



HAL
open science

Cybercar: l'alternative à la voiture particulière

Thierry Fraichard

► **To cite this version:**

Thierry Fraichard. Cybercar: l'alternative à la voiture particulière. *Navigation (Paris)*, 2005, 53 (1), pp.53-74. inria-00001074v1

HAL Id: inria-00001074

<https://inria.hal.science/inria-00001074v1>

Submitted on 27 Sep 2006 (v1), last revised 2 Mar 2007 (v3)

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.

Cybercar : l'alternative à la voiture particulière

Thierry Fraichard

Inria^a Rhône-Alpes & Gravir^b-CNRS^c
655 av. de l'Europe, Montbonnot, 38334 St Ismier Cedex, France
http://emotion.inrialpes.fr/fraichard
thierry.fraichard@inria.fr

27 septembre 2006

Adresse de correspondance — Thierry FRAICHARD

Inria	Tel :	+33 4 76 61 52 21
655 av. de l'Europe, Montbonnot	Fax :	+33 4 76 61 52 10
38334 St Ismier Cedex	Mail :	thierry.fraichard@inria.fr
France		

Résumé — En un peu plus d'un siècle, la voiture particulière est devenue le moyen de transport numéro un dans le monde. Ce succès ne va pas sans poser un certain nombre de problèmes (accidents, pollution, etc.), qui vont aller en s'aggravant avec l'augmentation prévue du nombre de voitures particulières. Cet article présente le concept Cybercar, un système de transport public qui se veut une alternative viable à la voiture particulière. Un Cybercar est un véhicule public doté de capacités de conduite automatisée. Des systèmes Cybercars sont déjà opérationnels en Europe. Les technologies utilisées pour la conduite automatisée dans ces systèmes sont détaillées ainsi que celles qui seront nécessaires pour les générations futures de Cybercars.

Abstract — In about a century, the private car has become the most popular transport means in the world. This success comes with a price (accidents, pollution, etc.), which is likely to increase in the future given the expected augmentation of the number of cars. This article presents the Cybercar concept, a public transport system aimed at replacing the private car. A Cybercar is a public vehicle with fully automated driving capabilities. Several Cybercar systems are already operational in Europe. The technologies for automated driving that are used in such systems are detailed along with the technologies that will be required in the future generation of Cybercars.

^aInstitut National de Recherche en Informatique et en Automatique.

^bLab. Graphisme, Vision et Robotique.

^cCentre National de la Recherche Scientifique.

Cybercar : l'alternative à la voiture particulière

Thierry Fraichard

27 septembre 2006

Résumé — En un peu plus d'un siècle, la voiture particulière est devenue le moyen de transport numéro un dans le monde. Ce succès ne va pas sans poser un certain nombre de problèmes (accidents, pollution, etc.), qui vont aller en s'aggravant avec l'augmentation prévue du nombre de voitures particulières. Cet article présente le concept Cybercar, un système de transport public qui se veut une alternative viable à la voiture particulière. Un Cybercar est un véhicule public doté de capacités de conduite automatisée. Des systèmes Cybercars sont déjà opérationnels en Europe. Les technologies utilisées pour la conduite automatisée dans ces systèmes sont détaillées ainsi que celles qui seront nécessaires pour les générations futures de Cybercars.

Abstract — In about a century, the private car has become the most popular transport means in the world. This success comes with a price (accidents, pollution, etc.), which is likely to increase in the future given the expected augmentation of the number of cars. This article presents the Cybercar concept, a public transport system aimed at replacing the private car. A Cybercar is a public vehicle with fully automated driving capabilities. Several Cybercar systems are already operational in Europe. The technologies for automated driving that are used in such systems are detailed along with the technologies that will be required in the future generation of Cybercars.

Table des matières

1	L’automobile, la “Success Story” du 20^e siècle	3
2	Les problèmes liés à l’automobile	3
2.1	Problèmes de sécurité	4
2.2	Problèmes environnementaux	4
2.3	Problèmes sociétaux	4
3	ITS ou l’automobile améliorée	4
4	Les limites de ITS en milieu urbain	6
5	Le concept Cybercar	7
6	Les projets Cybercars en France et en Europe	8
7	Les technologies pour la conduite automatisée	10
7.1	Contrôle-commande	11
7.2	Navigation-localisation	11
7.3	Détection-évitement d’obstacles	12
8	Les futurs Cybercars	13
8.1	Liberté de mouvement	13
8.1.1	Localisation en tout point	13
8.1.2	Calcul de trajectoire	14
8.2	Environnement ouvert	17
8.2.1	Modélisation de l’environnement	17
8.2.2	Prédiction du comportement des obstacles mobiles	18
9	Conclusion	18
	Liste des illustrations	20
	Bibliographie	21

1 L'automobile, la "Success Story" du 20^e siècle

On attribue généralement la paternité de l'automobile aux français René Panhard et Émile Levassor qui, en utilisant le moteur à pétrole inventé par l'allemand Gottlieb Daimler, créent en 1891 le prototype de l'automobile telle qu'elle va se généraliser par la suite : moteur à explosion situé à l'avant, boîte de vitesse à engrenages, transmission par chaîne aux roues arrières [1].

En un peu plus d'un siècle, l'automobile va connaître un développement extraordinaire. Elle va passer du statut de produit artisanal réservé à une élite à celui de produit industriel destiné à un marché de masse. Surtout, son développement va avoir un double impact économique et sociétal majeur sur nos sociétés industrialisées.

Tout d'abord, l'automobile a été et reste encore source d'une activité économique fondamentale que ce soit de façon directe, pour sa production et son entretien, ou de façon indirecte, pour tous les secteurs liés à son utilisation : produits pétroliers, infrastructures routières, services, etc. (en Allemagne par exemple, un emploi sur sept dépend de l'automobile qui contribue par ailleurs pour un cinquième au Produit National Brut [2]).

Ensuite, plus que tout autre produit, l'automobile a profondément bouleversé nos sociétés et leurs organisations. Elle a permis à une proportion de plus en plus importante de la population de changer radicalement sa façon de se déplacer en favorisant notamment le développement des banlieues résidentielles avec leurs centres commerciaux et leurs autoroutes urbaines. Nos modes de vie et de déplacement en ont été durablement affecté et sont maintenant devenus très largement dépendant de ce moyen de transport.

D'un point de vue technologique, l'automobile a fait des progrès considérables et n'a cessé de s'améliorer. C'est aujourd'hui un produit de haute technologie disponible pour un coût très faible compte tenu de ses performances que ce soit en terme de vitesse, tenue de route, confort, sécurité et fiabilité. L'automobile s'adapte parfaitement à des trajets courts (quelques centaines de mètres), ou plus longs (plusieurs centaines de kilomètres). Elle est capable de transporter une à plusieurs personnes avec des charges variées. Outre des facteurs symboliques associés à l'automobile (liberté, statut social, etc.), cette flexibilité et cette polyvalence ont fait de l'automobile le moyen de transport préféré de tout un chacun (ou presque). Quelques chiffres pour se convaincre de ce succès : en l'an 2000, on évaluait à 740 millions le nombre d'automobiles dans le monde, la plupart dans les pays industrialisés avec une moyenne de 500 voitures pour 1000 habitants et 15000 kilomètres parcourus chaque année.

