HAL open science

Commande sans modèle pour l'alimentation de moteurs : résultats préliminaires et comparaisons

Cédric Join, John Masse, Michel Fliess

To cite this version:

Cédric Join, John Masse, Michel Fliess. Commande sans modèle pour l'alimentation de moteurs : résultats préliminaires et comparaisons. 2èmes Journées Identification et Modélisation Expérimentale - JIME'2006, Nov 2006, Poitiers - France. inria-00096695v1

HAL Id: inria-00096695

https://inria.hal.science/inria-00096695v1

Submitted on 19 Sep 2006 (v1), last revised 23 Sep 2006 (v2)

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.

Commande sans modèle pour l'alimentation de moteurs : résultats préliminaires et comparaisons

Cédric JOIN[a,b], John MASSE[c], Michel FLIESS[a,d]

[a] Projet ALIEN, INRIA Futurs

[b] CRAN (UMR-CNRS 7039)
Université Henri Poincaré (Nancy I), BP 239
54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France

[c] Société Appedge
18-22 rue d'Arras, 92000 Nanterre, France
http://www.appedge.com

[d] Équipe MAX, LIX (UMR-CNRS 7161)
École polytechnique, 91128 Palaiseau, France

cedric.join@cran.uhp-nancy.fr, john.masse@appedge.com
Michel.Fliess@polytechnique.edu

Résumé— *On applique de nouvelles techniques de « commande sans modèle » aux papillons, qui sont des dispositifs d'alimentation de moteurs. Les simulations numériques se comparent favorablement à une commande prédictive linéaire, basée sur la platitude, nécessitant la connaissance d'un modèle précis.*
Abstract— *New techniques of "no-model-based control" are applied to throttles, which are drive-by-wire servo drives. Our numerical simulations may be favorably compared to a flatness-based linear predictive control, where a precise mathematical model is needed.*

Mots-clés— *Moteurs, papillons, commande sans modèle, identification locale, dérivations de signaux bruités, commande prédictive linéaire, platitude.*
Key words— *Engines, throttles, no-model-based control, local identification, derivations of noisy signals, linear predictive control, flatness.*

I. INTRODUCTION

Les *papillons*, *throttles* en anglais, sont, ici (voir la photographie 1), des dispositifs essentiels pour l'alimentation en air de moteurs à explosions, comme les moteurs à essence. Leur commande a fait déjà l'objet de nombreuses études (voir, par exemple, [1], [2], [3], [10], [11], [13], [14], [15], [16] et leur bibliographie), selon des techniques diverses, nécessitant le plus souvent des modélisations globales, aussi précises que possible.

Cette communication vise à tester à propos de tels papillons des méthodes récentes de « commande sans modèle » [5], [6]. On sait, en effet, que la mise en équations de mécanismes industriels quelque peu complexes se révèle trop souvent coûteuse en temps et moyens.

Le § II rappelle très brièvement les principes généraux de notre « identification instantanée ». Le modèle local, valide sur un court laps de temps et réactualisé à chaque instant, est d'une extrême simplicité ; il s'obtient grâce à l'estimation de dérivées de signaux bruités. Après avoir décrit les papillons, le § III expose une première commande linéaire, de type prédictif, basée sur la platitude [8], nécessitant une modélisation mathématique « traditionnelle ». On passe, ensuite, à notre commande sans modèle. De nombreuses simulations numériques devraient persuader les lecteurs de l'intérêt de notre point de vue.

Fig. 1: Photographie du papillon

figure

II. Rappels sur l'identification instantanée[1]

Nous remplaçons les modèles mathématiques décrivant les machines dans une plage de fonctionnement aussi large que possible par une *identification instantanée*, valide sur un court laps de temps, et actualisée pas à pas. Un système monovariable, linéaire ou non, de dimension finie, d'entrée u et de sortie y, est représenté localement par

$$y^{(n)} = F + \alpha u + \beta \tag{1}$$

où
- $n \geq 1$, et, le plus souvent, $n = 1$, ou 2 ;
- $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ sont des paramètres constants *non physiques*, choisis par le praticien ;
- F est déterminé grâce à la connaissance de $y^{(n)}$, u, α, β.

Remarque 1 On trouvera les techniques d'estimation de dérivées de signaux bruités, nécessaires pour obtenir $y^{(n)}$ en [5], [6], avec d'autres références.

Remarque 2 Le comportement désiré s'obtient, ici, par correcteurs de type PID autour d'une trajectoire de référence, obtenue selon les principes issus de la platitude (cf. [7], [12]).

Remarque 3 On trouvera en [5], [6] quelques règles générales de mise en œuvre, appliquées à divers exemples, dont certains considérés comme difficiles, même avec un modèle connu.

III. Étude du papillon

A. Présentation

A.1 Rôle

Le conducteur appuie sur la pédale. Cette information est envoyée au calculateur, qui, en fonction des conditions de vie, détermine l'alimentation en air pour obtenir le couple souhaité. En effet, l'ouverture du papillon n'est plus, aujourd'hui, une commande directe par câble, en liaison avec la pédale d'accélérateur. Un capteur de position situé sous l'accélérateur traduit en tension la demande de couple du conducteur. Cette tension est envoyée à un calculateur qui gère simultanément les diverses demandes énergétiques du véhicule, comme la climatisation, l'éclairage, le refroidissement du moteur, ... Ces fonctions alourdissent la charge du moteur par leur consommation d'énergie. Le calculateur veille, par réglage d'ouverture/fermeture du papillon, à ce que l'activation ou l'extinction de ces divers mécanismes ne gênent pas le conducteur et n'entravent pas la bonne marche du véhicule.

