

Redéfinition de la supervision dynamique d'une automobile à partir de nouveaux capteurs

Mohamed OUAHI¹, Joanny STEPHANT¹, Dominique MEIZEL¹

¹XLIM – UMR 6172 – Université de Limoges, CNRS

ENSIL, Ester Technopole, 16, rue Atlantis, 87068 Limoges, France.

mohamed.ouahi@ensil.unilim.fr, stephant@ensil.unilim.fr, meizel@ensil.unilim.fr

Résumé— Les aides à la conduite telles que l'ABS et l'ESP utilisent des mesures d'angle au volant et de vitesse de lacet. Des mesures d'efforts au centre de roue seront disponibles à bas coût dans un avenir proche. L'utilisation de ces nouveaux capteurs serait d'autant plus économiquement viable qu'elle permettrait de définir de nouvelles aides à la conduite tout en assurant les fonctionnalités existantes sans utiliser les capteurs actuels. Dans cet objectif, cet article utilise les techniques d'observation d'état à entrées inconnues qui affectent la sortie. Le cas linéaire sera développé en tant qu'étude de faisabilité. Deux observateurs seront successivement étudiés. Tout d'abord, deux mesures d'efforts latéraux seront supposés disponibles. Ensuite, seule la mesure de l'effort avant sera utilisée. Ces capteurs logiciels seront confrontés à des données issues du simulateur professionnel CALLAS.

Mots-clés— Dynamique véhicule, observateurs d'état, observateurs à entrées inconnues, mesure d'effort, roulement de roue, aides à la conduite

I. INTRODUCTION

Les véhicules automobiles disposent actuellement de systèmes de sécurité active qui ont pour but de minimiser les accidents en aidant le conducteur à maîtriser son véhicule. Parmi ces systèmes, les plus connus sont l'ABS, l'ESP et l'AFU. Ces systèmes mécatroniques basent leurs calculs sur des mesures issues de capteurs (accéléromètre, gyromètre, capteur d'angle volant, codeurs de position de roue, ...). Néanmoins, certaines variables nécessaires au diagnostic comportemental du véhicule ne sont pas disponibles directement par la mesure (dérive, accélération longitudinale, efforts d'interaction pneumatique/chaussée, ...). Des algorithmes d'observation d'état, utilisant des modèles dynamiques, peuvent être mis en place pour les calculer [10], [11] et [12]. Actuellement, des recherches sont effectuées afin de développer des capteurs permettant d'accéder à la mesure du torseur des efforts pneumatique/chaussée à bas coût [1], [2] et [3]. Le déploiement de cette nouvelle technologie pourrait être d'autant plus économiquement justifiable si elle permettait de définir de nouvelles aides à la conduite tout en se substituant à l'intégralité des capteurs utilisés dans les fonctionnalités actuelles qui continueraient à être assurées dans une architecture redéfinie. Par ailleurs, ces nouvelles mesures peuvent être une source supplémentaire d'informations utilisable pour robustifier les algorithmes de contrôle et de diagnostic actuels.

Avec cet objectif, l'article présente deux observateurs d'état permettant de reconstruire des variables caractéristiques de la dynamique latérale du véhicule (dérive, vitesse de lacet et accélération latérale) ainsi que l'angle de

braquage, considéré alors comme une entrée inconnue. Les efforts latéraux au centre de roue sont considérés comme les seules mesures disponibles. L'état estimé (dérive et vitesse de lacet), l'accélération latérale et l'angle de braquage reconstruits peuvent servir d'entrées aux aides à la conduite "classiques".

Dans cette première étude, un modèle de véhicule de type "bicyclette" [4] sera utilisé pour définir les observateurs.

La vitesse longitudinale est supposée constante, le modèle de pneumatique utilisé est un modèle linéaire en la dérive et les mouvements de la masse suspendue (tangage et roulis) sont négligés. Ce type de modèle n'est valide que dans le cas d'une faible dynamique latérale ($|j\dot{y}| < 0,4g$).

Les observateurs sont construits sur les bases théoriques de l'observation d'état à entrées inconnues qui affectent la sortie [5] et [6]. La synthèse paramétrique des observateurs sera menée en utilisant des algorithmes de résolution d'inégalités matricielles linéaires (LMI) [9].

