

# Estimation du coefficient d'adhérence maximale pneumatique chaussée appliquée à la sécurité routière

Raymond GHANDOUR, Alessandro VICTORINO, Ali CHARARA, Moustapha DOUMIATI

Laboratoire HEUDIASYC, UMR 6599,  
Université de technologie de Compiègne, Centre de Recherche de Royallieu  
BP 60529, Compiègne, France.

*Raymond.Ghandour@hds.utc.fr, Alessandro.Victorino@hds.utc.fr, Ali.Charara@hds.utc.fr,  
Moustapha.Doumiati@hds.utc.fr*

**Résumé**— Des statistiques récentes, montrent qu'un grand nombre d'accidents de la circulation se produit à cause d'une perte de contrôle du véhicule par le conducteur, dans des situations de sortie de route. Ceci est principalement dû à une mauvaise adhérence entre les pneumatiques et la chaussée. Nombreux de ces accidents pourraient être évités, si les véhicules étaient équipés des systèmes d'aide à la conduite, basés sur la détection de la perte d'adhérence au point de contact pneu-chaussée. L'adhérence (plus précisément le coefficient d'adhérence latérale maximale) est un paramètre dans l'interaction pneu-chaussée qui dépend de plusieurs facteurs, principalement du modèle du pneu et de l'état de la chaussée (sèche, mouillée, enneigée ou glacée), et elle est étroitement liée aux efforts développés au niveau des pneus. Nous proposons dans cet article une méthodologie d'estimation du coefficient d'adhérence latérale maximale, afin de détecter de manière automatique une possible perte d'adhérence qui se traduit par un changement brusque de la nature de la chaussée. Cette méthode est basée sur une technique de minimisation quadratique itérative, qui prend en compte l'erreur entre la force latérale développée et le modèle d'interaction pneu-chaussée, donné en fonction de l'état de la chaussée. Les résultats présentés en simulation valident l'application de la méthode.

**Mots-clés**— Dynamique de véhicule, adhérence latérale maximale, modèle du véhicule, Filtre de Kalman, forces verticales, forces latérales, rigidité de dérive, angle de dérive.

## I. INTRODUCTION

Les différents paramètres de la dynamique de véhicule, tels que les forces d'interaction pneumatique-chaussée, l'angle de dérive, ainsi que l'adhérence, sont essentiels pour le développement des systèmes d'aide à la conduite. Le rôle de ces systèmes est d'avertir le conducteur des dangers imminents. Certains de ces paramètres peuvent être mesurés et d'autres, comme la rigidité de dérive ou l'adhérence, ne sont pas directement mesurables. Ils existent sur le marché des capteurs pour mesurer les forces/couples au niveau de pneus (moyeu dynamométrique) ou l'angle de dérive, mais le coût élevé de ces capteurs ne permet pas de les installer sur des véhicules de série.

De ce fait, il est nécessaire de reconstruire les variables non mesurables pour des raisons de coût ou de possibilité physique, en développant des observateurs d'états embarqués sur les véhicules (appelés aussi capteurs virtuels). Ces observateurs utilisent un modèle de connaissance associé à des mesures réelles.

Dans cet article nous nous intéressons à l'observation

robuste du coefficient d'adhérence latérale maximale (appelé ici adhérence maximale). L'adhérence maximale est un paramètre de la dynamique du véhicule étroitement lié à l'interaction pneumatique-chaussée, nécessaire au calcul ou à l'observation des forces au niveau des pneus, et qui caractérise l'état de la chaussée (sèche, mouillée, enneigée ou glacée). L'adhérence créée au point de contact pneu-chaussée est fonction de plusieurs paramètres, tels que les forces latérales et verticales au niveau des pneus, l'état de la chaussée, la rigidité de dérive. Une estimation de ce paramètre (l'adhérence) en temps réel, pendant le déplacement du véhicule, en utilisant des mesures facile d'accès (accélérations, vitesses, angle de braquage, etc), permet de fournir au conducteur (ou à un système de pilotage automatique) un moyen d'avertissement d'une possible perte d'adhérence, qui éviterait une sortie de route imminente. Nous pourrions également estimer de manière automatique, pendant le déplacement du véhicule, le type de chaussée sur laquelle il roule (sèche, mouillée, enneigée ou glacée), et optimiser en temps-réel l'observation des efforts au niveau des pneus dans une boucle fermée.