A.2 Fonctionnement

Le papillon est constitué d'une ailette, d'un moteur électrique continu, d'engrenages reliant l'arbre du moteur à l'ailette. L'angle de l'ailette est compris entre 0° et 80°. Un système de ressorts de précontraintes positionne cet angle à une valeur nominale de 7° (*limp-home* en anglais) : ouverture suffisante pour que le véhicule puisse rouler jusqu'au garage en cas de défaillance du calculateur ou de coupure de tension. Une non-linéarité avec zone morte est due aux ressorts.

A.3 Performances désirées

Nous avons choisi les performances suivantes, résumées en table I. Elles sont déduites d'essais effectués sur différents véhicules.
Pour un maximum de sécurité du conducteur, les performances doivent être respectées au niveau des dépassements, *overshoots* en anglais, mais surtout au niveau du temps d'établissement, qui caractérise un non-respect de la consigne conducteur/calculateur. Alors, le mode secours est enclenché : le calculateur coupe l'alimentation du papillon qui vient se positionner mécaniquement dans la position *limp home*.

Remarque 4 Il existe d'autres modes de dysfonctionnements et de secours, que nous ne détaillerons pas ici.

B. Électronique de commande

Fig. 2: Calculateur E 35

figure

L'objectif est d'asservir un papillon motorisé, grâce à une carte électronique de puissance. Le papillon est un modèle *Bosch* ou *Magneti Marelli*, piloté à 500 Khz en PWM. La période d'échantillonnage a été prise égale à 5 ms, puis 3 ms. Le calculateur (voir la photographie 2) doit réaliser plusieurs asservissements simultanés, d'où l'impossibilité de réduire davantage la période d'échantillonnage.

C. Commande avec modèle

Les seul usage d'un correcteur PID n'autorise pas des performances suffisantes pour des signaux faibles à cause des frottements et des effets non linéaires des ressorts de contraintes, difficiles à modéliser (*cf.* [3]).

[1] Les références [5], [6], en libre accès, fournissent bien plus de détails, tant théoriques que pratiques. On y trouvera, aussi, quelques références générales sur les méthodes d'identification et d'estimation sous-jacentes, et leurs nombreuses applications en automatique et traitement du signal.

Dynamique	Petits créneaux ($< 20^\circ$)	Grands créneaux
montante	$t_{90} < 35ms$ $t_{eb} < 150ms$ *Dépassements* $< 50\%$ *Retard pur* $< 5ms$	$t_{90} < 110ms$ $t_{eb} < 250ms$ *Dépassements* $< 20\%$ *Retard pur* $< 20ms$
déscendante	$t_{90} < 35ms$ $t_{eb} < 150ms$ *Dépassements* $< 0\%$ *Retard pur* $< 5ms$	$t_{90} < 110ms$ $t_{eb} < 250ms$ *Dépassements* $< 0\%$ *Retard pur* $< 20ms$

t_{90} et t_{eb} sont, respectivement, les temps de réponse, à 90%, et d'établissement de la consigne, à 0.2° près.

TABLE I: Performances désirées

table

C.1 Modèle

L'élaboration d'un modèle analytique est toujours difficile, car il est nécessaire de réaliser des mesures et/ou d'obtenir des données suffisantes du constructeur. Selon la nature de la loi de commande, il est nécessaire d'obtenir plus ou moins d'informations sur le procédé.
L'identification, obtenue, ici, selon les techniques de [9], des paramètres du modèle et des efforts de précontraintes est délicate. Il est nécessaire de construire un protocole tout en évitant la destruction du papillon motorisé. Des frottements secs perturbent fortement l'accès aux mesures. Cette première méthode montre qu'un modèle minimaliste d'un processus permet de répondre à un cahier des charges et de piloter correctement certains systèmes avec l'identification grossière d'un jeu minimal de paramètres : on doit supposer, tout de même, que les dispersions des caractéristiques du système sont dans une plage raisonnable.

Remarque 5 D'autres phénomènes extérieurs peuvent altérer le fonctionnement du papillon :
– *variation de la tension de la batterie,*
– *température ambiante.*

C.2 Commande

Nous avons appliqué la théorie de la platitude à un modèle comportemental linéaire, du second ordre, comprenant un intégrateur, obtenu grâce aux rejets des efforts des précontraintes. Ce dernier point est d'une importance capitale.
La sortie y du système linéaire, de fonction de transfert

$$H = \frac{k_m}{s(\tau s + 1)}$$

est *plate* (*cf.* [7], [8], [12]). On en déduit l'écriture de la commande nominale

$$u^* = (\tau \ddot{y}^* + \dot{y}^*)/k_m$$

à partir de la sortie de référence, qui prend en compte les saturations en position, vitesse et accélération du moteur ainsi que les performances désirées, établies au § III-A.3. Voir l'ensemble de ces trajectoires en figure 4.
On y ajoute, selon les préceptes de la commande prédictive par platitude (*cf.* [8], [12]), le rejet des précontraintes Pinv(y) et la correction PID(e) de l'erreur $e = y - y^*$

$$u = u^* + \text{Pinv}(y) + \text{PID}(e)$$

Les coefficients de PID(e) sont calculés de manière à imposer la dynamique de régulation souhaitée. Les dérivées $\dot{y}^*$ et $\ddot{y}^*$ ainsi que y^* découlent de la trajectoire de référence[2].

