

COMMANDE DE VEHICULES EN PRESENCE DE GLISSEMENT: APPLICATION AU SUIVI DE TRAJECTOIRE D'ENGINS AGRICOLES
--

Roland Lenain (Cemagref, Clermont-Ferrand)
Benoît Thuilot (LASMEA, Clermont-Ferrand)
Michel Berducat (Cemagref, Clermont-Ferrand)
Philippe Martinet (LASMEA, Clermont-Ferrand)

L'hypothèse de roulement pur sans glissement est fréquemment utilisée pour le suivi de trajectoire de robots mobiles. Malheureusement, celle-ci n'est en général plus valide pour les véhicules évoluant en milieux naturels, et en particulier dans le cadre des applications agricoles. En effet, les faibles propriétés d'adhérence des terrains d'évolution nécessitent la prise en compte de ce phénomène dans la commande dédiée à ce type d'engin. 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 les erreurs de suivi enregistrées lors de phases transitoires. Dans cet article plusieurs développements théoriques (basés sur des principes d'observation, 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, observateur, système chaîné, GPS, agriculture.*

1. Introduction

L'aide à la conduite de véhicule est un des enjeux de la robotique mobile, objet de nombreux travaux de recherche, en particulier dans le domaine des véhicules de tourisme (voir [1]). De nombreuses innovations dans ces domaines voient le jour, que ce soit pour l'amélioration du comportement des véhicules dédiés à la sécurité (comme les systèmes de contrôle de trajectoire [2]) ou le confort des utilisateurs (comme la régulation de vitesse [3]). Pour certains de ces domaines d'application, l'objectif poursuivi est l'autonomie complète de la plate forme considérée, soit pour intervenir à la place de l'homme (robots explorateurs par exemple), soit pour le soulager d'une tâche répétitive ou nécessitant une grande concentration. Si pour certaines tâches (par exemple l'exploration), la précision n'est pas la principale exigence, celle-ci peut, dans certains cas, s'avérer primordiale. C'est le cas de la problématique du suivi de trajectoire autonome, en particulier dans un contexte agricole. En effet, pour cette application, les précisions atteintes lors de l'exécution de travaux (comme le semis, l'épandage, le traitement, ...) influent directement sur la qualité du travail ainsi que sur les impacts environnementaux. La figure 1 illustre cette influence en mettant en relief les zones de manque ou de recouvrement induites par une imprécision dans le guidage des engins utilisés lors du travail du sol.

L'amélioration de la précision et de sa répétabilité dans l'exécution des trajectoires utilisées dans ce contexte est par conséquent un point important dans l'évolution des bonnes pratiques agricoles. L'automatisation de la tâche de guidage constitue de surcroît un confort

pour l'agriculteur qui peut alors se focaliser sur la surveillance du travail et sur le bon fonctionnement de l'équipement. Aussi, de nombreux systèmes d'assistance à la conduite d'engins agricoles ont vu le jour (voir [4] et [5] pour des états de l'art concernant ces systèmes). Les dispositifs de contrôle automatique proposés obtiennent des résultats satisfaisants (quelle que soit la technologie retenue pour les capteurs) tant que l'hypothèse de roulement sans glissement est valide. Dans le cas contraire (évolution en pente ou suivi de virage) la précision du suivi est fortement dégradée et le système de guidage n'est plus à même de fournir une tolérance de $\pm 15\text{cm}$, requise pour les tâches agricoles.

