

Commande de véhicules en présence de glissement : Application au suivi de trajectoire pour les engins agricoles

Roland LENAIN[◇], Benoit THUILOT^{*}, Christophe CARIOU[◇], Philippe MARTINET^{*}

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

^{*} LASMEA
24, av. des Landais
63177 Aubière Cedex France
benoit.thuilot@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé— L’hypothèse de roulement sans glissement est fréquemment utilisée pour adresser le suivi de trajectoire par des robots mobiles. Malheureusement, celle-ci n’est pas valide pour des véhicules évoluant en milieu naturel, et en particulier pour des applications agricoles. Les faibles propriétés d’adhérence des terrains d’évolution nécessitent, pour obtenir une précision de suivi satisfaisante, de prendre en compte le phénomène de glissement dans la commande de ces véhicules. En outre, les propriétés géométriques et dynamiques des engins évoluant sur de tels terrains (large inertie, suspensions, ...), ainsi que les actionneurs employés, génèrent des régimes transitoires augmentant ponctuellement les erreurs de suivi. Ces éléments doivent donc également être pris en considération par la loi de commande. Dans cet article plusieurs développements théoriques (basés sur des principes d’observateur, de commande non-linéaire et de commande prédictive), visant à conserver le même niveau de précision que celui enregistré dans le cas des véhicules routiers, sont étudiés et testés en vraie grandeur sur des engins agricoles.

Mots-clés— robots mobiles, commande non-linéaire, commande prédictive, observateur, GPS, agriculture.

I. INTRODUCTION

La problématique du suivi autonome de trajectoire par des engins agricoles prend une part grandissante dans les préoccupations agronomiques et de nombreux systèmes de guidage automatique ont ainsi vu le jour (voir [1] et [2] pour des états de l’art concernant ces systèmes). En effet, la précision du guidage des engins représente des enjeux économiques et environnementaux forts : une perte de précision de l’ordre de $\pm 15\text{cm}$ lors par exemple de travaux d’épandage, consécutive à une perte d’attention du conducteur, engendre des zones de recouvrement ou de manquement très préjudiciables soit pour l’environnement (e.g. épandage de pesticides) soit pour le niveau de production (e.g. semis). De surcroît, l’attention soutenue demandée au conducteur rend la tâche de conduite inconfortable et fatigante, compte tenu des larges amplitudes horaires de travail. Les systèmes de guidage automatique actuellement développés obtiennent des résultats satisfaisants (quelle que soit la technologie retenue pour les capteurs) tant que l’hypothèse de roulement sans glissement est satisfaite. Dans le cas contraire (évolution en pente ou suivi de trajectoires courbes), la précision du guidage est fortement dégradée. Les travaux présentés ici sont focalisés sur la prise en compte du phénomène de glissement dans les lois de guidage, afin de conserver la même précision dans toutes les conditions de travail.

La Section II est consacrée à la modélisation d’un vé-

hicule en présence de glissement. Afin de s’affranchir des difficultés inhérentes à l’utilisation d’un large modèle dynamique, un modèle cinématique étendu est développé. Il permet de rendre compte des glissements du véhicule au moyen de 2 paramètres uniquement. L’instrumentation envisagée pour les véhicules, réduite à un unique capteur extéroceptif (GPS cinématique), ne permet pas de mesurer directement ces 2 paramètres. Aussi, une approche de type observateur est développée à la Section III afin de les estimer en temps-réel. Sur la base de ce modèle et de cette estimation, une loi de commande non-linéaire, exploitant les propriétés des systèmes chaînés, est alors construite à la Section IV. Elle assure une précision de suivi satisfaisante, excepté lorsque les conditions de glissement présentent des discontinuités (essentiellement lors des entrées et sorties de courbes). Dans ce dernier cas, les erreurs transitoires de suivi sont dues au temps de réponse de l’actionneur et à l’inertie du véhicule. A la Section V, des éléments de commande prédictive fonctionnelle sont introduits dans la loi de commande non-linéaire précédemment développée pour éliminer ces dernières erreurs. Les essais réels présentés à la Section VI montrent que l’ensemble de ces algorithmes permet d’obtenir la précision de suivi recherchée, i.e. $\pm 15\text{cm}$, quelles que soient les conditions d’adhérence et les trajectoires à réaliser.

