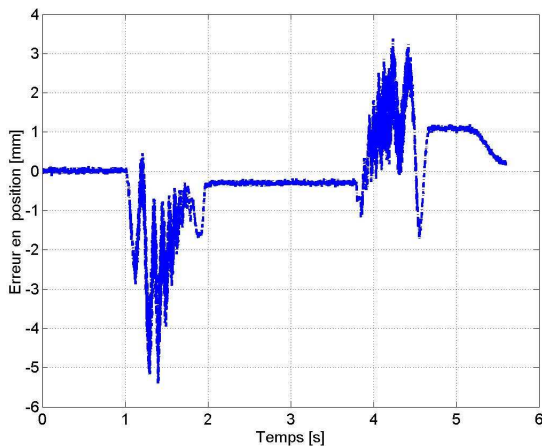


figure 7 : erreur de suivi de position

Le suivi en pression est représenté sur la figure 8, les problèmes liés aux frottements au début et à la fin de chaque phase dynamique est en partie résolu par le choix d'un modèle de frottement sec dans l'algorithme d'optimisation. Ainsi les erreurs de suivi en pression, hors

de ces phases n'excèdent pas 0.1 bar lors de la sortie de la tige, et 0.3 bar lors de l'entrée.

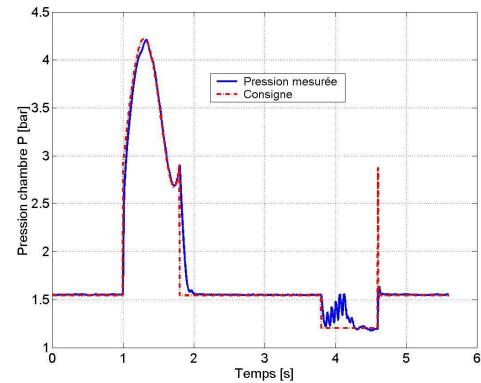


figure 8 : Suivi de trajectoire de pression

## 7 Conclusions et Perspectives

La dissymétrie importante due à la tige est la principale cause de la différence des résultats selon le sens de déplacement. C'est pourquoi il est important d'effectuer un bilan énergétique sur un aller retour. Aujourd'hui la boucle de retour d'erreur reste à être améliorée pour tendre vers des rendements énergétique de qualité. Néanmoins, ces premiers résultats expérimentaux laisse entrevoir des diminutions de l'ordre de 30% en terme d'énergie délivrée par la source. Et ce sans diminuer les performances de suivi de trajectoire en position, vitesse ou accélération.

La commande non linéaire multivariable s'avère donc une possibilité intéressante pour améliorer le rendement énergétique des axes électropneumatiques. Pour ce faire, il est important dès la conception de choisir d'effectuer l'asservissement avec deux servo-distributeurs 3/2 en place d'un 5/2. Si cette solution paraît demander un investissement plus important, elle est néanmoins de plus en plus utilisée pour pallier aux problèmes de lignes pneumatiques de trop grande longueur ainsi que pour limiter l'encombrement de l'ensemble actionneur plus modulateur de puissance.

## Bibliographie

- [Fliess 1995] **Fliess, M., Levine, J., Martin, P., Rouchon, P.** *Flatness and defect of non-linear systems : introductory, theory and applications*, International Journal of Control, Vol 61, p 1327-1361, 1995.
- [Brun 1999a] **Brun, X., Thomasset, D.** *Intérêts de la planification de trajectoires pour la commande en position d'actionneurs électropneumatiques*, Journées Doctorales d'Automatique, Nancy, 21/22/23 Septembre 1999, p 185-188.
- [Mc Cloy 1980] **Mc Cloy, D., Martin, H.R.** *Control of fluid power : analysis and design.*, Ellis Horwood, 1980. 510 p.
- [Brun 1999b] **X. Brun, M. Belgharbi, S. Sesmat, D. Thomasset, S. Scavarda,** *Control of an electropneumatic actuator, comparison between some linear and nonlinear control laws*, Journal of Systems and Control Engineering, 1999, Vol. 213, N°15, p 387-406.
- [Bachmann 1997] **Bachmann, J.R., Surgenor, B.W.** *On design and performance of a closed circuit pneumatic positioning system. The 5<sup>th</sup> Scandinavian. Int. Conf. on Fluid Power*, Linköping, Sweden, Vol.1, pp 309-322, 1997.
- [Brun 1999c] **Brun, X.** *Commandes linéaires et non linéaires en électropneumatique. Méthodologies et Applications.* Thèse de Doctorat N° 99 ISAL 0090, INSA de Lyon, 209 p, 1999.

[Isidori 1989] **Isidori, A.** *Nonlinear control systems*. New York : Springer Verlag, 2<sup>nd</sup> edition, 479 p, 1989.