

# Une Stratégie de Commande Globale pour le Convoi de Véhicules Urbains basée sur des Lois de Commande Découplées Non-Linéaires

J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, Philippe Martinet

► **To cite this version:**

J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, Philippe Martinet. Une Stratégie de Commande Globale pour le Convoi de Véhicules Urbains basée sur des Lois de Commande Découplées Non-Linéaires. Journée scientifique de l'Ecole doctorale SPI, EDSP105, Jun 2005, Clermont-Ferrand, France. hal-02467263

**HAL Id: hal-02467263**

**<https://hal.inria.fr/hal-02467263>**

Submitted on 4 Feb 2020

**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.

# Une Stratégie de Commande Globale pour le Convoi de Véhicules Urbains basée sur des Lois de Commande Découplées Non-Linéaires

J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton and P. Martinet  
LASMEA - 24 avenue des Landais - 63177 AUBIERE - FRANCE  
bom@lasmea.univ-bpclermont.fr

## Résumé

*Pour résoudre les problèmes liés au trafic important dans les métropoles, de nouvelles alternatives, appelés "Urban Transportation Systems", voient le jour. Celles-ci sont basées sur des véhicules électriques en libre accès. Une fonctionnalité nécessaire de ces systèmes est leur capacité à se déplacer en convoi. Dans ce papier, est présenté le convoi de ces véhicules automatisés, s'appuyant sur des capteurs RTK-GPS et une communication inter-véhicules. La commande développée est basée sur une stratégie de commande globale; en fait, l'état du convoi est pris en compte. En fait, le comportement du convoi est étudié à travers les états du leader et du véhicule situé immédiatement devant. La distance inter-véhicules est prise comme la distance curviligne le long d'une trajectoire de référence. Se basant sur la théorie de commande non-linéaire, les contrôles latéral et longitudinal sont traités indépendamment. Afin de prodiguer un confort aux passagers, des fonctions de supervision sont greffées au système de contrôle. Puis, des expérimentations, portées sur véhicules réelles, et des simulations de longs convois sont présentées.*

**Mots-clés :** robot mobile, commande non-linéaire, convoi, AGV (Automatic Guided Vehicles), RTK GPS.

## 1 Introduction

Afin de réduire et supprimer les nuisances, liées à la saturation du trafic routier, de nouvelles alternatives "Urban Transportation Systems" sont en développement. Certains de ces projets basés sur le libre accès de véhicules, ont été développés depuis le milieu des années 90, par exemple Praxitèle en France [11]-[3], CarLink aux USA [21], Crayon au Japon [6].

Pour se déplacer au mieux de manière autonome, l'une des nombreuses fonctionnalités apparaît être le convoyage de véhicules composé d'un leader suivi par des véhicules en ligne. Cette fonctionnalité est développée ici. De plus, les véhicules automatisés ont besoin de se localiser avec précision dans leur environnement. Différents capteurs peuvent être envisagés. Quelques applications, nécessitant des infrastructures équipées, ont été développées ou sont en développement : des vans automatisés en suspension sur des voies de guidage, grâce aux forces Electro Magnetic sont décrits dans [13], des flottes de navettes urbaines, détectant des balises magnétiques intégrés dans la route, sont présentées dans [7]. La majorité des systèmes d'autoroutes automatisées (AHS : Automated Highways Systems) requièrent une infrastructure particulière de la route couplée à une architecture adaptée comme décrit dans le projet PATH [9]. Une alternative consiste à l'utilisation de certains capteurs directs (comme les caméra [4], radar [10], ...), qui n'ont pas besoin d'une infrastructure équipée, donnent des mesures relatives par rapport au véhicule précédent. Enfin, des approches mixées sont également étudiées : dans [20], les auteurs combinent un capteur directeur (radar laser) avec un système de communication intégré à la route. Malheureusement, ces capteurs ont leurs inconvénients : respectivement le coût et la nécessité d'équiper une zone, et, le trop faible champ de perception. Pour surmonter ces problèmes, une intéressante solution est l'utilisation des capteurs RTK GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System), qui peuvent se localiser en temps-réel avec une précision de l'ordre du centimètre. Ces capteurs, couplés à une communication inter-véhicules, permettent de partager des mesures de localisation absolue. Des résultats de convoi basé sur

cette technologie peuvent être trouvés dans la littérature : dans [2], les auteurs développent en particulier l'aspect GPS, alors que dans [16], la communication est étudiée.

Nos travaux sont basés sur l'utilisation de capteurs RTK-GPS et d'une communication inter-véhicules basée sur la technologie WiFi. Ces capteurs sont montés sur des véhicules électriques urbains appelés Cycabs (Fig. 1), utilisés comme plates-formes expérimentales dans de nombreux laboratoires français.



FIG. 1 – Nos véhicules expérimentaux : Cycabs

Un objectif possible dans le convoi est de contrôler la vitesse des véhicules pour garder soit une distance directe constante ou un temps constant (voir par exemple [8]) entre les voitures. Ici, notre but est de garder une distance curviligne constante entre les véhicules. L'avantage principal de la distance curviligne est qu'elle reflète la distance parcourue et se justifie lorsque la trajectoire de référence présente de fortes courbures (ce qui n'est pas le cas avec la distance directe).

La synthèse de notre loi de commande se fonde sur des techniques de l'automatique non-linéaire, comme dans [5], contrairement aux approches linéaires (voir par exemple [14], [16]). Les avantages de cette technique sont une meilleure performance et la possibilité de totalement découpler les commandes latérale et longitudinale. Dans [22], la loi de commande latérale a été présentée pour un véhicule. Grâce à cette possibilité de découpler les deux types de contrôle, le guidage latéral de chaque véhicule dans le convoi peut être réalisé de manière indépendante en se basant sur cette loi de commande. Ainsi, ce papier ne présente que la loi de commande longitudinale.

