HAL
open science

Estimation de l'état dynamique du véhicule sur routes avec dévers et pentes

Kun Jiang, Alessandro Correa Victorino, Ali Charara

To cite this version:

Kun Jiang, Alessandro Correa Victorino, Ali Charara. Estimation de l'état dynamique du véhicule sur routes avec dévers et pentes. 6èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Jun 2015, Bourges, France. hal-01243215

HAL Id: hal-01243215

https://hal.science/hal-01243215

Submitted on 14 Dec 2015

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 de l'état dynamique du véhicule sur routes avec dévers et pentes

Kun Jiang, Alessandro Correa Victorino, Ali Charara

Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne (UTC) ,
HEUDIASYC UMR CNRS 7253,
BP 20529 - 60205 Compiègne, France.

kun.jiang@hds.utc.fr, acorreav@hds.utc.fr, acharara@hds.utc.fr

Résumé— **La dynamique du véhicule est un sujet essentiel dans le développement des systèmes de sécurité actifs. Les systèmes de contrôle exigent des informations précises sur la dynamique du véhicule, en particulier, les forces de contact pneu/chaussée. Néanmoins, les mesures directes des ces informations sont souvent difficiles, pour des raisons technologiques ou économiques. Par conséquent, cette étude présente une méthode robuste pour estimer ces paramètres en utilisant des technologies d'observation et des capteurs à faible coût disponibles sur des voitures de séries récentes. Les modèles mathématiques du véhicule ont été reconstruits pour s'adapter aux routes avec dévers et pentes. Les dynamiques du roulis et du tangage sont prises en compte pour améliorer l'estimation. Ensuite, un filtre de Kalman étendu est utilisé pour estimer la dynamique du véhicule. Enfin, l'observateur est testé à la fois en simulation sur CALLAS et sur des données réelles acquises sur le véhicule expérimental du laboratoire Heudiasyc DYNA.**

Mots-clés— **Observateur d'état ; filtre de Kalman étendu ; dynamique du véhicule ; dynamiques de roulis.**

I. INTRODUCTION

Les véhicules automobiles modernes sont de plus en plus équipés de systèmes électroniques pour améliorer la sécurité. Les paramètres et variables dynamiques du véhicule, tels que les forces de contact des pneus, les angles de dérive sont nécessaires pour l'implémentation de ces systèmes. Toutefois, l'état dynamique du véhicule est très difficile à mesurer directement. De plus, les capteurs qui mesurent certaines de ces variables sont très coûteux ou difficiles à installer dans les voitures commercialisées, d'où la nécessité du développement des observateurs.

L'estimation de la dynamique du véhicule a été étudiée par de nombreux chercheurs. Par exemple, dans [6], les forces verticales sont calculées par un modèle de véhicule avec 14 degrés de liberté . Les forces verticales et latérales au niveau de chaque pneu ont été estimées dans [5]. Cependant, ces études sont faites dans l'hypothèse où le véhicule roule sur une route plane. En réalité, l'environnement peut inclure des situations difficiles comme un terrain ondulé et des surfaces inclinées et avec dévers.

La contribution principale de cet article est la proposition des observateurs des forces verticales tenant compte de la géométrie de la route.

Pour évaluer la performance de nos observateurs, le simulateur PROSPER / CALLAS [4] est utilisé. Après les tests de simulation de Chicane, nous avons évalué notre nouvel observateur avec des données acquises sur le véhicule expérimental du laboratoire Heudiasyc, une Peugeot 308. DYNA est équipé de capteur capables de mesurer en temps réel les paramètres utilisés dans la mise en œuvre de nos observateurs, comme indiqué dans la Figure 1.

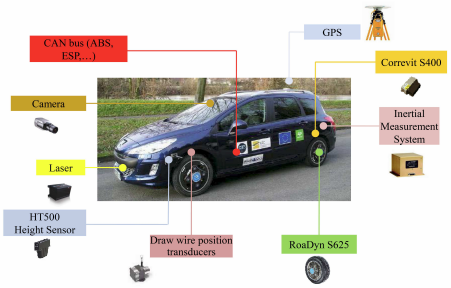

Fig. 1. Véhicule Expérimental : DYNA

La section 2 présente les nouveaux modèles du véhicule qui sont proposés dans cet article. La section 3 décrit la façon dont l'observateur est synthétisé. Ensuite, la validation sur des données hors ligne est menée dans la section 4. Enfin, des conclusions et des perspectives sont données dans la section 5.

II. Modèles du Véhicule

De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour la description de la dynamique du véhicule. Pour réaliser l'estimation en temps réel, nous devons simplifier le modèle avec des hypothèses raisonnables. Les modèles de la dynamique du véhicule que nous avons utilisés peuvent être classés en trois parties, comme il est montré dans la Figure 2.

