

# Observateurs Non Linéaires en Cascade : Application à l'Estimation de l'État du Véhicule et des Attributs de la Route

Yazid SEBSADJI<sup>1</sup>, Sébastien GLASER<sup>1</sup>, Saïd MAMMAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire sur les Interactions  
Véhicules-Infrastructure-Conducteurs (LIVIC-LCPC/INRETS)  
14, route de la Minière, Bât 824, 78000, Versailles, France

<sup>2</sup>Université d'Évry val d'Essonne, France. IBISC/CNRS-FRE 3190  
40 rue du Pelvoux CE1455, 91025, Evry, Cedex, France

{sebsadji, glaser}@lcpc.fr, mammar@iup.univ-evry.fr

**Résumé**— Il est maintenant établi que les systèmes d'aide à la conduite peuvent tirer un grand profit d'une meilleure connaissance de l'état dynamique du véhicule et de la géométrie de la route. Il est donc essentiel de disposer de mesures ou de bonnes estimations de ces grandeurs. Nous présentons dans cet article une approche de synthèse d'observateurs en cascade pour une classe de systèmes linéaires et non linéaires ainsi que les conditions nécessaires et suffisantes de stabilité et de convergence de ces observateurs.

L'approche est par la suite appliquée à l'estimation des variables dynamiques du véhicule et des attributs de la route et notamment la pente. Pour ce faire, deux observateurs, un filtre de Kalman étendu et un observateur de Luenberger sont placés en cascade. Ces observateurs utilisent un modèle dynamique du véhicule et disposent des mesures fournies par le système ABS et une centrale inertielle. Des tests, effectués sur des mesures obtenues à l'aide d'un véhicule prototype, sont également présentés.

**Mots-clés**— observateurs en cascade, pente, attributs de la route, estimation, modèle du véhicule, FKE, observateur de Luenberger.

## I. INTRODUCTION

Cette dernière décennie a vu la multiplication des recherches sur le développement des systèmes d'assistance à la conduite. Ces systèmes peuvent alerter le conducteur en amont d'un danger et vont jusqu'à corriger la trajectoire du véhicule lorsque celui-ci atteint par exemple des situations critiques pour la dynamique. Bien que la plupart des systèmes actuellement disponibles fonctionnent sans perception de la route, les recherches ont montré que le contrôle de la stabilité du véhicule est fortement lié à la géométrie de la route [1] et en particulier à la pente. Bien que ces attributs routiers (pente, dévers et courbure) soient peu variables dans le temps, et donc *a priori* possible à placer sur une cartographie numérique, leur recueil, au niveau de précision voulu et le stockage engendrent des coûts prohibitifs. Dans cet article, on propose une nouvelle méthode pour reconstruire la pente de la route, à partir d'un modèle longitudinal de la dynamique du véhicule et d'un observateur. Cet observateur nécessite la connaissance, en temps réel, des forces de contact pneu/chaussée qui sont cependant inaccessibles à la mesure, à un coût raisonnable. Pour pallier ce problème, un second observateur est placé en cascade avec le précédent, il permet d'estimer ces forces. Notons que plusieurs méthodes ont déjà été expérimentées pour l'estimation des forces de contact pneu/chaussée, notamment [2] et [3]. Ici, ces efforts sont calculés par le modèle de forces de Dugoff [2]. Les différentes variables nécessaires à

ce calcul sont estimées par l'application d'un filtre de Kalman étendu (FKE) sur le modèle non linéaire à quatre roues du véhicule.

Cette technique attrayante nécessite par contre de vérifier la stabilité et la convergence du système global constitué des deux observateurs. Cette propriété est démontrée mathématiquement dans le cas de la mise en cascade d'observateurs pour des systèmes linéaires et non linéaires vérifiant certaines conditions.

Les mesures nécessaires pour la mise en œuvre de l'ensemble du schéma d'estimation sont : les vitesses de rotation des pneus, fournies par le système ABS, l'angle de braquage mesuré par un codeur optique monté sur le colonne de direction et la vitesse de lacet mesurée par une centrale inertielle.

L'article est organisé comme suit : l'approche proposée pour la synthèse d'observateurs en cascade et les conditions nécessaires de stabilité sont données dans la section 2. Le modèle non linéaire à quatre roues du véhicule, utilisé pour les estimations est décrit dans la section 3. La section 4 détaille les méthodes d'estimation utilisées. la section 5 est consacrée aux résultats de vérification de la qualité des estimateurs sur les variables d'état de modèle du véhicule et de la pente de la route. La section 6 dresse quelques conclusions.

## II. OBSERVATEURS EN CASCADE

L'idée de l'utilisation d'observateurs en cascade consiste à concevoir un observateur stable pour l'ensemble d'un système à partir de la synthèse séparée d'observateurs pour chacun des sous-systèmes qui le constituent. La Fig. 1, montre une structure générale d'un système basé sur deux observateurs en cascade.