Habituellement, l'approche standard pour contrôler un convoi est basé sur une stratégie locale, c'est-à-dire chaque véhicule est contrôlé de proche-en-proche, comme dans [1], où les commandes appliquées à chaque véhicule sont calculées uniquement à partir des données reçues par le véhicule précédent. Une telle approche dite de proche-en-proche présente des inconvénients, comme une accumulation d'erreurs : les erreurs de régulation, introduites par les bruits sur les capteurs, grandissent de véhicule en véhicule menant à des oscillations. Pour surmonter ces problèmes, une communication inter-véhicules doit être considérée : dans [15], les distance, vitesse et accélération entre les véhicules sont transmises dans le but de calculer une prédiction de l'erreur en distance et l'intégrer dans le contrôleur. Dans [24], les informations provenant des véhicules immédiatement devant et derrière sont utilisées pour garantir la stabilité.

Dans ce papier, afin de capturer plus largement le comportement du convoi, les informations transmises par le véhicule immédiatement devant et par le leader sont utilisées pour contrôler chaque élément du peloton dans une stratégie de commande globale. De plus, dans le but d'assurer la sécurité des passagers et leur confort, un module de supervision est généré afin d'éviter d'éventuelles saturations de la loi de commande dans des situations critiques.

Le papier est organisé comme suit : tout d'abord, la modélisation du convoi est présentée. Puis, la commande du convoi est exposée. Enfin, d'un côté, une expérimentation grandeur nature montre les performances d'un convoi composé de deux véhicules, et d'un autre côté, des simulations d'un long convoi (10 éléments) sont reportées.

## 2 Modélisation du convoi

### 2.1 Hypothèses de modélisation

Les Cycabs fonctionnant en environnement urbain (vitesse réduite sur l'asphalte), peuvent être décrits par un modèle cinématique tricycle. De nombreux essais expérimentaux, réalisés dans différentes conditions, confirment ce choix. Par conséquent, le célèbre modèle tricycle, validé par de nombreux laboratoires [12] [19] [4] [22], est employé pour décrire le Cycab : les deux roues avants sont remplacées par une roue virtuelle unique située à la mi-distance entre les roues réelles. Les notations utilisées sont détaillées et illustrées sur la figure Fig. 2 :

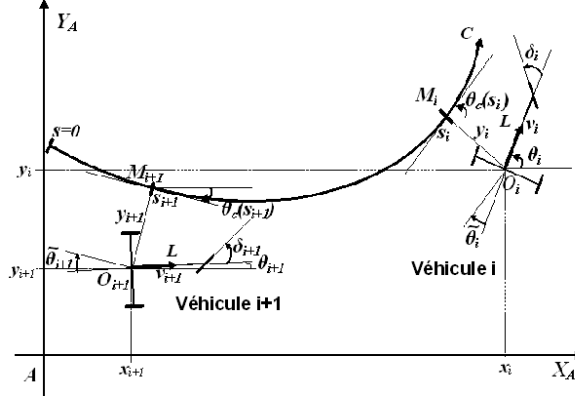


FIG. 2 – Description du modèle tricycle

- $C$  est le chemin de référence, défini dans un repère absolu  $[A, X_A, Y_A]$ .
- $O_i$  est le centre de l'essieu arrière du  $i^{eme}$  véhicule.
- $M_i$  est le point situé sur  $C$  le plus proche de  $O_i$ .
- $s_i$  est l'abscisse curviligne sur  $C$  du point  $M_i$ .  $c(s_i)$  représente la courbure du chemin  $C$  en ce point,
- $\theta_c(s_i)$  correspond à l'orientation de la tangente de  $C$  en  $M_i$ , exprimée dans le repère  $[A, X_A, Y_A]$ .
- $\theta_i$  est le cap du  $i^{eme}$  véhicule au point  $O_i$ , dans le repère  $[A, X_A, Y_A]$ .
- $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_c(s_i)$  définit l'erreur angulaire du  $i^{eme}$  véhicule par rapport à  $C$ .
- $y_i$  est l'erreur latérale du  $i^{eme}$  véhicule par rapport à  $C$ .
- $\delta_i$  correspond à l'angle de braquage de la roue virtuelle avant du  $i^{eme}$  véhicule.
- $L$  est la distance entre les essieux du robot.
- $v_i$  est la vitesse linéaire du  $i^{eme}$  véhicule au point  $O_i$ .
- $a_i = \dot{v}_i$  est l'accélération linéaire du  $i^{eme}$  véhicule au point  $O_i$ .
- $n$  est le nombre de véhicules formant le convoi, d'où  $i < n$ .

### 2.2 Modèle d'état

Le vecteur  $(s_i, y_i, \tilde{\theta}_i)$  décrit l'état du  $i^{eme}$  véhicule. Le modèle s'exprime alors (voir [19], [4], [22]) :

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

Les objectifs de commande sont d'amener et de maintenir  $y_i$  et  $\tilde{\theta}_i$  à 0, grâce à  $\delta_i$ , et  $s_i - s_{i+1}$  à une valeur désirée, notée  $d$ , grâce à  $v_i$ . De plus, il est considéré que :  $y_i \neq \frac{1}{c(s_i)}$  (le véhicule n'est pas sur le centre de courbure du chemin de référence). En pratique, si les  $n$  robots sont bien initialisés, de telles difficultés n'arrivent jamais.

### 3 Synthèse de la loi de commande

D'abord, il est montré que les commandes longitudinale et latéral peuvent être découplées. Puis, la commande longitudinale est synthétisée.

