HAL open science

Estimation du profil de la chaussée pour la dynamique du véhicule

Sebastian Erhart, Moustapha Doumiati, Olivier Sename, John Jairo Martinez Molina, Luc Dugard

To cite this version:

Sebastian Erhart, Moustapha Doumiati, Olivier Sename, John Jairo Martinez Molina, Luc Dugard. Estimation du profil de la chaussée pour la dynamique du véhicule. JD-JN-MACS 2011 - 4èmes Journées Doctorales/Journées Nationales MACS, Jun 2011, Marseille, France. pp.221-226. hal-00681179

HAL Id: hal-00681179

https://hal.science/hal-00681179v1

Submitted on 20 Mar 2012

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.

Estimation du profil de la chaussée pour la dynamique du véhicule

Sebastian Erhart, Moustapha Doumiati, John Martinez, Olivier Sename, Luc Dugard

Gipsa-lab CNRS UMR 5216, Grenoble-INP
961 Rue de la Houille Blanche, 38402 Saint Martin d'Hères, France

Prenom.Nom@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé— **Les défauts de la route par rapport à une surface idéalement plane constituent ce que l'on appelle son uni ou son profil. Au delà de ses effets sur les mouvements verticaux du véhicule, le profil de la chaussée joue un rôle prépondérant dans l'interaction avec le pneumatique. De ce fait, il influe directement sur la réponse dynamique du véhicule. Bien que la connaissance de cette variable soit essentielle pour une meilleure évaluation du comportement du véhicule, elle n'est pas disponible sur les véhicules de série pour des raisons techniques ou économiques. Par conséquent, une estimation fiable du profil de route serait un outil très intéressant pour les lois de contrôle de la dynamique verticale du véhicule. Dans ce contexte, le but de cet article est de développer une nouvelle méthode basée sur la théorie de Q-paramétrisation pour la reconstruction du profil en long. Une phase de validation en simulation, exploitant un jeu de données réelles, montre la pertinence de la méthode proposée.**

Mots-clés— **Profil de la chaussée, dynamique verticale du véhicule, estimation, Q-paramétrisation.**

I. Introduction

Les spécialistes du monde routier, des travaux publics, et les constructeurs automobiles s'intéressent depuis longtemps aux aspérités présentes sur les chaussées. Ces défauts de la route par rapport à une surface idéalement plane constituent ce que l'on appelle son uni ou son profil. La géométrie, les irrégularités et les déformations du sol modifient constamment la répartition des forces du contact roues/sol, les positions du véhicule et les orientations des roues. Par conséquent, le profil est considéré comme une entrée essentielle qui affecte d'une manière significative la réponse dynamique du véhicule.

La connaissance du profil de chaussée, représenté par un signal non-stationnaire, est indispensable surtout pour :

- l'analyse de la qualité de la route pour déduire les conséquences sur le confort des passagers,
- l'optimisation des suspensions,
- l'amélioration de la sécurité et la maniabilité du véhicule,
- une meilleure compréhension de la dynamique du véhicule.

Parmi les méthodes existantes pour la mesure du profil en long, nous citons l'APL (Analyseur de Profil en Long) et le GMP (General Motor Profile). L'APL est un outil de mesure développé au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) à la fin des années 1960 [1], [2]. C'est un appareil fiable, dans une bande passante fréquentielle très précise de la chaussée, dont les performances ont été l'objet de plusieurs études et recherche. L'APL représenté sur la figure 1 est un système mécanique composé d'une remorque mono-roue tractée par un véhicule à vitesse constante, qui délivre un signal représentatif du profil. Un problème majeur de l'APL est qu'il ne peut pas être intégré à bord des véhicules standard pour des raisons techniques. Le GMP proposé en 1964 par General Motors se base sur deux capteurs : un accéléromètre et un capteur laser [3]. Cette méthode, dite inertielle, est la méthode la plus utilisée dans le monde. Elle consiste à faire passer sur une chaussée, un véhicule à faible vitesse muni de capteurs de distance et d'accéléromètres dans les deux traces de roulement et d'enregistrer les signaux décrivant l'état dynamique de la caisse. Un inconvénient majeur de cette technique est qu'elle dépend fortement de l'emplacement des capteurs et des bruits engendrés.

