

Contributions à la planification de mouvement

Thierry Fraichard

▶ **To cite this version:**

Thierry Fraichard. Contributions à la planification de mouvement. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006. tel-00101623

HAL Id: tel-00101623
https://theses.hal.science/tel-00101623

Submitted on 27 Sep 2006

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.

Contributions à la planification de mouvement

Dr. Thierry Fraichard
Inria Rhône-Alpes & Laboratoire Gravir-CNRS

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme
d'**Habilitation à Diriger des Recherches**

Soutenue le 20 mars 2006 en présence de

Carlos Canudas De Wit	DR CNRS	Rapporteur
James Crowley	Prof. INPG	
Bernard Espiau	DR Inria	
Philippe Jorrand	DR CNRS	
Jean-Claude Latombe	Prof. Stanford Univ.	Rapporteur
Christian Laugier	DR Inria	
Jean-Paul Laumond	DR CNRS	Rapporteur

Table des matières

Avant-propos **4**

Curriculum Vitæ **5**
Parcours Professionnel . . . 5
Séjours invités . . . 5
Formation . . . 5
"Honneurs" . . . 6

1 Activités de recherche **7**
1.1 Introduction . . . 7
1.2 Planification de chemin . . . 11
1.2.1 Contraintes cinématiques . . . 12
Généralités . . . 12
Robot de type voiture . . . 14
1.2.2 Robustesse . . . 17
Généralités . . . 17
Robot de type voiture . . . 18
1.3 Planification de trajectoire . . . 22
1.3.1 Contraintes dynamiques . . . 23
1.3.2 Contrainte temps-réel . . . 26
1.3.3 Sûreté . . . 30
1.4 Modélisation de l'environnement . . . 33
1.4.1 Prédiction à long-terme de mouvement . . . 34
"Apprendre puis prédire" . . . 35
"Apprendre et prédire" . . . 37
1.5 Perspectives . . . 40
1.6 Références bibliographiques . . . 41

2 Activités d'animation de la recherche **52**
2.1 Encadrement . . . 52
2.1.1 Doctorants . . . 52
2.1.2 Masters, DEA . . . 52
2.1.3 Ingénieurs, Maîtrises, *etc* . . . 53

2.2 Enseignement . . . 55
2.2.1 Ecoles d'été . . . 55
2.2.2 Troisième cycle . . . 55
2.2.3 Second cycle . . . 55
2.2.4 Premier cycle . . . 55
2.3 Actions de recherche . . . 56
2.3.1 Coordination . . . 56
2.3.2 Responsabilité d'un Workpackage . . . 56
2.3.3 Participation . . . 56
2.4 Collaborations . . . 57
2.4.1 Chercheurs, Professeurs . . . 57
2.4.2 Post-Doctorants . . . 57
2.5 Diffusion . . . 58
2.5.1 Exposés invités, séminaires . . . 58
2.5.2 Organisation de manifestations . . . 58
Participation à des comités de programme . . . 58
Participation à des comités d'organisation . . . 59
Organisation de sessions invitées . . . 59
Présidence de sessions . . . 59
2.6 Valorisation . . . 60
2.6.1 Logiciels . . . 60
2.6.2 Brevets . . . 60
2.7 Activités diverses . . . 61
2.7.1 Comités de lecture . . . 61
Revues . . . 61
Conférences . . . 61
2.7.2 Evaluation de projets . . . 61
2.7.3 Administration de la Recherche . . . 61

3 Publications **62**
3.1 Articles de revue en cours de soumission . . . 62
3.2 Articles de revue . . . 62
3.3 Chapitres de livres . . . 63
3.4 Acte de conférences . . . 63
3.5 Conférences avec comité de lecture . . . 64
3.6 Publications académiques . . . 67
3.7 Livrables de contrats/projets . . . 68

4 Publications annexées **69**

Table des figures

1.1 Modèle de l'unicycle. 12
1.2 Modèle d'un véhicule de type voiture. 14
1.3 Chemin robuste pour bras manipulateur planaire. 18
1.4 Erreur odométrique pour véhicule de type voiture. 20
1.5 Chemins robustes pour véhicule de type voiture. 21
1.6 Exemple d'espace des états-temps. 24
1.7 Temps de planification d'algorithmes probabilistes. 27
1.8 Cycle de la Planification de Mouvement Partiel. 28
1.9 Horizon temporel et sûreté. 30
1.10 États de collision *vs* états de collision inévitable. 30
1.11 Dispositif expérimental pour la prédiction de mouvement. . . 35
1.12 "Apprendre puis prédire". 36
1.13 Modèle de Markov Caché augmenté. 37
1.14 " Apprendre et prédire". 38

Avant-propos

Comparé à la rédaction d'une Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), la rédaction d'une thèse de doctorat est une simple formalité (pour ainsi dire). Au cours de notre activité de recherche, nous sommes tous amenés à lire un certain nombre de thèses de doctorat. Dans la forme, elles sont relativement proches, et quand vient le temps de rédiger sa propre thèse de doctorat, cette forme standard constitue un guide précieux.

Il en est tout autre chose pour l'HDR. Pour commencer, on n'est que rarement amené à en lire dans le cours normal de notre activité de recherche. Peu ou prou, on commence à s'intéresser à ce genre littéraire le jour où l'on décide de rédiger sa propre HDR. On demande alors aux collègues et amis qui sont passés par là de bien vouloir nous montrer leurs œuvres. On est surpris de constater alors l'étonnante diversité du genre ! Dans sa version "lourde", la HDR s'apparente (pour ceux qui s'en souviennent) à l'ancienne thèse d'état. Dans sa version "légère", c'est une simple collection d'articles. entre ces deux extrêmes, tout est possible.

Dans ces conditions, le rédacteur d'une HDR est quelque peu perplexe : que faire ? quel contenu ? quel volume ? quel type de lecteur ? Autant de questions auquel le rédacteur doit apporter soi-même ses propres réponses. Comme d'autres avant nous, c'est ce que nous avons du faire. Nous avons donc fait des choix. Ce n'est certainement pas à l'Histoire de dire si nos choix ont été pertinents, mais plus modestement à nos lecteurs (et surtout à nos rapporteurs). Nous espérons que ce sera le cas...

Thierry Fraichard
Janvier 2006

Curriculum Vitæ

Thierry FRAICHARD

Chargé de Recherche
Inria Rhône-Alpes

Parcours Professionnel

- Depuis janvier 2003 : Chargé de Recherche, équipe e-Motion, Inria Rhône-Alpes & Laboratoire Graphisme, Vision et Robotique (Gravir), Grenoble (FR).
- Décembre 1994-décembre 2002 : Chargé de Recherche, projet Sharp, Inria Rhône-Alpes & Laboratoire Graphisme, Vision et Robotique (Gravir), Grenoble.
- Décembre 1993-novembre 1994 : Post-doctorant, Manipulation Laboratory, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA (US).
- Septembre 1991-août 1993 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche, Université Pierre-Mendès France & Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle (Lifia), Grenoble.
- Septembre 1988-août 1991 : Doctorant, Lifia, Grenoble.

Séjours invités

- Septembre-décembre 2002 : Japan Society for the Promotion of Science Fellow, Distributed Adaptive Robotics Research Unit, Institut Riken, Saitama (JP).
- Novembre 2000-janvier 2001 & novembre 2001 : Tan Chin Tuan Fellow, Intelligent Systems Laboratory, School of Computer Engineering, Nanyang Technological University (NTU), Singapour.

Formation

- Avril 1992 : **Doctorat en Informatique** , de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG). *Planification de mouvement pour mobile non-holonome en espace de travail dynamique.*

- Juin 1988 : **Diplôme d'Etudes Approfondies en Informatique** de l'INPG. *Planification de mouvement en univers multi-agents.*
- Juin 1986 : **Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées en Génie Informatique** de l'Université Joseph Fourier (UJF), Grenoble.
- Juin 1985 : **Maîtrise en Informatique** de l'Université de Bourgogne, Dijon (FR).

"Honneurs"

- Articles de conférences sélectionnés pour des numéros spéciaux de revues :
  - Int. Conf. on Field and Service Robotics (FSR), 2005 [1].
  - IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2003 [7].
  - Int. Conf. on Field and Service Robotics (FSR), 2003 [4].
- Bourses :
  - Japan Society for the Promotion of Science Fellowship, 2002.
  - Singapore Tan Chin Tuan Fellowships, 2000 & 2001.
  - Allocation de recherche du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, 1988-1991.