#### 3.1 Découplage

Par une transformation inversible de l'état et de la commande, le modèle non-linéaire (1) de chaque Cycab peut être converti de manière exacte, sous forme chaînée, voir [19] :

$$\begin{aligned}\dot{a}_{1i} &= m_{1i} \\ \dot{a}_{2i} &= a_{3i}m_{1i} \\ \dot{a}_{3i} &= m_{2i}\end{aligned}$$

où  $(a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}) = (s_i, y_i, (1-c(s_i)y_i) \tan \tilde{\theta}_i)$  est le vecteur d'état chaîné et  $M = (m_{1i}, m_{2i})^T = \Upsilon(v_i, \delta_i)$  est le vecteur de commande chaîné. De cette forme chaînée, une grande partie de la théorie de l'automatique linéaire peut être employée. Plus précisément, on peut noter que la commande latérale de chaque véhicule (c'est-à-dire la commande de  $a_{2i}$  et de  $a_{3i}$ ) peut être réalisée indépendamment en contrôlant uniquement  $m_{2i}$ . Comme  $m_{2i}$  est relié d'une manière inversible à  $\delta_i$  (à condition que  $v_i \neq 0$ ), la commande latérale est entièrement découplée de la commande longitudinale : dans la commande latérale,  $v_i$  apparaît comme un paramètre libre, qui peut donc être employé pour réaliser la commande longitudinale. Des détails et les performances de la commande latérale sont présentés dans [22].

#### 3.2 Commande longitudinale

Dans cette partie, une loi longitudinale de commande est conçue. D'abord, deux stratégies de navigation sont étudiées et comparées. L'une est basée sur une approche locale du convoi et l'autre est référencée sur le leader. Puis, une stratégie globale de commande (GCS), combinant les avantages de chaque approche, est élaborée. Une fois l'entrée de la commande définie, la loi est synthétisée. Finalement, pour apporter le confort et la sûreté, un module de supervision : le monitoring, traite les commandes calculées.

##### 3.2.1 Stratégies de navigation pour le convoi

La stratégie locale de commande (LCS) est exposée dans [1] : le convoi est commandé de proche-en-proche (la loi de commande de chaque voiture dépend seulement de son précédent). L'objectif de cette commande de convoi est de préserver une distance curviligne constante entre chaque voiture et son suiveur. Le schéma sur la figure Fig. 3 présente la loi. Nous pouvons noter que l'entrée de la loi de commande est définie par l'erreur entre le  $i^{eme}$  et le  $(i + 1)^{eme}$  :

$$e_{i+1}^i = s_i - s_{i+1} - d \tag{2}$$

Même si les expériences effectuées avec deux voitures sont satisfaisantes (l'écart est bien respecté, assurant la sûreté du convoi), la stabilité d'un long convoi ne peut pas être garantie car les véhicules sont commandés de proche-à-proche, voir les simulations dans [1]. En effet, l'accumulation des erreurs crée des oscillations dans les commandes, entraînant un manque de confort et l'instabilité sur de longs pelotons.

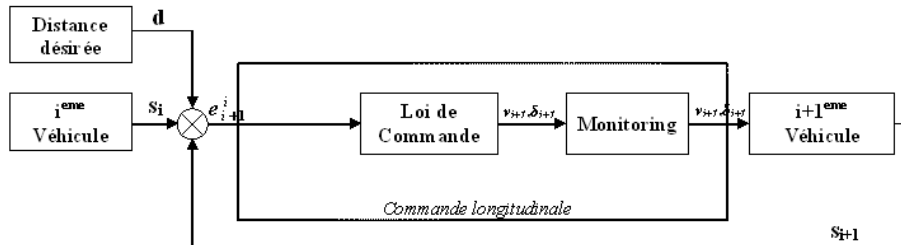


FIG. 3 – Contrôle longitudinal avec LCS

Pour surmonter ces problèmes, une autre approche, préservant une distance curviligne constante avec une référence commune (le leader du convoi est choisi ici), peut être étudiée. En cas de scission du convoi ou d'un comportement inattendu d'un membre du convoi, la référence commune peut être changée pour un nouveau leader. Ainsi, l'entrée de la loi de commande est simplement l'erreur entre le premier et le  $(i + 1)^{eme}$  véhicules définie par :

$$e_{i+1}^1 = s_1 - s_{i+1} - i.d \quad (3)$$

Ainsi, on élimine l'accumulation des erreurs et dans la théorie, le nombre d'éléments dans le convoi est illimité. Malheureusement, le véhicule immédiatement devant le véhicule contrôlé n'est pas considéré par ce dernier : par exemple si le  $i^{eme}$  véhicule s'arrête (ou ralentit), le  $(i + 1)^{eme}$  continue à maintenir un espace constant avec le leader sans tenir compte de la voiture immédiatement devant, la distance entre le  $i^{eme}$  et le  $(i + 1)^{eme}$  véhicule n'est pas respectée et, des collisions peuvent se produire.

Par conséquent, ces deux approches présentent plusieurs avantages, mais également quelques inconvénients ! Notre idée consiste à développer une approche basée sur ces deux stratégies pour en garder leurs principaux avantages. Pour cela, un module nommé "variable adaptée de commande", calculant l'entrée de la loi de commande, a pour but de donner plus ou moins de prédominance à chaque approche. Le schéma de la commande longitudinale est donné par Fig. 4. Quand le convoi est hors de danger,

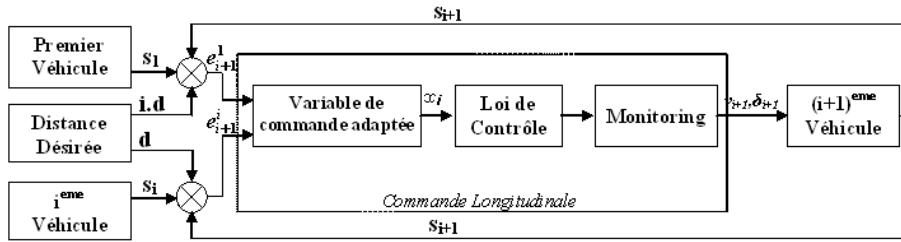


FIG. 4 – Commande longitudinale avec GCS

nous favorisons le confort des passagers, soit la référence absolue ; et, quand les risques de collision se apparaissent, l'inter-distance doit être respectée, ainsi nous permutons progressivement à une approche de proche-en-proche.