L'estimation du coefficient d'adhérence latérale maximale est vastement traitée dans la littérature en utilisant plusieurs modèles de pneumatique et pour plusieurs états des chaussées. Plusieurs publications, estiment ce coefficient mais pour un état de route bien déterminé [2]. D'autres [1], [3], [4], estiment ce coefficient pour plusieurs types de chaussée. Les méthodes d'estimation développées sont, principalement basées sur des méthodes d'optimisation de l'erreur, comme la méthode de gradient descendant [1] et la méthode des moindres carrés récursives [3]. Dans ces travaux, les efforts au point de contact pneu-chaussée sont considérés connus, mesurés par des capteurs extrêmement coûteux, ou calculés par des méthodes en boucle ouverte. Dans une méthodologie semblable à [1] et [3], nous présentons dans cet article une méthode pour l'estimation de l'adhérence maximale basée sur l'estimation robuste embarquée des efforts pneu-chaussée, en utilisant la méthode d'optimisation non-linéaire itérative de Levenberg Marquardt. La méthode, présentée en détails dans les sections suivantes, prend en compte l'erreur entre la force latérale estimée (par des observateurs, pendant le déplacement du véhicule) et celle donnée par le modèle théorique de l'interaction pneumatique-chaussée de Dugoff.

Comme cité précédemment, l'adhérence maximale est liée aux efforts développés au point de contact pneu-chaussée, c'est un paramètre important dans le calcul des ces efforts, et de l'angle de dérive. Dans nos travaux précédents nous avons développé des observateurs d'état pour l'estimation des forces et de l'angle de dérive [5], [6]. En revanche, l'adhérence maximale était considérée comme un paramètre constant et supposé connu. La méthode pour l'estimation en ligne, du coefficient d'adhérence maximale, présentée dans cet article constitue ainsi une continuité de ces travaux sur les observateurs de forces, en les rendant robustes aux différents types de chaussées.

L'article est organisé comme suit. Dans la section II, on définit le coefficient d'adhérence latérale maximale, son importance pour la dynamique du véhicule et pour la sécurité routière, ainsi que la possibilité de l'estimer à partir des forces latérales estimées au point de contact. Dans la section III, on définit le modèle de véhicule utilisé, ainsi que le modèle de Dugoff pour l'estimation des efforts latéraux. Dans la section IV, on présente la méthode d'estimation itérative du coefficient d'adhérence latérale maximale. La section V présente les résultats qui valident la performance de cette méthode, suivie de la section VI avec les conclusions et perspectives.

## II. LE COEFFICIENT D'ADHÉRENCE LATÉRALE

### A. Coefficient d'adhérence latérale

Le coefficient d'adhérence latérale, ou mobilisé, est la facilité avec laquelle un véhicule dérape sur la route. C'est le rapport entre la force de résistance de frottement latérale et la force normale agissant au point de contact [4].

$$\mu = \frac{F_{y_{ij}}}{F_{z_{ij}}} \quad (1)$$

Avec  $F_{y_{ij}}$  la force latérale par pneu et  $F_{z_{ij}}$  la force verticale par pneu.

### B. Coefficient d'adhérence latérale maximale

Le coefficient d'adhérence latérale maximale détermine les forces maximales que les pneus peuvent fournir. Il correspond à la valeur où la force latérale arrive à la saturation et où il y a un risque d'une sortie de route.

Comme montré dans la figure 1, l'adhérence maximale est largement liée à l'état de la chaussée et aux efforts entre la pneumatique et la chaussée. Son estimation peut ainsi permettre la détermination de l'état de la chaussée et une possible perte d'adhérence. Ce paramètre ne peut pas être mesuré par des capteurs conventionnels, ainsi il faut disposer d'une technique d'estimation pour l'estimer à partir des mesures disponibles et des modèles de l'interaction pneu-chaussée.

Nous présentons dans la section IV une méthode d'estimation de ce coefficient à partir des forces estimées au point de contact, et en utilisant un modèle théorique de pneu (modèle de Dugoff). Tout d'abord, dans la prochaine section, nous présentons la modélisation de l'interaction entre les pneumatiques et la chaussée et un rappel sur la méthode d'estimation des efforts au point de contact.

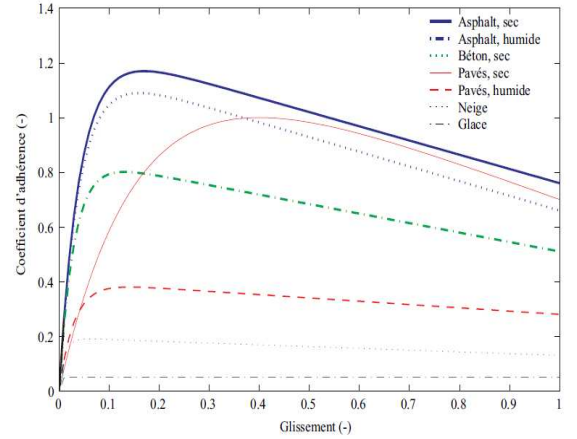


Fig. 1. Modèle de l'interaction pneumatique-chaussée. Le coefficient d'adhérence maximale est associé au point maximum de chaque courbe (à la saturation de la force latérale) pour différents états de chaussée

## III. INTÉRACTION PNEUMATIQUE-CHAUSSÉE ET ESTIMATION DES EFFORTS AU POINT DE CONTACT

### A. Modèle de Dugoff

La modélisation des forces du contact pneumatique/chaussée est complexe car des nombreux phénomènes physiques interagissent, selon une multitude de caractéristiques environnementales et pneumatiques (charge appliquée, pression des pneus, revêtement de la chaussée).

