

Suivi de trajectoire haute précision pour les véhicules tout-terrains

Roland Lenain[◇], Benoit Thuilot[★], Christophe Cariou[◇], Philippe Martinet[★]

[◇] Cemagref

[★] LASMEA

BP50085 - 24, av. des Landais

24, av. des Landais

63172 Aubière Cedex France

63177 Aubière Cedex France

roland.lenain@cemagref.fr

benoit.thuilot@lasmea.univ-bpclermont.fr

17 juin 2005

Résumé

Si la problématique du suivi de trajectoire de robots mobiles sous hypothèse de roulement sans glissement des roues sur le sol est aujourd'hui satisfaisante dans certaines conditions favorables (pas d'annulation de la vitesse, bonnes conditions d'adhérence, ...), il n'en va pas de même pour les véhicules évoluant en milieu naturel. En effet, les faibles propriétés d'adhérence des terrains d'évolution ne permettent pas une transposition directe des algorithmes de suivi, menant alors à des pertes importantes de précision lorsque l'hypothèse de roulement sans glissement est violée. En outre les propriétés géométriques et dynamiques des engins évoluant sur de tels terrains (inertie, garde au sol, ...) ainsi que les actionneurs employés génèrent des phénomènes de retard augmentant lors de phases transitoires, les erreurs de suivi enregistrées. Dans cet article plusieurs développements théoriques (basés sur des principes d'observateur, de commande adaptative et 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 prédictive, commande adaptative, observateurs, systèmes chaînés, GPS, agriculture.

1 Introduction

L'aide à la conduite de véhicule est un des enjeux majeur de la robotique, mobilisant de nombreux travaux de recherches, en particulier dans le domaine des véhicules de tourisme (voir [4]). De nombreuses voies de recherches dans ces domaines sont envisagées, que ce soit pour l'amélioration du comportement des véhicules dédiés à la sécurité (comme les systèmes de contrôle de trajectoire [3]) ou le confort des utilisateurs (comme la régulation de vitesse, voir [11]). Pour certains domaines d'application, l'automatisation complète de la conduite peut être vue comme un objectif. On parle alors de robots mobiles autonomes, comme ceux utilisés pour l'exploration de zones dangereuse (voir par exemple [8]). Si pour certaines tâches (par exemple l'exploration), la précision n'est pas la principale exigence, celle-ci peut s'avérer dans certains cas primordiale.

C'est en particulier vrai pour la robotique agricole, où les précisions des travaux ont des retombées importantes compte tenu des contraintes environnementales et économiques. En ce sens, les dispositifs d'aide à la conduite sont d'une grande utilité pour l'agriculteur, et l'automatisation de la tâche de guidage des machines tractées présente un intérêt considérable. Plusieurs dispositifs sont déjà proposés par les constructeurs, basées sur différentes technologies (comme CLAAS, [2], John Deere, [7], ou encore [9]). De telles solutions sont en général basées sur l'hypothèse de roulement sans glissement des roues sur le sol, présentant de très bon résultats dans les cas favorables (suivi de ligne droite sur terrain plat). Toutefois, les spécificités des champs (géométrie, relief, ...) ne permettent pas toujours aux hypothèses classiques d'être vérifiées (trajectoire courbes ou terrain en pente), dégradant ainsi de façon considérable la précision

du suivi dans des proportions non acceptables pour les travaux considérés (voir [13]).

Dans cet article, un algorithme global de suivi de trajectoire est proposé afin de conserver une précision de quelques centimètres (du même ordre de grandeur que la précision des capteurs extéroceptifs embarqués). Cet algorithme est basé sur une approche mono-capteur (ici le capteur GPS cinématique), ne nécessitant pas l'ajout de capteur complémentaire sur le véhicule. Celui-ci permet de s'affranchir des phénomènes augmentant les erreurs de suivi, due aux limites de validité de l'hypothèse de roulement sans glissement, mais également les phénomènes de retard générés par l'inertie importante de ce type de véhicule et les actionneurs requis pour ce type d'application.

Dans une première partie, la modélisation du véhicule en présence de glissement est envisagée et un modèle cinématique étendu est proposé. L'alimentation de ce modèle, basé sur des techniques d'observation est décrite, afin d'estimer à tout moment l'effet des glissements sur le véhicule. La commande non linéaire de ce nouveau modèle est ensuite étudiée, permettant une erreur de suivi réduite sous l'hypothèse de variation quasi statique des conditions de suivi (essentiellement courbure de la trajectoire de référence lentement variable...). Enfin, une action prédictive est intégrée à la loi de commande, permettant de réduire les dépassements lors des transitoires de courbure. L'efficacité de l'ensemble de l'algorithme est finalement validé au travers d'essais réels, permettant une précision de suivi comprise dans un intervalle de $\pm 15cm$, conforme aux attentes des agriculteurs, quelles que soient les conditions d'adhérences et les trajectoires à exécuter.

2 Modélisation

2.1 Notations

Dans un premier temps, le schéma classique d'un véhicule type voiture sous hypothèse de roulement sans glissement (modèle d'Ackermann) est représenté sur la figure 1. Le véhicule est considéré comme étant un modèle bicycle (1 roue considérée comme le train avant et une pour le train arrière).

- $\mathcal{C}$ est la trajectoire à suivre,
- O est le centre de l'essieu arrière,
- 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 $\mathcal{C}$, et $c(s)$ 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 $\mathcal{C}$ (voir Figure 1).
- δ est l'angle de braquage virtuel de la roue avant.
- v est la vitesse linéaire du véhicule, considérée ici comme un paramètre, dont la valeur peut varier pendant le guidage.
- L est l'empattement du véhicule.