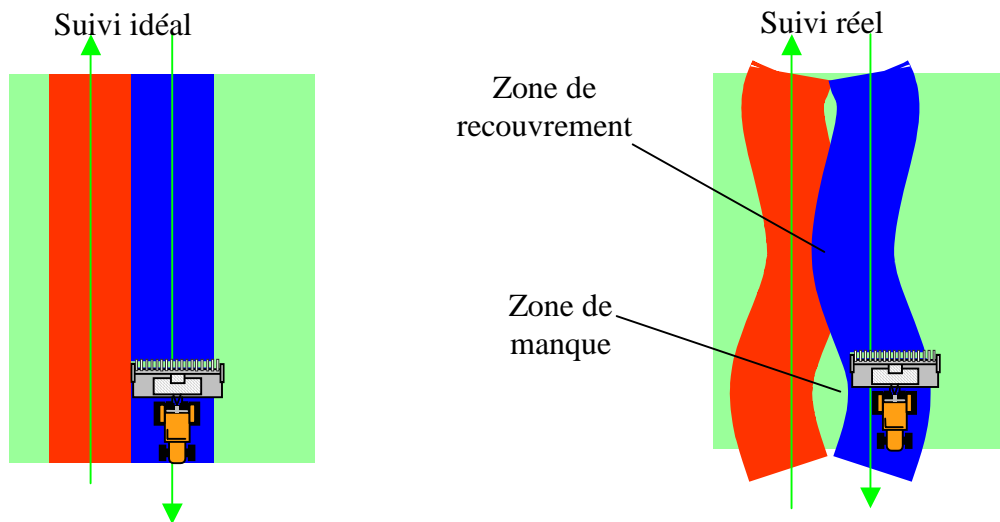


Figure 1 : Intérêt du suivi de trajectoire de précision en agriculture

Les travaux présentés ici sont focalisés sur la prise en compte de ce phénomène au sein de dispositifs de guidage automatique d'engins agricoles. L'objectif applicatif est de conserver la même précision de suivi dans toutes les conditions de travail (quelle que soit la validité de l'hypothèse de roulement sans glissement). L'accomplissement de cet objectif nécessite également la prise en compte des retards générés par l'inertie importante et par les propriétés des actionneurs requis pour ce type d'application. Cet article adresse ce problème par la mise en place d'action prédictive, capable d'anticiper les variations de trajectoires.

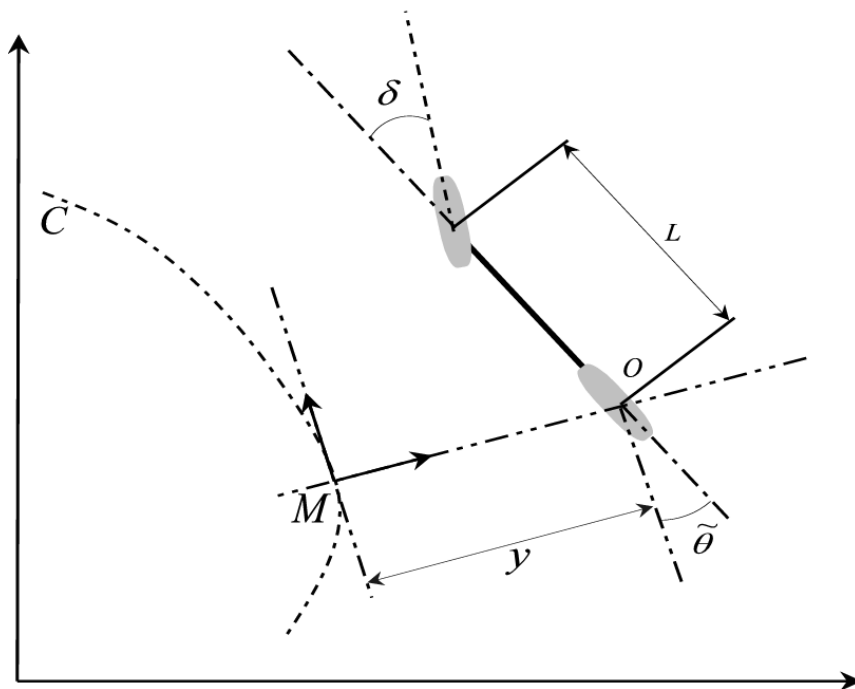
Dans une première partie (section 2), la modélisation du véhicule en présence de glissement est envisagée et un modèle cinématique étendu est proposé pour s'affranchir des difficultés inhérentes à l'utilisation d'un modèle dynamique complet. En effet, celui-ci requiert uniquement l'estimation de deux paramètres. L'instrumentation retenue est basée sur l'emploi d'un unique capteur extéroceptif (GPS cinématique), permettant de connaître la position du véhicule. En revanche, les paramètres de glissement nécessitent la construction d'un algorithme d'estimation des conditions d'adhérence détaillé en section 3. La commande non linéaire basée sur ce nouveau modèle est ensuite étudiée à la section 4, qui autorise une erreur de suivi réduite, sous l'hypothèse de variation quasi statique des conditions (essentiellement courbure de la trajectoire de référence lentement variable...). Enfin, une action prédictive est intégrée à la loi de commande en section 5. Celle-ci permet de réduire les dépassements lors des transitoires de courbure, dus aux retards introduits à la fois par l'actionneur et l'inertie du véhicule. L'efficacité de l'ensemble de l'algorithme est finalement validé au travers d'essais réels présentés en section VI, assurant une précision de suivi comprise dans un intervalle de $\pm 15\text{cm}$. Ce qui est conforme aux attentes des agriculteurs, quelles que soient les conditions d'adhérence 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 un modèle bicycle (1 roue considérée comme le train avant et une pour le train arrière). Cette vision classique d'un robot mobile utilise les notations suivantes :

- C est la trajectoire à suivre
- O est le centre de l'essieu arrière
- M est le point de C le plus proche de O . M est considéré comme unique, ce qui est vrai lorsque O est suffisamment proche de C
- s est l'abscisse curviligne de M le long de C , et $c(s)$ représente la courbure de 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 (voir Figure 1)
- δ est l'angle de braquage virtuel de la roue avant. Dans l'application envisagée ici, l'angle de braquage est le seul élément piloté
- 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



1. Paramètres du modèle d'Ackermann

En utilisant cette modélisation il est possible de définir les équations du mouvement du véhicule considéré comme un bicycle, sous hypothèse de roulement pur 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 générale, 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").

