Commande d'un véhicule à 4 roues directrices en milieu naturel :

Application au suivi de trajectoires pour les engins agricoles

Christophe CARIOU[◇], Roland LENAIN[◇], Benoit THUILOT[⋆], Philippe MARTINET[⋆]

[◇] Cemagref
BP50085 - 24, av. des Landais
63172 Aubière Cedex France
christophe.cariou@cemagref.fr

[⋆] LASMEA
24, av. des Landais
63177 Aubière Cedex France
benoit.thuilot@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé— **Les faibles conditions d'adhérence rencontrées par les véhicules évoluant en milieu naturel engendrent d'importants glissements qu'il est nécessaire de considérer pour concevoir des lois de commande performantes. L'objet de cet article est ainsi de proposer un algorithme de commande adapté à un véhicule à quatre roues directrices pour réaliser un suivi précis de trajectoire dans de telles conditions. Nous montrons tout particulièrement l'intérêt des quatre roues directrices pour contrôler non seulement l'écart latéral, mais également l'écart angulaire du véhicule par rapport à la trajectoire à suivre. La motivation de ces travaux concerne le développement des systèmes de guidage pour les engins agricoles demandant un suivi latéral et angulaire précis. Les applications privilégiées sont l'évolution en ligne dans les coteaux et en crabe sur terrain plat. Basée sur un modèle cinématique étendu, une commande non-linéaire adaptative est élaborée reposant sur un principe de backstepping en considérant successivement les commandes de direction des roues avant et arrière du véhicule. Les résultats expérimentaux, obtenus avec un véhicule à quatre roues directrices et équipé d'un unique capteur GPS centimétrique, démontrent les capacités et la robustesse de la loi de commande proposée.**

Mots-clés— **robot mobile, commande adaptative, commande par backstepping, GPS, agriculture.**

I. Introduction

Guider de façon autonome et avec précision un véhicule tout-terrain nécessite de prendre en compte des phénomènes dynamiques souvent négligés dans les applications de robotique mobile. En particulier les faibles conditions d'adhérence, fréquemment rencontrées en milieu naturel, dégradent fortement la précision du suivi des trajectoires, notamment dans le cas classique où les lois de commande ont été bâties sous l'hypothèse de roulement pur sans glissement [11]. Cela peut être très pénalisant d'un point de vue applicatif, tout particulièrement en agriculture où les systèmes de guidage automatique ont pour rôle d'assurer un suivi précis des trajectoires, quelles que soient les conditions d'adhérence rencontrées, afin de réduire les impacts environnementaux.

Dans le cas d'un tracteur agricole à deux roues directrices, un guidage précis, au sens de l'écart latéral par rapport à la trajectoire de référence à suivre, a été obtenu lors de nos travaux précédents [7], en prenant en compte les effets du glissement dans l'élaboration de la loi de commande. Cependant, un écart angulaire subsiste, plus ou moins important selon les conditions d'adhérence, entre l'orientation de la trajectoire de référence et le cap du véhicule, évoluant alors en crabe pour compenser les dérives liées au manque d'adhérence. Dans cet article, l'asservissement de l'orientation du véhicule par rapport à la trajectoire de référence est envisagé en exploitant la direction du train arrière. Cette nouvelle fonctionnalité est proposée avec une commande manuelle sur les récents tracteurs à quatre roues directrices, tels le Xerion de Claas ou le Fastract de JCB : l'opérateur oriente les roues arrière indépendamment des roues avant de façon à compenser les glissements, permettant ainsi d'évoluer en ligne dans les coteaux pour les travaux agricoles de précision, ou d'évoluer volontairement en crabe afin de limiter la compaction du sol. Le développement d'un mode de guidage automatique pour de tels véhicules, soulageant ainsi l'opérateur de la tâche de conduite et du contrôle manuel fastidieux des roues arrière, constitue un champ d'application privilégié.

Dans la littérature, les systèmes de direction à quatre roues directrices ont été principalement étudiés pour augmenter la manœuvrabilité du véhicule dans les endroits étroits (engins de manutention, opération de parking, automoteurs agricoles [8]), ainsi que dans l'industrie automobile pour proposer une sécurité active sur les véhicules routiers [4], [5]. Dans ce dernier cas, l'objectif est de modifier la dynamique du véhicule en agissant sur la commande de direction des roues arrière, afin d'améliorer la stabilité durant les virages pris à haute vitesse, ou de diminuer la lourdeur de la direction sous une forte accélération, voir par exemple le système *Active drive* de Renault qui équipera début 2008 les versions haut de gamme de la Laguna III. L'angle du train directeur arrière, borné à quelques degrés, est souvent calculé comme fonction de l'angle de la roue avant, de la vitesse angulaire, et de gains prédéfinis selon la vitesse du véhicule.

