



**HAL**  
open science

## Estimation de la dynamique latérale pour véhicules à deux roues motorisés

Dalil Ichalal, Chenane Chabane, Hichem Arioui, Said Mammar

► **To cite this version:**

Dalil Ichalal, Chenane Chabane, Hichem Arioui, Said Mammar. Estimation de la dynamique latérale pour véhicules à deux roues motorisés. CIFA 2012 Septième Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Jul 2012, Grenoble, France. pp.1-6. hal-00692567

**HAL Id: hal-00692567**

**<https://hal.science/hal-00692567v1>**

Submitted on 3 May 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Estimation de la dynamique latérale pour véhicules à deux roues motorisés

Dalil Ichalal\* Chabane Chenane\* Hichem Arioui\*  
Said Mammam\*

\* *IBISC Laboratory, Evry-Val d'Essonne University,  
40, rue de Pelvoux, Courcouronnes 91020 Evry Cedex  
e-mail : dalil.ichalal@ibisc.univ-evry.fr*

---

## Résumé

Dans ce papier, le problème de l'estimation de la dynamique latérale de véhicules à deux roues motorisés est traité. La contribution réside dans la proposition d'une approche d'estimation basée sur un observateur non-linéaire. Dans un premier temps, un modèle de type Takagi-Sugeno (T-S) est proposé en utilisant les transformations par secteurs non-linéaires. Le modèle obtenu est à variables de décision non mesurables. L'intérêt de ce type de modélisation est la minimisation des pertes d'informations qui conduisent souvent à des estimations erronées de l'état. L'estimation de la dynamique latérale est ensuite réalisée par un observateur d'état construit à partir du modèle T-S obtenu. La convergence de l'observateur est étudiée par la méthode de Lyapunov. Les conditions de stabilité obtenues sont exprimées en termes d'inégalités linéaires matricielles (LMI) dont la résolution est facilement réalisable par des outils numériques dédiés.

---

## 1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, les statistiques sur les accidents impliquant les véhicules à deux roues (moto, scooter, vélo, etc.) montrent que leurs usagers sont parmi les plus vulnérables sur la route : 1000 à 1600 tués par an depuis 20 ans. De plus, selon les dernières statistiques ONISR. [2010], Amans and Moutreuil [2005], le nombre de tués chez les motocyclistes n'a pas baissé (25% de l'ensemble des tués sur la route en 2010 contre 14% en 2001) alors que les avancées, en matière d'assistance et de sécurité, sont manifestes chez les conducteurs de voitures. Il reste que le risque d'être tué dans un accident est 20 fois plus élevé pour un motocycliste que pour un conducteur de voiture de tourisme.

Les systèmes de sécurité passifs et actifs (freinage, stabilité, etc.) représentent des progrès majeurs en termes de sécurité. Ils sont de plus en plus développés et installés sur les véhicules de tourisme contrairement aux deux roues, encore en queue de peloton. Ceci est dû en partie, aux aspects financiers qu'engendrent les véhicules de tourisme (volumes et coûts moyens plus importants) et d'autre part à la complexité dynamique (maniabilité, stabilité/équilibre, contact pneu-chaussée, etc.) des véhicules à deux roues motorisés (les motos à trois roues sont, en partie, une réelle réponse à ces problèmes).

Dans ce contexte, quelques groupes de chercheurs se sont lancés dans l'étude et la mise en place de fonctions de risque pour l'implantation d'un système de sécurité préventive pour les deux roues motorisés. Un premier groupe s'est contenté de dupliquer les travaux sur les véhicules de tourisme en rajoutant une couche cartographique (suivi par GPS) Bekiaris [2005]. Un deuxième groupe s'est orienté vers l'étude de l'impact de certains paramètres

géométriques/dynamiques (tels que la cambrure, l'angle de chasse, etc.) sur la stabilité et l'équilibre du véhicule en prise de virage (Evangelou [2008]). Nous avons aussi contribué dans ce sens en proposant plusieurs fonctions de risque dans Slimi et al. [2010], Hima et al. [2007], lors de la prise de virage, en prenant en compte : 1- la dynamique latérale de la moto (2 corps et 4 degrés de liberté), 2- le comportement du conducteur, dans sa manière de mobiliser une partie de l'adhérence et 3- l'infrastructure (dévers, pente, courbure, etc.).

Le succès de l'ensemble de ces travaux se fonde essentiellement sur la connaissance en ligne des paramètres dynamiques de la moto afin d'évaluer, de manière fine, le risque encouru. Par conséquent, les techniques d'observation utilisées doivent être capables de prendre en compte les complexités que nous avons soulignées auparavant telles que le modèle dynamique à fortes non-linéarités, l'équilibre, le contact pneu-chaussée, etc. Les premières réponses à ces problèmes d'observation/estimation commencent à émerger.

