

Observateur robuste pour l'estimation de la courbure de la route : Application à la détection de sorties de route des véhicules

H. DAHMANI¹, M. CHADLI¹, A. RABHI¹, A. EL HAJJAJI¹

¹Laboratoire Modélisation, Information et Systèmes, UPJV-MIS (EA4290)

7, Rue du Moulin Neuf, 80000 Amiens, France.

(*hamid.dahmani, mohammed.chadli, abdelhamid.rabhi, ahmed.hajjaji*)@u-picardie.fr

Résumé— Dans cette communication, une méthode de détection de sorties de route est proposée. L'idée est d'estimer la courbure de la route et la comparer ensuite à celle de la trajectoire suivie par le véhicule. L'algorithme proposé pour calculer l'indicateur de risque intègre les corrections du conducteur en tenant compte de la dynamique du braquage. Le modèle utilisé provient de la dynamique latérale du véhicule couplé à un système de vision équipé d'une caméra frontale détectant la ligne blanche de la voie. Afin de tenir compte du comportement non linéaire du véhicule, des variations de ses paramètres et des perturbations du vent, un modèle incertain de type TS (Takagi-Sugeno) avec perturbations externes est développé. Un observateur de type TS avec rejet de perturbations est synthétisé en utilisant le formalisme LMI (Inégalités Matricielles Linéaires). Les résultats de simulation montrent la robustesse de l'observateur synthétisé et l'efficacité de la méthode proposée à détecter les sorties de route à travers deux scénarios de conduite.

Mots-clés— Dynamique latérale du véhicule, modèle Takagi-Sugeno, aide à la conduite, sorties de route, observateurs, LMI.

I. INTRODUCTION

Les accidents par sorties de voie dans les virages représentent approximativement 30% de l'accidentologie générale en France et provoquent 40% des tués d'après une étude du Centre Européen d'Études de Sécurité et d'Analyse des Risques (CEESAR, France) publiée dans [1]. Ceci amène constructeurs, équipementiers et organismes de recherche à développer des systèmes d'aide à la conduite pour éviter ce genre d'accident.

Durant cette dernière décennie, différents systèmes ont été proposés avec des niveaux d'assistance allant d'une simple émission d'alerte jusqu'à la correction de trajectoire, en passant par la limitation des actions du conducteur [2][3]. Quelle que soit l'assistance apportée, la première étape consiste en l'évaluation et le calcul d'un indicateur de risque. Par exemple le DLC (distance à sortie de voie) et le TLC (temps à sortie de voie) sont deux indicateurs de risque qui ont été largement étudiés ces dernières années [3][4]. Nous présentons ici une autre approche pour caractériser le risque de sorties de route. Elle se base sur la comparaison de la courbure estimée de la route à celle de la trajectoire suivie par le véhicule.

L'estimation de la dynamique du véhicule et des attributs de la route sont d'une très grande importance dans les

systèmes d'aide à la conduite. Particulièrement les systèmes de détection de sorties de route nécessitent la connaissance a priori des états de la dynamique latérale du véhicule dont la mesure avec précision est très délicate voir impossible même avec des capteurs coûteux [5][6]. Le modèle utilisé dans ce présent travail se base sur la mesure anticipée du déplacement latéral à l'aide d'une caméra détectant la ligne blanche de la voie.

Afin de prendre en compte le comportement non linéaire de la dynamique du véhicule, la représentation floue de type Takagi-Sugeno (TS) est utilisée [7]. De nombreux travaux ont été proposés pour étudier la stabilité, la stabilisation et l'estimation d'état de ce type de représentation, pour plus de détails voir [8]-[11]. Pour prendre en compte les variations paramétriques du véhicule, des incertitudes ont été rajoutées. Le modèle étudié tient compte également des perturbations externes.

Ce travail est organisé comme suit : dans la section 2, nous présentons le modèle du véhicule utilisé et sa représentation par un modèle flou incertain de type TS. Ensuite, la synthèse de l'observateur qui lui est associé et les conditions sous forme de LMI qui garantissent les performances désirées en rejet de perturbations sont proposées dans la section 3. La section 4 est consacrée à l'algorithme proposé pour le calcul de l'indicateur de risque et la détection des sorties de route. Dans la deuxième partie de la section 4 des résultats de simulations sont proposées pour montrer la convergence de l'observateur et la qualité de l'estimation de la courbure de la route. Et à travers deux scénarios de conduite l'algorithme proposé est testé pour la détection de sorties de route.