En utilisant cette modélisation il est possible de définir les équations du mouvement du véhicule considéré comme un bicycle, sous hypothèse de roulement sans glissement, donnée par l'équation (1). Un tel modèle permet de caractériser le mouvement du véhicule tant que l'hypothèse d'application est vérifiée. En règle général, ce modèle est suffisant pour concevoir une commande dédiée au véhicule évoluant en ligne droite sur terrain plat ou pour le suivi de trajectoire sur monde plat et suffisamment adhérent (asphalte) avec un véhicule léger (le poids du véhicule générant une déformation du pneumatique assimilable au phénomène de glissement, alors appelé "pseudo-glissement") comme réalisé par [15].

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

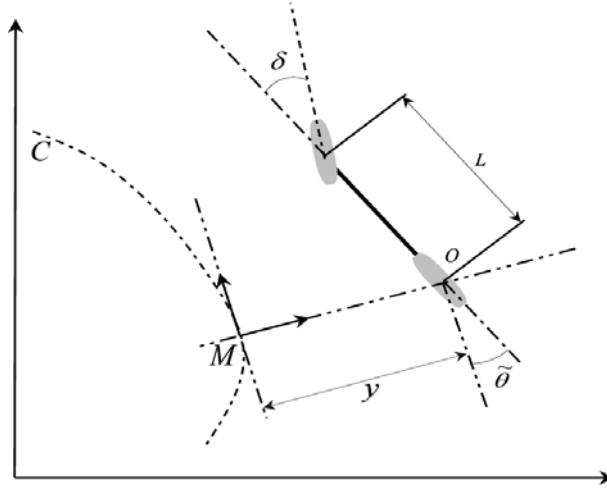


FIG. 1 – Paramètres du modèle d'Ackermann

2.2 Prise en compte du phénomène de glissement

2.2.1 Description des paramètres de glissement

Dans le cas du suivi de trajectoire sur terrain quelconque, l'hypothèse de roulement sans glissement n'est en général plus valide. Une commande basée sur le modèle (1) débouche alors sur des erreurs de suivi pouvant être importantes. Afin de prendre en compte ce phénomène, une première possibilité peut consister à envisager l'utilisation d'une approche dynamique, permettant de caractériser ce phénomène. Toutefois, une modélisation dynamique valide pour tenir compte des glissements doit être basée sur la description du contact pneu sol (type Pacejka, voir [1]).

Toutefois, de telles modélisations nécessitent l'identification de nombreux paramètres (permettant entre autre de définir les forces au contact pneu/sol), qui dans le cas des véhicules tout terrains sont variables (contrairement au véhicule routier où une partie des inconnus du modèle peuvent être approximées avec une certaine robustesse). Il serait donc nécessaire de mettre en place de nouveaux capteurs afin d'extraire l'ensemble de ces paramètres, nécessitant une instrumentation lourde et onéreuse. Afin de privilégier l'utilisation d'un unique capteur extéroceptif et de simplifier l'expression des lois de commande, un modèle cinématique étendu est envisagé, basé sur l'extraction de paramètres issu d'une étude dynamique du véhicule et intervenant de façon prépondérante dans la description du phénomène physique : les angles de dérive des pneumatique.

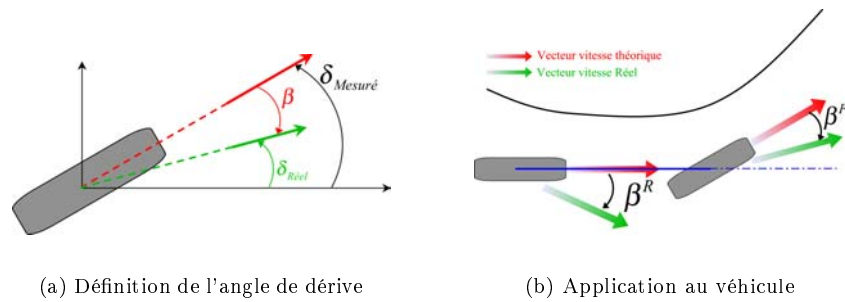


FIG. 2 – Paramètres de glissement du Modèle Orienté Pneumatique

Cette notion est décrite graphiquement sur la figure 2(a) et représente la différence entre la direction du vecteur vitesse théorique (flèche rouge), du pneumatique définie par l'orientation de celui-ci et la

direction du vecteur vitesse réelle (représenté par une flèche verte). Considérant que nous avons ici un modèle à deux pneumatiques, le modèle sous hypothèse de roulement sans glissement est ici étendu à deux angles de dérive : β^F pour le train avant et β^R pour le train arrière (comme représenté sur la figure 2(b)).

2.2.2 Modèle cinématique étendu

Sous l'hypothèse que le glissement peut être entièrement décrit par la considération de ces deux paramètres, il est possible de recalculer d'un point de vue cinématique les équations d'évolution du véhicule en incluant ces deux angles. Le modèle (2) est ainsi défini et constitue le modèle cinématique étendu du véhicule avec prise en compte des glissements.

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

Étant donné la structure de cette équation, ce modèle est équivalent à un modèle de véhicule à deux trains directeur évoluant sous hypothèse de roulement sans glissement. En effet, si on considère le changement de variable $\delta_1 = \delta + \beta^F$ et $\delta_2 = \tilde{\theta} + \beta^R$, ce modèle peut être mis sous la même forme que dans [6], qui définit un véhicule doté deux angles de braquage (δ_1 pour l'avant et δ_2 pour l'arrière).