Récemment, plusieurs études ont été menées sur la structure multimodèle de type Takagi-Sugeno (T-S) introduite initialement dans Takagi and Sugeno [1985]. Elle est basée sur la décomposition du domaine de fonctionnement du système en plusieurs zones. Le comportement du système non-linéaire est représenté dans chaque zone par un modèle linéaire. En utilisant un mécanisme d'interpolation fondé sur des fonctions de pondération satisfaisant la propriété de somme convexe, le comportement global du système non-linéaire (dans un compact de l'espace d'état) est modélisé sous une forme polytopique. L'obtention d'un multimodèle peut être achevée de trois façons différentes : la première approche utilise les techniques d'identification en imposant la structure du modèle ainsi que les fonctions de

pondération et le nombre de sommets du polytope (nombre de sous-modèles). La seconde approche consiste en la linéarisation d'un modèle non-linéaire, obtenu a priori, autour d'un ensemble de points de fonctionnement judicieusement choisis. Enfin, la dernière approche consiste en une transformation mathématique, du modèle non-linéaire, conduisant ainsi à un modèle T-S équivalent (exact) i.e. sans perte d'information sur un compact de l'espace d'état. Cette manipulation mathématique est connue sous le nom de transformation par secteur non-linéaire, Tanaka and Wang [2001], Nagy et al. [2009].

Le modèle de Takagi-Sugeno a prouvé son efficacité dans l'analyse, la commande et l'observation des systèmes non-linéaires. En effet, il fournit un moyen simple du point de vue mathématique pour représenter des comportements non-linéaires, Takagi and Sugeno [1985]. Grâce à la propriété de somme convexe des fonctions de pondération, un ensemble d'outils et de méthodes développé dans le cadre des systèmes linéaires a pu être généralisé aux systèmes non-linéaires. L'intérêt de cette structure réside dans la simplicité qu'elle offre pour l'étude de la stabilité et la conception de contrôleurs et d'observateurs. Dans Chadli et al. [2002], Guerra et al. [2006], Kruszewski et al. [2008], la stabilité et la commande sont proposées. Dans Akhenak et al. [2008], Marx et al. [2007], le problème de l'estimation d'état et la conception d'observateurs pour le diagnostic est traité avec des modèles T-S. Les approches proposées ont pour objectif l'extension des observateurs classiques comme l'observateur de Luenberger Luenberger [1971] et l'observateur à entrées inconnues (UIO) Darouach et al. [1994], au domaine non-linéaire. Le conservatisme souvent mis en évidence pour ces approches a été largement étudié, on peut citer les travaux dans Sala and Ariño [2007], où le théorème de Polya est exploité afin de proposer des conditions LMIs moins conservatives. Dans Kruszewski et al. [2008], les auteurs ont proposé une approche originale de réduction du conservatisme pour les systèmes à temps discret. Elle est fondée sur le calcul des variations de la fonction de Lyapunov sur un horizon  $m > 1$  d'échantillons.

Dans ce papier, une méthode d'estimation d'état de la dynamique latérale du véhicule à deux roues est proposée. La modélisation T-S utilisée permet la prise en compte de plusieurs dynamiques non-linéaires. De plus, la vitesse longitudinale est prise en compte dans le modèle de la dynamique latérale, ce qui le rend plus proche de la réalité. Le modèle ainsi obtenu est à variables de décision non-mesurables dans le sens où les fonctions de pondération dépendent de variables d'état non mesurables. Dans la section 2, le modèle du véhicule à deux roues est présenté sous forme non-linéaire puis transformé en un modèle T-S avec l'approche secteurs non-linéaires. Le modèle obtenu est utilisé dans la section 3 afin de concevoir l'observateur estimant les états dynamiques du véhicule. Les résultats de simulation sont présentés à la section 4.

## 2. DESCRIPTION DU MODÈLE

La dynamique latérale d'un véhicule à deux roues motorisé (V2RM) est représentée par un système composé de trois équations Slimi et al. [2009], Sharp [1971.] décrivant le mouvement latéral causé essentiellement par l'effet des forces latérales des pneumatiques avant et arrière ( $F_{yf}$  et

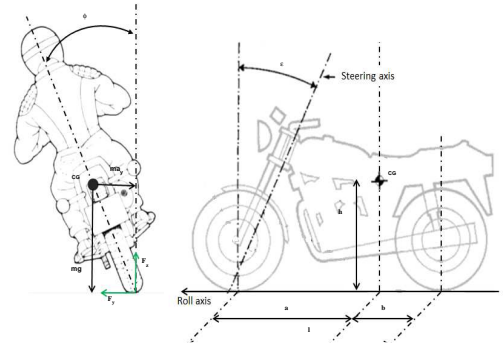


FIGURE 1. Configuration du modèle

$F_{yr}$ ), les mouvements de rotations de lacet et de roulis. L'étude de ce modèle revient à reconstruire les états dynamiques de la moto lors de la prise de virage (le cas le plus complexe de l'étude).