II. MODÉLISATION DU VÉHICULE DANS UN VIRAGE

Le modèle utilisé dans cet article décrit la dynamique latérale du véhicule dans un virage soumis à des perturbation du vent [13]. Il est obtenu à partir du modèle bicyclette et des équations issues du système de vision.

A. Modèle bicyclette

En virage le modèle bicyclette dérive/lacet (figure 1) est une représentation largement utilisé pour décrire le comportement de la dynamique latérale du véhicule. Il peut être obtenu en considérant des angles petits, une vitesse longitudinale constante et en négligeant les mouvements de roulis et de tangage. Les équations du mouvement sont

Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet "SEDVAC" financé par le "Conseil Régional de Picardie".

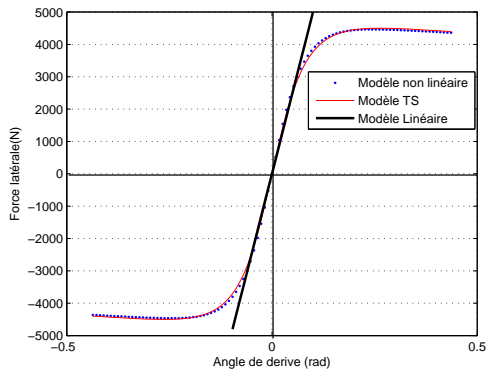


Fig. 2. La force latérale avant

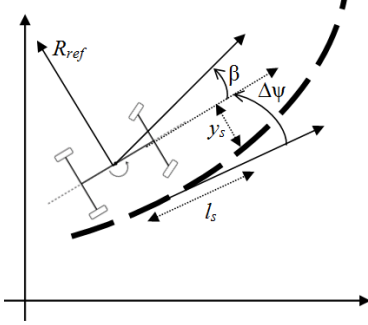


Fig. 3. Le véhicule dans le repère lié à la route

latéral du véhicule par rapport à la bordure de la voie mesurée à une distance l_s du centre de gravité du véhicule. Sa dynamique peut s'écrire comme suit :

$$\dot{y}_s = v(\beta + \Delta\psi) + l_s\Delta\dot{\psi} \quad (7)$$

$\Delta\psi$ étant l'angle de lacet relatif donné par l'équation suivante :

$$\Delta\dot{\psi} = \dot{\psi} - \frac{v}{R_c} = \dot{\psi} - vw \quad (8)$$

avec $w = \frac{1}{R_c}$ est la courbure de la route de rayon R_c . En intégrant les équations (7) et (8) dans le modèle (6), le modèle complet s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|)(A_i x(t) + B_i u(t)) + B_w w(t) + B_f f_w(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (9)$$

avec

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{11i} & a_{12i} & 0 & 0 \\ a_{21i} & a_{22i} & 0 & 0 \\ v & l_s & 0 & v \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} b_{1i} \\ b_{2i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_s v \\ -v \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_{zz}} \frac{\eta v}{l_w} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Afin de tenir compte des variations de l'adhérence, de la masse du véhicule et des erreurs de modélisation, des incertitudes sont rajoutées dans la matrice d'état du modèle. Le modèle TS incertain est décrit par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|) ((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t)) + B_w w(t) + B_f f_w(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (10)$$

Les incertitudes $\Delta A_i(t)$ et $\Delta B_i(t)$ sont supposées bornées, $\|\Delta A_i\| < \rho_i, \|\Delta B_i\| < \nu_i$ avec ρ_i et ν_i des scalaires positifs.

III. SYNTHÈSE DE L'OBSERVATEUR ET ESTIMATION DE LA COURBURE DE LA ROUTE

Cette section aborde la synthèse d'un observateur d'état complet pour reconstruire les états du modèle incertain et perturbé décrit par les équations (10) à partir de la mesure de l'entrée et de la sortie du système. La courbure de la route est considérée comme une entrée inconnue qui sera ensuite estimée à partir des états reconstruits. La structure de l'ensemble modèle-observateur-estimateur est donnée par la figure 4.