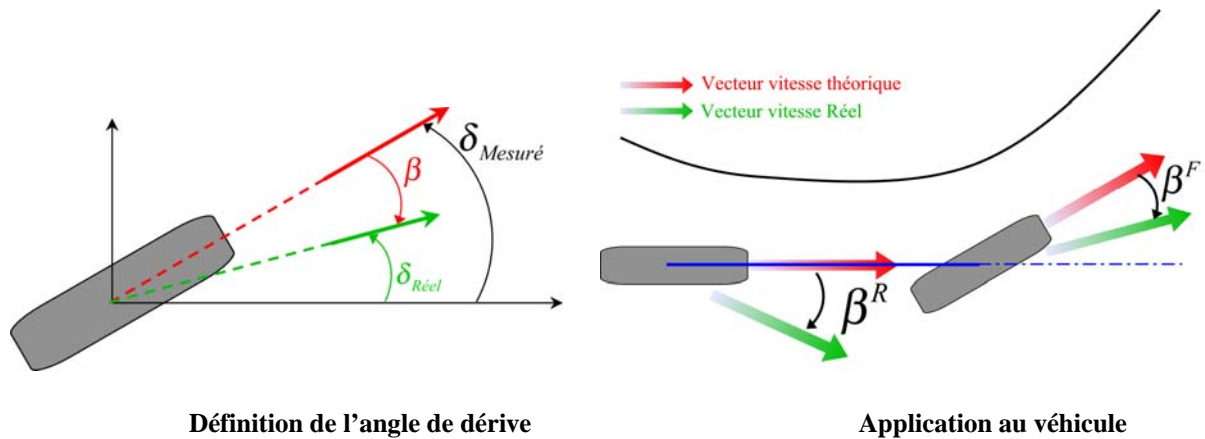
$$\begin{cases} \dot{s} &= \frac{v \cos \tilde{\theta}}{1 - cy} \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\tilde{\theta}} &= v \left(\frac{\tan \delta}{L} - \frac{c \cos \tilde{\theta}}{1 - yc} \right) \end{cases} \quad (1)$$

2.2. Prise en compte du phénomène de glissement

a. 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 caractériser ce phénomène, une première possibilité peut consister à envisager l'utilisation d'une approche dynamique, permettant de caractériser ce phénomène, en introduisant les efforts s'appliquant sur le véhicule, et en particulier les forces induites par le contact pneu sol (décrit notamment par Pacejka dans [6]).

Bien qu'autorisant une bonne description du comportement du pneumatique, de tels points de vue nécessitent l'identification de nombreux paramètres, qui, dans le cas des véhicules tout terrain, sont variables (contrairement au cas des véhicules routiers 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 issus d'une étude dynamique du véhicule et intervenant de façon prépondérante dans la description du phénomène physique : les angles de dérive des pneumatiques.



2. Paramètres de glissement du Modèle Orienté Pneumatique

Cette notion est décrite graphiquement sur la figure 2.1. Elle 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 réel (représenté par une flèche verte). Cette variable est représentative à la fois de la déformation du pneumatique, mais également du glissement du pneu sur le sol. Dans une vision dynamique, la dérive permet d'avoir accès à l'effort appliqué par la roue sur le véhicule et d'en déduire le mouvement de

celui-ci. Dans une vision cinématique (ne s'intéressant qu'aux mouvements et non aux forces les générant), nous utiliserons cette variable pour accéder à l'orientation réelle des vecteurs vitesse, utilisée pour construire les relations représentative du mouvement du véhicule. En considérant que nous avons ici un modèle à deux pneumatiques (comme dans le cas précédent), 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 2.2).

