



HAL
open science

Etude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur A model-free control for an engine throttle: a preliminary study

Cédric Join, John Masse, Michel Fliess

► To cite this version:

Cédric Join, John Masse, Michel Fliess. Etude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur A model-free control for an engine throttle: a preliminary study. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 2008, 42, pp.335–354. inria-00187327v3

HAL Id: inria-00187327

<https://inria.hal.science/inria-00187327v3>

Submitted on 28 Mar 2008 (v3), last revised 8 Apr 2008 (v4)

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.

Etude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur

A model-free control for an engine throttle: a preliminary study

Cédric JOIN^{a,b} — John MASSE^c — Michel FLIESS^{a,d}

^a INRIA – ALIEN

^b CRAN (CNRS, UMR 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 Equipe MAX, LIX (CNRS, UMR 7161), Ecole 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 en air de moteurs. Les simulations numériques se comparent favorablement à une commande prédictive linéaire, basée sur la platitude, nécessitant la connaissance d'un modèle précis. On fournit quelques détails de mise en œuvre.

ABSTRACT. New techniques of “model-free control” are applied to throttles, which are valves that directly regulate the amount of air entering the engines. Our numerical simulations may be favorably compared to a flatness-based linear predictive control, where a precise mathematical model is needed. Some details of the implementation are provided.

MOTS-CLÉS : Moteurs, papillons, commande sans modèle, identification, dérivation numérique, bruits, commande prédictive, commande par platitude.

KEYWORDS: Engines, throttles, model-free control, identification, numerical differentiation, noises, predictive control, flatness-based control.

1. Introduction



Figure 1. *Un exemple de papillon*

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 l'objet de nombreuses publications (voir, par exemple, (Aono *et al.*, 2006; Barić *et al.*, 2005; Canudas de Wit *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 1996; Deur *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007; Pavković *et al.*, 2006; Rossi *et al.*, 2000; Rothfuß *et al.*, 2000; Steward *et al.*, 2004; Vašak *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2006; Won *et al.*, 1998; Yang, 2004), et leurs bibliographies), selon des techniques diverses, nécessitant le plus souvent des modélisations globales, aussi précises que possible, à l'exception de quelques études, comme celle de (Naranjo *et al.*, 2007) utilisant le flou.

Ce travail préliminaire, issu d'une récente présentation de congrès (Join et al., 2006), vise à tester à propos de tels papillons des méthodes récentes de « commande sans modèle » (Fliess et al., 2006b; Fliess et al., 2006a; Fliess et al., 2008). On sait, en effet, que la mise en équations de mécanismes industriels se révèle trop souvent coûteuse en temps et moyens, surtout s'il faut, comme ici, tenir compte de phénomènes complexes de frottements, de vieillissement et de dispersions dues à la fabrication en série.

La section 2 rappelle brièvement les principes généraux de :

- 1) l'identification paramétrique des systèmes linéaires, développée par (Fliess et al., 2003; Fliess et al., 2008) et utilisée à la section 3.3.1 ;
- 2) notre « identification instantanée », où le modèle local, valide sur un court laps de temps et réactualisé à chaque instant, est d'une extrême simplicité ;
- 3) la dérivation numérique, qui permet de l'obtenir.

Après avoir décrit les papillons, la section 3 expose une première commande linéaire, de type prédictif, basée sur la *platitude*¹, nécessitant une modélisation mathématique « traditionnelle ». On passe, section 3.4, à notre commande sans modèle. De nombreuses simulations numériques, complétées section 3.4.2 par quelques détails sur la mise en œuvre informatique, devraient persuader les lecteurs de l'intérêt de notre point de vue.

2. Rappels

2.1. Identification paramétrique

Considérons le système linéaire $\dot{y} = y + bu$, $t \geq 0$, où le coefficient constant b est inconnu. Les notations usuelles du calcul opérationnel (voir (Doetsch, 1970; Parodi, 1957)) conduisent à

$$sY = Y + bU + y(0)$$

Annihilons la condition initiale $y(0)$ en appliquant aux deux membres la dérivation $\frac{d}{ds}$, dite parfois *algébrique* (Mikusinski, 1983; Mikusinski et al., 1987), qui correspond dans le domaine temporel à la multiplication par $-t$,

$$\left(1 + (s-1)\frac{d}{ds}\right)Y = b\frac{dU}{ds} \quad [1]$$

Cette équation traduit l'*identifiabilité linéaire* (Fliess et al., 2003; Fliess et al., 2008) de b . On se débarrasse des dérivées par rapport au temps, c'est-à-dire de $s\frac{dY}{ds}$, en multipliant les deux membres de [1] par une puissance négative suffisante de s .

1. Renvoyons à (Fliess et al., 1995); (Rotella et al., 2007) et à (Sira-Ramírez et al., 2004). On utilise ici une formalisation de la commande prédictive linéaire par platitude (voir (Fliess et al., 2000)), qui, comme on le sait, est indépendante de toute technique de commande optimale.

2.2. Identification instantanée

Limitons-nous à un système monovariante, linéaire ou non. Il est loisible² de supposer qu'il satisfait l'équation différentielle entrée-sortie

$$E(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(\iota)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(\kappa)}) = 0 \quad [2]$$

où E est une fonction « suffisamment régulière » de ses arguments. Si, pour $0 < n \leq \iota$, $\frac{\partial E}{\partial y^{(n)}} \neq 0$, le théorème des fonctions implicites permet de réécrire localement [2] sous la forme

$$y^{(n)} = \mathfrak{E}(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, y^{(n+1)}, \dots, y^{(\iota)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(\kappa)}) \quad [3]$$

En posant $\mathfrak{E} = F + \alpha u$, [3] devient

$$y^{(n)} = F + \alpha u \quad [4]$$

où

- $\alpha \in \mathbb{R}$ est un paramètre constant, *non physique*, choisi par le praticien ;
- F est déterminé grâce à la connaissance de $y^{(n)}$, u , α .