Dans le cas d'observateurs construits comme le montre la Fig. 1, les estimations obtenues à l'aide du premier observateur affectent la dynamique du second observateur. Nous étudions ici la convergence du système global, dans le cas où les observateurs sont conçus selon les techniques conventionnelles, telles que le filtre de Kalman simple ou linéarisé, Luenberger linéaire ou étendu et autres observateurs linéaire.

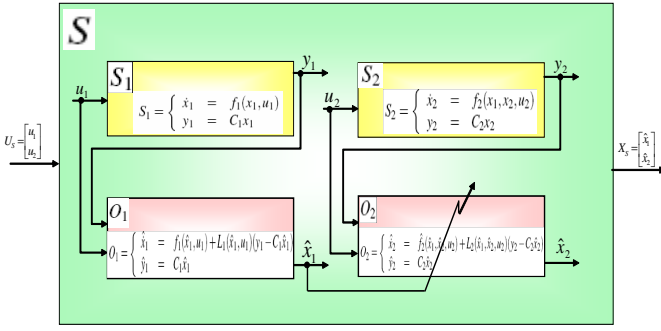


Fig. 1. Observateurs en cascade

Supposons que le premier observateur ( $O_1$ ) soit conçu pour estimer l'état du premier système ( $S_1$ ), décrit par :

$$S_1 = \begin{cases} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, u_1) \\ y_1 &= C_1 x_1 \end{cases} \quad (1)$$

L'estimateur non-linéaire ( $O_1$ ) du premier système ( $S_1$ ) est donné par :

$$O_1 = \begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 &= f_1(\hat{x}_1, u_1) + L_1(\hat{x}_1, u_1)(y_1 - C_1 \hat{x}_1) \\ \hat{y}_1 &= C_1 \hat{x}_1 \end{cases} \quad (2)$$

où  $\hat{x}_1$  est l'estimation de  $x_1$  et  $L_1(\hat{x}_1, u_1)$  est la matrice des gains.

L'erreur d'estimation de l'observateur  $O_1$  est :

$$e_1 = x_1 - \hat{x}_1 = f_1(x_1, u_1) - f_1(\hat{x}_1, u_1) - L_1(\hat{x}_1, u_1)(C_1 x_1 - C_1 \hat{x}_1)$$

En linéarisant les fonctions d'évolution du système  $S_1$  autour de l'état estimé, on obtient :

$$\dot{e}_1 = \left[ \frac{\partial f_1(x_1, u_1)}{\partial x_1} - L_1(\hat{x}_1, u_1)C_1 \right] e_1$$

Si le gain,  $L_1$  est choisi selon des techniques de conception d'estimateur, alors l'erreur d'estimation  $e_1$  décroît vers zéro :

$$e_1 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad t \rightarrow \infty \quad (3)$$

Le deuxième observateur ( $O_2$ ) est construit pour le deuxième système ( $S_2$ ), décrit par :

$$S_2 = \begin{cases} \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2, u_2) \\ y_2 &= C_2 x_2 \end{cases} \quad (4)$$

De la même manière, nous allons procéder à la conception du second observateur. Cependant, l'estimation de la fonction  $f_2$ , notée  $\hat{f}_2$ , est employée à la place de  $f_2$ . Elle est calculée en utilisant l'état estimé  $\hat{x}_1$  du système  $S_1$ . En conséquence, le deuxième observateur est construit en utilisant  $\hat{f}_2$  comme suit :

$$O_2 = \begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) + L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)(y_2 - C_2 \hat{x}_2) \\ \hat{y}_2 &= C_2 \hat{x}_2 \end{cases} \quad (5)$$

$L_2$  est choisi de telle sorte que la dynamique suivante tend vers zéro :

$$\dot{e}_2 = \left[ \frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) - C_2 \right] e_2$$

$$e_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad t \rightarrow \infty$$

Pour assurer la stabilité du second observateur les deux hypothèses suivantes seront utiles :

**Hypothèse 1 :**  $\hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)$  est divisible en une valeur vraie  $f_2(x_1, \hat{x}_2, u_2)$  et une erreur  $\Delta f_2$ , due à l'erreur  $e_1$ .

$\Delta f_2$  converge vers 0 lorsque l'erreur  $e_1$  converge vers 0.

$$\frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} = \frac{\partial f_2(x_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} + \Delta f_2 \quad (6)$$

$$\Delta f_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad e_1 \rightarrow 0 \quad (7)$$

**Hypothèse 2 :** On suppose que l'état  $x_2$  est borné, c'est-à-dire :

$$\|x_2\| < x_{2max}$$

L'erreur d'estimation du système  $S_2$  est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \hat{x}_2 - \dot{x}_2 \\ &= f_2(x_1, x_2, u_2) - \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)(y_2 - C_2 \hat{x}_2) \\ &= \frac{\partial f_2(x_1, x_2, u_2)}{\partial x_2} x_2 - \frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial \hat{x}_2} \hat{x}_2 - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)C_2(x_2 - \hat{x}_2) \\ &= \left[ \frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)C_2 \right] (x_2 - \hat{x}_2) - \Delta f_2 x_2 \\ \dot{e}_2 &= \left[ \frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)C_2 \right] e_2 - \Delta f_2 x_2 \end{aligned} \quad (8)$$