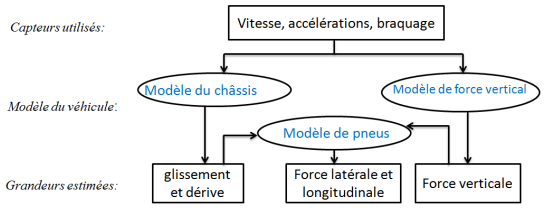

Fig. 2. Modèle complet de véhicule

L'étude propose un nouveau modèle de forces verticales, qui considère l'angle de roulis, angle de tangage et de les géométrie de la route. La construction de ce nouvel observateur est fait en associant deux modèles proposés précédemment en [4], le modèle de la dynamique verticale avec le modèle de la dynamique latérale.

A. Mesure de l'accélération en situation dynamique

Dans [5], il est présenté un modèle de force verticale où le charge sur la roue change en raison de la variation d'accélération du véhicule.

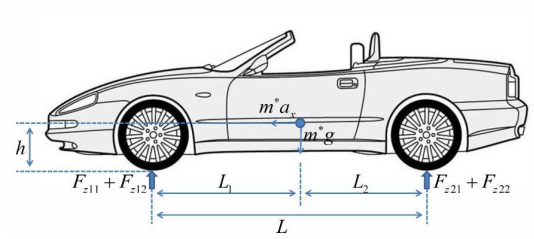

Fig. 3. Transfert de charge vertical

Le modèle de transfert de charge verticale est représentée ci-dessous :

$$F_{z11} = \frac{1}{2}m(\frac{L_2}{L} - \frac{a_x h}{gL})g - m(\frac{L_2}{L} - \frac{a_x h}{gL})\frac{a_y h}{E_1} \quad (1)$$

où L est l'empattement, L = L1 + L2, L1 est la position de centre de gravité, h est la hauteur du centre de gravité, E_1, E_2 sont la voie avant, arrière du véhicule .

Dans [5], le véhicule est considéré sur une route plane de sorte que la force de gravité n'agit que dans la direction verticale du véhicule. Cette hypothèse a simplifié la mesure de accélérations.

Dans cet article, nous présentons un modèle de force verticale générale qui convient à toute la géométrie de la route. Nous avons proposé de distinguer les accélérations causées par le mouvement du véhicule de l'accélération de la gravité. De cette manière, l'influence de la géométrie et des irrégularités de la route sont prises en compte.

Dans une route irrégulière, les accélérations mesurées contiennent deux parties, celles causées par le mouvement,a_{xmot}, a_{ymot}, a_{zmot}, et celles causées par gravité,, a_{xgra}, a_{ygra}, a_{zgra}.

Pour simplifier le calcul des forces verticales, nous pouvons transformer la situation d'une route irrégulière sur la situation normale. Les accélérations équivalentes sont :

$$\begin{aligned} a_{xequ} &= a_{xmot} + a_{xgra} \\ a_{yequ} &= a_{ymot} + a_{ygra} \\ a_{zequ} &= -a_{zmot} + a_{zgra} \end{aligned} \quad (2)$$

Ensuite, selon le modèle de transfert de charge, l'équation de la force verticale est modifiée comme suit :

$$F_{z11} = \frac{1}{2}m(\frac{L_2}{L} - \frac{a_{xequ}h}{a_{zequ}L})a_{zequ} - m(\frac{L_2}{L} - \frac{a_{xequ}h}{a_{zequ}L})\frac{a_{yequ}h}{E_1} \quad (3)$$

L'accéléromètre mesure directement la somme de accélérations causées par le mouvement du véhicule et par gravité. Cependant, la quantité mesurée est influencée par l'angle de tangage et de roulis.

Par conséquent, les accélérations équivalentes peuvent être calculées à partir des accélérations mesurées comme suit :

$$\begin{pmatrix} a_{xequ} \\ a_{yequ} \\ a_{zequ} \end{pmatrix} = R_\theta R_\phi \begin{pmatrix} a_{xm} \\ a_{ym} \\ a_{zm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

où les matrices de rotation sont :

$$R_\theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_v & -\sin\theta_v \\ 0 & \sin\theta_v & \cos\theta_v \end{pmatrix}, R_\phi = \begin{pmatrix} \cos\phi_v & 0 & \sin\phi_v \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi_v & 0 & \cos\phi_v \end{pmatrix} \quad (5)$$

et θ_v and ϕ_v sont les angles de roulis et de tangage du châssis du véhicule, a_{xm} a_{ym} a_{zm} sont les accélérations mesurées par l'accéléromètre installé dans le châssis.

En appliquant les calibrations des accélérations mesurées, nous transformons la route inclinée dans une route plane équivalente.