La dérivation numérique de la section 2.3 permet d'obtenir une bonne estimée de $y^{(n)}$ à chaque instant t . Le modèle [4] est ainsi dit *instantané*, car actualisé pas à pas. Il vise à remplacer des modèles mathématiques décrivant les machines dans une plage de fonctionnement aussi large que possible.

REMARQUE. — 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 (voir (Fliess et al., 1995; Fliess et al., 2000; Rotella et al., 2007; Sira-Ramírez et al., 2004)).

REMARQUE. — On trouvera par (Fliess et al., 2006b; Fliess et al., 2006a; Fliess et al., 2008) quelques règles générales de mise en œuvre, appliquées à divers exemples, dont certains considérés comme difficiles, même avec un modèle connu.

2.3. Dérivation numérique

Renvoyons à (Fliess et al., 2008); (Mboup et al., 2007) pour plus de détails sur la dérivation numérique, c'est-à-dire l'estimation des dérivées de signaux temporels bruités³. Nous n'en présentons ici que les principes généraux.

2. Les références (Fliess et al., 2006a; Fliess et al., 2006b), en [accès libre](#), fournissent bien plus de détails, tant théoriques que pratiques.

3. Ce sujet a, comme on le sait, suscité une littérature considérable, notamment en automatique (voir, par exemple, la bibliographie de (Fliess et al., 2008)).

2.3.1. Signaux polynômiaux

Soit la fonction polynomiale $x_N(t) = \sum_{\nu=0}^N x^{(\nu)}(0) \frac{t^\nu}{\nu!} \in \mathbb{R}[t]$, $t \geq 0$, de degré N . Avec les notations opérationnelles bien connues (voir (Doetsch, 1970; Parodi, 1957)), il vient :

$$X_N(s) = \sum_{\nu=0}^N \frac{x^{(\nu)}(0)}{s^{\nu+1}}$$

Multiplions les deux membres par des puissances positives de la dérivation algébrique $\frac{d}{ds}$. Les quantités $x^{(\nu)}(0)$, $\nu = 0, 1, \dots, N$, qui sont linéairement identifiables, satisfont le système triangulaire d'équations linéaire :

$$\frac{d^\alpha s^{N+1} X_N}{ds^\alpha} = \frac{d^\alpha}{ds^\alpha} \left(\sum_{\nu=0}^N x^{(\nu)}(0) s^{N-\nu} \right) \quad 0 \leq \alpha \leq N-1 \quad [5]$$

On se débarrasse des dérivées par rapport au temps, c'est-à-dire de $s^\mu \frac{d^\mu X_N}{ds^\mu}$, $\mu = 1, \dots, N$, $0 \leq \iota \leq N$, en multipliant les deux membres de (5) par $s^{-\bar{N}}$, $\bar{N} > N$.

2.3.2. Signaux analytiques

Considérons la fonction analytique définie par la série convergente $x(t) = \sum_{\nu=0}^{\infty} x^{(\nu)}(0) \frac{t^\nu}{\nu!}$, où $0 \leq t < \rho$. Sur l'intervalle $(0, \varepsilon)$, $0 < \varepsilon \leq \rho$, on approche $x(t)$ par le développement de Taylor tronqué $x_N(t) = \sum_{\nu=0}^N x^{(\nu)}(0) \frac{t^\nu}{\nu!}$, d'ordre N . Des calculs analogues à ceux du § 2.3.1 permettent alors d'obtenir des estimations des dérivées.

2.4. Débruitage

Les bruits entachant toute mesure sont considérés comme des phénomènes à fluctuations ou oscillations rapides⁴. Ils sont, bien entendu, amplifiés par la dérivation temporelle, c'est-à-dire par des puissances positives de s en [1] et [5]. On les atténue donc avec des filtres passe-bas, comme, par exemple, des intégrales itérées. En multipliant les deux membres de [1] et [5] par $s^{-\bar{N}}$, pour $\bar{N} > 0$ assez grand, ou par un filtre rationnel passe-bas convenablement choisi, on obtient le débruitage recherché.

2.5. Programmation

L'identification paramétrique de la section 2.1 s'effectue grâce à une courte fenêtre temporelle d'intégration qui autorise la boucle fermée. Pour la dérivation numérique,

4. Renvoyons à (Fliess, 2006) pour un formalisme mathématique précis, utilisant l'analyse non standard.

on utilise également de courtes fenêtres d'intégration qui, étant de plus glissantes, permettent une estimation en temps réel des dérivées à chaque instant⁵.

3. Étude du papillon

3.1. Présentation

3.1.1. Généralités

Le conducteur appuie sur la pédale de l'accélérateur. 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.

3.1.2. 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.

3.1.3. Performances désirées

Nous avons choisi les performances suivantes, résumées au tableau 1. 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. — Il existe d'autres modes de dysfonctionnements et de secours, que nous ne détaillerons pas ici.

5. Renvoyons le lecteur intéressé à C. Join (cedric.join@cran.uhp-nancy.fr) pour ces programmes.

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

t_{90} et t_{eb} sont, respectivement, les temps de réponse, à 90 %, et d'établissement de la consigne, à 0, 2 près.

Tableau 1. Performances désirées

3.2. Électronique de commande

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 figure 2) doit réaliser plusieurs asservissements simultanés, d'où l'impossibilité de réduire davantage la période d'échantillonnage.

3.3. Commande avec modèle

La principale difficulté dans ce type d'asservissement est de réaliser des petits déplacements de l'ordre de 1 degré. L'asservissement se comporte mieux en descente (figure 6) qu'en montée (figure 5). En effet, les frottements secs, difficilement identifiables, perturbent fortement le démarrage et la stabilisation. La commande plate, utilisée avec une bonne estimation de la précontrainte, permet d'obtenir rapidement au démarrage une commande suffisamment énergétique et bien dosée afin de décoller le papillon. Si toute l'énergie de la commande est absorbée par le frottement sec, c'est le PID qui prend le relais. C'est pourquoi on note sur certaines figures, comme la 10, un ralliement tardif vers le point de consigne. On reste tout de même dans une plage admissible de 0,2 degré, au pas de quantification près, qui est de 0,1 degré. Augmenter la dynamique du PID engendre des oscillations sur certaines plages de fonctionnement. L'objectif que nous nous étions fixé, pour des raisons de robustesse par rapport aux dispersions de conception, est d'utiliser un seul PID dans toute la plage de fonctionnement : on évite ainsi le calcul de multiples coefficients de PID et la gestion des transitions entre eux.