Plus récemment, dans le but de reconstruire le profil en temps-réel sur les véhicules de série, des recherches ont été développées pour remplacer les capteurs physiques (APL et GMP) par des estimateurs basés sur la théorie d'automatique. Par exemple, dans [1], l'auteur a proposé un observateur d'état à mode glissant pour estimer le profil en considérant un modèle complet du véhicule. Dans [4], les auteurs estiment le profil en se basant sur un modèle quart-véhicule et en développant un filtre de Kalman linéaire. Dans leur étude, le profil est représenté par une rampe. Dans [5], le profil est identifié en utilisant des accéléromètres, un modèle demi-véhicule, et une étude de classification des profils selon leurs comportements fréquentiels. Dans cette présente étude, une nouvelle méthode dédiée à la reconstruction du profil en long sera présentée. Les principales originalités de la méthode proposée par rapport à la littérature existante sont :

- une nouvelle synthèse du problème d'estimation en se basant sur la théorie de la Q-paramétrisation,

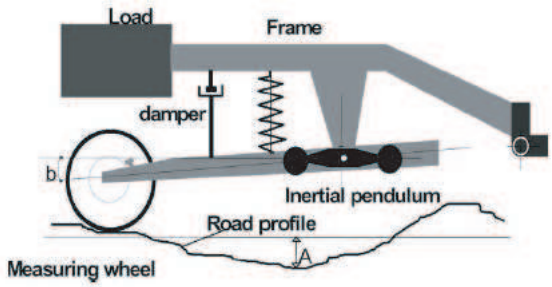

Fig. 1. APL : Analyseur de Profil en Long (Figure reproduite de [1])

– une nouvelle modélisation du profil de la chaussée par des fonctions sinusoidales à fréquences variables,
– une utilisation d'un nombre minimal de capteurs pour le dispositif d'estimation. En fait, la méthode proposée nécessite uniquement des mesures d'un accéléromètre de châssis, alors que [1] et [4] utilisent de plus des capteurs de débattements de suspensions.

Au regard du modèle véhicule/chaussée, il faut bien entendu qu'il soit représentatif, cependant il doit aussi être suffisamment simple pour éviter les difficultés d'analyse et les temps d'exécution longs inadéquats pour des applications embarquées. Dans la suite, le véhicule sera représenté par un modèle quart-véhicule capable de décrire les mouvements verticaux du véhicule, et la chaussée sera modélisée par une composition d'ondes spatiales.

La structure de cet article est la suivante. La deuxième section décrit la modélisation du système véhicule/chaussée. Dans la section trois, nous présentons le concept d'estimation. La section quatre est dédiée à la présentation des résultats de simulation. Finalement, la dernière section résume le travail et propose des perspectives.

II. Modélisation du système véhicule/chaussée

Pour la conception du schéma d'estimation du profil, il est indispensable d'établir en premier lieu, un modèle dynamique du système véhicule/chaussée.

A. Modèle de quart de véhicule

En général, le degré de finesse de la modélisation dépend des objectifs fixés. Comme notre objectif futur est d'utiliser le modèle dans une application embarquée à bord d'un véhicule et utilisant un minimum de capteurs, nous avons recours à des hypothèses qui réduisent le calcul et simplifient la modélisation du véhicule. Pour cela, nous avons choisi le modèle d'un quart de véhicule. De nombreux travaux ont montré la pertinence du modèle quart véhicule pour l'étude des suspensions automobiles (passives ou semi-actives) et de leur isolation vibratoire (ex. [6] et [7]).

Ce modèle est constitué d'une roue (de raideur K_2) et d'une suspension (de raideur K_1 et de coefficient d'amortissement C_1). Il est illustré par la figure 2 où la variable z_1 représente la hauteur de la caisse, la variable z_2 est la hauteur de la roue, m_1 est la masse suspendue appliquée au quart de véhicule, m_2 représente la masse non suspendue de la roue, et u est le profil de la chaussée.

Le comportement dynamique du système autour de son point d'équilibre est décrit sous la forme de l'équation (1).

$$\begin{cases} m_1\ddot{z}_1 &= -K_1 z_1 - C_1\dot{z}_1 + K_1 z_2 + C_1\dot{z}_2 \\ m_2\ddot{z}_2 &= -(K_1+K_2)z_2 - C_1\dot{z}_2 + K_1 z_1 \\ & \quad +C_1\dot{z}_1 + K_2 u \end{cases} \tag{1}$$

Par le biais d'une approximation linéaire, les coefficients de raideur du pneu et de la suspension sont considérés constants dans cette étude. De plus, nous ne considérons pas des composants actifs ou semi-actifs de la suspension, mais l'étude peut être généralisée.