Chapitre 1

Activités de recherche

1.1 Introduction

On définit généralement un système robotique comme étant un système artificiel, équipé de capteurs et d'actionneurs, conçu pour agir sur le monde qui l'entoure. Il existe de nombreux types de systèmes robotiques, *eg* bras manipulateur, main articulée, véhicule terrestre ou aérien, robot humanoïde, etc., capables d'effectuer des actions de nature très diverses, *eg* se déplacer, manipuler et assembler des objets, etc. Mais, dans tous les cas, qui dit action dit *mouvement*. Un système robotique, quel qu'il soit, se doit de pouvoir déterminer et réaliser les mouvements à accomplir pour accomplir une tâche donnée.

En robotique, on appelle *planification de mouvement* ce problème particulier du calcul *préalable* du mouvement à accomplir. C'est un problème fondamental en robotique qui a fait et continue de faire l'objet de nombreux travaux de recherche depuis la fin des années 60. C'est précisément ce problème qui se trouve au cœur de nos activités de recherche.

Dans sa forme la plus générale, la planification de mouvement se définit de la façon suivante : étant donné un modèle du système robotique et de son environnement, planifier un mouvement consiste à calculer le mouvement que doit effectuer le système robotique pour atteindre un objectif fixé a priori. Dans sa version de base, communément appelée *planification de chemin*[1], on se limite à l'aspect géométrique du problème : on dispose du modèle géométrique du système robotique (supposé libre de ses mouvements), et des objets de l'environnement (supposés fixes), puis on calcule un chemin géométrique, *ie* une séquence continue de configurations[2], sans collision entre deux configurations données. Ce sont les systèmes robotiques

[1] On parle aussi du *Problème du déménageur de piano* [HSS87].

[2] On appelle *configuration* d'un système robotique un ensemble minimal de paramètres indépendants décrivant de manière unique la position et l'orientation de tous les éléments de ce système [Lat91c].

de type bras manipulateur en milieu industriel qui ont motivés les premières recherches en planification de chemin [Udu77]. De tels robots opèrent dans des milieux contrôlés où les objets sont généralement fixes. On souhaite calculer le déplacement de l'effecteur, *ie* l'organe terminal du bras, porteur d'un outil donné. La liberté de mouvement de l'effecteur, tant en translation qu'en rotation, est en général assurée par la conception mécanique du bras manipulateur.

Il suffit cependant que l"un des deux postulats de la planification de chemin soit violé (liberté de mouvement du robot, nature statique de l'environnement), et la planification de chemin en tant que telle peut ne plus suffire. Selon les cas, il faudra alors calculer un chemin et un profil de vitesse associé (où de façon équivalente une chronique temporelle), une trajectoire, *ie* une séquence continue d'états[3] voire une stratégie de déplacement pouvant combiner des actions motrices, des actions perceptives ou des actions sensorimotrices.

Il est évident que les deux conditions liées à la planification de chemin sont généralement violées dès que l'on quitte un monde industriel fermé et ses bras manipulateurs. Au cours des dernières années, notre philosophie (pour employer un bien grand mot) a toujours été de ne pas considérer la planification de mouvement comme un problème théorique isolé, mais de la replacer toujours dans son contexte, *ie* comme faisant partie intégrante du processus décisionnel d'un système robotique bien réel confronté à un environnement bien réel lui aussi avec tout ce que cela peut impliquer. Ceci nous a amené naturellement à intégrer dans le champ de la planification de mouvement diverses contraintes liées soit au système robotique considéré, soit à son environnement. L'un des objectifs applicatifs de nos travaux de recherche étant l'autonomie de mouvement pour véhicule terrestre de type voiture, nous nous sommes particulièrement intéressés à cette problématique particulièrement riche en contraintes.

Nos contributions à la planification de mouvement portent sur différents aspects du problème. Nous avons fait le choix dans ce document de les présenter de façon thématique (plutôt que chronologique) en trois thèmes qui sont respectivement la planification de chemin, la planification de trajectoire et la modélisation de l'environnement.

Planification de chemin

La planification de chemin se concentre sur les aspects géométriques de la planification de mouvement (évitement de collision avec les obstacles fixes

[3] On appelle *état* d'un système robotique un ensemble de paramètres dont la connaissance à un instant t_0 ainsi que la connaissance des commandes qui seront appliquées par la suite au détermine complètement le comportement du système à tout instant $t \geq t_0$ [Oga90b]. Alors que la configuration offre une vue statique d'un système robotique, l'état en offre une vue dynamique.

de l'environnement).

Notre première contribution à la planification de chemin a porté sur la prise en compte de ce que l'on appelle des *contraintes cinématiques non-holonomes*. Ce type de contraintes affecte la majorité des véhicules munis de roues. Pour un véhicule de type voiture, nous avons donc proposé un schéma de *planification de chemin à courbure continue et à dérivée de courbure bornée*. Ces deux propriétés sont essentielles pour assurer que le chemin planifié puisse être suivi avec précision et avec une vitesse minimale.

Notre seconde contribution a résulté d'une réflexion plus générale sur la finalité des chemins planifiés : ils sont destinés à être exécuté par le système robotique réel. Cette décomposition planification/exécution repose donc sur l'hypothèse que le chemin planifié pourra être exécuté avec succès. C'est une hypothèse très forte qui n'est malheureusement pas toujours vérifiée ce qui soulève le problème de la *robustesse* des chemins planifiés, *ie* la garantie que leur exécution réussira. Nous nous sommes donc attachés à développer des techniques de planification de chemin robuste pour véhicules non-holonomes.

Ces contributions sont présentées dans la section 1.2.

Planification de trajectoire

C'est la dimension temporelle qui constitue la différence essentielle entre un chemin et une trajectoire. La planification de trajectoire s'impose donc dès lors que l'on doive prendre en compte des *contraintes dynamiques*, *ie* dépendantes du temps. Ces contraintes dynamiques sont de deux types : celles qui concernent l'environnement (présence de *mobiles*), et celles qui concernent le système robotique (sa *dynamique*). Notre contribution à cette problématique a porté sur les points suivants :

Le premier point a consisté à proposer un cadre général pour aborder les problèmes de planification de trajectoire en présence de contraintes dynamiques. Ce cadre est celui de *l'espace des états-temps*, *ie* l'espace des états du système robotique augmenté de la dimension temporelle.

Le second point découle de la remarque suivante : dès lors que l'on place un système robotique dans un environnement dynamique, il risque d'être percuté par l'un des mobiles (ceci est d'autant plus vrai si les mobiles en question sont aveugles, rapides voire hostiles). Du point de vue de la planification de trajectoire, cela impose un temps de réponse limité. La *planification de mouvement partiel* est la réponse que nous avons proposé à cette contrainte temps-réel.

Le troisième point est fortement lié au second. A l'instar de la plupart des méthodes de navigation, la planification de mouvement partiel pose le problème de la sûreté du système robotique considéré, *ie* la garantie de non-collision. Nous avons proposé le concept *d'état de collision inévitable* pour analyser la sûreté et tenter d'y apporter des solutions.

Ces contributions sont présentées dans la section 1.3.

Modélisation de l'environnement

Cette dernière contribution sort du cadre de la planification de mouvement proprement dite et porte sur la problématique de l'obtention du modèle de l'environnement que requiert la planification de mouvement. La difficulté supplémentaire induite par les environnements dynamiques découle du fait que la planification de mouvement requiert impérativement la connaissance a priori du comportement futur des mobiles. Dans l'état actuel des travaux en modélisation de l'environnement, au mieux peut-on espérer obtenir un modèle de l'état courant de l'environnement incluant des informations sur la dynamique des mobiles, *eg* vitesse, accélération, *etc*. Notre contribution porte sur la prédiction du futur. Nous nous sommes intéressés au problème de la prédiction *à long-terme* de mouvement, *ie* sur un horizon temporel qui soit compatible avec les exigences de la planification de mouvement en environnement dynamique.

Cette contribution est présentée dans la section 1.4.