II. MODÉLISATION

A. Notations

Lorsque les hypothèses de roulement sans glissement sont valides, il est usuel de décrire un véhicule de type voiture par un modèle bicycle (encore appelé modèle d’Ackermann), où le train avant et le train arrière sont chacun simplifiés en une unique roue virtuelle placée au centre des essieux. Ce modèle, représenté sur la Figure 1, peut être décrit à l’aide des notations suivantes :

- \mathcal{C} est la trajectoire à suivre,
- O est le centre de l’essieu arrière.
C’est le point du véhicule que l’on souhaite contrôler : on souhaite que O décrive la trajectoire \mathcal{C} .
- M est le point de \mathcal{C} le plus proche de O .
 M est considéré comme unique, ce qui est vrai lorsque O est suffisamment proche de \mathcal{C} .
- s est l’abscisse curviligne de M le long de \mathcal{C} .
 $c(s)$ représente la courbure de \mathcal{C} en ce point.
- y et $\tilde{\theta}$ sont respectivement l’écart latéral et angulaire

- du véhicule par rapport à la trajectoire de référence C .
- v est la vitesse linéaire du véhicule, considérée ici comme un paramètre, dont la valeur peut varier pendant le guidage.
- δ est l'angle de braquage de la roue avant virtuelle. C'est la seule variable de commande utilisée pour les applications de suivi de trajectoire.
- L est l'empattement du véhicule.

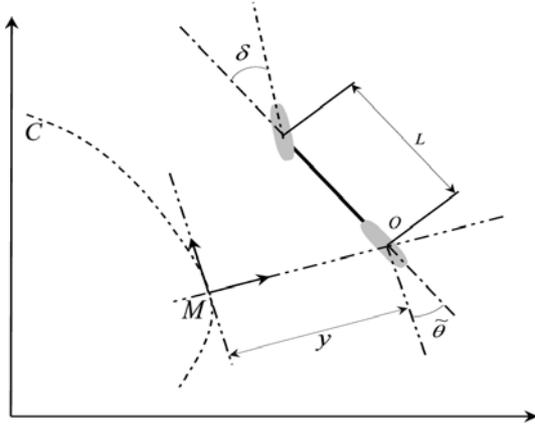


Fig. 1. Paramètres du modèle bicycle

On peut alors montrer (e.g. voir [3], [4]) que sous l'hypothèse de roulement sans glissement, l'évolution du véhicule par rapport à sa trajectoire de référence est décrite par :

$$\begin{cases} \dot{s} &= v \frac{\cos \bar{\theta}}{1-c(s)y} \\ \dot{y} &= v \sin \bar{\theta} \\ \dot{\bar{\theta}} &= v \left(\frac{\tan \delta}{L} - \frac{c(s) \cos \bar{\theta}}{1-c(s)y} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Il a été prouvé (voir [3]) que le modèle cinématique (1) pouvait être ré-écrit comme un système chaîné. En exploitant cette propriété, des lois de commande non-linéaires peuvent être construites pour réaliser avec de très bonnes performances des suivis de trajectoires sur un monde plat suffisamment adhérent (e.g. asphalté, cf. [5]) ou des suivis de lignes droites sur terrain naturel (cf. [4] pour le cas d'une application agricole).

B. Prise en compte du phénomène de glissement

B.1 Description des paramètres de glissement

Dans le cas du suivi de trajectoires sur terrain quelconque, l'hypothèse de roulement sans glissement n'est en général plus valide. Une commande basée sur le modèle cinématique (1) débouche alors sur des erreurs de suivi pouvant être importantes (e.g. voir [6]).

Pour prendre en compte le phénomène de glissement, une première possibilité peut consister à envisager l'utilisation de modèles dynamiques. Ces modèles permettent une description très complète du comportement d'un véhicule. Malheureusement, ils requièrent la connaissance de très nombreux paramètres géométriques et dynamiques (répartition des masses sur le véhicule, suspensions, ...) ainsi qu'un modèle de contact pneumatique / sol (le plus classique étant le modèle de Pacejka, voir [7]). Pour des applications sur les véhicules routiers, cette approche est parfois

retenue, car dans ce cas les différents paramètres peuvent être approximés avec une certaine robustesse. À l'inverse, dans le cas des véhicules tout-terrain, certains paramètres sont particulièrement difficiles à identifier, et de surcroît peuvent varier très largement tout au long du guidage (en particulier les paramètres décrivant le contact pneumatique / sol). L'utilisation d'un modèle dynamique nécessiterait donc de mettre en place de nouveaux capteurs pour estimer en temps-réel l'ensemble des paramètres, c'est-à-dire une instrumentation lourde et onéreuse, en contradiction avec le souhait de n'utiliser qu'un unique capteur extéroceptif. De plus, la large plage de variation des différents paramètres proposerait un problème délicat lors de l'élaboration des lois de commande.

Aussi, une seconde approche est proposée ici. Elle consiste à rester sur une modélisation cinématique. Le phénomène de glissement est alors pris en compte en introduisant dans ce type de modèle, le paramètre qui décrit de façon prépondérante le glissement dans les études dynamiques. Ce paramètre, noté β sur la Figure 2(a), est l'angle de dérive du pneumatique. Il correspond à la différence entre la direction que présenterait le vecteur vitesse dans le cas d'un roulement sans glissement (i.e. direction confondue avec l'orientation de la roue, cf. flèche rouge), et la direction que présente réellement le vecteur vitesse (représentée par une flèche verte). Dans le cas du modèle bicycle, il convient donc d'introduire 2 paramètres de glissement, notés β^F pour la roue avant et β^R pour la roue arrière, comme montré sur la Figure 2(b).