### 3.2.2 Stratégie de Commande Globale (GCS)

Il semble, donc, intéressant de définir l'entrée de la loi de commande en se basant sur les erreurs définies par les deux approches. Une consigne adaptée peut être construite de la forme :

$$x_i = \sigma_i(s_i - s_{i+1} - d) + (1 - \sigma_i)(s_1 - s_{i+1} - id) \quad (4)$$

avec  $\sigma_i$  donnant plus ou moins d'importance à chaque approche. L'étape suivante est de définir  $\sigma_i$ . Pour cela, nous définissons la distance de sécurité  $d_s$  comme la distance curviligne minimale qui doit toujours être observée entre 2 véhicules. Il s'avère que si l'écart est proche de cette limite, la régulation est mauvaise et la distance de sécurité peut ne pas être respectée. Ainsi, l'approche locale de proche-en-proche LCS doit prévaloir sur l'approche référencée absolue ( $\sigma_i$  doit être choisi proche de 0). À l'opposé, cette dernière doit être prédominante quand la sécurité est assurée ( $\sigma_i$  choisi proche de 1). De ces commentaires, quand  $e_{i+1}^i$  est proche de  $-d + d_s$ ,  $\sigma_i$  doit être près de 0 ; et quand l'écart est près de  $d$ ,  $\sigma_i$  proche de 1. Une manière pour définir  $\sigma_i$  est de se baser sur les fonctions sigmoïdes, voir (5) et Fig. 5.

$$\sigma_i(y_{i+1}) = 0.5 \left( \frac{1 - e^{-ay_{i+1}}}{1 + e^{-ay_{i+1}}} + 1 \right) = \frac{1}{1 + e^{-ay_{i+1}}} \quad (5)$$

La fonction sigmoïde a besoin d'être translatée pour avoir la commutation de 0 à 1 entre  $-d_s$  et 0. Donc, nous fixons :

$$z_{i+1} = e_{i+1}^i + \frac{d-d_s}{2} \quad (6)$$

Le paramètre  $a = 2.5$  est choisi de manière à satisfaire les mêmes conditions.

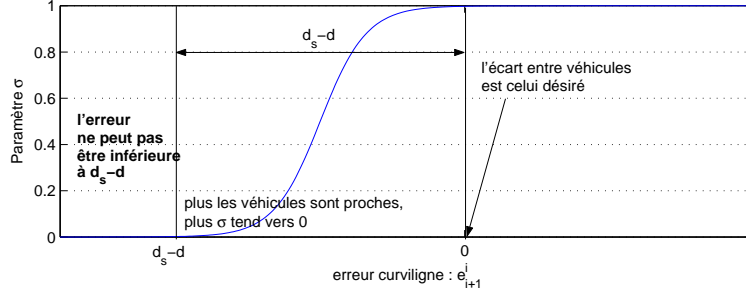


FIG. 5 – Fonction  $\sigma_i$

### 3.2.3 Loi de commande

Une fois l'entrée de commande définie, la prochaine étape consiste à synthétiser la loi. En différenciant l'entrée de la loi de commande  $x_i$  (equation (4)), on obtient :

$$\dot{x}_i = \sigma_i \dot{e}_{i+1}^1 + (1 - \sigma_i) \dot{e}_{i+1}^i + \dot{\sigma}_i e_{i+1}^1 - \dot{\sigma}_i e_{i+1}^i \quad (7)$$

Pour simplifier les équations, on pose :

$$\dot{\sigma}_i = A(z_{i+1}) \dot{e}_{i+1}^i \quad \text{avec} \quad A(z_{i+1}) = \frac{ae^{-az_{i+1}}}{(1+e^{-az_{i+1}})^2} \quad (8)$$

De (7) et (8), il peut être écrit :

$$\dot{x}_i = \sigma_i \frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1 - y_1 c(s_1)} + (1 - \sigma_i) \frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} + A(z_{i+1})(s_1 - s_i + d - id) \dot{e}_{i+1}^i - \sigma_i \frac{v_{i+1} \cos \tilde{\theta}_{i+1}}{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})} \quad (9)$$

Comme dans la synthèse de la commande latérale, des techniques de linéarisation exactes sont également employées : la variable de commande est la vitesse du suiveur  $v_{i+1}$ . La commande fictive  $u_i$ , liée à  $v_{i+1}$  est introduite. Ainsi, de (9) :

$$v_{i+1} = \frac{1 - y_{i+1} c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{i+1} [1 + A(z_{i+1})(s_1 - s_i - id + d)]} \left( \sigma_i \frac{v_1 \cos \tilde{\theta}_1}{1 - y_1 c(s_1)} + [1 - \sigma_{i+1} + A(z_{i+1})(s_i - s_i - (i-1)d)] \frac{v_i \cos \tilde{\theta}_i}{1 - y_i c(s_i)} - u_i \right) \quad (10)$$

L'évolution de l'erreur est simplement donnée par  $\dot{x}_i = u_i$ . Ainsi, il est possible d'exprimer la commande fictive par :

$$u_i = -k x_i \quad (11)$$

La loi de commande du convoi est obtenue en reportant (11) dans (10). Nous pouvons noter en étudiant  $1 + (s_1 - s_i - id + d)A(z_{i+1})$ , que des singularités peuvent se produire pour quelques situations exceptionnelles. En pratique, la probabilité que  $1 + (s_1 - s_i - id + d)A(z_{i+1}) = 0$  se produise, est extrêmement rare. La configuration unique, où les problèmes se produisent, serait que le premier, le  $i^{eme}$  et également le  $(i+1)^{eme}$  véhicules soient dans une combinaison spécifique. Si le cas se produisait,  $v_{i+1}$  augmenterait pour atteindre des valeurs irréelles, ces vitesses utopiques seraient immédiatement corrigées par le Monitoring.