1.2 Planification de chemin

La planification de chemin se concentre sur les aspects géométriques de la planification de mouvement. Formulé dans l'espace des configurations du système robotique considéré, le système robotique est représenté par un point de cet espace et tout problème de planification de chemin se ramène au problème du calcul d'une courbe continue de cet espace. Cette courbe doit relier deux configurations données et ne doit contenir aucune configuration entraînant une collision entre le système robotique et l'un des obstacles fixes de l'environnement. Toute courbe vérifiant ces deux propriétés (continuité et non-collision) est une solution et l'enjeu principal de la planification de chemin consiste en général à calculer la courbe la plus courte, *ie* le chemin géométrique le plus court, entre la configuration initiale et la configuration finale. Notre contribution à la planification de chemin a porté principalement sur les deux points suivants :

Le premier point a consisté à enrichir le problème de base en considérant des systèmes robotiques qui ne sont pas libres de leurs mouvements (nous préciserons cette notion par la suite). Pour de tels systèmes, trouver une courbe continue et sans collision de l'espace des configurations ne suffit plus. Il faut de surcroît que cette courbe vérifie les contraintes qui réduisent la liberté de mouvement du système considéré. Les contraintes de mouvement auxquelles nous nous sommes intéressés sont ce que l'on appelle des *contraintes cinématiques non-holonomes*. Ce type de contraintes est très courant puisqu'il affecte la majorité des véhicules munis de roues. Nous nous sommes concentrés sur le cas désormais classique du véhicule de type voiture. Ce travail est détaillé dans la section 1.2.1.

Le second point a résulté d'une réflexion plus générale sur la finalité des plans calculés par un planificateur de mouvement. Ces plans sont destinés à être exécuté par le système robotique réel. De manière implicite, la décomposition planification/exécution repose donc sur l'hypothèse que le mouvement planifié pourra être exécuté avec succès par le système robotique réel. Dans le cas de la planification de chemin par exemple, l'hypothèse implicitement faite est que le robot pourra suivre le chemin planifié avec une précision suffisante pour éviter toute collision. Si l'on y réfléchit, c'est une hypothèse très forte qui n'est malheureusement pas toujours vérifiée (notamment pour des systèmes de type robots mobiles qui, comme nous le verrons par la suite, sont confrontés à un sérieux problème de localisation). Ceci soulève alors le problème de ce que nous appellerons la *robustesse* des chemins planifiés, *ie* la garantie qu'un chemin puisse être exécuté avec succès par un système robotique donné. Nous nous sommes donc attachés à développer des techniques de planification de chemin robuste. Ce travail est détaillé dans la section 1.2.2.

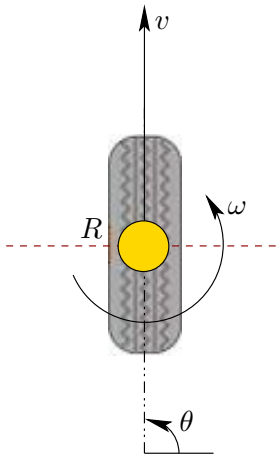


FIG. 1.1 – Modèle de l'unicycle.

1.2.1 Contraintes cinématiques

Généralités

Si 1961 est l'année de naissance du premier système robotique de type bras manipulateur avec le robot Unimate [Eng80], c'est en 1966 que naît le premier robot mobile autonome : Shakey [Nil84c]. Beaucoup de robots mobiles sont apparus depuis et la majorité d'entre eux se déplacent grâce à des roues dont le nombre et l'agencement peuvent varier [AM89, CBDN96]. L'efficacité énergétique de la roue ainsi que la facilité de concevoir et de commander des robots munis de roues expliquent cette prééminence de la roue comme moyen de locomotion. Cependant, la présence de roues soulève un problème nouveau quant à la liberté de mouvement du système robotique qui en est équipé. Ce problème est lié à la notion connue en mécanique sous le nom de *non-holonomie*. Mais curieusement, alors que de nombreux robots mobiles à roues ont été développés depuis la fin des années 60, il faut attendre 1986 pour que la non-holonomie fasse officiellement son apparition dans le domaine de la robotique et de la planification de chemin [Lau86c].

Voyons sur un exemple simple en quoi le problème de la non-holonomie consiste. Considérons *l'unicycle*, *ie* le système robotique se réduisant à une roue se déplaçant sur un plan. Les coordonnées (x, y) du point de contact R entre la roue et le sol ainsi que l'orientation θ de la roue constituent une configuration de ce système : $q = (x, y, \theta)$ (Fig. 1.1). La contrainte de roulement sans glissement impose à R de se déplacer dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation de la roue ce qui se traduit par la relation suivante :

$$\dot{x} \sin\theta - \dot{y} \cos\theta = 0 \tag{1.1}$$

La relation (1.1) constitue ce que l'on appelle une *contrainte cinématique*

non-holonome, *ie* une relation non-intégrable portant sur les paramètres de configuration du système ainsi que leurs dérivées. Ce type de contrainte survient généralement lorsqu'un système a moins de paramètres de commande que de paramètres de configuration. C'est le cas pour la roue qui a deux paramètres de commande (la vitesse linéaire v et la vitesse angulaire ω) et trois paramètres de configuration (x, y et θ).

Du point de vue de la planification de chemin, la principale conséquence de la non-holonomie est qu'elle oblige à calculer des chemins qui sont non seulement sans collision mais aussi *admissibles*, *ie* qui vérifient les contraintes non-holonomes du système considéré. La difficulté supplémentaire induite par la non-holonomie est telle qu'elle a amené une partie de la communauté à oublier les obstacles et à se concentrer d'abord sur le problème du calcul de chemin admissible. Dans ce domaine, l'apport d'outils issus de la géométrie différentielle et de la commande des systèmes non-linéaires a été déterminant pour ce qui est de la compréhension du problème et de l'élaboration de solutions (*cf* [LC93, Lau98c]).

Étant donné un système non-holonome, la première question qui se pose est de savoir si ses contraintes non-holonomes réduisent l'espace des configurations atteignables. En d'autres termes, est-il toujours possible de relier deux configurations par un chemin admissible ? C'est l'étude de la commandabilité du système (grâce notamment à l'analyse de l'algèbre de Lie associée au système considéré [SJ72b]), qui permet de répondre à cette question au travers des notions de *commandabilité locale* (toute configuration voisine est atteignable), et de *commandabilité locale en temps petit* (toute configuration voisine est atteignable en un temps arbitrairement court). Se pose ensuite le problème du calcul effectif d'un chemin admissible. L'enjeu est alors de concevoir ce que l'on appelle une *méthode de guidage*, *ie* un algorithme capable de calculer, en l'absence d'obstacles, un chemin admissible entre deux configurations données. A ce jour, on ne dispose pas d'une méthode de guidage générale capable de calculer des chemins admissibles pour un système non-holonome quelconque. On ne sait le faire que pour certaines catégories de systèmes non-holonomes, *eg* les systèmes nilpotents [LS93], chaînés [MS93, TMS95, MNC92] ou différentiellement plats [RFLM93, SLL+97, LL01b].

Si l'on dispose d'une méthode de guidage pour un système non-holonome donné, il est alors possible de planifier des chemins admissibles sans-collision en intégrant la méthode de guidage au sein d'un schéma général de planification de mouvement tel que l'algorithme "Probabilistic Roadmap" [KSLO96b], l'algorithme du Fil d'Ariane [MAB98b], la méthode d'approximation de chemins holonomes [LJTM94b], voire l'algorithme "Rapidly-Exploring Random Tree" [LK01]. Tous ces schémas associent la méthode de guidage et un "collision checker" pour connecter entre elles des paires de configurations. Dans le cas d'un système commandable localement en temps petit, il est important de noter que le planificateur de mouvement obtenu est complet (ou proba-

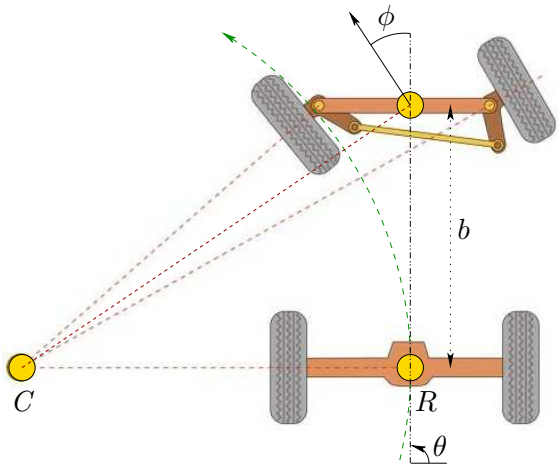


FIG. 1.2 – Modèle d'un véhicule de type voiture.

blement complet) si la méthode de guidage utilisée rend compte de cette commandabilité locale en temps petit. C'est le cas si la méthode de guidage est *topologiquement admissible*, *ie* si elle vérifie la propriété suivante [SL98d] :

$$\begin{array}{l} \forall \varepsilon > 0, \exists \eta > 0, \forall (q_1, q_2) \in \mathcal{C}^2, \\ q_2 \in \mathcal{B}(q_1, \eta) \Longrightarrow \mathit{Steer}\ (q_1, q_2) \subset \mathcal{B}(q_1, \varepsilon) \end{array} \tag{1.2}$$

où $\mathcal{B}(q, \epsilon)$ dénote le voisinage de taille ϵ autour de la configuration q, et où $\mathit{Steer}\ (q_1, q_2)$ dénote le chemin entre q_1 et q_2 calculé par la méthode de guidage. En d'autres termes, la méthode de guidage doit pouvoir relier deux configurations arbitrairement proches par un chemin qui reste dans un certain voisinage de ces deux configurations.