La première partie de cet article présente le modèle de véhicule utilisé. La seconde partie aborde la construction des deux observateurs. Enfin, les observateurs sont testés et confrontés aux données issues du simulateur de véhicule CALLAS distribué par la société Oktal¹. Ce logiciel est basé sur un modèle de connaissance et il a été validé par une étude conjointe de l'INRETS, du LCPC et de l'ETAS [13].

Afin de faciliter la lecture, les différentes notations sont explicitées dans l'annexe VI.

II. MODÉLISATION DU VÉHICULE

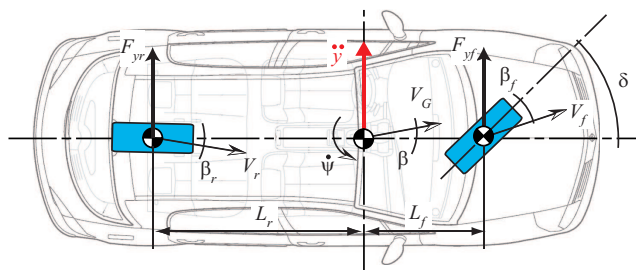


Fig. 1. Modèle Bicyclette

Après application du principe fondamental de la dynamique, un modèle linéaire stationnaire du véhicule (1), représenté par une bicyclette, est obtenu. Les variables de ce modèle sont représentées sur la figure 1. Les entrées considérées sont les efforts d'interaction pneumatiques/chaussée exprimés dans le repère véhicule.

1. <http://www.oktal.fr>

$$\begin{cases} \dot{\beta} &= (F_{yf} + F_{yr})/(V_G M_V) - \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} &= (L_f F_{yf} - L_r F_{yr})/I_{zz} \end{cases} \quad (1)$$

En supposant de faibles dynamiques, avec l'hypothèse de petits angles de dérive et de braquage, les équations des efforts latéraux avant et arrière sont supposés linéaires en la dérive et s'écrivent comme :

$$\begin{cases} F_{yf} &= D_f \beta_f \\ F_{yr} &= D_r \beta_r \end{cases} \quad (2)$$

Avec les relations de la cinématique, les angles de dérive avant et arrière sont :

$$\begin{cases} \beta_f &= \delta - \beta - \frac{L_f \dot{\psi}}{V_G} \\ \beta_r &= -\beta + \frac{L_r \dot{\psi}}{V_G} \end{cases} \quad (3)$$

En remplaçant les équations (3) dans (2), les efforts latéraux s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} F_{yf} &= D_f (\delta - \beta - \frac{L_f \dot{\psi}}{V_G}) \\ F_{yr} &= D_r (-\beta + \frac{L_r \dot{\psi}}{V_G}) \end{cases} \quad (4)$$

III. OBSERVATEURS LINÉAIRES À ENTRÉES INCONNUES

Les objectifs des deux observateurs présentés vont être la reconstruction de l'état du véhicule ainsi que du braquage, considéré comme non mesuré. Les mesures utilisées seront les efforts latéraux des roues avant et arrière. Dans un premier temps, les mesures des efforts latéraux avant et arrière seront considérées disponibles et l'observateur sera noté OEI1. Dans un second temps, seule la mesure d'effort avant sera utilisée et permettra de construire l'observateur OEI2.

A. OEI1 : Observateur avec deux sorties F_{yf} , F_{yr}

A.1 Modèle de la dynamique du véhicule

En remplaçant F_{yf} et F_{yr} (4) dans (1), l'équation d'évolution du modèle bicyclette est sous la forme d'un système linéaire à entrée inconnue qui affecte la sortie :

$$\Sigma_1 \begin{cases} \dot{x} &= Ax + R\delta \\ y &= Cx + D\delta \end{cases} \quad (5)$$

Dans cette expression,

$x = \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}$ est le vecteur d'état, δ est l'entrée inconnue et $y = \begin{pmatrix} F_{yf} \\ F_{yr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$ est le vecteur des sorties. A est la matrice d'état, R est la matrice de commande associée à l'entrée inconnue, C est la matrice d'observation et D est la matrice d'influence de l'entrée inconnue sur les mesures.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-D_f - D_r}{M_V V_G} & \frac{L_r D_r - L_f D_f}{M_V V_G^2} - 1 \\ \frac{L_r D_r - L_f D_f}{I_{zz}} & \frac{-L_r^2 D_r - L_f^2 D_f}{I_{zz} V_G} \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} \frac{D_f}{M_V V_G} \\ \frac{L_f D_f}{I_{zz}} \end{pmatrix}; D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_f \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_f & \frac{-L_f D_f}{V_G} \\ -D_r & \frac{L_r D_r}{V_G} \end{pmatrix}$$