D'après la deuxième hypothèse, nous pouvons écrire ce qui suit :

$$\|\Delta f_2 x_2\| \leq \|\Delta f_2\| \|x_2\| \leq \|\Delta f_2\| x_{2max} \quad (9)$$

D'après les équations (7) et (9), on obtient :

$$\|\Delta f_2 x_2\| \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad e_1 \rightarrow 0$$

Nous aurons alors :

$$\Delta f_2 x_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad e_1 \rightarrow 0 \quad (10)$$

D'après les équations (3) et (10), lorsque le temps tend vers l'infini, l'équation (8) converge vers la quantité suivante :

$$\dot{e}_2 = \left[ \frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)C_2 \right] e_2$$

Puisque  $L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)$  est choisi de telle sorte que la dynamique de l'erreur soit stable, alors :

$$e_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad t \rightarrow \infty$$

Ce qui prouve la convergence du deuxième observateur ( $O_2$ ). On conclut que l'ensemble des deux observateurs  $O_1$  et  $O_2$  constitue un observateur stable pour le système global  $S$ .

### III. MODÈLE DU VÉHICULE

La mise en œuvre d'une structure d'observation, telle que présentée précédemment, pour estimer les états du véhicule et la pente de la route, nécessite de disposer d'un modèle dynamique du véhicule. L'objet de cette section est de présenter le développement d'un modèle dynamique réaliste en accord avec l'application envisagée. Parmi les différents modèles existants dans la littérature [4], [5], [6], nous nous concentrerons sur le modèle non linéaire [4] à quatre roues, relativement complet et couramment utilisé pour ce type d'applications.

Plusieurs forces extérieures agissent sur le véhicule. Ces forces

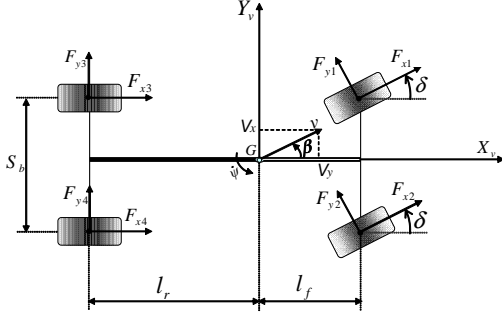


Fig. 2. Véhicule et forces extérieures

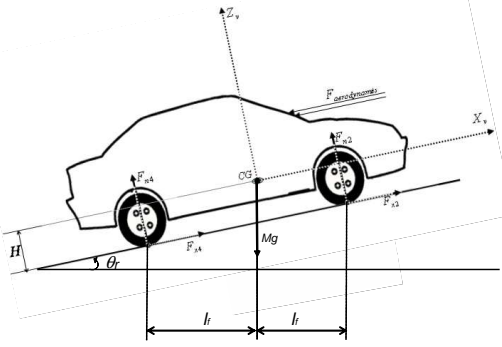


Fig. 3. Véhicule et forces extérieures : pente non nulle

sont représentées sur les Fig. 2 et Fig. 3 dans le cas d'une route horizontale et plane et dans le cas d'une route à pente non nulle.

Dans ce qui suit, le modèle sera limité aux seuls mouvements de translations longitudinale et latérale ainsi qu'à la rotation en lacet. Les équations d'évolution du modèle non linéaire à quatre roues du véhicule sont données par le système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} M\dot{V}_x = \sum F_{X_i} + M\psi V_y - C_x V_x^2 - Mg \sin \theta_r \\ M\dot{V}_y = \sum F_{Y_i} - M\psi V_x - C_y V_y^2 \\ I_z \dot{\psi} = \sum M_{Z_i} \end{cases} \quad (11)$$

$M$  est la masse du véhicule,  $\theta_r$  est la pente de la route,  $g$  est l'accélération gravitationnelle et  $C_x$  est le coefficient de résistance aérodynamique.  $\sum F_{X_i}$ ,  $\sum F_{Y_i}$  et  $\sum M_{Z_i}$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) représentent respectivement la somme des forces longitudinales, somme des forces latérales et la somme des moments autour de l'axe  $Z$ . Une fois projetées sur les axes principaux du véhicule, ces quantités sont données par :

$$\sum F_{X_i} = (F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \delta + (F_{x3} + F_{x4}) \cos \beta + (F_{y3} + F_{y4}) \sin \beta \quad (12)$$

$$\sum F_{Y_i} = (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta + (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta - (F_{x3} + F_{x4}) \sin \beta + (F_{y3} + F_{y4}) \cos \beta \quad (13)$$

$$\sum M_{Z_i} = l_f (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta + l_f (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta + \frac{S_b}{2} (F_{x2} - F_{x1}) \cos \delta + \frac{S_b}{2} (F_{x4} - F_{x3}) - \frac{S_b}{2} (F_{y2} - F_{y1}) \sin \delta - l_r (F_{y3} + F_{y4}) \quad (14)$$