b. Modèle cinématique étendu

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

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

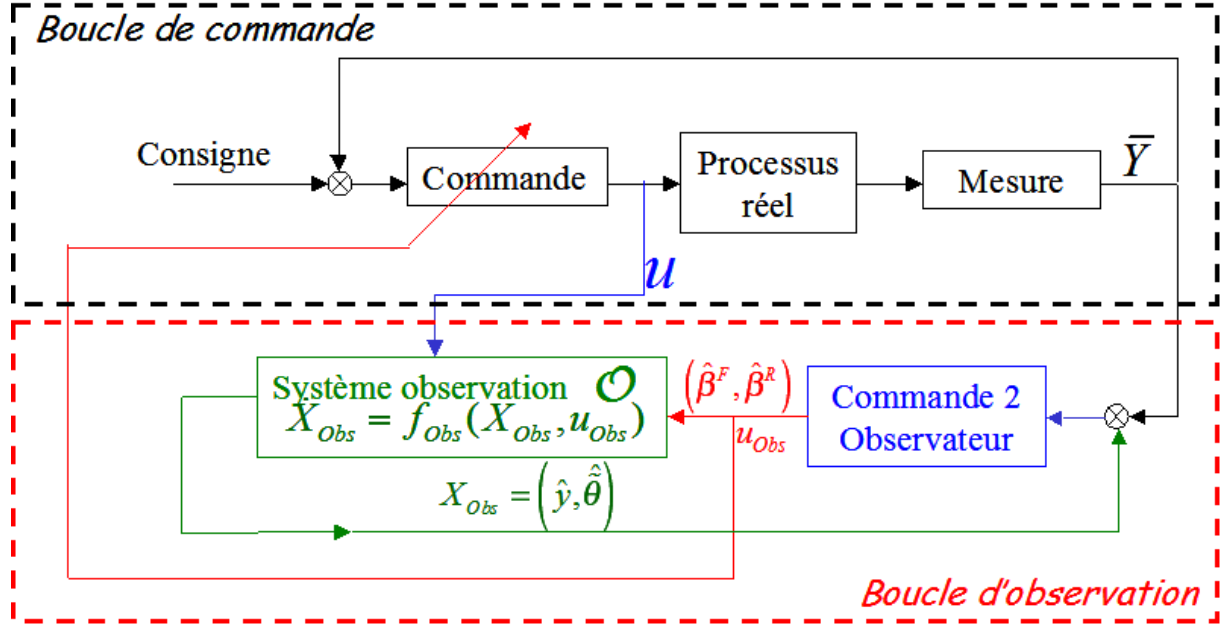
Étant donné la structure de cette équation, ce modèle est équivalent à un modèle de véhicule à deux trains directeurs évoluant sous hypothèse de roulement sans glissement. En effet, si on considère le changement de variable $\delta_1 = \delta + \beta^F$ et $\delta_2 = \tilde{\theta} + \beta^R$, ce modèle peut être mis sous la même forme que dans [7], qui définit un véhicule doté de deux angles de braquage (δ_1 pour l'avant et δ_2 pour l'arrière). On obtient alors un modèle de comportement de véhicule en présence de glissement, comportant uniquement deux paramètres à identifier en temps réel, et dont la structure équationnelle demeure très proche de celle envisagée dans le cas du roulement sans glissement. Ceci permet, d'une part, de minimiser le nombre de capteurs devant être embarqués et d'autre part, de conserver les principes de commande non linéaires déjà mis en place sur le modèle (1).

3. Estimation des paramètres de glissement

3.1. Principe de l'observation

Étant donné la variabilité des conditions d'adhérence et la dépendance des angles de dérives à l'attitude du véhicule, il est nécessaire, pour exploiter le modèle (2), de pouvoir accéder aux valeurs de β^F et de β^R en temps réel. Le capteur GPS utilisé dans l'application fournit en temps réel le vecteur d'état du modèle (2): $\begin{bmatrix} s & y & \tilde{\theta} \end{bmatrix}^T$. En revanche, aucune mesure directe des angles de dérives n'est disponible. Il apparaît en conséquence nécessaire de mettre en place une estimation en ligne indirecte, capable de reconstruire les variables manquantes. Pour cela, une méthode basée sur la notion d'observateur est ici développée. Malheureusement, aucun modèle d'évolution des glissements (permettant d'accéder aux dérivées premières des paramètres de glissement : $\dot{\beta}^F$ et $\dot{\beta}^R$) n'est disponible. Il s'avère de fait délicat d'envisager l'intégration des deux dérives des pneumatiques dans l'état du véhicule (menant ainsi à $X = \begin{bmatrix} y & \tilde{\theta} & \beta^R & \beta^F \end{bmatrix}^T$) permettant de mettre en place des techniques classiques d'observation, comme celles décrites dans [8].

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 le schéma représenté sur la figure 3.



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

Dans cette vision de l'observation, la sortie du processus réel (mesure \bar{Y} de la position et de l'orientation du véhicule) est vue comme la consigne vers laquelle l'état X_{Obs} (sortie du processus simulé) doit converger. Pour permettre cette convergence, les dérivées à estimer en temps réel sont modifiées au travers d'une loi de commande, capable de minimiser l'écart entre \bar{Y} et X_{Obs} . Pour l'observation, le système (3) est par conséquent considéré :

$$\dot{X}_{Obs} = f(X_{Obs}, u_{Obs}), \text{ avec}$$

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

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

u_{Obs} est le vecteur de commande, X_{Obs} est le vecteur d'état et \bar{Y} est vu comme la consigne vers laquelle l'état X_{Obs} doit converger. Sous le point de vue décrit par (3), le

problème dual de l'observation de (β^F, β^R) est de trouver la commande (u_{Obs}) 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 $\varepsilon = X_{Obs} - \bar{Y}$ et définie par (4). Sous cette définition, la dynamique de l'erreur d'observation peut être définie comme suit :

$$\dot{\varepsilon} = f_{Obs}(X_{Obs}, u_{Obs}) - \dot{\bar{Y}} \quad (4)$$

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 :