### 3.3 Monitoring

Malheureusement, des problèmes de saturation peuvent apparaître : par exemple, si les voitures sont trop éloignées, de fortes accélérations, et des vitesses élevées, se produisent. Afin d'assurer la sécurité et le confort des passagers, quelques contraintes doivent être satisfaites. Il semble ainsi naturel de borner la vitesse dans une plage de fonctionnement raisonnable. Nous fixons :

$$0 \leq v_{i+1} \leq v_{max} \quad (12)$$

Cependant, si le véhicule  $i + 1$  est loin derrière le véhicule  $i$ , ou si le véhicule  $i$  présente un comportement étrange (par exemple s'il s'arrête brusquement), la loi de commande (10) peut alors mener à de vives accélérations/décélérations, très désagréables pour les passagers à bord. Par conséquent, le Monitoring exposé sur la figure Fig. 6, est introduit, dans le but de favoriser le confort des passagers, dans la mesure où leur sécurité peut être garantie. Plus précisément, la notation  $a_{conf}$  sur la figure Fig. 6 représente l'accélération/décélération maximale assurant le confort pour les passagers à bord. Puis, si l'accélération/décélération du véhicule  $i + 1$ , dénotée  $a_{i+1}$ , est supérieure à cette valeur, un test de sécurité est réalisé :

- le cas  $a_{i+1} > a_{conf} > 0$  se produit quand le véhicule  $i + 1$  est loin derrière le véhicule  $i$ . Dans une telle situation,  $a_{i+1}$  peut être limitée à  $a_{conf}$  sans risque de collision.
- le cas  $a_{i+1} < -a_{conf} < 0$  se réalise si le véhicule  $i$  s'arrête brutalement. Dans un tel cas, des risques de collision doivent être étudiés. À ce but, la distance couverte par le véhicule  $i + 1$ , avec une décélération  $-a_{conf}$ , est d'abord calculée, et son inter-distance finale avec le véhicule  $i$  est déduite (le plus mauvais cas, c'est-à-dire le véhicule  $i$  est arrêté, est ici traité).
  - si cette inter-distance est supérieure à  $d_s$ , alors  $a_{i+1}$  peut sans risque être limitée à  $-a_{conf}$ .
  - dans l'autre cas, la décélération ( $-a_{urg}$  dénoté) menant à une inter-distance projetée égale à  $d_s$  est calculée, et  $a_{i+1}$  est limitée à cette valeur. La sécurité des passagers est privilégiée par rapport à leur confort.

En calculant l'inter-distance finale des véhicules avec une décélération constante ( $-a_{urg}$  ou  $-a_{conf}$ ), les retards introduits par les actionneurs du véhicule expérimental sont pris en considération.

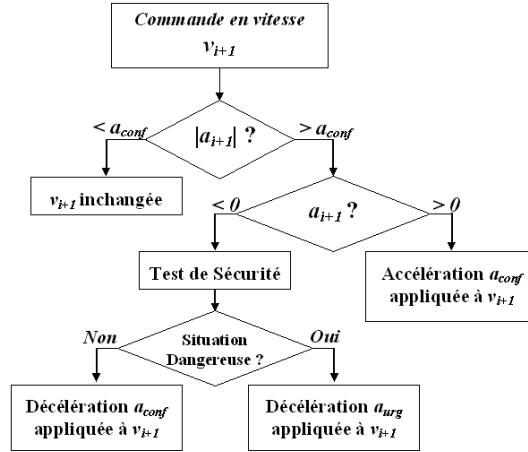


FIG. 6 – Schéma de Monitoring

## 4 Résultats expérimentaux et de simulations

Cette section est séparée en deux : premièrement, les résultats expérimentaux valident la loi standard et le monitoring, et deuxièmement, les simulations mettent en avant la stratégie de commande globale GCS en la comparant à l'approche locale LCS.

### 4.1 Experimentation

Plusieurs expériences ont été effectués au "Campus des Cézeaux". Les expériences présentées ici impliquent seulement deux véhicules expérimentaux ( $\sigma_i$  n'a aucune influence car la voiture précédente et le leader sont identiques). Cependant, des expériences avec plus de véhicules sont projetées, dès que notre laboratoire sera équipé de véhicules supplémentaires.

Les véhicules expérimentaux utilisés, appelés Cycab, sont illustrés sur la figure Fig. 1. Leur petite dimension (longueur  $1.90m$ , largeur  $1.20m$ ) est un avantage pour le trafic urbain. La configuration cinématique utilisée est identique à celle de la voiture. Leur vitesse maximale est  $v_{max} = 18km/h$ . Les



capteurs RTK GPS embarqués dans les véhicules fournissent des mesures avec une précision de l'ordre de  $2cm$ , à une fréquence d'échantillonnage de  $10Hz$ . Les mesures GPS du leader sont transmises vers le suiveur grâce à une communication WiFi.

