



HAL
open science

Contrôle Affine Par Morceaux Pour Système De Maintien à La Voie

André Benine-Neto, Said Mammar, Benoît Lusetti

► **To cite this version:**

André Benine-Neto, Said Mammar, Benoît Lusetti. Contrôle Affine Par Morceaux Pour Système De Maintien à La Voie. Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Jul 2012, Grenoble, France. ⟨hal-00870034⟩

HAL Id: hal-00870034

<https://hal.science/hal-00870034v1>

Submitted on 4 Oct 2013

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.



HAL Authorization

Contrôle Affine par Morceaux pour Système de Maintien à la Voie

André Benine-Neto * Saïd Mammam. ** Benoit Lusetti *

* *LIVIC-IFSTTAR, 14 route de la Minière, 78000 Versailles France
(e-mail : andre.benine-neto, benoit.lusetti@ifsttar.fr).*

** *IBISC - EA 4526 UEVE, 40 rue du Pelvoux CE1455, 91020, Evry,
Cedex, France (e-mail : said.mammam@iup.univ-evry.fr)*

Résumé : Cet article présente le développement d'un système d'évitement de sortie de voie dans les situations de fortes sollicitations latérales. Des contrôleurs de type retour d'état affine par morceaux assurent la stabilité asymptotique. Leur synthèse est fondée sur les fonctions de Lyapunov continues et elles-mêmes affines par morceaux. La performance du système est vérifiée par les essais sur véhicule prototype sous conditions d'adhérence dégradée.

Keywords: Systèmes affines par morceaux, Contrôleurs affines par morceaux, Inégalités matricielles linéaires, Système d'aide à la conduite, Stabilité quadratique de Lyapunov.

1. INTRODUCTION

Plusieurs systèmes automatisés ont été introduits dans le marché automobile pendant ces dernières années avec pour objectif l'amélioration de la sécurité. L'utilisation de capteurs extéroceptifs a permis le développement de systèmes d'aide à la conduite pour non seulement avertir le conducteur en cas de sortie involontaire de la voie mais aussi guider la voiture au centre de la voie (LKAS). Plusieurs références existent sur le sujet (Chaib et al., 2004; Minoiu-Enache et al., 2009a; Cerone et al., 2009), ainsi que des systèmes déployés dans le marché automobile (Alkim et al., 2007; IVsource, 2001; Iihoshi, 2004).

Ces travaux et systèmes commercialisés sont généralement conçus pour fonctionner dans les situations de faible accélération latérale, par conséquent dans la région de comportement linéaire des efforts de contact entre pneumatique et chaussée. Le développement des systèmes de maintien dans la voie pour les situations de fortes sollicitations de la dynamique latérale doit intégrer le contrôle de la stabilité du véhicule, avec la prise en compte de la saturation des forces de contact ainsi que le positionnement du véhicule sur la voie. Une telle assistance permettra de réduire fortement les d'accidents causés aussi bien par l'inattention du conducteur ou par sa sur-réaction.

Mammam et al. (2010) ont présenté un système de maintien dans la voie avec un contrôleur utilisant le concept de contrôle parallèle distribué dans lequel le comportement non-linéaire des efforts pneumatique-chaussée a été considéré par un modèle flou (Takagi-Sugeno) du véhicule.

Les systèmes affines par morceaux (APM) présentent aussi une possibilité efficace pour traiter les non-linéarités. Ils ont été utilisés pour le contrôle de lacet des véhicules par Bernardini et al. (2009), combinés à la commande prédictive et par Scalzi et al. (2010); Benine-Neto et al. (2010) avec des contrôleurs PI linéaires par morceaux. Un système d'évitement de sortie involontaire de la voie a

aussi été proposé par Benine-Neto and Mammam (2011) avec un retour d'état APM fondé sur des fonction de Lyapunov quadratiques par morceaux. La synthèse des gains est obtenue par une procédure d'optimisation avec des contraintes de type inégalités matricielles linéaires (LMI). Cette synthèse permet simultanément d'assurer la stabilité du système et des performances.

Cet article présente la synthèse et implantation sur véhicule prototype du contrôleur APM avec retour d'état. Dans la section 2, la dynamique latérale du véhicule est présentée ainsi que le développement de son modèle APM. La stratégie de contrôle et la synthèse de la loi de commande sont abordées dans la section 3. Section 4 présente les résultats expérimentaux obtenus avec ce même véhicule pour une manoeuvre d'évitement d'obstacle en virage à faible adhérence. La dernière section conclut l'article.