On définit  $x$  et  $u$  respectivement le vecteur d'état du système, composé des vitesses longitudinale, latérale et de lacet et du vecteur des entrées du système, lui-même composé de l'angle de braquage des deux roues avant et des vitesses angulaires des quatre roues données par :

$$x = [V_x \quad V_y \quad \psi]$$

$$u = [\delta \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4]$$

Les deux composantes longitudinale et latérale des forces de contact pneu/chaussée sont calculées à l'aide du modèle de forces de Dugoff [2], donné par le système suivant :

$$\begin{cases} F_{xi} = C_{xxi} \frac{\lambda_i}{1-\lambda_i} k_i \\ F_{yi} = C_{yyi} \frac{\tan \alpha_i}{1-\lambda_i} k_i \end{cases} \quad (15)$$

avec

$$k_i = \begin{cases} (2 - \sigma_i) \sigma_i & \text{if } \sigma_i < 1 \\ 1 & \text{if } \sigma_i \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

et

$$\sigma_i = \frac{(1-\lambda_i) \mu_i F_{ni}}{2 \sqrt{C_{x0}^2 \lambda_i^2 + C_{y0}^2 \tan^2 \alpha_i}} \quad (17)$$

$C_{x0}$  et  $C_{y0}$  sont respectivement les raideurs longitudinale et latérale commune aux quatre pneus.  $\mu_i$  est le coefficient d'adhérence mobilisable de chaque pneu.  $\lambda_i$  et  $\alpha_i$  sont respectivement le glissement longitudinal et l'angle de dérive latérale [7], donnés par :

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{R\omega_i - V_{xi}}{\max(R\omega_i, V_{xi})} \\ \alpha_i = \delta_i - \arctan\left(\frac{V_{yi}}{V_{xi}}\right) \end{cases} \quad (18)$$

où  $R$  est le rayon de la roue.

Notons que le modèle considéré tient compte également du transfert de charge entre les roues. Les forces normales ( $F_{ni}$ ) agissant sur chaque roue sont définies en fonction de la masse totale du véhicule et de ses paramètres géométriques, de l'accélération longitudinale  $a_x$ , de l'accélération latérale  $a_y$  et de la pente de la route. Les formules finales sont les suivantes :

$$\begin{cases} F_{n1} = \frac{l_r Mg \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} - \frac{HM a_x}{2(l_r + l_f)} - \frac{l_r HM a_y}{S_b(l_r + l_f)} \\ F_{n2} = \frac{l_r Mg \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} - \frac{HM a_x}{2(l_r + l_f)} + \frac{l_r HM a_y}{S_b(l_r + l_f)} \\ F_{n3} = \frac{l_f Mg \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} + \frac{HM a_x}{2(l_r + l_f)} - \frac{l_f HM a_y}{S_b(l_r + l_f)} \\ F_{n4} = \frac{l_f Mg \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} + \frac{HM a_x}{2(l_r + l_f)} + \frac{l_f HM a_y}{S_b(l_r + l_f)} \end{cases} \quad (19)$$

#### IV. ESTIMATION DES VARIABLES D'ÉTAT ET DE LA PENTE

##### A. Estimation des variables d'état du véhicule

Le schéma bloc de simulation est représenté sur la Fig. 4. Le vecteur de sortie du système est constitué de la vitesse longitudinale du véhicule et de la vitesse de lacet. La vitesse longitudinale est approximée ici par la moyenne des vitesses de translation des deux roues arrière, ces deux roues étant celles qui sont les moins soumises aux glissements longitudinaux. Le vecteur des mesures  $y$ , et la matrice de sortie de système  $C$  sont donc donnés par :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad y = Cx.$$

L'estimation va maintenant procéder en deux étapes. Un premier observateur de type filtre de Kalman étendu (FKE) sera développé pour estimer les états dynamiques du véhicule et les efforts de contact pneu/chaussée [8]. On utilise pour cela le modèle discret non linéaire, représenté par le système (20), issu du modèle à quatre roues précédent.  $\Delta T$  est le pas d'échantillonnage du modèle discrétisé.

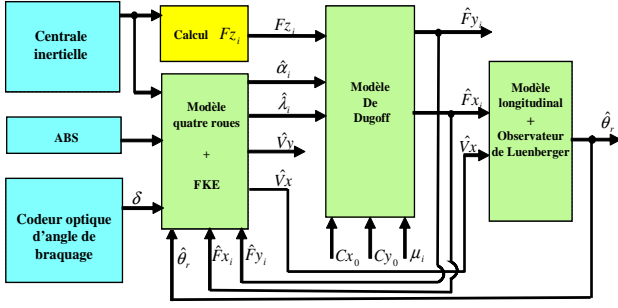


Fig. 4. Schéma bloc des simulations

$$\begin{cases} \hat{V}_x(k+1) = \hat{V}_x(k) + \frac{\Delta T}{M} \left( \sum \hat{F}_{X_i}(k) + M\hat{\psi}(k)\hat{V}_y(k) - C_x\hat{V}_x^2(k) - Mg \sin \hat{\theta}_r(k) \right) \\ \hat{V}_y(k+1) = \hat{V}_y(k) + \frac{\Delta T}{M} \left( \sum \hat{F}_{Y_i}(k) - M\hat{\psi}(k)\hat{V}_x(k) - C_y\hat{V}_y^2(k) \right) \\ \hat{\psi}(k+1) = \hat{\psi}(k) + \frac{\Delta T}{M} \left( \sum \hat{M}_{Z_i}(k) \right) \end{cases} \quad (20)$$

Notons que les variables d'état estimées permettent d'accéder aux efforts qui sont par la suite utilisés pour estimer la pente de la route.