Plusieurs travaux ont été réalisés pour l'estimation des entrées inconnues dans le cadre des systèmes dynamiques linéaires [7] et [8]. Le système (5) respecte les hypothèses suivantes :

- Le système est commandé uniquement par l'entrée inconnue (δ).
- Le nombre d'entrées inconnues est inférieur ou égal au nombre de mesures.
- La matrice D est de rang plein colonnes $Rang(D) = 1$.

L'entrée inconnue δ peut s'exprimer à partir de la première ligne de l'équation d'observation du système (5) car $D_1 = D_f \neq 0$ est inversible.

$$\delta = D_1^{-1}(y_1 - C_1 x) \quad (6)$$

Ainsi, si l'état x est connu, l'estimation de δ (braquage) est obtenu à partir de l'équation (6).

En remplaçant l'expression de l'entrée inconnue (6) dans le système (5) la représentation d'état suivante est obtenue :

$$\Sigma_1 \begin{cases} \dot{x} &= (A - R D_1^{-1} C_1) x + R D_1^{-1} y_1 \\ y_2 &= C_2 x \end{cases} \quad (7)$$

La reconstruction des états non mesurables est alors celle d'un système d'entrée connue $y_1 = F_{yf}$ et de sortie $y_2 = F_{yr}$.

$$\Sigma_1 \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} &= F \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} + G F_{yf} \\ F_{yr} &= C_2 \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

La matrice d'observabilité de ce système s'écrit :

$$O = \begin{pmatrix} C_2 \\ C_2 F \end{pmatrix}$$

et son déterminant est :

$$\det(O) = -D_r^2$$

La matrice est de rang 2 car la rigidité de dérive arrière D_r est non nulle dans les hypothèses de validité du modèle de véhicule linéaire. L'état du système (8) est donc observable et il est possible d'estimer l'angle de braquage par l'équation (6).

A.2 Définition de l'observateur OEI1

Pour les systèmes linéaires stationnaires, de nombreuses techniques d'observation d'état peuvent être appliquées (Filtre de Kalman, Luenberger, modes glissants, ...). Afin de pouvoir caractériser les performances de robustesse, les gains de l'observateur OEI1 seront obtenus par la résolution d'un système d'inéquations de type LMI.

L'observateur OEI1 d'ordre plein ([5] et [6]) pour le système (8) peut être formulé par :

$$obs \begin{cases} \dot{z} &= Nz + My_1 + Ly_2 \\ \hat{x} &= z \end{cases} \quad (9)$$

où $\hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{\beta} \\ \hat{\dot{\psi}} \end{pmatrix}$ est l'estimation du vecteur d'état.

N , M , L sont des matrices à déterminer de telle sorte que l'erreur d'observation soit asymptotiquement nulle.

La dynamique de l'erreur d'observation $e = x - \hat{x}$ est :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}}$$

En remplaçant x par $e + \hat{x}$ et y_2 par C_2x .

$$\dot{e} = (F - LC_2)e + (F - LC_2 - N)\hat{x} + (G - M)y_1 \quad (10)$$

L'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro si et seulement si les matrices N , M et L sont choisies de sorte que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$\begin{cases} F - LC_2 \text{ est une matrice de Hurwitz} \\ F - LC_2 - N = 0 \\ G - M = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Sous ces conditions, l'équation (10) devient alors

$$\dot{e} = (F - LC_2)e \quad (12)$$

Les paragraphes suivants présentent la détermination des matrices N , M et L vérifiant les contraintes (11).

A.2.a Détermination de la matrice M .

$G - M = 0 \implies M = G$ (G est la matrice de commande du système (8)).

A.2.b Détermination de la matrice L .

La matrice L est choisie de telle sorte que l'erreur d'observation (12) soit asymptotiquement stable.