Le suivi automatique de trajectoires par un véhicule à quatre roues directrices demeure quant à lui peu étudié, si ce n'est pour des opérations de parking de véhicules routiers. Par exemple, une loi de commande reposant sur les propriétés de platitude différentielle a été proposée dans [3] afin de planifier et réaliser une trajectoire de façon autonome. Les déplacements sont cependant supposés être effectués sur un sol plat sous l'hypothèse de roulement pur sans glissement.

Contrairement à l'ensemble de ces travaux, notre originalité réside dans l'exploitation de la direction des roues arrière du véhicule pour contrôler explicitement l'écart angulaire du véhicule par rapport à la trajectoire à suivre, tout en conservant un suivi précis au regard de l'écart latéral.

Basée sur un modèle cinématique étendu présenté en section II, une loi de commande non-linéaire adaptative reposant sur un principe de backstepping est détaillée en section III : l'angle de direction du train directeur arrière est d'abord considéré comme un paramètre mesuré. Le modèle du véhicule est converti en une forme chaînée et une loi de commande dont les performances sont indépendantes de la vitesse d'avancement est élaborée pour le train directeur avant, avec pour seul objectif de contrôler l'écart latéral. Ensuite, la loi de commande pour le train directeur arrière est considérée afin d'assurer la convergence de l'écart angulaire du véhicule sur la valeur désirée. La section IV est consacrée à la présentation du robot expérimental, et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus en conditions réelles sur des terrains naturels plats et pentus.

II. Modèle cinématique étendu

A. Formalisme

Les véhicules considérés évoluant en milieu naturel, il est nécessaire de prendre en compte les faibles conditions d'adhérence dans la modélisation, pour permettre ensuite la synthèse de lois de commande garantissant un suivi précis de la trajectoire. Le choix d'un modèle dynamique, souvent utilisé pour les applications routières [2], ne peut être retenu du fait du nombre important de paramètres (notamment le contact roue-sol), de leur variabilité ainsi que de leur faible observabilité. Par conséquent, il est proposé ici d'étendre le modèle cinématique classique d'un véhicule à quatre roues directrices développé sous l'hypothèse de roulement sans glissement [9]. Chaque train de roue avant et arrière est représenté sous la forme d'une roue virtuelle située à mi-distance des roues réelles. Deux paramètres supplémentaires, décrivant de façon prépondérante le glissement [7], sont alors introduits : les angles de dérive avant et arrière, notés respectivement β_F et β_R. Ils représentent la différence entre la direction que présenterait le vecteur vitesse au centre de la roue dans le cas d'un roulement sans glissement, et la direction que présente réellement ce vecteur vitesse.

Les notations utilisées dans cet article sont listées ci-après et présentées figure 1 :

- Γ est la trajectoire à suivre.
- F et R sont respectivement le centre des roues virtuelles avant et arrière. R est le point à contrôler.
- L est l'empattement du véhicule.
- θ_v est l'orientation du véhicule par rapport au repère absolu $[O, X_O, Y_O)$.
- V_r est la vitesse linéaire du véhicule au point R, supposée strictement positive et commandée manuellement.
- δ_F et δ_R sont les angles de braquage des roues virtuelles avant et arrière. Ils constituent les deux variables de commande.
- β_F et β_R sont les angles de dérive avant et arrière.
- M est le point de Γ le plus proche de R. M est supposé unique, voir hypothèse (2) ci-après.
- s est l'abscisse curviligne du point M le long de Γ.
- $c(s)$ est la courbure de la trajectoire Γ au point M.
- $\theta_\Gamma(s)$ est l'orientation de la tangente à Γ au point M par rapport au repère absolu $[O, X_O, Y_O)$.
- y et $\tilde{\theta} = \theta_v - \theta_\Gamma$ sont respectivement les écarts latéral et angulaire du véhicule par rapport à Γ.

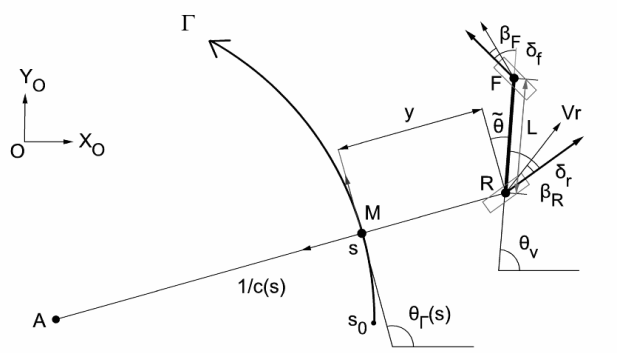

Fig. 1. Paramètres pour le suivi de trajectoire

En reprenant les calculs de modélisation réalisés lors de nos précédents travaux [7], et en les appliquant à un véhicule à quatre roues directrices, nous obtenons les équations de mouvement suivantes, exprimées par rapport à Γ :

$$\begin{cases} \dot{s} &= V_r \frac{\cos(\tilde{\theta}+\delta_R-\beta_R)}{1-c(s)\,y} \\ \dot{y} &= V_r \sin(\tilde{\theta}+\delta_R-\beta_R) \\ \dot{\tilde{\theta}} &= V_r\left[\cos(\delta_R-\beta_R)\lambda_1-\lambda_2\right] \end{cases} \tag{1}$$

avec : $\lambda_1 = \frac{\tan(\delta_F-\beta_F)-\tan(\delta_R-\beta_R)}{L}$, $\lambda_2 = \frac{c(s)\cos(\tilde{\theta}+\delta_R-\beta_R)}{1-c(s)\,y}$