Les gains de la loi de commande latérale sont définis pour imposer une convergence du véhicule sur le chemin de référence sur une distance de  $15m$ . Les paramètres de la loi longitudinale sont fixés à  $d = 8.0m$ ,  $k = 0.6$ ,  $v_{max} = 4m/s$ ,  $a_{conf} = 1m/s^2$  (donnée fournie d'après les études faites dans [23]) et  $d_s = 6.50m$ . Notre expérience peut être divisée en trois parties, voir Fig. 7. D'abord, nous examinons l'accrochage; pour cela, nous fixons l'espace initial entre les voitures proche de  $20m$ . Grâce au monitoring, l'allure apparaît confortable (aucune saturation sur l'accélération et vitesse sont visibles Fig. 8). Dans une deuxième phase, les performances longitudinales de la loi en conditions standards sont analysées. Une fois que la consigne est atteinte, l'erreur longitudinale présente un écart-type satisfaisant de  $4.7cm$  et une valeur moyenne de  $1.0cm$  (Fig. 9). Finalement, la sécurité, en situation critique est étudiée. En

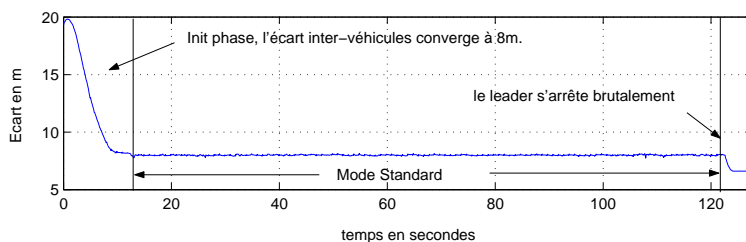


FIG. 7 – Distance curviligne entre les véhicules

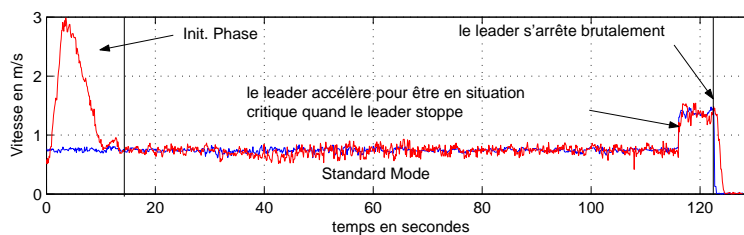


FIG. 8 – Vitesses mesurées par GPS

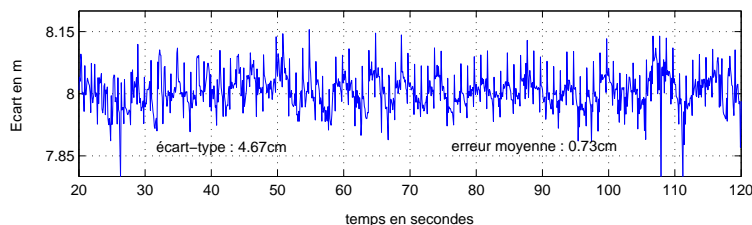


FIG. 9 – Zoom sur la distance curviligne en mode standard

préliminaire, le leader se stabilise à une vitesse plus élevée afin de placer le peloton en situation critique si le Cycab de tête s'arrête brutalement. Puis, le leader s'arrête soudainement. Comme la sécurité ne peut être assurée avec une décélération égale à  $-a_{conf}$ , une décélération d'urgence égale à  $-1.2m/s^2$  est calculée et appliquée, voir Fig. 10 et Fig. 11.

Pour conclure, l'expérience prouve les bonnes performances de la commande avec monitoring (le confort est examiné au début de l'expérience et la sécurité au final).

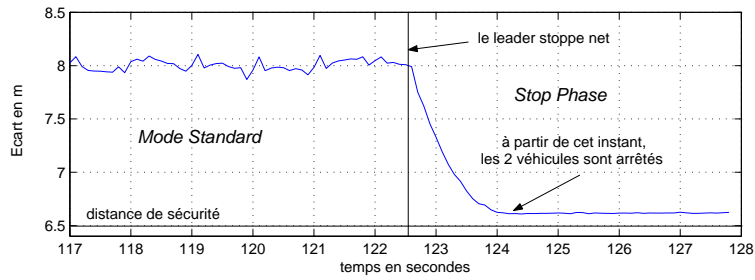


FIG. 10 – Distance curviligne entre les véhicules en phase d’arrêt

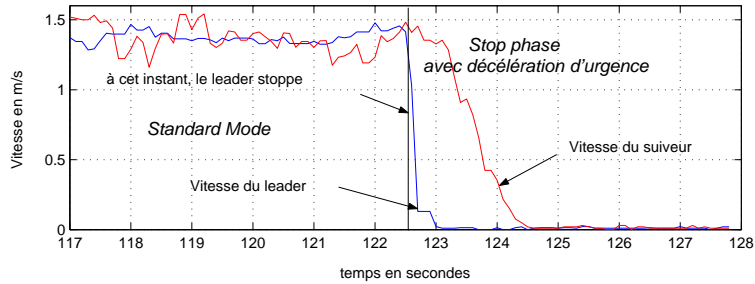


FIG. 11 – Zoom sur la vitesse en situation standard

## 4.2 Simulations

Dans cette partie, notre approche est comparée à une approche classique de proche-en-proche. Le scénario commun est le suivi d’un chemin, par un peloton constitué de 10 voitures, à une vitesse constante de  $2m/s$  (fixé par le leader). Afin de simuler une loi de commande de proche-à-proche, le paramètre  $\sigma_i$  est fixé à 0 pendant la simulation. Entre les deux simulations, seul le paramètre de  $\sigma_i$  diffère : les autres paramètres de simulation sont choisis égaux (identiques à l’expérience). Enfin, les bruits de mesure des capteurs RTK-GPS sont introduits par l’ajout d’un bruit blanc avec un écart type de  $10cm$ .