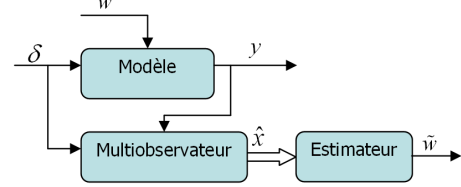


Fig. 4. Structure de l'observateur

L'observateur proposé est de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|)(A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i(y(t) - C\hat{x}(t)) + \eta_i(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (11)$$

où $\hat{x}(t)$ est le vecteur d'état reconstruit, $\hat{y}(t)$ est la sortie de l'observateur. La synthèse de l'observateur consiste à déterminer les paramètres $\eta_i(t)$ et L_i qui assurent la convergence de l'erreur d'estimation donnée par :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (12)$$

Définissons l'erreur d'estimation de sortie :

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) = C(x(t) - \hat{x}(t)) = Ce(t) \quad (13)$$

La dynamique de l'erreur est donnée par :

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|) (\overline{A}_i e(t) + \Delta A_i x(t) + \overline{B}_w \overline{w}(t) - \eta_i(t)) \quad (14)$$

$$\text{Où } \overline{A}_i = A_i - L_i C, \quad \overline{B}_w = [B_w \ B_f \ I]$$

$$\overline{w}(t) = [w(t) \ f(t) \ b(t)]^T \quad \text{et} \quad b(t) = \sum_{i=1}^2 \mu_i \Delta B^T \delta(t)$$

Afin d'estimer correctement l'état du système en présence du terme inconnu $\overline{w}(t)$ et des incertitudes du modèle, les gains de l'observateur L_i et les variables $\eta_i(t)$ doivent garantir les conditions suivantes : *i*) Assurer la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation en présence des incertitudes et *ii*) garantir que l'erreur d'estimation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ vérifie

$$\sup \frac{\|e(t)\|_2}{\|\overline{w}(t)\|_2} < \gamma, \quad \|\overline{w}(t)\|_2^2 = \int_0^\infty \overline{w}(t)^T \overline{w}(t) dt \neq 0 \quad (15)$$

pour des conditions initiales nulles, où $\gamma > 0$ est le niveau d'atténuation H_∞ entre $\overline{w}(t)$ et $e(t)$.

A. Conditions de convergence de l'observateur

Notre objectif est de déterminer les valeurs des termes $\eta_i(t)$ et des gains L_i de l'observateur (11) afin d'assurer la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation et d'atténuer l'effet des incertitudes et des perturbations $\bar{w}(t)$ sur l'erreur $e(t)$.

Théorème 1 : L'erreur d'estimation d'état $e(t)$ (14) converge asymptotiquement vers zéro et satisfait le critère d'atténuation H_∞ suivant :

$$J_{e\bar{w}} = \int_0^\infty (e(t)^T e(t) - \gamma^2 \bar{w}(t)^T \bar{w}(t)) dt < 0, \quad (16)$$

s'il existe une matrice symétrique définie positive X , des matrices N_i et des scalaires positifs β_0 et β_1 vérifiant les LMI suivantes pour $i = 1, 2$:

$$\begin{bmatrix} \Omega_i & X\bar{B}_w & X \\ \bar{B}_w^T X & -\gamma^2 I & 0 \\ X & 0 & -\beta_1 I \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

avec $\Omega_i = A_i^T X + X A_i + N_i C + C^T N_i^T + \beta_0 \rho_i^2 I$. Les gains de l'observateur (11) sont définis par

$$L_i = X^{-1} N_i \quad (18)$$

$$\begin{cases} \eta_i(t) = 0 & \text{si } r = 0 \\ \eta_i(t) = \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - \beta_0}\right) \rho_i^2 \frac{\hat{x}(t)^T \hat{x}(t)}{2r(t)^T r(t)} X^{-1} C^T r(t) & \text{si non} \end{cases} \quad (19)$$

Preuve : La démonstration de la convergence asymptotique de l'observateur emploie le lemme suivant :