Conformément au théorème de Lyapunov la convergence de l'observateur est garantie s'il existe une matrice symétrique définie positive X telle que la fonction de Lyapunov $V(e) = e^T X e$ ait les propriétés suivantes :

$$\forall e \neq 0 \begin{cases} V(e) > 0 \\ \dot{V}(e) < 0 \end{cases}$$

Ceci se reformule en appliquant (12) par :

$$\begin{cases} X > 0 \\ (F - LC_2)^T X + X(F - LC_2) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

En appliquant le complément de Schur [9] et en posant

$$W = XL$$

le système d'inégalités (13) s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} -X & 0 \\ 0 & F^T X + X F - (C_2^T W^T - W C_2) \end{pmatrix} < 0 \quad (14)$$

La détermination de la matrice de gain L est obtenue en deux étapes. Dans un premier temps, l'inégalité matricielle linéaire (14) par rapport aux inconnues X et W est résolue. Dans un second temps, la valeur de L est déduite en appliquant l'équation suivante :

$$L = X^{-1}W \quad (15)$$

A.2.c Détermination de la matrice N .

La matrice N est obtenue à partir de l'équation (11) :

$$F - LC_2 - N = 0 \implies N = F - LC_2$$

A.2.d En résumé.

L'observateur OEI1 permet la reconstruction simultanée, de la dérive du véhicule, de la vitesse de lacet et de l'angle de braquage (entrée inconnue) à partir des mesures d'efforts latéraux avant et arrière. Il est résumé par le système d'équations suivant :

$$OEI1 \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\hat{\beta}} \\ \dot{\hat{\psi}} \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} \hat{\beta} \\ \hat{\psi} \end{pmatrix} + M F_{yf} + L F_{yr} \\ \hat{\delta} = D_1^{-1} \left(F_{yf} - C_1 \begin{pmatrix} \hat{\beta} \\ \hat{\psi} \end{pmatrix} \right) \end{cases} \quad (16)$$

B. OEI2 : Observateur avec une seule sortie F_{yf}

B.1 Modèle de la dynamique du véhicule

L'observateur OEI2 suppose qu'une seule sortie est accessible : F_{yf} . L'objectif est toujours de reconstruire l'angle de dérive, la vitesse de lacet et l'angle de braquage. Le système Σ_2 sur lequel est construit l'observateur est différent de Σ_1 (5) par son équation d'observation.

$$\Sigma_2 \begin{cases} \dot{x} = Ax + R\delta \\ y_1 = C_1 x + D_1 \delta \end{cases} \quad (17)$$

Ce système vérifie également les hypothèses permettant la construction de l'observateur (III-A.1).

Sa matrice d'observabilité est :

$$O = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_1 A \end{pmatrix}$$

Le déterminant de cette matrice est :

$$\det(O) = D_f^2 \left(-1 + \frac{L_r D_r + L_f D_r}{M_V V_G^2} - \frac{L_f L_r^2 D_r + L_f^2 L_r D_r}{V_G^2 I_{zz}} \right)$$

et sa valeur numérique dans le cas du véhicule étudié est : $-2.0406e+010$.

La matrice est donc de rang 2. Le système (8) est donc observable. Il est donc possible de reconstruire l'angle de braquage selon l'équation (6).

B.2 Définition de l'observateur OEI2

Un observateur OEI2 d'ordre plein ([5] et [6]) pour le système (17) s'écrit :

$$obs \begin{cases} \dot{z} = Nz + Ly_1 \\ \hat{x} = z \end{cases} \quad (18)$$

où $\hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{\beta} \\ \hat{\psi} \end{pmatrix}$ est l'estimation du vecteur d'état.

N et L sont des matrices à déterminer de telle sorte que l'erreur d'estimation converge vers zéro.

Par analogie avec la section III-A.2, la dynamique de l'erreur d'observation $e = x - \hat{x}$ s'écrit comme :

$$\dot{e} = Ne + (A - LC_1 - N)x + (R - LD_1)\delta \quad (19)$$

L'erreur d'observation d'état converge asymptotiquement vers zéro si et seulement si les matrices N et L sont choisies de sorte que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$\begin{cases} N \text{ est une matrice de Hurwitz} \\ A - LC_1 - N = 0 \\ R - LD_1 = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Sous ces conditions, l'équation (19) devient alors

$$\dot{e} = Ne \quad (21)$$

B.2.a Détermination des gains de l'observateur.