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

$\frac{\partial f_{Obs}}{\partial u}(X_{Obs}, 0)$ étant inversible (comme prouvé dans [9]), il est naturel de proposer pour u_{Obs} , la loi de commande (6).

$$u_{Obs} = \left. \frac{\partial f_{Obs}}{\partial u} \right|_{(X_{Obs}, 0)}^{-1} \left[G \cdot \varepsilon - f_{Obs}(\hat{X}_{Obs}, 0_{2 \times 1}) + \dot{\bar{Y}} \right] \quad (6)$$

où G est une matrice Hurwitz permettant de définir la dynamique de l'observateur (temps de réponse des données estimées à une variation des données mesurées). En effet, en reportant (6) dans (5), la loi de commande retenue pour les dérivées assure que :

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

Cette équation différentielle permet la convergence de l'erreur vers une valeur nulle avec un comportement imposé par le choix effectué sur la matrice G . La loi de commande (6), 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).

4. Loi de commande en présence de glissement

4.1. Linéarisation exacte - système chaîné

Afin de réaliser la commande du véhicule en présence de glissement, le modèle (2), dont les deux paramètres de glissement sont adaptés en temps réel, est utilisé. Celui-ci est non linéaire, ce qui rend a priori la synthèse d'une loi de commande plus difficile. Néanmoins, comme nous l'avons vu précédemment, ce modèle étendu est analogue à une classe de robot non holonome (robot mobile à deux trains directeurs), qui, d'après [7] peuvent être mis sous forme chaînée (forme linéaire). 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 chaînée (9).

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

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.

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

Ainsi, la forme transformée (9) du système (2) constitue un système d'équation linéaire, pour lequel la synthèse d'une loi de commande est plus facile. De plus, les changements de variables étant inversibles, il est possible, après avoir construit une expression de commande de revenir à une expression non linéaire. La démarche adoptée pour réaliser la commande de l'angle de braquage du véhicule est alors explicitée sur la figure 4.

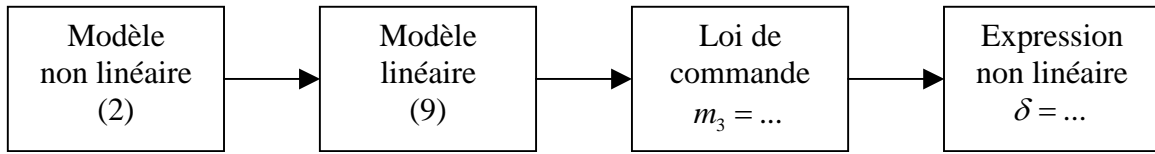


Figure 4 : démarche adoptée pour la construction d'une loi de commande non linéaire

La section suivante explicite l'expression analytique de la loi de commande régissant l'angle de braquage en fonction des glissements estimés et de l'erreur mesurée.

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).

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

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 glissements nuls, cette loi de commande est rigoureusement égale à la loi de commande définie sous l'hypothèse de roulement sans glissement, décrite dans [10].

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\theta}_2 = \tilde{\theta} + \beta^R \\ \alpha = 1 - c(s)y \\ A = -K_d \alpha \tan \tilde{\theta}_2 - K_p y + c(s) \alpha \tan^2 \tilde{\theta}_2 + \frac{dc(s)}{ds} y \tan \tilde{\theta}_2 \end{array} \right. \quad (12)$$

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-ci utilise, d'une part, la connaissance préalable de la trajectoire de référence et d'autre part une modélisation de l'actionneur, dans le but d'anticiper les variations de courbure.

5.1. Séparation de la loi de commande

Compte tenu du fait que les glissements et les écarts ne peuvent être anticipés, la prédiction ne peut porter que sur la courbure. Par conséquent, il est judicieux de décomposer la loi de commande (12) en deux termes additifs, comme suit :

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

$$\text{avec} \left\{ \begin{array}{l} \delta_{Traj} = \arctan(u) \\ \delta_{Deviation} = \arctan\left(\frac{v}{1+uv+u^2}\right) - \beta^F \end{array} \right. \text{et} \left\{ \begin{array}{l} u = \frac{L}{\cos \beta^R} c(s) \frac{\cos \tilde{\theta}_2}{\alpha} \\ v = \frac{L}{\cos \beta^R} A \frac{\cos^3 \tilde{\theta}_2}{\alpha^2} + \tan \beta^R \end{array} \right. \quad (13)$$

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. 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 de la figure 5.