Lemme 1 : Pour toutes matrices X et Y de dimensions appropriées, la propriété suivante est vérifiée :

$$X^T Y + Y^T X \leq \beta X^T X + \beta^{-1} Y^T Y \quad \text{avec } \beta > 0$$

Afin de satisfaire la condition (16), il suffit de montrer que $J_\infty = \dot{V}(e) + e(t)^T e(t) - \gamma^2 \bar{w}(t)^T \bar{w}(t) < 0$, avec $V(e)$ est une fonction de Lyapunov définie par $V(e) = e(t)^T X e(t)$, $X > 0$ et $\dot{V}(e)$ la dérivée par rapport au temps de $V(e)$ le long de la trajectoire de (14). En effet

$$J_\infty = \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|) (e^T (\bar{A}_i^T X + X \bar{A}_i) e + x^T \Delta A_i^T X e + e^T X \Delta A_i x - 2\eta_i^T X e + 2e^T \bar{B}_w \bar{w}) + e^T e - \gamma^2 \bar{w}^T \bar{w} \quad (20)$$

En utilisant le lemme 1 et l'expression de l'erreur d'estimation donnée par (13), nous obtenons l'inégalité suivante

$$J_\infty \leq \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|) (e^T (\bar{A}_i^T X + X \bar{A}_i + \beta_1^{-1} X^2) e - 2\eta_i^T X e + \beta_1 \rho_i^2 (\hat{x}^T \hat{x} + e^T e) + \beta_1 \rho_i^2 (\hat{x}^T e + e^T \hat{x}) + 2e^T \bar{B}_w \bar{w}) + e^T e - \gamma^2 \bar{w}^T \bar{w} \quad (21)$$

En utilisant encore une fois, le lemme 1 l'inégalité (21) devient

$$J_\infty \leq \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|) (e^T (\bar{A}_i^T X + X \bar{A}_i + \beta_1^{-1} X^2 + \beta_0 \rho_i^2 I) e - 2\eta_i^T X e + \beta_1 (1 + \beta_2) \rho_i^2 \hat{x}^T \hat{x} + 2e^T \bar{B}_w \bar{w}) + e^T e - \gamma^2 \bar{w}^T \bar{w} \quad (22)$$

avec $\beta_0 = \beta_1 (1 + \beta_2^{-1})$. En remplaçant les termes η_i par leurs expressions données par (19), on a :

$$-2\eta_i^T X e = \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - \beta_0}\right) \rho_i^2 \frac{\hat{x}^T \hat{x}}{r^T r} r^T C X^{-1} X e = \beta_1 (1 + \beta_2) \rho_i^2 \hat{x}^T \hat{x} \quad (23)$$

Après simplification l'inégalité (22) peut s'écrire sous la forme

$$J_\infty \leq \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|) (e^T (\bar{A}_i^T X + X \bar{A}_i + \beta_1^{-1} X^2 + \beta_0 \rho_i^2 I) e + 2e^T \bar{B}_w \bar{w}) + e^T e - \gamma^2 \bar{w}^T \bar{w} \quad (24)$$

Que l'on peut réécrire par

$$J_\infty \leq \sum_{i=1}^2 \mu_i(|\alpha_f|) \left(\begin{bmatrix} e^T \\ \bar{w}^T \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \bar{A}_i^T X + X \bar{A}_i + \beta_1^{-1} X^2 + \beta_0 \rho_i^2 I + I & X \bar{B}_w \\ \bar{B}_w^T X & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \bar{w} \end{bmatrix} \right) \quad (25)$$

En effet l'inégalité (17) permet, en utilisant le lemme de Schur, de garantir la négativité de J_∞ , i.e. $J_\infty < 0$ et par conséquent le critère H_∞ (16) est satisfait.

IV. APPLICATION À LA DÉTECTION DE SORTIES DE ROUTE

A. Estimation de la courbure de la route et celle de la trajectoire suivie par le véhicule

Une fois les états du système sont reconstruits, ils sont utilisés pour estimer la courbure de la route. L'équation (8) donne :

$$\bar{w} = \frac{1}{v} \dot{\psi} - \frac{1}{v} \Delta \dot{\psi} \quad (26)$$

Où v est la vitesse du véhicule, $\dot{\psi}$ et $\Delta \dot{\psi}$ sont les variables d'état estimées par l'observateur.