Ainsi, le modèle est exprimé par les équations suivantes :

– Dynamique latérale

$$M\dot{v}_y + M_f k \ddot{\psi} + (M_f j + M_r h) \ddot{\phi} + M_f e \ddot{\delta} = F_{yf} + F_{yr} \quad (1)$$

– Dynamique de roulis

$$(M_f j + M_r h) \dot{v}_y + a_1 \ddot{\phi} + a_2 \ddot{\psi} + a_3 \ddot{\delta} + a_4 v_x \dot{\psi} + a_4 v_x \dot{\delta} = \sum M_x \quad (2)$$

– Dynamique de lacet

$$M_f k (\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) + a_2 \ddot{\phi} + b_1 \ddot{\psi} + b_2 \ddot{\delta} - b_3 v_x \dot{\phi} - a_5 v_x \dot{\delta} = \sum M_z \quad (3)$$

– Dynamique de braquage

$$M_f e \dot{v}_y + a_3 \ddot{\phi} + c_1 \ddot{\psi} + c_2 \ddot{\delta} - a_5 v_x \dot{\phi} + c_3 v_x \dot{\psi} = \sum M_s \quad (4)$$

où :

$$\sum M_x = (M_f j + M_r h) g \sin(\phi) + (M_f e g - \eta F_{zf}) \sin(\delta) \quad (5)$$

$$\sum M_z = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} - \tau \cos(\varepsilon) \quad (6)$$

$$\sum M_s = (M_f e g - \eta F_{zf}) \sin(\phi) + (M_f e g - \eta F_{zf}) \sin(\varepsilon) \sin(\delta) + \tau \quad (7)$$

Les forces latérales  $F_{yf}$  et  $F_{yr}$  agissant, respectivement, sur les roues avant et arrière dépendent des angles de dérives latérales  $\alpha_f$  et  $\alpha_r$  et des angles de carrossage  $\gamma_f$  et  $\gamma_r$ , et sont données par :

$$\begin{cases} F_{yf} = -C_{f1} \alpha_f + C_{f2} \gamma_f \\ F_{yr} = -C_{r1} \alpha_r + C_{r2} \gamma_r \end{cases} \quad (8)$$

où :

$$\begin{cases} \alpha_f = \left( \frac{v_y + l_f \dot{\psi} - \eta \dot{\delta}}{v_x} \right) - \delta \cos(\varepsilon) \\ \alpha_r = \left( \frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \right) \end{cases} \quad (9)$$

et :

$$\begin{cases} \gamma_f = \phi + \delta \sin(\varepsilon) \\ \gamma_r = \phi \end{cases} \quad (10)$$

Les forces s'expriment, donc, finalement par :

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{f1} \left( \delta \cos(\varepsilon) - \frac{\dot{v}_y + l_f \dot{\psi} - \eta \dot{\delta}}{v_x} \right) + C_{f2} (\phi + \delta \sin(\varepsilon)) \\ F_{yr} = C_{r1} \left( \frac{l_r \dot{\psi} - \dot{v}_y}{v_x} \right) + C_{r2} \phi \end{cases} \quad z_1 = v_x, \quad z_2 = \frac{1}{v_x}, \quad z_3 = \frac{\sin(\phi)}{\phi}, \quad z_4 = \dot{\phi} \quad (16)$$

Dans ce travail, nous considérons une conduite normale (hors des cas limites) ce qui explique la forme linéaire des forces de contact  $F_{yf}$  et  $F_{yr}$  par rapport aux angles de dérive et aux angles de carrossage.

En remplaçant les expressions des forces dans le modèle dynamique et en choisissant pour vecteur d'état  $x(t) = [v_y \ \dot{\psi} \ \dot{\phi} \ \phi \ \dot{\delta} \ \delta]$ , le système s'écrit sous la forme :

$$E\dot{x}(t) = A(x(t))x(t) + B\tau \quad (12)$$

où  $E$  est une matrice constante et non singulière,  $B$  est une matrice constante et  $A(x)$  et une matrice non-linéaire donnée par :

$$A(x) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12}(v_x) & 0 & a_{14} & a_{15}(v_x) & a_{16} \\ a_{21} & a_{22}(v_x) & a_{23}(v_x) & a_{24} & a_{25}(v_x) & a_{26}(v_x) \\ 0 & a_{32}(v_x, \phi) & 0 & a_{34}(v_x, \phi) & a_{35}(v_x) & a_{36}(v_x) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{51}(v_x) & a_{52}(v_x) & a_{53}(v_x) & a_{54}(v_x, \phi) & a_{54}(v_x) & a_{56}(v_x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Les éléments  $a_{ij}$  de la matrice  $A(x)$  sont donnés dans l'Annexe.