Plusieurs modèles ont été utilisés dans la littérature pour modéliser ces forces, dont nous distinguons deux types, les modèles physiques qui permettent de caractériser la surface de contact roue/sol [10] et des modèles empiriques qui sont issus d'identifications des paramètres de courbes à partir de relevés expérimentaux obtenus sur banc d'essai [8].

Le modèle de Dugoff nous semble le mieux adapté pour cette étude, car il ne nécessite qu'un nombre mineur de paramètres pour évaluer les efforts latéraux. C'est un modèle non linéaire, dont la formule simplifiée est donnée par :

$$F_{y_{ij}} = -C_{\alpha i} \tan \alpha_{ij} \cdot f(\lambda) \quad (2)$$

où  $C_{\alpha i}$  est la rigidité de dérive et  $f(\lambda)$  est donnée par :

$$f(\lambda) = \begin{cases} (2 - \lambda)\lambda, & \text{if } \lambda < 1 \\ 1, & \text{if } \lambda \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\mu_{max} F_{z_{ij}}}{2C_{\alpha i} |\tan \alpha_{ij}|} \quad (4)$$

où  $\mu_{max}$  représente le coefficient de frottement et  $F_{z_{ij}}$  est la charge normale appliquée au pneu  $ij$ . Ce modèle simplifié néglige l'effet des efforts longitudinaux [7].

### B. Estimation des efforts pneumatique/chaussée

Dans nos études précédentes, nous avons développé des observateurs capables d'estimer les forces pneu-chaussée en temps-réel pendant le déplacement du véhicule [6]. Nous allons donc utiliser ces résultats dans l'estimation de l'adhérence maximale. La figure 2 présente le processus d'estimation des forces latérales, des forces verticales,

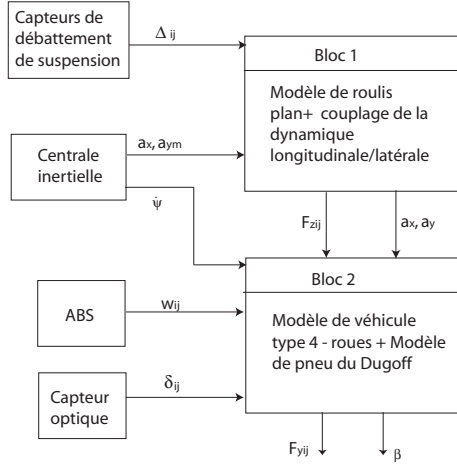


Fig. 2. Diagramme du processus d'estimation

et de l'angle de dérive. Où  $a_x$  et  $a_{ym}$  sont respectivement les accélérations longitudinale et latérale,  $\dot{\psi}$  est la vitesse de lacet,  $\Delta_{ij}$  ( $i =$  avant (1) ou arrière (2) et  $j =$  gauche (1) ou droite (2)) est le débattement de suspensions,  $w_{ij}$  est la vitesse de la roue,  $F_{z_{ij}}$  et  $F_{y_{ij}}$  sont respectivement les forces normales et latérales du contact roues/sol,  $\beta$  est l'angle de dérive au centre de gravité.

Ce processus d'estimation est divisé en deux blocs en séries, dont l'objectif est d'estimer les efforts verticaux et latéraux au niveau du contact pneumatique/chaussée, qui constitueront l'entrée du processus d'estimation de l'adhérence maximale décrite dans la section IV. La modélisation dynamique du véhicule (modèle du roulis, modèle dynamique 4 roues) est présentée en détails dans [6].

Ce dispositif d'estimation nécessite les mesures suivantes :

- vitesse du lacet et accélérations longitudinales et latérales, accessibles à partir d'une centrale inertielle ;
- débattements de suspension, mesurés par un capteur de débattement ;
- angle de braquage, mesuré par un capteur optique ;
- vitesses des roues, fournies par le système ABS.

L'objectif principal du premier bloc est de fournir la masse du véhicule, le transfert de charge et les efforts verticaux appliqués au niveau roues/sol, ainsi que l'accélération latérale corrigée relativement au roulis du véhicule, notée  $a_y$ . L'objectif principal du second bloc, est l'estimation des efforts latéraux et de la dérive. Il utilise des estimations fournies par le premier bloc. Deux techniques d'observation sont utilisées dans ce processus, le filtre de Kalman Etendu (EKF) et le (UKF - uncented Kalman filter).

