



**HAL**  
open science

# Algorithmes pour la commande d'une formation de robots mobiles

P. Cartade, R. Lenain, Benoît Thuilot, M. Berducat

► **To cite this version:**

P. Cartade, R. Lenain, Benoît Thuilot, M. Berducat. Algorithmes pour la commande d'une formation de robots mobiles. 7ième Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'12), Jul 2012, Grenoble, France. 6 p. hal-00765934

**HAL Id: hal-00765934**

**<https://hal.science/hal-00765934v1>**

Submitted on 17 Dec 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Algorithmes pour la commande d'une formation de robots mobiles <sup>\*</sup>

Pierre Cartade <sup>\*</sup> Roland Lenain <sup>\*</sup> Benoit Thuilot <sup>\*\*,\*\*\*</sup>  
Michel Berducat <sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Cemagref, 24 avenue des Landais, 63172 Aubière, France  
([author@cemagref.fr](mailto:author@cemagref.fr)).

<sup>\*\*</sup> Clermont université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP  
10448, 63000 Clermont-Ferrand, France  
([benoit.thuilot@lasmea.univ-bpclermont.fr](mailto:benoit.thuilot@lasmea.univ-bpclermont.fr))

<sup>\*\*\*</sup> CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, 63171 Aubière, France

---

**Résumé :** La nécessité de diminuer l'impact sur l'environnement des activités agricoles, tout en préservant le niveau de production pour satisfaire les demandes de population en croissance, exige l'étude de nouveaux outils de production. Des robots mobiles peuvent constituer une solution prometteuse, puisque des dispositifs autonomes peuvent permettre d'accroître les niveaux de production, en préservant l'environnement en raison de leur grande précision. Si le contrôle automatique d'une machine seule offre des améliorations significatives, le contrôle d'une flotte modulaire de véhicules permet d'augmenter les espaces couverts sans utiliser de grandes machines qui provoquent un important compactage du sol. Pour être efficace, le contrôle de plusieurs robots autonomes doit être très précis et capable de gérer les différentes configurations rencontrées pendant une tâche agricole. Pour réaliser ces objectifs, les lois de contrôle simples utilisées dans le contexte routier ne sont pas appropriées dans des conditions tout terrain.

Dans cet article, la commande en formation de plusieurs robots est envisagée dans le cadre du suivi de trajectoire. On propose des lois de commande adaptatives et prédictives qui prennent en compte les faibles conditions d'adhérence pour préserver l'exactitude de positionnement global et relatif. Elle permet alors de gérer une formation dans l'environnement naturel, indépendamment des conditions du sol, de la trajectoire à suivre et de la forme choisie pour la formation. Dans une première partie, on considère le modèle du mouvement de formation, en tenant compte des faibles conditions d'adhérence. Dans une deuxième partie, un observateur dédié à l'évaluation en ligne des conditions d'adhérences est conçu. Il permet de calculer les variables manquantes exigées pour un contrôle précis. Finalement, en se référant au modèle et à l'observateur, des lois de commande pour l'asservissement latéral et angulaire sont proposées. Il est basé sur une erreur mélangeant des écarts relatifs et absolus et permet la gestion du contrôle adaptatif. Les capacités de l'approche développée sont alors examinées à travers des expériences à échelle réelle.

*Mots clés :* robots tout-terrain, suivi de trajectoire, commande laterale, commande longitudinale

---

### 1. INTRODUCTION

Les avancées continues dans le contrôle de robots mobiles autonomes (soit pour un robot seul Canudas de Wit et al. (1996) soit pour un système multi-robots Balch and Arkin (1998), Desai et al. (1998)) offrent de nouvelles possibilités en termes d'applications pour l'amélioration de la vie quotidienne. Par exemple, le développement de flottes multi-robots automatisées peut avoir beaucoup d'applications pour lesquelles il est nécessaire de couvrir de grands secteurs Cao et al. (1997), comme la surveillance, le nettoyage, l'exploration, etc. Ceci est particulièrement intéressant pour les applications environnementales comme l'agriculture, où l'utilisation de plusieurs robots légers dans le champ peut permettre de réduire l'impact sur l'environnement en préservant le niveau de production. Cela constitue un problème complexe comme exposé dans Blackmore et al. (2005). Plutôt que de faire évoluer de nombreux petits robots, comme définis dans Sahin (2004), une structure de coopération avec un nombre limité de machines légères semble préférable pour le travail en plein champ : d'une part, quelques opérations agricoles comme la récolte nécessitent vraiment de grandes machines pour réaliser correctement les tâches et d'autre part, ce point de vue semble plus applicable (notamment pour les problèmes de maintenance, de contrôle, etc). On considère ici la commande en formation de plusieurs robots légers exécutant des opérations dans un champ (comme illustré sur la figure 1).