2. DYNAMIQUE DU VÉHICULE

Un modèle type bicyclette de Ackermann (2002) permet la représentation des phénomènes essentiels de la dynamique latérale du véhicule. Seules la translation latérale et la rotation de lacet sont considérées alors que les mouvements de roulis et tangage sont négligés. Les deux roues avant comme les deux roues arrière sont rassemblées en une seule au milieu de chaque essieu. Donc, la dynamique du véhicule peut être exprimée :

$$\begin{cases} mv(\dot{\beta} + r) = f_f + f_r \\ J\dot{r} = l_f f_f - l_r f_r, \end{cases} \quad (1)$$

où r est la vitesse de lacet, β l'angle de dérive du véhicule, v la vitesse longitudinale, m la masse du véhicule, l_f et l_r les empattements avant et arrière, J l'inertie de lacet, et f_x , avec $x = f, r$, sont les efforts latéraux des pneus (sur le train avant et arrière, respectivement).

Ces efforts sont modélisés par la formule magique de Pacejka, (Pacejka, 2004) :

$$f_x(\alpha_x) = D \sin \{ \text{Catan} [(1 - E) B\alpha_x + E \text{atan}(B\alpha_x)] \}, \quad (2)$$

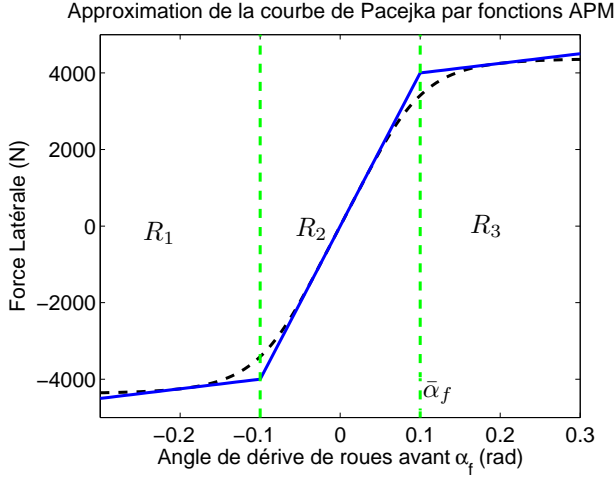


FIGURE 1. Forces latérales de roue avant selon le modèle de Pacejka et les approximations par des fonctions APM.

où α_x sont les angles de dérive au niveau des pneus avant et arrière du véhicule, considérés suffisamment petits, et donnés par :

$$\alpha_f = \delta_f - \beta - \frac{l_f r}{v}, \quad \alpha_r = -\beta + \frac{l_r r}{v}, \quad (3)$$

Ce modèle non-linéaire simplifié (1), (2) et (3) possède, lorsqu'on analyse ses bifurcations Ono et al. (1998), un domaine de stabilité limité et qui dépend de l'angle de braquage défini par le conducteur. Il fait aussi apparaître deux points d'équilibre instables et un point d'équilibre stable. L'origine des instabilités de ce modèle se trouve dans le comportement non-linéaire des efforts pneumatiques. Le modèle APM du véhicule pour la synthèse d'une loi de commande est décrit dans la suite.

2.1 Modèle affine par morceaux de la dynamique du véhicule

Les efforts latéraux des pneus avant et arrière, décrits par (2), sont approximés par les fonctions affines suivantes :

$$\begin{aligned} f_f(\alpha_f) &= e_{fi} + d_{fi}\alpha_f \\ f_r(\alpha_r) &= e_{ri} + d_{ri}\alpha_r, \end{aligned} \quad (4)$$

où d_{fi} , d_{ri} , e_{fi} et e_{ri} dépendent des efforts pneumatiques avant et arrière et de la région correspondante, représentée par l'indice (i). Pour la région qui contient l'origine (région 1), l'approximation linéaire des forces de contact souvent utilisée est obtenue en prenant $e_{f1} = 0$, $e_{r1} = 0$, $d_{f1} = c_f$ et $d_{r1} = c_r$ où c_f et c_r sont liés aux paramètres de la formule de Pacejka par $c_f = B_f C_f D_f$ et $c_r = B_r C_r D_r$, comme montré dans la Fig. 1.

Prenant en compte les fonctions affines par morceaux (4) et (4) pour représenter les forces non-linéaires et considérant la vitesse longitudinale constante, la dynamique du véhicule (1) est donc représentée par l'ensemble de systèmes affines ci-dessous :

$$\dot{x}^d = A_i^d x^d + B_i^d u + a_i^d, \quad (5)$$

avec les dynamiques correspondantes :