B. Modèle de la chaussée

La caractérisation du profil de route sous forme d'un modèle est une des étapes clés qui détermine essentiellement

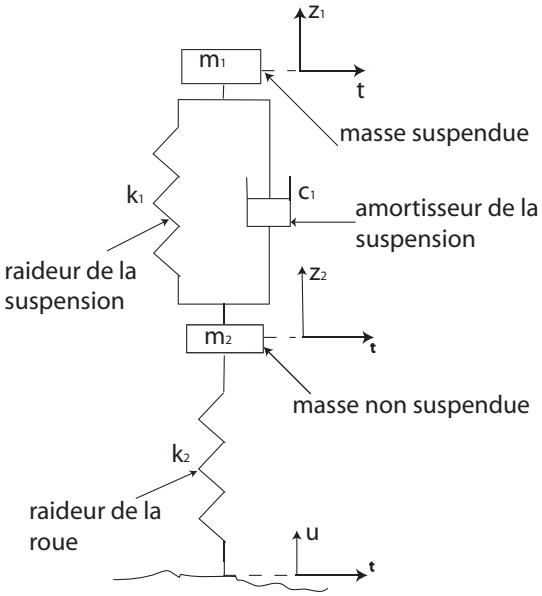

Fig. 2. Modèle d'un quart de véhicule

la performance et la qualité de la reconstruction du profil. Toutefois, il s'agit d'un exercice difficile car une prédiction fiable ne sera jamais obtenue. Des travaux ont conduit à une classification de routes à l'aide du spectre fréquentiel du profil, consigné dans une norme ISO [8]. Dans ce contexte, le profil peut être représenté par une composition d'ondes spatiales (nombre d'onde 'ν').

La figure 3 montre la décomposition spectrale d'un exemple de profil de route capté par la méthode GMP. Ce profil représente la trace de la roue avant gauche échantillonnée avec une distance de 0.1524 m.

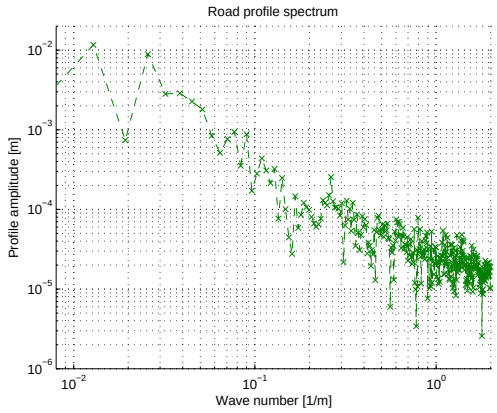

Fig. 3. Spectre spatial du profil de route (#1)

D'après cette figure, le spectre comporte des amplitudes importantes pour les composants avec un nombre d'onde bas ($\nu \approx 10^{-2}m^{-1}$) mais également des parties considérables pour des ondes élevées ($\nu \approx 10^{-1}m^{-1}$). Ce profil spatial se transforme à l'aide de la vitesse de la voiture v en fonction temporelle '$u(t)$' perceptible au niveau de la roue. D'après [9], la relation entre le nombre d'onde et la fréquence observable 'f' est donnée par :

$$f = v \times \nu. \tag{2}$$

Dans de nombreuses approches proposées dans la lité-

rature, comme dans [1] et [10], la modélisation du profil consiste à considérer nulle l'accélération du profil perceptible ($\ddot{u}(t) \approx 0$). Cette approximation correspond au cas d'une présence exclusive des basses fréquences. Dans cette étude le modèle du profil '$u(t)$' sera approximé par la composition d'un nombre fini 'N' des sinusoïdes.

$$u(t) \approx \sum_{i=1}^{N} \hat{u}_i \cdot sin(2\pi f_i t + \varphi_i), \tag{3}$$

où 'f_i' présente la i-ème fréquence considérée, '$\hat{u}_i$' constitue son amplitude attribuée (par exemple, à l'aide du spectre de la figure 3) et 'φ_i' dénomme son déphasage. Pour un profil de route réel (interprété comme un signal non-stationnaire) ces paramètres caractéristiques fréquentiels varieront en général dans le temps. Le problème considéré consiste à établir une estimation précise de '$\hat{u}_i$', 'φ_i' et 'f_i' pour un nombre 'N' donné.

III. Méthode d'estimation du profil

En se basant sur le modèle véhicule/chaussée présenté dans la Section II, et sur l'information concernant la hauteur de la caisse 'z_1', la reconstruction du profil peut être ramenée à un problème d'estimation d'état. La description de la méthode d'observation du profil sera détaillée dans les sous-sections suivantes. La méthode appliquée se base principalement sur des résultats élaborés dans le contexte des commandes adaptatives [11] [12] [13].