La première simulation illustre le proche-en-proche. Afin de présenter l’accumulation des erreurs, l’écart entre chaque véhicule et un élément du convoi, par exemple le leader du convoi, est étudié. La figure Fig. 12 prouve les principaux inconvénients d’une approche locale. La distance avec le leader présente un écart type de  $9.7cm$  pour le premier suiveur, tandis que pour le dernier il est de  $67.7cm$ . De plus, les performances sont mauvaises dans les virages serrés : quand le dernier véhicule est dans une forte courbure, à  $t = 95s$  voir Fig. 12, l’erreur maximale enregistrée est de  $2.80m$ .

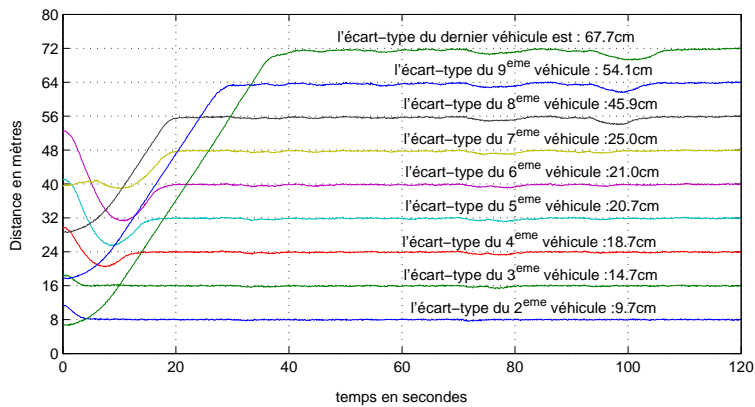


FIG. 12 – Ecart curviligne avec le leader (proche-en-proche)

Dans la seconde simulation, en utilisant la GCS, les inconvénients disparaissent : il n'y a plus de perturbations, voir Fig. 13. Chaque suiveur semble être soumis à des erreurs du même ordre. Les erreurs longitudinales standards de chacun des véhicules sont près de  $10\text{cm}$  ( $9.5\text{cm}$  pour le premier suiveur et de  $10.9\text{cm}$  pour le dernier - le bruit GPS introduit est retrouvé), voir Fig. 15. De ces simulations, il semble évident que cette loi de commande surmonte les limitations de l'approche de proche-à-proche. D'ailleurs, en observant le paramètre  $\sigma_i$  dans la phase d'initialisation (Fig. 14), nous pouvons voir que les lois longitudinales permutent progressivement d'une configuration de proche-à-proche (quand la distance inter-véhicule est trop petite) à une approche référencée sur le leader. Cela assure la sécurité du peloton (grâce à l'approche locale LCS), quand les voitures sont trop près, et ; une fois le risque écarté, des performances de régulation satisfaisantes sont assurées (par le référencement absolu sur le leader). Les simulations montrent les performances de la loi de commande et, particulièrement la capacité d'adaptation de l'erreur longitudinale à la situation rencontrée.

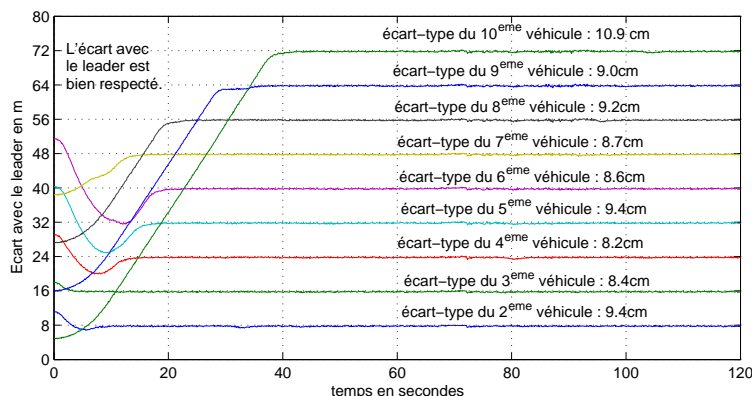


FIG. 13 – Ecart curviligne avec le leader (GCS)

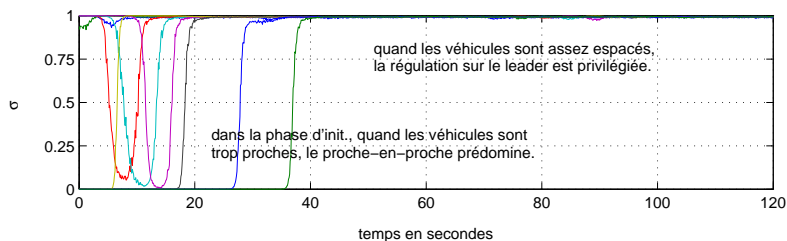


FIG. 14 –  $\sigma_i$

Véhicule	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LCS	9.7	14.7	18.7	20.7	21.0	25.0	45.9	54.1	67.7
GCS	9.4	8.4	8.2	9.4	8.6	8.7	9.2	9.0	10.9

FIG. 15 – Ecart-type (en cm) selon la stratégie de commande

## 5 Conclusion

Dans cette article, une Stratégie Globale de Commande (GCS) est proposée pour contrôler un convoi de véhicules. Celle-ci tient compte du véhicule immédiatement devant (comme la Stratégie Locale standard de Commande (LCS)), mais également des véhicules précédents. Ainsi, en situation standard (lorsque la sécurité est assurée), l'accumulation des erreurs inhérente au LCS est évitée. Cependant, le véhicule immédiatement devant est pris en considération quand les véhicules sont anormalement près les uns des autres. Un module de supervision : "Monitoring" est également introduit afin de garantir sécurité et

confort aux passagers. En conclusion, les performances de la stratégie globale sont démontrées à travers des expérimentations sur des véhicules urbains et des simulations de longs convois.