En un peu plus de cent ans, l'automobile est donc devenue un produit *indispensable* à la vie quotidienne de millions de personnes. Ce développement va se poursuivre puisque certains experts estiment que le nombre d'automobiles dans le monde pourrait doubler dans les vingt prochaines années compte tenu notamment de la demande croissante de pays émergeant tels que la Chine ou l'Inde.

2 Les problèmes liés à l'automobile

Le succès de l'automobile s'est malheureusement accompagné de l'apparition d'un certain nombre de problèmes qui ont pris de plus en plus d'importance au

fur et à mesure de l'accroissement du nombre d'automobiles. Ces problèmes de nature très diverses peuvent se regrouper en trois catégories : les problèmes liés à la sécurité, à l'environnement et ceux de nature sociétale.

2.1 Problèmes de sécurité

En l'an 2000, il y a eu plus de 41000 morts du fait d'accidents de la route en Union Européenne (plus 1,7 millions de blessés). Le nombre de victimes aux États-Unis est du même ordre de grandeur. On notera que cela équivaut peu ou prou au crash d'un avion moyen-courrier par jour. . . Le coût économique de ces accidents est évidemment énorme. Certes, la sécurité a beaucoup augmenté ces vingt dernières années du fait notamment de l'amélioration des véhicules et des infrastructures. Il semble cependant difficile de continuer à améliorer les choses du fait de la persistance du facteur humain. L'homme est dans la majorité des cas responsable des accidents : temps de réaction trop élevé, réaction inadéquate (voire accidentogène dans 30% des situations).

2.2 Problèmes environnementaux

L'automobile est une source importante de pollution et notamment d'émission de CO₂. Les constructeurs automobiles font de gros efforts depuis plusieurs années pour réduire les émissions polluantes (amélioration des moteurs, traitement des gaz d'échappement, etc.). Malheureusement, ces efforts ne suffisent pas à compenser l'augmentation du nombre de véhicules sans compter le goût actuel du public pour des véhicules de type 4×4 plus puissants et plus polluants (aux États-Unis par exemple, la vente de "Sport Utility Vehicles" a été multipliée par trois entre 1990 et 2000).

2.3 Problèmes sociétaux

Il y a d'ores et déjà trop d'automobiles. La plupart des centres urbains de taille grande ou moyenne ont des problèmes d'encombrement (bouchons, manque de places de parking, etc.). Cette situation engendre nombre de nuisances qui affectent non seulement les conducteurs mais aussi les résidents de ces centres urbains (bruit, stress, pollution, manque d'espace pour les piétons, etc.).

Se pose aussi le problème de notre dépendance vis à vis de ce moyen de transport. Le développement de l'automobile a engendré des modes de vie qui sont impensables sans voiture. Cette dépendance affecte bien sur tous ceux qui n'ont pas accès à une automobile (enfants, personnes handicapées, personnes âgées), et le vieillissement de la population n'arrange pas les choses.

3 ITS ou l'automobile améliorée

Les principaux pays industrialisés (Japon, États-Unis et Europe) ont pris conscience de la gravité des problèmes énoncés précédemment et ont entrepris d'y apporter des solutions. De nombreux programmes ont ainsi vu le jour depuis environ vingt ans. Parmi les principaux programmes gouvernementaux, nous pouvons citer :

Japon : Advanced Cruise-Assist Highway Systems, 1989 [3], et Advanced Safety Vehicle, 1991 [4].

États-Unis : Automated Highway Systems, 1990 [5], Intelligent Vehicle Initiative, 1998 [6].

Europe : Eureka Prometheus, 1986 [7], Advanced Driver Assistance Systems in Europe, 2000 [8].

Tous ces différents programmes (et bien d’autres encore) visent à développer ce que l’on appelle communément aujourd’hui des “Intelligent Transport Systems” (ITS).

Les stratégies ITS au Japon [9], aux États-Unis [10] et en Europe [11] diffèrent sur certains points mais dans l’ensemble, de tels systèmes reposent sur l’utilisation des technologies les plus avancées dans le domaine de l’informatique, des télécommunications, de l’électronique, des capteurs et du contrôle, pour améliorer l’efficacité et la sécurité du transport terrestre (et principalement du transport routier).

L’information est au cœur de ces systèmes. Les technologies mises en œuvre doivent permettre la circulation d’informations entre les véhicules ou entre les véhicules et l’infrastructure. Ces informations de natures très diverses (état du trafic, itinéraire à suivre, présence d’accidents, présence de véhicules ou d’obstacles, etc.), doivent permettre de voyager plus vite, dans de meilleures conditions et de façon plus sûre. Par ailleurs, l’historique de ces informations doit fournir un outil d’analyse des modes de déplacement et favoriser la conception de systèmes de transport globalement plus efficaces.

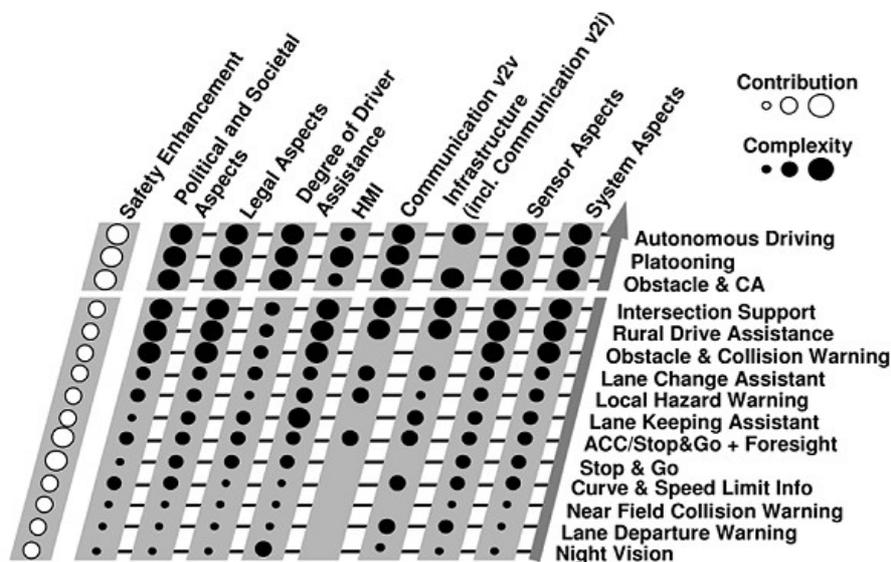


FIG. 1 – La feuille de route Adase des outils ITS en Europe (source Adase).

Dans le domaine de l’amélioration des véhicules, les systèmes embarqués de navigation (planification d’itinéraires), sont sans doute les premiers exemples de systèmes que l’on peut ranger dans la famille des outils ITS. Les systèmes

de navigation les plus récents communiquent avec l'infrastructure (via liaison téléphonique ou RDS) pour obtenir l'état courant du trafic.