A. Q-Paramétrisation

Le modèle dynamique du quart de véhicule déduit de l'équation (1) est discrétisé avec une période d'échantillonnage de $T_s = 20ms$. Ce modèle discret est donné par :

$$G(z^{-1}) = \frac{z_1(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \tag{4}$$

où $G(z^{-1})$ représente la fonction de transfert entre le profil de la chaussée 'u' et la hauteur de la caisse 'z_1'.

Dans cette étude, l'observateur envisagé est considéré comme un système de commande minimisant l'erreur entre le signal de sortie z_1 et son estimation $\tilde{z}_1$, et ceci en se basant sur la théorie de la Q-paramétrisation. La figure 4 est dédiée à la représentation du concept d'estimation.

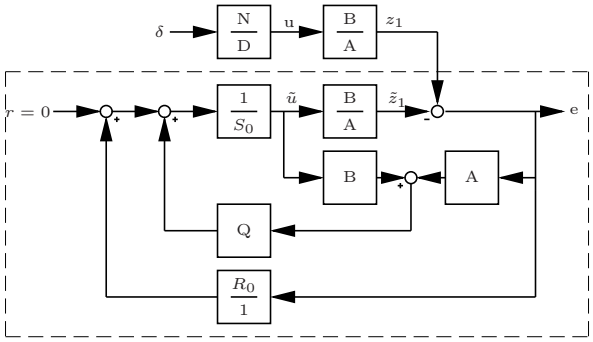

Fig. 4. Schéma bloc de l'observateur

En atteignant la coïncidence des deux signaux de sortie (mesure z_1/estimation $\tilde{z}_1$), l'observateur génère simultanément un signal $\tilde{u}$ qui excite l'entrée du modèle du quart véhicule $\frac{B}{A}$ et qui correspond à une image du vrai profil u.

La théorie de la conception de commande, basée sur les méthodes polynomiales, révèle la représentation des correcteurs stabilisant le système (4) sous la forme :

$$\frac{R(z^{-1})}{S(z^{-1})} = \frac{R_0(z^{-1}) + A(z^{-1})Q(z^{-1})}{S_0(z^{-1}) - B(z^{-1})Q(z^{-1})} \tag{5}$$

Cette représentation du correcteur est appelé *Youla-Kučera*-paramétrisation (ou Q-paramétrisation) [14] où $R_0(z^{-1})$ et $S_0(z^{-1})$ représentent le numérateur et le dénominateur d'un correcteur quelconque rendant les pôles du système en boucle fermée stables. $Q(z^{-1})$ est un polynôme dont les degrés de liberté peuvent servir à satisfaire des critères de performance sans toucher la stabilité du système. Le schéma bloc de l'observateur réalisant la Q-paramétrisation (5) est illustré dans la figure 4.

La représentation du profil temporel dans l'équation (3) peut être exprimée sous forme des polynômes $\frac{N}{D}$ à l'aide de sa transformée en Z. Cette expression correspond à un système dynamique qui, étant excité par la distribution de Dirac 'δ', fournit un signal de sortie identique à l'équation (3). Par conséquent, le polynôme D contient les pôles engendrés par la somme des sinusoïdes :

$$\frac{N(z^{-1})}{D(z^{-1})} = \frac{\tilde{N}(z^{-1})}{\prod_{i=1}^{N}\left(1 - 2z^{-1}\cos(\frac{2\pi f_i}{T_s}) + z^{-2}\right)}. \tag{6}$$

L'erreur entre la mesure z_1 et $\tilde{z}_1$ (dénommé e dans la figure 4) tend vers zéro indépendamment de l'existence d'une perturbation engendrée par (6), si l'équation diophantienne (7) est résolue [15].

$$S_o(z^{-1}) - B(z^{-1})Q(z^{-1}) = S'(z^{-1})D(z^{-1}) \tag{7}$$

La résolution de cette équation fournit le polynôme Q, basé sur la connaissance des fréquences f_i supposées dans le modèle du profil de la chaussée. Par suite, à cette étape de synthèse, l'observateur inclut le modèle quart de véhicule (4) et le modèle de la chaussée (3) pour un ensemble des fréquences fixes. Ce dernier est inclus sous la forme des coefficients fixes du polynôme Q. L'observateur ne sera pas capable de garantir un affaiblissement de l'erreur e, si les fréquences divergent des fréquences supposées. La performance correspond ainsi à un observateur de perturbation avec des modèles prédéfinis.