Dans les applications considérées, une trajectoire de référence est définie par un véhicule leader, commandé manuellement ou automatiquement. La forme de la confi-

---

<sup>\*</sup>. Ce travail est soutenu par L'Agence nationale de la recherche française (ANR) et bénéficie de la subvention ANR-10-VPTT-011 attribuée au projet de SafePlatoon.



FIGURE 1. Illustration de l'application

guration n'est pas fixée. En effet la couverture de l'espace peut exiger une formation variable (déchargement de réservoir, manoeuvre, etc). Plusieurs approches pour le contrôle en formation de robots mobiles Fax and Murray (2004), Yamaguchi et al. (2001) ont été proposées, mais elles sont principalement dédiées aux environnements structurés. Pour ce qui est des tâches en milieu naturel, malgré les nombreuses perturbations rencontrées et dues à l'environnement (dérapage, irrégularité du terrain, etc) une position relative très précise des robots est impérative. Ceci ne peut pas être traité par des approches classiques.

Dans ce document, on propose un algorithme adaptatif pour la commande en formation, s'appuyant sur une trajectoire de référence définissant un cadre relatif local. Il découple les dynamiques longitudinale et latérale par rapport à la trajectoire désirée : l'avance de chaque robot le long de la trajectoire de référence peut être traitée indépendamment de l'asservissement de son écart latéral par rapport à cette trajectoire. Le contrôle longitudinal est basé sur l'asservissement de distances curvilignes intervéhicule, tandis que le contrôle latéral repose sur une approche de commande adaptative référencée observateur. Le contrôle d'une formation variable rassemble les deux lois de commande, permettant une régulation précise de la formation pour des opérations en champ, indépendamment de la forme de la trajectoire de référence et des propriétés de l'environnement.

Le document est organisé comme suit : on présente d'abord un modèle consacré à une formation de robots mobiles et la stratégie d'observation permettant d'adapter les mauvaises conditions d'adhérence rencontrées en milieu naturel. En se basant sur ce modèle, la commande de chaque robot mobile est alors détaillée : l'asservissement longitudinal est rappelé à partir de travaux effectués précédemment, tandis que la commande latérale prend en compte des écarts latéraux non tous nuls. La validation de l'approche proposée est finalement réalisée grâce aux expériences réelles en milieu naturel.

## 2. MODÉLISATION D'UN ROBOT MOBILE

La commande autonome d'une flotte de robots mobiles doit prendre en compte la trajectoire désirée, utilisée comme un cadre de référence pour le positionnement tant longitudinal que latéral de chaque robot. L'objectif est d'assurer un mouvement complet précis des robots dans une configuration désirée mais potentiellement variable le long de cette trajectoire choisie.

### 2.1 Modèle d'une formation de robots

La stratégie de commande complète pour la formation de robots est basée sur la modélisation proposée dans la figure 2 (on montre deux robots parmi  $n$ ).

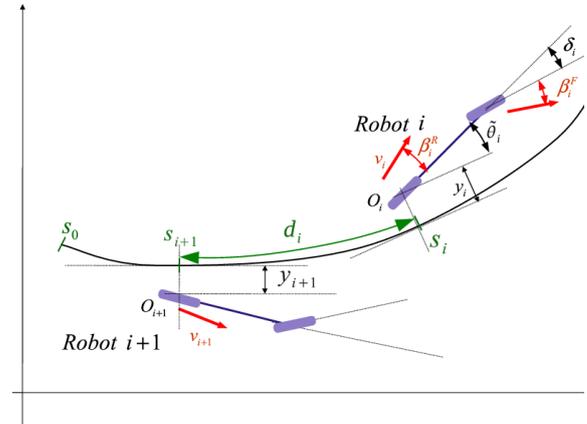


FIGURE 2. Modèle longitudinal d'une flotte de robots

Dans cette représentation, chaque robot est vu comme une bicyclette, comme dans le célèbre modèle d'Ackermann, voir Samson (1995) : une roue unique pour l'axe avant et une autre pour l'axe arrière. L'hypothèse classique de roulement sans glissement n'est pas réaliste en milieu naturel. En effet les glissements affectent de façon significative la dynamique d'un robot et nuisent à la précision du suivi de trajectoire. Pour tenir compte de cette spécificité, deux angles de glissement sont ajoutés :  $\beta^F$  et  $\beta^R$  respectivement pour l'axe avant et arrière. Leur estimation est décrite dans la section 2.2. Ces variables sont représentatives de la différence entre l'orientation du pneu et de la direction de son vecteur vitesse. Le glissement longitudinal n'a pas été décrit, puisque dans les applications considérées la précision du guidage longitudinal n'est pas aussi critique que pour la dynamique latérale. En se basant sur ces suppositions, les notations utilisées par la suite sont représentées sur la figure 2 pour le  $i^{eme}$  robot et énumérées ci-après :