Le 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 (voir (Deur et *al.*, 2004)).

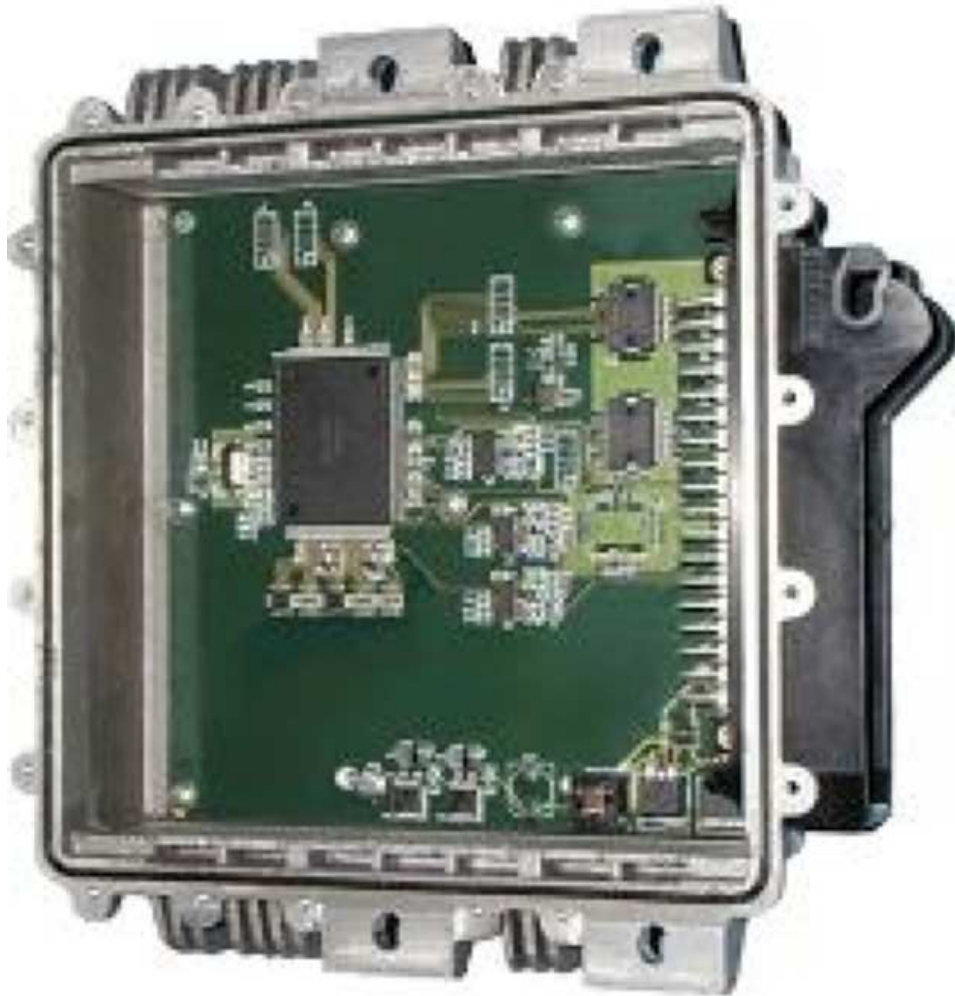


Figure 2. *Calculateur E 35.*

3.3.1. *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 des paramètres du modèle et des efforts de précontraintes est délicate avec les techniques usuelles. Il est nécessaire de construire un protocole

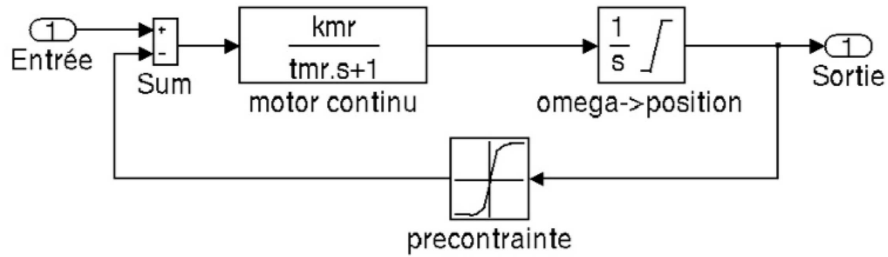


Figure 3. Schéma de principe

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. — D'autres phénomènes extérieurs peuvent altérer le fonctionnement du papillon :

- variation de la tension de la batterie,
- température ambiante.

3.3.2. 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 (voir (Fliess et al., 1995; Fliess et al., 2000; Rotella et al., 2007; Sira-Ramírez et al., 2004)). 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 à la section 3.1.3. Voir l'ensemble de ces trajectoires en figure 4.

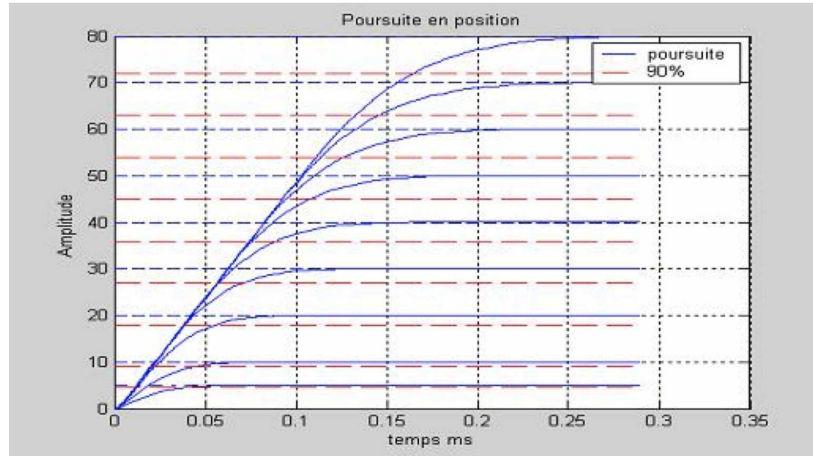


Figure 4. Trajectoires de références

On y ajoute, selon les préceptes de la commande prédictive par platitude (voir (Fliess et al., 1995; Fliess et al., 2000; Rotella et al., 2007; Sira-Ramírez et al., 2004)), le rejet des précontraintes⁶ $\text{Pinv}(y)$ 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 référence⁷.