### 2.1 Modélisation multimodèle de la dynamique du V2RM

*Modélisation de type Takagi-Sugeno* La technique de modélisation utilisée dans ce travail, à savoir la transformation par secteurs non-linéaires, constitue une approche intéressante dans le sens où elle permet de réécrire le modèle non linéaire initial sous la forme multimodèle de type T-S sans perte d'information. En effet, la transformation permet de réécrire le modèle de manière exacte (erreur nulle entre le modèle initial et le modèle T-S) dans un compact de l'espace d'état. Soit un modèle non-linéaire décrit par la forme :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))x(t) + g(x, u(t))u(t) \quad (13)$$

Soit  $k$  le nombre de fonctions non-linéaires présentes dans le système que l'on notera  $f_i$ ,  $i = 1, \dots, k$ . Supposons qu'il existe un compact  $C$  des variables  $x(t)$  et  $u(t)$  où les non-linéarités sont bornées. Le modèle (13) peut alors être réécrit, de façon exacte, sous la forme multimodèle suivante :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t), u(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (14)$$

où  $A_i$  et  $B_i$  sont des matrices constantes connues et  $\mu_i(\cdot)$  sont des fonctions de pondération satisfaisant la propriété de somme convexe :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t), u(t)) = 1 \\ 0 \leq \mu_i(x(t), u(t)) < 1, \quad i = 0, \dots, r \end{cases} \quad (15)$$

et  $r$  représente le nombre de sous-modèles locaux défini par  $r = 2^k$  où  $k$  est le nombre de non-linéarités dans le modèle initial (13) (pour plus de détails le lecteur peut se référer à Tanaka and Wang [2001]).

Afin de développer un multimodèle, considérons les non linéarités suivantes :

Il est important de noter que le véhicule à deux roues, contrairement au véhicule à quatre roues, n'est stable qu'à partir d'une certaine vitesse longitudinale  $v_x$ . Donc les bornes des variables de prémisses sont données par

$$\begin{cases} z_1^{\min} \leq z_1 \leq z_1^{\max} \\ z_2^{\min} \leq z_2 \leq z_2^{\max} \\ z_3^{\min} \leq z_3 \leq z_3^{\max} \\ z_4^{\min} \leq z_4 \leq z_4^{\max} \end{cases}$$

En suivant l'approche donnée dans Tanaka and Wang [2001], le modèle suivant est obtenu

$$E\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{16} \mu_i(v_x, x) \mathcal{A}_i x(t) + B\tau(t) \quad (17)$$

Compte tenu de la non-singularité de la matrice  $E$ , son inverse  $E^{-1}$  existe et permet d'écrire le modèle (17) sous la forme :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{16} \mu_i(v_x, x) \mathcal{A}_i x(t) + B\tau(t) \quad (18)$$

où  $\mathcal{A}_i = E^{-1} \mathcal{A}_i$  et  $B_i = E^{-1} B_i$ .

### 2.2 Equation de mesure

Les capteurs généralement disponibles permettent de mesurer plusieurs variables du vecteur d'état, telles que les vitesses angulaires  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\psi}$  et l'angle  $\delta$ , ce qui permet d'écrire l'équation de mesure suivante :

$$y(t) = Cx(t) \quad (19)$$

où :

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Cette équation est choisie de telle sorte à minimiser le nombre de capteurs embarqués sur le V2RM tout en garantissant la condition d'observabilité de chaque sous modèle, à savoir, les paires  $(A_i, C)$ ,  $i = 1, \dots, 16$  sont observables.

## 3. CONCEPTION DE L'OBSERVATEUR

L'objectif dans cette section est d'estimer les variables d'état non mesurées, en particulier la vitesse latérale  $\dot{y}$  et l'angle de roulis  $\phi$  qui constituent les paramètres les plus importants dans la synthèse de fonctions de risque.

### 3.1 Estimation d'état

Considérons le modèle donné par les équations (18) et (19). L'observateur estimant les variables d'état s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^{16} \mu_i(v_x, \hat{x}) (A_i \hat{x}(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t)) + B\tau(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (20)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation d'état  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$  obéit à l'équation différentielle suivante :

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^{16} \mu_i(v_x, \hat{x}) \Phi_i e(t) + \Delta(t) \quad (21)$$

où :

$$\Phi_i = A_i - L_i C \quad (22)$$

et :

$$\Delta(t) = \sum_{i=1}^{16} (\mu_i(v_x, x) - \mu_i(v_x, \hat{x})) A_i x(t) \quad (23)$$

Notons que si l'erreur d'estimation d'état  $e(t)$  converge vers zéro, le terme  $\Delta(t)$  converge également vers zéro. De plus, l'état  $x(t)$  du système est borné ce qui conduit à une perturbation  $\Delta(t)$  bornée.