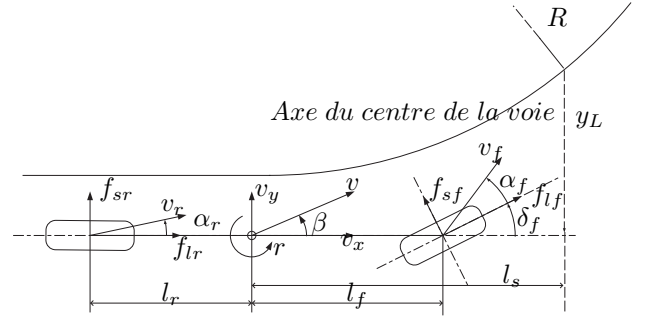


FIGURE 2. Modèle bicyclette du véhicule

$$A_i^d = \begin{bmatrix} -2 \frac{d_{fi} + d_{ri}}{mv} & -1 - 2 \frac{d_{fi} l_f - d_{ri} l_r}{Jv} \\ 2 \frac{d_{ri} l_r - d_{fi} l_f}{J} & -2 \frac{d_{fi} l_f^2 + d_{ri} l_r^2}{Jv} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$B_i^d = \begin{bmatrix} 2 \frac{d_{fi}}{mv} \\ 2 \frac{d_{fi} l_f}{J} \end{bmatrix}, \quad a_i^d = \begin{bmatrix} 2 \frac{e_{fi} + e_{ri}}{mv} \\ 2 \frac{e_{fi} l_f - e_{ri} l_r}{J} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

où l'entrée de commande est l'angle de braquage $u = \delta_f$, et le vecteur d'état est formé par l'angle de dérive du véhicule et sa vitesse de lacet $x^d = [\beta, r]^T$.

2.2 Positionnement sur la voie et colonne de direction

Le positionnement du véhicule sur la voie est obtenue par une camera installée en vision frontale au niveau du rétroviseur intérieur. L'écart latéral par rapport au centre de la voie, à une distance visée l_s , est noté y_L et l'angle de cap relatif, ψ_L . Ils sont calculés par l'algorithme développé pour la détection de marquages par Labayrade et al. (2006). Fig. 2 illustre le modèle type bicyclette sur la voie.

Un moteur électrique est utilisé pour l'assistance. Il est installé sur la colonne de direction du véhicule prototype. Il peut être asservi en angle ou bien en couple, noté τ_a .

Le modèle APM du véhicule (5) est étendu pour prendre en compte les dynamiques du positionnement du véhicule et de la colonne de direction, modélisée par un système de second ordre (Minoiu-Enache et al., 2009a). Le modèle APM du véhicule devient :

$$\dot{x} = A_i x + B_i u + B_\rho \rho_{ref} + a_i, \quad (8)$$

avec $x = [\beta, r, \psi_L, y_L, \delta_f, \dot{\delta}_f]$, $u = \tau_a$ et ρ_{ref} est une entrée exogène qui représente la courbure de la route définie par $\rho_{ref} = R^{-1}$, où R est le rayon de la route. Les matrices deviennent :

$$A_i = \begin{bmatrix} & A_i^d & 0 & 0 & \frac{2d_{fi}}{2d_{fi}l_f} & 0 \\ & & 0 & 0 & \frac{mv_f}{2d_{fi}l_f} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{J}{0} & 0 \\ v & l_s & v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2\eta \frac{d_{fi}}{I_s R_s^2} & 2\eta \frac{l_f d_{fi}}{I_s R_s^2 v} & 0 & 0 & -2\eta \frac{d_{fi}}{I_s R_s^2} & -\frac{B_s}{I_s} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$B_i = \left[0, 0, 0, 0, 0, \frac{1}{I_s R_s} \right]^T,$$

$$B_\rho = [0, 0, -v, 0, 0, 0]^T,$$

$$a_i = \left[(a_i^d)^T, 0, 0, 0, -2\eta \frac{e_{fi}}{I_s R_s^2} \right]^T.$$

où B_s est le coefficient d'amortissement de la colonne, I_s le moment d'inertie du système de direction, η la largeur de contact du pneu et R_s le rapport de réduction de la direction. Les valeurs numériques des paramètres sont données dans la Table 1.

TABLE 1. Paramètres du véhicule

Paramètres du véhicule			Approximations APM		
m	1600	[kg]	d_{f1}	11162	[N/rad]
J	2454	[kg m ²]	d_{f2}	39995	[N/rad]
l_f	1.22	[m]	d_{f3}	11162	[N/rad]
l_r	1.44	[m]	e_{f1}	-2018	[N]
l_s	5	[m]	e_{f2}	0	[N]
B_s	14	[m]	e_{f3}	2018	[N]
I_s	0.05	[kgm ²]	c_r	34993	[N/rad]
η	0.13	[m]	$\pm\bar{\alpha}_f$	± 0.07	[rad]
R_s	15				

3. STRATÉGIE DE CONTRÔLE

La stratégie de contrôle pour éviter la sortie involontaire de la voie consiste en une commande par retour d'état APM, synthétisée par optimisation BMI et fondée sur des fonctions de Lyapunov quadratiques par morceaux (Rodrigues and How, 2003).

L'application de cette théorie au système (8) requiert quelques considérations qui seront explicitées dans la suite.