De nombreux autres outils d'assistance au conducteur (Advanced Driver Assistance Systems) sont en cours de développement ou prévus. La figure 1 détaille les développements prévus en Europe. L'assistance est d'abord passive : amélioration de la perception (nocturne, brouillard, angles morts, etc.), signaux d'alarme (obstacle devant, changement de voie, hypovigilance, etc.). Elle devient progressivement active : contrôle longitudinal (contrôle adaptatif d'allure, freinage d'urgence, etc.), puis latéral (correction de trajectoire, évitement d'obstacles, conduite en peloton, etc.). L'objectif à long terme est la conduite automatisée

4 Les limites de ITS en milieu urbain

La philosophie ITS vise, pour l'essentiel, à l'amélioration de l'automobile traditionnelle et de son milieu naturel, le réseau routier. Cependant, l'automobile, fut-elle améliorée, reste un moyen de transport privé : une automobile transporte dans la plupart des cas une seule personne, son propriétaire. En terme d'espace, l'automobile est très peu performante : elle occupe trop de place (d'autant que la plupart du temps, elle est garée et inutilisée).

Ce problème d'espace devient critique en milieu urbain où l'espace disponible est limité. Quand le nombre d'automobiles devient trop important, les différents problèmes évoqués précédemment surviennent : encombrement, temps de trajet en augmentation, manque de places de parking, pollution, nuisances pour les citoyens, etc. La résolution de ce problème d'espace passe par deux types de mesures :

- Décourager l'utilisation de la voiture particulière : essentiellement par des incitations d'ordre économique (parcmètres, parkings payants, péages, etc.), ou réglementaire (accès restreint voire interdit).
- Offrir des moyens de transport alternatifs plus performants que les transports publics classiques (métro, tramway, bus) qui manquent de flexibilité.

Des alternatives en matière de transport public existent déjà : taxis, taxis collectifs, systèmes de Personal Rapid Transit¹, etc., mais ces différentes alternatives restent marginales pour des raisons soit économiques, soit liées à la qualité du service rendu (*cf* l'étude comparative menée dans [14]).

Une alternative plus intéressante est celle dite du "Car Sharing". Cela repose sur la mise à disposition des usagers d'une flotte de petits véhicules en libre service. Ces véhicules desservent une zone géographique donnée. Une station centrale surveille en permanence la position et l'état de chacun des véhicules. Ces véhicules sont disponibles 24 heures sur 24 mais ils doivent être pris et retourné dans des stations spéciales réparties dans la zone desservie. Des expériences de Car Sharing ont été faites au Japon, aux États-Unis ainsi qu'en Europe depuis la fin des années 90. En France, nous pouvons citer notamment les expériences Praxitèle [15, Saint Quentin en Yvelines, 1997] et Liselec [16, La Rochelle, 1999]

Le concept du Car Sharing induit une différence fondamentale avec l'automobile traditionnelle : l'automobile n'est plus la propriété d'un seul utilisateur. Elle devient un service. Une seule automobile sert à plusieurs usagers. De même

¹Flotte de petits véhicules à guidage automatisé et disponible à la demande évoluant sur un réseau protégé spécifique (de type rail en général), *eg* YorkPRT [12]. ULTra [13]

que l'on qualifie souvent l'automobile traditionnelle de voiture privée ou particulière, on peut parler dans le cas du Car Sharing de *voiture publique*.

5 Le concept Cybercar

Les différentes expériences de Car Sharing ont montré la viabilité et les avantages du concept de voiture publique. Elles en ont montré aussi certaines limitations. Pour commencer, les véhicules ne sont pas disponibles "N'importe où, n'importe quand", ils ne sont disponibles qu'en station (ce qui pose un problème si la demande de transport est très diffuse sur une zone donnée ou pendulaire). Ensuite, ce moyen de transport public n'est pas accessible à tous (comme peut l'être par exemple le bus ou le métro), il faut pouvoir conduire (ce qui exclut les personnes jeunes, âgées ou handicapées).

Le concept Cybercar est une réponse à ces deux problèmes. Un Cybercar est une *voiture publique automatisée*, c'est à dire un véhicule Car Sharing avec des fonctionnalités de conduite automatisée (la conduite manuelle reste éventuellement possible). La possibilité de se déplacer de manière automatique permet :

- La redistribution des Cybercars dans la zone desservie en fonction de la demande.
- La prise et le dépôt d'un Cybercar n'importe où dans la zone desservie.
- L'accessibilité à tous les usagers.

A la différence de l'approche ITS qui considère la conduite automatisée comme un objectif lointain, l'approche Cybercar envisage dès le départ des fonctionnalités de conduite automatisée.

<i>Environnement</i>	<i>Vitesse d'évolution</i>	<i>Nature des obstacles</i>
voies protégées	faible/moyenne	absent
voies semi-protégées	"	vulnérables
zones piétonnes	faible	"
voies urbaines calmes	moyenne	véhicules, vulnérables
voies urbaines	"	"
voies péri-urbaines	rapide	"
routes	rapide/très rapide	"

TAB. 1 – La feuille de route Cybercar (un vulnérable désigne un obstacle de type piéton, chien, etc.).

Tout roboticien sait que les deux facteurs clé qui contraignent le développement de systèmes robotiques autonomes sont la complexité de l'environnement (présence ou non d'obstacles mobiles au comportement futur inconnu notamment), et la vitesse d'évolution du système robotique (dynamique des mouvements à vitesse élevée). Ce qui caractérise le concept Cybercar dans ses aspects conduite automatisée est son caractère incrémental. On augmente progressivement la vitesse moyenne d'évolution ainsi que la complexité des environnements dans lesquels la conduite automatisée doit avoir lieu (table 1). Cette philosophie permet d'envisager dès à présent le déploiement de systèmes Cybercars puis d'étendre progressivement leur champ d'application. On peut constater la

convergence à terme entre les approches Adase et Cybercar. Dans les deux cas, on aboutit à un véhicule capable de se déplacer de manière automatique dans le réseau routier.

6 Les projets Cybercars en France et en Europe



FIG. 2 – Le véhicule Cycab de l’Inria. Il est maintenant commercialisé par la société Robosoft.

En France, on peut considérer que les premiers travaux dans le domaine des Cybercars ont commencé il y a environ dix ans avec le programme Praxitèle [15, 1993-1997]. Le volet applicatif de ce projet visait à montrer la viabilité d’un système Car Sharing classique au travers de l’expérience en vraie grandeur menée à Saint Quentin en Yvelines durant la dernière année du projet. Praxitèle comportait toutefois un volet recherche dans lequel ont été démontré certaines fonctionnalités de conduite automatisée dont notamment la conduite en convoi où un véhicule était capable de suivre automatiquement un véhicule leader (en conduite manuelle) [17]. Dans Praxitèle, l’intérêt de la conduite en convoi était d’optimiser la redistribution des véhicules de station à station (la formation d’un convoi permet à un seul opérateur de déplacer simultanément plusieurs véhicules). Dans le contexte Cybercar, la formation de convoi peut aussi être utilisée pour augmenter le débit de véhicules sur une voie donnée (augmentation obtenue grâce à la réduction des espaces inter-véhicules).

Par ailleurs, Praxitèle a permis le développement d’un premier prototype de véhicule Cybercar. Ce véhicule dénommé Cycab diffère radicalement d’une automobile classique. C’est un véhicule électrique biplace de petite taille (figure 2). L’électronique embarquée permet la conduite automatisée sous contrôle informatique. Il reste cependant pilotable manuellement par joystick. En fonction des applications envisagées, différentes combinaison de capteurs sont possibles afin de permettre au Cycab de connaître son état ainsi que celui de son environnement.