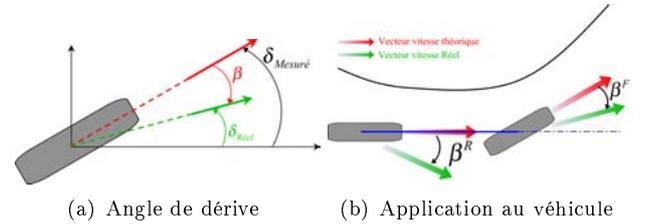


Fig. 2. Paramètres de glissement du modèle cinématique étendu

B.2 Modèle cinématique étendu

Pour introduire les angles de dérive dans les modèles cinématiques de véhicule, on peut utiliser l'analogie de tels systèmes avec les engins à 2 trains directeurs.

En effet, au vu de la Figure 2(b), l'évolution d'un véhicule bicycle en présence de glissement est équivalente à celle d'un engin à 2 roues directrices respectant les hypothèses de roulement sans glissement, et dont les angles de braquage avant et arrière seraient respectivement $\delta^F = \delta + \beta^F$ et $\delta^R = \beta^R$. Le modèle cinématique de tels engins à 2 roues directrices est connu (e.g. voir [8]). En remplaçant dans ces modèles δ^F et δ^R par leur expression en fonction de δ , β^F et β^R , on obtient alors un modèle cinématique de véhicule bicycle capable de rendre compte des phénomènes de glissement :

$$\begin{cases} \dot{s} &= v \frac{\cos(\bar{\theta} + \beta^R)}{1-c(s)y} \\ \dot{y} &= v \sin(\bar{\theta} + \beta^R) \\ \dot{\bar{\theta}} &= v \left[\cos \beta^R \frac{\tan(\delta + \beta^F) - \tan \beta^R}{L} - \frac{c(s) \cos(\bar{\theta} + \beta^R)}{1-c(s)y} \right] \end{cases} \quad (2)$$

Le modèle (2) est appelé dans la suite modèle cinématique étendu. Dans le cas où les glissements sont nuls (i.e. $(\beta^F, \beta^R) = (0, 0)$), on vérifie aisément que le modèle (2) redevient équivalent au modèle (1), comme attendu.

La capacité du modèle (2) à décrire fidèlement le comportement d'un véhicule en présence de glissement a été validée au travers de nombreuses expérimentations réalisées avec le tracteur agricole présenté à la Section VI, cf [6].

III. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DE GLISSEMENT

A. Principe de l'observation

L'instrumentation envisagée pour équiper le véhicule consiste en un unique capteur GPS cinématique, dont l'antenne est placée à la verticale du point O . Un tel capteur permet de mesurer le vecteur d'état du modèle (2), i.e. $[s \ y \ \hat{\theta}]^T$, mais pas les 2 paramètres de glissement β^F et β^R . Compte tenu de la variabilité des conditions d'adhérence en milieu naturel, ces 2 paramètres doivent donc être estimés en ligne.

β^F et β^R n'appartiennent pas au vecteur d'état du modèle (2) (et il est impossible de les y ajouter, puisqu'aucune expression analytique ne peut être proposée pour $\dot{\beta}^F$ et $\dot{\beta}^R$). Par conséquent, il n'est pas possible d'utiliser des techniques classiques d'observation, comme celles décrites dans [9]. Aussi, l'algorithme d'estimation développé ci-dessous propose d'envisager le problème d'observation comme le dual d'un problème de commande : les paramètres de glissement à observer sont perçus comme des variables de commande devant assurer la convergence de l'état d'un modèle (2) simulé vers les valeurs mesurées par le GPS, l'angle de braquage δ étant alors traité comme un paramètre connu. Ce point de vue peut être résumé par la Figure 3.

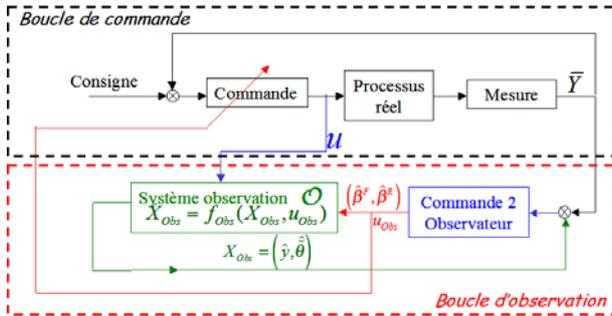


Fig. 3. Schéma de l'algorithme d'estimation et interaction avec la commande

Concrètement, à partir du modèle (2), on construit le système d'observation \mathcal{O} , défini par :