Ce modèle présente une singularité lorsque $y = \frac{1}{c(s)}$, c'est-à-dire lorsque les points A et R sont superposés. Ce problème n'est pas rencontré en pratique, car les rayons de courbure des trajectoires à suivre sont supposés toujours grands comparés aux écarts y à la trajectoire. Ainsi l'hypothèse suivante est posée :

$$|y| < \frac{1}{|c(s)|} \quad \Rightarrow \quad 1-c(s)\,y > 0 \tag{2}$$

B. Estimation des angles de dérive

Le modèle (1) décrit le déplacement du véhicule en présence de glissement avec les deux angles de dérive β_F et β_R. Comme la mesure directe de ces paramètres semble difficilement réalisable à un coût raisonnable, une mesure indirecte est considérée. Pour cela, l'expression de $\dot{\theta}_v$ est considérée (cf. troisième équation de (1)) :

$$\dot{\theta}_v = V_r\left[\cos(\delta_R-\beta_R)\lambda_1\right] \tag{3}$$

Comme il sera discuté en section IV, les variables disponibles sont y, θ_v et $\tilde{\theta}$, ainsi que $\delta_{F_{mes}}$ et $\delta_{R_{mes}}$ les mesures des angles de direction des roues avant et arrière. A partir des expressions $\dot{y}$ de (1) et $\dot{\theta}_v$ de (3), l'estimation des angles de dérive peut ainsi être obtenue par un calcul direct :

$$\begin{cases} \beta_R &= \tilde{\theta}+\delta_{R_{mes}}-\arcsin\left(\frac{\dot{y}}{V_r}\right) \\ \beta_F &= \delta_{F_{mes}}-\arctan\left(\frac{L\dot{\theta}_v}{V_r\cos(\delta_{R_{mes}}-\beta_R)}+\lambda_0\right) \end{cases} \tag{4}$$

avec $\lambda_0 = \tan(\delta_{R_{mes}}-\beta_R)$

Une première approche consiste à utiliser directement (4) et conduit à une estimation satisfaisante des paramètres de glissement. Néanmoins, comme les dérivations numériques de y et θ_v peuvent générer une estimation bruitée, un filtre passe-bas doit être utilisé avec une fréquence de coupure relativement élevée pour éviter la perte d'information. Une seconde approche consiste à construire un observateur pour obtenir une estimation plus robuste vis-à-vis des bruits et incertitudes de mesure. Nous utilisons celui développé lors de nos travaux précédents [6]. Cet observateur présente le problème d'observation comme le dual d'un problème de commande, voir figure 2. Les angles de dérive à observer sont considérés comme des variables de commande devant assurer la convergence de l'état du modèle observateur (1) vers les valeurs mesurées, les angles de braquage étant traités comme des paramètres connus. La loi de commande de cette boucle d'observation constitue l'équation d'observation permettant d'estimer en ligne les angles de dérive β_F et β_R, voir [6] pour plus de détails.

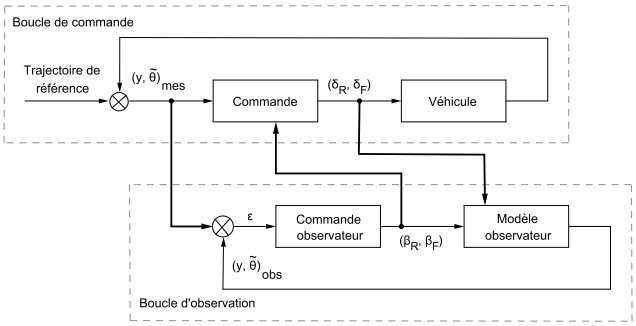

Fig. 2. Schéma des boucles de commande et d'observation

Ainsi, avec l'estimation des angles de dérive β_F et β_R, toutes les variables du modèle (1) sont connues. Ce modèle sert de base pour l'étude de la loi de commande ci-après.

III. Etude d'une loi de commande

L'objectif de la commande est d'assurer un suivi précis de trajectoire en dépit des faibles conditions d'adhérence, en utilisant les deux angles de direction des trains directeurs avant et arrière du véhicule. Les sorties à contrôler sont l'écart latéral y et l'écart angulaire $\tilde{\theta}$. En pratique, le point de fonctionnement pour ces sorties est constant et égal à $(0, \tilde{\theta}_{cons})$: l'écart latéral doit converger et être maintenu autour de zéro, tandis que l'écart angulaire doit converger vers une valeur de consigne constante. Le choix $\tilde{\theta}_{cons} = 0°$ représente un déplacement du véhicule avec une orientation parallèle à la trajectoire de référence Γ. Si $\tilde{\theta}_{cons} \neq 0°$, le véhicule se déplace en crabe avec un offset angulaire par rapport à Γ.