Une fois que la courbure de la route est estimée, elle peut être comparée à la courbure de la trajectoire du véhicule afin de détecter les éventuelles sorties de route. Cette dernière est déduite à partir de l'angle de braquage donné par la solution en régime statique du modèle (6) [6] :

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta} = \frac{v}{l - \frac{mv^2(l_f C_f - l_r C_r)}{l C_f C_r}} \quad (27)$$

où $l = l_f + l_r$.

D'autre part nous avons $R_v \dot{\psi} = v$ et $w_v = 1/R_v$. L'équation (27) donne :

$$w_v = \frac{1}{R_v} = \frac{\delta}{l - \frac{mv^2(l_f C_f - l_r C_r)}{l C_f C_r}} \quad (28)$$

B. Calcul des indicateurs de risque de sorties de route

Les indicateurs de risque pour la sortie de route étudiés ces dernières années tel que le TLC, présentent des inconvénients vis à vis du temps nécessaire à leur calcul et nécessitent des informations géométriques précises de la route [3]. Ils sont aussi calculés sans prendre en compte

la dynamique du véhicule et n'intègrent donc pas les corrections du conducteur par exemple. Le premier indicateur de risque (r_1) utilisé ici est la différence instantanée entre la courbure de la route \hat{w} obtenue par l'équation (26) et la courbure de la trajectoire du véhicule w_v donnée par l'équation (28)[16].

Pour réduire les fausses détections et les non détections d'une sortie de route, nous devons tenir compte de la dynamique du braquage du conducteur $\dot{\delta}$, cela nous permettra d'éviter les fausses détections quand le conducteur est déjà en train de corriger sa trajectoire. Nous définissons alors un second indicateur de risque r_2 . Dès que r_1 dépasse le seuil prédéfini r_{Thres} , si le conducteur est en train de corriger sa trajectoire ($\frac{\dot{\delta}}{r_1} > \epsilon$), l'indicateur de risque r_2 donné par :

$$r_2 = \frac{\tilde{w} - w_v}{\dot{w}_v} \quad (29)$$

est calculé. Ce dernier définit le temps nécessaire à la correction afin que la trajectoire du véhicule rejoigne celle de la route. La sortie de route est alors détectée dès que ce temps dépasse le seuil r_{Thres2} , pour une conduite idéale ce temps doit être nul à tout instant. Cette méthode peut s'avérer très efficace pour détecter les sorties dues aux fausses manoeuvres ou à l'endormissement du conducteur, L'algorithme donné par la figure 5 présente les différentes étapes de détection.

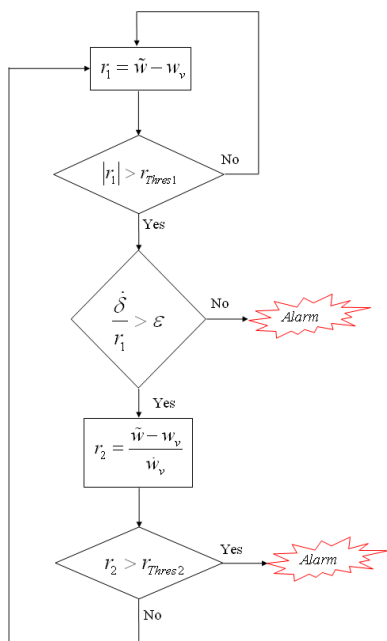


Fig. 5. algorithme de détection de sorties de route

C. Résultats de simulation

Dans cette section nous présentons les résultats de simulation pour tester les différentes techniques utilisées.

Considérons un exemple de double virage donné par la figure 6, les hypothèses suivantes sont considérées :

Hypothèse A1 : Chaque virage est à courbure constante.

Hypothèse A2 : La courbure de la route est nulle pour une ligne droite.

Hypothèse A3 : Le véhicule roule à une vitesse constante ou à faibles variations.