$$\mathcal{O} : \dot{X}_{Obs} = f_{Obs}(X_{Obs}, u_{Obs})$$

$$X_{Obs} = \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{\theta} \end{bmatrix} \quad u_{Obs} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}^R \\ \hat{\beta}^F \end{bmatrix} \quad \bar{Y} = \begin{bmatrix} y \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix}$$

$$f_{Obs}(X_{Obs}, u_{Obs}) = \begin{cases} v \sin(\hat{\theta} + \hat{\beta}^R) \\ v \left[\cos \hat{\beta}^R \frac{\tan(\delta + \hat{\beta}^F) - \tan \hat{\beta}^R}{L} \right. \\ \left. - \frac{c(s) \cos(\hat{\theta} + \hat{\beta}^R)}{1 - c(s)\hat{y}} \right] \end{cases} \quad (3)$$

u_{Obs} est le vecteur de commande, X_{Obs} est le vecteur d'état et \bar{Y} est la consigne vers laquelle l'état X_{Obs} doit converger.

Le problème de l'observation de β^F et β^R peut alors être formulé comme la recherche d'une loi de commande u_{Obs} permettant à X_{Obs} de converger vers \bar{Y} . En effet, si une telle convergence peut être obtenue, c'est qu'alors l'évolution de l'état X_{Obs} du modèle simulé \mathcal{O} reflète la réalité, et donc il en est de même pour les variables de glissement u_{Obs} qui sont appliquées à ce modèle.

B. Algorithme d'estimation

Pour construire la loi de commande recherchée, on introduit tout d'abord l'erreur d'estimation $\epsilon = X_{Obs} - \bar{Y}$. La dynamique de cette erreur est donnée par :

$$\dot{\epsilon} = f_{Obs}(\hat{X}_{Obs}, u_{Obs}) - \dot{\bar{Y}} \quad (4)$$

où $\dot{\bar{Y}}$ est la dérivée de la mesure, obtenue par dérivation numérique. Les valeurs des angles de dérive n'excédant pas en pratique quelques degrés, on ne commet pas d'erreur importante en linéarisant l'équation (4) autour d'une commande nulle :

$$\dot{\epsilon} = f_{Obs}(\hat{X}_{Obs}, 0) - \dot{\bar{Y}} + \frac{\partial f_{Obs}}{\partial u_{Obs}}(X_{Obs}, 0)u_{Obs} \quad (5)$$

Un calcul direct peut alors prouver (voir [6]) que $\frac{\partial f_{Obs}}{\partial u_{Obs}}(X_{Obs}, 0)$ est inversible dès que $v \neq 0$ et $\tilde{\theta} \neq \frac{\pi}{2} [\pi]$. Ces 2 conditions étant toujours satisfaites lors d'une application pratique de suivi de trajectoire, il est alors naturel de proposer la loi de commande suivante :

$$u_{Obs} = \left(\frac{\partial f_{Obs}}{\partial u_{Obs}}(X_{Obs}, 0) \right)^{-1} \left[G \cdot \epsilon - f_{Obs}(\hat{X}_{Obs}, 0) + \dot{\bar{Y}} \right] \quad (6)$$

où G est une matrice Hurwitz permettant de définir la dynamique de l'observateur. En effet, en reportant (6) dans (5), nous obtenons :

$$\dot{\epsilon} = G \cdot \epsilon \quad (7)$$

La loi de commande (6) constitue l'équation d'observation permettant d'estimer en temps-réel les paramètres de glissement β^F et β^R .

IV. LOI DE COMMANDE EN PRÉSENCE DE GLISSEMENT

A. Linéarisation exacte - système chaîné

Il a été établi, voir e.g. [10], que les modèles cinématiques de tous les robots mobiles construits sous des hypothèses de roulement sans glissement, peuvent être ré-écrits comme des systèmes chaînés. Cette propriété est donc également vraie pour le modèle cinématique étendu (2), puisque ce dernier est analogue à un modèle cinématique de robot mobile à 2 roues directrices respectant ces hypothèses de non glissement (cf. Section II).

Un calcul direct permet de vérifier que le modèle (2) peut effectivement être converti, sans aucune approximation, en un système chaîné (8) :

$$\begin{cases} a'_1 = 1 \\ a'_2 = a_3 \\ a'_3 = m_3 \end{cases} \quad (8)$$

en exploitant d'une part, les transformations d'état et de commande définies respectivement par (9) et (10) :

$$\Phi : (s, y, \tilde{\theta}) \rightarrow (a_1, a_2, a_3)^T \rightarrow (s, y, \tan(\tilde{\theta} + \beta^R)(1 - c(s)y))^T \quad (9)$$

$$M : \begin{aligned} \delta &\rightarrow m_3 = \frac{m_2}{m_1} \\ m_2 &= \frac{d}{dt} \left(\tan(\tilde{\theta} + \beta^R) [1 - c(s)y] \right) \\ m_1 &= v \frac{\cos(\tilde{\theta} + \beta^R)}{1 - c(s)y} \end{aligned} \quad (10)$$

et d'autre part, en substituant aux dérivées temporelles du modèle (2), des dérivées par rapport à l'abscisse curviligne $s = a_1$ (avec $a'_i = \frac{d a_i}{d s}$).