3.1 Hypothèses pour LKAS et systèmes APM

La plupart des véhicules présentent un comportement sous-vireur, donc seules les forces de contacts latérales des roue avants sont approximées par les fonctions APM (3). L'approximation linéaire est considérée pour les efforts latéraux des roues arrières.

$$\begin{cases} f_f(\alpha_f) = e_{f1} + d_{f1}\alpha_f, & \text{for } \alpha_f < -\bar{\alpha}_f, \\ f_f(\alpha_f) = c_f\alpha_f, & \text{for } -\bar{\alpha}_f < \alpha_f < \bar{\alpha}_f, \\ f_f(\alpha_f) = e_{f3} + d_{f3}\alpha_f, & \text{for } \alpha_f > \bar{\alpha}_f, \\ f_{sr}(\alpha_r) = c_r\alpha_r \quad \forall \alpha_r, \end{cases} \quad (10)$$

où $\bar{\alpha}_f$ correspond à la partition visible sur la Fig. 1.

Les entrées exogènes, comme la courbure de la route, ne sont pas prises en compte lors de la synthèse de la loi de commande.

Chaque région de l'espace d'état, notée R_i , $i = 1, 2, 3$ est décrite par l'intersection de sous-espaces.

$$R_i = \{x | H_i^T x - g_i < 0\} \quad (11)$$

Ces régions peuvent être aussi exprimées par des ellipsoïdes dégénérés (Rodrigues and How, 2003), ce qui permet de réduire le nombre de paramètres dans l'optimisation pour rechercher la fonction de Lyapunov quadratique par morceaux. L'ellipsoïde dégénéré est décrit par :

$$\|E_i x + f_i\|_2 \leq 1 \quad \forall x \in R_i, \quad (12)$$

Selon Rodrigues and How (2003), si $R_i = \{x | \underline{d} < c_i^T x < \bar{d}\}$ l'ellipsoïde dégénéré peut être obtenu par :

$$E_i = 2c_i^T / (\bar{d} - \underline{d}) \quad \text{and} \quad f_i = -(\bar{d} + \underline{d}) / (\bar{d} - \underline{d}) \quad (13)$$

Pour le système (8), ils deviennent :

$$\begin{aligned} E_1^T &= [-1, -\frac{l_f}{v}, 0, 0, 1, 0] \frac{2}{-\bar{\alpha}_f - \underline{d}}, \quad f_1 = \frac{\bar{\alpha}_f - \underline{d}}{-\bar{\alpha}_f - \underline{d}}, \\ E_2^T &= [-1, -\frac{l_f}{v}, 0, 0, 1, 0] \frac{1}{\bar{\alpha}_f}, \quad f_2 = -\frac{\bar{\alpha}_f - \bar{\alpha}_f}{\bar{\alpha}_f + \bar{\alpha}_f} = 0, \\ E_3^T &= [-1, -\frac{l_f}{v}, 0, 0, 1, 0] \frac{2}{\bar{d} - \bar{\alpha}_f}, \quad f_3 = -\frac{\bar{d} + \bar{\alpha}_f}{\bar{d} - \bar{\alpha}_f}, \end{aligned} \quad (14)$$

où \underline{d} et \bar{d} peuvent être choisis arbitrairement, tels que $\underline{d} < -\bar{\alpha}_f$ et $\bar{d} > \bar{\alpha}_f$.

Les régions décrites par des ellipsoïdes sont utiles pour relaxer les contraintes pendant la recherche de la fonction de Lyapunov quadratique par morceaux. Afin d'assurer la continuité de cette fonction, une description paramétrée par la frontière des régions est nécessaire, Rodrigues and How (2003).

Pour les régions décrites par (14), les matrices de continuité entre deux régions voisines sont :

$$\begin{aligned} F_{1,2} &= F_{2,3} = \begin{bmatrix} \frac{l_f}{v} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & I_{5 \times 5} & & & \end{bmatrix}, \\ l_{1,2} &= -l_{2,3} = \\ &= \left[\frac{\bar{\alpha}_f}{2 + l_f^2/v^2}, \frac{\bar{\alpha}_f l_f}{v(2 + l_f^2/v^2)}, 0, 0, \frac{-\bar{\alpha}_f}{2 + l_f^2/v^2}, 0 \right] \end{aligned} \quad (15)$$

3.2 Synthèse du contrôleur APM

L'objectif consiste à trouver un contrôleur APM, $u_c = K_i x + m_i$, basé sur une fonction de Lyapunov du type :

$$V_i(x) = x^T P_i x + 2q_i^T x + r_i. \quad (16)$$

Pour que $V_i(x)$ soit une fonction de Lyapunov avec un taux de décroissance α_i , pour la région R_i , les conditions

$$x \in R_i, \begin{cases} V_i(x) > \epsilon \|x - x_{eq}\|_2 \\ \frac{d}{dt} V_i(x) < -\alpha_i V_i(x), \end{cases} \quad (17)$$

doivent être satisfaites, où $\epsilon \geq 0$ est fixé, et x_{eq} est le point d'équilibre du système en boucle fermée, décrit par :

$$\dot{x} = (A_i + B_i K_i)x + (b_i + B_i m_i) = \tilde{A}_i x + \tilde{b}_i. \quad (18)$$