Les travaux sur les Cybercars se sont ensuite poursuivis en France au sein du programme français La Route Automatisée [18, 1998-2001], puis au niveau européen dans le cadre du projet Cybercars [19, 2001-2004]. L’objectif de ce projet était de fédérer les différents travaux menés au niveau européen dans les domaines liés au concept Cybercar. Il a permis de tester et de valider un



FIG. 3 – Le système Parkshuttle du parking P3 de l’aéroport Amsterdam-Schiphol [depuis décembre 1997].



FIG. 4 – Le système Parkshuttle du “business park” de Rivium (NL) : [phase I : février 1999 ; phase II : été 2003] (source Frog Navigation Systems).

certain nombre de technologies clés pour le développement des futurs systèmes Cybercars. Ces technologies concernent la localisation de véhicule, la navigation automatique, la détection et l’évitement d’obstacles inattendus. etc. Ce projet a surtout été l’occasion de démontrer des systèmes Cybercars dans des conditions réelles d’utilisation. Le plus ancien de ces systèmes a été implanté dans l’un des parkings de l’aéroport d’Amsterdam-Schiphol dès décembre 1997 (figure 3).



FIG. 5 – Les Cybercabs de l’exposition Floriade à Amsterdam [avril-octobre 2002] (source Frog Navigation Systems).



FIG. 6 – Le système Parkshuttle nouvelle génération à Antibes [juin 2004].

Depuis, d'autres systèmes avec différents types de Cybercars ont été déployés dans des environnements variés : un "business park" (figure 4), un parc d'exposition floral (figure 5) et le centre ville d'Antibes (figure 6). Cette dernière expérimentation ayant été réalisée en juin 2004 à l'occasion du workshop final du projet Cybercars.

Dans tous les cas, il s'agit de systèmes où des Cybercars se déplacent de façon complètement automatisée sur un réseau de voies dédiées semi-protégées. Le fonctionnement de ces systèmes s'apparentent à celui d'un ascenseur horizontal : l'utilisateur appelle un Cybercar depuis l'une des stations du réseau, monte à bord quand l'un d'entre eux se présente et indique sa destination dans le réseau en pressant simplement sur un bouton. La conduite automatisée est rendue possible moyennant une infrastructure instrumentée. Cette instrumentation a pour but de permettre aux Cybercars de se localiser et partant, de se déplacer dans le réseau. Ces technologies se sont améliorées et aujourd'hui, l'équipement est devenu facile à installer avec un impact sur les infrastructures existantes minimal. Il n'a fallu par exemple que quelques jours pour équiper le centre ville d'Antibes en vue de l'expérience de juin 2004. S'agissant de voies semi-protégées, des obstacles inattendus (piétons, chiens, etc.) peuvent survenir. La sécurité est donc un aspect important de ces systèmes. Elle est assurée au moyen de capteurs divers qui vont permettre aux Cybercars de détecter tout obstacle inattendu afin de l'éviter.

Les différentes technologies mise en œuvre dans les systèmes Cybercars opérationnels aujourd'hui sont présentés dans la section 7. Certains des travaux réalisés dans le volet recherche du projet et qui concerne donc les générations futures de systèmes Cybercars sont détaillées eux dans la section 8.

7 Les technologies pour la conduite automatisée

Les technologies requises pour la conduite automatisée qui sont opérationnelles aujourd'hui dans les systèmes Cybercars existants peuvent se regrouper en trois familles principales : celles qui concernent les aspects contrôle-commande du véhicule, les aspects localisation et conduite automatisée (que l'on nomme habituellement navigation en robotique), et enfin les aspects détection et évitement d'obstacles.

7.1 Contrôle-commande

La conduite automatisée nécessite en premier lieu que le système informatique embarqué puisse contrôler les différents actionneurs du véhicule. Jusqu'à une date récente, équiper un véhicule en vue de son contrôle informatique nécessitait des équipements spécialisés et coûteux. L'introduction récente dans le milieu automobile de la technologie "Drive by wire", *ie* d'actionneurs contrôlés électroniquement et non plus mécaniquement, permet de disposer aujourd'hui de toute une panoplie d'actionneurs à commande électronique à faible coût (accélération, freinage, direction, etc.). Les actionneurs de ce type comportent des micro-contrôleurs qui sont tous reliés entre eux via un réseau, le plus répandu étant le bus série Controller Area Network (CAN) de l'équipementier allemand Bosch.

Une architecture matérielle de ce type permet de réduire la connectique à bord d'un véhicule et d'en simplifier la conception. Mais cela pose de nouveaux problèmes au niveau de la conception de l'architecture logicielle embarquée : cette dernière doit être distribuée sur les différents micro-contrôleurs. La conception de systèmes temps-réel embarqués distribués est un problème délicat qui se pose aussi bien dans le domaine de l'aéronautique que de l'automobile. L'approche de type AAA (Adequation Algorithm Architecture) permet par exemple de simplifier le processus de conception d'une architecture logicielle embarquée en découplant le problème de la programmation de l'architecture logicielle proprement dite et celui de la répartition-synchronisation des différentes tâches sur les micro-contrôleurs [20]

7.2 Navigation-localisation

En ce qui concerne la navigation, les différents systèmes Cybercars existant se limitent à suivre des itinéraires prédéfinis. Suivre une trajectoire prédéfinie est un problème classique en automatique que l'on sait résoudre au moyen de lois de commande adaptées. Ces techniques de suivi de trajectoire requièrent néanmoins la connaissance de la position courante du véhicule (problème de localisation).

Les Cybercars existant utilisent diverses techniques pour se localiser. Ces techniques ont différents avantages et inconvénients : elles peuvent donner soit une position relative, soit une position absolue. Certaines nécessitent une instrumentation plus ou moins importante de l'environnement. Enfin, leur précision et leur champ d'application est variable. Souvent, la localisation est effectuée en combinant plusieurs de ces techniques.

Localisation proprioceptive : ce type de technique calcule la position relative du véhicule en intégrant les informations fournies par un ou plusieurs capteurs d'ego-mouvement : odomètre, accéléromètre, gyromètre, etc. Le problème majeur qui affecte ce type de localisation est la dérive qui croît au cours du temps. De ce fait, la localisation proprioceptive ne peut être utilisée qu'à court terme, des relocalisations à intervalles réguliers sont indispensables.

Filoguidage : un fil enterré dans lequel circule un courant électrique matérialise la route à suivre. Des capteurs inductifs embarqués sur le véhicule permettent

de détecter le fil. Ne reste plus alors au véhicule qu'à le suivre en utilisant une technique d'asservissement classique.

Guidage sur plots magnétiques : le principe est similaire à celui du filoguidage. Des plots magnétiques enterrés et espacés de quelques mètres remplacent le fil électrique. Le véhicule utilise ces plots pour se relocaliser. La navigation entre deux plots se fait en se basant sur la localisation proprioceptive (typiquement l'odométrie). Cette technique a moins d'impact sur l'environnement que le filoguidage. La navigation est moins précise mais elle peut se faire à des vitesses plus élevées.