Robot de type voiture

Avec le robot de type "differential drive"[4], le robot de type voiture est sans doute l'un de ceux qui a été le plus étudié. Soit un véhicule de type voiture se déplaçant sur un plan. Il est équipé de quatre roues : deux roues fixes à l'arrière et deux roues orientables à l'avant. Le mécanisme d'Ackermann[5] assure un différentiel d'orientation des roues avant qui permet que les axes de rotation de toutes les roues se croisent en un même point C, le centre instantané de giration du véhicule (Fig. 1.2). De ce fait, un véhicule de type voiture est équivalent d'un point de vue cinématique à un *bicycle*, *ie* un système avec une roue arrière fixe et une roue avant orientable.

Si l'on choisit R, le point médian de l'axe des roues arrières, comme point de référence alors une configuration est constituée de (x, y), les coordonnées

[4]Robot à deux roues motrices parallèles contrôlées de façon indépendante.
[5]Mécanisme connu aussi sous le nom d'épure de Jeantaud.

de R, de θ, l'orientation principale du véhicule, ainsi que de ϕ, l'angle de braquage, *ie* l'orientation moyenne des roues avant : $q = (x, y, \theta, \phi)$. Un véhicule de type voiture est soumis à deux contraintes non-holonome. La première est liée à la contrainte de roulement sans glissement, c'est très précisément la contrainte (1.1). R doit se déplacer dans une direction perpendiculaire à l'axe des roues arrières. La seconde est liée au fait que l'angle de braquage est généralement limité mécaniquement : $|\phi| \leq \phi_{\max}$. Ceci se traduit par la relation suivante [Lat91c] :

$$\dot{x}^2 + \dot{y}^2 - \left(\frac{b}{\tan \phi_{\max}}\right)^2 \dot{\theta}^2 \geq 0 \tag{1.3}$$

où b dénote l'empattement du véhicule. Cette contrainte est non-holonome, elle a pour effet de borner inférieurement le rayon de giration du véhicule, *ie* la distance entre C et R.

Depuis 1986 et jusqu'au milieu des années 90, de nombreux algorithmes de planification de chemin pour véhicule de type voiture ont été proposés, *eg* [Lau87d, BL89c, JC89b, 58, Lat91a, SO95b, MMC96, *etc*]. Ces travaux utilisent tous un modèle cinématique simplifié de la voiture qui n'inclut pas l'angle de braquage dans la liste des paramètres de configuration et dans lequel on ne contrôle que la vitesse angulaire. La vitesse linéaire est supposée constante et la vitesse angulaire est bornée de façon à respecter la contrainte (1.3) sur l'angle de braquage[6]. De par (1.1), il y a bijection entre un chemin dans l'espace des configurations $xy\theta$ et la courbe tracée par R dans le plan xy (θ se déduit de la direction tangente à cette courbe). Planifier un chemin pour ce système simplifié peut donc se ramener à calculer une courbe du plan xy. Cette courbe est admissible si sa courbure est bornée supérieurement par l'inverse du rayon de giration minimum.

Dubins [Dub57b] puis Reeds & Shepp [RS90b] ont étudié les propriétés de ce système simplifié. Dans le cas où le véhicule ne se déplace qu'en marche avant, le système est commandable localement [Dub57b]. Dans le cas où il peut manœuvrer, *ie* se déplacer en marche avant et en marche arrière, le système est commandable localement en temps petit [RS90b]. Dans les deux cas, les chemins optimaux sont composés de segments reliés entre eux par des arcs de cercle tangents de rayon minimum. Suite à ces travaux, on constate que tous les travaux évoqués précédemment calculent des chemins de ce type. Ce type de chemin est simple d'un point de vue géométrique. Il présente néanmoins un défaut : la courbure n'est pas continue (les discontinuités de courbure surviennent au niveau des transitions segments-arcs de cercle). La courbure étant directement liée à l'orientation des roues avant, cela signifie que si un véhicule réel souhaite suivre ce type de chemin de façon exacte, il doit impérativement s'arrêter à chaque discontinuité de courbure afin de réorienter ses roues.

[6] Le modèle simplifié est en fait équivalent au modèle de l'unicycle avec une contrainte supplémentaire sur le domaine de la vitesse angulaire, contrainte découlant de (1.3).

Selon les applications visées, ce défaut peut se révéler rédhibitoire. Si c'est le cas, on peut envisager deux réponses possibles à ce problème : la première est de lisser a posteriori le chemin planifié de façon a supprimer les discontinuités de courbure. Ceci a été proposé pour des robots de type "differential drive" [LSCG89a, FSLC93b]. Dans le cas d'un véhicule de type voiture, un tel lissage peut introduire des manœuvres non désirées sur un chemin par ailleurs sans manœuvre ce qui n'est pas toujours souhaitable. La seconde solution est de planifier directement un chemin à courbure continue, *eg* [LL01b].

C'est dans cette optique que ce situe notre principale contribution à la planification de chemin pour véhicule de type voiture. Comme indiqué précédemment, la continuité de courbure est une propriété désirable puisqu'elle va permettre de suivre un chemin sans s'arrêter (sauf bien sûr si une manœuvre doit être effectuée). si l'on observe de surcroît que la dérivée de la courbure est liée à la vitesse de braquage, il peut-être tout aussi désirable que cette dérivée de la courbure soit bornée supérieurement de façon à assurer que le chemin puisse être suivi à une vitesse minimale. Nous avons donc abordé le problème de la *planification de chemin à courbure continue et à dérivée de courbure bornée pour un véhicule de type voiture.*

Pour ce faire, nous avons considéré un modèle cinématique étendu du véhicule de type voiture, modèle incluant la courbure comme paramètre de configuration supplémentaire et dans lequel on contrôle l'accélération angulaire (modèle enrichi de celui introduit dans [BCL94b]). Après avoir étudié les propriétés de ce nouveau système (commandabilité, nature des chemins optimaux), nous avons proposé la première méthode de guidage complète et topologiquement admissible pour ce système. Cette méthode calcule des chemins qui tendent vers les chemins optimaux du système simplifié (de type segments-arcs de cercle donc), lorsque la borne sur la dérivée de la courbure tend vers l'infini. Ce travail a commencé dès 1995 dans le cadre du doctorat d'Alexis Scheuer. Son doctorat soutenu en 1998 [Sch98b] s'intéresse au cas où le véhicule ne se déplace qu'en marche avant. Nos travaux ultérieurs ont considéré le problème complet (marche avant et marche arrière).

Ces travaux ont fait l'objet de publications dans les principales conférences internationales en robotique [48, 46, 45, SL98b, 40, 36], et ont donné lieu à un article de synthèse paru récemment dans la revue IEEE Transactions on Robotics [6]. Cet article est annexé à ce document.