Pour la synthèse de la loi de commande, selon Rodrigues and How (2003), le point d'équilibre x_{eq} doit être choisi à priori. Amener la voiture au centre de la voie (en absence de courbure) consiste à amener l'état vers l'origine, donc $x_{eq} = 0$ a été considéré comme point d'équilibre pour (18). x_{eq} doit aussi être l'extremum de la fonction de Lyapunov candidate. On fixe par conséquent $q_2 = 0_{6 \times 1}$ et $r_2 = 0$ pour assurer $V(0) = 0$.

A partir des conditions (17), des contraintes de type inégalités matricielles linéaires peuvent être obtenues. Ensuite, les gains K_i et m_i peuvent être déterminés de façon itérative par la *méthode V-K* décrite dans (Rodrigues and How, 2003), si les points d'équilibre pour chaque région x_{eq}^i sont choisis a priori. Grâce à la symétrie du modèle, seule la prise en compte des régions R_1 et R_2 est nécessaire pour la synthèse, dont les deux étapes importantes sont les suivantes :

Étape-V : Avec un contrôleur fixé, ainsi que α_i , résoudre :

Trouver : P_1, q_1, r_1 et P_2

tels que :

$$\begin{cases} F_{12}^T(P_1 - P_2)F_{12} = 0 \\ F_{12}^T(P_1 - P_2)l_{12} + F_{12}^T q_1 = 0 \\ l_{12}^T(P_1 - P_2)l_{12} + 2q_1^T l_{12} + r_1 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \left[\begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} P_1 - \epsilon I_n \\ + \lambda_1 E_1^T E_1 \end{array} \right) \begin{array}{c} q_1 + \epsilon x_{eq} + \lambda_1 E_1^T f_1 \\ r_1 - \epsilon x_1^T x_1 + \lambda_1 (f_1^T f_1 - 1) \end{array} \end{array} \right] \succ 0 \\ [P_2 - \epsilon I_n] \succ 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \left[\begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} \tilde{A}_1^T P_1 + P_1 + \tilde{A}_1 \\ -\gamma_1 E_1^T E_1 + \alpha_1 P_1 \end{array} \right) \begin{array}{c} P_1 \tilde{b}_1 + \tilde{A}_1^T q_1 \\ -\gamma_1 E_1^T f_1 + \alpha_1 q_1 \\ 2\tilde{b}_1^T q_1 + \alpha_1 r_1 \\ -\gamma_1 (f_1^T f_1 - 1) \end{array} \end{array} \right] \prec 0 \\ [\tilde{A}_2^T P_2 + P_2 + \tilde{A}_2 + \alpha_2 P_2] \prec 0 \\ \epsilon > 0, \quad \gamma_1 > 0, \quad \lambda_1 > 0. \end{cases} \quad (21)$$

Étape-K : Avec P_1, q_1, r_1 et P_2 obtenus à l'étape précédente, résoudre :

maximiser : $\min_i \alpha_i$

tels que : (20), (21)

$$(A_i + B_i K_i)x_{eq}^i + (b_i + B_i m_i) = 0, \quad (23)$$

$$\begin{cases} (K_2 - K_1) F_{1,2} = 0 \\ (K_2 - K_1) l_{1,2} + (m_2 - m_1) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \epsilon > 0, \quad \gamma_1 > 0, \quad \lambda_1 > 0, \quad \alpha_i > l_0 > 0, \\ -l_1 < K_i < l_1, \quad -l_2 < m_i < l_2, \end{cases} \quad (25)$$

avec l_0 une limite scalaire, l_1 et l_2 des limites vectorielles.

Il faut assurer qu'à chaque itération α_i est plus grand que celui obtenu au pas précédent. La procédure est

interrompue quand les LMI deviennent infaisables où la progression n'est plus significative.

Les détails de la synthèse sont omis, mais le lecteur peut se référer à (Benine-Neto and Mammam, 2011) et (Rodrigues and How, 2003).

La contrainte (23) impose un seul point d'équilibre pour (18), en plaçant les points d'équilibre des régions R_i , noté x_{eq}^i au dehors de ses propres régions, sauf pour la région contenant x_{eq} (R_2 pour le système de maintien à la voie). La contrainte (19) assure la continuité de la fonction de Lyapunov quadratique aux surfaces de transitions des régions voisines. La contrainte (24) impose la continuité de la loi de commande sur ces surfaces. Les contraintes (20) et (21) sont les conditions de stabilité de Lyapunov (17) imposées dans chaque région (14) à l'aide de la S-procédure (Boyd et al., 1994).