A. Conversion du modèle du véhicule en forme chaînée

Il est établi que la plupart des modèles cinématiques des robots mobiles peuvent être convertis sans aucune approximation en modèles presque linéaires nommés formes chaînées, voir [9] pour plus de détails. Une telle approche est attractive puisqu'elle nous permet d'utiliser les résultats de la théorie des systèmes linéaires, tout en travaillant sur le modèle non-linéaire exact du véhicule. C'est cette approche que nous utilisons dans cet article. Cependant, au lieu d'introduire un modèle à deux chaînes comme décrit dans [1], ce qui impliquerait la commande des dérivées des angles de braquage, nous proposons de suivre une approche par backstepping. Cette méthode nous permet d'étendre aux véhicules à quatre roues directrices l'ensemble des résultats précédemment obtenus pour les véhicules à deux roues directrices [7], et de conserver les valeurs directes des angles comme variables de commande. Plus précisément, l'approche par backstepping est composée de deux étapes. Dans la première étape (sections III.A et III.B), δ_R est considéré comme un paramètre mesuré. Dans la seconde étape (section III.C), δ_R sera traité comme une entrée de commande.

Lorsque δ_R est considéré comme un paramètre mesuré, le modèle (1) contient seulement deux entrées (V_r, δ_F). En conséquence, il peut être converti en une forme chaînée. L'expression générale pour une forme chaînée de dimension trois (a_1, a_2, a_3) reposant sur deux entrées (m_1, m_2) s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = \frac{d\,a_1}{dt} & = & m_1 \\ \dot{a}_2 = \frac{d\,a_2}{dt} & = & a_3 m_1 \\ \dot{a}_3 = \frac{d\,a_3}{dt} & = & m_2 \end{cases} \tag{5}$$

La transformation d'état qui convertit le système (1) en forme chaînée (5) est donnée par :

$$[s, y, \tilde{\theta}] \rightarrow [a_1, a_2, a_3] = [s, y, (1 - c(s)\,y)\tan(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)]$$

La transformation de commande est :

$$[V_r, \delta_F] \rightarrow [m_1, m_2] = [\tfrac{V_r \cos(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)}{1 - c(s)\,y}, \tfrac{da_3}{dt}]$$

Le calcul explicite de m_2 conduit à (6). Il est supposé que $\dot{\delta}_R - \dot{\beta}_R = 0$. Cette hypothèse n'est pas restrictive puisqu'en pratique l'angle de direction des roues arrière est supposé compenser l'angle de dérive arrière. Ces deux angles se stabilisent sur une constante quel que soit $\tilde{\theta}_{cons}$.

$$\begin{aligned} m_2 \;=\; & c(s) V_r \sin(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)\tan(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R) \\ & + y\,\tfrac{dc}{ds}\tan(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)\tfrac{V_r \cos(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)}{1 - c(s)\,y} \\ & + V_r \tfrac{1 - c(s)\,y}{\cos^2(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)}\,[\cos(\delta_R - \beta_R)\lambda_1 - \lambda_2] \end{aligned} \tag{6}$$

L'objectif de la loi de commande est d'assurer le suivi de trajectoire. Dans notre application, V_r est considérée comme un paramètre. Le but est d'amener et maintenir à zéro $a_2 = y$. De plus, comme mentionné dans [9], il est très attractif de remplacer la dérivation par rapport au temps par une dérivation par rapport à a_1, c'est à dire l'abscisse curviligne. En utilisant les notations $m_3 = \frac{m_2}{m_1}$ et $a'_i = \frac{d\,a_i}{d\,a_1}$, la forme chaînée devient :

$$\begin{cases} a'_1 & = & 1 \\ a'_2 & = & a_3 \\ a'_3 & = & m_3 \end{cases} \tag{7}$$

Les deux dernières équations de (7) constituent un système linéaire. De plus, les équations différentielles étant établies par rapport à a_1, les performances de la loi de commande seront indépendantes de la vitesse du véhicule.