Cette loi a été implantée en temps réel. Elle fonctionne correctement. Les résultats expérimentaux sont présentés figures 5, 6 et 7. La figure 7 montre un dépassement non maîtrisé lorsque la consigne varie fortement. C'est dû aux conditions expérimentales où la période d'échantillonnage de 5 ms est trop importante. Précisons que les résultats des simulations sont très proches de la réalité.

C.3 Difficultés complémentaires

Avec un papillon motorisé en couple, où l'arbre du moteur est relié directement à l'ailette, il devient presqu'impossible de mesurer la précontrainte à cause de l'importance du frottement sec. Cette méthode, ou toute autre nécessitant la connaissance d'un modèle, s'avère, alors, trop laborieuse dans l'estimation des paramètres.

D. *Commande sans modèle*

Passons à une commande sans modèle qui permet, en identifiant uniquement le gain statique du modèle, et cela de manière grossière ou empirique, d'asservir un procédé complexe. En effet, la précision du gain statique n'est pas primordiale, ce qui permet de s'affranchir d'un travail d'identification complexe, tout en accédant aux exigences fonctionnelles et dynamiques souhaitées. Bien entendu, ces exigences doivent être atteignables par le dimensionnement du procédé. Cette méthode, comme la précédente, peut aussi être utilisée pour y parvenir, en fonction des exigences.
Ici, il n'a pas été nécessaire d'identifier la précontrainte ou d'autres paramètres, ce qui simplifie grandement la mise en œuvre. Néanmoins, comme pour la première commande, il a été implanté une dynamique de poursuite calibrée sur des trajectoires de référence. Une structure PID normalisée assure la précision.

[2] Répétons, ici, ce qui a déjà été souvent écrit à propos de la platitude (*cf.* [7], [8], [12]) : le calcul des dérivées n'offre, ici, aucune difficulté puisque l'on connaît l'expression analytique de la référence.