B. Expression de la loi de commande

L'objectif du suivi de trajectoire est d'assurer la convergence vers 0 de l'écart latéral $y = a_2$. La structure du système chaîné (8) conduit à proposer la loi de commande virtuelle suivante :

$$m_3 = -K_d a_3 - K_p a_2 \quad (K_p, K_d) \in \mathbb{R}^{+2} \quad (11)$$

puisqu'en reportant (11) dans (8), on obtient la dynamique d'erreur :

$$a_2'' + K_d a_2' + K_p a_2 = 0 \quad (12)$$

Cette équation différentielle assure tout d'abord que l'écart latéral $y = a_2$ converge vers 0, comme il était désiré. De plus, puisque les dérivées intervenant dans (12) sont des dérivées par rapport à l'abscisse curviligne, les gains K_p et K_d permettent de régler une distance de réponse (et non un temps de réponse). Par conséquent, les performances de la loi de suivi seront indépendantes de la vitesse du véhicule. Enfin, l'équation (12) assure également que $a_3 \rightarrow 0$, ce qui est équivalent à $\tilde{\theta} \rightarrow -\beta^R$. Cela signifie que le cap du véhicule compense l'éventuel glissement arrière. C'est exactement ce qui est observé en pratique lorsqu'on cherche à suivre une ligne droite sur une pente : le véhicule est obligé d'évoluer "en crabe".

La loi d'angle de braquage δ permettant de réaliser le suivi de trajectoire en présence de glissement s'obtient en inversant les transformations (9) et (10) dans la commande virtuelle (11). Son expression est fortement non-linéaire :

$$\delta = \arctan \left\{ \frac{L}{\cos \beta^R} \left[c(s) \frac{\cos \tilde{\theta}_2}{\alpha} + A \frac{\cos^3 \tilde{\theta}_2}{\alpha^2} \right] \dots \dots + \tan \beta^R \right\} - \beta^F \quad (13)$$

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_2 = \tilde{\theta} + \beta^R \\ \alpha = 1 - c(s)y \\ A = -K_d \alpha \tan \tilde{\theta}_2 - K_p y + c(s) \alpha \tan^2 \tilde{\theta}_2 \dots \dots + \frac{dc(s)}{ds} y \tan \tilde{\theta}_2 \end{cases}$$

Dans le cas où les glissements sont nuls (i.e. $(\beta^F, \beta^R) = (0, 0)$), on vérifie aisément que la loi de commande (13) est bien sûr équivalente à la loi classique construite sous l'hypothèse de roulement sans glissement (voir e.g. [4]).

Les expérimentations réalisées avec le tracteur agricole présenté à la Section VI, montrent que la loi de commande (13), alimentée par les mesures GPS et par l'estimation des glissements (6), assure effectivement une précision de suivi satisfaisante (voir [6]), à l'exception toutefois

des situations où les conditions de glissement présentent des discontinuités. Il s'agit essentiellement des entrées et sorties de courbe, où des erreurs transitoires de suivi sont enregistrées, dues au temps de réponse de l'actionneur et à l'inertie du véhicule.

V. COMMANDE PRÉDICTIVE

Pour limiter ces erreurs transitoires, il est nécessaire d'introduire une anticipation dans la loi de commande. L'approche proposée ici consiste à introduire des éléments de commande prédictive fonctionnelle dans la loi non-linéaire (13). La prédiction est construite à partir d'un modèle explicite de l'actionneur. Il apparaît qu'en utilisant ce seul modèle, la méthode permet aussi de compenser les effets inertiels de manière implicite.

A. Séparation de la loi de commande

Les glissements et les erreurs de suivi sont par essence imprévisibles. Le seul élément sur lequel on peut anticiper est la courbure de la trajectoire de référence. Pour que les algorithmes prédictifs puissent porter exclusivement sur cet élément, la loi de commande (13) est tout d'abord scindée en 2 termes additifs :

$$\delta = \delta_{Traj} + \delta_{Deviation}$$

$$\text{avec } \begin{cases} \delta_{Traj} = \arctan(u) \\ \delta_{Deviation} = \arctan\left(\frac{v}{1+uv+u^2}\right) - \beta^F \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{et } \begin{cases} u = \frac{L}{\cos \beta^R} c(s) \frac{\cos \tilde{\theta}_2}{\alpha} \\ v = \frac{L}{\cos \beta^R} A \frac{\cos^3 \tilde{\theta}_2}{\alpha^2} + \tan \beta^R \end{cases}$$