B. Commande des roues avant

Afin de contrôler l'écart latéral, un choix judicieux pour m_3 est (8). En effet, cette expression conduit à la dynamique d'erreur (9), qui implique que $a_2 = y$ converge vers zéro, ainsi que a_3 (et donc $\tilde{\theta}$ converge vers $\beta_R - \delta_R$).

$$m_3 = \frac{m_2}{m_1} = -K_d a_3 - K_p a_2 \quad (K_d, K_p > 0) \tag{8}$$

$$\Rightarrow \quad a_2'' + K_d a_2' + K_p a_2 = 0 \tag{9}$$

Le suivi de trajectoire est ainsi réalisé. De plus, puisque l'équation de la dynamique d'erreur (9) est écrite en fonction de a_1, les gains (K_p, K_d) permettent de spécifier une distance de réponse au lieu d'un temps de réponse. Nous choisissons ici $K_p = \frac{K_d^2}{4}$ afin d'obtenir un amortissement critique $\xi = 1$. Finalement, l'inversion de (8) nous donne l'expression de la loi de commande pour les roues avant :

$$\begin{aligned} \delta_F \;=\; & \arctan\Big\{ \tan(\delta_R - \beta_R) \\ & + \tfrac{L}{\cos(\delta_R - \beta_R)} \big(\tfrac{c(s)\cos\tilde{\theta}_2}{\alpha} + \tfrac{A\cos^3\tilde{\theta}_2}{\alpha^2} \big) \Big\} + \beta_F \end{aligned} \tag{10}$$

avec :

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_2 = \tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R \\ \alpha = 1 - c(s)\, y \\ A = -\frac{K_d^2\, y}{4} - K_d\, \alpha \tan\tilde{\theta}_2 + c(s)\, \alpha \tan^2\tilde{\theta}_2 \end{cases} \tag{11}$$

Avec la commande (10), l'écart latéral y converge vers zéro de même que $\tilde{\theta}_2$. Ce dernier point signifie que l'écart angulaire $\tilde{\theta}$ converge vers $\beta_R - \delta_R$. On remarquera que lorsque $\delta_R = 0$, le cap du véhicule compense le glissement arrière, ce qui est observé en pratique : le véhicule évolue en crabe lors du suivi d'une ligne droite sur une pente glissante.

C. Commande des roues arrière

La seconde étape de l'approche par backstepping a pour but de contrôler l'écart angulaire en agissant sur δ_R, alors que les roues avant sont commandées selon (10). La dynamique de l'écart angulaire par rapport à l'abscisse curviligne est déduite de (1) :

$$\tilde{\theta}' = \frac{d\tilde{\theta}}{ds} = \frac{\alpha\lambda_1 \cos(\delta_R - \beta_R)}{\cos\tilde{\theta}_2} - c(s) \tag{12}$$

avec : $\lambda_1 = \frac{\tan(\delta_F - \beta_F) - \tan(\delta_R - \beta_R)}{L}$

La loi de commande (10) établie pour les roues avant peut être substituée dans l'expression de λ_1 conduisant à :

$$\lambda_1 = \frac{1}{\cos(\delta_R - \beta_R)} \big(\frac{c(s)\cos\tilde{\theta}_2}{\alpha} + \frac{A\cos^3\tilde{\theta}_2}{\alpha^2} \big) \tag{13}$$

La dynamique imposée par δ_F sur l'écart angulaire peut alors être exprimée comme suit (injecter (13) dans (12), et rapporter l'expression de A donnée par (11)) :

$$\tilde{\theta}' = \big(-\frac{K_d^2\, y}{4\,\alpha} - K_d \tan\tilde{\theta}_2 + c(s) \tan^2\tilde{\theta}_2 \big) \cos^2\tilde{\theta}_2 \tag{14}$$

Comme mentionné dans la section III.B, la loi de commande (10) impose que $\tilde{\theta}_2$ demeure proche de zéro. Ainsi, le terme $\cos^2\tilde{\theta}_2$ peut être consideré comme égal à 1. On obtient alors :

$$\tilde{\theta}' = -\frac{K_d^2\, y}{4\,\alpha} - K_d \tan\tilde{\theta}_2 + c(s) \tan^2\tilde{\theta}_2 \tag{15}$$

En étudiant (15), deux cas doivent être considérés selon la valeur de la courbure $c(s)$.

C.1 Suivi de lignes droites : $c(s) = 0$

Dans ce cas, l'équation (15) devient :

$$\tilde{\theta}' = -\frac{K_d^2\, y}{4} - K_d \tan\tilde{\theta}_2 \tag{16}$$

Une dynamique d'erreur $\tilde{\theta}' = K_{d2}\,(\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})$ avec $K_{d2} > 0$, et par conséquent la convergence de $\tilde{\theta}$ vers θ_{cons}, peut facilement être imposée avec la loi de commande suivante :

$$\delta_R = \beta_R - \tilde{\theta} + \arctan\Big(\frac{-K_d\, y}{4} - \frac{K_{d2}\,(\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})}{K_d} \Big) \tag{17}$$

C.2 Suivi de trajectoires courbes : $c(s) \neq 0$

En posant $X = \tan\tilde{\theta}_2$, l'équation (15) devient :

$$-\tilde{\theta}' - \frac{K_d^2\, y}{4\,\alpha} - K_d\, X + c(s)\, X^2 = 0 \tag{18}$$