La matrice D_1 étant carrée et inversible, il est possible d'exprimer L à partir de l'équation (20) :

$$L = RD_1^{-1}$$

Ce qui permet de déduire N par

$$N = A - RD_1^{-1}C$$

B.2.b En résumé.

les estimées de la dérive du véhicule, de la vitesse de lacet et de l'angle de braquage (entrée inconnue) à partir de la seule mesure de l'effort latéral avant sont données par le système d'équations suivant :

$$OEI2 \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\hat{\beta}} \\ \dot{\hat{\psi}} \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} \hat{\beta} \\ \hat{\psi} \end{pmatrix} + LF_{yf} \\ \hat{\delta} = D_1^{-1} \left(F_{yf} - C_1 \begin{pmatrix} \hat{\beta} \\ \hat{\psi} \end{pmatrix} \right) \end{cases} \quad (22)$$

IV. EVALUATIONS NUMÉRIQUES

A. Environnement d'évaluation

Les données qui servent à l'évaluation sont issues du logiciel CALLAS. Les performances de l'observateur ont été testées dans l'environnement MATLAB-SIMULINK.

Le paramétrage du modèle servant à la construction des observateurs est vérifié en utilisant un modèle bicyclette linéaire stationnaire, dont l'entrée est le braquage considéré comme connu et mesuré δ_m (23). Ce modèle sera nommé ML2 dans la suite de l'article. Les résultats de reconstruction des efforts de ce modèle sont présentés sur la figure 2, l'état du système sur les figures 3 et 4. Ils sont comparés aux données issues du simulateur.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + R\delta_m \\ \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \\ F_{yf} \\ F_{yr} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -D_f & \frac{-L_f D_f}{V_G} \\ -D_r & \frac{L_r D_r}{V_G} \\ -(D_f + D_r) & \frac{L_r D_r - L_f D_f}{V_G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \\ + (0 \ 0 \ D_f \ 0 \ D_f)^T \delta_m \end{cases} \quad (23)$$

Les résultats des observateurs OEI1 (16) et OEI2 (22) sont comparés avec les sorties du simulateur CALLAS et du modèle (23).

L'ensemble des modèles utilisent les mêmes valeurs de paramètres.

Les deux observateurs sont testés avec un essai représentatif de la dynamique latérale : le franchissement de chicane ISO. Les vitesses de 40 et 90 km/h seront pratiquées.

Les conditions initiales des états du système et des observateurs sont nulles.

B. Mesures mises à disposition des observateurs

Les efforts latéraux avant et arrière du véhicule (modèle bicyclette) sont donnés par la figure 2(a) pour l'essai à 40km/h et 2(b) pour 90km/h.

Sur ces deux figures, les sorties F_{yf} et F_{yr} du modèle (23) sont également présentées. Ces figures illustrent bien le domaine de validité de ce modèle. Dans le cadre de l'essai à 40km/h, il est très représentatif. En revanche, à 90km/h, les pneumatiques commencent à être saturés dans les zones de fortes dynamiques, le modèle est un peu moins représentatif. Dans cet essai, l'accélération latérale au centre de gravité est, au plus fort, de $5m.s^{-2}$. Il est à noter que les mêmes valeurs de rigidités de dérive (D_f et D_r) ont été utilisées pour les deux essais.