1.2.2 Robustesse

Généralités

In fine, le chemin produit par un planificateur de chemin est destiné à être exécuté par un système robotique réel. Très schématiquement, on peut considérer que le rôle du niveau exécution est d'assurer le suivi du chemin planifié. Ce suivi est généralement réalisé à l'aide d'une loi de commande qui compense dans une certain mesure les incertitudes qui affectent le système robotique réel[7] et vise à minimiser l'écart entre le chemin planifié et le chemin effectivement réalisé par le système robotique. La planification de chemin ne se préoccupe pas du devenir des chemins planifiés. D'un certain point de vue, elle fait l'hypothèse que le système robotique sera capable d'exécuter, *ie* de suivre jusqu'à son terme, le chemin planifié. En présence d'obstacles, cela suppose un écart de suivi suffisamment faible pour éviter toute collision. Cette hypothèse implicite est très forte et n'est malheureusement pas toujours vérifiée. En effet, la minimisation de l'écart de suivi repose sur la connaissance à chaque instant de l'état du système robotique (et plus particulièrement, dans le cadre du suivi de chemin, de sa configuration). La *localisation*, *ie* la capacité pour un système robotique d'estimer sa configuration courante est donc déterminante vis à vis du succès où de l'échec du suivi d'un chemin planifié. La localisation est un processus également soumis à incertitude. Comme nous le verrons par la suite, elle repose sur l'utilisation de différents capteurs qui, quelle que soit leur précision, retournent une information qui est toujours entachée d'erreur, il en résulte que le système robotique réel ne peut jamais connaître exactement sa configuration courante. Partant de là, l'écart entre le chemin nominal et le chemin réalisé ne peut jamais être nul. Dans le meilleur des cas, cet écart est égal à l'erreur qui existe entre la configuration estimée et la configuration réelle.

Légitimement, peut alors se poser au niveau de la planification de chemin le problème de ce que nous appellerons la *robustesse* des chemins planifiés, *ie* la garantie qu'un chemin puisse être exécuté avec succès par un système robotique donné. Une formulation possible de la *planification de chemin robuste*[8] est la suivante :

> Si $\mathcal{B}_\pi(q)$ dénote l'ensemble des configurations dans lequel peut se trouver le système robotique considéré après avoir suivi le chemin π jusqu'à la configuration q alors le chemin π est robuste si et seulement si, $\forall q \in \pi,\ \mathcal{B}_\pi(q)$ est sans collision.

Il est important de noter que la robustesse n'est garantie que vis à vis d'informations connues a priori, *ie* un modèle des incertitudes affectant le

[7] Ces incertitudes sont de nature très diverses. Elles peuvent être liées à la commande, à la perception et aux interactions entre le système et son environnement, *eg* glissement.

[8] Dans la littérature, on parle aussi de *planification en présence d'incertitude* [Lat91c, chap. 10].

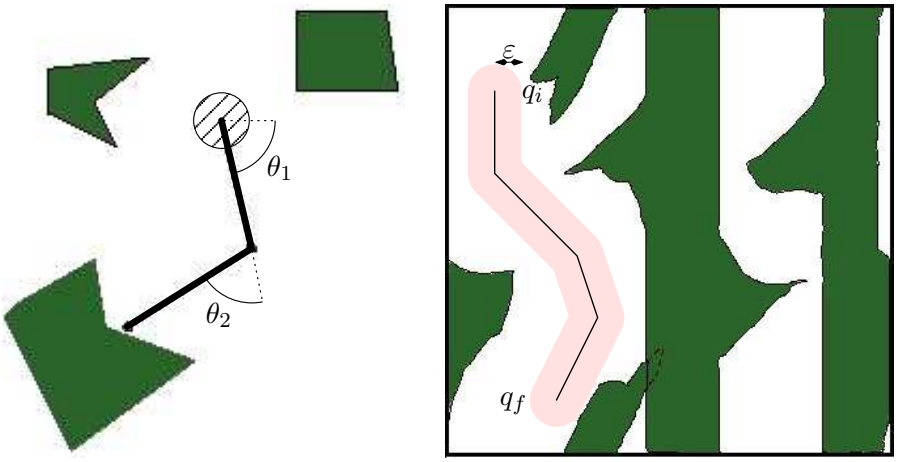


FIG. 1.3 – Bras manipulateur planaire à deux degrés de liberté (à gauche), et son espace des configurations (à droite). Les régions blanches représentent les configurations sans collision. Le chemin de q_i à q_f est robuste.

système robotique et principalement ses incertitudes de localisation (modèle représenté de façon abstraite par $\mathcal{B}_\pi$).

Considérons un bras manipulateur industriel. Les capteurs fixés sur ses articulations lui permettent se localiser avec une grande précision quelque soit sa configuration. Supposons qu'il soit capable de suivre un chemin donné avec un écart borné supérieurement tout au long du chemin. Soit ε l'écart de suivi maximum, un chemin donné est robuste si l'ensemble des configurations situées à distance inférieure ou égale à ε de ce chemin sont sans collision (Fig. 1.3). Dans ce cas, planifier un chemin robuste se fait de façon triviale en accroissant isotropiquement de ε les obstacles de l'espace des configurations.

Robot de type voiture

Considérons maintenant un système de type robot mobile à roues. Le premier moyen dont il dispose pour se localiser est l'odométrie [VitBC, Sle81]. Des capteurs fixés au niveau des roues du système mesurent leurs rotations et changements d'orientation éventuels. L'intégration de ces mesures à partir d'une configuration initiale permet d'estimer la nouvelle configuration du système. Le défaut majeur de l'odométrie découle du caractère relatif de ce type de localisation : l'erreur de localisation commise à chaque étape se propage et croît de manière non bornée[9]. La réponse classique au problème de la dérive odométrique est d'équiper le système robotique d'un dispositif de localisation absolue. Il en existe plusieurs types et les technologies employées peuvent être très différentes (*cf* [BEF95a]), mais ils reposent tous sur

[9]La localisation par centrale inertielle entraîne les mêmes problèmes.

un principe commun : la détection et l'identification *d'amers*, *ie* d'éléments particuliers de l'environnement dont on connaît la position absolue, qui sont ensuite utilisés pour calculer la position absolue du système robotique. La localisation sur amers offre l'avantage évident d'une localisation absolue mais, en l'état actuel de la technologie, ce n'est pas *la* solution au problème de localisation. D'abord, la précision de la localisation obtenue n'est pas toujours suffisante pour permettre un suivi de chemin. Ensuite, la capacité de pouvoir se localiser dépend fortement de la possibilité de percevoir les amers nécessaires ce qui n'est pas toujours acquis. Le système "Global Positionning System" [HWLC94] est un bon exemple de système de localisation sur amers souffrant de ces deux limitations.

Pour les robots mobile à roues, la dérive odométrique et le défaut de localisation sur amers peuvent être deux facteurs d'échec évidents lors du suivi d'un chemin planifié. Il est donc important de s'attacher a prendre en compte de façon explicite ce double problème au niveau de la planification de chemin et de chercher à résoudre le problème de la *planification de chemin robuste pour des systèmes soumis aux incertitudes liées à l'odométrie et à la localisation sur amers*. On notera que la résolution de ce problème ne peut se faire de façon aussi simple que pour le bras manipulateur de la Fig. 1.3.

La problématique de la robustesse aux incertitudes fait son apparition en planification de chemin dés le milieu des années 70 [Tay76]. Elle concerne tout d'abord la robotique manipulatrice et des tâches d'assemblage impliquant des contacts et dont la réalisation nécessite un positionnement très précis. On parle alors de *planification de mouvements fins* (*cf* [Lat91c, chap. 10] et le rapport de synthèse établi dans [GMR92]). Les deux résultats les plus significatifs des travaux dans ce domaine sont sans aucun doute les notions de *mouvement compliant*[10] et de *préimage*[11] [LPMT84a]. Ce n'est qu'à partir du début des années 90 que les systèmes de type robot mobile soumis aux incertitudes liées à l'odométrie et à la localisation sur amers sont abordés. Outre la notion de préimage déjà mentionnée, les travaux correspondants introduisent aussi aussi les concepts de *champs d'incertitude*[12], *eg* [TFL94b, PS95, LFPCM97b, RBFT99, LLFP00] et de *régions de localisation*[13], *eg* [LL95, BSA95b, LLFP00]. Si certains de ces travaux planifient effectivement des chemins robustes au sens défini précédemment, d'autres se limitent à planifier des chemins qui minimisent l'incertitude de localisation le long du chemin (le succès de l'exécution n'est alors pas garanti). D'autres enfin planifient ce qu'il conviendra plutôt d'appeler des stratégies

[10] Mouvement exploitant la géométrie de la tâche à réaliser pour réduire de façon significative l'incertitude de localisation, *eg* glisser sur une surface annule l'incertitude de position dans la direction normale à cette surface.

[11] Région de l'espace des configurations à partir de laquelle un mouvement donné est garanti d'atteindre un objectif donné.

[12] Carte de l'incertitude de localisation sur amers en toute configuration.

[13] Région de l'espace des configurations où la localisation sur amers est possible.