Guidage sur transpondeurs : Le principe est proche de celui du guidage sur plots magnétiques. Ces derniers sont remplacés par des transpondeurs, *ie* des dispositifs électroniques passifs capables de fournir au véhicule non seulement leurs positions mais aussi des informations complémentaires, *eg* caractéristiques de la voie, présence d'une intersection et nature de cette dernière, etc. Plots magnétiques et transpondeurs peuvent aussi coexister.

GPS (Global Positioning System) : c'est un système de localisation absolue dont le principe est bien connu maintenant (localisation par mesure du temps de vol de signaux en provenance de différents satellites). La précision du GPS standard, de l'ordre de plusieurs mètres, est insuffisante pour la navigation. Par contre, le GPS différentiel (utilisation d'une station au sol qui sert de référence locale) et surtout le Real-Time Kinematic (RTK) GPS (analyse du temps de vol mais aussi de la phase des signaux satellites) permet d'obtenir des précisions de l'ordre du centimètre qui sont suffisantes pour la navigation. Le GPS semble la solution de localisation idéale. Ce système a malheureusement des limites, notamment en milieu urbain où la présence de bâtiments élevés peut empêcher de détecter suffisamment de satellites pour une bonne localisation.

7.3 Détection-évitement d'obstacles

Les différents systèmes Cybercars existant opèrent sur des voies de circulation semi-protégées. Des obstacles inattendus (piétons, chiens, etc.) peuvent donc survenir et il est critique de les détecter afin de pouvoir les éviter. Pour l'instant, l'évitement d'obstacle consiste simplement à freiner pour éviter la collision. La détection d'obstacles est assurée au moyen de différents types de capteurs.

Détecteurs de choc : ce sont de simples capteurs mécaniques. Ils sont en général intégrés dans les pare-chocs du véhicule et provoquent l'arrêt de celui-ci en cas de contact direct avec un obstacle. En terme de sécurité, ils ne peuvent remplir leur rôle que pour de faibles vitesses.

Télémètres (ultra-sonore, laser, radar) : ce type de capteur fonctionnent tous sur le même principe. On calcule la distance à un obstacle en mesurant le temps de vol d'une onde quelconque (ultra-sonore, lumineuse ou radio selon le type de télémètre).

- Les télémètres ultra-sonore sont adaptés pour la détection d’obstacles proches (de un à trois mètres). L’information fournie est peu précise et sujette à un certain nombre de problèmes bien connus (absorption, réflexion spéculaire, réverbération, etc.). Ils peuvent suffire pour certaines applications et ont l’avantage d’être peu coûteux.
- Les télémètres laser sont basés sur un faisceau laser rotatif permet de scanner un (voire plusieurs) plan horizontal et de détecter les obstacles situés dans ce plan. Ils ont une portée de l’ordre de 50 mètres et donnent la distance et l’azimut d’un obstacle avec une très bonne précision. Ils sont cependant sensibles aux conditions atmosphériques (pluie, brouillard, etc.). Ce sont à l’heure actuelle les capteurs les plus utilisés.
- Les radars ont été introduits récemment dans le milieu automobile (pour des applications de contrôle d’allure adaptatifs). Leur portée est plus grande que celle des télémètres laser mais leur précision est moins bonne. Par contre, ils peuvent mesurer directement la vitesse relative d’un obstacle en utilisant l’effet Doppler . Ils sont aussi beaucoup moins sensibles aux conditions atmosphériques.

8 Les futurs Cybercars

Les systèmes Cybercars existant correspondent à la ligne 2 de la table 1. Il reste un long chemin à parcourir avant de parvenir à la dernière ligne de cette table... Pour parvenir à cet objectif, il va falloir d’abord s’affranchir de deux contraintes qui affectent les systèmes Cybercars actuels. La première contrainte est celle des itinéraires prédéfinis. La seconde est celle du caractère semi-protégé des environnements. Les conséquences de la disparition de ces deux contraintes sont analysées dans les deux sections suivantes.

8.1 Liberté de mouvement

Si l’on souhaite un jour que les Cybercars soient disponibles “N’importe où, n’importe quand”², il faut que ces Cybercars puissent évoluer librement dans la zone qu’ils desservent. Ils ne doivent pas être contraints de suivre des itinéraires prédéfinis comme c’est le cas aujourd’hui. Cette liberté de mouvement n’est possible que si les Cybercars ont les deux capacités suivantes :

1. Capacité de se localiser de façon précise en tout point de la zone desservie.
2. Capacité de calculer la trajectoire à accomplir pour parvenir à son but.

8.1.1 Localisation en tout point

Si ce n’était ses limitations en zones urbaines, le GPS serait la solution au problème de localisation en tout point. Si les zones d’ombres, *ie* les zones dans lesquelles le GPS est inopérant, sont de petite taille, il est envisageable de combiner GPS et localisation proprioceptive pour obtenir une localisation en tout point avec une précision suffisante.

Un autre type de solution est la localisation sur amers. Un amer est un élément caractéristique de l’environnement, il peut être naturel ou artificiel.

²De manière par exemple à pouvoir utiliser son téléphone portable pour commander un Cybercar quel que soit l’endroit où l’on se trouve.

On se localise par rapport à ces amers. Si l'on dispose d'information sur leurs positions absolues, on peut se localiser de façon absolue.

Il existe déjà des systèmes commerciaux de localisation sur amers basé sur la combinaison laser-réflecteurs optiques, *eg* le système NAV 200 de Sick AG. Ce type de système est bien adapté à un usage intérieur, il nécessite cependant une instrumentation de l'environnement. Les travaux de recherche actuels porte sur l'utilisation d'amers naturels de l'environnement et de la vision.