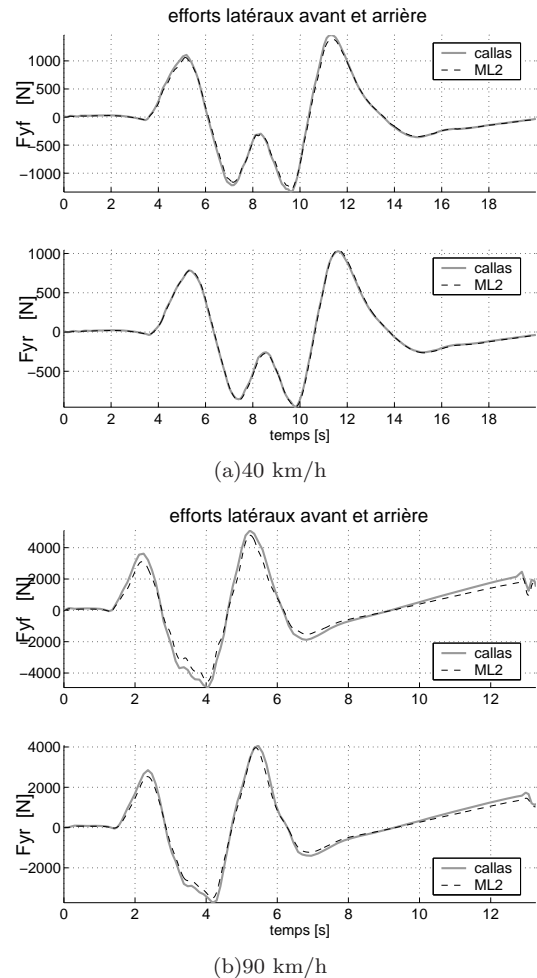


Fig. 2. Efforts latéraux avant et arrière. Le modèle (23) en boucle ouverte se comporte comme le simulateur CALLAS ; ceci d'autant mieux que la vitesse (et l'accélération centrifuge) est petite.

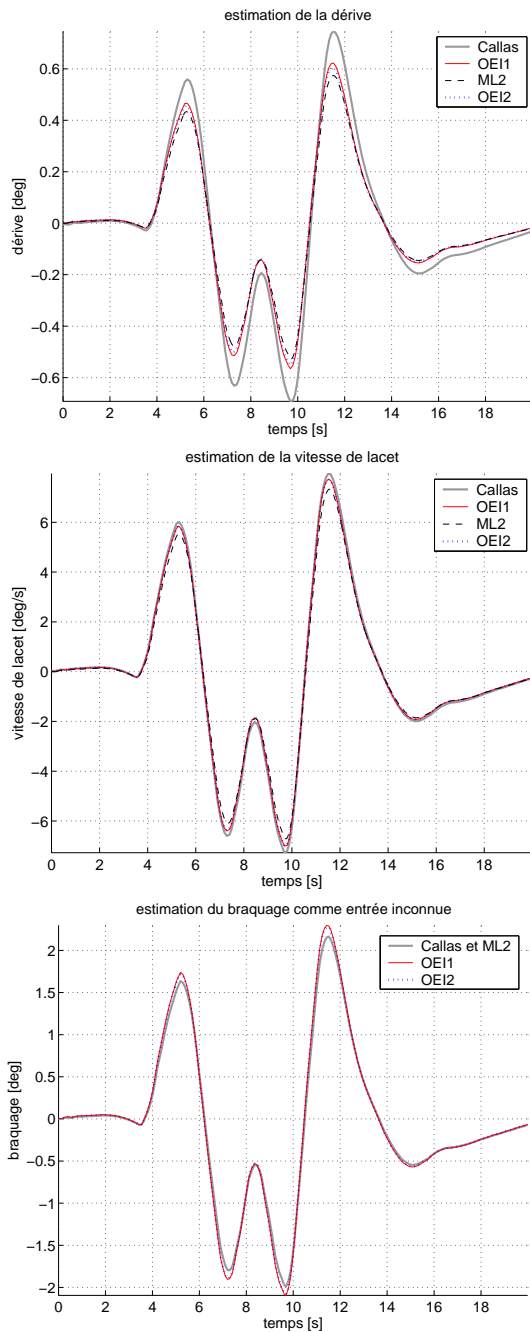


Fig. 3. Observateurs OEI1 et OEI2 : estimations de l'angle de dérive, de la vitesse de lacet et de l'angle de braquage de la roue virtuelle avant à 40km/h, comparaison aux données de simulation CALLAS et au modèle linéaire ML2. Rappelons que l'angle de braquage n'est pas mesuré mais qu'il est correctement reconstruit.

C. Chicane ISO franchie à 40km/h

Les estimées de l'angle de dérive et de la vitesse de lacet (états) délivrées par les observateurs OEI1 et OEI2 sont comparées aux valeurs issues du modèle CALLAS servant de référence. L'estimation de l'angle de braquage de la roue virtuelle avant (l'entrée inconnue) est comparée à la référence calculée par le pilote virtuel de CALLAS. L'ensemble de ces résultats est présenté sur la figure 3. Les résultats ainsi obtenus montrent clairement que les états non mesurés ainsi que l'entrée inconnue sont correctement estimés par les observateurs basés sur les mesures des efforts latéraux.