### 3.2 Etude de la convergence de l'observateur

L'étude de la convergence de l'observateur est établie en utilisant la théorie de Lyapunov. Choisissons la fonction candidate de Lyapunov de la forme :

$$V(e(t)) = e^T(t) P e(t), \quad P = P^T > 0 \quad (24)$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &= \dot{e}^T(t) P e(t) + e^T(t) P \dot{e}(t) \\ &= e^T(t) \sum_{i=1}^{16} \mu_i(v_x, \hat{x}) (\Phi_i^T P + P \Phi_i) e(t) \\ &\quad + 2e^T(t) P \Delta(t) \end{aligned} \quad (25)$$

Le système est stable pour certaines vitesses longitudinale i.e.  $v_x \geq z_1^{min}$ , donc le terme  $\Delta(t)$  reste borné. La dynamique de l'erreur d'estimation d'état (21) est stable et le gain  $\mathcal{L}_2$  du transfert de  $\Delta(t)$  vers  $e(t)$  est borné par  $\gamma$  si la condition suivante est vérifiée :

$$\dot{V}(e(t)) + e^T(t) e(t) - \gamma^2 \Delta^T(t) \Delta(t) < 0 \quad (27)$$

En substituant  $\dot{V}(e(t))$  dans (27) on obtient :

$$\begin{aligned} e^T(t) \sum_{i=1}^{16} \mu_i(v_x, \hat{x}) (\Phi_i^T P + P \Phi_i + I) e(t) + 2e^T(t) P \Delta(t) \\ - \gamma^2 \Delta^T(t) \Delta(t) < 0 \end{aligned} \quad (28)$$

En définissant le vecteur augmenté  $\tilde{x}(t) = [e^T(t) \quad \Delta^T(t)]^T$ , l'inégalité (28) devient :

$$\tilde{x}^T(t) \sum_{i=1}^{16} \mu_i(v_x, \hat{x}) \begin{pmatrix} \Phi_i^T P + P \Phi_i + I & P \\ P & -\gamma^2 I \end{pmatrix} \tilde{x} < 0 \quad (29)$$

Compte tenu de la forme quadratique de (29) et de la propriété de somme convexe des fonctions de pondération  $\mu_i$ , une conditions suffisante de négativité de (29) est donnée par :

$$\begin{pmatrix} \Phi_i^T P + P \Phi_i + I & P \\ P & -\gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \quad (30)$$

$i = 1, \dots, 16$

En utilisant la définition de  $\Phi = A_i - L_i C$  et les changements de variables  $K_i = P L_i$  et  $\bar{\gamma} = \gamma^2$  on aboutit aux inégalités matricielles  $i = 1, \dots, 16$  :

$$\begin{pmatrix} A_i^T P + P A_i - C^T K_i^T - K_i C + I & P \\ P & -\bar{\gamma} I \end{pmatrix} < 0 \quad (31)$$

Si les conditions LMI (31) sont vérifiées, le système générant l'erreur d'estimation d'état (21) est stable et le transfert de  $\Delta(t)$  vers  $e(t)$  est borné par  $\gamma$ . Les gains  $L_i$  de l'observateur sont obtenus à partir de l'équation  $L_i = P^{-1} K_i$ .

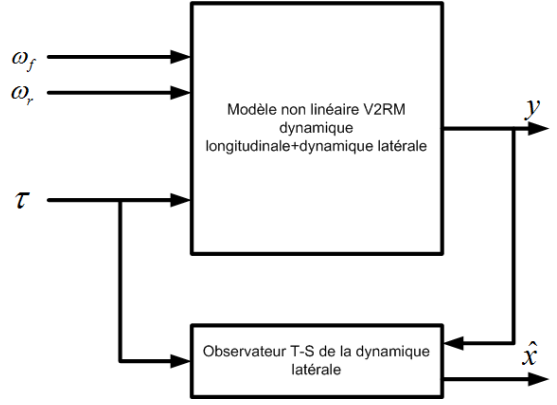


FIGURE 2. Estimation d'état de la dynamique latérale du V2RM

Afin d'améliorer les performances de l'observateur, il est possible d'introduire des conditions LMI assurant le placement des pôles de l'observateur dans une région désirée. Soit la région  $S$  du plan complexe définie par un disque de rayon  $R$  :

$$S = \{z \in \mathbb{C} / |z| < R\} \quad (32)$$

L'expression sous forme d'inégalité linéaire matricielle de cette contrainte est donnée par :

$$\begin{pmatrix} -RP & P A_i - K_i C \\ A_i^T P - C^T K_i^T & -RP \end{pmatrix} < 0, \quad i = 1, \dots, 16 \quad (33)$$