- $\Gamma$  est la trajectoire de référence commune pour chaque robot défini dans un cadre absolu (calculé ou enregistré à l'avance).
- $O_i$  est le centre de l'axe arrière du  $i^{eme}$  robot mobile. C'est le point qui doit être contrôlé pour chaque robot.
- $s_i$  est l'abscisse curviligne du point le plus proche de  $O_i$  sur la trajectoire. Elle correspond à la distance parcourue par le robot  $i$  le long de  $\Gamma$ .
- $c(s_i)$  est la courbure de la trajectoire  $\Gamma$  en  $s_i$ .
- $\tilde{\theta}_i$  indique l'écart angulaire du robot  $i^{eme}$  par rapport à  $\Gamma$ .
- $y_i$  est l'écart latéral du robot  $i$  par rapport à  $\Gamma$ .
- $\delta_i$  est l'angle de braquage de la roue avant du  $i^{eme}$  robot.
- $l$  est l'empattement du robot.
- $v_i$  est la vitesse linéaire du  $i^{eme}$  robot au point  $O_i$ .
- $\beta_i^F$  et  $\beta_i^R$  indiquent les angles de glissement (avant et arrière) du  $i^{eme}$  robot.

En utilisant ces notations, les équations de mouvement pour le  $i^{eme}$  robot mobile peuvent s'écrire (voir Lenain et al. (2006) pour les détails) :

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= v_i \frac{\cos(\tilde{\theta}_i + \beta_i^R)}{1 - c(s_i) y_i} \\ \dot{y}_i &= v_i \sin(\tilde{\theta}_i + \beta_i^R) \\ \dot{\tilde{\theta}}_i &= v_i \left( \cos \beta_i^R \frac{\tan(\delta_i + \beta_i^F) - \tan(\beta_i^R)}{l} - \frac{c(s_i) \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

L'expression (1) n'existe pas si le  $[1 - c(s_i) y_i] = 0$  (c'est-à-dire si le point  $O_i$  est confondu avec le centre instantané de courbure de la trajectoire de référence). Une telle situation n'est pas rencontrée en pratique, puisque l'on suppose que les robots sont correctement initialisés. Le vecteur d'état pour le robot  $i$  est alors défini par  $X_i = [s_i \ y_i \ \tilde{\theta}_i]^T$  et est supposé mesuré. En conséquence, on connaît entièrement le modèle (1) dès que les angles de glissement  $\beta_i^F$  et  $\beta_i^R$  sont accessibles. Comme ces variables ne peuvent pas être facilement mesurées, elles sont estimées grâce à un observateur décrit ci-dessous.

## 2.2 Estimation des angles de glissement

Comme les angles de glissement intégrés dans le modèle de robot (1) sont difficilement mesurables, une estimation indirecte est nécessaire. L'approche référencée observateur détaillée dans Cariou et al. (2009) est ici mise en oeuvre. Elle suit l'algorithme décrit dans la figure 3, et bénéficie du principe de dualité entre l'observation et la commande.

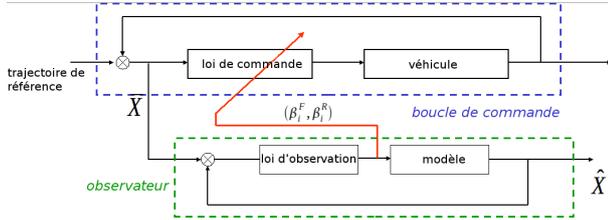


FIGURE 3. schéma du principe de l'observateur

Plus précisément, on considère le modèle (1) comme un processus régulé grâce aux angles de dérive  $\beta^F$  et  $\beta^R$ . L'observateur se ramène alors à une loi de commande conçue pour ces angles, dans le but d'assurer la convergence des deux sorties du modèle ( $X_i^{obs} = [y_i^{obs} \ \tilde{\theta}_i^{obs}]^T$ ) avec les valeurs mesurées correspondantes ( $\bar{X}_i = [\bar{y}_i \ \tilde{\theta}_i]^T$ ). Une telle convergence assure que le modèle (1) est représentatif du robot réel en prenant en compte les conditions d'adhérence. Les valeurs des angles de dérive peuvent alors être intégrées aux lois de commande des robots mobiles. Le calcul détaillé de cet observateur et les preuves de stabilité associées sont détaillées dans Cariou et al. (2009).