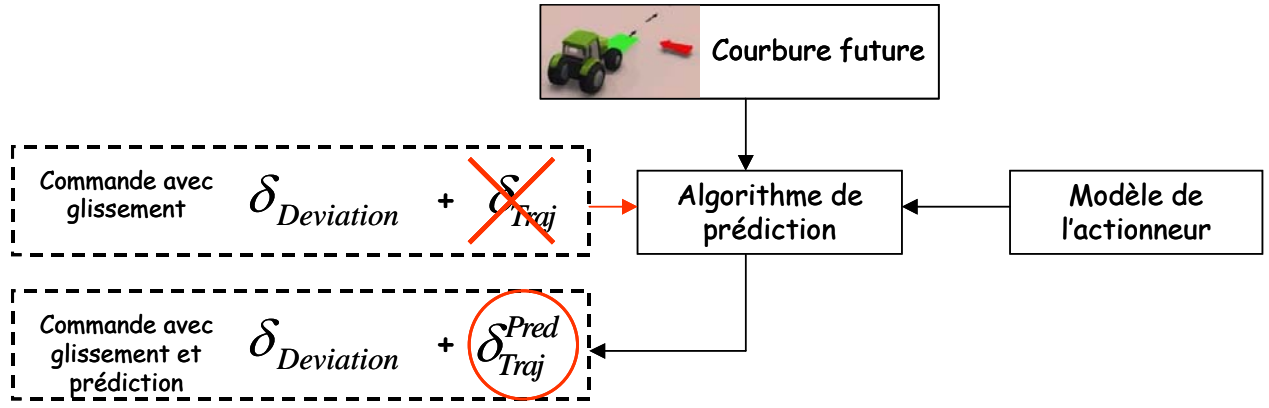


Figure 5 : Algorithme de suivi avec prédiction et glissement

Un horizon de prédiction est fixé, au bout duquel il est possible, à chaque instant, d'extraire la courbure à venir de la trajectoire à suivre. Cette courbure future est l'entrée de l'algorithme de prédiction, qui ne s'applique qu'au terme d'asservissement de courbure. Celui-ci est calculé en fonction d'un modèle de l'actionneur prenant en compte son retard, afin d'assurer une bonne adéquation entre la courbure du véhicule et celle de la trajectoire. La section suivante détaille l'algorithme de prédiction assurant l'asservissement de courbure.

5.2. Commande prédictive fonctionnelle

Une fois cette séparation effectuée, appliquons l'algorithme de commande prédictive fonctionnelle définie dans [11] 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 présenté sur la figure 6 :

- 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 envoyée 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 à l'horizon H . C'est la valeur de la consigne future devant être atteinte par le véhicule calculée par l'intermédiaire de la courbure future ($\delta^{Obj} = \arctan L \times c(s_H)$). s_H étant la courbure de la trajectoire au bout de 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 :

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

- $\hat{\delta}^R$: 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.

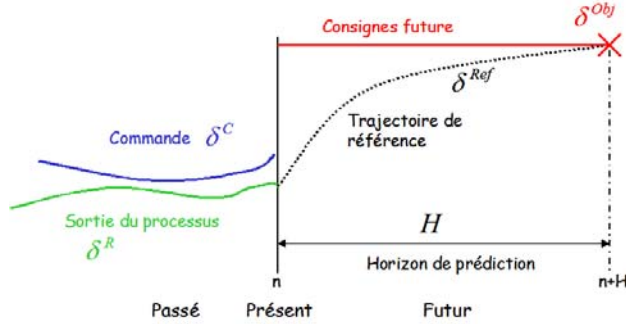


Figure 6.1 : Principe de prédiction

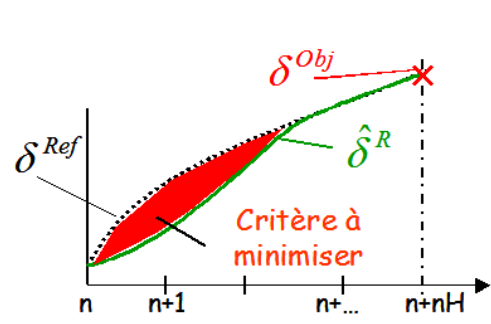


Figure 6.2 : Critère de

minimisation

Figure 6 : 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} (critère graphiquement représenté sur la figure 6.2). 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)

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

Dans notre cas, le comportement de l'algorithme prédictif est étroitement lié au choix de H . Intuitivement, H est donné par le temps de réponse du bas niveau. Toutefois, il est possible, en jouant sur cette valeur, d'augmenter l'effet anticipatif et de compenser dans une certaine mesure les effets des retards liés à l'inertie du véhicule.