Pour la première itération le contrôleur obtenu dans (Minoiu-Enache et al., 2009a) a été utilisé comme gain initial, donc :

$$K_i^{k=0} = \begin{bmatrix} -351.9, & -68.37, & -728.44, & -56.69, \\ & & & -620.60, & -1.81 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

avec $m_i = 0$ pour toutes les régions. Les performances de ce contrôleur étant satisfaisantes pour le domaine linéaire des efforts pneumatique-chaussée, comme montré dans (Minoiu-Enache et al., 2009a), une contrainte est ajoutée à l'*Étape-K* pour limiter la variation de K_2 à 5% de ses valeurs initiales.

$$0.95|K_2^0| < |K_2^k| < 1.05|K_2^0|, \quad (27)$$

où l'indice k représente le nombre d'itérations. Le taux de décroissance initial a été choisi comme $\alpha_i = 0$. Après 19 itérations, le résultat obtenu est :

$$K_1 = [-334.3, -71.8, -764.8, -53.9, -651.3, -1.7],$$

$$K_2 = [-378.8, -74.4, -764.8, -53.9, -606.8, -1.7], \quad (28)$$

$$K_3 = K_1, \quad m_1 = -m_3 = 3.1, \quad m_2 = 0$$

C'est ce dernier contrôleur qui a été implanté sur la voiture expérimentale. Les résultats sont décrits dans la section suivante.

4. RÉSULTATS DE L'IMPLANTATION DE L'ASSISTANCE SUR LE VÉHICULE

Les tests ont été effectués sur une piste d'essai localisée à Versailles-Satory, sur un virage type S dont la courbure mesurée par l'algorithme de Labayrade et al. (2006) est montrée dans les Fig. 8. Le conducteur a retiré ses mains du volant pour simuler une situation d'inattention. L'assistance se déclenche quand une des roues avant dépasse une distance d du centre de la voie (indiquée par la ligne bleu pointillée sur la Fig. 3), qui caractérise une sortie imminente de la voie. La stratégie d'activation utilisée est identique à celle de Minoiu-Enache et al. (2009a). Le symbole "*" dans les Fig. 3 à 8 indique le moment de l'activation de l'assistance.

Des anneaux de matériaux composites (Boulleau, 2011) ont été montés sur les roues avant du véhicule afin de reproduire une situation de faible adhérence, ce qui permet

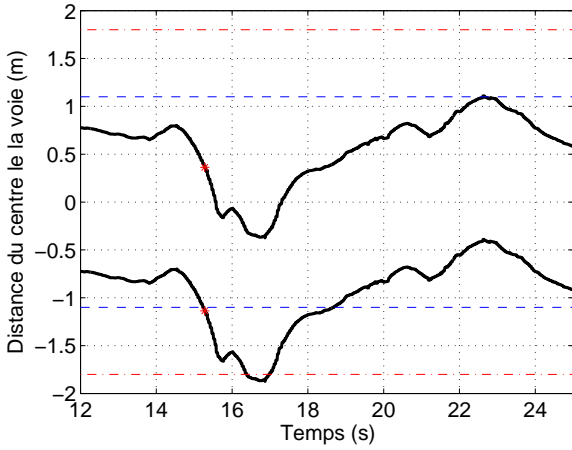


FIGURE 3. Positions de roues avant par rapport au centre de la voie et bande centrale pour l'activation de l'assistance.

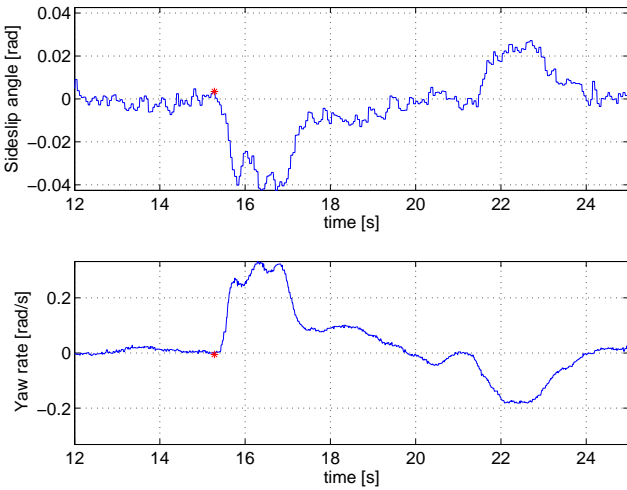


FIGURE 4. Angle de dérive et vitesse de lacet pendant l'évitement de sortie de voie.

de rentrer à faible vitesse, dans la région non-linéaire des efforts de contact pneumatique-chaussée.

La Fig. 3 montre les positions, sur la voie, des roues avant du véhicule sur la voie pendant la manœuvre d'évitement de sorties de voie. Les lignes pointillées ("dash-dotted") rouges représentent les bords de la voie. Cette figure montre que, malgré une brève excursion de la roue avant droite en dehors de la voie, l'assistance est efficace dans l'exécution de la manœuvre.