## 2.3 Linéarisation exacte du modèle pour la commande

Le modèle cinématique (1) a été étendu pour prendre en compte les faibles conditions d'adhérence. Néanmoins, celui-ci est toujours compatible avec des modèles cinématiques classiques, comme ceux considérés dans Samson (1995). Il peut donc être mis sous forme chaînée, permettant alors une linéarisation exacte. Ceci peut être réalisé en imposant la transformation suivante pour l'état et la commande :

$$\begin{aligned} [s_i, y_i, \tilde{\theta}_i] &\rightarrow [a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}] = \\ &\quad [s_i, y_i, (1 - c(s_i) y_i) \tan(\tilde{\theta}_i + \beta_i^R)] \\ [v_i, \delta_i] &\rightarrow [m_{1i}, m_{2i}] = \left[ \frac{v_i \cos(\tilde{\theta}_i + \beta_i^R)}{1 - c(s_i) y_i}, \frac{da_{3i}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Ceci transforme le système (1) en le système (3).

$$\begin{cases} \dot{a}_{1i} = \frac{da_{1i}}{dt} = m_{1i} \\ \dot{a}_{2i} = \frac{da_{2i}}{dt} = a_{3i} m_{1i} \\ \dot{a}_{3i} = \frac{da_{3i}}{dt} = m_{2i} \end{cases} \quad (3)$$

Considérons maintenant, dans le système (3), la dérivée par rapport à l'abscisse curviligne, au lieu de la dérivée par rapport au temps. Ceci mène finalement au système (4) :

$$\begin{cases} a'_{2i} = \frac{da_{2i}}{ds_i} = a_{3i} \\ a'_{3i} = \frac{da_{3i}}{ds_i} = m_{3i} = \frac{m_{2i}}{m_{1i}} \end{cases} \quad (4)$$

qui constitue une forme linéaire exacte. Puisque  $a_{1i} = s_i$ , alors  $a'_{1i} = 1$  est enlevée du modèle, qui devient indépendant de la vitesse du robot. En conséquence, ces transformations permettent de séparer formellement le comportement longitudinal du robot de son mouvement latéral par rapport à la trajectoire de référence. Les commandes longitudinale et latérale peuvent alors être traitées indépendamment.

## 3. COMMANDE EN FORMATION D'UNE FLOTTE DE ROBOTS MOBILES

Dans le contexte d'une flotte de robots mobiles suivant une trajectoire de référence, les positions des différents robots par rapport à la trajectoire sont transmises au sein de la flotte via communication sans fil. Les commandes de chaque robot visent à assurer la convergence vers la trajectoire, en terme d'écart longitudinal (commande longitudinale) et d'écart latéral (commande latérale). Dans cette Section, nous rappelons d'abord rapidement la commande longitudinale. Ensuite la loi de commande latérale, qui constitue l'apport principal de cet article, est détaillée.

### 3.1 Loi de commande longitudinale

Le but de la loi de commande longitudinale est de maintenir un écart constant  $d$  entre les abscisses curvilignes de deux véhicules successifs. De préférence, chaque robot est commandé en fonction de l'abscisse curviligne  $s_1$  du premier véhicule. Cela permet d'éviter un comportement oscillant dû à la propagation d'erreurs d'un véhicule à l'autre. Cependant, pour des raisons de sécurité, la distance au véhicule précédent est également prise en compte. C'est pourquoi, comme proposé dans Bom et al. (2005), on considère une erreur  $x_i$  intégrant l'écart véhicule leader  $e_i^1$  (terme le plus important en général) et l'écart au précédent  $e_i^{i-1}$  (terme prédominant lorsque l'on approche la distance de sécurité). Les fonctions utilisées pour faire la moyenne des deux termes sont aussi lisses que possible pour assurer une commande régulière. La commande auxiliaire  $m_{1i}$  (et par conséquent  $v_i$ ) assurant la convergence de  $x_i$  vers 0

peut être facilement développée à partir de la première équation du modèle (3) de sorte que chaque véhicule peut être commandé longitudinalement de manière précise et sûre, quelle que soit la vitesse du véhicule leader.