5.3. Loi de commande prédictive

L'équation résultant de la minimisation (15) n'est pas détaillée ici (voir [12] pour le calcul de la minimisation), 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 :

$$\delta = \delta_{Traj}^{Pred} + \delta_{Deviation} \quad (16)$$

6. Résultats de suivis réels

6.1. Dispositif expérimental



Figure 7.1 : Véhicule expérimental

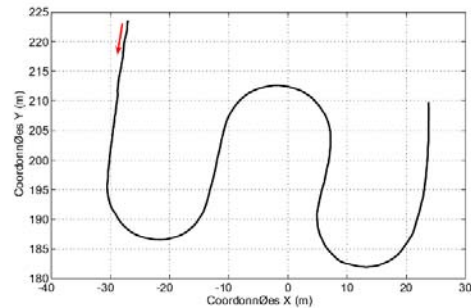


Figure 7.2 : Trajectoire à virages successifs

Figure 7 : Véhicule expérimental et trajectoire à suivre sur terrain plat

Le véhicule utilisé pour la validation expérimentale est un tracteur CLAAS Ares 640, présenté sur la figure 7.1. 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 $\pm 2\text{cm}$. Avec ce dispositif, deux suivis de trajectoire ont été considérés. Tout d'abord, le suivi de la trajectoire courbe présentée sur la figure 7.2 a été effectué à une vitesse de $8\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ sur champs plat. Ensuite, le suivi d'une ligne droite sur un terrain présentant une pente d'environ 15% a été testé à la même vitesse.

6.2. Résultat lors de virages successifs

La loi de commande (16) (avec prédiction et glissement) a été implémentée sur le véhicule et le résultat de suivi pour la trajectoire 7.2 sous cette loi de commande est présenté sur la figure 8 en trait mixte vert. Celui-ci est comparé à la loi de commande (12) (sans prédiction en trait pointillé rouge) et à la loi de commande en négligeant les glissements (en trait plein noir).

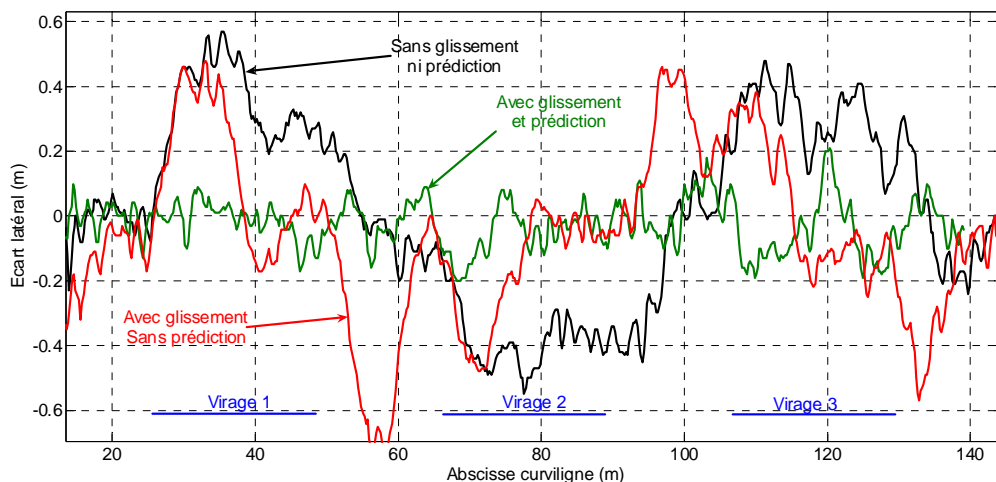


Figure 8 : Erreurs de suivis réels lors d'une succession de demi-tours

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). Toutefois, à chaque variation de courbure (i.e à chaque entrée et sortie de courbure) la loi 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 s'en trouve plus confortable pour l'utilisateur.

6.3. Résultat en pente

Un cas particulièrement défavorable est le suivi d'une ligne droite en pente. 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 9.