Si on pouvait imposer $\tilde{\theta}' = K_{d2}\,(\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})$, alors le discriminant de l'équation (18) s'écrirait :

$$\Delta = \frac{K_d^2}{\alpha} + 4\, c(s)\, K_{d2}\,(\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta}) \tag{19}$$

Comme α est supposé être toujours strictement positif, voir hypothèse (2), la condition $\Delta > 0$ est toujours satisfaite en pratique. En effet, les plages de variation pour $c(s)$ et y, et le choix fait pour (K_d, K_{d2}) ne peuvent conduire à un discriminant négatif que lorsque l'écart $|\tilde{\theta} - \tilde{\theta}_{cons}|$ devient supérieur à 30°, ce qui n'est jamais le cas en conditions expérimentales. Ensuite, la racine $X = \frac{K_d + \sqrt{\Delta}}{2c(s)}$ est une solution non valide par rapport aux limites de l'actionneur : le terme en K_d étant prépondérant, la valeur absolue de l'angle $\tilde{\theta}_2$, soit δ_R, serait très important. L'unique solution valide est ainsi $X = \frac{K_d - \sqrt{\Delta}}{2c(s)}$, conduisant à la loi de commande (20) pour les roues arrière :

$$\delta_R = \beta_R - \tilde{\theta} + \arctan\left\{ \frac{K_d - \sqrt{\frac{K_d^2}{1 - c(s)y} + 4\, c\, K_{d2}\,(\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})}}{2c(s)} \right\} \tag{20}$$

Les expressions (17) et (20) constituent les lois de commande des roues arrière pour le suivi de lignes droites et courbes. La continuité de ces expressions peut être établie par des calculs non présentés dans cet article.

IV. Résultats expérimentaux

Les expérimentations sont réalisées avec un véhicule tout-terrain à quatre roues directrices, voir figure 3, sur des terrains plats et pentus (15%). L'unique capteur extéroceptif utilisé est un récepteur GPS centimétrique, dont l'antenne est installée à la verticale du point R. Il délivre une position absolue avec une précision de 2 cm à une fréquence de 10 Hz.

Fig. 3. Plateforme expérimentale

Le véhicule est d'abord conduit manuellement pour enregistrer une trajectoire de référence. Puis le guidage automatique est lancé : à partir de la trajectoire apprise et de la position du véhicule, les variables s, $c(s)$, $\theta_\Gamma(s)$ et y sont calculées chaque 100 ms. L'orientation du véhicule θ_v est estimée par un filtre de Kalman utilisant les vecteurs vitesse du GPS. L'écart angulaire $\tilde{\theta}$ peut ainsi être calculé. Deux codeurs angulaires mesurent les angles de direction $\delta_{F_{mes}}$ et $\delta_{R_{mes}}$. Les variables du vecteur d'état du modèle (1) et les paramètres de glissement estimés à partir de (4) ou de l'observateur sont disponibles. Les commandes des roues avant (10) et arrière (17, 20) sont alors calculées.

Dans les sections A et B suivantes, la trajectoire à suivre est rectiligne et réalisée sur un terrain en pente. Durant le guidage automatique, la vitesse du véhicule est de 1.8 m/s (6.5 km/h). Les gains de commande (K_p, K_d) sont fixés à $(0.16, 0.8)$ afin d'imposer une distance de convergence de $11m$ pour l'écart latéral. Le gain $K_{d2} = 1.1$ est choisi pour fixer une distance de réponse de $3m$ pour l'écart angulaire. Enfin, la section C propose une expérimentation pour le cas d'une trajectoire courbe avec ces mêmes valeurs de gain.

A. *Trajectoire rectiligne en pente :* $\tilde{\theta}_{cons} = 0°$

Afin de montrer les améliorations apportées par la loi de commande proposée, trois lois de commande sont présentées. Sur les figures (4,5), les conventions suivantes sont utilisées :

- **courbes grises continues** : résultats obtenus avec uniquement les roues avant commandées ($\delta_R = 0°$), et sans prendre en compte l'effet des glissements, c'est à dire avec $(\beta_R, \beta_F) = (0°, 0°)$. La loi de commande est issue de nos précédents travaux [10], et peut être retrouvée à partir de (10).
- **courbes grises pointillées** : résultats obtenus avec uniquement les roues avant commandées ($\delta_R = 0°$), mais les angles de dérive sont estimés. La loi de commande est issue de nos précédents travaux [7], et peut être aussi retrouvée à partir de (10).
- **courbes noires continues** : résultats obtenus quand les roues avant et arrière sont commandées, avec $\tilde{\theta}_{cons} = 0°$. La loi de commande (17) est utilisée pour les roues arrière et (10) pour les roues avant.