Ces deux termes présentent les significations suivantes :

- $\delta_{Deviation}$ (terme nul en l'absence d'erreur de suivi et de glissement) : ce terme permet d'asservir l'erreur de suivi à zéro compte tenu des écarts enregistrés et du glissement estimé. Les glissements et les écarts n'étant pas prévisibles, ce terme ne rentrera pas dans l'algorithme de prédiction.
- δ_{Traj} (terme non nul en l'absence d'erreur de suivi et de glissement) : ce terme dépend majoritairement de la courbure de la trajectoire de référence. Il permet de faire converger la courbure du véhicule vers celle de la trajectoire. celle-ci étant parfaitement connue, il est possible d'anticiper l'évolution de $c(s)$. L'algorithme de prédiction portera donc sur ce terme.

Le principe de la loi prédictive est résumé sur la Figure 4.

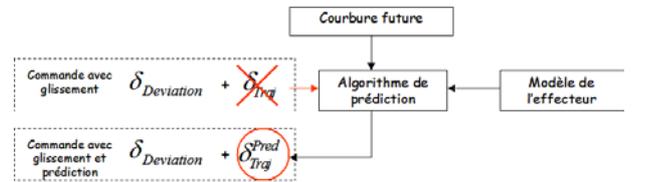


Fig. 4. Algorithme de suivi avec prédiction et glissement

B. Commande prédictive fonctionnelle

Les techniques de commande prédictive fonctionnelle, voir e.g. [11], utilisées ci-après pour apporter de l'anticipation au terme δ_{Traj} , sont schématisées sur la Figure 5. Elles exploitent les notations suivantes :

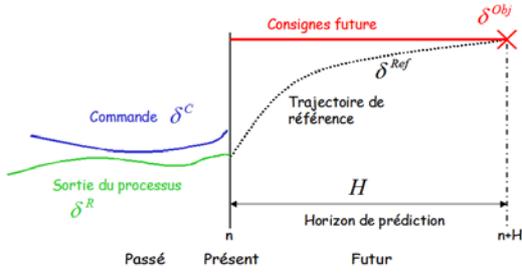


Fig. 5. Schéma décrivant la commande prédictive fonctionnelle

- δ^C : *Commande envoyée à l'actionneur*
Dans le cas présent où une séparation de la loi de commande a été réalisée, il s'agit uniquement de la partie δ_{Traj} définie par (14).
- δ^R : *Angle de braquage mesuré*
Cette variable constitue la sortie du processus, soit ici l'angle de braquage mesuré, en réponse à la commande δ^C qui lui a été envoyée.
- H : *Horizon de prédiction*
C'est la durée dans le futur sur laquelle est appliqué l'algorithme de prédiction. Dans notre cas, H est choisi constant, et multiple de la période d'échantillonnage notée T_e : $H = n_H T_e$.
- δ^{Obj} : *Objectif à l'horizon H*
C'est la valeur souhaitée de δ^R à l'horizon H . Dans notre cas, nous avons $\delta^{Obj} = \arctan(Lc(s_H))$, où $c(s_H)$ est la courbure de la trajectoire à l'horizon H .
- δ^{Ref} : *Trajectoire de référence*
 δ^{Ref} définit la dynamique avec laquelle l'automaticien souhaite que le processus rejoigne la consigne future δ^{Obj} . Classiquement, on choisit un premier ordre :

$$\delta_{[n+i]}^{Ref} = \delta^{Obj} - \gamma^i \{ \delta^{Obj} - \delta_{[n]}^R \} \quad (15)$$

où $i \in [0, n_H]$ et $\gamma \in [0, 1[$ est un paramètre permettant de définir la réactivité de la trajectoire de référence et donc de la commande.

- $\hat{\delta}^R$: *Sortie prédite du processus*
Cette variable est la réponse future du processus à une séquence de commande donnée. Cette réponse est calculée à partir d'un modèle du processus.

Le principe de la commande prédictive fonctionnelle consiste alors à déterminer la séquence de commande (dont la structure a été préalablement choisie) qu'il convient d'appliquer durant H pour minimiser l'écart quadratique, noté D , entre la sortie prédite du processus $\hat{\delta}^R$ et la trajectoire de référence δ^{Ref} :

$$D = \min_{\delta_{[n, \dots, n+H]}^C} \sum_{i=0}^{n_H} \left\{ \hat{\delta}_{[n+i]}^R - \delta_{[n+i]}^{Ref} \right\}^2 \quad (16)$$

Le premier élément de la séquence de commande ainsi obtenue est alors appliqué effectivement sur le processus. Le comportement de l'algorithme prédictif est étroitement lié au choix de H . Intuitivement, H doit être de l'ordre de grandeur du temps de réponse du processus (i.e. de l'actionneur dans notre cas). Toutefois, en augmentant H , on peut augmenter l'effet anticipatif de la commande, et compenser dans une certaine mesure les effets liés à l'inertie du véhicule. Plus de détails sur ce sujet sont donnés dans [6].