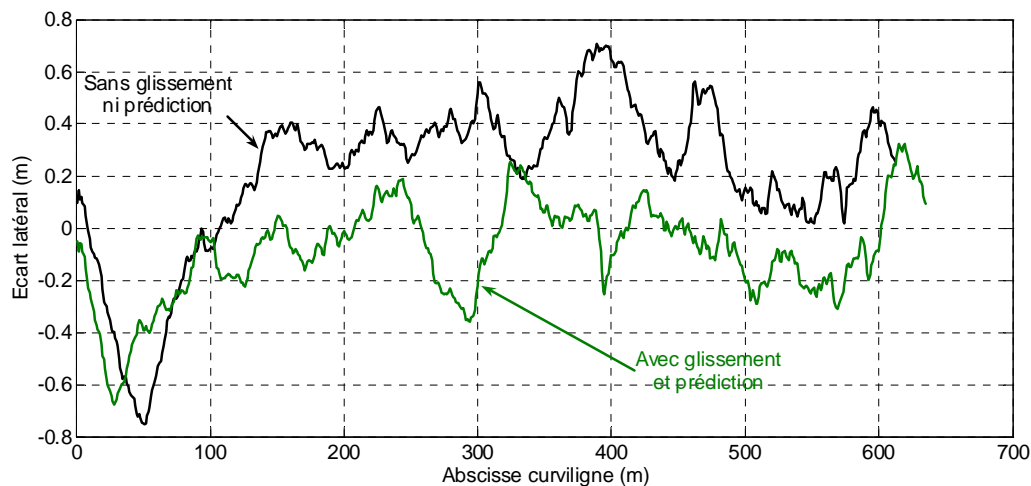


Figure 9 : Erreurs de suivis réels en pente

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 30cm), 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 variation 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 (comme autour de l'abscisse 50m). Dans ces conditions expérimentales, la précision du suivi est très proche de l'objectif requis pour les travaux agricoles de $\pm 15\text{cm}$. Ces résultats sont confirmés par de nombreux résultats expérimentaux, détaillés dans [9].

6.4. Résultats statistiques

Afin d'aller plus loin dans la comparaison des approches, il est possible d'extraire des résultats présentés sur les figures 8 et 9, quelques données statistiques représentatives des performances des stratégies de commande considérées. Le tableau 1 présente les propriétés

des erreurs de suivi enregistrées dans les deux cas d'étude (suivi d'une succession de demi-tours et suivi d'une ligne droite en pente) et pour chacune des lois de commande présentée. Sur ce tableau sont reportés les valeurs des moyennes, les écarts-types et les pourcentages de temps passé dans l'intervalle d'acceptabilité de $\pm 15\text{cm}$ (objectif final)

	moyenne	Ecart-type	Tps dans $\pm 15\text{cm}$
<i>Succession de virages</i>			
Sans glissement ni prédiction	4cm	30cm	28%
Avec glissement sans prédiction	0cm	16cm	58%
Avec glissement et prédiction	-3cm	5cm	100%
<i>Suivi en pente</i>			
Sans glissement ni prédiction	32cm	16cm	16%
Avec glissement et prédiction	-1cm	14cm	75%

Tableau 1 : Comparaison numérique des erreurs de suivi à la trajectoire de référence

Au vu 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 naturel, 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 obtenues 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 glissements), 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.

Conclusions et perspectives

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. Les phénomènes de glissement et le 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, lors des expérimentations en vraie grandeur, 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 sur les mesures fournies par le GPS seul. Celui-ci, fixé en haut de la cabine du tracteur est soumis à de fortes perturbations, étant donné les oscillations de la cabine induites par l'irrégularité du sol (trou, bosse, ...). La réduction de tels bruits nécessiterait la mise en place de capteurs additionnels (type Gyromètre, accéléromètre, inclinomètre, ...).

De plus l'algorithme de prédiction peut être raffiné par l'introduction explicite de l'inertie du véhicule au sein du modèle de l'actionneur. En effet, les équations dynamiques montrent qu'il est possible de considérer les effets inertiels de la même manière que le retard du bas niveau.

Bibliographie

- [1] Laumond, J.-P., *La robotique mobile. Systèmes automatisés (IC2)*. 2001, Paris: Hermes.
- [2] Andréa-Novel, B.d., et al. *An optimal control strategy for a vehicle to brake in corner with stability*. in *journées automatique et automobile*. 2001. Bordeaux.
- [3] Bom, J., et al. *Nonlinear Control for Urban Vehicle Platoon, Relying upon a Unique Kinematic GPS*. in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005. Barcelona (Spain).
- [4] Keicher, R. and H. Seufert, *Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe*. Computers and Electronics in Agriculture, 2000. **25**(1): p. 169-194.
- [5] Reid, J.F., et al., *Agricultural automatic guidance research in North America*. Computers and Electronics in Agriculture, 2000. **25**(1): p. 155-167.
- [6] Bakker, E., L. Nyborg, and H.B. Pacejka. *Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies*. in *International congress of Society of Automotive Engineers*. 1987. Warrendale, Pensylvania (USA).
- [7] Samson, C., *Time-varying feedback stabilization of car-like wheeled mobile robots*. International Journal of Robotics Research, 1993. **12**(1): p. 55-60.
- [8] Stephant, J., *Contribution à l'étude et à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule*. 2004, Université de Technologie de Compiègne (France).
- [9] Lenain, R., *Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissement*. 2005, Université Blaise Pascal - Clermont II (France).
- [10] Thuilot, B., et al., *Automatic guidance of a farm vehicle relying on a single CP-GPS*. Autonomous Robots, 2002. **13**(2): p. 53-71.
- [11] Richalet, J., *Pratique de la commande prédictive*. Traité des nouvelles technologies série automatique. 1993, Paris: Hermes.
- [12] Lenain, R., et al., *High accuracy path tracking for vehicle in presence of sliding: Application to farm vehicles automatic guidance for agricultural task*. Autonomous Robots, Kluwer Academic Publishers, vol. 21, n. 1, pp. 79-97, august, 2006.