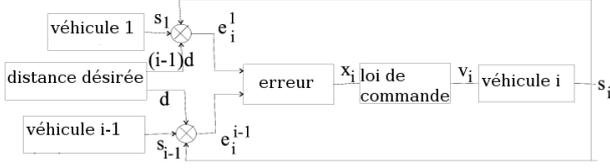


FIGURE 4. Schéma de la commande longitudinale

### 3.2 Loi de commande latérale

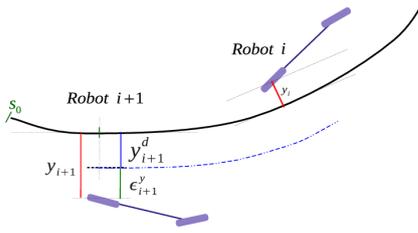


FIGURE 5. modèle de commande latérale

**Écarts latéraux désirés** Une fois la commande longitudinale établie, la commande de la position latérale de chaque robot peut être étudiée. Contrairement au problème de suivi de trajectoire classique pour lequel l'erreur de suivi doit être nulle Morin and Samson (2001), les écarts latéraux des robots au sein d'une formation doivent converger vers des valeurs non nulles. Dans ce but, le modèle est étendu en ajoutant une variable  $y_i^d(s_i)$ , représentant l'écart latéral désiré du robot  $i$  et permettant le positionnement relatif des robots mobiles dans l'espace. Ce point de vue est schématisé sur la figure 5.

**Synthèse de la loi de commande** S'appuyant sur le système linéaire (4) provenant des transformations d'états (2) et la connaissance des angles de dérive, la commande latérale consiste à réguler  $a_{2i} = y_i$  aux valeurs limites désirées  $y_i^d$ . Cet objectif peut être atteint en imposant la loi de commande virtuelle (5) pour  $m_{3i}$  :

$$m_{3i} = -K_d(a_{3i} - y_i^d) - K_p(a_{2i} - y_i^d) + y_i^{\prime\prime d} \quad (K_d, K_p > 0) \quad (5)$$

Cela conduit à l'équation différentielle linéaire du second ordre suivante satisfaite par l'erreur de contrôle du  $i$ -ième robot, notée  $\epsilon_i^y = a_{2i} - y_i^d$  :

$$\epsilon_i^{\prime\prime y} + K_d \epsilon_i^{\prime y} + K_p \epsilon_i^y = 0 \quad (6)$$

Celle-ci assure la convergence de  $\epsilon_i^y$  vers 0 (i.e :  $y_i \rightarrow y_i^d$ ).

La commande de l'angle de braquage des roues du robot  $i$  peut être déduite de la commande virtuelle  $m_{3i}$  grâce aux transformations inverses (2). cela conduit (si  $\epsilon_i^{\prime\prime y}$  est négligé) à :

$$\delta_i = \arctan \left\{ \tan(\beta_i^R) + \frac{l}{\cos(\beta_i^R)} \left( \frac{c(s_i) \cos \tilde{\theta}_{2i}}{\alpha_i} + \dots \frac{A_i \cos^3 \tilde{\theta}_{2i}}{\psi \alpha_i^2} \right) \right\} + \beta_i^F \quad (7)$$

où :

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_{2i} = \tilde{\theta} + \beta_i^R \\ \alpha_i = 1 - c(s_i)y_i \\ A_i = -K_p \epsilon_i^y - K_d \alpha_i \eta + c(s_i)\alpha_i \eta \tan \tilde{\theta}_{2i} \\ \eta = \left( \tan \tilde{\theta}_{2i} - \frac{\dot{y}_i^d}{v_i \cos \tilde{\theta}_{2i}} \right) \\ \psi = 1 + \tan^2(\tilde{\theta}_{2i}) - \frac{\dot{y}_i^d \tan \tilde{\theta}_{2i}}{v_i \cos \tilde{\theta}_{2i}} \end{cases} \quad (8)$$

La loi de commande (8) repose sur les hypothèses suivantes :

- l'accélération longitudinale peut être négligée ( $\dot{v}_i = 0$ ) dans la dynamique latérale. Les gains de la loi de commande longitudinale peuvent être adaptés pour assurer cette hypothèse tout en conservant un comportement longitudinal satisfaisant
- $1 - c(s_i)y_i \neq 0$  : condition d'existence du modèle, ce point à déjà été discuté.
- $\tilde{\theta}_{2i} \neq \frac{\pi}{2} [\pi]$  : le vecteur vitesse du dernier robot n'est pas orthogonal à la trajectoire à suivre. Cette condition est satisfaite quand la formation est correctement initialisée.