#### IV. ESTIMATION DU COEFFICIENT D'ADHÉRENCE LATÉRALE MAXIMALE

##### A. Méthode d'estimation

Le schéma bloc de la figure 3 représente la méthode utilisée pour calculer le coefficient d'adhérence latérale maximale pour des différents états de chaussée. La première partie (marquée "observateur - données") est constituée des observateurs de forces latérales ( $F_{y_{ij}}$ ), forces verticales ( $F_{z_{ij}}$ ), l'angle de dérive ( $\alpha_{ij}$ ) et la rigidité de dérive ( $C_{\alpha_{ij}}$ ), présentés dans section III. Un test est effectué sur l'angle

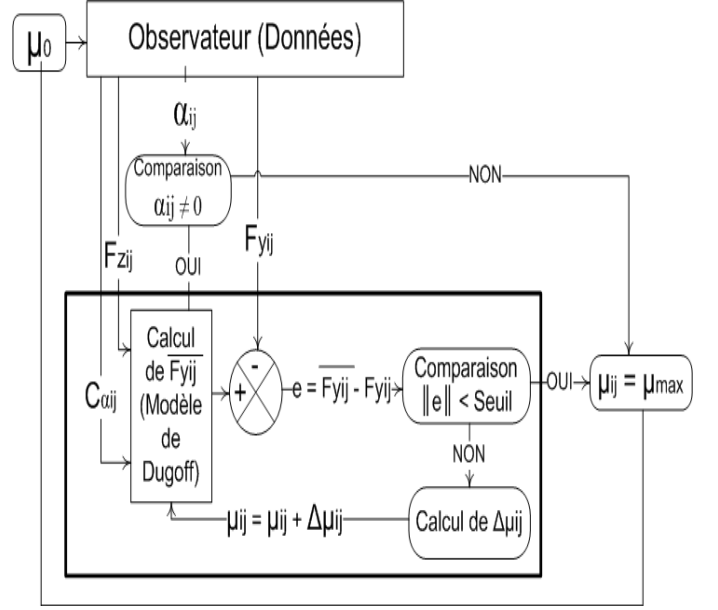


Fig. 3. Méthode d'estimation du coefficient d'adhérence latérale maximal

de dérive pour vérifier s'il est différent de zéro (pour éviter des singularités).

Le second bloc, en bas de la figure, constitue la boucle d'optimisation non linéaire de Levenberg-Marquardt. L'objectif de la boucle est de trouver une valeur d'adhérence maximale qui minimise l'erreur entre la force latérale fournie par le modèle de Dugoff et la force latérale estimée par nos observateurs. L'erreur entre cette valeur fournie par le modèle et la valeur de la force estimée est évaluée et constitue le critère d'arrêt de la boucle. Si cette erreur est inférieure à un certain seuil, alors le coefficient d'adhérence maximale utilisé par le modèle de Dugoff (eq. 2), est à un seuil près, celui développé au point de contact pneu-chaussée.

La formalisation de cet algorithme d'optimisation est basée sur trois hypothèses, qui seront validées plus loin dans cette section :

*Hypothèse 1* : Le modèle quasi-statique de Dugoff, donné dans l'équation (2), peut être utilisé dans l'estimation de la force latérale pour chaque pneu.

*Hypothèse 2* : Si l'hypothèse 1 est vérifiée, nous supposons qu'à chaque instant  $k$  de la trajectoire, qu'il est possible de calculer une erreur  $e_{ij} = \overline{F_{y_{ij}}} - F_{y_{ij}}$  où  $\overline{F_{y_{ij}}}$  est la force latérale calculée avec le modèle de Dugoff et  $F_{y_{ij}}$  la force latérale estimée par l'observateur.

*Hypothèse 3* : Nous supposons que :

- La rigidité de dérive est connue ;
- Les forces latérales ( $F_{y_{ij}}$ ) et verticales ( $F_{z_{ij}}$ ) et l'angle de dérive ( $\alpha_{ij}$ ) sont estimés par les observateurs de la section III.

##### B. Validation des hypothèses

Avant de développer l'algorithme pour l'estimation de l'adhérence maximale, il nous a paru indispensable de vérifier la validité des hypothèses, établies au paragraphe précédent. Pour cela, nous avons simulé une trajectoire en

chicane à être parcourue par un véhicule dans le simulateur réaliste *CALLAS*. La figure 4, montre l'évolution de la force latérale  $F_{y11}$  développée sur le pneu avant droit, pour un coefficient d'adhérence latérale  $\mu_{max}$  spécifié dans le simulateur. Pour chaque point de la trajectoire, la force latérale calculée par le modèle de Dugoff,  $F_{y_{dugoff11}}$ , est également calculée avec le même  $\mu_{max}$ . L'erreur  $e_{11} = \overline{F_{y_{dugoff11}}} - F_{y11}$ , montrée dans la figure, indique que les hypothèses 1 et 2 ci-dessus ne sont pas rejetées.