En conclusion, les gains de l'observateur assurant la stabilité de la dynamique de l'erreur d'estimation d'état, la minimisation du transfert de  $\Delta(t)$  vers  $e(t)$  et le placement des pôles de l'observateur dans la région LMI, qui est l'intersection entre le disque de rayon  $R$  et de centre  $(0, 0)$  défini en  $S$  et le demi plan gauche du plan complexe, sont obtenus en résolvant le problème d'optimisation suivant sous contraintes LMI :

$$\min_{P, K_i} \bar{\gamma} \quad \text{s.c.} (31) - (33)$$

## 4. RÉSULTATS DE SIMULATION

Le système global, non-linéaire, incluant les dynamiques longitudinale et latérale du véhicule à deux roues est utilisé. Il nécessite trois entrées : le couples  $\tau$  (voir figure 3) de direction appliqué par le conducteur sur le guidon du véhicule à deux roues et les vitesses angulaires des deux roues avant et arrière  $\omega_f$  et  $\omega_r$ . L'observateur estimant la dynamique latérale utilise uniquement le couple de direction  $\tau$  et les sorties  $\dot{\psi}$ ,  $\dot{\phi}$  fournies par la centrale inertielle ainsi que  $d\delta$  et  $\delta$  obtenues à partir d'un codeur approprié. Le schéma de l'estimation d'état est donné sur la figure 2. Les gains  $L_i$  de l'observateur ont été calculés par la résolution du problème d'optimisation sous contraintes LMIs proposées dans (31)-(33) en plaçant les pôles dans un disque de rayon  $R = 1000$ . Le taux d'atténuation, obtenu, du terme  $\Delta(t)$  est  $\gamma = 2.6119$ . Les conditions initiales du systèmes sont  $x(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$  et celles de l'observateur sont  $\hat{x}(0) = [1 \ 1 \ 0.1 \ 1 \ 0 \ 0.1]^T$ . La manœuvre réalisée consiste en un changement de voie et qui est décrite par un couple conducteur illustré sur la figure 3.

La figure 5 présente les états réels du système ainsi que les états estimés par l'observateur. Les erreurs d'estimation d'état sont données sur la figure 4

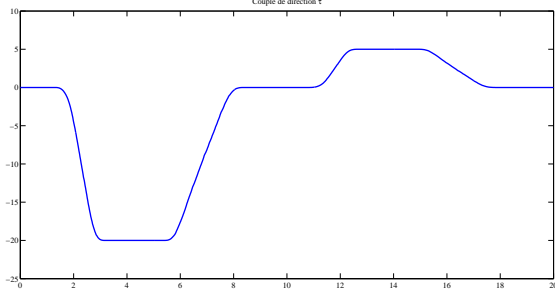


FIGURE 3. Couple de direction appliqué au guidon du V2RM

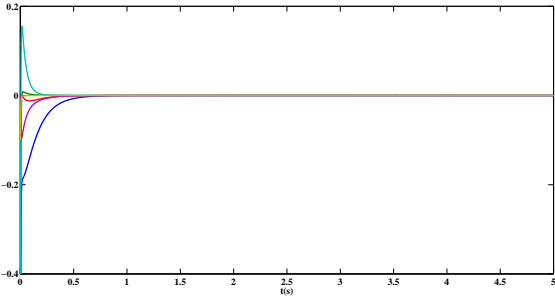


FIGURE 4. Erreurs d'estimation d'état

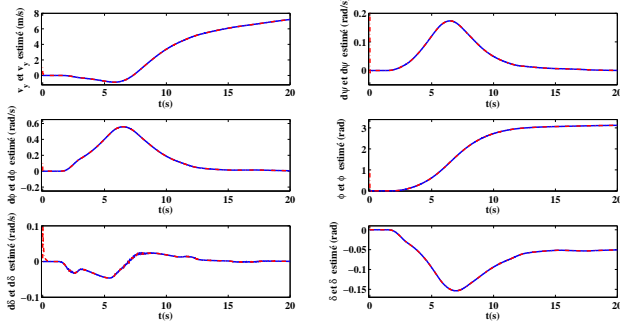


FIGURE 5. Etats du système et leurs estimées

Une seconde simulation a été réalisée avec les mêmes paramètres et gains que le cas précédent. Les mesures sont considérées bruitées comme le montre la figure 6. Les estimations des états dynamiques du V2RM sont présentées sur la figure 7. Les résultats obtenus sont satisfaisant dans le sens où les états importants pour la suite de ce travail sont la vitesse latérale  $v_y$  et l'angle de roulis  $\phi$  qui sont très bien estimés même en présence de bruit de mesure.