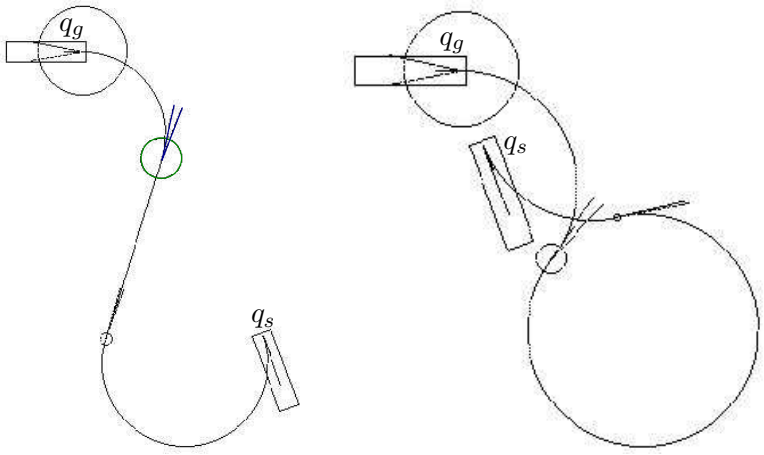


FIG. 1.4 – Évolution de l'erreur odométrique pour un véhicule de type voiture le long de chemins composés de segments et d'arcs de cercle. L'incertitude sur la position est représentée par un disque centré sur la position considérée. L'incertitude sur l'orientation est représentée par un cône [42].

de mouvement combinant chemins et mouvements compliants reposant sur l'utilisation de capteurs, *eg* un suivi de mur.

Compte tenu de la complexité intrinsèque du problème de la planification de chemin robuste [CR87b], force est de constater que ces différents travaux se limitent à des cas relativement simples et font souvent des hypothèses simplificatrices qui limitent parfois l'applicabilité réelle des solutions proposées, *eg* robot ponctuel ou circulaire, localisation sur amers parfaite dans les régions de localisation, modèle capteur simplifié, *etc*. Ainsi, l'hypothèse la plus répandue est que le système robotique se déplace en ligne droite et que la dérive odométrique est due à une incertitude sur la direction et l'amplitude du déplacement (les changements de direction se font au moyen de rotations sur place). Cette hypothèse est acceptable si l'on dispose d'un système robotique de type "differential drive", elle ne s'applique malheureusement pas au cas d'un véhicule de type voiture (*cf* §1.2.1). Notre contribution principale a la planification de chemin robuste a donc été d'introduire la non-holonomie dans cette problématique.

Nous avons étudié le problème de la modélisation de la dérive odométrique pour un véhicule de type voiture. Dans le cadre du doctorat de Raphaël Mermond[14], nous avons proposé un modèle géométrique prenant en compte les incertitudes liées à l'angle de braquage et à la distance parcourue. A découlé de ce modèle une fonction d'évolution de la dérive odométrique le long d'un chemin admissible pour un véhicule de type voiture, chemin de type Reeds & Shepp [RS90b] composés de segments et d'arcs de cercle en l'occurrence

[14]Doctorat malheureusement avorté pour cause de Service National.

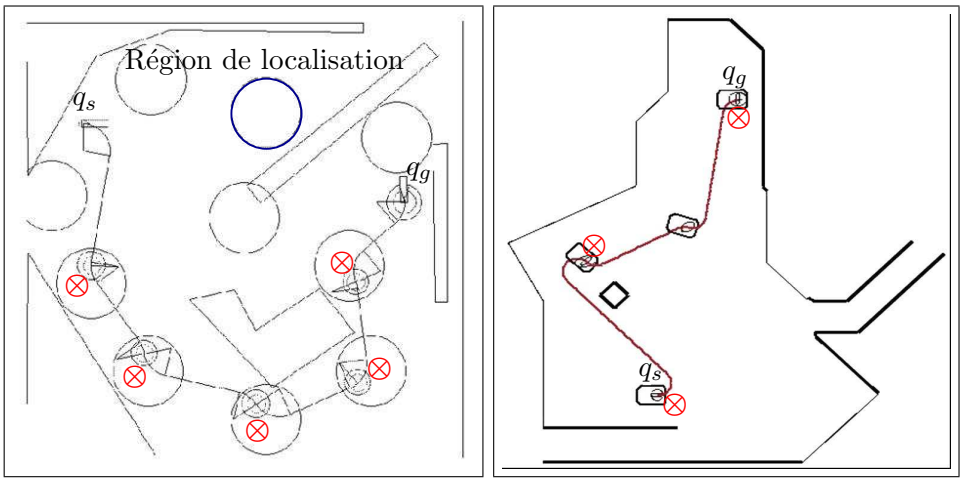


FIG. 1.5 – Chemins robustes pour véhicule de type voiture : localisation sur amers en région de localisation circulaire [42] (à gauche) ; localisation sur amers générale [39] (à droite). Les actions de localisations sur amers se font aux configurations indiquées par ⊗.

(Fig. 1.4). Cette fonction d'évolution disponible, nous avons alors considéré le cas d'un véhicule de type voiture muni d'un dispositif de localisation sur amers ne fonctionnant qu'à l'intérieur d'un ensemble de régions de localisation. Nous avons proposé pour ce système un algorithme de planification de chemin robuste.

Le caractère par trop conservatif du modèle géométrique de la dérive odométrique nous a ensuite amené à en proposer un modèle probabiliste plus réaliste qui repose sur une simulation du processus de localisation odométrique effectivement utilisé par le système robotique lorsqu'il se déplace (simulation utilisant la partie prédiction d'un Filtre de Kalman Étendu [Jaz70]). Ce travail, mené avec Alain Lambert, post-doctorant en provenance de l'Université Technologique de Compiègne, nous a permis d'étendre son travail de thèse [Lam98, LLFP00] sur la navigation robuste pour système robotique de type "differential drive" au cas d'un véhicule de type voiture.

Dans les deux cas, le modèle de dérive odométrique est mis en œuvre dans une méthode de guidage robuste pour véhicule de type voiture, méthode de guidage qui est ensuite utilisée dans un schéma général de planification de mouvement. Le résultat final obtenu est un chemin sans collision robuste complété par la prescription d'actions de localisation sur amers en des configurations déterminées (Fig. 1.5). Il est possible d'optimiser soit la longueur des chemins obtenus, soit le nombre d'actions de localisation sur amers (dans le cas où ce type de localisation est coûteux par exemple). Ces différents travaux ont fait l'objet de publications dans les principales conférences internationales en robotique, *eg* [42, 39].

1.3 Planification de trajectoire

C'est la dimension temporelle qui constitue la différence essentielle entre un chemin et une trajectoire. Un chemin est de nature statique, il représente là où doit passer le système robotique mais ne dit rien quant à la façon dont il va y passer (à quelle vitesse, à quel instant ?). De fait, la planification de chemin ne s'applique qu'à des environnements statiques. La planification de trajectoire s'impose donc dès lors que l'on souhaite (où que l'on doive) prendre en compte des *contraintes dynamiques*, *ie* dépendantes du temps. Ces contraintes dynamiques sont de deux types : celles qui concernent l'environnement (présence de *mobiles*), et celles qui concernent le système robotique (sa *dynamique*). On notera que ces deux types de contrainte ne sont pas indépendantes. S'il est en effet envisageable de planifier une trajectoire en environnement statique (pour minimiser le temps de déplacement ou bien l'énergie consommée). Dès lors que l'on se place en environnement dynamique, les capacités dynamiques du système robotique doivent être prise en compte (ne serait-ce que de façon simplifiée en considérant une vitesse maximale par exemple).

En milieu industriel, un bras manipulateur est souvent seul à se déplacer (hormis l'objet qu'il manipule). Il n'en est généralement pas de même pour un robot mobile. Les robots de service et autres véhicules autonomes vont de plus en plus être amenés à se déplacer dans des environnements contenant des mobiles. De ce fait, nous nous sommes intéressés à la planification de trajectoire avec prise en compte simultanée de la présence de mobiles et de la dynamique du système robotique. Notre contribution à cette problématique a porté sur les points suivants :

Le premier point a consisté à proposer un cadre général pour aborder les problèmes de planification de trajectoire en présence de contraintes dynamiques. Ce cadre est celui de *l'espace des états-temps*, *ie* l'espace des états du système robotique augmenté de la dimension temporelle. Ce travail est détaillé dans la section 1.3.1.