3 Estimation des paramètres de glissement

3.1 Principe de l'observation

Afin de pouvoir utiliser le modèle cinématique étendu (2), il est nécessaire de pouvoir estimer les deux paramètres de glissement. Compte tenu de la variabilité des conditions d'adhérence en milieu naturel, et de la dépendance de ces paramètres à l'état du véhicule $X = [y \ \tilde{\theta}]^T$, il est nécessaire de mettre en place une estimation en ligne. Bien qu'il soit possible de réaliser un calcul direct de ces paramètres par comparaison entre l'évolution réelle du véhicule (mesure) et l'évolution de ce dernier, calculée par l'intermédiaire du modèle négligeant les glissements (1), comme effectué dans [5], une méthode basée sur la notion d'observateur est ici développée.

Pour cette dernière, aucun modèle d'évolution des glissements (permettant d'accéder aux dérivées premières : $\dot{\beta}^F$ et $\dot{\beta}^R$) n'est disponible. Il s'avère de fait délicat d'envisager l'intégration des deux dérivées des pneumatiques dans l'état du véhicule (menant ainsi à $X = [y \ \tilde{\theta} \ \beta^R \ \beta^F]^T$) permettant de mettre en place des techniques classiques d'observation, comme décrite dans [14].

Par conséquent, l'algorithme d'estimation mis en place, tout en reprenant en substance les principes de l'observation classique, envisage le problème d'observation comme le dual du problème de commande. Les paramètres de glissement à observer seront donc ici perçus comme des variables de commande permettant de faire converger la sortie du modèle 2 vers la mesure faite de celui-ci, en considérant l'angle de braquage δ comme un paramètre du modèle. Ce point de vue peut être résumé par la figure 3.

Compte tenu de cette présentation, l'algorithme d'observation est ici apparenté à un problème de commande du modèle cinématique étendu intervenant en parallèle de la boucle de commande principale. Pour l'observation, le système (3) est considéré, où u_{Obs} (paramètres de glissement) est le vecteur de commande, X_{Obs} (sorties estimées) est le vecteur d'état et $\tilde{Y} = H[y \ \tilde{\theta}]^T$ (la mesure des écarts du véhicule à la trajectoire) est considéré comme la consigne vers lequel l'état X_{Obs} doit converger.

$$\begin{aligned} X_{Obs} &= \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{\tilde{\theta}} \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad u_{Obs} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}^R \\ \hat{\beta}^F \end{bmatrix} \\ f_{Obs}(X, (\beta^F, \beta^R)) &= \begin{cases} f_1 &= v \sin(\tilde{\theta} + \beta^R) \\ f_2 &= v \left[\cos \beta^R \frac{\tan(\delta + \beta^F) - \tan \beta^R}{L} - c \frac{\cos(\tilde{\theta} + \beta^R)}{1 - cy} \right] \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

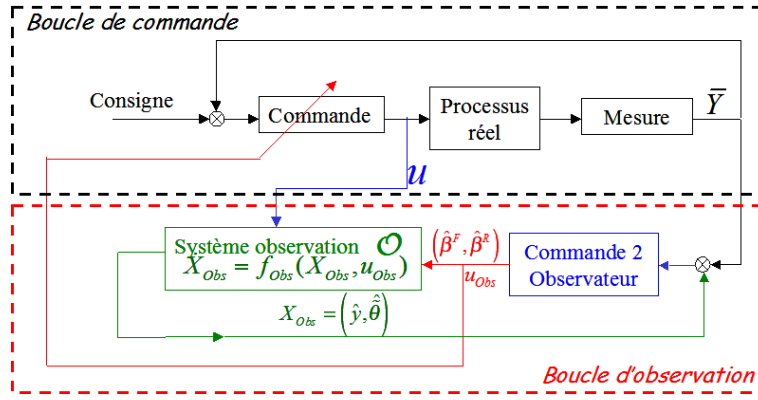


FIG. 3 – Schéma de l'algorithme d'estimation et interaction avec la commande

Sous le point de vue décrit par (3), le problème dual de l'observation de (β^F, β^R) peut être formaliser comme suit. Il s'agit ici de trouver la commande (paramètre de glissement) assurant la convergence de X_{Obs} vers la mesure $\bar{Y}$.

3.2 Algorithme d'estimation

Ce problème de commande est résolu en considérant l'erreur d'estimation notée ϵ et définie par $\epsilon = X_{Obs} - \bar{Y}$. Sous cette définition, la dynamique de l'erreur d'observation peut être définie comme suit :

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

où $\dot{\bar{Y}}$ est la dérivée de la mesure effectuée, obtenue ici par dérivation numérique. Ce qui, en linéarisant autour de la commande nulle (considérant que les valeurs des dérivées n'excèdent pas en pratique quelques degrés) nous permet d'écrire :

$$\dot{\epsilon} = f_{Obs}(\hat{X}_{Obs}, 0_{2 \times 1}) - \dot{\bar{Y}} + \frac{\partial f_{Obs}}{\partial u}(X_{Obs}, 0)u_{Obs} \quad (5)$$

D'autre part, la convergence de ϵ vers zéro peut être obtenu par l'équation différentielle (6), sous condition que la matrice G soit Hurwitz.

$$\dot{\epsilon} = G \cdot \epsilon \quad (6)$$

En injectant l'expression de $\dot{\epsilon}$ définie par (5) condition de convergence (6), la loi de commande pour u_{Obs} peut être calculée :

$$u_{Obs} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}^R \\ \hat{\beta}^F \end{bmatrix} = \frac{\partial f_{Obs}}{\partial u}|_{(X_{Obs}, 0)}^{-1} \left[G \cdot \epsilon - f_{Obs}(\hat{X}_{Obs}, 0_{2 \times 1}) + \dot{\bar{Y}} \right] \quad (7)$$

La loi de commande (7), constitue l'équation d'observation permettant de calculer les paramètres de glissement manquants, puisque ceux-ci assurent la convergence du modèle vers les données expérimentales (mesure). La matrice Hurwitz G permet quant à elle de définir la dynamique de l'observateur (temps de réponse des données estimées à une variation des données mesurées), permettant ainsi de filtrer les données estimées, et par voie de conséquence, les glissements calculés.