B. Algorithme d'adaptation

Afin d'arriver à une erreur d'estimation minimale dans le cas où le profil de route se compose de fréquences variables dans le temps, un polynôme estimé $\hat{Q}$ sera utilisé (au lieu du polynôme Q précalculé) dans l'observateur. $\hat{Q}$ est donné par l'équation (8) :

$$\hat{Q}(z^{-1}) = \underbrace{\begin{bmatrix}\hat{\theta}_1 & \cdots & \hat{\theta}_{n_{\hat{Q}}}\end{bmatrix}}_{\hat{\theta}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ z^{-(n_{\hat{Q}}-1)} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Ce polynôme $\hat{Q}$ est caractérisé par ses $n_{\hat{Q}}$ coefficients et peut être interprété comme une approximation de la solution de l'équation (7) déterminée à l'aide d'un critère de minimisation. Un tel critère, J constitue par exemple, l'erreur d'estimation au carré, obtenue à partir des coefficients $\hat{\theta}$:

$$J_0(t+1) = \frac{1}{2}\left[\varepsilon_0(t+1)\left(\hat{\theta}(t)\right)\right]^2. \tag{9}$$

L'idée de la méthode de minimisation récursive sera d'ajuster les coefficients à chaque pas dans la direction du gradient de J_0 pour s'approcher de sa valeur minimale.

L'erreur ε_0, contenant $\hat{\theta}(t)$), est appelée l'erreur d'estimation *a priori* et s'exprime par :

$$\varepsilon_0(t+1) = \frac{S_0 - B\hat{Q}}{AS_0 + BR_0} \cdot w(t+1). \tag{10}$$

La relation $w(t+1)$, où :

$$w(t+1) = Ae(t+1) + B^*\hat{u}(t), \tag{11}$$

est appliquée sous la condition que la structure du polynôme B correspond à $B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + \cdots + b_{n_B} z^{-n_B}$, ce qui permet d'introduire le polynôme $B^*(z^{-1}) = zB(z^{-1})$.

On définit le vecteur d'observation, $\phi(t+1)$:

$$\phi(t+1) = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ z^{-n_{\hat{Q}}} \end{bmatrix} \cdot w(t+1), \tag{12}$$

et le vecteur, $\phi^*(t+1)$, obtenu par un filtrage successif :

$$\phi^*(t+1) = \frac{B^*}{AS_0 + BR_0} \cdot \phi(t+1). \tag{13}$$

Ainsi, l'équation (10) est reformulée de la manière suivante :

$$\varepsilon_0(t+1) = \frac{S_0}{AS_0 + BR_0} \cdot w(t+1) - \hat{\theta} \cdot \phi^*(t), \tag{14}$$

d'où il s'ensuit le gradient recherché de l'équation (9) :

$$\frac{\partial J_0(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t)} = \varepsilon_0(t+1) \cdot (-\phi^*(t)). \tag{15}$$

La loi d'adaptation des coefficients devient :

$$\hat{\theta}^T(t+1) = \hat{\theta}^T(t) + F \cdot \varepsilon_0(t+1) \cdot \phi^*, \tag{16}$$

où F est une matrice de gain d'adaptation définie positive. Une réflexion similaire pour le critère de minimisation J :

$$J(t+1) = \frac{1}{2}\left[\varepsilon(t+1)\left(\hat{\theta}(t+1)\right)\right]^2, \tag{17}$$

basé sur l'erreur d'estimation *a posteriori* $\varepsilon(t+1)$ (contenant $\hat{\theta}(t+1)$) implique une normalisation de F, et fournit une loi d'adaptation stable pour n'importe quelle valeur de F de la forme :

$$\hat{\theta}^T(t+1) = \hat{\theta}^T(t) + \frac{F}{1 + \phi^{*T} F \phi^*} \cdot \varepsilon_0(t+1) \cdot \phi^*. \tag{18}$$

Le gain d'adaptation F peut être variable dans le temps. Souvent un gain décroissant est choisi [16]. Au début une convergence rapide vers les coefficients recherchés est envisagée. Ensuite le gain peut décroître pour : 1) éviter des oscillations des coefficients autour du minimum et 2) diminuer la sensibilité vis-à-vis du bruit. Finalement la conservation d'une valeur minimale du gain assure la réactivité pour ajuster les coefficients lorsque les fréquences observées varient.