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.

6. La fonction $\text{Pinv}(y)$ représente la tension nécessaire à appliquer au papillon pour qu'il se maintienne en la position y , c'est-à-dire pour lutter contre le ressort de précontrainte, qui ramène en la position *limp home*. Il est nécessaire d'anticiper son action et donc de l'identifier correctement avant toute conception de lois de commandes de type « rejet de perturbations ». Le vieillissement du papillon, son encrassement, les dispersions de fabrication altèrent la forme et les valeurs de la précontrainte. Il est donc nécessaire d'identifier à nouveau les valeurs de cette précontrainte selon des cycles de vie bien définis du véhicule, si l'on souhaite conserver les performances désirées.

7. Répétons, ici, ce qui a déjà été souvent écrit à propos de la platitude (voir (Fliess et al., 1995; Fliess et al., 2000; Rotella et al., 2007; Sira-Ramírez et al., 2004)) : le calcul des dérivées n'offre, ici, aucune difficulté puisque l'on connaît l'expression analytique de la référence.

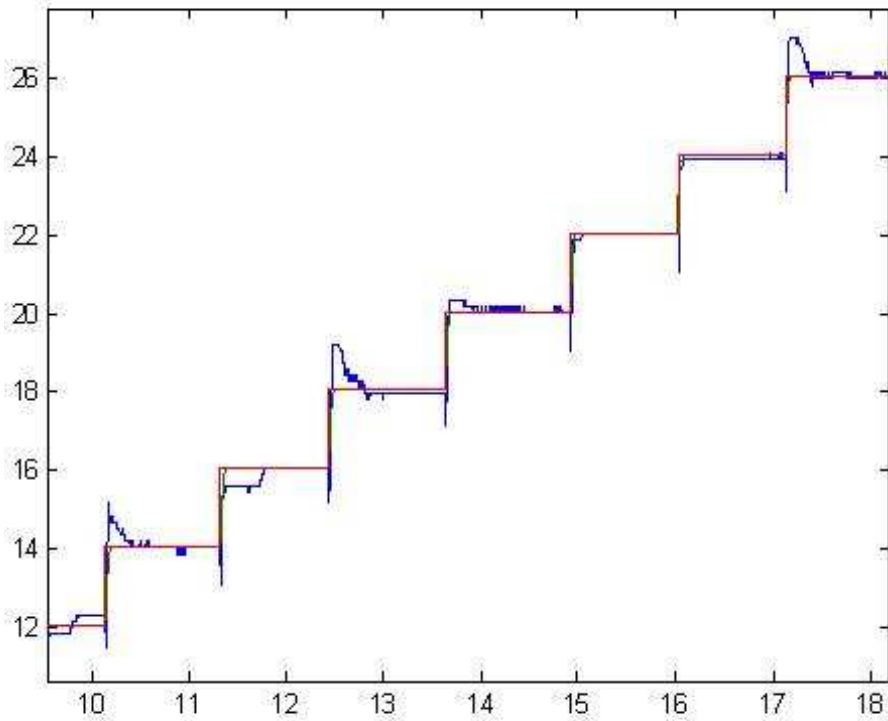


Figure 5. Résultats en montée

3.3.3. Difficultés complémentaires

Avec un papillon motorisé en couple, où l'arbre du moteur est relié directement à l'ailette, il devient presque 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.

3.4. Commande sans modèle

3.4.1. Généralités

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.

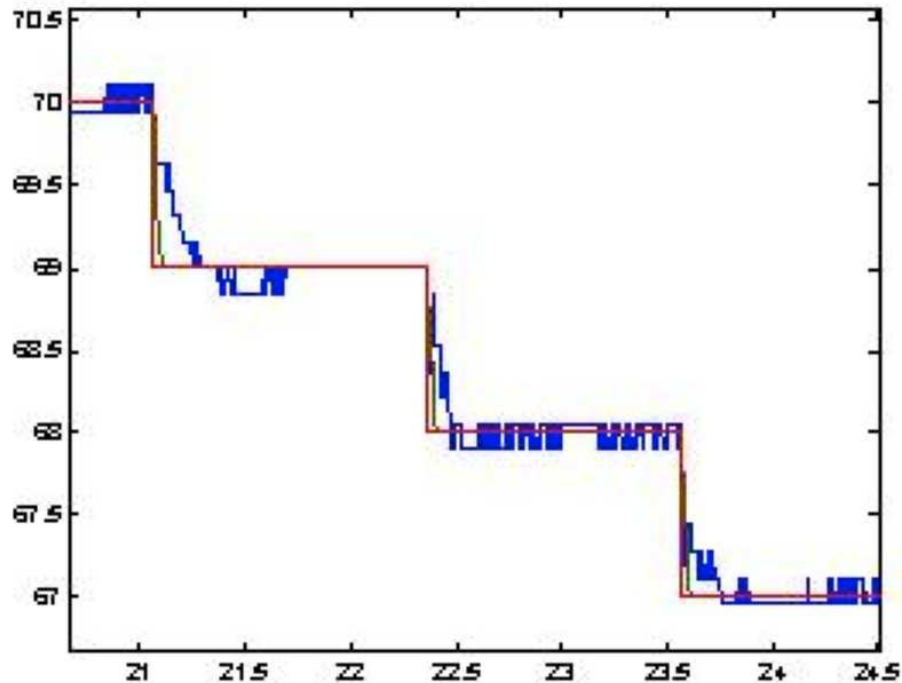


Figure 6. Résultats en descente

Ici, il n'a pas été nécessaire d'identifier la précontrainte ou d'autres paramètres, ce qui simplifie beaucoup les choses. Comme pour la première commande, on a implanté une dynamique de poursuite calibrée sur des trajectoires de référence. Une structure PID normalisée assure la précision.