4 Loi de commande en présence de glissement

4.1 Linéarisation exacte - système chaîné

Au vue des chapitres précédents, un modèle de véhicules (2), alimenté par l'algorithme d'estimation (7) capable de caractériser le comportement du véhicule en présence de glissement de façon précise, est

disponible. Par ailleurs, le modèle étendu est analogue à une classe de robot non holonome (robot mobile à deux trains directeurs), qui, d'après [12] peuvent être mis sous forme chaînée (i.e linéarisation exacte). En effet, sous les changements de variables Φ pour l'état et M pour la commande, définis par (8), le système (2) peut être mis sous la forme (9), constituant une forme linéaire pour le modèle cinématique étendu.

$$\begin{aligned} \Phi &: (s, y, \tilde{\theta}) \rightarrow (a_1, a_2, a_3)^T = \left(s, y, \tan(\tilde{\theta} + \beta^R) (1 - c(s)y) \right)^T \\ M &: (s, y, \tilde{\theta}, \delta) \rightarrow m_3 = \frac{m_2}{m_1} \\ &\quad \begin{cases} m_2 = \frac{d}{dt} \left(\tan(\tilde{\theta} + \beta^R) [1 - c(s)y] \right) \\ m_1 = \frac{v \cos(\tilde{\theta} + \beta^R)}{1 - c(s)y} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

Dans (9), $a'_{n=1..3}$ définit la dérivée de $a_{n=1..3}$ par rapport à l'abscisse curviligne, définissant ainsi un système indépendant de la vitesse du v du véhicule.

$$\begin{cases} a'_1 = 1 \\ a'_2 = a_3 \\ a'_3 = m_3 \end{cases} \quad (9)$$

4.2 Expression de la loi de commande

L'objectif du suivi de trajectoire est d'assurer la convergence de l'écart latéral $y \equiv a_2$ vers 0, ce qui est obtenu classiquement par l'application de la commande virtuelle (10).

$$m_3 = -K_d a_3 - K_p a_2 \quad (K_p, K_d) \in \mathbb{R}^{+2} \quad (10)$$

où K_p, K_d peuvent être assimilés à des gains proportionnel et dérivé d'une loi de commande PD. Une telle expression mène à l'équation différentielle (11).

$$a''_2 + K_d a'_2 + K_p a_2 = 0 \quad (11)$$

Cette équation différentielle, outre le fait qu'elle permet la convergence de l'écart latéral vers 0 ($a_2 \rightarrow 0$), impose également la convergence $a_3 \rightarrow 0$. Cette deuxième convergence implique que $\tilde{\theta} \rightarrow -\beta^R$, ce qui signifie d'un point de vue physique que le cap du véhicule doit compenser le glissement arrière. Ceci formalise au sein de la loi de commande un phénomène observé naturellement lors du contrôle de véhicule en pente : le comportement "en crabe" nécessaire au contrôle d'une trajectoire. Enfin, en substituant la définition de m_3 donnée par (9) dans la commande virtuelle (10), l'expression de la loi de commande non linéaire appliquée au véhicule (12) peut donc être définie. Nous pouvons noter que si nous appliquons des glissement nuls, cette loi de commande est rigoureusement égale à la loi de commande définie sous l'hypothèse de roulement sans glissement, décrite dans [16].

$$\begin{aligned} \delta_{MOP} &= \arctan \left\{ \frac{L}{\cos \beta^R} \left[c(s) \frac{\cos \tilde{\theta}_2}{\alpha} + A \frac{\cos^3 \tilde{\theta}_2}{\alpha^2} \right] + \tan \beta^R \right\} - \beta^F \\ \text{avec } \begin{cases} \tilde{\theta}_2 &= \tilde{\theta} + \beta^R \\ \alpha &= 1 - c(s)y \\ A &= -K_d \alpha \tan \tilde{\theta}_2 - K_p y + c(s) \alpha \tan^2 \tilde{\theta}_2 + \frac{dc(s)}{ds} y \tan \tilde{\theta}_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

Si cette loi de commande permet, par l'utilisation du modèle cinématique étendu et de l'algorithme d'estimation, de compenser le phénomène de glissement, elle n'en néglige pas moins le problème de retard lié d'une part à l'actionneur bas niveau et d'autre part à l'inertie du véhicule, souvent non négligeable dans le cadre des engins tout terrain. Ce retard entraîne un phénomène de dépassement lors des phases transitoires de glissement, en général induit par une variation rapide de courbure lors du suivi de courbure sur terrain plat.

5 Commande prédictive

Afin de tenir compte de ce phénomène de retard et de conserver le même niveau de précision, malgré les transitoires de courbures, un algorithme prédictif, associé à la loi de commande (12) est appliqué. Celui repose sur les deux assertions suivantes. Premièrement, la trajectoire de référence est complètement connue à tout moment. Par conséquent, la courbure future peut être déduite et finalement la consigne future devant être atteinte en l'absence de glissement (asservissement de la courbure du véhicule à la courbure de la trajectoire). Deuxièmement, un modèle de la réponse du bas niveau est connu, ce qui permet de prédire avec précision la réponse de celui-ci à une consigne connue.

Ainsi, connaissant à la fois la consigne future et la réponse de l'effecteur, il est possible d'anticiper la variation de courbure intervenant dans le futur, et donc la consigne à appliquer à l'actionneur pour annuler son retard et donc le dépassement de trajectoire induit sur le véhicule.