8.1.2 Calcul de trajectoire

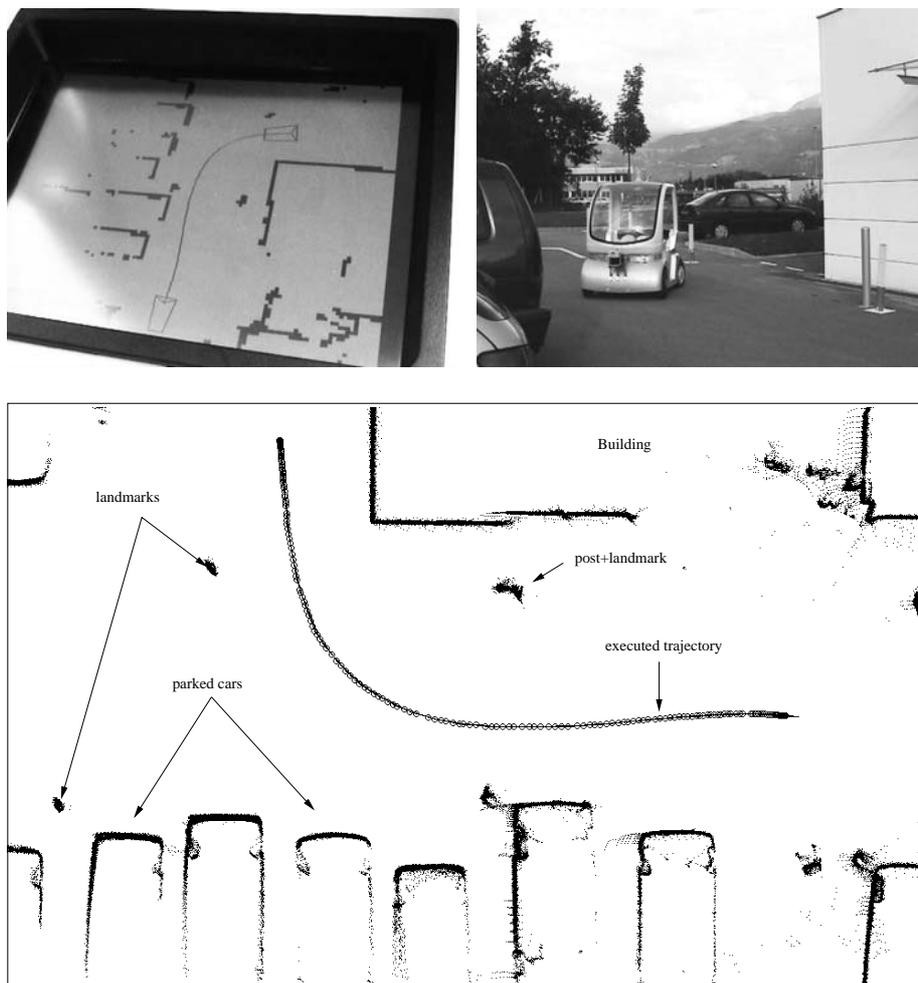


FIG. 7 – Conduite automatisée à vitesse lente du Cycab de l'Inria Rhône-Alpes : calcul d'un chemin sans collision vers le but (en haut, à gauche), suivi du chemin nominal (en haut, à droite), trace de l'exécution (en bas) [21].

La capacité de calculer la trajectoire qui doit mener un Cybercar à son but est évidemment une composante clé de la conduite automatisée. Ce problème

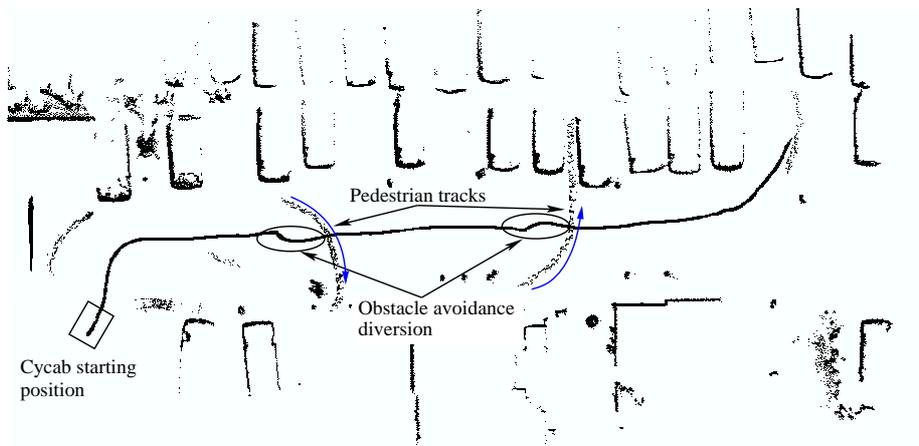


FIG. 8 – Conduite automatisée à vitesse lente du Cycab de l’Inria Rhône-Alpes en présence d’obstacles mobiles à faible dynamique : suivi et adaptation locale du chemin nominal (en haut), trace de l’exécution (en bas) [22].

de calcul préalable de trajectoire, dénommé planification de mouvement en robotique, a fait l’objet de très nombreux travaux de recherche depuis la fin des années 60. Ces travaux ont engendrés des techniques de planification de mouvement pour des systèmes robotiques très divers (bras manipulateurs, véhicules terrestres, hélicoptères, sous-marins, robots humanoïdes, etc.), et placés dans des environnements variés (connus/inconnus, intérieurs/extérieurs, avec ou sans obstacles mobiles, etc). Il est important de noter que, par nature, la planification de mouvement est un processus hors-ligne. Le mouvement est calculé sur la base de modèles : modèle du système robotique et surtout modèle de son environnement (caractéristiques des obstacles notamment). D’après la feuille de route Cybercar de la table 1, on peut distinguer deux types de scénarios dans lesquels les futurs Cybercars seront amenés à évoluer

1. Les Cybercars évoluent à faible vitesse dans des environnements faiblement dynamiques, *ie* avec des obstacles mobiles peu nombreux et se déplaçant lentement.
2. Les Cybercars évoluent à vitesse élevée dans des environnements fortement dynamiques, *ie* avec des obstacles mobiles plus nombreux et se déplaçant rapidement.

Pour le premier type de scénario (faible dynamicité), on peut négliger la dynamique du véhicule et se contenter de calculer le chemin géométrique menant au but. C'est ce chemin qui est fourni au module de navigation du Cybercar (charge à ce dernier de gérer la vitesse le long de ce chemin comme cela est fait aujourd'hui). Calculer un chemin pour un véhicule à roue est une problématique bien maîtrisée aujourd'hui pour laquelle de nombreuses solutions efficaces existent [23]. Ainsi, la conduite automatisée à vitesse lente en environnement à faible dynamicité est d'ores et déjà envisageable. Elle a d'ailleurs été démontrée expérimentalement sur le véhicule Cycab de l'Inria Rhône-Alpes muni d'un dispositif de localisation sur amers combinant laser et réflecteurs optiques (figures 7 et 8).

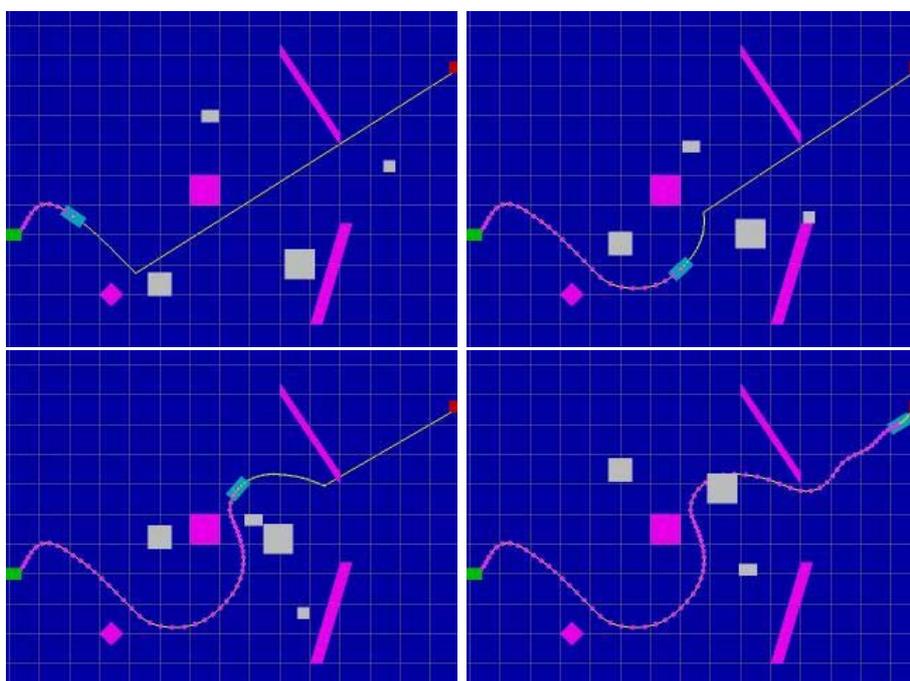


FIG. 9 – La planification itérative de trajectoire (PIT) en action : un véhicule (rectangle bleu) évolue dans un environnement contenant des obstacles fixes (rectangles roses) et mobiles (rectangles gris). Le véhicule part du rectangle vert (à gauche), et doit rejoindre le rectangle rouge (à droite). A différents instants sont représentés : la trajectoire déjà réalisée (en rose) et la trajectoire calculée (en jaune). La trajectoire en jaune se compose de la trajectoire partielle effectivement calculée par PIT (en règle générale, elle n'atteint pas le but) et une ligne droite jusqu'au but (à fin de visualisation seulement).