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 $0,2^\circ$ sur la sortie.

Afin de mieux tester, encore, notre approche et sa robustesse, nous fournissons des simulations avec données entachées 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. —On trouvera en (Fliess, 2006) 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.

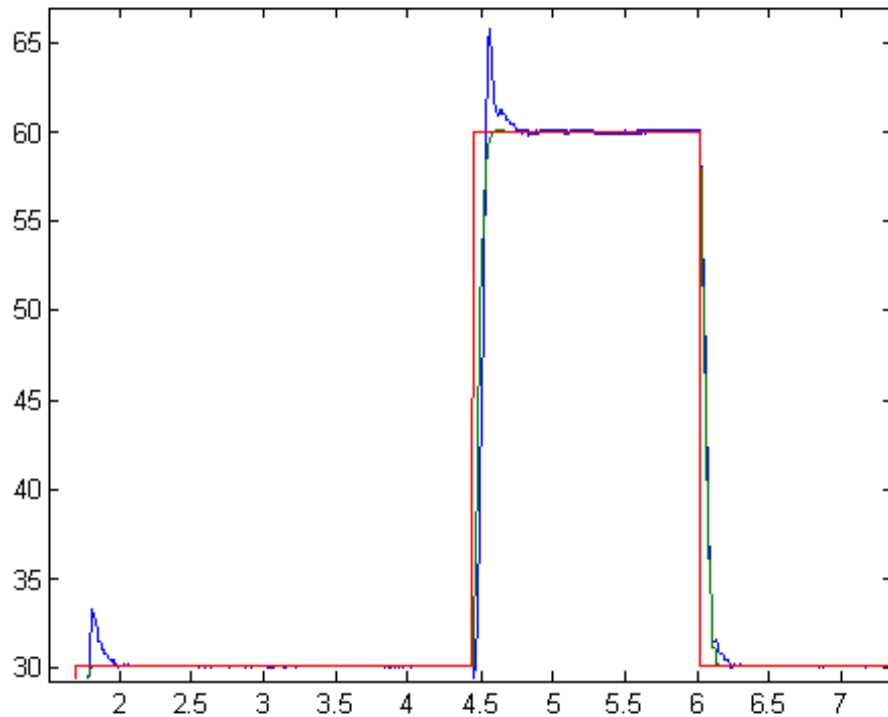


Figure 7. Résultats en réponse à d'importants échelons d'amplitudes

3.4.2. Mise en œuvre

La loi de commande a été implantée sur un microprocesseur HD64F7058BF80K qui accepte du code C standard et nécessite 8 cycles machines (80MHz) pour réaliser une multiplication sur des nombres flottants.

Pour l'écriture du code nous avons utilisé notre atelier logiciel développé en Maple pour réaliser du prototypage rapide. Il permet d'obtenir une architecture de contrôle multi-cible du code et d'engendrer simultanément le code C/Matlab dans Simulink et le code C à implanter dans le calculateur cible, à partir d'une même source. La mise au point du code a été faite sur le code généré en Matlab puis en C, inclus directement dans Simulink, puis enfin sur le calculateur. Ainsi, nous avons pu très rapidement :

- tester sous Simulink le code réellement implanté dans le calculateur,
- vérifier la robustesse et le « profilage » de notre loi de commande par rapport à la précision numérique (Digit),

Types d'opération	Nombres d'opération	Nombres d'opération conditionnées (If then else)
Additions	20	3
Divisions	4	
Multiplications	19	2
Assignements	55	12

Tableau 2. Opérations nécessaires à la commande

- obtenir à chaque étape de la conception un code C et/ou Matlab, engendré proprement, c'est-à-dire lisible, bien structuré et optimisé,
- vérifier la cohérence du code dans un langage de haut niveau (Maple),
- avoir le nombre d'opérations nécessaires à la réalisation de la loi de commande, à chaque étape de sa conception, et ainsi, prendre en compte les contraintes fortes du temps réel dès le début du cycle du développement.

Le tableau 2 est engendré automatiquement par MapleTM. Il récapitule le nombre d'opérations nécessaires à chaque pas de calcul en fonction des branchements logiques. Il est révélateur de la simplicité de la loi de commande proposée.

4. Conclusion

L'implantation en temps réel de cette commande sans modèle est en cours de développement. D'autres travaux, sur les systèmes hybrides (Bourdais *et al.*, 2007) et sur certains matériaux (Gédouin *et al.*, 2008), ont déjà été menés avec succès.

Un prochain article (Fliess *et al.*, 2008) fera un point théorique plus précis sur la commande sans modèle, tout en l'accompagnant de diverses considérations sur la commande à modèle restreint, ou incomplet, dont certains aspects de (Villagra *et al.*, 2008) peuvent être vus comme une première manifestation pratique⁸.

5. Bibliographie

- T. Aono, T. Kowatari, « Throttle-control algorithm for improving engine response based on air-intake model and throttle-response model », *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 53, p. 915-921, 2006.
- M. Barić, I. Petrović, N. Perić, « Neural network-based sliding mode control of electronic throttle », *Engineering Appl. Artificial Intelligence*, vol. 18, p. 951-961, 2005.
- R. Bourdais, M. Fliess, C. Join, W. Perruquetti, « Towards a model-free output tracking of switched nonlinear systems », *Proc. 7th IFAC Symp. Nonlinear Control Systems (NOLCOS 2007)*, Pretoria, 2007 (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00147702/fr>).