En outre, afin de s'affranchir des temps de réponse des actionneurs de directions, un asservissement de courbure prédictif est réalisé. Comme mis en place dans Cariou et al. (2009), cette stratégie repose sur la connaissance de la trajectoire de référence (ou celle du leader), afin d'extraire la courbure future. Cette courbure permet d'obtenir un angle de braquage cible utilisé ensuite comme objectif à atteindre pour la partie de l'expression (8) gérant la courbure du robot. Cette stratégie permet de s'affranchir des dépassements de suivi de trajectoire lors des transitoires de courbure et imputables aux retards des actionneurs.

De la même manière que  $d$  permet de définir la distance entre les robots au sein de la flotte et donc leurs positions longitudinales relatives, la variable  $y_i^d$  dans (7) permet de définir leurs positions latérales par rapport au mouvement global de la trajectoire. Les positions relatives latérales et longitudinales de chaque robot peuvent alors être spécifiées dans le repère de la trajectoire de référence indépendamment. Les écarts latéraux désirés  $y_i^d$  sont ensuite construits pour réguler la formation et permettre d'accomplir la tâche imputée au système multi-robots.

### 3.3 Génération des écarts latéraux

Lors de la réalisation dans un champ d'une manœuvre nécessitant plusieurs machines, on prend généralement pour écart latéral la largeur des véhicules réduite d'environ 15%. Cela entraîne un léger chevauchement et permet ainsi une couverture complète du champ. Exactement comme dans le cas longitudinal, en vue d'éviter un comportement oscillant dû à la propagation d'erreurs, chaque robot doit être de préférence commandé par rapport à la trajectoire du robot de tête. Cela peut être facilement réalisé en spécifiant un  $y_i^d$  constant dans (7). Ce premier mode est satisfaisant si les véhicules ne sont jamais côte à côte (e.g quand la manœuvre est réalisée selon une configuration d'alliers).

Mode 1 (écart latéraux fixés) :  $y_i^d(s_i) = d_i^y$ , avec  $d_i^y$  constant, choisi en fonctions des largeurs des véhicules. La position latérale des robots est indépendante du comportement du robot précédent et en particulier ne reproduit pas une éventuelle déviation.

Au contraire, lorsque les robots ont à travailler côte à côte (e.g un tracteur se déplaçant autour d'une moissonneuse pour la décharger), le robot  $i$  doit reproduire l'écart du robot  $i - 1$  pour permettre un travail commun et éviter les collisions. Idéalement, tant que l'écart du robot  $i - 1$  ne dépasse pas un certain seuil spécifié à l'avance, le robot  $i$  doit être commandé par rapport à la trajectoire du véhicule leader, pour éviter le comportement oscillant mentionné ci-dessus. Lorsque ce seuil est dépassé, le robot  $i$  doit être commandé par rapport à la trajectoire du robot  $i - 1$ . Un tel comportement est effectivement possible, puisque les écarts latéraux désirés introduit Figure 5, peuvent varier. Pour ce second mode on propose de définir  $y_i^d$  de la manière suivante :

$$y_i^d(s_i) = d_i^y + \sigma(y_{i-1}) [y_{i-1} - d_{i-1}^y], \quad (9)$$

où  $\sigma(y_{i-1}) \in [0, 1]$  est la fonction régulière de moyennage introduite sur la figure 6. On remarque que si  $y_{i-1}$  est petit, alors  $\sigma(y_{i-1}) \approx 0$  et donc  $y_i^d(s_i) = d_i^y$  comme avec le mode 1. En revanche, si  $y_{i-1}$  est grand,  $\sigma y_{i-1} \approx 1$  et le robot  $i$  reproduit l'écart latéral du robot  $i - 1$ .

Mode 2 (écarts adaptatifs) :  $y_i^d(s_i)$  est défini par 9.

Le robot  $i$  reproduit l'écart latéral du robot  $i - 1$  si cette dernière valeur dépasse un certain seuil.