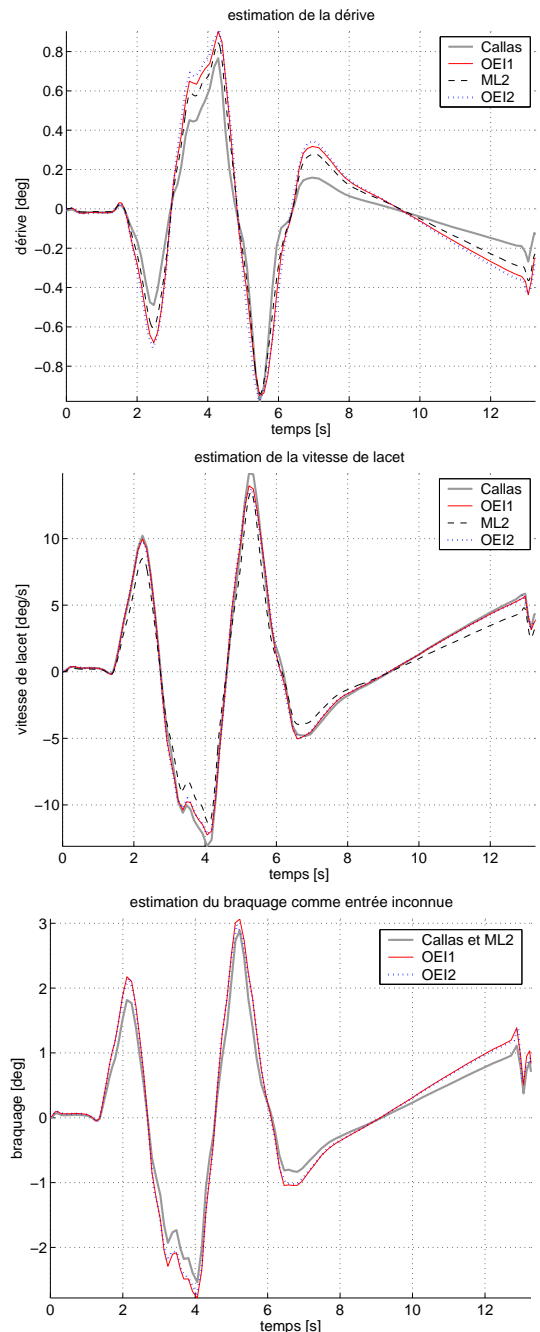


Fig. 4. Observateurs OEI1 et OEI2 : estimations de l'angle de dérive, de la vitesse de lacet et de l'angle de braquage de la roue virtuelle avant à 90km/h, comparaison aux données de simulation CALLAS et au modèle linéaire ML2. Rappelons que l'angle de braquage n'est pas mesuré et qu'il est correctement reconstruit.

Il est toutefois à noter que les observateurs d'état (et le modèle en boucle ouverte sous-jacent) sous-estiment la dérive et la vitesse de lacet. Rappelons que l'angle de braquage n'est pas mesuré mais qu'il est correctement reconstruit.

D. Chicane ISO franchie à 90km/h

Les estimations de l'angle de dérive, de la vitesse de lacet et de l'angle de braquage sont données par la figure 4.

Les résultats obtenus montrent des performances correctes des observateurs OEI1 et OEI2 au niveau de l'observation de l'angle de dérive et de la vitesse de lacet ainsi qu'au niveau de l'angle de braquage considéré comme une

entrée inconnue.

Le modèle de pneumatique utilisé et donc le modèle servant de base à la construction des observateurs est aux limites de sa représentativité. La dérive reconstruite a tendance à être surestimée par le modèle. Ces surestimations sont amplifiées par les observateurs. En revanche les performances sur la vitesse de lacet sont améliorées. La reconstruction du braquage comme entrée inconnue est correcte.

V. CONCLUSION

Cet article a montré qu'il était envisageable de substituer des mesures d'efforts au centre-roue à celles issues des capteurs d'angle au volant et de vitesse de lacet qui sont actuellement utilisées pour estimer la dérive, variable intermédiaire essentielle aux méthodes de stabilisation de trajectoire.

Il s'agit d'une étude de faisabilité puisqu'un modèle de type "bicyclette" à vitesse constante et un modèle linéaire de pneumatique ont été considérés pour caractériser la dynamique latérale. L'ensemble aboutit à un modèle linéaire stationnaire dont la validité est restreinte à un domaine où le véhicule est peu sollicité.

Néanmoins, le cadre linéaire stationnaire facilite la synthèse d'observateurs à entrée inconnue qui permettent de reconstruire les variables usuellement mesurées (vitesse de lacet, angle de braquage) et d'estimer la dérive du véhicule.