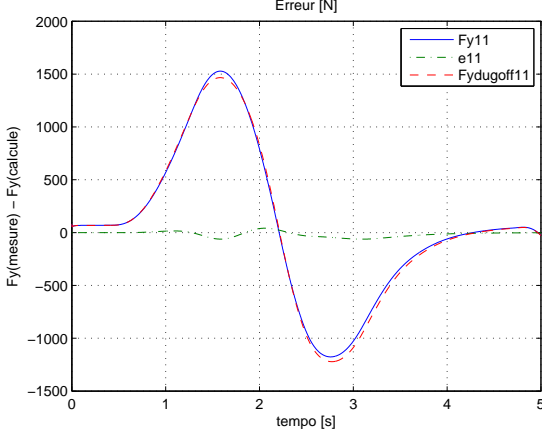


Fig. 4. Validation du modèle

### C. Algorithme d'optimisation

La méthode d'optimisation utilisée est la méthode de Levenberg-Marquardt. L'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) est une technique itérative pour localiser le minimum d'une fonction à plusieurs variables, qui est exprimée comme la somme des carrés des fonctions à valeurs réelles non-linéaires [7], [8]. Elle est devenue une technique standard pour résoudre les problèmes de moindres carrés non linéaires [9], et largement adoptée dans un grand nombre de disciplines [11]. La méthode LM peut être considérée comme une combinaison entre la méthode du gradient descendant et la méthode de Gauss-Newton. Quand une solution est loin de la solution correcte, LM se comporte comme la méthode de gradient descendant : elle sera lente mais la convergence est garantie. Quand une solution est proche de la solution correcte, elle se comporte comme la méthode de Gauss-Newton.

Soit la fonction de coût à minimiser comme suit :

$$\begin{aligned}
L &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n e_k^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\overline{F_{y_{ijk}}} - F_{y_{ijk}})^2 \\
&= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left( \frac{\mu_{max}^4 F_{z_{ijk}}^4}{(4C_{\alpha_{ijk}} \tan \alpha_{ijk})^2} - 2 \frac{\mu_{max}^3 F_{z_{ijk}}^3}{(4C_{\alpha_{ijk}} \tan \alpha_{ijk})} \right. \\
&\quad \left. + \mu_{max}^2 F_{z_{ijk}}^2 \right) + (-2F_{y_{ijk}} \left( \frac{\mu_{max}^2 F_{z_{ijk}}^2}{(4C_{\alpha_{ijk}} \tan \alpha_{ijk})} \right. \\
&\quad \left. - \mu_{max} F_{z_{ijk}} \right)) + F_{y_{ijk}}^2
\end{aligned} \tag{5}$$

où  $\overline{F_{y_{ijk}}}$  est la force latérale calculée par le modèle de Dugoff et  $F_{y_{ijk}}$  celle estimée par les observateurs de la sec-

tion III. Considérons sa linéarisation avec le développement en série de Taylor :

$$L(\hat{\mu} + \Delta\mu) = \left[ L(\hat{\mu}) + L\mu * \Delta\mu + \frac{1}{2} L\mu\mu * \Delta\mu^2 + \theta^3 \right] \tag{6}$$

où  $L(\hat{\mu} + \Delta\mu)$  est l'approximation linéaire de  $L(\mu)$  autour du point  $\hat{\mu}$ . En considérant une perturbation infinitésimale de cette fonction autour de  $\Delta\mu$ , nous avons :

$$\frac{\partial L(\hat{\mu} + \Delta\mu)}{\partial \Delta\mu} = L(\mu) + L\mu\mu * \Delta\mu \tag{7}$$

où  $L\mu = \frac{\partial L}{\partial \mu}$  et  $L\mu\mu = \frac{\partial^2 L}{\partial \mu^2}$ . Ce qui donne,

$$L\mu\mu * \Delta\mu = -L\mu \tag{8}$$

$$L = \frac{1}{2} \epsilon^T * \epsilon \tag{9}$$

$$L\mu = \epsilon_\mu^T * \epsilon \tag{10}$$

$$L\mu\mu = \epsilon_\mu^T * \epsilon_\mu + \epsilon_{\mu\mu}^T * \epsilon \tag{11}$$

où  $\epsilon = [e_{ij1}, e_{ij2}, \dots, e_{ijk}]$ , est le vecteur d'erreur et  $\epsilon_\mu = \left[ \frac{\partial e_{ij1}}{\partial \mu}, \frac{\partial e_{ij2}}{\partial \mu}, \dots, \frac{\partial e_{ijk}}{\partial \mu} \right]$ , la première dérivée du vecteur d'erreur.