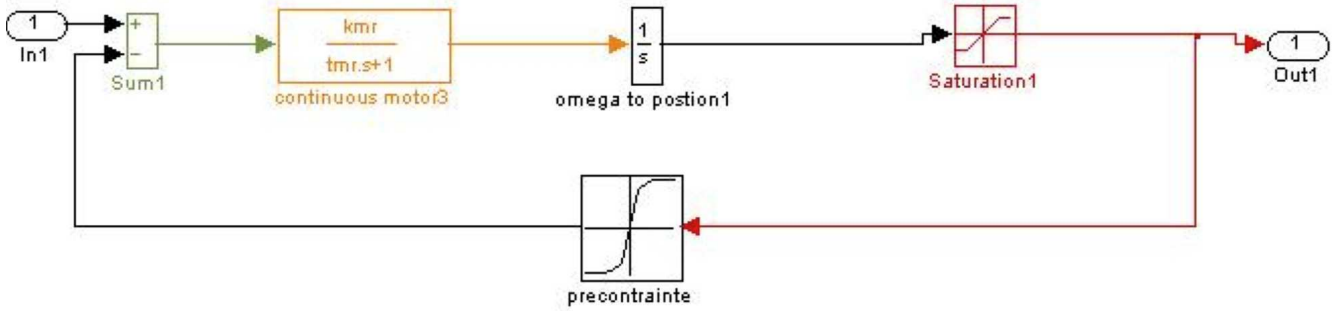

Fig. 3: Schéma de principe

figure

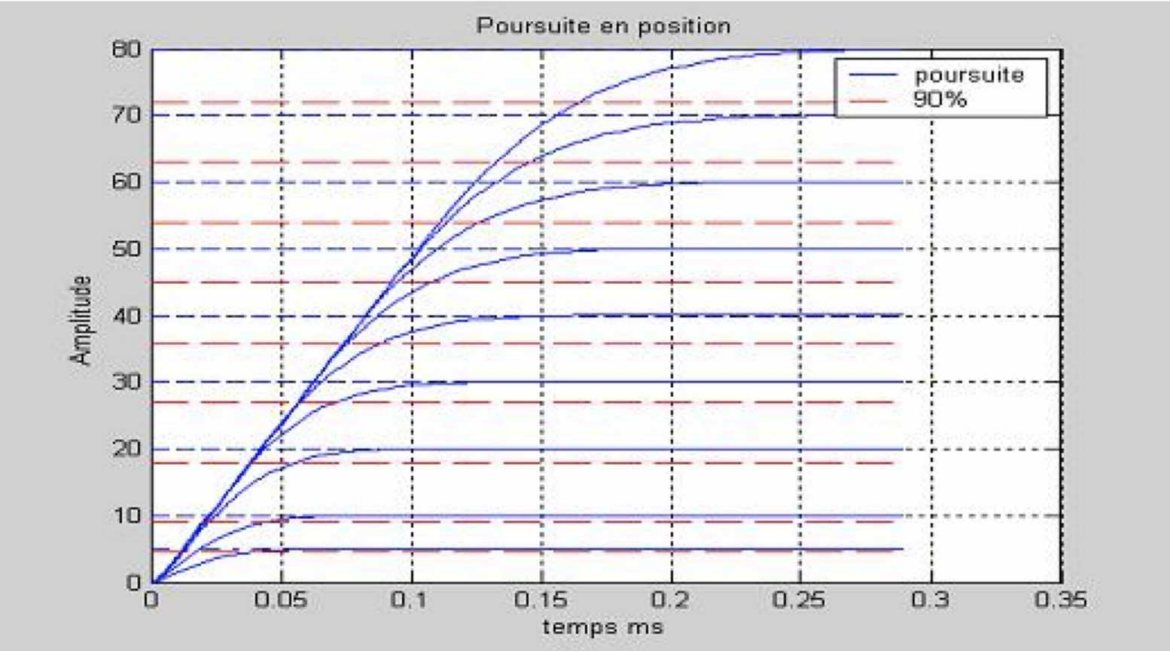

Fig. 4: Trajectoire de références

figure

Les résultats de simulation montrent qu'il est possible d'atteindre les performances souhaitées avec un minimum d'effort. Ils sont comparables à ceux obtenus avec la commande par platitude (voir figures 8, 9, 10). La commande est, néanmoins, un peu moins dynamique pour chaque changement de consigne. La simulation a été réalisée avec une cadence d'intégration de 3 ms, des bloqueurs d'ordre 0 et une quantification de 0.2° sur la sortie.

Afin de mieux tester, encore, notre approche et sa robustesse, nous fournissons des simulations avec données entâchées d'un bruit blanc gaussien $N(0, 0.3)$, centré. Les résultats, comme le montrent les figures 11, 12 et 13, n'en sont pas pour autant dégradés.

Remarque 6 On trouvera en [4] les raisons théoriques expliquant cette robustesse aux bruits. Rappelons que cette approche ne nécessite pas la connaissance des propriétés statistiques des bruits, que l'on aurait pu choisir colorés et/ou non gaussiens.

IV. Conclusion

L'implémentation en temps réel de cette commande sans modèle pour papillons est en cours de développement. D'autres applications dans divers domaines techniques sont examinées et feront l'objet de prochaines communications.

Références

[1] M. Barić, I. Petrović, N. Perić, Neural network-based sliding mode control of electronic throttle, *Engineering Appl. Artificial Intelligence*, 18: 951-961, 2005.

[2] S.-B. Choi, J.K. Hedrick. Robust throttle control of automatic engines: theory and experiments, *J. Dynamic Syst. Measur. Control*, 118: 92-98, 1996.

[3] J. Deur, D. Pavković, N. Perić, M. Jansz, D. Hrovat, An electronic throttle control strategy including compensation of friction and limp-home effects, *IEEE Trans. Industr. Appl.*, 40: 821-834, 2004.

[4] M. Fliess, Analyse non standard du bruit, *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. I*, 342: 797-802, 2006.

[5] M. Fliess, C. Join, M. Mboup, H. Sira-Ramírez, Vers une commande multivariable sans modèle, *Actes Conf. Internat. Francoph. Automatique – CIFA 2006*, Bordeaux, 2006 (accessible sur `http://hal.inria.fr/inria-00001139`).

[6] M. Fliess, C. Join, H. Sira-Ramíez. Complex continuous nonlinear systems: their black box identification and their control, *Proc.* 14th *IFAC*