C. Loi de commande prédictive

On notera δ_{Traj}^{Pred} , le premier élément de la séquence de commande déterminée lors de la minimisation de (16). L'expression de la loi de commande non-linéaire, prenant en compte les glissements et incluant une prédiction sur les variations de courbure de la trajectoire de référence est alors (voir aussi Figure 4) :

$$\delta = \delta_{Traj}^{Pred} + \delta_{Deviation} \quad (17)$$

VI. RÉSULTATS DE SUIVIS RÉELS

A. Dispositif expérimental

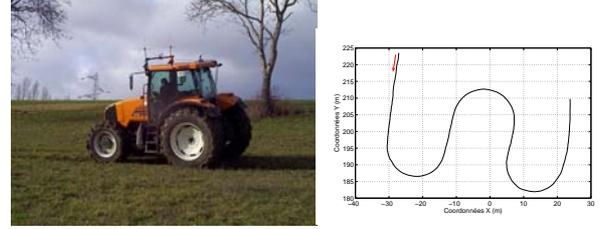


Fig. 6. Véhicule expérimental et trajectoire à suivre sur terrain plat

Le véhicule utilisé pour les validations expérimentales est un tracteur CLAAS Ares 640, présenté sur la Figure 6(a). Il est équipé d'un GPS cinématique temps réel (RTK). Plus précisément, il s'agit d'un modèle Aquarius de la société Thales, permettant une localisation absolue avec une précision de $\pm 2\text{cm}$, à une fréquence de 10 Hz.

Deux résultats expérimentaux sont reportés ci-après. Tout d'abord, le suivi de la trajectoire courbe présentée sur la Figure 6(b) a été effectué à une vitesse de 8 km.H^{-1} sur un champ plat. Ensuite, le suivi d'une ligne droite sur un terrain présentant une pente d'environ 15% a été testé à la même vitesse.

B. Résultat lors de virages successifs

La loi de commande (17) (avec prise en compte des glissements et prédiction sur la courbure) a été implémentée sur le véhicule. L'erreur latérale enregistrée lors du suivi de la trajectoire 6(b) est présentée sur la Figure 7 en trait mixte vert. Elle est comparée aux résultats obtenus avec la loi de commande (13) (sans prédiction, en trait pointillé rouge) et la loi de commande ne prenant pas en compte les glissements (en trait plein noir).

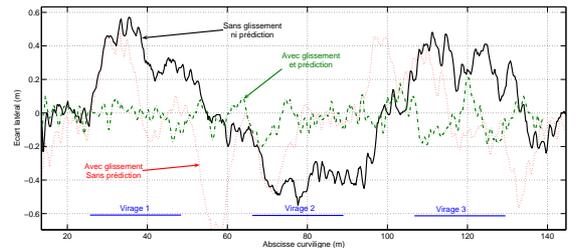


Fig. 7. Résultats de suivis réel lors d'une succession de demi-tours

En premier lieu, cette figure montre clairement l'intérêt de la prise en compte des glissements : en effet, les

2 lois prenant en compte ce phénomène permettent la convergence du véhicule vers la trajectoire de référence, du moins pendant les phases où les conditions de glissement sont constantes (c'est-à-dire pendant les différents virages). Ce n'était absolument pas le cas lorsque les glissements n'étaient pas intégrés dans la loi de commande : la courbe en trait plein noir présente des erreurs d'environ 40cm lors de chaque virage.

L'intérêt d'une prédiction sur la courbure de la trajectoire de référence apparaît également clairement : à chaque variation de courbure (i.e à chaque entrée et sortie de virage) la loi de commande sans prédiction (13) présente des erreurs transitoires de suivi. La prédiction introduite dans la loi (17) permet de réduire très significativement (voire d'annuler complètement) ce phénomène. L'erreur de suivi reste alors constamment dans la plage désirée de $\pm 15\text{cm}$. En outre, l'algorithme de prédiction permet d'adoucir considérablement la prise de virage (la consigne sur l'angle de braquage est moins brusque) et le comportement du véhicule est plus confortable pour l'utilisateur.

C. Résultat en pente

Un cas particulièrement défavorable est le suivi d'une ligne droite en pente. La trajectoire de référence étant une droite, l'algorithme prédictif n'a pas d'utilité. Aussi, la Figure 8 compare uniquement les erreurs enregistrées avec la loi globale (17) et la loi sans prédiction ni glissement (même conventions de traits et de couleurs que précédemment).