B. Dynamiques de roulis et de tangage

L'équation (3) fournit un modèle mathématique général des forces verticales en présence de pentes et dévers. Cependant, le roulis et le tangage dynamique n'apparaissent pas directement dans ce modèle. Ce modèle ne considère pas l'influence des suspensions. Dans une situation de conduite dynamique, avec freinage, dans des virages ou sur route irrégulière, le système de suspensions aura une forte influence sur la dynamique du véhicule.

Afin de réduire le nombre de paramètres du modèle, nous simplifions le système de suspensions avec un ressort et un amortisseur en parallèle, comme indiqué dans la Figure 4. Nous combinons les effets des suspensions et des pneus dans un modèle, dans lequel Kr est la rigidité de rotation totale équivalente et Cr est le coefficient d'amortissement total équivalent.

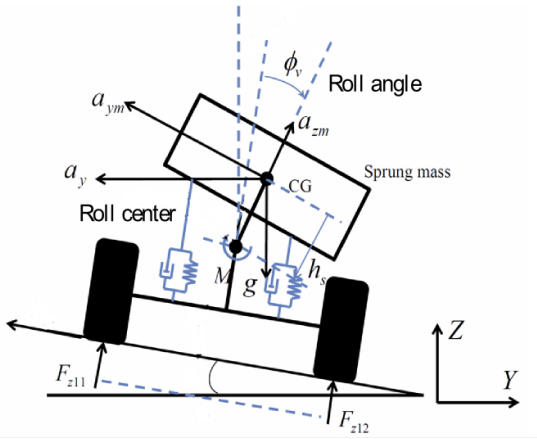

Fig. 4. Dynamiques de roulis et tangage

Nous supposons que la position du centre de roulis du véhicule reste constante et sa distance par rapport au centre de gravité est noté h_s. En calculant la somme des moments dans l'axe de roulis, la dynamique de roulis du châssis est décrite par l'équation suivant :

$$\begin{aligned} I_{xx}\ddot{\phi}_v &= -C_r\dot{\phi}_v - K_r\phi_v + m_v h_s a_{ym} \\ I_{yy}\ddot{\theta}_v &= -C_r\dot{\theta}_v - K_r\theta_v + m_v h_s a_{xm} \end{aligned} \quad (6)$$

où I_{xx} est le moment d'inertie du véhicule par rapport à l'axe de roulis, I_{yy} est calculé par rapport à l'axe de tangage, et h_s est la hauteur de la masse suspendue par rapport à l'axe de roulis.

C. Angles de roulis et de tangage

L'angle de roulis peut être calculée par intégration de la vitesse angulaire de roulis mesurée par un accéléromètre.

Cependant, le biais du capteur sera également intégré, ce qui provoque une grande erreur de calcul. Dans [11], Hac propose un modèle d'angle de roulis exprimé avec la déflexion de suspension, avec lequel la dynamique de tangage est découplé du mouvement de roulis. Dans notre modèle, l'angle de roulis et l'angle de tangage sont obtenus par des capteurs de déflexion de suspension. Les résultats sont montrés dans la Figure 5, en rouge est la sortie du simulateur, en bleu est la sortie du modèle.

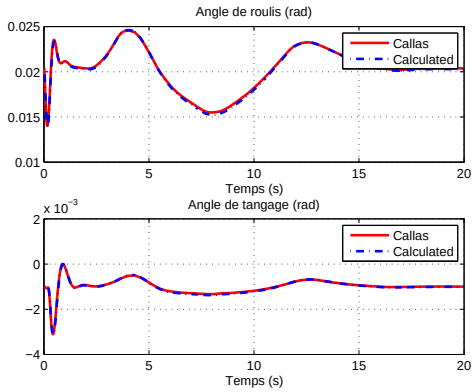

Fig. 5. Estimation de l'angle de roulis et tangage

$$\theta_v = \frac{\Delta_{11} - \Delta_{12} + \Delta_{21} - \Delta_{22}}{2E}, \quad \phi_v = \frac{\Delta_{11} + \Delta_{12} - \Delta_{21} - \Delta_{22}}{2(L_1 + L_2)} + \phi_s \tag{7}$$

où Δ_{ij} représente la déflexion de la suspension mesurée au niveau de chaque roue du véhicule et E désigne la voie du véhicule, $\phi_s$est l'angle statique de tangage.

D. Forces verticales

Dans le modèle considéré en [5], le transfert de charge est provoqué par les accélérations longitudinale et latérale. Dans notre modèle (6), le transfert de charge est considéré comme provoqué par le couple de suspension.