Il a été montré que ceci était possible en mesurant les efforts latéraux sur les roues avant et arrière mais aussi, seulement sur les roues avant.

La synthèse des paramètres des observateurs a été réalisée par résolution d'inéquations linéaires matricielles, ce qui permet de mener une synthèse robuste (dans un travail futur).

Les observateurs ont été testés avec des données issues du simulateur CALLAS (basé sur un modèle de connaissance détaillé). Ils seront bientôt confrontés à des données expérimentales.

Des travaux futurs considéreront le cas de véhicules à plusieurs essieux directeurs et l'extension du domaine de validité des observateurs présentés, notamment par l'intégration d'un modèle de pneumatique non linéaire.

VI. NOTATIONS

- D_f : Rigidité de dérive avant [$N.rad^{-1}$]
- D_r : Rigidité de dérive arrière [$N.rad^{-1}$]
- L_f : Distance essieu avant, centre de gravité [m]
- L_r : Distance essieu arrière, centre de gravité [m]
- I_{zz} : Inertie de lacet [$kg.m^2$]
- M_V : Masse totale du véhicule [kg]
- V_G : Norme de la vitesse du centre de gravité [$m.s^{-1}$]
- $\dot{\psi}$: Vitesse de lacet [$rad.s^{-1}$]
- F_{yf} : Effort latéral pneumatique avant repère véhicule [N]
- F_{yr} : Effort latéral pneumatique arrière repère véhicule [N]
- β : Angle de dérive du centre de gravité [rad]
- β_f : Angle de dérive de la roue avant [rad]
- β_r : Angle de dérive de la roue arrière [rad]
- δ : Angle de braquage de la roue virtuelle avant [rad]

REMERCIEMENTS

Cette étude est financièrement supportée par la région Limousin.

RÉFÉRENCES

- [1] Kwapisz, D. et Stéphant J. et Meizel D. Instrumented bearing for force and moment measurements. IEEE Sensors, Lecce, Italie, 26-29 Octobre 2008.
- [2] Toshimichi T. et Mitsuru A. et Hiroaki M. Development of tire and moment measurement system mounted on a wheel hub unit. Advanced Vehicle Control Symposium, AVEC, Tapei, Taiwan, 20-24 Août 2006.
- [3] Frayer R.W.JR. Measurement of bearings loads using dactile wire inserts. *SAE Transactions*, vol. 94, n° 4, pp. 237-243, 1985.
- [4] Segel M.L. Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control. *automobile division of the institut of mechanical engineers*, vol. 7 pp. 310-330, 1956.
- [5] Boutayeb M. et Darouach M. et Rafaralahy H. Generalized state-space observers for chaotic synchronization and secure communication. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 49, n° 3, pp. 345-349, 2002.
- [6] Liu F. Synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes non linéaires. Thèse de doctorat de l'Université de Basse-Normandie, 06 décembre 2007.
- [7] Maquin D. et Gaddouna B. et Ragot J. Estimation of unknown inputs in linear systems. American Control Conference, ACC, Baltimore, Maryland, Etats-Unis, 29 juin-01 juillet 1994.
- [8] Stotsky A. et Kolmanovsky I. Simple unknown input estimation techniques for automotive applications. American Control Conference, ACC, Arlington, VA, Etats-Unis, 25-27 juin 2001.
- [9] Boyd S. et El Ghaoui L. et Feron E. et Balakrishnan V. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. SIAM, Philadelphia, 1994.
- [10] Stéphant J. et Charara A. et Meizel D. Virtual Sensor, Application to vehicle sideslip angle and transversal forces. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, n°2, pp. 278-289, 2004.
- [11] Baffet G. et Charara A. et Lechner D. Estimation of vehicle sideslip, tire force and wheel cornering stiffness. *Control Engineering Practice*, vol. 17, n°11, pp. 1255-1264, 2009.
- [12] Doumiati M. et Victorino A. et Charara A. et Lechner D. Lateral load transfer and normal forces estimation for vehicle safety : experimental test. *Vehicle System Dynamics*, vol. 47, n°12, pp. 1511-1533, 2009.
- [13] Lechner D. et Delanne Y. et Schaefer G. et Schmitt V. Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS. *Ingénieurs de l'automobile*, n° 713, pp. 10-38, 1997.