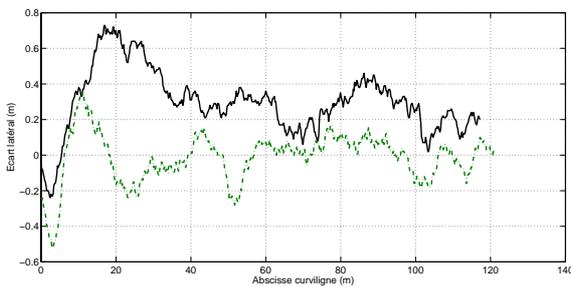


Fig. 8. Résultats de suivis réel en pente

La loi de commande classique, ne prenant pas en compte les glissements, présente une erreur de suivi importante (environ 30cm). De surcroît, des modifications ponctuelles, représentatives des variations des conditions d'adhérence au contact roue-sol, sont également enregistrées. A l'inverse, la loi de commande basée sur le modèle (2) est capable d'estimer une valeur pertinente des paramètres de glissement, ce qui permet de ramener le véhicule sur sa trajectoire de référence. Toutefois, les mêmes variations rapides des conditions d'adhérence entraînent quelques dépassements ponctuels, d'amplitude toutefois limitée (comme autour de l'abscisse 50m). Ils sont dus aux temps de réponse de la loi de commande et des actionneurs, étant donné que dans cette situation, nous n'avons pas d'éléments qui nous permettraient d'anticiper. La précision du suivi reste cependant très proche de l'objectif de $\pm 15\text{cm}$.

VII. CONCLUSION

Cet article présente une approche globale basée sur différents principes de commande, permettant de limiter de façon significative les effets de plusieurs phénomènes inter-

venant en robotique mobile hors route. Les phénomènes de glissement ont été pris en compte via la conception d'un modèle cinématique étendu, sur la base duquel des estimateurs de glissements et une loi de commande non-linéaire ont pu être construits. Les dépassements transitoires induits par les actionneurs et par l'inertie du véhicule ont, quant à eux, été adressés via la commande prédictive fonctionnelle. Cette approche globale permet d'obtenir un niveau de précision en suivi de trajectoire comparable à celui obtenu dans de bonnes conditions d'adhérence, quelles que soient les trajectoires à suivre et quelles que soient la géométrie ou les conditions d'adhérence du terrain d'évolution. Ainsi, lors des expérimentations en vraie grandeur, la précision requise par les travaux agricoles, i.e. $\pm 15\text{cm}$, est atteinte quasiment en permanence pour les deux cas très défavorables de suivi présentés ici (succession de demi-tours et suivi en pente).

L'instrumentation envisagée pour le véhicule consistait ici en un unique capteur GPS. Malheureusement, l'antenne GPS située sur le toit de la cabine, est soumise à des oscillations induites par l'irrégularité du sol (trou, bosse, ...). Cela a pour effet de dégrader la précision des mesures, et donc de l'estimation des glissements. Nous travaillons actuellement sur l'ajout de capteurs bas-coût (de type gyromètre, accéléromètre, inclinomètre, ...) qui permettraient d'augmenter la confiance dans les mesures.

Enfin, nous travaillons également pour introduire explicitement l'inertie du véhicule dans l'algorithme de prédiction. En effet, les équations dynamiques montrent qu'il est possible de construire un modèle décrivant les effets inertiels au sein du modèle de l'actionneur.

RÉFÉRENCES

- [1] R. Keicher et H. Seufert. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1) :169–194, 2000.
- [2] J.F. Reid, Q. Zhang, N. Noguchi, et M. Dickson. Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1) :155–167, 2000.
- [3] C. Samson. Control of chained system. *IEEE Transaction on Automatic Control*, (40) :64–77, 1995.
- [4] B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet, et M. Berducat. Automatic guidance of a farm vehicle relying on a single CP-GPS. *Autonomous Robots*, 13(2) :53–71, 2002.
- [5] B. Thuilot, J. Bom, F. Marmoiton, et P. Martinet. Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor. *Int. Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV)*, Lisbonne (Portugal), 2004.
- [6] R. Lenain. *Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissement*. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II (France), Nov. 2005.
- [7] E. Bakker, L. Nyborg, et H.B. Pacejka. Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies. *Congrès International de la société des ingénieurs de l'automobile (SAE)*, pages 2190–2204, Warrendale, Pensylvanie (USA), 1987.
- [8] A. Micaelli et C. Samson. Trajectory tracking for unicycle-type and two-steering-wheels mobile robots. *INRIA technical report*, (2097), 1993.
- [9] J. Stéphant. *Contribution à l'étude et à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne (France), Déc. 2004.
- [10] W. Leroquais et B. d'Andréa-Novel. Transformations of the kinematic models of restricted mobility wheeled mobile robots with a single platform into chained form. *Conference on Decision and Control*, volume 4, pages 3811–3816, New Orleans, Louisiana (USA), 1995.
- [11] J. Richalet. *Pratique de la commande prédictive*. Traité des nouvelles technologies série automatique. Hermes, Paris, 1993.