### B. Estimation de la pente

L'application du FKE sur le modèle discret non linéaire du véhicule nous a permis d'estimer les différentes forces. Ces forces sont maintenant utilisées comme des entrées du modèle longitudinal simplifié représenté par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{V}_x = \frac{\hat{F}_{res}}{M} - g \sin \theta_r \\ \dot{\theta}_r = 0 \end{cases} \quad (21)$$

avec

$$\hat{F}_{res} = \sum \hat{F}_{X_i} + M\hat{\psi}\hat{V}_y - C_x\hat{V}_x^2$$

En général la pente de la route est inférieure à dix degrés en valeur absolue, l'approximation de  $\sin \theta_r$  par  $\theta_r$  est donc acceptable. De ce fait, le système (21) peut s'écrire sous la forme linéaire suivante :

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \underline{x} + \underline{B} u$$

avec,  $\underline{x} = [V_x \ \theta_r]^T$  le vecteur d'état,  $u = \hat{F}_{res}$  l'entrée, et  $\underline{C} = [1 \ 0]$  est la matrice des sorties. Les deux matrices  $\underline{A}$  et  $\underline{B}$  sont données par :

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & -g \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 1/M \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les deux hypothèses (1) et (2) nécessaires pour la stabilité du second observateur (observateur de Luenberger), donc du système global schématisé sur la Fig. 4 sont bien vérifiées, puisque les deux variables ( $V_x$  et  $\theta_r$ ) qui constituent le vecteur d'état  $\underline{x}$  du second modèle (modèle longitudinal) sont bornées. De plus, la fonction d'évolution ( $\underline{A}$ ) de ce modèle est linéaire, donc  $\Delta \underline{A} = 0, \forall(x, \underline{x} \text{ et } u)$ .

Pour estimer la pente, on applique l'observateur de Luenberger [9] sur le modèle longitudinal du véhicule. L'expression mathématique de cet observateur est donnée par :

$$\hat{\underline{x}} = \underline{A} \underline{x} + \underline{B} u + L(y - \underline{C} \hat{\underline{x}})$$

avec  $L$  est le gain de l'observateur. Il est déterminé de telle sorte que les valeurs propres de la matrice  $[\underline{A} - L\underline{C}]$  soient à parties réelles négatives, c'est-à-dire que l'observateur soit stable.

## V. RÉSULTATS DE SIMULATION ET EXPÉRIMENTAUX

### A. Résultats d'estimation

Dans cette section, les résultats d'estimation des variables d'état du modèle non linéaire du véhicule et la reconstruction de la pente de la route sont présentés. L'angle de braquage ( $\delta$ ) appliqué aux roues avant est représenté sur la Fig. 5-a, La pente est visible sur la Fig. 9-a, les vitesses de rotation des quatre roues sont représentées sur les Fig. 5-b, Fig. 5-c Fig. 5-d et Fig. 5-e. Dans cette partie de la simulation, les coefficients d'adhérence ( $\mu_i$ ) sont supposés constants et fixés à 0.8. Rappelons que la vitesse du véhicule est remplacée par la moyenne des vitesses de translation des deux roues arrière. Elle est fixée aux alentours de 25m/s.

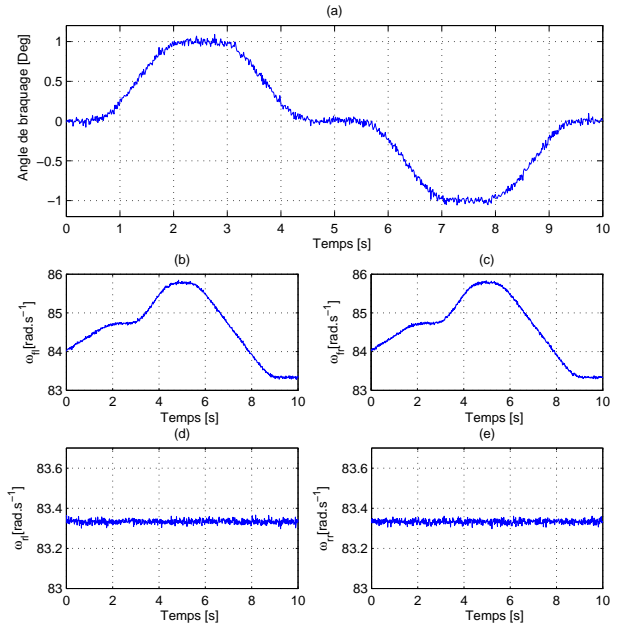


Fig. 5. Braquage et vitesses angulaires des quatre roues

La Fig. 6 montre les résultats d'estimation pour la vitesse longitudinale (a), la vitesse latérale (b), la vitesse de lacet (c) et l'angle de dérive (d). Les courbes obtenues tout comme les erreurs d'estimation présentées sur la Fig. 7 permettent de conclure que ces variables sont parfaitement estimées.