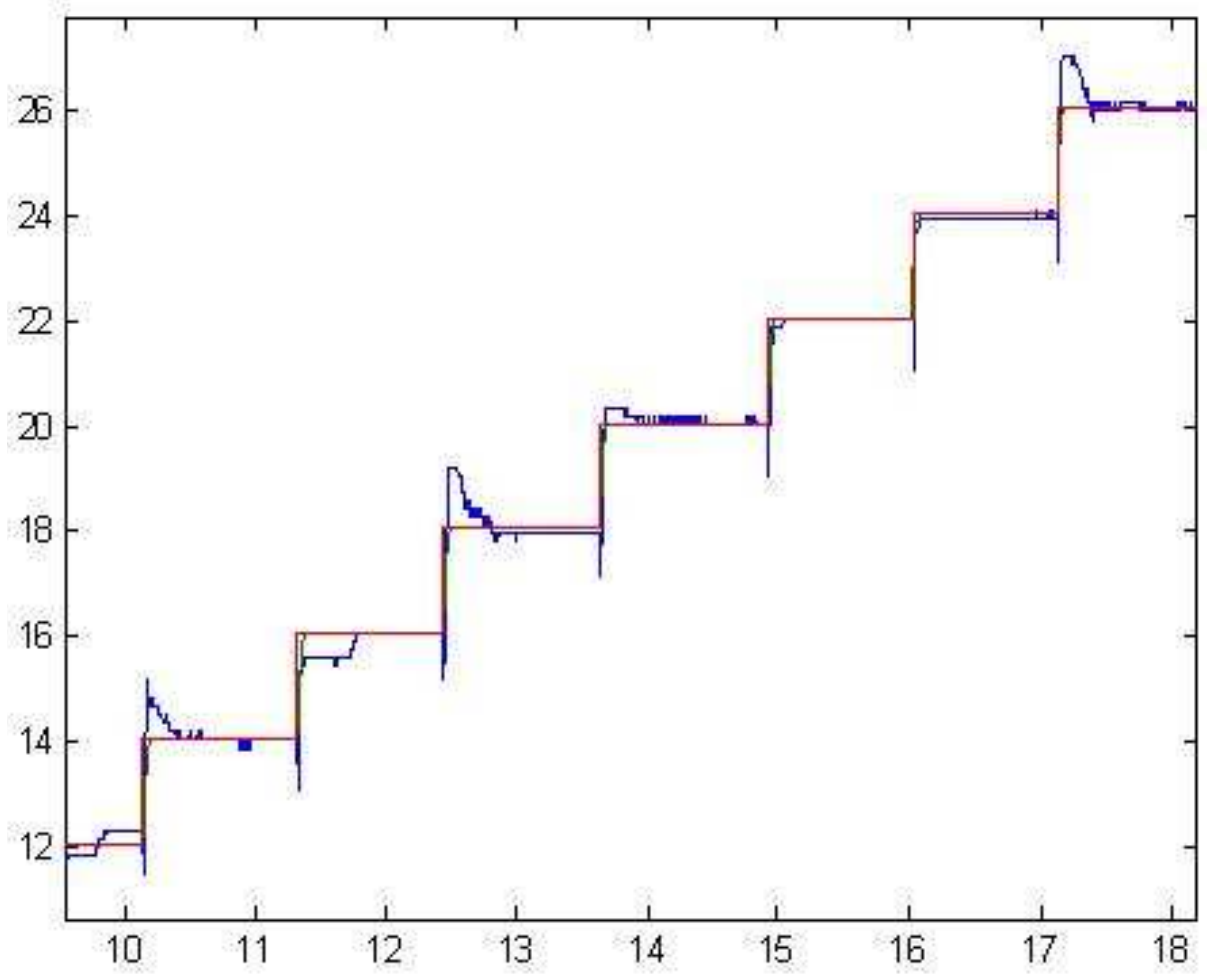

Fig. 5: Résultats en montée

figure

Symp. System Identification – SYSID 2006, Newcastle, Australie, 2006 (accessible sur `http://hal.inria.fr/inria-00000824`).

[7] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon, Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples, *Internat. J. Control*, 61: 1327-1361, 1995.

[8] M. Fliess, R. Marquez, Continuous-time linear predictive control and flatness: a module-theoretic setting with examples, *Internat. J. Control*, 73: 606-623, 2000.

[9] M. Fliess, H. Sira-Ramírez, An algebraic framework for linear identification, *ESAIM Control Optim. Calc. Variat.*, 9: 151-168, 2003.

[10] C. Rossi, A. Tilli, A. Tonielli, Robust control of a throttle body for drive by wire operation of automotive engines, *IEEE Trans. Control Syst. Technology*, 8: 993-1002, 2000.

[11] R. Rothfuß, H.-M. Heinkel, R. Sedlmeyer, H. Schmidt, S. Stoll, J. Winkelhake, Flatness based control of a throttle plate, *Proc.* 14th *Internat. Symp. Math. Theory Networks Systems – MTNS 2000*, Perpignan, 2000.

[12] H. Sira-Ramírez, S. Agrawal, *Differentially Flat Systems*, Marcel Dekker, New York, 2004.

[13] M. Vašak, M. Baotic, M. Morari, I. Petrovic, N. Peric, Constrained optimal control of an electronic throttle, *Internat. J. Control*, 79: 2006, 465-478.

[14] S.W. Wang, D.L. Yu, J.B. Gomm, G.F. Page, S.S. Douglas, Adaptive neural network model based predictive control for air-fuel ratio of SI engines, *Engineering Appl. Artificial Intelligence*, 19: 189-200, 2006.

[15] M. Won, S.B. Choi, J.K. Hedrick, Air-to-fuel ratio control of spark ignition engines using Gaussian network sliding control, *IEEE Trans. Control Syst. Technology*, 6: 678-687, 1998.

[16] C. Yang, Model-based analysis and tuning of electronic throttle controllers, *Proc. SAE World Congress*, Detroit, MI, 2004.