5.1 Séparation de la loi de commande

Compte tenu du fait que lorsque les glissements demeurent constants ou lentement variables, la loi de commande (12) autorise un suivi de trajectoire avec une précision satisfaisante, l'algorithme de prédiction, défini par la suite, ne sera pas appliqué à l'ensemble de la commande. En effet, en considérant l'expression de la commande, il est possible de la décomposer en deux termes additifs, comme présenté par (13).

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_{Traj} + \delta_{Deviation} \\ \text{avec } \begin{cases} \delta_{Traj} &= \arctan(u) \\ \delta_{Deviation} &= \arctan\left(\frac{v}{1+uv+u^2}\right) - \beta^F \end{cases} \\ \text{et } \begin{cases} u &= \frac{L}{\cos \beta^R} c(s) \frac{\cos \theta_2}{\alpha} \\ v &= \frac{L}{\cos \beta^R} A \frac{\cos^3 \theta_2}{\alpha^2} + \tan \beta^R \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

Ces deux termes remplissent des rôles bien distincts et complémentaires, comme précisé ci-après :

- $\delta_{Deviation}$ (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 écarts générés par des phénomènes non modélisés n'étant pas prévisibles, il est totalement inutile d'intégrer ce terme dans un algorithme prédictif. Celui-ci restera donc inchangé par 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 à suivre. Celui-ci assure l'égalité entre la courbure de la trajectoire et la courbure du véhicule. Pour le moment, il n'est pas réalisé à proprement parlé de loi de commande pour faire converger ces courbures. Cet asservissement est donc réalisé par ce terme, de façon directe. Sachant que la trajectoire est totalement connue, l'algorithme de prédiction remplacera ce terme, avec comme objectif la convergence de la courbure du véhicule vers la courbure de la trajectoire.

Ainsi, l'algorithme prédictif s'appliquera uniquement à la composante δ_{Traj} associée à l'asservissement de la courbure du véhicule à la courbure de la trajectoire, comme représenté sur le schéma présentée de la figure 4.

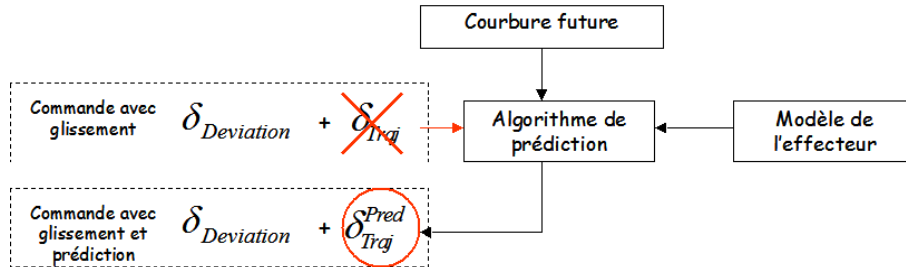


FIG. 4 – Algorithme de suivi avec prédiction et glissement

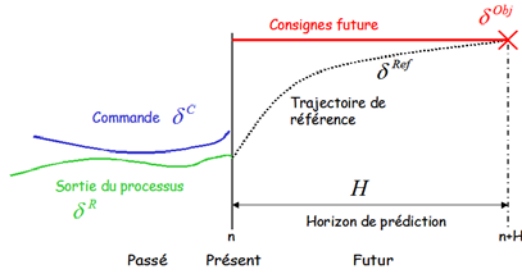
5.2 Commande prédictive fonctionnelle

Une fois cette séparation effectuée, appliquons l'algorithme de commande prédictive fonctionnelle définie dans [10] au terme δ_{Traj} , afin de calculer un terme prédictif associé, noté dans la suite δ_{Traj}^{Pred} . Celui-ci utilise les notations suivantes, s'articulant autour du schéma 5(a) :

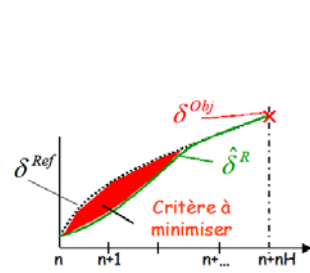
- δ^C : Commande envoyée à l'actionneur. Dans le cas présent où une séparation de la loi de commande a été réalisée, il s'agit uniquement de la partie "trajectoire" (δ_{Traj}) définie par (13).
- δ^R : Angle de braquage mesuré. Cette variable constitue la sortie du processus, soit classiquement l'angle de braquage mesuré, en réponse à la commande δ^C envoyé à l'effecteur.
- H : Horizon de prédiction. C'est le temps (constant dans notre cas) dans le futur sur lequel est appliqué l'algorithme de prédiction. Ce paramètre a une grande importance pour l'application sur le comportement de l'algorithme prédictif. Dans le cas discret qui nous occupe, l'horizon de prédiction est choisi comme un entier (n_H) correspondant au nombre d'itération devant être faite dans le futur, pour minimiser le critère quadratique.
- δ^{Obj} : Objectif (ou consigne) futur, supposé connu. C'est la valeur de la consigne future devant être atteinte par le véhicule. En principe, une valeur de cette consigne peut-être extraite à chaque moment dans le futur ($n, n+1, \dots, n+n_H$). Ici, nous noterons δ^{Obj} la dernière valeur de cette consigne et la considérerons constante sur l'horizon de prédiction.
- δ^{Ref} : Trajectoire de référence souhaitée pour atteindre la consigne finale δ^{Obj} . Celle-ci, choisie par l'utilisateur, définit la dynamique souhaitée pour que le processus rejoigne la consigne future. Classiquement, on choisit ici un premier ordre comme dans la relation (14) 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. La trajectoire de référence est définie dans ce cas par l'équation (14), où δ^{Obj} est choisie constante sur H :

$$\delta_{[n+i]}^{Ref} = \delta_{[n+n_H]}^{Obj} - \gamma^i \{ \delta_{[n]}^{Obj} - \delta_{[n]}^R \} \quad (14)$$

- $\hat{\delta}^R$: Sortie prédite du processus. Cette variable constitue la réponse future du processus à une séquence de commande définie, connaissant le modèle d'évolution du processus.