En supposant que  $\epsilon_\mu$  est une fonction linéaire, nous pouvons considérer l'approximation suivante :

$$L\mu\mu \approx \epsilon_\mu^T * \epsilon_\mu \tag{12}$$

et (8) devient,

$$\epsilon_\mu^T * \epsilon_\mu * \Delta\mu = -\epsilon_\mu^T * \epsilon \tag{13}$$

où

$$\Delta\mu = -(\epsilon_\mu^T * \epsilon_\mu)^{-1} * (\epsilon_\mu^T * \epsilon) \tag{14}$$

Les équations (13) et (14) constituent le bloc "calcul de  $\Delta\mu_{ij}$ " dans la boucle du processus d'optimisation de la figure 3. Une fois que  $\Delta\mu$  est ainsi calculé, un nouveau coefficient d'adhérence est finalement calculé par,  $\mu_{t+1} = \mu_t + \Delta\mu$  où  $t$  indique un pas dans la boucle d'optimisation. À partir de  $\mu_{t+1}$  le vecteur d'erreur  $\epsilon$  est recalculé. L'arrêt de la boucle est déterminé par la condition  $\|\epsilon\| < \text{seuil}$ .

## V. VALIDATION ET RÉSULTATS

La méthode représentée dans la section IV, a été implémentée et testée sur des données issues du simulateur *CALLAS*, sur une chicane à une vitesse de 60 km/h, et avec des états de chaussée différents ( $\mu_{max}$  différents). Le simulateur *CALLAS* fournit les paramètres de la dynamique de véhicule qui constituent les entrées du bloc "observateur(données)" de la figure 3, qui sont essentiellement les débattements de suspensions, les accélérations longitudinales et latérales, la vitesse de lacet, les vitesses des roues, et l'angle de braquage (entrées de nos observateurs de forces dans la figure 2). Les vraies valeurs de  $\mu_{max}$ , utilisées par le simulateur dans la génération des paramètres de la dynamique, sont inconnues dans les observateurs de forces et dans la boucle d'optimisation. L'objectif est ainsi d'appliquer la méthode décrite dans la section précédente pour

estimer une valeur de  $\mu_{max}$  qui soit le plus proche possible de la vraie valeur.

Nous présentons ici l'application de la méthode d'estimation du  $\mu_{max}$  pour un véhicule qui roule sur quatre types de chaussées : route sèche, route mouillée, route enneigée et route glacée. Tous les résultats concernent la roue avant-gauche du véhicule. La valeur initiale de  $\mu_{max}$  dans la boucle d'optimisation est initialisée à 0.01. Par la suite,  $F_{y11}$  désigne la force latérale estimée par nos observateurs de forces avec les paramètres fournis par CALLAS ;  $F_{yDugofff11}$  désigne la force latérale estimée par le modèle de Dugoff pour un  $\mu_{max}$  donné, et  $e_{11}$  la fonction d'erreur.

Pour un sol sec ( $\mu_{max} = 0.9$  dans CALLAS), les résultats sont représentés dans les figures 5 et 6.

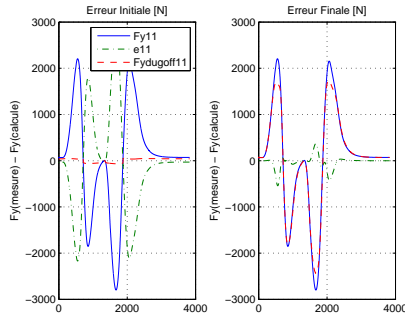


Fig. 5. Estimations de la force latérale sur un sol sec : (a) début de minimisation, (b) à la fin de la minimisation

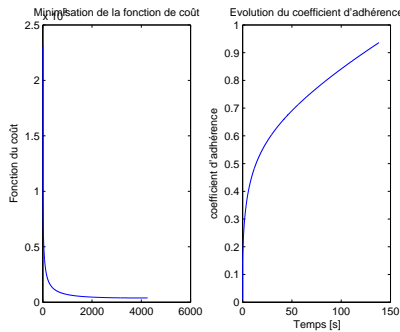


Fig. 6. (a) Evolution de la fonction de coût, (b) Evolution du coefficient d'adhérence latérale pendant le processus de d'optimisation.