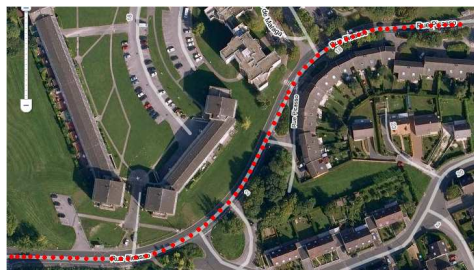


Fig. 6. Exemple de double virage

Sous les hypothèses $A1 \sim A3$, le double virage considéré peut être représenté par un signal donnant la courbure instantanée de la route (première courbe de la figure 7). Ce signal est pris comme une entrée inconnue dans le modèle est sera reconstitué à partir des résultats de l'observateur.

Les incertitudes de modélisation sont $\Delta A_i(t) = \pm 10\% A_i(t) = 0.1 A_i \eta(t)$, $\Delta B_i(t) = \pm 10\% B_i(t) = 0.1 B_i \eta(t)$. La fonction $\eta(t)$ est une fonction aléatoire avec une moyenne nulle et une variance unitaire. Les perturbations du vent sont $f_w = 300N$ et agissent à une distance $l_w = 0.8m$ du centre de gravité du véhicule. Pour un taux d'atténuation $\gamma = 0.168$, les conditions de synthèse (17) sont faisables et donnent :

$$X = \begin{bmatrix} 962 & -194 & -32 & 323 \\ -194 & 1713 & 18 & -183 \\ -32 & 18 & 6 & -63 \\ 323 & 183 & -63 & 639 \end{bmatrix}$$

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 & 1167.8 & 116.6 \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 & 1167.5 & 116.6 \end{bmatrix}$$

$$\beta_1 = 20905, \quad \beta_0 = 28900$$

Le système (10) est simulé avec le braquage des roues $\delta(t)$ comme entrée et la courbure de la route $w(t)$ comme une entrée inconnue, les deux entrées sont illustrées par la figure 7.

Les variables d'états du modèle estimés par l'observateur

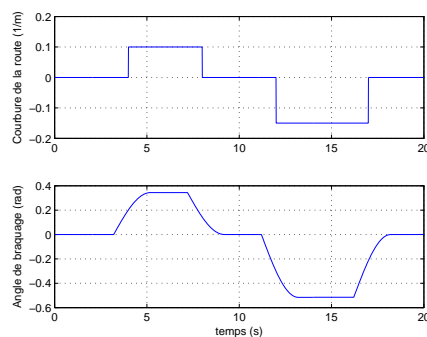


Fig. 7. Entrées du modèle

sont données par la figure 8 et l'estimée de la courbure de la route est illustrée par la figure 9.

Les indicateurs de risque r_1 and r_2 sont calculés dans deux scénarios (figure 10 et 11). le premier est une conduite normale et le deuxième est une sortie volontaire de la route à l'instant $t = 12s$. Contrairement au premier cas, les deux indicateurs divergent à partir de $t = 12s$, instant à partir duquel nous avons simulé la sortie de route.

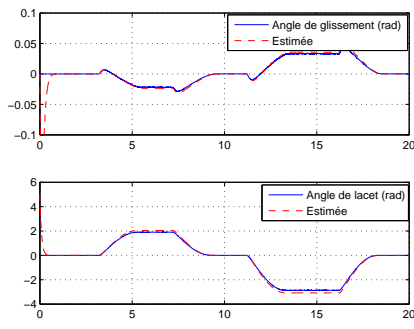


Fig. 8. Tracés des états et leurs estimés

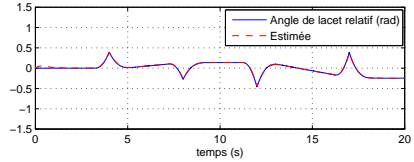


Fig. 9. Estimation de la courbure de la route

V. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une approche pour caractériser le risque de sorties de route. Le modèle de véhicule équipé d'un système de vision a été représenté par un modèle flou de type TS avec des incertitudes et des perturbations causées par des rafales du vent. Un observateur a été synthétisé en utilisant l'approche H_∞ et le formalisme LMI. L'algorithme proposé pour détecter les sorties de route se base sur le calcul de deux indicateurs de risque et tient compte des corrections du conducteur. Cette méthode peut s'avérer très efficace pour détecter les accidents dûs aux fausses manoeuvres ou à l'endormissement du conducteur. L'algorithme a été testé à travers deux scénarios de conduite dans un exemple de double virage et fera l'objet de tests réel sur un véhicule expérimental dans nos future travaux.