8. Voir aussi l'atténuation des perturbations par (Fliess *et al.*, 2008).

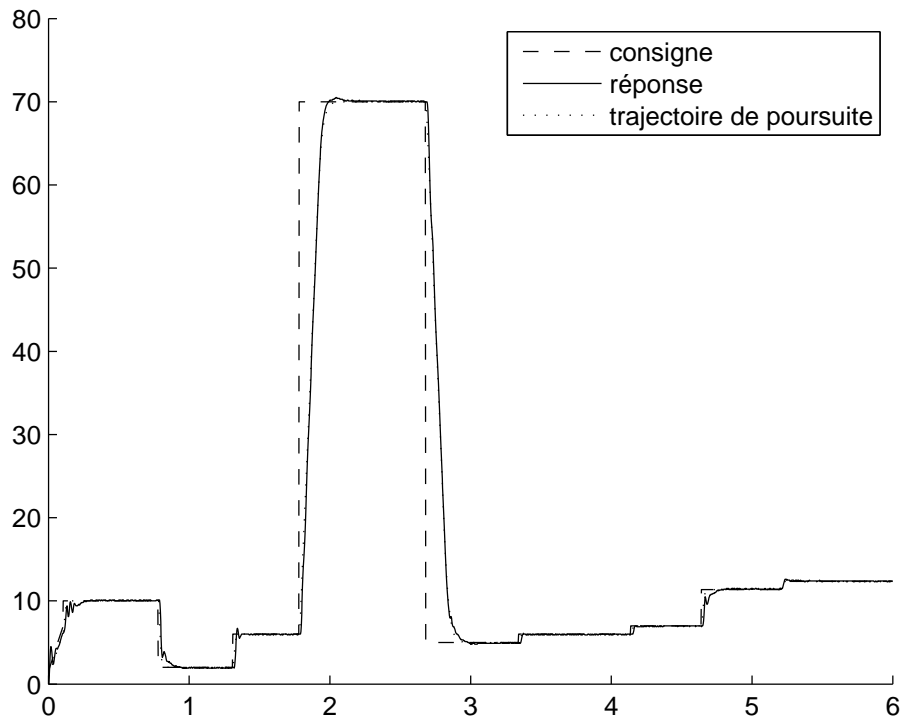


Figure 8. Résultats généraux pour la commande sans modèle : cas non bruité

- C. Canudas de Wit, I. Kolmanovsky, J. Sung, « Adaptive pulse control of electronic throttle », *Proc. Amer. Control Conf.*, Arlington, VA, 2001.
- S.-B. Choi, J.K. Hedrick, « Robust throttle control of automatic engines: theory and experiments », *J. Dynamic Syst. Measur. Control*, vol. 118, p. 92-98, 1996.
- 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.*, vol. 40, p. 821-834, 2004.
- G. Doetsch, « Einführung in Theorie und Anwendung der Laplace-Transformation », 2. Auflage, Birkhäuser, 1970. Traduction anglaise : *Introduction to the Theory and Application of the Laplace Transform*, Springer, 1974.
- M. Fliess, « Analyse non standard du bruit », *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. I*, vol. 342, p. 797-802, 2006.
- M. Fliess, C. Join, « Commande sans modèle et commande à modèle restreint », à paraître en 2008 (bientôt accessible sur <http://hal.inria.fr>).

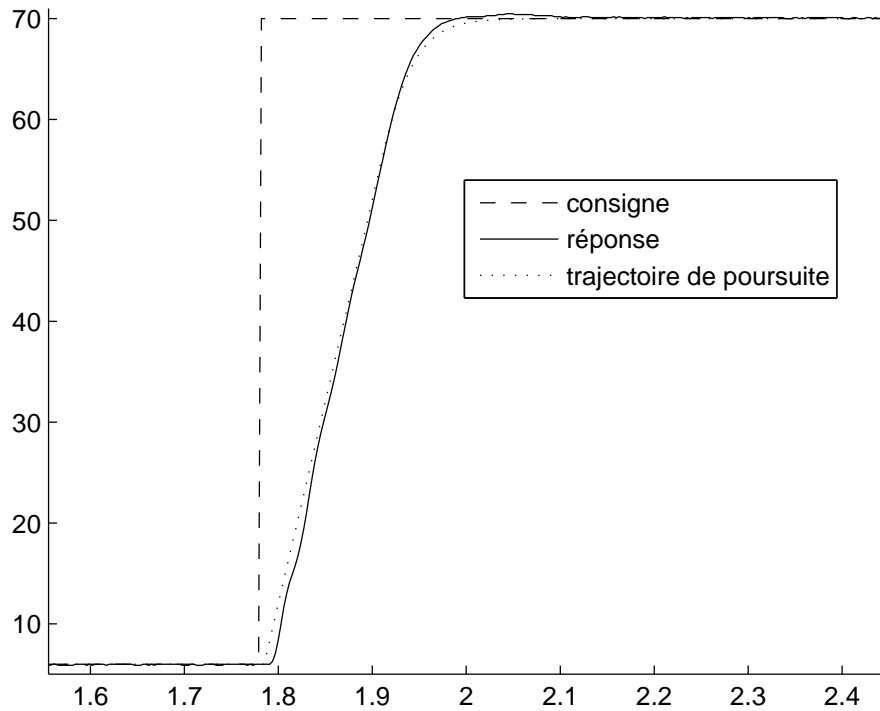


Figure 9. Zoom de la figure 8

- M. Fliess, C. Join, M. Mboup, H. Sira-Ramírez, « Vers une commande multivariable sans modèle », *Actes Conf. Internat. Francoph. Automatique (CIFA 2006)*, Bordeaux, 2006a (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00001139/fr>).
- M. Fliess, C. Join, H. Sira-Ramírez. « Complex continuous nonlinear systems: their black box identification and their control », *Proc. 14th IFAC Symp. System Identification (SYSID 2006)*, Newcastle, Australie, 2006b (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00000824/fr>).
- M. Fliess, C. Join, H. Sira-Ramírez, « Non-linear estimation is easy », *Internat. J. Modelling Identification Control*, vol. 3, 2008 (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00158855/fr>).
- M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon, « Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples », *Internat. J. Control*, vol. 61, p. 1327-1361, 1995.
- M. Fliess, R. Marquez, « Continuous-time linear predictive control and flatness: a module-theoretic setting with examples », *Internat. J. Control*, vol. 73, p. 606-623, 2000.