Les résultats d'estimation des forces longitudinales sont visibles sur la Fig. 8. Ces forces sont proportionnelles à la pente de la route.

La pente estimée par l'observateur de Luenberger (OL) est visible sur la Fig. 9-a. Les erreurs d'estimation sont représentées sur Fig. 9-b. Ces deux courbes montrent aussi la bonne estimation de cette variable.

### B. Tests sur véhicule prototype

Dans un premier temps, le modèle non linéaire du véhicule à quatre roues a été validé sur la base des mesures issues du véhicule prototype. Par la suite, le filtre de Kalman étendu et l'observateur de Luenberger ont été appliqués sur des mesures obtenues lors de tests expérimentaux sur les pistes de Satory/Versailles.

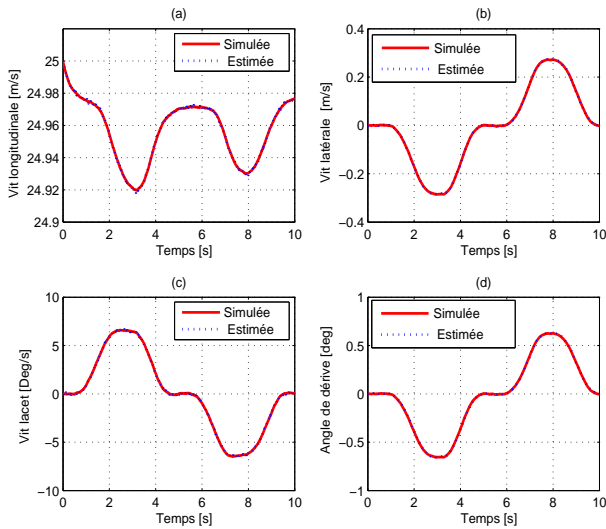


Fig. 6. Résultat d'estimation et de simulation des variables d'état

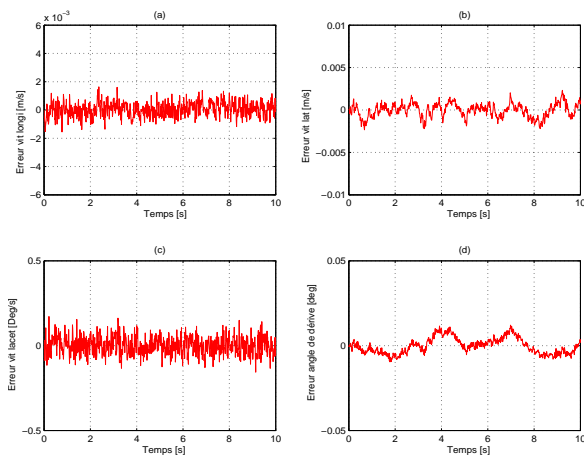


Fig. 7. Erreurs d'estimation des variables d'état

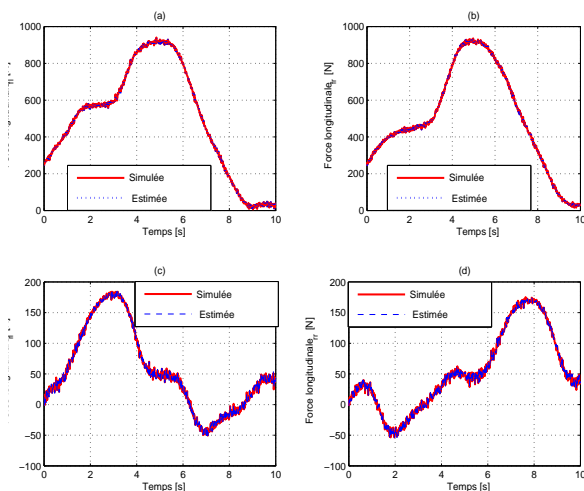


Fig. 8. Forces longitudinales estimées et simulées

Le véhicule, sur lequel les tests ont été menés, est équipé d'un codeur optique d'angle de braquage, d'un ABS, d'une centrale inertielle et d'un Correvit, qui permet d'accéder simultanément aux vitesses latérale et longitudinale. Les résultats issus de ces

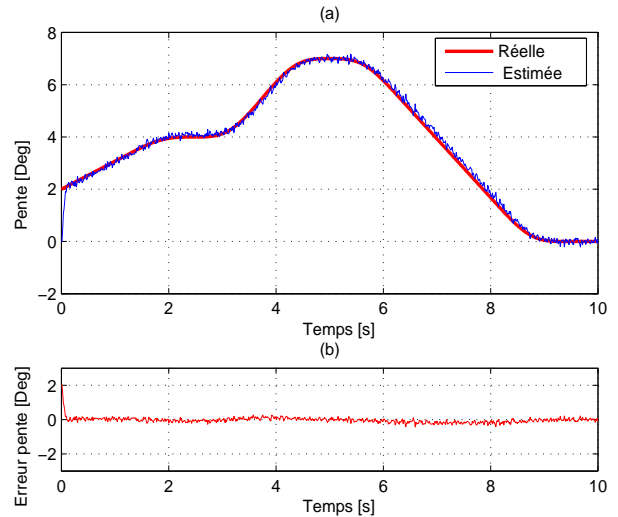


Fig. 9. La pente estimée et l'erreur d'estimation

tests sont visibles sur les figures suivantes. Une première comparaison est conduite entre les grandeurs simulées et les grandeurs estimées :