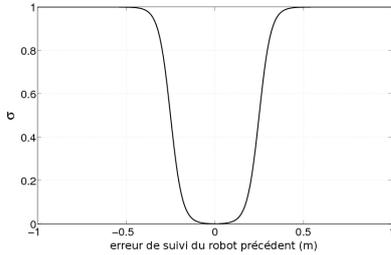


FIGURE 6. Forme de la fonction de moyennage

## 4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

### 4.1 Matériel expérimental

Les deux véhicules électriques représentés Figure 7 sont utilisés pour les expérimentations. Le nom du leader est RobuFAST, celui du suiveur Arocco. Ils sont dotés de capacités tout-terrain et peuvent gravir des pentes allant jusqu'à 45°.

Le principal capteur extéroceptif à bord des deux robots est un récepteur GPS-RTK, qui fournit des mesures de position absolues avec une précision de 2cm et à une fréquence d'échantillonnage de 10 HZ. Les transferts d'information entre véhicules sont faits par communication WIFI.

### 4.2 Résultats expérimentaux pour le suivi de trajectoire

Les expériences menées pour valider notre algorithme consistent à suivre la trajectoire représentée sur la Figure 8. Celle-ci a été enregistrée au préalable, à l'aide d'un

Robots	robuFAST	Arocco
Masse totale	$m = 350$ kg	$m = 650$
Empattement	$L = 1.2$ m	$L = 1.2$ m
Vitesse maximale	8 m/s	4 m/s

TABLE 1. Caractéristiques principales des robots



FIGURE 7. Robots utilisés pour les expériences

robot conduit manuellement à la vitesse de 1 m/s. Elle est constituée de deux parties rectilignes et d'un tournant. Une moitié de la trajectoire est en pente et l'autre moitié sur une surface relativement plane.

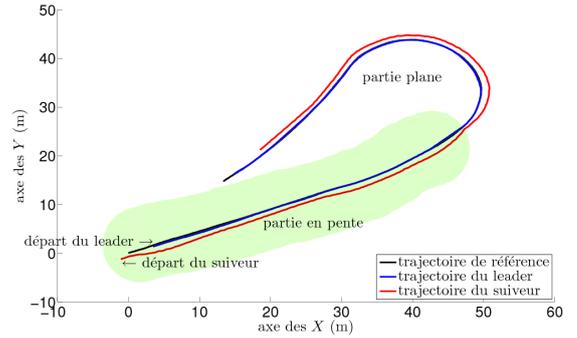


FIGURE 8. Trajectoire des robots

Le premier véhicule se déplace à une vitesse de 2 m/s et doit suivre la trajectoire de référence. L'autre véhicule doit maintenir une distance latérale de 1 m et une distance longitudinale de 10 m avec le leader. Pour ce qui concerne l'erreur latérale, représentée sur la figure 9, la précision atteinte est relativement importante, puisqu'on peut voir qu'après une phase d'initialisation (jusqu'à l'itération 250) l'erreur latérale ne dépasse pas 20 cm par rapport aux écarts latéraux désirés (0 m pour le leader, 1 m pour le suiveur). Ceci est obtenu malgré les faibles conditions d'adhérence qui dégradent le suivi, dans le cas d'utilisation de lois de commande sous hypothèse de roulement sans glissement (i.e  $(\beta_u^F, \beta_i^R) = (0, 0)$ ). Un dépassement peut être observé vers les itérations 400 et 450 (du leader et du suiveur respectivement) correspondant au passage de la partie en pente à la partie plate. Cela provoque en effet un mouvement de roulis expliquant la variation de l'erreur latérale (les antennes GPS sont placées en hauteur, voir la Figure 7) qui ne correspond pas réellement à un mouvement réel du robot dans le plan de lacet. Malgré cette perturbation, l'algorithme de contrôle reste stable et fournit un niveau de précision compatible avec les opérations agricoles actuelles.