IV. Résultats de simulation

L'évaluation de l'approche proposée est effectuée au moyen des simulations numériques dans Matlab/Simulink. Dans le premier essai, le signal de mesure z_1 est généré par l'injection du profil mesuré (dont le spectre est illustré sur la figure 3) dans un modèle identique au quart de véhicule (4). La vitesse de la voiture dans la simulation est fixée à $v = 50\ km/h$. Comme le système de suspension est stable, les coefficients du correcteur peuvent être mis égaux à $R_0 = 0$ et $S_0 = 1$. L'observateur est initialisé avec un polynôme $\hat{Q}$ contenant $n_{\hat{Q}} = 6$ coefficients : l'ordre du polynôme résultant est ainsi $n_{\hat{Q}} - 1 = 5$. Le choix de ce nombre résulte d'une suite d' essais avec des nombres variés. Une augmentation de '$n_{\hat{Q}}$' au delà de 6 ne conduit pas à une amélioration significative pour les profils simulés. Les coefficients '$\hat{\theta}$' du polynôme '$\hat{Q}$' sont initialisés à zéro. Le gain d'adaptation F est initialisé par une matrice diagonale réalisant une norme de F décroissante. Dans ce contexte, la norme (maximum des valeurs singulières) est considérée comme une mesure pour le gain matriciel et par conséquent un critère déterminant la dynamique de l'observateur. La valeur de la norme est fixée à 100 décroissant exponentiellement ($\tau = 1s$) vers une valeur de 1. La figure 5 montre le profil estimé et le profil de référence.

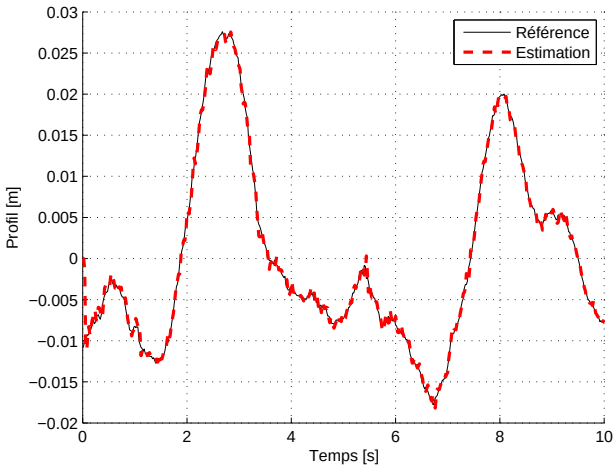

Fig. 5. Comparaison du profil de référence (#1) et son estimation, réalisé avec $v = 50\ km/h$

Il est clair que l'estimation du profil converge rapidement vers la référence. L'erreur d'estimation est représentée dans la figure 6.

L'erreur quadratique moyenne s'élève à $MSE = 9,3 \cdot 10^{-7} m^2$, sa racine est égale à $RMSE = 9,6 \cdot 10^{-4} m$. L'approche fréquentielle pour l'estimation du profil de route

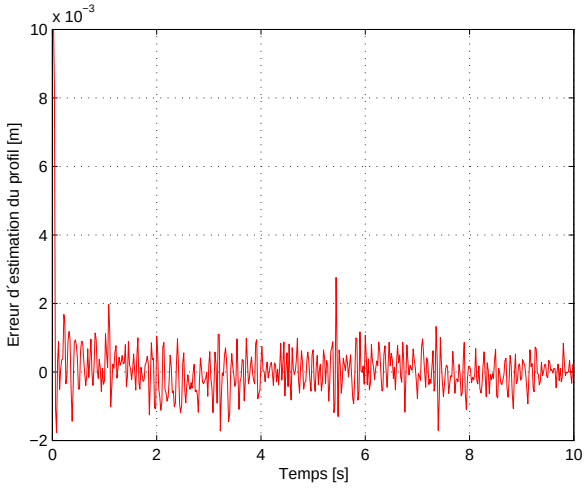

Fig. 6. Erreur d'estimation du profil (#1)

semble convenable malgré un caractère difficilement prédictible de la chaussée. Les tracés des coefficients $\hat{\theta}_i$ du vecteur $\hat{\theta}$, ainsi que la norme du gain d'adaptation F sont illustrés dans la figure 7.