D'un point de vue technologique, les pertes possibles de signaux GPS, dues à l'effet "canyoning", sont un souci important. Pour traiter cette difficulté, la fusion de données combinant les capteurs GPS et odométriques est étudiée. Une autre solution consiste en reconstruisant l'état des véhicules du convoi par la vision, voir [18] et [17]. De plus, la communication en temps réel de chaque véhicule vers les véhicules rangés derrière, semble être un défi ambitieux pour de longs pelotons.

## Références

- [1] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, and P. Martinet. Nonlinear control for urban vehicles platooning, relying upon a unique kinematic GPS. In *22<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, Barcelona (Spain), April 2005.
- [2] M.E. Cannon, C. Basnayake, S. Crawford, S. Syed, and G. Lachapelle. Precise GPS sensor subsystem for vehicle platoon control. In *Conf. ION GPS/GNSS*, pages 213–224, Portland OR (USA), Sept. 2003.
- [3] P. Daviet, S. Abdou, and M. Parent. Platooning for vehicles and automatic parking by scheduling robotic actions. In *Intern. Symposium on Robotics and Manufacturing (WAC'96)*, Montpellier (France), 1996.
- [4] P. Daviet and M. Parent. Platooning for small public urban vehicles. In *4<sup>th</sup> Intern. Symposium Experimental Robotics (ISER'95)*, pages 345–354, Stanford, CA (USA), July 1995.
- [5] A. De Luca, G. Oriolo, and C. Samson. Feedback control of a nonholonomic car-like robot. In *Robot Motion Planning and Control*, J.P. Laumond eds, volume 229 of *Lectures Notes in Control and Information Sciences*, pages 171–253, Springer-Verlag, 1998.
- [6] P. Evans. New energy sources for the car : how toyota sees the future. *Energy News (Australian Institute of Energy)*, 18(2), June 2000.
- [7] D. Gillet and T. Chevroulet. BURST : Bright Urban System for Transportation. In *2<sup>nd</sup> Intern. Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration (WESIC'99)*, Newport (Wales), Sept. 1999.
- [8] A. Girault and S. Yovine. Stability analysis of a longitudinal control law for autonomous vehicles. In *IEEE Conf. on Decision and Control (CDC'99)*, volume 4, pages 3728–3733, Phoenix AR (USA), December 1999.
- [9] R. Horowitz and P. Varaiya. Control design of an automated highway system. *Proc. IEEE*, 88(7) :913–925, July 2000.
- [10] H. Kuroda, S. Kuragaki, T. Minowa, and K. Nakamura. An adaptive cruise control system using a millimeter wave radar. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'98)*, volume 1, pages 168–172, Stuttgart (Germany), October 1998.
- [11] C. Laugier. Towards autonomous vehicles for future Intelligent Transportation Systems. In *Proc. 6<sup>th</sup> Conf. of Italian Association in Artificial Intelligence*, pages 251–258, Padova (Italy), Sept. 1998.
- [12] J.P. Laumond, editor. *La Robotique Mobile*. Hermes Science, Paris, Sept. 2001.
- [13] M<sup>3</sup> Team. The M<sup>3</sup> urban transportation system. FTA Project Report MA-26-7077, MagneMotion Inc., Acton, MA (USA), January 2003.
- [14] H. Makela, P. Kaarmila, and K. Koskinen. Convoy navigation. In *3<sup>d</sup> IFAC Conf. on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV'98)*, pages 31–36, Madrid (Spain), March 1998.
- [15] T.S. No, K.-T. Chong, and D.-H. Roh. A Lyapunov function approach to longitudinal control of vehicles in a platoon. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 50(1) :116–124, January 2001.
- [16] M. Ohtomo, R. Kimura, S. Fukushima, and N. Fujii. Automatic following system utilizing vehicle-to-vehicle communication. In *IEEE Intern. Conf. on Intelligent Vehicles (IV'98)*, volume 2, pages 381–384, Stuttgart (Germany), October 1998.

- [17] E. Royer, J. Bom, M. Dhome, B. Thuilot, M. Lhuillier, and F. Marmoiton. Outdoor autonomous navigation using monocular vision. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2005*, Edmonton (Canada), August 2005.
- [18] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, and T. Chateau. Towards an alternative GPS sensor in dense urban environment from visual memory. In *British Machine Vision Conference*, volume 1, pages 197–206, Kingston (England), September 2004.
- [19] C. Samson. Control of chained systems : application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 40(1) :64–77, January 1995.
- [20] Y. Seto and H. Inoue. Development of platoon driving in ahs. *JSAE Review*, 20(1) :93–99.
- [21] S. Shaheen, K. Wipyewski, C. Rodier, L. Novick, M.A. Meyn, and J. Wright. Carlink II : a commuter carsharing pilot program final report. PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2004-23, Univ. of California, Berkeley (USA), August 2004.
- [22] B. Thuilot, J. Bom, F. Marmoiton, and P. Martinet. Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor. In *5<sup>th</sup> IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV'04)*, Lisboa (Portugal), July 2004.
- [23] TranSafety Inc. Simulated on-the-road emergencies used to test stopping sight distance assumptions. *Road Management and Engineering Journal*, July 1997.
- [24] Y. Zhang, E.B. Kosmatopoulos, P.A. Ioannou, and C.C. Chien. Autonomous intelligent cruise control using front and back information for tight vehicle following maneuvers. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 48(1) :319–328, January 1999.