Le second point découle de la remarque suivante : dès lors que l'on place un système robotique dans un environnement dynamique, il risque d'être percuté par l'un des mobiles (ceci est d'autant plus vrai si les mobiles en question sont aveugles, très rapides voire hostiles). Du point de vue de la planification de trajectoire, cela impose un temps de réponse limité. La *planification de mouvement partiel* est la réponse que nous avons proposé à cette contrainte temps-réel. Ce travail est détaillé dans la section 1.3.2.

Le troisième point est fortement lié au second. A l'instar de la plupart des méthodes de navigation, la planification de mouvement partiel pose le problème de la sûreté du système robotique considéré, *ie* la garantie de non-collision. Nous avons proposé le concept *d'état de collision inévitable* pour analyser la sûreté et tenter d'y apporter des solutions. Ce travail est détaillé dans la section 1.3.3.

1.3.1 Contraintes dynamiques

C'est à partir du milieu des années 80 que les contraintes dynamiques font leur apparition dans le champ de la planification de mouvement. Les deux types de contraintes dynamiques, celles concernant l'environnement (présence de *mobiles*), et celles concernant le système robotique (sa *dynamique* au sens mécanique du terme), font dans une large mesure l'objet de traitements séparés. Quand nous commençons à aborder cette problématique au début des années 90, la situation est la suivante :

En ce qui concerne les mobiles, le concept clé est celui *d'espace des configurations-temps* introduit par [ELP87]. L'ajout de la dimension temporelle à l'espace des configurations permet de transformer les contraintes dynamiques de non-collision imposées par les mobiles en des régions interdites statiques de l'espace des configurations-temps. De ce fait, il devient possible de planifier une trajectoire, *ie* une courbe de l'espace des configurations-temps, en utilisant une technique de planification de chemin. Il suffit d'adapter cette technique afin de prendre en compte les spécificités de la dimension temporelle : on ne peut pas se déplacer dans le passé, on ne peut pas se déplacer trop vite (vitesse maximale). Ainsi certains auteurs ont-ils proposés des adaptations du graphe de visibilité, *eg* [RS85b, KZ86b, ELP87, FS90], ou encore des méthodes de décomposition cellulaire, *eg* [FS89a, SLG90].

En ce qui concerne la dynamique du système robotique, le concept clé est sans aucun doute celui *d'espace des états*[15]. Même si certains auteurs ont proposés des techniques de planification de trajectoire opérant dans l'espace des configurations, *eg* [SH85], voire dans l'espace de travail, *eg* [SD88], l'espace des états est le cadre privilégié pour aborder le problème de la planification de trajectoire avec prise en compte de la dynamique du système robotique considéré, *eg* [BDG85c, SD85, CDRX88b, JHCP89, CRR90, DX90b, SL90, *etc*]. Les cas traités et les modèles dynamiques utilisés dans ces différents travaux sont plus ou moins complexes (robot ponctuel ou non, espace de travail de dimension un, deux ou trois, vitesse et/ou accélération bornée, dynamique lagrangienne, *etc*). On remarque cependant que, compte tenu de la complexité intrinsèque de la planification de trajectoire (*cf* [CDRX88b]), les modèles dynamiques les plus complets ne sont en général utilisés que lorsque le système robotique se déplace le long d'un chemin donné.

Il n'y a par contre presque aucuns travaux qui considèrent simultanément les deux types de contraintes dynamiques mentionnées précédemment[16]. A notre connaissance, les seules exceptions sont [Ó'Dú87b] et [FS89a] : [Ó'Dú87b] traite le cas d'une particule à accélération bornée se déplaçant le long d'un chemin donné entre deux particules mobiles. La solution proposée est exacte et opère dans l'espace des états et dans l'espace des configurations-temps.

[15] On parle aussi *d'espace des phases*.

[16] Si l'on admet qu'une simple borne sur la vitesse ne constitue pas une véritable contrainte dynamique.

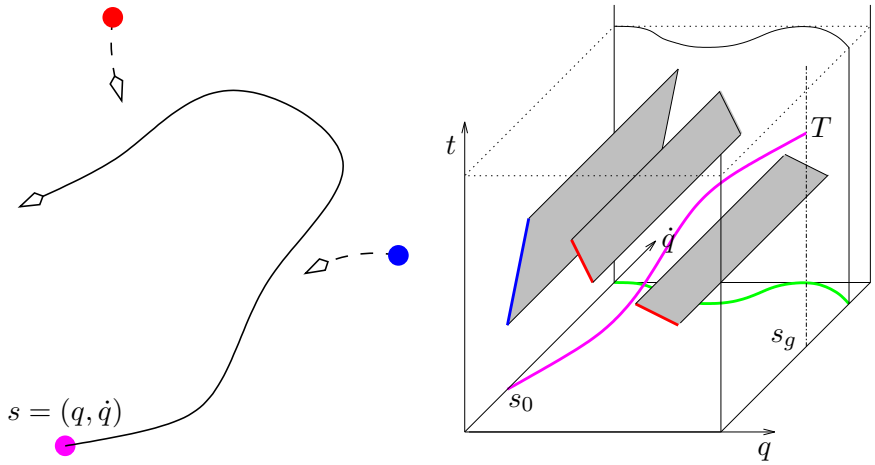


FIG. 1.6 – Robot ponctuel se déplaçant le long d'un chemin donné au milieu de mobiles (à gauche). L'état de ce système est $s = (q, \dot{q})$, *ie* sa position et sa vitesse le long du chemin. Son espace des états-temps est donc tridimensionnel : $(q, \dot{q}, t)$ (à droite). En vert, la courbe de vitesse maximale, en rouge et en bleu, les contraintes imposées par les deux mobiles : ces différentes contraintes se traduisent par des régions interdites de l'espace des états-temps. La courbe reliant l'état-temps $(s_0, 0)$ à l'état-temps (s_g, T) tout en évitant les régions interdites est une trajectoire solution [11].

[FS89a] traite le cas d'une particule à vitesse, accélération et force centrifuge bornées se déplaçant dans le plan au milieu de polygones en translation. La solution proposée est approchée et opère dans l'espace des configurations-temps discrétisé.

Notre principale contribution à la planification de trajectoire en présence de contraintes dynamiques a été de proposer dès 1993 [52] un cadre général pour aborder ce type de problème. Ce cadre qui découle tout naturellement de la fusion des cadres permettant de traiter respectivement le problème des mobiles et le problème de la dynamique du système robotique, est celui de *l'espace des états-temps*, *ie* l'espace des états du système robotique augmenté de la dimension temporelle. L'espace des états-temps joue un rôle équivalent à celui joué par l'espace des configurations pour la planification de chemin. Il permet d'abord une modélisation unifiée d'un sous-ensemble des contraintes dynamiques. Les contraintes imposées par les mobiles ainsi qu'une partie des contraintes liées à la dynamique du système (celles relatives aux vitesses) sont représentées par des régions interdites de l'espace des états-temps. Il permet ensuite de ramener la planification de trajectoire au problème du calcul d'une courbe continue de l'espace des états-temps (Fig. 1.6). Outre sa continuité, cette courbe doit vérifier certaines propriétés liées d'une part aux spécificité de la dimension temporelle et d'autre part aux contraintes liées à la dynamique restantes (celles relatives aux accélérations). Il est cependant

possible d'adapter des techniques de planification de chemin pour résoudre le problème. C'est ce que nous avons fait pour le cas d'un véhicule de type voiture se déplaçant le long d'un chemin donné [52] puis dans le plan [50].

Ces travaux, réalisés au milieu des années 90, ont fait l'objet de publications dans les principales conférences internationales en robotique [55, 54, 53, 52, 51, 50], et ont donné lieu à un article de synthèse paru plus récemment dans la revue Advanced Robotics [11]. Cet article est annexé à ce document.

La planification de mouvement souffre de ce que les anglo-saxons appellent "the curse of dimensionality" [Bel61] : la complexité du processus de planification de mouvement croît exponentiellement avec la dimension de l'espace de recherche. Dans la mesure où la dimension de l'espace des états-temps est deux fois celle de l'espace des configurations (plus un pour la dimension temporelle), on imagine sans peine que les limites pratiques des techniques classiques de planification de mouvement sont vite atteintes. De fait, dans les exemples que nous avons traités, il s'est révélé difficile dans la pratique de planifier des trajectoires dans des espaces des états-temps de dimension supérieure à trois. Cependant, l'arrivée des techniques de planification dites *probabilistes*[17] au milieu des années 90 a profondément modifié cet état des choses. Il est devenu possible de traiter des systèmes robotique plus complexes. De fait, on voit apparaître au début des années 2000 un certain nombre de travaux qui se placent dans le cadre de l'espace des états-temps pour planifier des trajectoires en environnement dynamique, *eg* [FDF01, BV02b, HKLR02, vdBO04].