Dans le mouvement de tangage, le couple de suspension est noté M_ϕ. En considérant les moments de torsion, on a :

$$\begin{aligned} F_{z1} + F_{z2} &= m_v a_{zequ} \\ F_{z1} L_1 - F_{z2} L_2 &= M_\phi \end{aligned} \tag{8}$$

où F_{zij} $(i, j = 1, 2)$ est la force verticale de chaque pneu, $i = 1$ correspond à l'essieu avant, $j = 1$correspond au côté gauche.F_{z1}est la force totale à l'essieu avant.

Dans le mouvement de roulis, le couple de suspension est notée M_θ. De la même manière, on a :

$$\begin{aligned} F_{z1} &= F_{z11} + F_{z12} \\ F_{z11}\frac{E_1}{2} - F_{z12}\frac{E_1}{2} &= M_\theta\left(\frac{F_{z1}}{F_{z1}+F_{z2}}\right) \\ F_{z21}\frac{E_2}{2} - F_{z12}\frac{E2}{2} &= M_\theta\left(\frac{F_{z2}}{F_{z1}+F_{z2}}\right) \end{aligned} \tag{9}$$

La suspension est représentée par un ressort et un amortisseur. Le couple de suspension est calculé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} M_\phi &= K_r\phi + C_r\dot{\phi} \\ M_\theta &= K_r\theta + C_r\dot{\theta} \end{aligned} \tag{10}$$

Avec toutes les équations (8)~(10), les forces verticales à quatre roues est formulée comme :

$$\begin{aligned} F_{z11} &= \frac{m_v L_2 a_{zequ}}{2L} - \frac{L_2(K_r\theta + C_r\dot{\theta})}{LE_1} + \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{2L} - \frac{M_\theta M_\phi}{m_v a_{zr} LE_1} \\ F_{z12} &= \frac{m_v L_2 a_{zequ}}{2L} + \frac{L_2(K_r\theta + C_r\dot{\theta})}{LE_1} + \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{2L} + \frac{M_\theta M_\phi}{m_v a_{zr} LE_1} \\ F_{z21} &= \frac{m_v L_1 a_{zequ}}{2L} - \frac{L_1(K_r\theta + C_r\dot{\theta})}{LE_2} - \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{2L} + \frac{M_\theta M_\phi}{m_v a_{zr} LE_2} \\ F_{z22} &= \frac{m_v L_1 a_{zequ}}{2L} + \frac{L_1(K_r\theta + C_r\dot{\theta})}{LE_2} - \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{2L} - \frac{M_\theta M_\phi}{m_v a_{zr} LE_2} \end{aligned} \tag{11}$$

Dans le modèle final, les angle de roulis et tangage sont utilisés directement pour représenter les roulis et le tangage dynamique. Ce modèle est plus adapté aux situations de conduite dynamiques sur des routes avec pentes et/ou dévers. Cependant, le calcul des forces verticales par le modèle (11) (en boucle ouverte) est limité en raison de la variation de certains paramètres et hypothèses qui visent à simplifier le modèle. Par conséquent, dans la section suivante, une nouvelle technique d'observateur est introduit pour prendre en compte les incertitudes associées à ce modèle, et donner un cadre probabiliste à l'estimation des forces verticales.

III. Conception de l'observateur

Le processus de calcul global de l'observateur peut être exprimé par la Figure 6 :

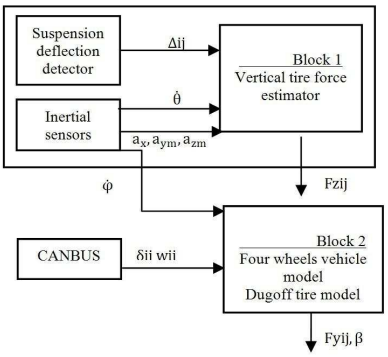

Fig. 6. Algorithme général de l'observateur de la dynamique. Cet article s'intéresse à l'observateur dans le bloc 1

Le premier bloc fournit les estimation des forces verticales pour le calcul de la dynamique latérale. L'estimation dans le bloc 2 est présentée dans [4], et n'est pas décrite ici. Dans cet article, nous présentons un observateur pour les forces verticales capable de fonctionner en présence de pentes et dévers et des irrégularités sur la route. La structure en cascade des observateurs dans les blocs 1 et 2 permettent ainsi d'estimer les efforts au niveau des pneus. Avec un modèle linéaire, les forces verticales sont estimées par filtre de Kalman comme ci-dessous.