Suite à l'activation de l'assistance, l'angle de dérive des roues avant dépasse le seuil $\bar{\alpha}_f$, comme illustré sur la Fig. 8. Cette variable est calculée par (3) avec les mesures de l'angle de dérive du véhicule obtenues grâce au capteur CORREVIT, de la vitesse de lacet obtenue par une centrale inertielle et de l'angle de braquage de roue mesuré par un codeur optique. Les mesures de l'angle de dérive et de la vitesse de lacet sont présentées dans la Fig. 4 et l'angle de braquage ainsi que sa dérivée sont illustrés dans la Fig. 5.

Le changement de contrôleur de R_2 à R_3 , indiqué dans la Fig. 7, engendre une réduction du couple d'assistance, ce

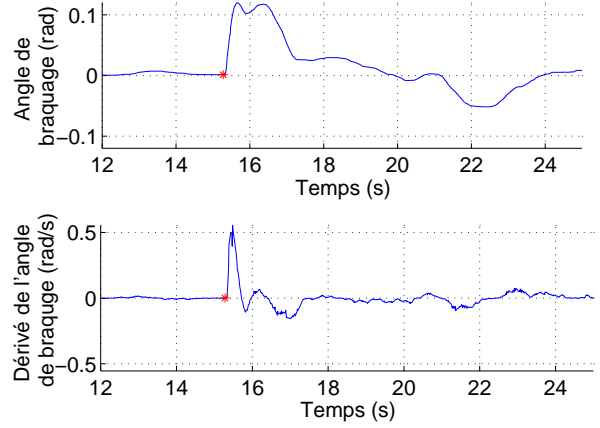


FIGURE 5. Angle de braquage et sa dérivée pendant l'évitement de sortie de voie.

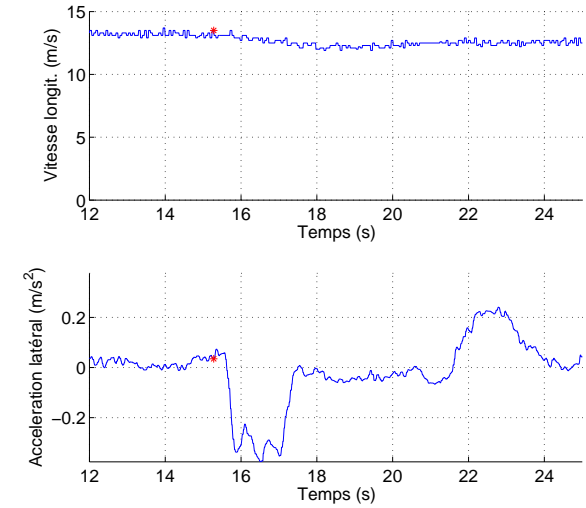


FIGURE 6. Vitesse longitudinale et accélération latérale pendant l'évitement de sortie de voie.

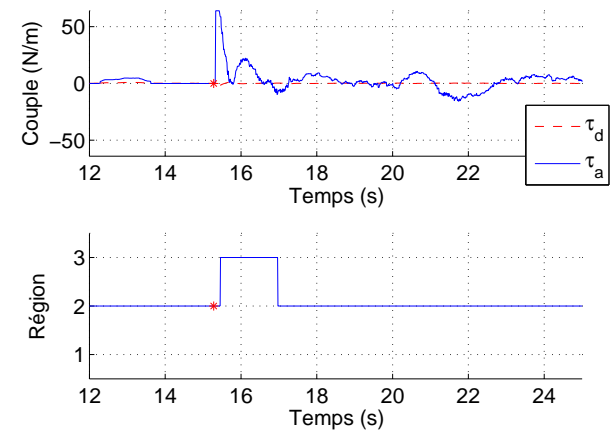


FIGURE 7. Couple conducteur et couple d'assistance (entrée de commande) pendant l'évitement de sortie de voie.

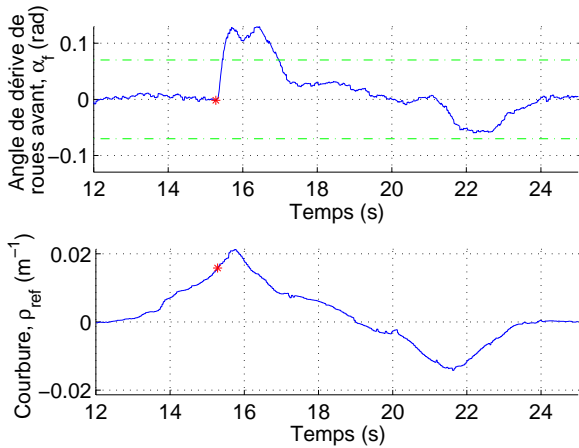


FIGURE 8. Angle de dérive de roues avants et courbure mesurée de la piste pendant l'évitement de sortie de voie.

qui permet une légère réduction de l'angle de dérive de roues avants (autour de 16s). Il est possible d'apercevoir également une brève réduction de l'angle de braquage. A cet instant, le véhicule est encore en train de négocier le virage, par conséquent le couple augmente de nouveau pour éviter la sortie de voie, avant que l'action du contrôleur de R_3 soit capable de ramener l'état du véhicule en R_2 .