## 5. CONCLUSION

Dans ce papier, la technique multimodèle de conception d'observateurs est exploitée afin d'observer les états dynamiques d'un véhicule à deux roues motorisé. Le modèle non-linéaire de la dynamique latérale est transformé sous forme d'un modèle T-S. Les variables intervenant dans les fonctions de pondération sont partiellement mesurables. L'observateur proposé utilise alors les états estimés dans les fonctions d'activation. La convergence de l'erreur

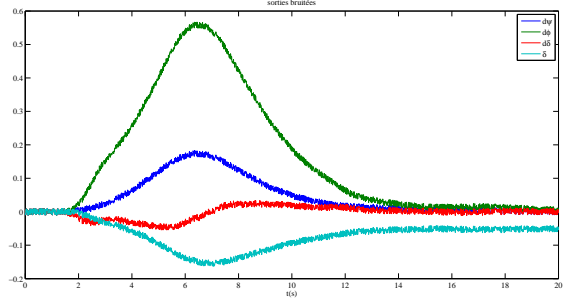


FIGURE 6. Sorties du système en présence de bruit de mesure

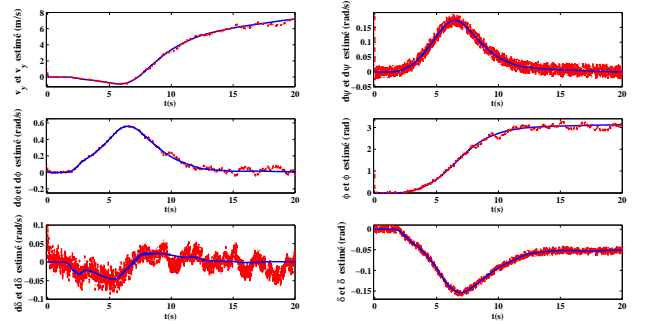


FIGURE 7. Etats estimés du véhicule en présence de bruit de mesure

d'estimation d'état est étudiée par la théorie de Lyapunov conduisant à des conditions de stabilité formulées en termes de LMI. La contribution de ce travail est double : d'une part, la conception d'observateur pour le véhicule à deux roues motorisé, considéré comme étant un système fortement non-linéaire et peu étudié, d'autre part, la prise en compte d'un certain nombre de non-linéarités visant à améliorer les résultats d'estimation d'état par rapport aux approches linéaires. De plus, la vitesse longitudinale est considérée variable ce qui est plus réaliste. La formulation du modèle sous forme T-S a pour objectif de fournir une structure facilement exploitable du point de vue mathématique. Les travaux futurs concerneront l'amélioration de l'observateur en prenant en compte des dynamiques négligées et la synthèse de fonctions de risques visant à alerter le conducteur des situations critiques.

## 6. ANNEXE

$$a_{11} = -C_{f1} - C_{r1} \quad (34)$$

$$a_{12}(v_x) = \frac{1}{v_x} (-C_{f1}L_f + C_{r1}L_r) - Mv_x \quad (35)$$

$$a_{14} = C_{f2} + C_{r2}, \quad a_{15}(v_x) = \frac{1}{v_x} \eta C_{f1} \quad (36)$$

$$a_{16} = C_{f1} \cos(\varepsilon) + C_{f2} \sin(\varepsilon) \quad (37)$$

$$a_{21} = -C_{f1}L_f + C_{r1}L_r, \quad a_{24} = C_{f2}L_f - C_{r2}L_r \quad (38)$$

$$a_{22}(v_x) = \frac{1}{v_x} (-C_{f1}L_f^2 - C_{r1}L_r^2) - M_f k v_x \quad (39)$$

$$a_{23}(v_x) = \left( \left( \frac{i_{fy}}{R_f} \right) + \left( \frac{i_{ry}}{R_r} \right) \right) v_x \quad (40)$$

$$a_{25}(v_x) = \frac{1}{v_x} \eta L_f C_{f1} + \left( \frac{i_{fy}}{R_f} \right) \sin(\varepsilon) v_x \quad (41)$$

$$a_{26} = L_f C_{f1} \cos(\varepsilon) + L_f C_{f2} \sin(\varepsilon) \quad (42)$$

$$a_{32}(v_x, \dot{\phi}) = -\frac{1}{v_x} \left( M_f j + M_r h + \left( \frac{i_{fy}}{R_f} \right) + \left( \frac{i_{ry}}{R_r} \right) \right) + (M_f j^2 + M_r h^2 + I_{fy} + I_{ry} - I_{rz} - I_{fz} \cos(\varepsilon)^2 - I_{fy} \sin(\varepsilon)^2) \dot{\phi} \quad (43)$$

$$a_{34}(\phi) = (M_f j + M_r h) g \frac{\sin(\phi)}{\phi} \quad (44)$$

$$a_{35}(v_x) = \left( \frac{i_{fy}}{R_f} \right) \cos(\varepsilon) v_x, \quad a_{36} = M_f e g - \eta F_{zf} \quad (45)$$

$$a_{51}(v_x) = \frac{1}{v_x} \eta C_{f1}, \quad a_{53}(v_x) = \left( \frac{i_{fy}}{R_f} \right) \cos(\varepsilon) v_x \quad (46)$$

$$a_{52}(v_x) = \frac{1}{v_x} \eta L_f C_{f1} - v_x (M_f e) \left( \frac{i_{fy}}{R_f} \right) \sin(\varepsilon) \quad (47)$$

$$a_{54}(\phi) = (M_f e g - \eta F_{zf}) \frac{\sin(\phi)}{\phi} - \eta C_{f2} \quad (48)$$

$$a_{55}(v_x) = \frac{\eta^2 C_{f1}}{v_x} \quad (49)$$

$$a_{56} = -\eta C_{f1} \cos(\varepsilon) - \eta C_{f2} \sin(\varepsilon) + (M_f e g - \eta F_{zf}) \sin(\varepsilon) \quad (50)$$