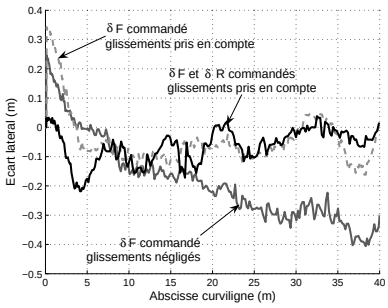

Fig. 4. Ecarts latéraux

La figure 4 présente les écarts latéraux. L'importance de prendre en considération les glissements apparaît clairement : la loi de commande qui néglige les effets du glissement et agit uniquement sur les roues avant n'assure pas un suivi de trajectoire satisfaisant (écart latéral autour de $-30cm$ après $20m$). Au contraire, les deux lois prenant en compte les glissements assurent un suivi avec un écart latéral autour de zéro. Une erreur de $-10cm$ est seulement notée dans les premiers mètres, principalement due aux changements rapides des conditions d'adhérence au début de la pente.

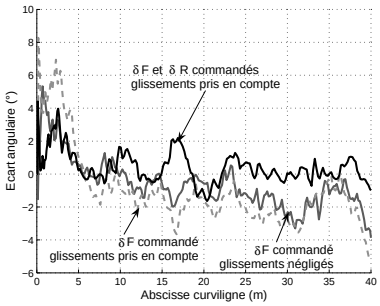

Fig. 5. Ecarts angulaires

L'intérêt de commander les roues arrière est montré sur la figure 5 qui affiche les écarts angulaires. En effet, quand seulement les roues avant sont commandées, le véhicule évolue en crabe pour compenser les glissements. Ceci conduit à un écart angulaire de plusieurs degrés (autour de $-2°$ pour les conditions d'adhérence rencontrées dans cet essai). Au contraire, quand les roues avant et arrière sont commandées et les angles de dérive estimés, l'écart angulaire reste de façon satisfaisante proche de 0°.

B. *Trajectoire rectiligne en pente :* $\tilde{\theta}_{cons} = 0°, -10°, -20°$

Afin de montrer les capacités des lois de commande (10) et (17), le suivi de trajectoire a été réalisé le long de la même trajectoire rectiligne, mais successivement avec trois valeurs de consigne pour l'écart angulaire : $\tilde{\theta}_{cons} = 0°, -10°, -20°$. La vitesse du véhicule imposée est toujours de 1.8m/s. La figure 6 présente les écarts latéraux obtenus durant les trois essais : la courbe noire correspond à $\tilde{\theta}_{cons} = 0°$, la courbe gris foncé à $\tilde{\theta}_{cons} = -10°$, et la courbe gris clair à $\tilde{\theta}_{cons} = -20°$. Pour ces trois essais, l'écart latéral reste de manière satisfaisante autour de $\pm 10cm$ après la distance de réponse, quelle que soit le point de fonctionnement choisi pour l'écart angulaire.

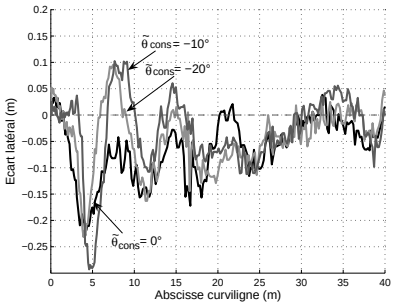

Fig. 6. Ecarts latéraux

Les écarts angulaires pour ces trois essais sont présentés sur la figure 7 avec le même code couleur. Nous pouvons observer que les écarts angulaires convergent correctement vers leur point de fonctionnement $\tilde{\theta}_{cons} = 0°, -10°, -20°$, démontrant la capacité de commander explicitement et précisément l'écart angulaire en plus de l'écart latéral, bien que le véhicule évolue sur un terrain pentu et glissant.

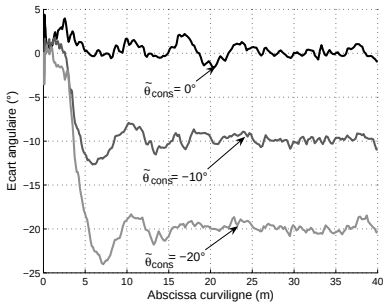

Fig. 7. Ecart angulaire

La figure 8 montre les angles de direction avant et arrière, lorsque le point de fonctionnement est $\tilde{\theta}_{cons} = -20°$. Nous constatons que les directions des roues sont peu bruitées en dépit des perturbations dues au terrain naturel, et qu'elles n'atteignent pas la valeur consigne de 20° afin de compenser les effets du glissement. La loi de commande des roues arrière assure une convergence rapide de l'écart angulaire, principalement due au réglage de K_{d2}, alors que les roues avant assurent la convergence de l'écart latéral vers zéro.