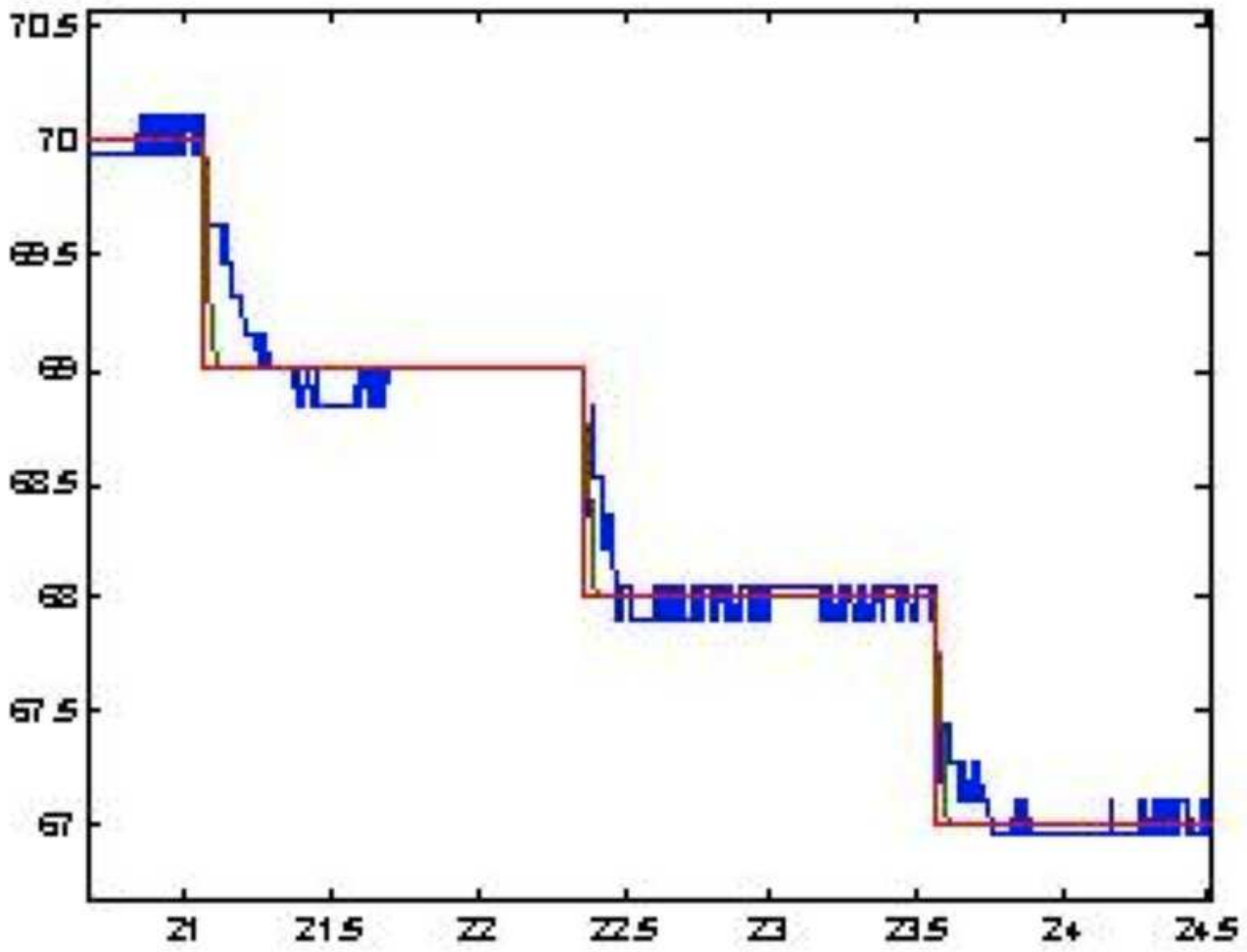

Fig. 6: Résultats en descente

figure

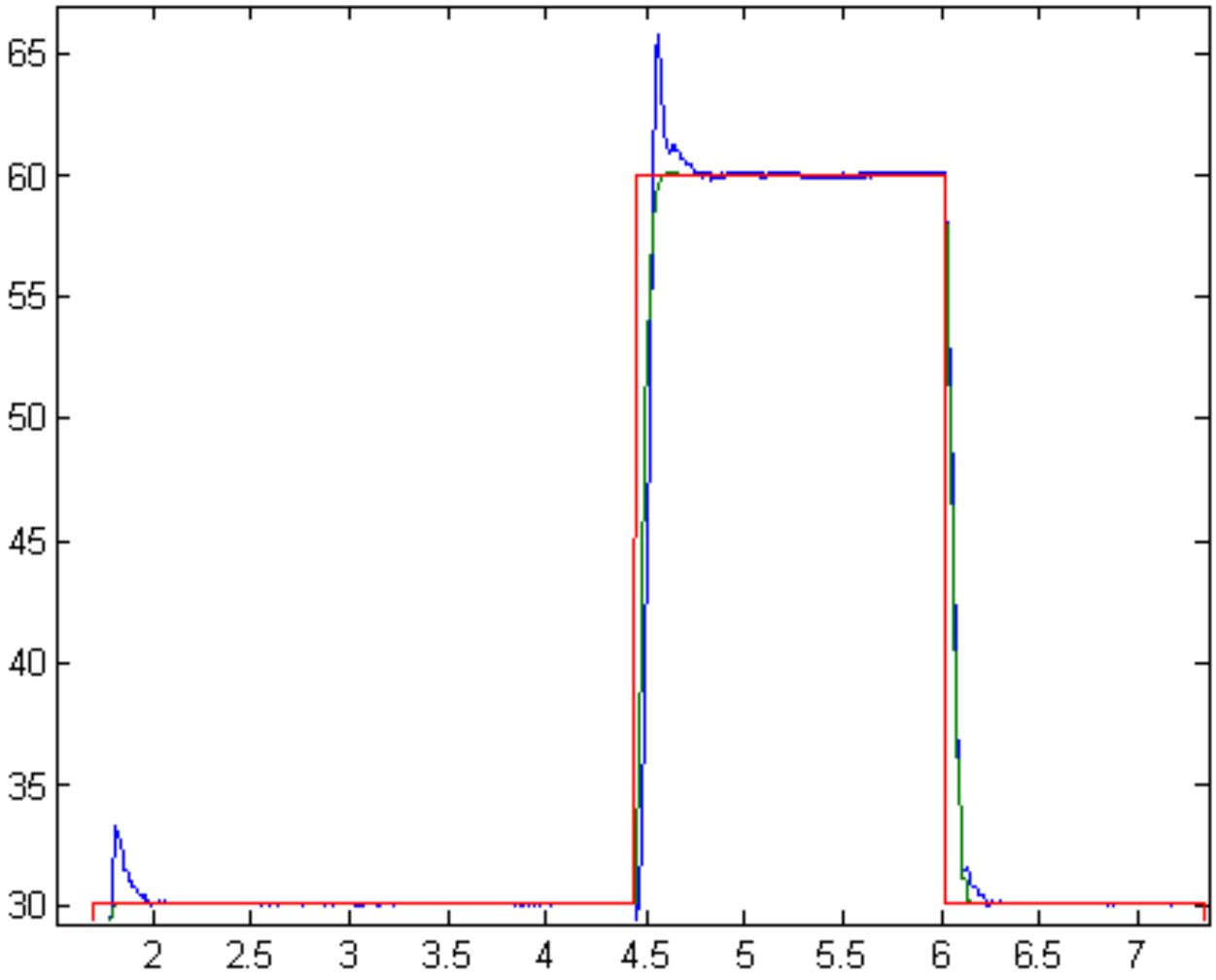

Fig. 7: Résultats en réponse à d'importants échelons d'amplitudes

figure

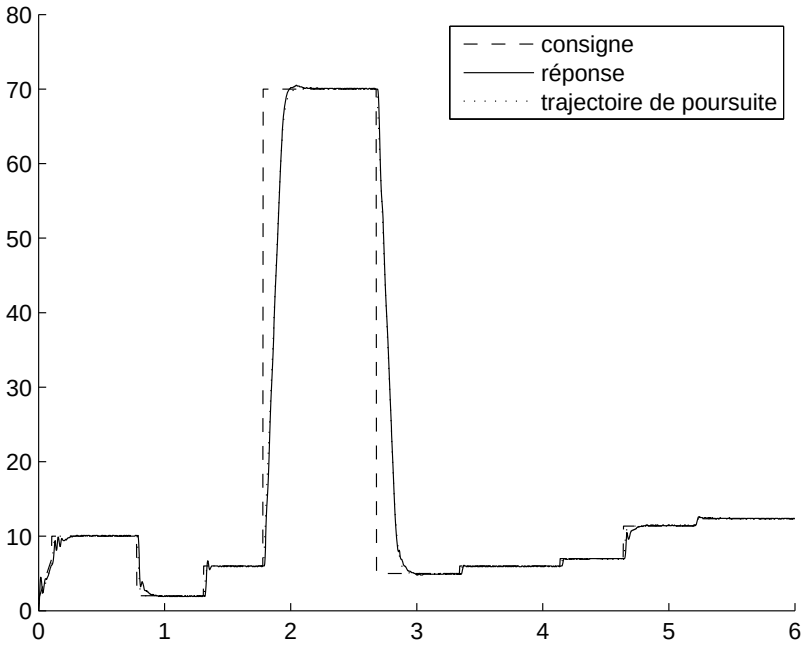