## 7. ANNEXE

$M_f$	masse du corps avant
$M_r$	masse du corps arrière
$j$	distance entre le centre de gravité du corps avant et sol
$k$	distance entre les centres de gravité de chaque corps
$L_f$	distance entre le centre de gravité et la roue avant
$L_r$	distance entre le centre de gravité et la roue arrière
$e$	distance entre la fourche et le centre de gravité
$h$	hauteur du centre de gravité
$\varepsilon$	inclinaison de la fourche
$i_{fy}$	inertie de la roue avant par rapport à l'axe (OY)
$i_{ry}$	inertie de la roue arrière par rapport à l'axe (OY)
$I_{fy}$	inertie de la roue avant par rapport à l'axe (OY)
$I_{ry}$	inertie de la roue arrière par rapport à l'axe (OY)
$I_{rz}$	inertie de la roue arrière par rapport à l'axe (OZ)
$I_{fz}$	inertie de la roue avant par rapport à l'axe (OZ)
$R_f$	rayon de la roue avant
$R_r$	rayon de la roue arrière
$g$	force de gravité
$M$	masse totale du V2RM $M = M_f + M_r$
$C_{f1}$	raideur latérale du pneu avant
$C_{f2}$	raideur de carrossage du pneu avant
$C_{r1}$	raideur latérale du pneu arrière
$C_{r2}$	raideur de carrossage du pneu arrière
$\eta$	chasse pneumatique

## RÉFÉRENCES

Akhenak, A., Chadli, M., Ragot, J., and Maquin, D. (2008). Fault detection and isolation using sliding mode observer for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy model. In *16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre*. Ajaccio, France.

Amans, B. and Moutreuil, M. (2005). Recherche sur les accidents impliquant un deux roues motorisé,. Technical

report, Projet RIDER. rapport final n° RIDER200503-10.

Bekiaris, E. (2005). Saferider project. In *Final Report n° RIDER200503-10, French National Agency of Reaserch*. E-U.

Chadli, M., Maquin, D., and Ragot, J. (2002). Non quadratic stability analysis of Takagi-Sugeno systems. In *IEEE Conference on Decision and Control, CDC'2002*. Las Vegas, Nevada, USA.

Darouach, M., Zasadzinski, M., and Xu, S. (1994). Full-order observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(3), 606–609.

Evangelou, S. (2008). Influence of road camber on motor-cycle stability. volume 75, 231–236.

Guerra, T.M., Kruszewski, A., Vermeiren, L., and Tirmant, H. (2006). Conditions of output stabilization for nonlinear models in the Takagi-Sugeno's form. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(9), 1248–1259.

Hima, S., Nehaoua, L., Seguy, N., and Arioui, H. (2007). Motorcycle dynamic model synthesis for two wheeled driving simulator. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*.

Kruszewski, A., Wang, R., and Guerra, T. (2008). Non-quadratic stabilization conditions for a class of uncertain nonlinear discrete time TS fuzzy models : A new approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53(2), 606 – 611.

Luenberger, D. (1971). An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 16, 596–602.

Marx, B., Koenig, D., and Ragot, J. (2007). Design of observers for takagi sugeno descriptor systems with unknown inputs and application to fault diagnosis. *IET Control Theory and Application*, 1, 1487–1495.

Nagy, A., Mourot, G., Marx, B., Schutz, G., and Ragot, J. (2009). Model structure simplification of a biological reactor. In *15th IFAC Symposium on System Identification, SYSID'09*. Saint Malo, France.

ONISR. (2010). caractéristiques et causes des accidents de la route. Technical report, Les grandes données de l'accidentologie 2010,.

Sala, A. and Ariño, C. (2007). Asymptotically necessary and sufficient conditions for stability and performance in fuzzy control : Applications of Polya's theorem. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(24), 2671–2686.

Sharp, R. (1971.). The stability and control of motor-cycles. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 13, 316–329,.

Slimi, H., Arioui, H., Nouveliere, L., and Mammar, S. (2009). Advanced motorcycle-infrastructure-driver roll angle profile for loss control prevention. In *12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, St. Louis, Missouri, U.S.A.,*

Slimi, H., Arioui, H., Nouveliere, L., and Mammar, S. (2010). 'motorcycle speed profile in cornering situation. In *American Control Conference (ACC)*.

Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, 116–132.

Tanaka, K. and Wang, H. (2001). *Fuzzy Control Systems Design and Analysis : A Linear Matrix Inequality Approach*. John Wiley and Sons.