Après avoir négocié la courbe à droite (à partir de 18s), le véhicule est ramené au centre de la voie et le conducteur reprend le contrôle de la voiture.

5. CONCLUSION

Cet article a présenté le développement et implantation d'un système d'aide à la conduite pour éviter les sorties involontaires. Le modèle du véhicule a été obtenu en utilisant l'approximation par des fonctions APM des forces latérales de contact entre le pneumatique et la chaussée, afin de prendre en compte son comportement non-linéaire. La synthèse de la loi de commande est fondée sur les fonctions de Lyapunov quadratiques par morceaux. Les gains pour le retour d'état du contrôleur APM ont été synthétisés par la méthode V-K qui permet la conversion de s contraintes BMI initiales en des LMI et une résolution par optimisation de façon itérative. Les résultats expérimentaux ont démontré, par l'évitement de sortie de voie en virage, que cette approche est satisfaisante pour manœuvrer le véhicule sans perte de la stabilité, malgré la faible adhérence. Les travaux futurs concerneront l'insertion d'une deuxième entrée de commande (freinage différentiel), car l'utilisation de l'angle de braquage seul peut s'avérer insuffisant.

RÉFÉRENCES

Ackermann, J. (2002). *Robust Control*. Springer, London.
 Alkim, T., Bootsma, G., and Looman, P. (2007). *The Assisted Driver, Systems that support driving*. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat.
 Benine-Neto, A. and Mammar, S. (2011). Piecewise affine state feedback controller for lane departure avoidance.

In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2011*, 839 – 844.
 Benine-Neto, A., Scalzi, S., Netto, M., Pasillas-Lepine, W., and Mammar, S. (2010). La conduite en conditions limite : contrôle d'un modèle non linéaire du véhicule par une approche affine par morceaux via le suivi d'une référence en vitesse de lacet. In *Conférence Francophone d'automatique, Nancy, France*.
 Bernardini, D., Cairano, S.D., Bemporad, A., and Tseng, H. (2009). Drive-by-wire vehicle stabilization and yaw regulation : A hybrid model predictive control design. In *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, P.R. China*, 7621–7626.
 Bouleau, P. (2011). Skid concept. <http://www.skid-concept.com>. Dossier-de-presse-photos-maj-05-09-conduite-extreme-v3.3.pdf.
 Boyd, S., Ghaoui, L.E., Feron, E., and Balakrishnan, V. (1994). *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, chapter 7. SIAM.
 Cerone, V., Milanese, M., and Regruto, D. (2009). Combined automatic lane-keeping and driver's steering through a 2 dof control strategy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(1), 135–142.
 Chaib, S., S. Netto, M., and Mammar, S. (2004). H-infinity, adaptive, pid and fuzzy control : a comparison of controllers for vehicle lane keeping. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma, Italy*, 139–144.
 Iihoshi, A. (2004). Driver assistance system (lane keep assist system). Presentation to WP-29 ITS Round Table, Geneva.
 IVsource (2001). Nissan demos new lane keeping products. www.ivsource.net.
 Labayrade, R., Douret, J., Laneurit, J., and Chapuis, R. (2006). A reliable and robust lane detection system based on the parallel use of three algorithms for driving safety assistance. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E89-D(7), 2092–2100.
 Mammar, S., Minoiu-Enache, N., Glaser, S., Lusetti, B., and Benine-Neto, A. (2010). Lane keeping automation at tire saturation. In *Proceedings of the IEEE American Control Conference, Baltimore, USA*, 6466–6471.
 Minoiu-Enache, N., Lusetti, B., Mammar, S., and Netto, M. (2009a). Assistance active de prévention des sorties de voie. prise en compte des virages. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 43(6), 615–646.
 Ono, E., Hosoe, S., Tuan, H.D., and Doi, S. (1998). Bifurcation in vehicle dynamics and robust front wheel steering control. *IEEE Trans. on Control System Technology*, 6(3), 9–14.
 Pacejka, H. (2004). *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
 Rodrigues, L. and How, J.P. (2003). Observer based control of piecewise-affine systems. *Int. J. Control*, 76(5), 459–477.
 Scalzi, S., Benine-Neto, A., Netto, M., Pasillas-Lepine, W., and Mammar, S. (2010). Active steering control based on piecewise affine regions. In *Proceedings of the IEEE American Control Conference, Baltimore, USA*, 5362–5367.