A. Estimation des forces verticales par Filtre de Kalman

Pour construire un filtre de Kalman, le modèle de force verticale est représenté par :

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + \omega_{k-1} \\ y_k &= Hx_k + v_k \end{aligned} \tag{12}$$

où A est la matrice d'évolution d'état, H est la matrice d'observation, et ω_k *et* v_k sont des bruits blancs. Le vecteur d'état de véhicule $X \epsilon R^{14}$ est défini comme suit :

$$X = \left[\ \phi\,\dot{\phi}\,\theta\,\dot{\theta}\,F_{z11}\,F_{z12}\,F_{z21}\,F_{z22}\,a_{xr}\,\dot{a}_{xr}\,a_{yr}\,\dot{a}_{yr}\,a_{zr}\,\dot{a}_{zr}\ \right]^T \tag{13}$$

La valeur initiale de X est :

$$X_0 = \left[0000\,\frac{m_v g}{4}\,\frac{m_v g}{4}\,\frac{m_v g}{4}\,\frac{m_v g}{4}\,000000\right]^T \tag{14}$$

En outre, l'hypothèse suivante est faite $\ddot{a}_{xr} = \ddot{a}_{yr} = \ddot{a}_{zr} = 0$.

Les équations d'état en temps continu sont présentées dans (15). En discrétisant les équations d'état, nous pouvons obtenir la matrice d'évolution A.

$$\dot{X} = \begin{cases} \dot{\phi} = \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} = \frac{m_v h}{I_{xx}} a_y - \frac{C_r}{I_{xx}}\dot{\phi} - \frac{K_r}{I_{xx}}\phi \\ \dot{\theta} = \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} = \frac{m_v h}{I_{yy}} a_x - \frac{C_r}{I_{yy}}\dot{\theta} - \frac{K_r}{I_{yy}}\theta \\ \dot{F}_{z11} = \frac{m_v l_2}{2l}\dot{a}_{zr} - \frac{K_r\theta + C_r\dot{\theta}}{E_1} + \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{l} \\ \dot{F}_{z12} = \frac{m_v l_2}{2l}\dot{a}_{zr} + \frac{K_r\theta + C_r\dot{\theta}}{E_1} + \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{l} \\ \dot{F}_{z21} = \frac{m_v l_1}{2l}\dot{a}_{zr} - \frac{K_r\theta + C_r\dot{\theta}}{E2} - \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{l} \\ \dot{F}_{z22} = \frac{m_v l_1}{2l}\dot{a}_{zr} + \frac{K_r\theta + C_r\dot{\theta}}{E_2} - \frac{K_r\phi + C_r\dot{\phi}}{l} \\ \dot{a}_x = \dot{a}_x \\ \ddot{a}_x = 0 \\ \dot{a}_y = \dot{a}_y \\ \ddot{a}_y = 0 \\ \dot{a}_{zr} = \dot{a}_{zr} \\ \ddot{a}_{zr} = 0 \end{cases} \tag{15}$$

Le modèle d'observation est linéaire et le vecteur de sortie Y se présente comme suit :

$$Y = \left[\ \phi\,\dot{\phi}\,\theta\,\dot{\theta}\,F_{sum}\,F_{zlat}\,F_{zlon}\,a_{xm}\,a_{ym}\,a_{zm}\ \right]^T \tag{16}$$

où

— ϕ, θ sont calculés par l'équation (7)

— F_{sum}est le totale de forces verticales , F_{zlat}, F_{zlon} sont les transferts de charge latéral et longitudinal, calculés par l'équation (11)

— $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, a_{xm},a_{ym},a_{zm}sont mesurés par l'accéléromètre

Par conséquent, la matrice d'observateur H est déterminée par

$$Y = H * X \tag{17}$$

Pour ce filtre de Kalman, la covariance des erreurs de mesure est déterminée par la variance des accéléromètres, qui est constante. Nous attirons l'attention au fait que les angles de la géométrie de la route n'apparaissent pas explicitement dans notre formulation.

Avant d'appliquer le filtre de Kalman, nous devons vérifier observabilité du système. La matrice d'observabilité est calculée par :

$$O = \left[\ H \quad HA \quad HA^2 \quad ... \quad HA^{n-1}\ \right]^T \tag{18}$$

Dans notre cas, la matrice d'observabilité est de rang plein 14, par conséquent, notre système est observable.

IV. VALIDATION HORS LIGNE

Comme nous l'avons introduit dans ci-dessus, nous avons utilisé un simulateur et des données réelles acquises avec une voiture expérimentale pour évaluer la performance de l'observateur que nous présentons dans cet article, qui tient comptes des inclinaisons de la route (appelé par la suite « nouvel observateur »). La performance des observateurs développés se caractérise par l'erreur moyenne normalisée définie par :

$$\varepsilon_z = 100 * \frac{|Z_{obs} - Z_{measure}|}{max(|Z_{measure}|)} \tag{19}$$

où Z_{obs} est la valeur observée, $Z_{measure}$ est la valeur mesurée et $(|Z_{measure}|)$ est la valeur absolue maximale des données mesurées.