Fig. 8: Résultats généraux sans modèle, non bruités

figure

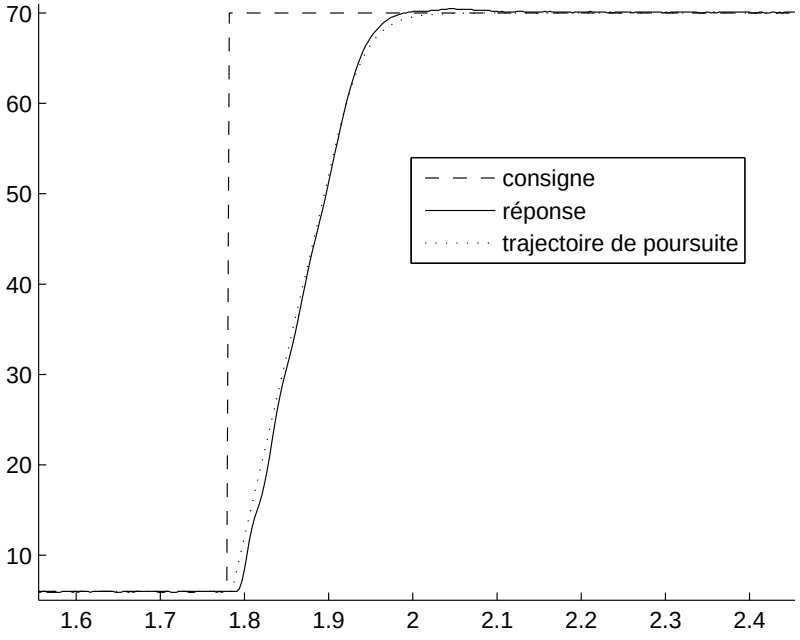

Fig. 9: Zoom de la figure 8

figure

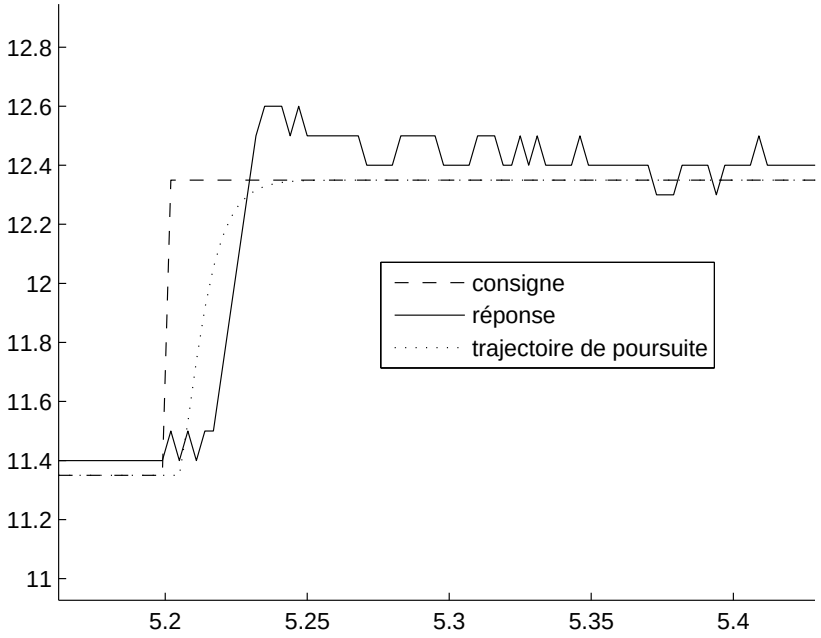

Fig. 10: Zoom de la figure 8

figure

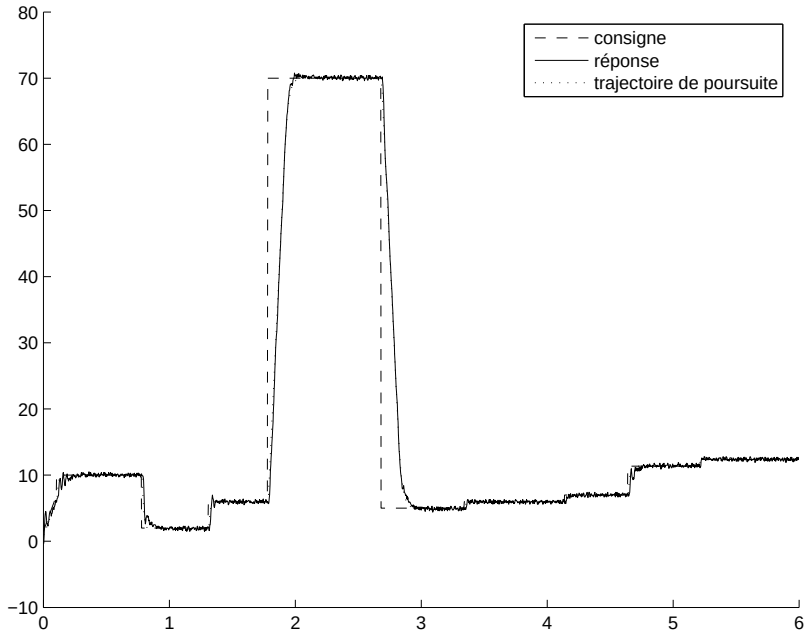