RÉFÉRENCES

[1] F. Bar and Y. Page. An empirical classification of lane departure crashes for the identification of relevant counter-measures. 46th AAAM Conference, Florida, USA, 2002.
 [2] C. Boussard. Estimations embarquées de conditions de risque. Thèse de l'école des mines de Paris, 2007.

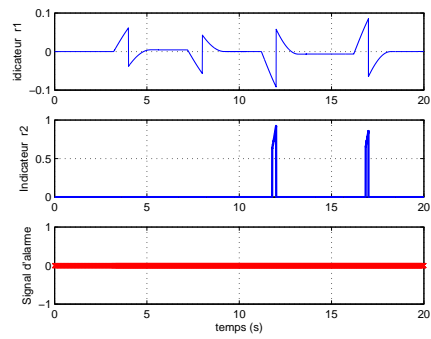


Fig. 10. Les indicateurs de risque dans le 1^{er} scénario

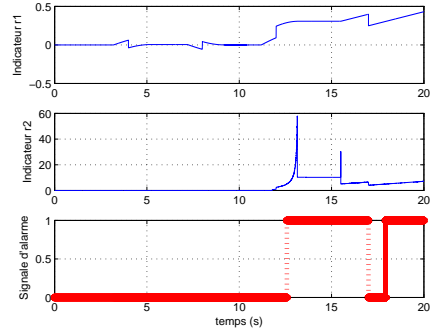


Fig. 11. Les indicateurs de risque dans le 2^{eme} scénario

[3] S. Glaser, S. Mammar, M. Netto and B. Lusetti, Experimental Time to Line Crossing validation. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Vienna, Austria, 2005.
 [4] S. Mammar, S. Glaser and Y. Sebsadji. Time-to-Line-Crossing : from Perception to Control Variable. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Seattle, WA, USA, 2007
 [5] Mammar S, Glaser S, Netto M. Vehicle lateral dynamics estimation using Unknown Input Proportional-Integral Observers, American Control Conference, Minnesota, 2006.
 [6] N. Zbiri, A. Rabhi, K. N. M'sirdi. Detection of critical situations for lateral vehicle Control. International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety, Italy, 2004, pp. 176-181.
 [7] T. Takagi and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.15, pp. 116-132, 1985.
 [8] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot, and D. Maquin. Design of sliding mode unknown input observer for uncertain Takagi-Sugeno model. 15th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'07, Athens, Greece, 2007.
 [9] M. Chadli, A. Akhenak, J. Ragot, D. Maquin, State and Unknown Input Estimation for Discrete Time Multiple Model. *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 346, No. 6, pp. 593-610, 2009.
 [10] M. Chadli, A. Elhajjaji. Output robust stabilisation of uncertain Takagi-Sugeno model. CDC-ECC, Seville Spain, 2005.
 [11] T. Guerra, A. Kruszewski, L. Vermeiren, and H. Tirmant. Conditions of output stabilization for nonlinear models in the Takagi-Sugeno's form. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 157, no. 9, pp. 1248-1259, 2006.
 [12] K. Tanaka, T. Ikeda, and H. Wang. Fuzzy regulators and fuzzy observers, Relaxed stability conditions and lmi-based designs. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 6, n° 2, pp. 250-265, 1998.
 [13] J. Ackemann, A. Bartlett, D. Kaesbauer, and R. Steinhauser, Robust control with uncertain parameters. Springer, London, 1993.
 [14] H. B. Pacejka, E. Bakker and L. Linder. A new tire model an application in vehicle dynamics studies. *SAE paper* 890089, 1989.
 [15] C. Lee, W. Lai and Y. Lin. A TSK Type Fuzzy neural network systems for dynamic systems identification. *In Proceedings of the IEEE-CDC Hawaii USA*, p 4002-4007, 2003 .
 [16] H. Dahmani, M. Chadli, A. Rabhi and A. El Hajjaji. Lane departure detection using Takagi-Sugeno Fuzzy model. LFA, Annecy, France, 2009.