Le nouvel observateur est conçu afin de fournir une meilleure performance sur des routes avec dévers et pentes. L'objet de nos expériences est de valider cette amélioration. Par conséquent, tous les essais sont effectués dans les conditions d'un angle de la route non nul.

Dans la partie simulation, deux essais de Chicane ont été réalisés. Un essai Chicane est effectué sur une route avec dévers. L'angle de dévers de la route est de 30%. L'autre test est effectué sur une route inclinée. L'angle d'inclinaison est de 20%. La vitesse du véhicule est d'environ 30 km/h. L'accélération latérale est d'environ (-0,5 g, 0,5 g). Le test dure environ 20 secondes. La trajectoire de cet essai est représentée sur la Figure 7 :

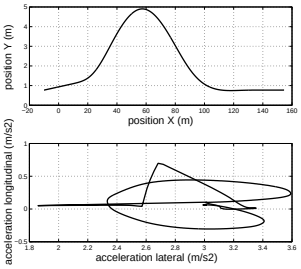

Fig. 7. Trajectoire et accélération du véhicule en simulation

Pour vérifier l'amélioration de la performance, nous testons également l'observateur décrit en [5] (qui ne tient pas compte des inclinaisons de la route) dans les mêmes conditions afin de procéder à une comparaison.

A. Simulation de l'essai Chicane sur route inclinée

L'objectif de cette simulation est de tester notre observateur sur des routes inclinées. L'angle d'inclinaison est défini comme 20%. Les forces verticales estimées sont présentées dans la figure 8.

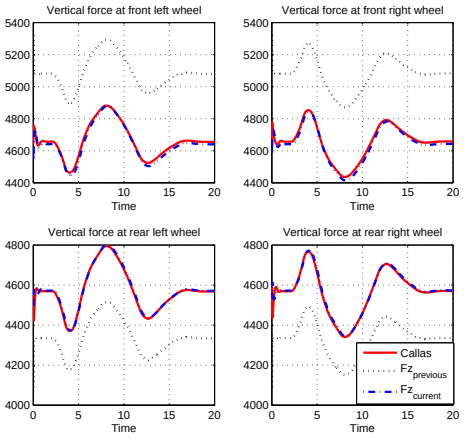

Fig. 8. Estimation de la force verticale sur route inclinée. $Fz_{précédent}$indique les forces verticales estimées à partir d'un modèle de route plane Fz_{actuel} ces mêmes forces estimées par notre modèle.

L'erreur moyenne normalisée de l'estimation des forces verticales est indiquée dans la table 1 :

TABLE I

Les erreurs de l'estimation des forces verticales sur une route inclinée

Erreurs (%)	**Fz11**	**Fz12**	**Fz21**	**Fz22**
Observateur actuel	0.34	0.34	0.13	0.15
Observateur précédent	8.68	8.74	4.90	4.90

De la table 1, nous pouvons constater que l'erreur du nouvel observateur est inférieure à 1%, tandis que l'observateur dans [5] a une erreur d'environ 8%. Dans le nouvel observateur, nous avons considéré la composante de gravité dans la dynamique longitudinale, ce qui rend l'observateur fiable même sur route inclinée.

B. *Simulation de l'essai Chicane surroute avec dévers*

L'objectif de cet essai simulé consiste à évaluer notre observateur sur route avec dévers. L'angle de dévers est défini comme 30%. Les forces verticales estimées sont montrées dans la figure 9 :

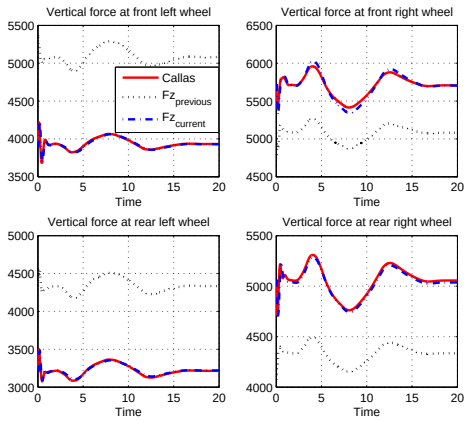

Fig. 9. Estimation de Force vertical sur route avec dévers

Dans la figure 9, les lignes rouges représentent les données de simulation, fournie par Callas. Les données de référence montrent que les forces verticales de roues droites sont généralement plus grandes que celles des roues gauches. Ce fait corresponde à l'influence de l'angle de dévers. Cependant, dans l'observateur précédent, représenté par les lignes pointillées noirs, l'angle d'inclinaison n'est pas considéré, de sorte que les valeurs observées aux roues droite et gauche sont très similaires. En revanche, avec notre observateur actuel, les valeurs estimées sont satisfaisantes. Pour évaluer la performance des deux observateurs plus précisément, l'erreur moyenne normalisée de l'estimation est calculée et présentée dans la table II :