(a) Schéma de base de la commande prédictive



(b) Représentation de la minimisation

FIG. 5 – Schémas associés à la commande prédictive

Sous ces notations, il s'agit de trouver la commande à appliquer durant H permettant de minimiser l'écart quadratique entre la sortie prédite du processus $\hat{\delta}^R$ et la trajectoire de référence δ^{Ref} , ayant choisie une structure de commande au préalable. On applique ensuite au système la première valeur de la séquence calculée sur H . Ainsi, le terme prédictif se calcule en tant que solution du problème de minimisation (15)

$$\delta_{Traj}^{Pred} = \delta_{[n..n+n_H]}^{C \min} \sum_{i=0}^{n_H} \left\{ \hat{\delta}_{[n+i]}^R - \delta_{[n+i]}^{Ref} \right\}^2 \quad (15)$$

5.3 Loi de commande prédictive

L'équation résultant de la minimisation (15) n'est pas détaillée ici, et la solution est notée δ_{Traj}^{Pred} . La loi de commande globale résulte ainsi de l'addition des termes utilisés dans la séparation, en substituant

le résultat de l'algorithme prédictif au terme associé à la trajectoire. Cette loi peut donc s'écrire comme suit :

$$\delta = \delta_{Traj}^{Pred} + \arctan\left(\frac{v}{1+uv+u^2}\right) - \beta^F$$

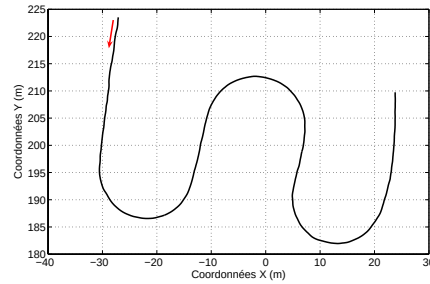
avec
$$\begin{cases} u &= \frac{L}{\cos \beta^R} C(s) \frac{\cos \theta_2}{\alpha} \\ v &= \frac{L}{\cos \beta^R} A \frac{\cos^3 \theta_2}{\alpha^2} + \tan \beta^R \end{cases} \quad (16)$$

6 Résultats de suivis réels

6.1 Dispositif expérimental



(a) Véhicule expérimental



(b) Trajectoire à virages successifs

FIG. 6 – Véhicule expérimental et trajectoire à suivre sur terrain plat

Le champ d'application envisagé dans cet article est dédié à l'agriculture de précision où l'automatisation de la tâche de guidage revêt un enjeu environnemental prépondérant. En effet, la tâche de guidage dans la plupart des travaux agricoles requiert une attention accrue de l'agriculteur qui ne peut de fait se focaliser sur le contrôle de l'outil, impliquant un manque de confort et une fatigue importante, compte tenu des grandes amplitudes de travail. Par ailleurs, une perte de précision de cette tâche (de l'ordre de $\pm 15\text{cm}$), consécutive à une perte d'attention engendre des zones de recouvrement ou de manquement lors par exemple de travaux d'épandages, très préjudiciables soit pour l'environnement soit pour le niveau de production. En conséquence un suivi de trajectoire automatique précis et constant au cours du temps (qui plus est répétable) est un bénéfice important, tant pour le confort de l'agriculteur que pour la réduction de la pollution.

Le véhicule utilisé pour la validation expérimentale est un tracteur CLAAS Ares 640, présenté sur la figure 6(a). Celui-ci est équipé d'un GPS cinématique temps réel (RTK), Aquarius de la société Thales, autorisant un positionnement relatif à une station de référence à $\pm 2\text{cm}$.

6.2 Résultat lors de virages successifs

En utilisant le matériel décrit précédemment, la loi de commande (16) est implémentée et le suivi de la trajectoire présentée sur la figure 6(b) est effectué à la vitesse de 8 km.H^{-1} . Le terrain d'évolution est un champ humide présentant de faibles propriétés d'adhérence. Dans ces conditions, le résultat relatif à l'erreur de suivi sous la loi de commande (16) (avec prédiction et glissement), est comparé à la loi de commande (12) (sans prédiction) et la loi de commande en négligeant les glissements, sur la figure 7.

Cette figure permet de montrer dans un premier temps l'intérêt de la prise en compte des glissements lors des prises de virages. En effet, toutes les lois prenant en compte les glissements permettent la convergence du véhicule, du moins pendant les phases où les conditions sont constantes, vers la trajectoire de référence (Convergence de l'écart latéral vers 0 à chaque virage). La loi de commande basée sur le modèle (2) et alimentée par l'équation d'observation (7), permet effectivement de compenser le phénomène de glissement. Toutefois, à chaque variation de courbure (i.e à chaque entrée et sortie de courbure) la loi