La figure 5 montre l'évolution de la force latérale pendant le déplacement du véhicule. La partie de gauche montre le début de l'optimisation, l'écart entre la force estimée  $F_{y11}$  et la force de Dugoff  $F_{yDugofff11}$  est dû au fait que le  $\mu$  initial est très loin du  $\mu_{max}$  associé à ce type de chaussée. La partie de droite montre la fin de l'optimisation. On voit que  $F_{yDugofff11}$  converge bien vers  $F_{y11}$ , et l'erreur tend vers zéro avec une valeur moyenne inférieure à 200N. Le coefficient d'adhérence estimé  $\mu$  converge ainsi vers sa vraie valeur. La figure 6 montre l'évolution de la fonction  $L$  (éq. 5) (à gauche) et de  $\mu$  (à droite). Nous constatons également un décrochage du modèle dans les parties extrêmes de la courbe, cela est dû aux fortes sollicitations lors de ces virages.

Pour un sol mouillé ( $\mu = 0.6$ ), les résultats sont représentés dans les figures 7 et 8.

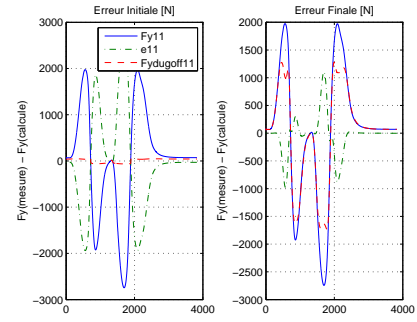


Fig. 7. Estimations de la force latérale sur un sol mouillé : (a) début de minimisation, (b) à la fin de la minimisation

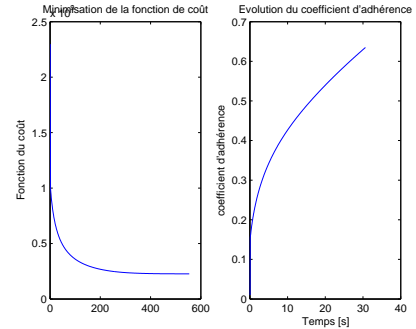


Fig. 8. (a) Evolution de la fonction de coût, (b) Evolution du coefficient d'adhérence latérale sur un sol mouillé.

Les figures 7 et 8 valident l'estimation du  $\mu_{max}$  pour une chaussée mouillée. Là aussi, l'erreur moyenne à l'issue du processus de minimisation est inférieure à 200N.

Pour un sol enneigé ( $\mu = 0.2$ ), les résultats sont représentés dans les figures 9 et 10.

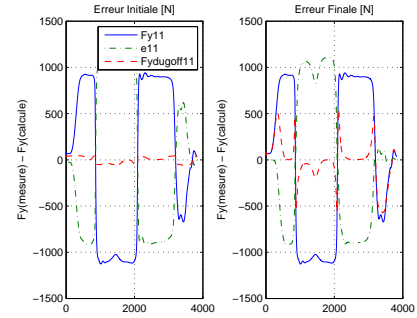


Fig. 9. Estimations de la force latérale sur un sol enneigé : (a) début de minimisation, (b) à la fin de la minimisation

La figure 9 montre bien l'effet du manque d'adhérence et du décrochage du modèle de Dugoff dans les virages. Néanmoins, comme montré dans la figure 10, le coefficient d'adhérence estimé converge vers sa vraie valeur.

Pour un sol glacé ( $\mu = 0.05$ ), les résultats sont représentés dans les figures 11 et 12. Du fait que l'adhérence est extrêmement faible, et la vitesse à 60km/h, la dynamique d'interaction dépasse la limite de saturation pour les forces latérales. Nous pouvons en déduire que les hypothèses établies dans la section IV sont dans la limite de leur validité.

Néanmoins le système d'estimation du  $\mu_{max}$  converge vers sa vraie valeur.

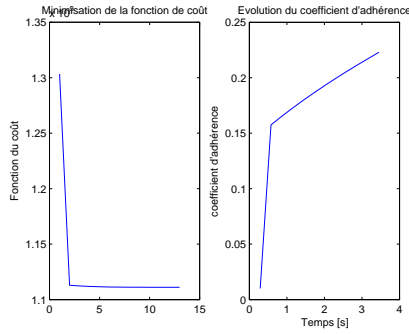


Fig. 10. (a) Evolution de la fonction de coût, (b) Evolution du coefficient d'adhérence latérale sur un sol enneigé.

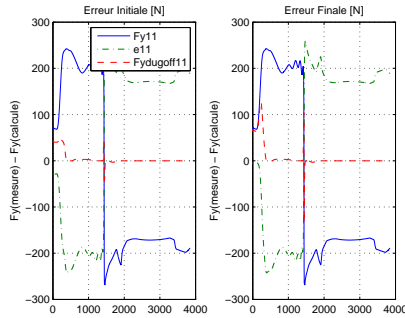


Fig. 11. Estimations de la force latérale sur un sol glacé : (a) début de minimisation, (b) à la fin de la minimisation

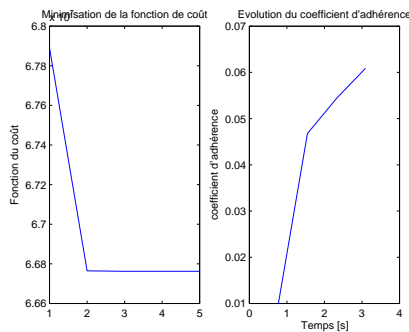


Fig. 12. (a) Evolution de la fonction de coût, (b) Evolution du coefficient d'adhérence latérale sur un sol glacé.