TABLE II

Les erreurs de l'estimation des forces verticales sur une route avec dévers

Erreurs (%)	**Fz11**	**Fz12**	**Fz21**	**Fz22**
Observateur actuel	0.24	0.46	0.30	0.42
Observateur précédent	27.22	10.46	31.97	13.52

De la Tableau 2, nous constations que le nouvel observateur a aussi une bonne performance en route avec dévers. Ces bons résultats confirment que la méthodologie d'observation présentée est appropriée pour l'estimation des forces verticales dans des situations de dévers et pentes .

C. *Validation hors ligne sur des données réelles*

Nous utilisons aussi la voiture expérimentale pour évaluer la performance de nos observateurs en condition réelle. Pendant l'essai, la voiture expérimentale était conduite sur des routes dans la ville, où le véhicule parcourt un tronçon avec pente et dévers. La figure 11 montre la trajectoire, la vitesse, l'altitude et l'angle volant au cours de cette période.

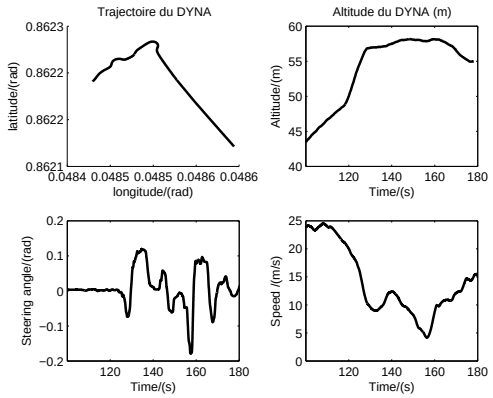

Fig. 10. Trajectoire et angle volant de véhicule expérimentale

Dans les premières 30 secondes, la voiture prend une route inclinée en pente. Puis elle négocie un virage brusque, comme nous pouvons le voir dans la Figure 10 . Après cela, la voiture suit la courbe en S, ce qui entraine une forte variation de l'angle volant. Le condition de conduite et la géométrie de la route est assez compliqué. Pour avoir une bonne estimation de la dynamique du véhicule il est important que l'observateur de la dynamique reste fiable indépendamment des angles de la route.

Les forces verticales estimées sont :

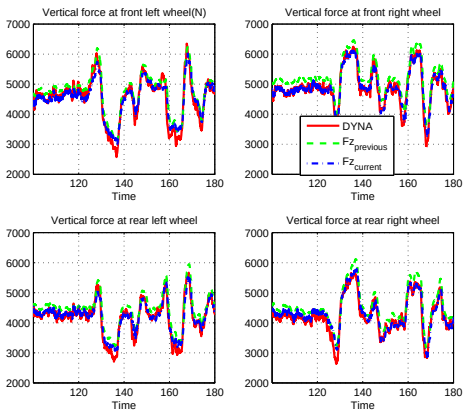

Fig. 11. Comparaison des forces verticales estimées avec des données réelles. Dyna en rouge représente les efforts mesurés par les roues dynamométriques montés sur chaque roue du véhicule, $Fz_{précédent}$ correspond à l'observation avec le modèle qui ne prend pas en compte les inclinaisons de la route, Fz_{actuel} correspond aux résultats de l'observateur présenté dans cet article.

Nous pouvons voir que les forces verticales ont subi une grande variation au cours de l'expérience. Cela est provoqué par la géométrie de la route et par le comportement dans le virage. Nous pouvons voir que les valeurs estimées par le nouvel observateur sont très proches de la valeur réelle.

Pour évaluer la performance plus précisément, l'erreur moyenne normalisée est donnée dans la table III :

TABLE III
Les erreurs de l'estimation des forces verticales en condition réelle

Erreurs (%)	**Fz11**	**Fz12**	**Fz21**	**Fz22**
Observateur actuel	2.49	1.63	1.94	2.05
Observateur précédent	3.40	4.52	4.10	4.60

Avec la structure d'observation représenté sur la Figure 5, en dehors des forces verticales, notre observateur peut aussi estimer les forces latérales. Une fois que l'estimation des forces verticales sur route avec dévers est améliorée, l'observateur des forces latérales est censé avoir également une bonne performance avec dévers. Pour justifier cette supposition, nous avons également mesuré les valeurs des forces latérales avec des données réelles. Les forces latérales estimées sont montrées dans la Figure 12 :