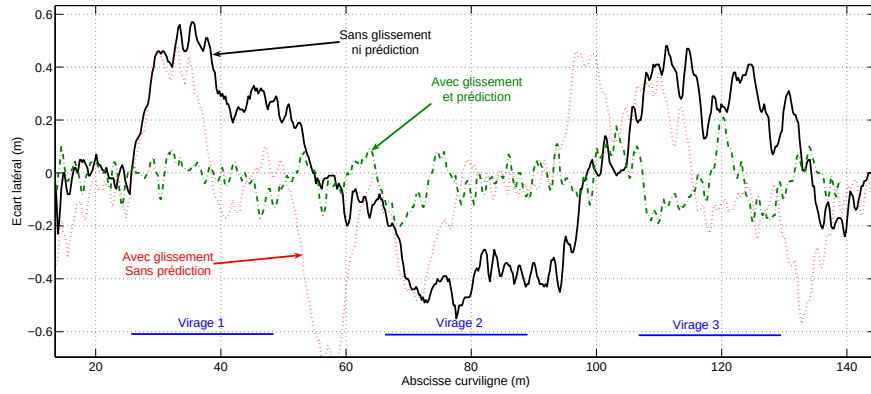


FIG. 7 – Résultats de suivis réel lors d’une succession de demi tours

de commande sans prédiction (en trait pointillé rouge) admet des dépassements. En revanche, la loi de commande (16) permet de réduire de façon conséquente (voire d’annuler complètement) ce phénomène lié au retard bas niveau. L’effet anticipatif intervient dans ce cas de figure comme un gain considérable compte tenu de la précision requise pour l’application. En outre, un tel algorithme permet d’adoucir considérablement la prise de virage (la consigne sur l’angle de braquage est moins brusque) et le comportement du véhicule sans trouve plus confortable pour l’utilisateur.

6.3 Résultat en pente

Un cas particulièrement défavorable pour les travaux agricoles et l’automatisation de la tâche de guidage est le cas du suivi de ligne droite en pente. Nous effectuons ce test ici à une vitesse de 8km.H^{-1} . Étant donné qu’en ligne droite, l’algorithme prédictif n’a pas d’utilité, nous comparerons ici le résultat de la loi de commande (16), uniquement avec la loi de commande sans prédiction ni glissement. La comparaison des écarts à la trajectoire est présentée sur la figure 8.

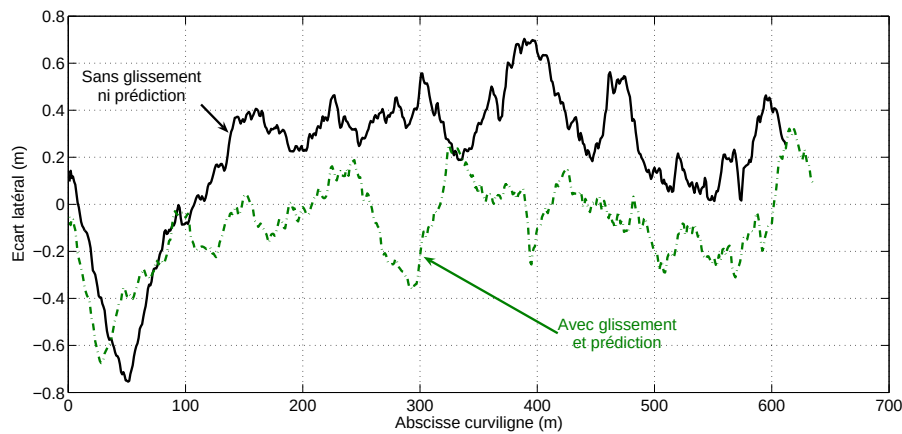


FIG. 8 – Résultats de suivis réel en pente

Ici, les effets de la pente sur le suivi de trajectoire utilisant une loi classique basée sur un modèle négligeant les glissements, entraîne un écart latéral non négligeable relativement constant (autour de 40cm), mais enregistrant des modifications ponctuelles, représentatives des variations de conditions d’adhérence au contact roue sol. Au contraire, la loi de commande basée sur le modèle (2) est capable d’estimer une valeur pertinente des paramètres de glissement, permettant à la loi de commande de ramener le véhicule

sur sa trajectoire de référence. Toutefois, la variabilité rapide des conditions d'adhérence entraîne, étant donné le nécessaire temps de réponse de la loi de commande et des actionneurs, quelques dépassements ponctuels de trajectoire, d'amplitude toutefois limitée. Dans ces conditions expérimentales, la précision du suivi est très proche de l'objectif requis pour les travaux agricoles de $\pm 15\text{cm}$.

	moyenne	écart type	dans $\pm 15\text{cm}$
Succession de virages			
sans glissement ni prédiction	4cm	30cm	28%
Avec glissement sans prédiction	0cm	16cm	57%
Avec glissement et prédiction	-3cm	5cm	100%
suivi en pente			
sans glissement ni prédiction	32cm	16cm	16%
Avec glissement et prédiction	-1cm	14cm	75%

TAB. 1 – Tableau comparatif des erreurs de suivi

Les propriétés des signaux d'erreurs de suivi des trajectoires présentées sur les figure 7 et 8 sont reportés dans le tableau 1. Celui montre les valeurs des moyennes, écarts types et le pourcentage de valeur dans l'intervalle d'acceptabilité de $\pm 15\text{cm}$ (objectif final), permettant de comparer d'un point de vue numérique les différentes approches. Au vue de ces chiffres, il est possible de quantifier l'apport des développements présentés dans l'article. Ainsi, sur monde plat, l'algorithme global, dans le cadre d'un suivi de trajectoires courbes sur monde plat, est capable de maintenir le véhicule dans l'intervalle d'acceptabilité durant tout le suivi (100% des valeurs sont dans les $\pm 15\text{cm}$) et une variabilité très réduite de l'écart (faible écart type). Ce qui constitue une nette amélioration par rapport à l'approche intégrant les glissements mais ne prenant pas en compte de principe prédictif, montrant ainsi l'intérêt de l'approche prédictive dans les transitoires de courbure. Comparés au comportement de l'approche classique (loi de commande sous hypothèse de roulement sans glissement) pour le suivi de telles trajectoires en milieu naturels, ces résultats montrent l'importance de la prise en compte des phénomènes perturbants (glissements et retards) pour assurer un suivi de trajectoire précis et les limites des lois de commande classiques de robots mobiles pour l'évolution en milieux naturels.