Pour le deuxième type de scénario (forte dynamicité), l'approche précédente n'est plus envisageable. A vitesse élevée, la dynamique du véhicule ne peut plus être négligée et on ne peut découpler les aspects chemin et vitesse d'une trajectoire. Par ailleurs, la présence d'obstacles mobiles impose une borne supérieure sur le temps disponible pour calculer une trajectoire, borne dont la valeur est inversement proportionnelle à la vitesse des obstacles mobiles. Compte tenu de

la complexité intrinsèque d'un calcul de trajectoire intégrant la dynamique d'un véhicule, on ne dispose pas à ce jour de technique de planification de trajectoire suffisamment performante pour opérer dans un environnement fortement dynamique.

Une solution envisagée à ce problème est celle dite de la planification itérative de trajectoire (PIT), approche qui prend en compte explicitement la contrainte temps-réel imposée par la dynamique de l'environnement [24]. Il existe différentes variantes de PIT [24, 25, 26, 27] mais le principe général est le même : PIT ne cherche pas à calculer une trajectoire complète vers le but. En fonction du temps disponible, PIT ne calcule qu'une trajectoire partielle, *ie* qui ne mène pas forcément jusqu'au but mais qui s'en approche (c'est cette trajectoire partielle qui est fournie au module de navigation du Cybercar). Ensuite PIT répète cette planification partielle avec une fréquence qui est celle imposée par la dynamique de l'environnement (figure 9). L'un des avantages de PIT est qu'à chaque itération, une nouvelle trajectoire est calculée sur la base d'un modèle mis à jour de l'environnement (ceci assure le caractère réactif du processus). Les travaux de recherche actuels portent sur l'analyse de la sûreté et la convergence de ce type d'approche, ainsi bien sûr que sa validation sur véhicules réels.

8.2 Environnement ouvert

Les besoins actuels des systèmes Cybercars en matière de détection d'obstacles sont relativement simples. Il faut essentiellement détecter la présence d'un obstacle immédiatement devant le Cybercar et sur sa trajectoire prédéfinie, peu importe le type de l'obstacle et son comportement futur.

Si maintenant, on souhaite calculer une trajectoire menant au but, la situation est radicalement différente. Comme indiquée dans la section précédente, la planification de mouvement opère sur la base de modèles : modèle du système robotique et de son environnement. En conséquence, avant que de pouvoir planifier une trajectoire, il est nécessaire de disposer d'informations sur les obstacles de l'environnement (forme, position, vitesse, etc.). Ces informations peuvent provenir de sources diverses : connaissances a priori (cartes de l'environnement), capteurs, etc. Dans le cas des obstacles mobiles, il faut de surcroît avoir des informations sur leurs comportements futurs (en effet, planifier un mouvement dans un environnement dynamique implique une projection dans l'avenir). Dans le cas général, on ne dispose pas de cette connaissance, on est alors amené à faire des hypothèses sur le comportement futur des obstacles mobiles. En conclusion, les deux capacités suivantes sont requises :

1. Capacité de modéliser un environnement dynamique (construction d'un modèle de l'environnement à un instant donné).
2. Capacité de prédire le comportement futur des obstacles mobiles.

8.2.1 Modélisation de l'environnement

Les roboticiens sont confrontés à ce problème de modélisation de l'environnement depuis toujours. À ce jour, malgré la quantité de travaux effectués sur ce sujet, il n'est pas résolu.

Dans le contexte Cybercar, la plus grande difficulté provient des obstacles mobiles : comment les détecter et identifier toutes leurs caractéristiques utiles pour la navigation ?

Beaucoup de travaux de recherche sont menés autour de l'utilisation de la vision. Comme l'oeil humain, c'est un capteur qui fournit en effet une information très riche sur l'environnement. Toute la difficulté est d'interpréter cette information pour en extraire les éléments utiles.

La vision a déjà été utilisée dans le domaine automobile, *eg* détection des bords de route, détection des véhicules à l'avant, etc. Les premiers résultats sont encourageants mais ces techniques ne fonctionnent bien que dans certaines conditions (platitude de la route, luminosité, etc.). Il y a encore beaucoup de choses à améliorer et de chemin à accomplir avant que l'on puisse disposer d'un système de vision capable de construire un modèle décent de l'environnement d'un véhicule de type Cybercar.

8.2.2 Prédiction du comportement des obstacles mobiles

Supposons un instant que l'on dispose d'un module de modélisation de l'environnement capable de fournir toutes les informations utiles sur les obstacles mobiles d'un environnement donné à un instant donné. Comment prédire leurs comportements futurs ?

La plupart des techniques prédictives existantes reposent sur une hypothèse de continuité : on choisit un modèle de mouvement censé représenter l'obstacle mobile, *eg* une masse ponctuelle, puis on suppose qu'il va garder un comportement constant, *eg* vitesse constante, accélération constante, etc. La prédiction résulte donc de l'application de cette commande constante à ce modèle. Pour un obstacle mobile "intentionnel" de type piéton ou voiture, on imagine sans peine les limites de ce type de techniques (surtout si l'on souhaite disposer de prédictions valides au delà de quelques secondes seulement).

Dans le contexte Cybercar, il peut être intéressant d'exploiter le caractère intentionnel du mouvement des obstacles mobiles. En d'autres termes, les piétons ou les voitures ont tendance à effectuer des déplacements caractéristiques qui sont en grande partie déterminés par la structure de l'environnement. D'où l'idée d'essayer de déterminer ces déplacements caractéristiques et d'utiliser cette connaissance pour prédire sur le long terme le comportement futur des obstacles mobiles. La détermination des déplacements caractéristiques peut se faire par observation prolongée de l'environnement : les déplacements des obstacles mobiles sont enregistrés puis analysés. Les déplacements similaires sont regroupés et définissent un déplacement caractéristique donné. La prédiction se fait en comparant le mouvement courant d'un obstacle mobile avec l'ensemble des déplacements caractéristiques ainsi appris. Ce type d'approche est actuellement en cours d'expérimentation sur un environnement de type parking [28].