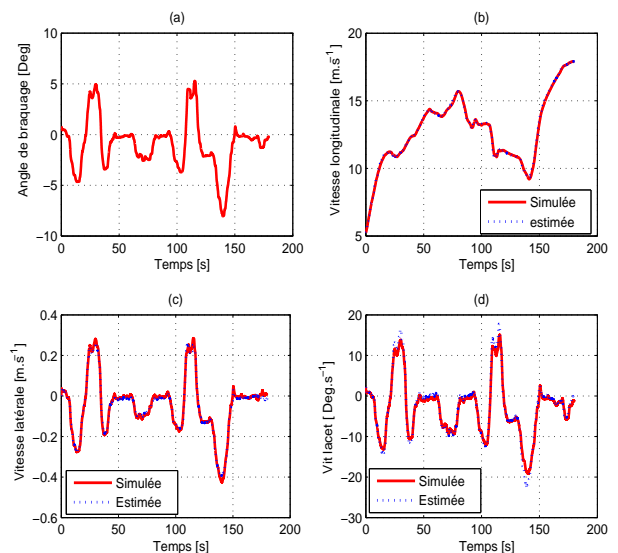


Fig. 10. Angle de braque et variables d'état simulées et estimées

La Fig. 10 montre l'angle de braquage (a) et les grandeurs simulées et estimées pour : la vitesse longitudinale (b), la vitesse latérale (c) et la vitesse de lacet (d). Les courbes démontrent que les variables d'état estimées suivent parfaitement celle simulées. Les erreurs relatives des estimations sont de 4%, 5% et 7.5% respectivement pour les vitesses longitudinale, latérale et de lacet. Les résultats d'estimation des forces longitudinales ( $F_{xi}$ ) avant et arrière sont visibles sur la Fig. 11.

Les estimées sont maintenant comparées aux mesures. Les résultats sont donnés sur les Fig. 12 et Fig. 13. Ils sont concluants puisque les différences entre les mesures données par les capteurs et les résultats d'estimation sont très faibles.

Finalement, la courbe de reconstruction de la pente est donnée sur la Fig. 14. Elle suit parfaitement celle de la pente réelle obtenue par cartographie numérique. La bonne estimation des variables d'état et de la pente de la route confirme l'adéquation des modèles et des observateurs.