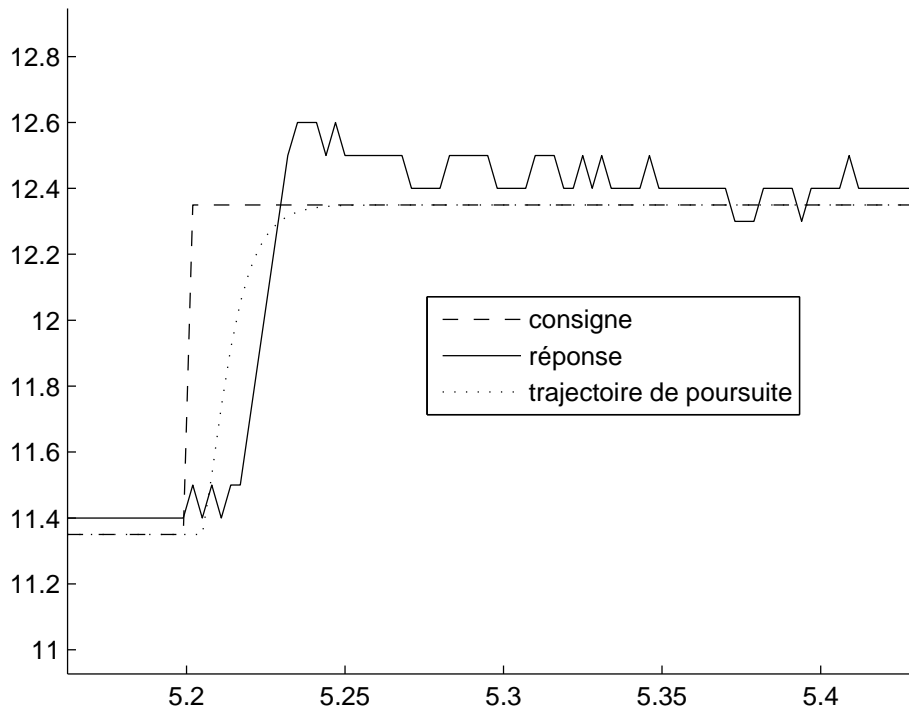


Figure 10. Zoom de la figure 8

- M. Fliess, H. Sira-Ramírez, « An algebraic framework for linear identification », *ESAIM Control Optim. Calc. Variat.*, vol. 9, p. 151-168, 2003.
- M. Fliess, H. Sira-Ramírez, « Closed-loop parametric identification for continuous-time linear systems », in H. Garnier & L. Wang (Eds): « Continuous-Time Model Identification from Sampled Data », Springer, 2008 (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00114958/fr>).
- P.-A. Gédouin, C. Join, E. Delaleau, J.-M. Bourgeot, S.A. Chirani, S. Calloch, « Model-free control of shape memory alloys antagonistic actuators », *Proc. 17th IFAC World Congress (WIFAC 2008)*, Seoul, 2008 (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00261891/fr/>).
- C. Join, J. Masse, M. Fliess, « Commande sans modèle pour l'alimentation de moteurs : résultats préliminaires et comparaisons », *Actes 2^e Journées identification et modélisation expérimentale (JIME 2006)*, Poitiers, 2006 (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00096695/fr>).

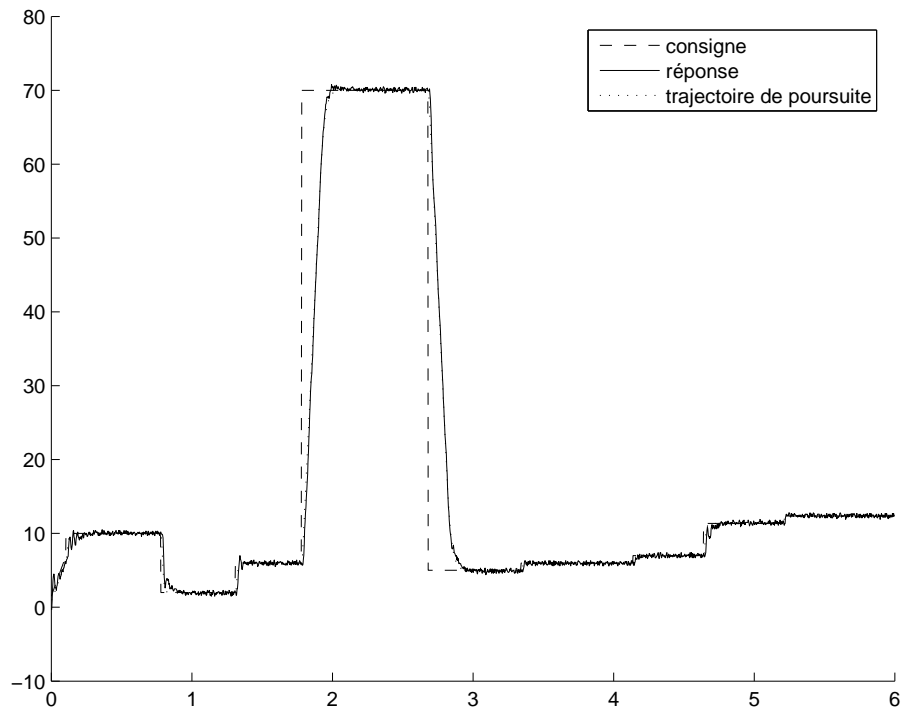


Figure 11. Résultats généraux de la commande sans modèle : cas bruité

- D. Kim, H. Peng, S. Bai, J.M. Maguire, « Control of integrated powertrain with electronic throttle and automatic transmission », *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 15, p.474-482, 2007.
- M. Mboup, C. Join, M. Fliess, « A revised look at numerical differentiation with an application to nonlinear feedback control », *Proc. 15th Mediterrean Conf. Control Automation (MED 2007)*, Athènes, 2007 (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00142588/fr>).
- J. Mikusinski, « Operational Calculus », 2nd ed., Vol. 1, PWN & Pergamon, 1983.
- J. Mikusinski, T. Boehme, « Operational Calculus », 2nd ed., Vol. 2, PWN & Pergamon, 1987.
- J.E. Naranjo, C. González, R. García, T. de Pedro, « Cooperative throttle and brake fuzzy control for acc+stop&go maneuvers », *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 56, p. 1623-1630, 2007.
- M. Parodi, « Introduction à l'analyse symbolique », Gauthier-Villars, 1957.
- D. Pavković, J. Deur, M. Jansz, N. Perić, « Adaptive control of automotive electronic throttle », *Control Engineering Practice*, vol. 14, p. 121-136, 2006.