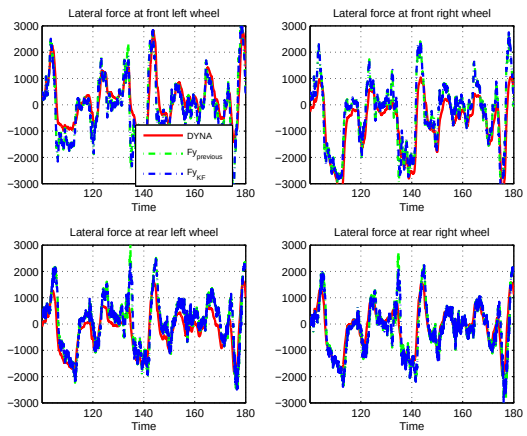

Fig. 12. Comparaison des forces latérales estimées avec des données réelles

Les valeurs estimées des forces latérales sont également proches des données de référence. L'erreur moyenne de la sortie normalisée d'observation est :

TABLE IV
Les erreurs de l'estimation des forces latérales en condition réelle

Erreurs (%)	**Fy11**	**Fy12**	**Fy21**	**Fy22**
Observateur actuel	6.04	6.69	6.10	6.31
Observateur précédent	6.05	6.72	6.21	6.42

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce papier a présenté un nouveau modèle pour estimer les forces verticales de pneus . En distinguant l'accélération due à la gravité et au mouvement, le modèle peut prendre en compte l'angle d'inclinaison de la route et ses irrégularités. En introduisant le modèle de suspension, les dynamiques de tangage et de roulis sont prises en compte. De cette manière, notre modèle est adapté pour des routes irrégulières. Puis combiné avec le modèle des forces latérales obtenu dans les travaux précédents, avec un filtre de Kalman, nous avons développé des observateurs pour estimer les forces verticales et latérales de chaque pneu, les résultats obtenus sont satisfaisants en présence de pentes de dévers. validations hors ligne sont réalisées avec des données réelles acquissent avec notre véhicule expérimental pour évaluer la performance de l'observateur.

Toutefois, le nouvel observateur ne fonctionne que lorsque les paramètres physiques du véhicule sont déjà connus et restent constants. En fait, certains paramètres considérés comme constants changent pendant l'essai. Pour améliorer la précision de l'observateur, nous devrions également estimer les paramètres physiques du véhicule, comme la position du centre de gravité, la rigidité de dérive, la rigidité de la suspension. L'étude future sera concentrée à l'estimation de ces paramètres physiques du véhicule.

Références

[1] M.Gadola, D.Chindamo, et al. "Development and validation of a Kalman filter-based model for vehicle slip angle estimation " Vehicle System Dynamics 52.1(2014) : 68-84.

[2] Xu Li, Xiang Song, Chingyao Chan. "Reliable vehicle sideslip angle fusion estimation using low-cost sensors ."Measurement 51 (2014) : 241-258.

[3] M.Ouahi, J.Stéphant and D.Meiezl. "Simultaneous observation of the wheels' torques and the vehicle dynamic state." Vehcicle System Dynamics 51.5 (2013) :737-766.

[4] B. Wang, A. C. Victorino and A. Charara, "State observers applied to vehicle lateral dynamics estimation : a comparison between Extended Kalman filter and Particle filter", 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Austria, Nov, 2013.

[5] D.Moustapha, A.C.Victorino, A. Charara et al. "An estimation process for vehicle wheel-ground contact normal forces." 17th IFAC World Congress, Milano, Italy (2008)

[6] Shim, Taehyun, and Chinar Ghike. "Understanding the limitations of different vehicle models for roll dynamics studies." Vehicle system dynamics 45.3 (2007) : 191-216.

[7] T.A.Wenzel, K.J.Burnham, M.V.Blundell, R.A.Williams. "Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation" Vehicle System Dynamics 44.2(2006)153-171.

[8] J. Stéphant. Contribution à l'étude et à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2004

[9] J.Ryu and J.C.Gerdes. "Estimation of vehicle roll and road bank angle." American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004. Vol. 3. IEEE, 2004.

[10] H.Aleksander, Brown, T. & Martens, J. (2004). Detection of vehicle rollover, Proceedings of the SAE World congress, Michigan, USA.

[11] A.Hac, T.Brown and J.Martens. Detection of vehicle rollover. Vehicle Dynamics & Simulation, 2004.

[12] D. L. Milliken, E. M. Kasprak, L. Daniel Metz and W. F. Milliken. Race car vehicle dynamics. SAE International, 2003.

[13] U.Kienecke and Lars Nielsen. "Automotive control systems." Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2000. 432 (2000).

[14] SORNIOTTI, Aldo et D'ALFIO, Nicolò. Vehicle dynamics simulation to develop an active roll control system. SAE Technical Paper, 2007.

[15] Rajamani, R. (2006). Vehicle dynamics and control, Springer.