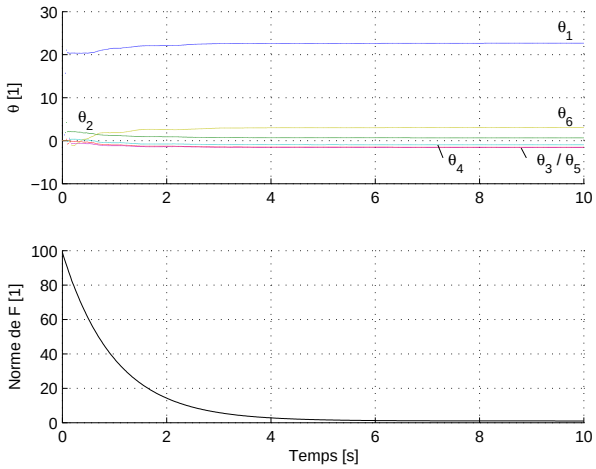

Fig. 7. Tracé des coefficients $\hat{\theta}$ et de la norme du gain d'adaptation F pour le profil (#1)

Initialement les coefficients convergent (à l'aide d'un gain d'adaptation élevé) rapidement vers des valeurs satisfaisantes selon le critère de minimisation (17). Cette adaptation permet de diminuer l'erreur d'estimation initiale. Ensuite la variabilité des coefficients est limitée sous forme d'un gain d'adaptation décroissant. Les valeurs des coefficients, obtenues pendant cette première période, fournissent également une estimation correcte du profil dans la suite.

Pour approfondir l'analyse de performance, le spectre du profil estimé est tracé sur la figure 8 en comparaison avec le spectre de référence.

Un deuxième essai d'estimation est effectué au moyen d'un autre profil de référence. La vitesse de la voiture est diminuée à $v = 30\ km/h$. Le correcteur '$\frac{R_0}{S_0}$', le gain d'adaptation 'F' et la valeur d'initialisation de '$\hat{\theta}$' sont choisis comme dans le premier essai. Le profil ainsi que son estimation sont représentés dans la figure 9.

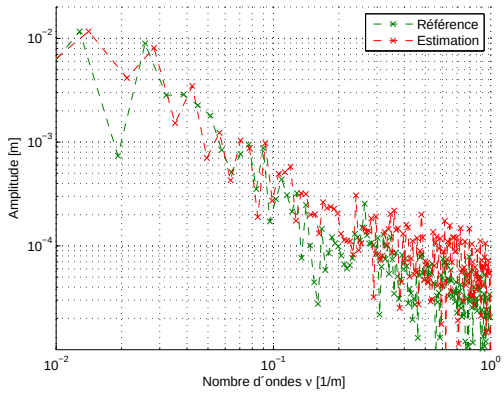

Fig. 8. Comparaison des spectres du profil de référence (#1) et son estimation

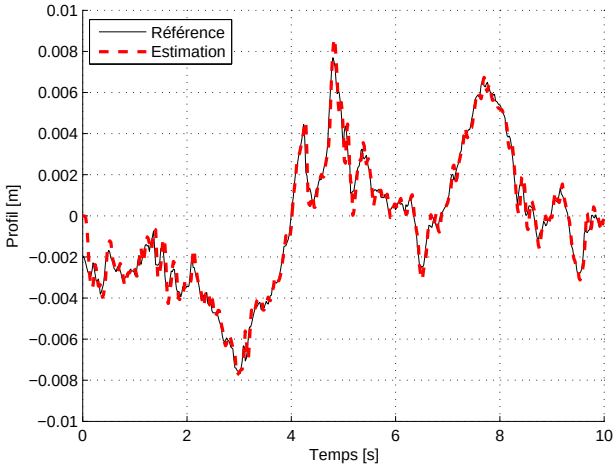

Fig. 9. Comparaison du profil de référence (#2) et de son estimation, réalisé avec $v = 30\ km/h$

Cette figure montre encore une fois la bonne reconstruction du profil. Après une convergence rapide, l'estimation fournit un résultat en conformité avec la référence. Les coefficients du polynôme '$\hat{Q}$' sont tracés sur la figure 10. On remarque que, pour cet essai, les coefficients '$\hat{\theta}_i$' évoluent différemment par rapport au premier essai. C'est normal puisqu'ils s'adaptent en fonction du profil rencontré afin de répondre au critère de minimisation (17).

V. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une nouvelle méthode d'estimation du profil en long de la chaussée. Le processus d'estimation est basé sur la théorie de la Q-paramétrisation et sur une analyse fréquentielle du signal de chaussée, où l'observateur proposé est considéré comme un système de commande minimisant l'erreur d'estimation. L'avantage de cette technique d'estimation consiste à prendre en compte un maximum d'information sur le caractère du profil de la chaussée. Par conséquent, une erreur d'estimation minimale, formulée au moyen d'un critère d'optimisation, est atteinte pour des profils différents. La méthode mise en œuvre a été testée sur des données réelles de profil de route, avec des résultats satisfaisants.