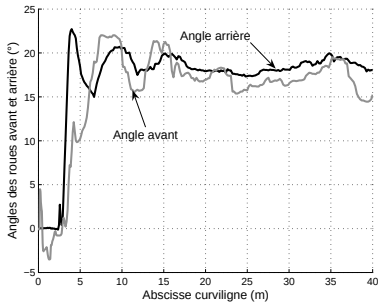

Fig. 8. Angles de direction avant et arrière

C. *Trajectoire courbe sur terrain plat : $\tilde{\theta}_{cons} = -10°$*

La figure 9 présente les résultats obtenus avec $\tilde{\theta}_{cons} = -10°$ pour le suivi d'une trajectoire courbe sur terrain plat. Les roues sont commandées selon (10) et (20). La loi de commande asservit correctement l'écart angulaire sur la valeur de consigne. Après le positionnement du véhicule en crabe, l'écart latéral se maintient autour de $\pm 10cm$, à l'exception d'un écart de $-20cm$ durant la forte transition de courbure à la fin du virage. Cet écart est dû au temps de réponse des actionneurs, ce qui met en évidence la nécessité de l'ajout d'une action prédictive, qui sera étudiée dans nos prochains travaux pour limiter ces dépassements.

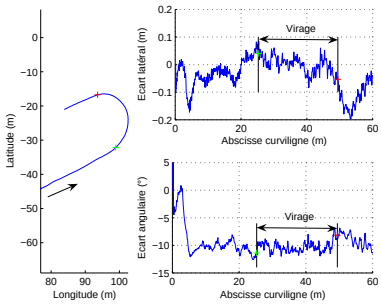

Fig. 9. Suivi d'une trajectoire courbe

V. Conclusion et perspectives

Cet article adresse le problème de suivi de trajectoire d'un véhicule à quatre roues directrices évoluant en milieu naturel, avec pour application le guidage autonome des engins agricoles. L'objectif est de contrôler à la fois l'écart latéral et l'écart angulaire par rapport à la trajectoire à suivre. Basée sur un modèle cinématique étendu prenant en compte les glissements par deux angles de dérive estimés en ligne, la loi de commande repose sur un principe de backstepping : le modèle est d'abord transformé en forme chaînée afin d'étudier la commande de direction des roues avant, pour contrôler l'écart latéral du véhicule quelle que soit l'orientation des roues arrière. Puis, la commande de direction des roues arrière est considérée afin d'asservir l'écart angulaire en un point de fonctionnement choisi.

Des résultats expérimentaux, réalisés en conditions naturelles avec un robot équipé d'un unique capteur GPS centimétrique, démontrent les capacités de la commande proposée pour réaliser un suivi précis de trajectoire : sur une pente de 15%, l'écart latéral reste autour de zéro, contre 30 cm si les glissements sont négligés. L'écart angulaire est de plus asservi de façon satisfaisante sur la valeur de consigne, que ce soit lors du suivi de trajectoires droites ou courbes.

Les prochains travaux concernent l'ajout d'une action prédictive pour améliorer le suivi lors des fortes transitions de courbure de la trajectoire de référence. L'extension de ces travaux au guidage autonome d'un système véhicule-remorque en milieu naturel est en cours d'investigation, le contrôle des outils traînés derrière un tracteur constituant un enjeu particulièrement intéressant.

Références

[1] Bushnell L., Tilbury D., Sastry S. *Steering three-input chained form nonholonomic systems using sinusoids : the fire truck example.* In Proc. of European Control Conference, Gronigen, The Netherlands, 1993.

[2] Ellouze M., d'Andréa-Novel B. *Control of unicycle-type robots in the presence of sliding effects with only absolute longitudinal and yaw velocities measurement.* In European Journal of Control, 6 :567–584, 2000.

[3] Hermosillo J., Sekhavat S. *Feedback control of a bi-steerable car using flatness. Application to trajectory tracking.* In Preoc. of the American Control Conference, Denver, Co(US), 2003.

[4] Hirano Y., Fukatani K. *Development of robust active rear steering control for automobile.* JSME inter. journal, vol. 40, no. 2, pp. 231–237, 1997.

[5] Leith D.J., Leithead W.E., Vilaplana M. *Robust lateral controller for 4-wheel steer cars with actuator constraints.* In Proc. of the IEEE conf. on Decision and Control, Seville (Spain) Dec. 2005

[6] Lenain R., Thuilot B., Cariou C., Martinet P. *Sideslip angles observers for vehicle guidance in sliding conditions : application to agricultural path tracking tasks.* IEEE conf. on Robotics and Automation, Florida, USA, pp. 3183-3158, May 2006.

[7] Lenain R., Thuilot B., Cariou C., Martinet P. *High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding. Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks.* In Autonomous robots 21(1) :79–97, 2006.

[8] Miller M. A., Steward B.L., Westphalen M. L. *Effects of multi-mode four-wheel steering on sprayer machine performance.* Transactions of the ASAE ISSN 0001-2351, Vol. 47(2) :385-395, 2004.

[9] Samson C. *Control of chained systems. Application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots.* IEEE transactions on Automatic Control, 40(1) :64–77, 1995.

[10] Thuilot B., Cariou C., Martinet P., Berducat M. *Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS.* In Autonomous robots 13(1) :53–71, 2002.

[11] Wang D., Low C. B. *Modeling skidding and slipping in wheeled mobile robots : control design perspective.* IEEE int. conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, Oct 2006.