Par ailleurs, les améliorations obtenus pour le suivi de trajectoires sur terrains en pente sont moins considérables, compte tenu des bruits plus importants enregistrés dans cette configuration (liés à l'oscillation plus importante de la cabine du fait de la sollicitation des système d'amortissement). De plus, les variations rapides des conditions d'adhérence, imprévisibles par l'algorithme prédictif, entraînent nécessairement des dépassements (expliquant les valeurs importantes des écarts types enregistrés). Toutefois, malgré ces dépassements (n'entraînant pas d'amélioration sur l'écart type entre loi de commande classique et loi prenant en compte les glissement), l'erreur de suivi sur terrain en pente est toutefois très réduite (centrée sur zéro) et reste dans l'intervalle d'acceptabilité durant la majeure partie du suivi, les dépassements demeurant ponctuels.

7 Conclusion

Cet article présente une approche globale basée sur différents principes de commande permettant de limiter de façon considérable les effets de plusieurs phénomènes intervenant en robotique mobile hors route et de fait classiquement négligés dans le cas des véhicules routiers. Les phénomènes de glissement et de retard induit par les actionneurs et les effets inertiels sont pris en compte via des approches adaptative (observateur) et prédictive (commande prédictive à modèle). De tels principes assurent un niveau de précision de 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, les expérimentations en vraie grandeur (application de la stratégie globale de commande au suivi de trajectoire d'un tracteur agricole) ont permis de valider la pertinence des techniques adaptative et prédictive. L'erreur de suivi sur les essais réalisés demeurent très proche de zéro, en comparaison avec

les résultats relatifs à l'approche classique avec peu de dépassements, de toute façon ponctuels et d'amplitude très limitée. La précision requise par les travaux agricoles $\pm 15\text{cm}$ est ainsi atteinte quasiment en permanence pour les deux cas très défavorables de suivi testés dans cet article (succession de demi tours et suivi en pente).

Malgré les développements proposés, et notamment l'utilisation d'une stratégie d'estimation basée sur les principes d'observation, il demeure toutefois des incertitudes quant au calcul des paramètres de glissement. En effet, cette estimation est basée sur les mesures fournies par le GPS seul. Celui-ci, fixé en haut de la cabine du tracteur - pour des raisons de bonne réception des satellites - est soumis à de fortes perturbations, étant donné les oscillations de la cabine liées à l'irrégularité du sol (trou, bosse, ...) pouvant mener l'algorithme à interpréter de telles perturbations comme du glissement. Une commande prenant en compte ces mouvements d'oscillation est donc générée, menant ainsi à un dépassement ponctuel. De telles perturbations ne peuvent être détectées par l'utilisation d'un unique capteur, et les limites de l'approche mono-capteur sont ici mises en évidence. La réduction de ces dépassements "résiduels" nécessitent en effet la mise en place de capteurs additionnels (type Gyromètre, accéléromètre, inclinomètre, ...), permettant de caractériser ces perturbations et d'extraire des valeurs plus juste des paramètres de glissement, pour un guidage plus robuste.

Références

- [1] E. Bakker, L. Nyborg, and H.B. Pacejka, *Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies*, Congres International de la société des ingénieurs de l'automobile (SAE), 1987, pp. 2190–2204.
- [2] A. Brunnert, *Machine guidance with laser and gps*, Conference on Crop Harvesting and Processing (Kentucky (USA)), 2003.
- [3] B. d'Andrea Novel and M. Ellouze, *Tracking with stability for a vehicle braking in a corner*, IEEE Conf. on Decision and Control, vol. 5, 2001, pp. 4427–4432.
- [4] J-P. Laumond, *La robotique mobile*, Systèmes automatisés (IC2), Hermes, Pary, 2001.
- [5] R. Lenain, C. Cariou, B. Thuilot, and P. Martinet, *Non-linear control for car like mobile robots in presence of sliding : Application to guidance of farm vehicles using a single rtk gps*, International Symposium on Robotics (Paris - Villepinte), 2004.
- [6] A. Micaelli and C. Samson, *Trajectory tracking for unicycle-type and two-steering-wheels mobile robots*, INRIA research report (1993), no. N° 2097.
- [7] M. O'Connor, G. Elkaim, T. Bell, and B. Parkinson, *Automatic steering of a farm vehicle using gps*, International Conference on precision agriculture (Mineapolis (USA)), 1996, pp. 767–777.
- [8] T. Peynot and S. Lacroix, *Enhanced locomotion control for a planetary rover*, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 1, 2003, p. 311 :316.
- [9] J. Reid and D. Niebuhr, *Driverless tractors*, Ressource 8 (2001), no. 9, 7–8.
- [10] J. Richalet, *Pratique de la commande prédictive*, Traité des nouvelles technologies série automatique, Hermes, Paris, 1993.
- [11] C. Samson, *Velocity and torque feedback control of a nonholonomic cart*, Lecture Notes in Control and Information Sciences **162** (1991), 125–151.
- [12] ———, *Control of chained system*, IEEE Trans. on Automatic Control (1995), no. 40, 64–77.
- [13] A. Stentz, C. Dima, C. Wellington, and D. Stager, *A system for semi-autonomous tractor operation*, Autonomous Robots (2002), no. 13, 87–104.
- [14] J. Stephant, *Contribution à l'étude et à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule*, Ph.D. thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2004.
- [15] B. Thuilot, J. Bom, F. Marmoiton, and P. Martinet, *Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic gps sensor*, Int. Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV) (Lisbonne), 2004.
- [16] B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet, and M. Berducat, *Automatic guidance of a farm vehicle relying on a single cp-gps*, Autonomous Robots (2002), no. 13, 53–71.