9 Conclusion

Après une brève évocation du succès foudroyant de l'automobile, des problèmes que cela entraîne et du futur de l'automobile au travers du programme Intelligent Transport Systems (ITS), cet article a introduit le concept Cybercar qui se veut une alternative viable à la voiture particulière. Un Cybercar est une voiture publique automatisée qui doit répondre à certains des problèmes posés par l'automobile (accidents, pollution, accessibilité, etc.).

Les différents systèmes Cybercars qui sont déjà opérationnels en Europe

démontrent la validité de ce concept. Cet article a détaillé les technologies utilisées pour la conduite automatisée dans ces systèmes (conduite sur voies semi-protégées seulement), puis a passé en revue les technologies qui seront nécessaires pour les générations futures de Cybercars qui devraient être capable de conduite automatisée en environnement quelconque. Ces technologies concernent les quatre grandes fonctionnalités suivantes : modélisation de l'environnement, localisation, prédiction du comportement futur d'obstacles mobiles et calcul de trajectoire.

Le concept Cybercar est encore jeune, les premiers travaux remontent au début des années 90, mais de grands progrès ont déjà été réalisés. Il reste encore beaucoup de chemin à accomplir avant que d'atteindre la déclinaison ultime du concept Cybercar (la voiture automatisée!). Cependant, compte tenu de la situation du transport routier (notamment en milieu urbain), il ne fait aucun doute que ce concept soit amené à se développer.

Table des figures

1	La feuille de route Adase des outils ITS en Europe (source Adase).	5
2	Le véhicule Cycab de l’Inria. Il est maintenant commercialisé par la société Robosoft.	8
3	Le système Parkshuttle du parking P3 de l’aéroport Amsterdam-Schiphol [<i>depuis décembre 1997</i>].	9
4	Le système Parkshuttle du “business park” de Rivium (NL) : [<i>phase I : février 1999 ; phase II : été 2003</i>] (source Frog Navigation Systems).	9
5	Les Cybercabs de l’exposition Floriade à Amsterdam [<i>avril-octobre 2002</i>] (source Frog Navigation Systems).	9
6	Le système Parkshuttle nouvelle génération à Antibes [<i>juin 2004</i>].	10
7	Conduite automatisée à vitesse lente du Cycab de l’Inria Rhône-Alpes : calcul d’un chemin sans collision vers le but (en haut, à gauche), suivi du chemin nominal (en haut, à droite), trace de l’exécution (en bas) [21].	14
8	Conduite automatisée à vitesse lente du Cycab de l’Inria Rhône-Alpes en présence d’obstacles mobiles à faible dynamicité : suivi et adaptation locale du chemin nominal (en haut), trace de l’exécution (en bas) [22].	15
9	La planification itérative de trajectoire (PIT) en action : un véhicule (rectangle bleu) évolue dans un environnement contenant des obstacles fixes (rectangles roses) et mobiles (rectangles gris). Le véhicule part du rectangle vert (à gauche), et doit rejoindre le rectangle rouge (à droite). A différents instants sont représentés : la trajectoire déjà réalisé (en rose) et la trajectoire calculée (en jaune). La trajectoire en jaune se compose de la trajectoire partielle effectivement calculée par PIT (en règle générale, elle n’atteint pas le but) et une ligne droite jusqu’au but (à fin de visualisation seulement).	16

Références

- [1] Claude-Alain Sarre. *Les Panhard et Levassor, une aventure collective*. ETAI, September 2000.
- [2] Verband der Automobilindustrie. Auto Industry & the Economy. <http://www.vda.de/en/aktuell/statistik/auto+wirtschaft/index.html>.
- [3] Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association (AHSRA). <http://www.ahsra.or.jp>.
- [4] K. Sato. Overview of the Advanced Safety Vehicle Project and Related Activities. *Japan Automobile Research Institute Research Journal*, 25(8), 2003.
- [5] J. Schneider. Automated Highway Systems Research on Design, Development and Implementation Issues. <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/ahssummary.htm>.
- [6] Intelligent Vehicle Initiative. <http://www.its.dot.gov/ivi/ivi.htm>.
- [7] Programme For A European Traffic System with Highest Efficiency And Unprecedented Safety (PROMETHEUS). <http://www.eureka.be>.
- [8] Advanced Driver Assistance Systems in Europe (ADASE). <http://www.adase2.net>.
- [9] ITS Japan. <http://www.its-jp.org/english>.
- [10] ITS USA. <http://www.itsa.org>.
- [11] ITS Europe. <http://www.ertico.com>.
- [12] YokPRT. Specialists in Personal Rapid Transit. <http://www.yorkprt.com>.
- [13] ULTra Urban Light Transport. Advanced Transport Systems Ltd. <http://www.atsltd.co.uk>.
- [14] M. Parent. Automated public vehicles : a first step towards the automated highway. In *Proc. of the World Congress on Intelligent Transport Systems*, Berlin (DE), October 1997.
- [15] Praxitèle : un service public de transport individuel. <http://www-rocq.inria.fr/praxitele>.
- [16] PSA Peugeot Citroën. Liselec : voitures électriques en libre-service. <http://www.psa-peugeot-citroen.com/modules/liselec/intro.html>.
- [17] P. Daviet and M. Parent. Platooning for Small Public Urban Vehicles. In *Proc. of the Int. Symp. on Experimental Robotics*, Stanford, CA (US), July 1995.
- [18] La Route Automatisée. <http://www.lara.prd.fr>.
- [19] Projet européen IST 2000-28487 Cybercars : Cybernetic Technologies for the Car in the City. <http://www.cybercars.org>.
- [20] T. Grandpierre, C. Lavarenne, and Y. Sorel. Optimized Rapid Prototyping For Real Time Embedded Heterogeneous Multiprocessors. In *Proc. of the Int. Workshop on Hardware/Software Co-Design*, Rome (IT), May 1999.
- [21] J. Hermosillo, C. Pradalier, S. Sekhavat, Ch. Laugier, and G. Baille. Towards motion autonomy of a bi-steerable car : Experimental issues from map-building to trajectory execution. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei (TW), May 2003.

- [22] C. Pradalier, J. Hermosillo, C. Koike, C. Braillon, P. P.Bessière, and C. Laugier. Safe and autonomous navigation for a car-like robot among pedestrian. In *IARP Int. Workshop on Service, Assistive and Personal Robots*, Madrid (ES), October 2003.
- [23] J.-P. Laumond, editor. *Robot motion planning and control*, volume 229 of *Lecture Notes in Control and Information Science*. Springer, 1998.
- [24] Th. Fraichard. Trajectory planning in a dynamic workspace : a ‘state-time’ approach. *Advanced Robotics*, 13(1) :75–94, 1999.
- [25] D. Hsu, R. Kindel, J.-C. Latombe, and S. Rock. Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles. In *Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, pages 233–255, Hanover, NH (US), March 2000.
- [26] E. Feron, E. Frazzoli, and M. Dahleh. Real-Time Motion Planning for Agile Autonomous Vehicle. In *Proc. of the AIAA Conf. on Guidance, Navigation and Control*, Denver, CO (US), August 2000.
- [27] F. Large. *Navigation Autonome d’un Robot Mobile en Environnement Dynamique et Incertain*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry (FR), November 2003.
- [28] D. Vasquez and Th. Fraichard. Motion prediction for moving objects : a statistical approach. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3931–3936, New Orleans, LA (US), April 2004.