Fig. 11: Résultats généraux sans modèle, avec bruits

figure

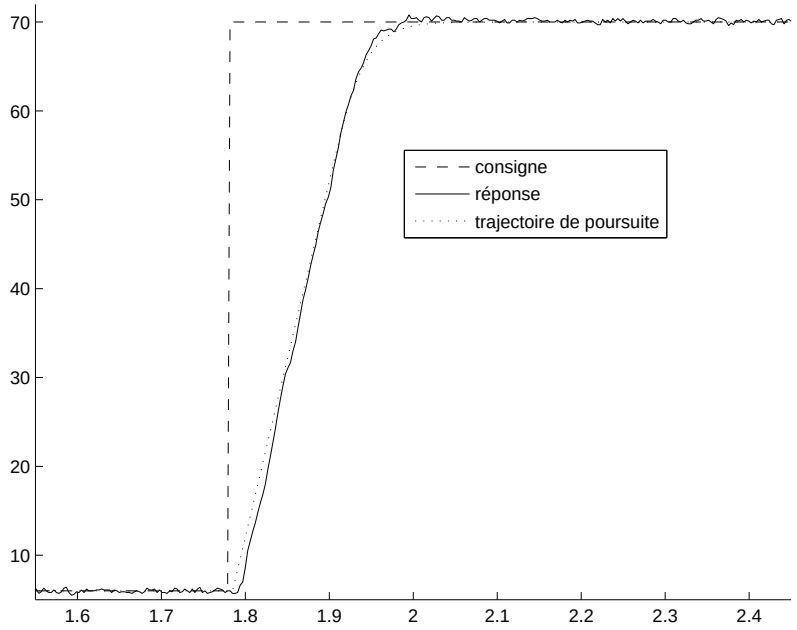

Fig. 12: Zoom de la figure 11

figure

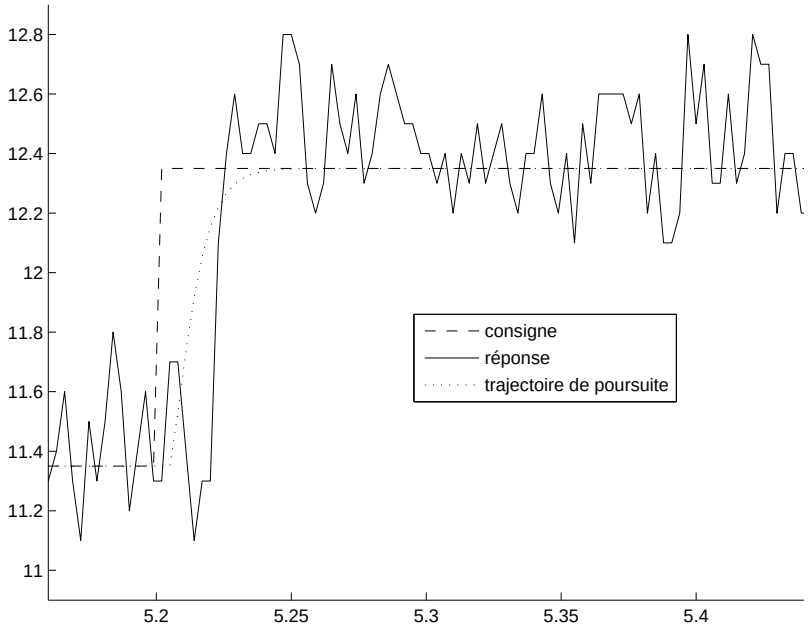

Fig. 13: Zoom de la figure 11

figure