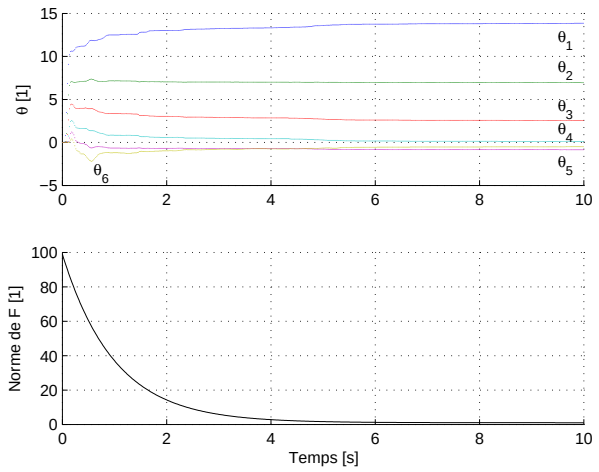

Fig. 10. Tracé des coefficients $\hat{\theta}$ et la norme du gain d'adaptation F pour le profil (#2)

Suite à ce travail, nous envisageons de :

- Tester la robustesse de la méthode par rapport aux incertitudes liées aux paramètres du véhicule (raideur du pneu, raideur de la suspension,...)
- Valider la méthode sur un véhicule expérimental avec des profils de route plus chahutés.
- Charger le correcteur $\frac{R_0}{S_0}$ à reproduire les basses fréquences contenues dans le profil de la chaussée. Cette démarche pourrait se révéler favorable pour des vitesses plus grandes.
- Améliorer la méthode pour prendre en compte, lors de l'estimation, les différentes situations de conduite (virage, accélération, décélération).

Remerciements

Le travail présenté dans cet article est supporté par le projet national INOVE/ANR 2010 BLAN 0308.

Références

[1] H. Imine. *Observation d'états d'un véhicule pour l'estimation du profil dans les traces de roulement*. Thèse de Doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin-en Yvelines, 2003.

[2] H. Imine, Y.Delanne, N.K.M'sirdi. *Road profile inputs for evaluation of the loads on the wheels*. Vehicle System Dynamics, vol. 43, Supplement, pp. 359-369, 2005.

[3] E.B. Splanger et W.J. Kelly. *Road profilometer method for measuring road profile*. General Motors Research Publication, GMR-452, 1964.

[4] M. Doumiati, G. Baffet, A. Charara, et A. Victorino. *Observateur d'état pour l'estimation du profil de la chaussée : Validation expérimentale*, JD-JN-MACS, Reims, 2007.

[5] A. Gonzalez, E. J. Obrien, Y. Y. Li, et K. Cashell. *The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness*, Vehicle System Dynamics, vol. 46(6), pp. 483-499, 2008.

[6] D. Sammier, O. Sename, et L. Dugard . *Skyhook and H_∞ control of semi-active suspensions : some practical aspects*, Vehicle System Dynamics, vol. 39(4), pp. 279-308, 2003.

[7] S. M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, et L. Dugard . *Semi-active suspension control design for vehicles*, Elsevier, Butterworth, 2010.

[8] ISO 8608, *Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data*, International Standards Organisation, 1995.

[9] M. Sayers, S. Karamihas. *The Little Book Of Profiling*, 1998.

[10] M. Doumiati, A. Victorino, A. Charara, D. Lechner. *Estimation of road profile for vehicle dynamics motion : experimental validation*, American Control Conference, ACC 2011, San Francisco, USA, June 2011.

[11] B. Francis and W. Wonham. *The internal model principle of control theory*, Automatica, vol. 12, pp. 457-465, 1976.

[12] B. Anderson. *From Youla-Kucera to identification, adaptive and nonlinear control*, Automatica, vol. 34, pp. 1485 ?1506, 1998.

[13] I. Landau , R. Lozano, M. M'Saad. *Adaptive Control*, Springer, London (U.K), 1997.

[14] D. Henrion. *Graduate course on polynomial methods for robust control, Part III.2*, 2001.

[15] I. Landau, A. Constantinescu, M. Alma. *Adaptive regulation - Rejection of unknown multiple narrow band disturbances*, 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, Thessaloniki, Greece, 2009.

[16] I. Landau. *Identification et commande des systèmes*, Hermes, 1988.