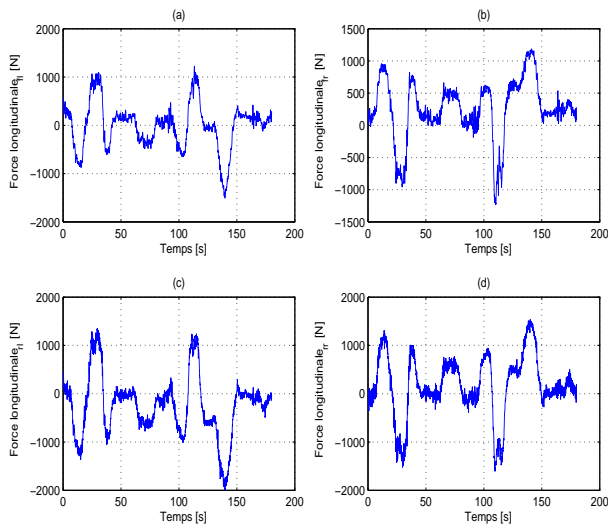


Fig. 11. Forces longitudinales estimées

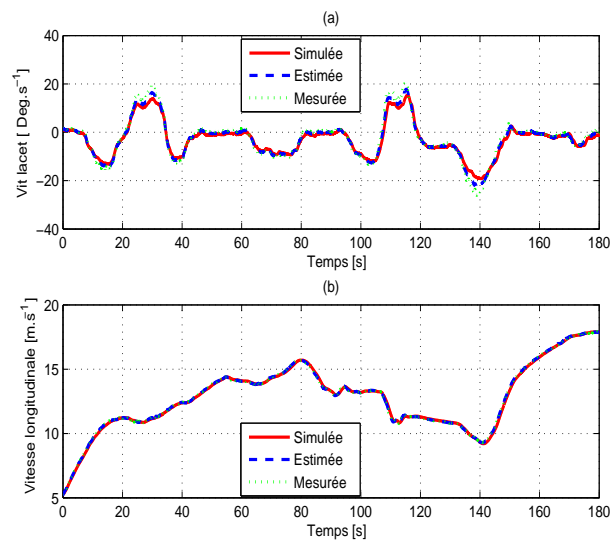


Fig. 12. Vitesses longitudinale et de lacet simulées, estimées et mesurées

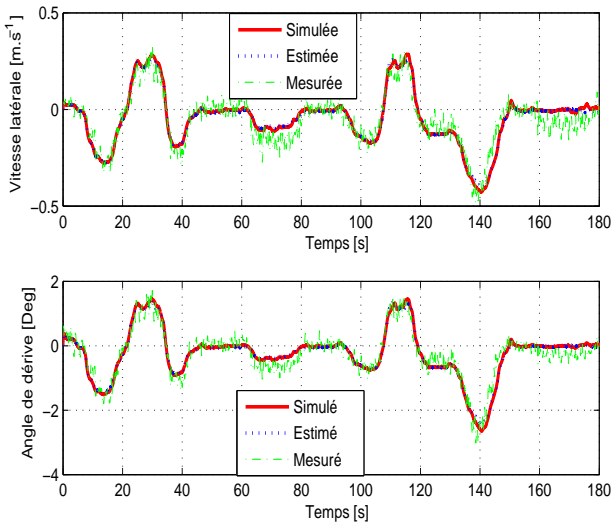


Fig. 13. Vitesse latérale et angle de dérive simulés, estimés et mesurés

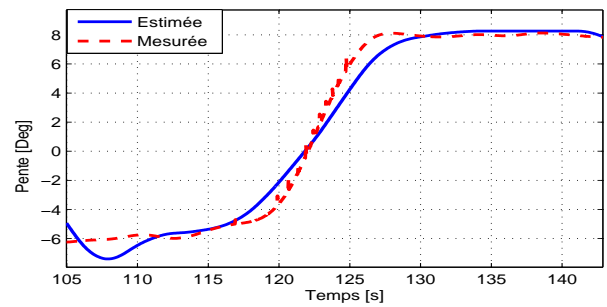


Fig. 14. Résultat d'estimation de la pente

## VI. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une approche de synthèse d'observateurs en cascade ainsi qu'une démonstration de la stabilité et la convergence de ces derniers sous certaines conditions, pour les systèmes linéaires et non linéaires.

Dans une deuxième partie, nous avons appliqué cette approche à la construction d'une méthode d'estimation des variables d'état d'un véhicule, par application de filtre de Kalman étendu sur le modèle non linéaire du véhicule à quatre roues. Un deuxième observateur de type Luenberger, appliqué sur le modèle longitudinal seul, permet d'estimer la pente. Les résultats d'estimation ont été comparés aux mesures obtenues à l'aide d'un véhicule prototype sur les pistes de Satory. Les états estimés suivaient parfaitement les mesures, la pente de la route est correctement reconstruite et les erreurs d'estimation sont faibles et acceptables.

## RÉFÉRENCES

- [1] H.E. Tseng, B. Achrafi, D.Madau, T. Brown et D. recker, *Development of vehicle stability control at ford*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 4, pp. 223-234, 1999.
- [2] J. Dugoff, P. Fanches et L. Segel, *An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance*. SAE, (700377), 1970.
- [3] E. Bakker, H.B. Pacejka, et L. Lidner, *A new tire model with an application in vehicle dynamics studies*. SAE paper, 1989.
- [4] Y. Sebsadji, S. Glaser, S. Mammam et J. Dakhllallah *Road Slope and Vehicle Dynamics Estimation*, American Control Conference, Seattle, Washington, Etats unis, Juin, 2008.
- [5] S. Glaser, *Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoire limites Application au développement de systèmes d'aide à la conduite*. Thèse, Université d'Evry Val d'Essonne, France, 2004.
- [6] Marcus Hiemer, *Model Based Detection and reconstruction of road traffic accidents*. Thèse, Université de Karlsruhe, Allemagne, 2004.
- [7] A. Rabhi, N.K. M'Sirdi and M. Ouladsine, *Robust Estimation of Tyre Road Frictions and Contact Forces* International Mediterranean Modeling Multiconference, Marseille, France, 2005.
- [8] R.E. Kalman, *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering, pp. 35-45, Mars 1960.
- [9] D.G. Luenberger, *An introduction to observers*, IEEE Trans. Automat. Contr, vol. 16, pp. 896-602, 1971.
- [10] N. Mudaliar, D. Le Blanc, H. Peng, *Linear Estimation for Road Departure Warning Systems*, American Control Conference - Proceedings, Boston, 2004.
- [11] A. Rabhi, *Estimation de la Dynamique du Véhicule en Interaction avec son Environnement*. Thèse, Université de Versailles-Saint-quentin-en-Yvelines, France, December 2005.
- [12] M. Satria, M.C. Best, *State estimation of vehicle handling dynamics using non-linear robust extended adaptive Kalman filter*, Vehicle System Dynamics, Vol.41, 2004, pp. 103-112.
- [13] D. Bevely, R. Sheridan, et J. C. Gerdes, *Integrating ins sensors with gps velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness*. In Proceedings of the American Control Conference, Juin, 2001, pp. 25-30.
- [14] J. Stéphane, *Contribution à l'étude et à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule*, Thèse de l'université de Technologie de Compiègne, France, Décembre 2004.