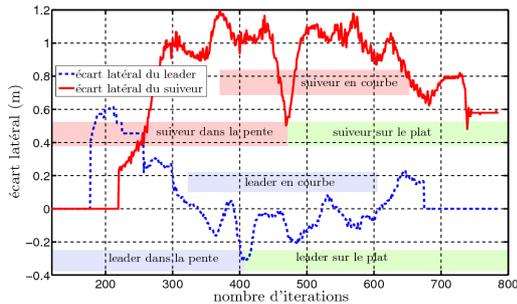


FIGURE 9. Ecart latéral des robots

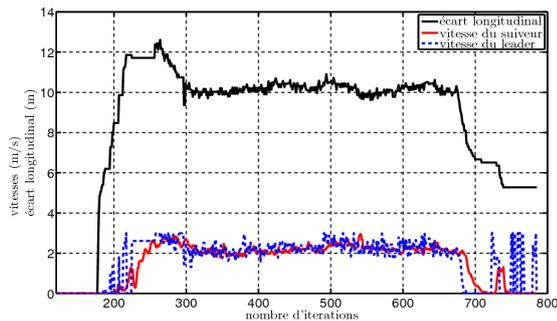


FIGURE 10. Ecart longitudinal et vitesse des robots

La Figure 10 montre un tracé comparant les vitesses des robots et les distances longitudinales. On peut observer au début une erreur longitudinale de 2 m et à la fin une autre de plus de 3 m. Cela peut s'expliquer par le temps important que nécessite le suiveur pour accélérer au début et ralentir à la fin. De plus on remarque que la distance longitudinale oscille quand les robots prennent le tournant et quand ils atteignent la partie plate. Ces imprécisions apparaissent lorsque d'importantes variations de vitesse sont nécessaires. Cependant lorsque le mouvement est uniforme, la distance curviligne entre les robots est bien maîtrisée, et reste proche de la distance souhaitée 10 m.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article propose un algorithme permettant de commander de manière précise une formation de robots tout-terrain. Notre approche considère la commande d'une formation comme une combinaison de (i) une commande en convoi et de (ii) une extension du problème de suivi de trajectoire avec un écart latéral non nul. En conséquence, la commande de chaque véhicule est décomposée en commande longitudinale et latérale par rapport à la trajectoire de référence. Et une stratégie de commande adaptative est développée. Elle permet de prendre en compte les conditions de faible adhérence ainsi que d'autres phénomènes rencontrés par des véhicules tout-terrain diminuant la précision des algorithmes classiques. La position relative de chaque robot par rapport à une formation peut être régulée avec une précision de quelques centimètres quelles que soient la forme de la trajectoire et les conditions d'adhérence. L'efficacité de notre approche a été testée par des expériences réelles à l'aide de deux véhicules tout-terrain. En outre, la stratégie proposée est centrée sur la régulation d'une formation par rapport à une trajectoire de référence fournie au préalable. Un tel algorithme doit maintenant être étendu pour gérer automatiquement la

formation (modification en ligne de la formation - notamment en bout de champ pour procéder à un demi-tour -, robot mobile entrant ou quittant la flotte, leader commandé manuellement, évitement d'obstacle, etc). En vue d'améliorer le suivi longitudinal du véhicule suiveur, un schéma prédictif, tenant compte des performances d'accélération du suiveur, est en développement pour anticiper les variations de vitesse du leader.

## RÉFÉRENCES

- Balch, T. and Arkin, R. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6), 926–939.
- Blackmore, S., Stout, B., Wang, M., and Runov, B. (2005). Robotic agriculture - the future of agricultural mechanisation? *5th European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Upsala (Sweden).
- Bom, J., Thuilot, B., Marmoiton, F., and Martinet, P. (2005). A global control strategy for urban vehicles platooning relying on nonlinear decoupling laws. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Edmonton (Canada), 2875–2880.
- Canudas de Wit, C., Bastin, G., and Siciliano, B. (1996). *Theory of Robot Control*. Springer-Verlag, New York, USA.
- Cao, Y., Fukunaga, A., and Kahng, A. (1997). Cooperative mobile robotics : Antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 4(1), 7–27.
- Cariou, C., Lenain, R., Thuilot, B., and Berducat, M. (2009). Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations. *Journal of Field Robotics*, 26(6-7), 504–518.
- Desai, J., Ostrowski, J., and Kumar, V. (1998). Controlling formations of multiple mobile robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Leuven (Belgium), 2864–2869.
- Fax, J. and Murray, R. (2004). Information flow and cooperative control of vehicle formations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(9), 1465–1476.
- Lenain, R., Thuilot, B., Cariou, C., and Martinet, P. (2006). High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding. application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks. *Autonomous robots*, 21(1), 79–97.
- Morin, P. and Samson, C. (2001). Commande de véhicules sur roues non holonomes, une synthèse. In *Actes des troisièmes journées nationales de la recherche en robotique (JNRR)*, Giens (France).
- Sahin, E. (2004). Swarm robotics : from sources of inspiration to domains of application. *Swarm Robotics, Proceedings of the SAB 2004 International Workshop, Lecture Notes in Computer Science*.
- Samson, C. (1995). Control of chained systems. application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(1), 64–77.
- Yamaguchi, H., Arai, T., and Beni, G. (2001). A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations. *Robotics and Autonomous Systems*, 36(4), 125–147.