Les résultats d'estimation du coefficient d'adhérence latérale maximale ainsi que l'erreur moyenne sont illustrés dans la table I, comme suit :

TABLE I  
RÉSULTATS D'ESTIMATION ET ERREUR MOYENNE

Chaussée	Vraie $\mu$	$\mu_{max}$ estimée	Erreur moyenne(N)
Sec	0.9	0.9361	70.7425
Mouillé	0.6	0.6354	174.8348
Neige	0.2	0.2284	640.9552
Glacé	0.05	0.0667	179.6127

On observe d'après les figures et la table précédentes, que le coefficient d'adhérence latérale maximale a bien convergé vers sa vraie valeur pour les quatre types de chaussées.

## VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons présenté une nouvelle méthode d'estimation du coefficient d'adhérence latérale maximale. Cette méthode est basée sur une technique d'optimisation non-linéaire (Levenberg Marquardt), appliquée à une fonction d'erreur entre les forces estimées par des observateurs embarqués sur le véhicule et celles calculées par un modèle théorique d'interaction pneumatique/chaussée (le modèle de Dugoff). La méthode a été testée en utilisant des données issues d'un simulateur réaliste de dynamique de véhicule (CALLAS), pour quatre différents types de chaussées (sèche, mouillée, enneigée et glacée). Pour tous les quatre types de sols, le vrai coefficient d'adhérence a été estimé de manière satisfaisante.

En ayant ce paramètre d'adhérence estimée, nous pouvons mettre en oeuvre un système de détection automatique de type de chaussée afin de permettre le calcul des indicateurs de risque de rupture d'itinéraire (sortie de route), et ainsi pouvoir avertir le conducteur.

Suite à ce travail, nous envisageons la validation de la méthode embarquée sur un véhicule réel. Pour ce faire, nous sommes entrain de développer un système de fenêtre glissante d'estimation qui doit nous permettre d'appliquer le processus d'optimisation dans un temps moindre et pendant le déplacement du véhicule.

## RÉFÉRENCES

- [1] L. Haffner, M. Kozek, and J. Shi, *Comparison of two Methods for the Estimation of the Maximum Coefficient of Friction in a Cornering Maneuver of a Passenger Vehicle*, AVEC'08, Vol. 16, pp. 92-97, 2008.
- [2] G. Erdogan, L. Alexander, and R. Rajamani, *Friction coefficient measurement for autonomous winter road maintenance*, Vehicle System Dynamics, Vol. 47, No. 4, pp. 497-512, April 2009.
- [3] C. Liu, and H. Peng, *Road Friction Coefficient Estimation For Vehicle Path Prediction*, Vehicle System Dynamics, Vol. 25, pp. 413-425, 1996.
- [4] S. Muller, M. Uchanski, K. Hedrick, *Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient*, Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 125, pp. 607-617, 2003.
- [5] M. Doumiati, D. Lechner, A. Victorino, G. Baffet, and A. Charara, *Estimation embarquée des efforts latéraux et de la dérive d'un véhicule : validation expérimentale*, JDJNMACS'09, Angers, France, Mars 2009.
- [6] M. Doumiati, A. Victorino, A. Charara, D. Lechner, *Estimation of vehicle lateral tire-road forces : a comparison between extended and unscented Kalman filtering*, Proceedings of the European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009.
- [7] Y. Hsu and J. Chistian Gerdes, « Stabilization of a steer-by-wire vehicle at the limits of handling using feedback linearization », *Proceedings of IMECE2005, AMSE International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Florida, U.S.A, 2005.
- [8] J. Dugoff, P. Fanches and L. Segel, « An analysis of tire properties and their influence on vehicle dynamic performance », *SAE paper (700377)*, 1970.
- [9] J. Dakhllallah, S. Glaser, S. Mammam and Y. Sebsadji, « Tire-road forces estimation using extended Kalman filter and sideslip angle evaluation », *American Control Conference*, Seattle, Washington, U.S.A, June 2008.
- [10] C. Canudas-De-Wit, P. Tsiotras, E. Velenis, M. Basset, G. Gisinger, « Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction », *Vehicle System Dynamics*, vol. 39, pp. 189-226, 2003.
- [11] R. Hartley, A. , *Iterative Estimation Methods*, Multiple View Geometry in computer vision (second edition), Appendix 6, pp. 597-627, 2003.