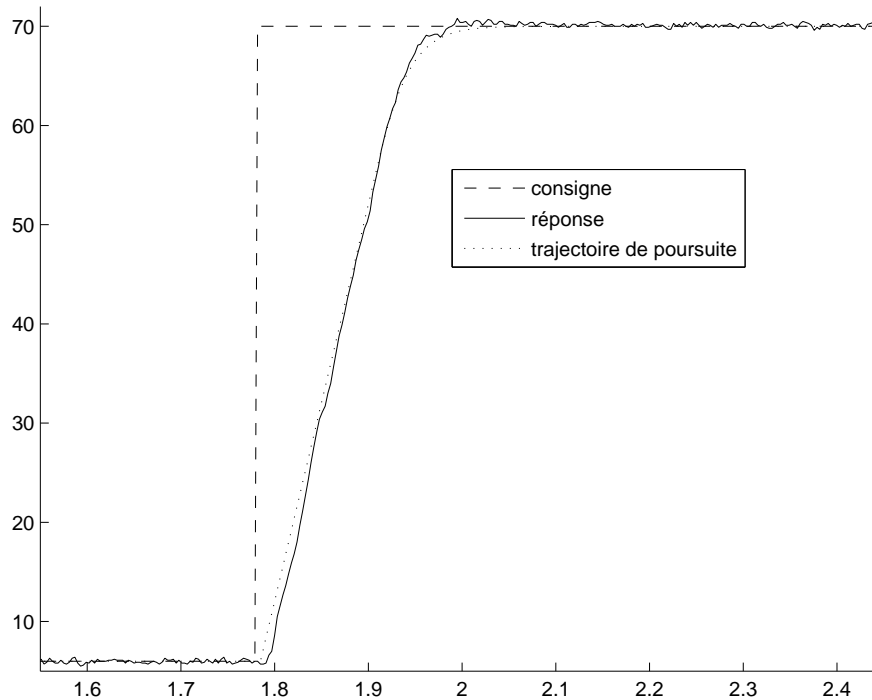


Figure 12. Zoom de la figure 11

- C. Rossi, A. Tili, A. Tonielli, « Robust control of a throttle body for drive by wire operation of automotive engines », *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 8, p. 993-1002, 2000.
- F. Rotella, I. Zambettakis, « Commande des systèmes par platitude », *Techniques de l'ingénieur*, S7450, 2007.
- 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.
- H. Sira-Ramírez, S. Agrawal, « Differentially Flat Systems », Marcel Dekker, 2004.
- P. Stewart, P.J. Fleming, « Drive-by-wire control of automotive driveline oscillations by response surface methodology », *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 12, p. 737-741, 2004.
- M. Vašak, M. Baotic, M. Morari, I. Petrovic, N. Peric, « Constrained optimal control of an electronic throttle », *Internat. J. Control*, vol. 79, p. 465-478, 2006.

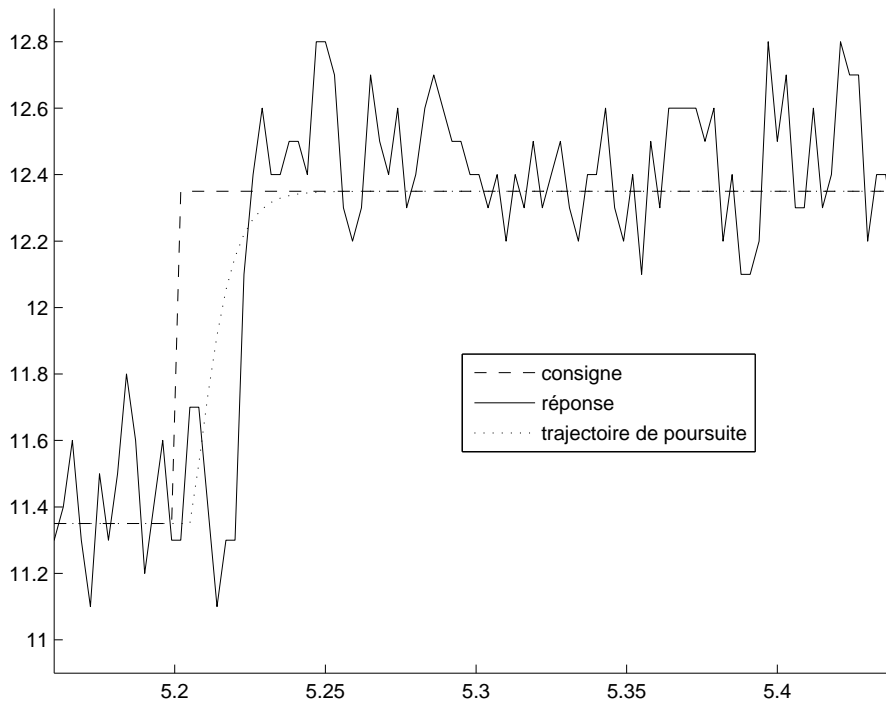


Figure 13. Zoom de la figure 11

- J. Villagra, B. d'Andréa-Novel, M. Fliess, H. Mounier, « Estimation of longitudinal and lateral vehicle velocities: an algebraic approach », *Proc. American Control Conference (ACC 2008)*, Seattle, 2008 (accessible sur <http://hal.inria.fr/inria-00263844/fr/>).
- 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*, vol. 19, p. 189-200, 2006.
- 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 Systems Technology*, vol. 6, p. 678-687, 1998.
- C. Yang, « Model-based analysis and tuning of electronic throttle controllers », *Proc. SAE World Congress*, Detroit, MI, 2004.