[17] Algorithme du type "Probabilistic Roadmap" [KSLO96b], ou "Rapidly-Exploring Random Tree" [LK01].

1.3.2 Contrainte temps-réel

Par rapport à la planification de mouvement en environnement statique, La planification de mouvement en environnement dynamique a une caractéristique fondamentale : *l'ancrage temporel* des mouvements planifiés. En d'autres termes, le mouvement planifié doit commencer à un certain instant et chaque état successif planifié doit être atteint par le système robotique à un instant prédéterminé. Cet ancrage temporel est évidemment lié aux impératifs de non-collision avec les mobiles. Dans ces conditions, la planification de mouvement est de fait soumise à une *contrainte temps-réel* : le temps disponible pour planifier un mouvement est celui qui sépare l'instant courant de l'instant où il est prévu que le mouvement planifié commence.

S'il est possible de fixer de façon arbitraire quand le mouvement planifié doit commencer, cette contrainte temps-réel est somme toute sans importance. Malheureusement, il n'en est rien et ceci pour la raison suivante : dès lors que l'on place un système robotique dans un environnement dynamique, il est potentiellement en danger et ne saurait rester passif au risque d'être percuté par l'un des mobiles (ceci est d'autant plus vrai si les mobiles en question sont aveugles, très rapides voire hostiles). En conséquence, c'est l'environnement qui dicte quand le système robotique doit commencer à se déplacer. C'est donc l'environnement qui détermine la contrainte temps-réel à laquelle est soumise la planification de mouvement. Selon les cas et en fonction de différents facteurs liés aux mobiles (vitesse, nombre, comportement, *etc*), facteurs que nous regrouperons sous le terme de *dynamicité* de l'environnement, cette contrainte temps-réel est plus ou moins forte. Si dans certains cas, le temps de réponse du planificateur de mouvement peut-être relativement long (*eg* dans le domaine spatial), dans d'autres cas par contre, il doit être très court (*eg* dans le domaine routier).

Malgré son importance, cette contrainte temps-réel est la grande absente des travaux dans le domaine de la planification de mouvement en environnement dynamique. Quelques travaux récents l'intègrent cependant, fût-ce de façon incomplète. Ces travaux, en s'appuyant sur des techniques probabilistes, ont développé des algorithmes de planification de mouvement pour des systèmes robotiques relativement simples avec des temps de réponses très faibles, *eg* de l'ordre de 200 ms pour une masse ponctuelle se déplaçant sur un plan [HKLR02] et de l'ordre de 5 ms pour un robot holonome se déplaçant sur un plan [BV02b]. Dans ces conditions, ces mêmes auteurs proposent de résoudre le problème de la navigation autonome en environnement dynamique en utilisant le planificateur de mouvement en-ligne à la manière d'un système réactif[18], et en alternant phases de planification et

[18] Nous définissons un *système réactif* comme étant un système capable de décider quoi faire au pas de temps suivant. A l'opposé, un planificateur de mouvement est un *système délibératif*, il décide quoi faire sur le nombre de pas de temps nécessaire pour atteindre un but donné.

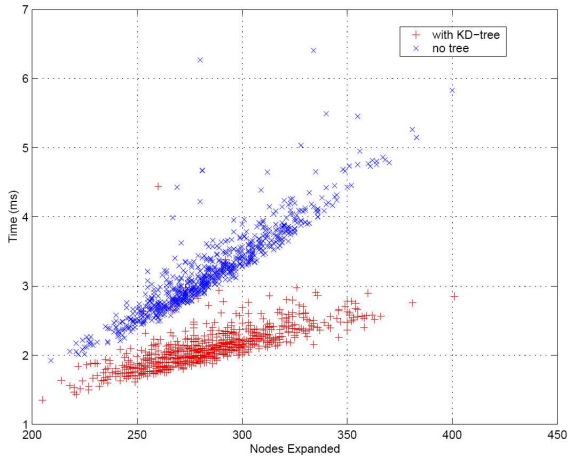


FIG. 1.7 – Temps de planification par rapport au nombre de nœuds développés pour deux algorithmes de planification de mouvement de type "Rapidly-Exploring Random Tree" [BV02b].

phases d'exécution.

Ce type d'approche est évidemment très séduisant puisqu'il offre d'abord une solution au problème de manque de "lookahead"[19] des systèmes réactifs. Il semble aussi prendre en compte la contrainte temps-réel évoquée ci-dessus (dans la mesure où le temps de réponse du planificateur de mouvement est compatible avec la dynamicité de l'environnement. Ce n'est malheureusement pas le cas et la raison en est que le temps de calcul d'une technique probabiliste ne peut pas être borné a priori. On peut statistiquement estimer un temps de calcul moyen et son écart-type associé mais on ne pourra jamais garantir que le temps de calcul ne va pas exploser dans une situation particulière. Il suffit pour s'en convaincre d'observer les temps de calcul mesurés par [BV02b] pour un système robotique en situation réelle (Fig. 1.7).

Compte tenu de la complexité intrinsèque de la planification de mouvement en environnement dynamique (*cf* les résultats établis dans [RS85b] et [CR87b]), il nous semble illusoire d'espérer jamais satisfaire une contrainte temps-réel forte dans des cas réalistes. La *planification de mouvement partiel* (PMP) est notre réponse à ce problème. PMP se résume de la façon suivante : faute de temps pour planifier un mouvement complet jusqu'au but, on ne planifie qu'un mouvement partiel en direction du but. L'idée clé est donc d'intégrer explicitement la contrainte temps-réel dans le processus de planification de mouvement en proposant des algorithmes de planification de mouvement *interruptibles*, *ie* capable de retourner une solution fût-elle partielle quand le temps de planification disponible est écoulé. On peut ob-

[19] Le fait de choisir ses actions futures en restreignant son raisonnement à un horizon temporel donné.

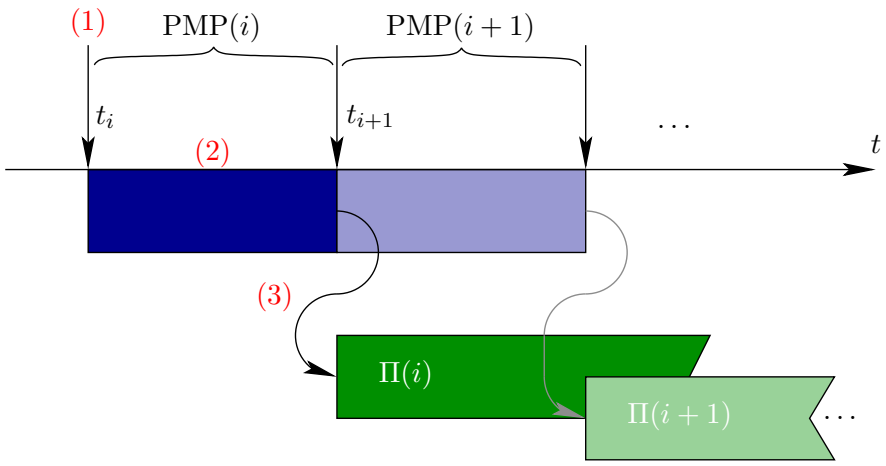


FIG. 1.8 – Cycle de la Planification de Mouvement Partiel.

jecter que PMP ne fait de la planification de mouvement à proprement parler lorsqu'il ne retourne qu'un mouvement partiel. Il nous semble cependant que c'est la seule réponse possible au problème de la contrainte temps-réel[20].

PMP n'étant pas assuré de trouver une trajectoire complète dans l'intervalle de temps disponible, il doit être invoqué de façon itérative jusqu'à ce que le but soit atteint. Le cycle général de fonctionnement de PMP est illustré dans la Fig. 1.8. Il comporte trois étapes :

1. Acquisition du modèle de l'environnement à l'instant courant t_i. Ce modèle contient l'état courant ainsi que les états futurs des mobiles.
2. Planification du mouvement entre $s(t_{i+1})$, *ie* l'état dans lequel se trouvera le système à l'instant t_{i+1}, et le but.
3. A l'instant t_{i+1}, Le temps disponible est écoulé. Détermination de $\Pi(i)$, le meilleur mouvement partiel trouvé. Celui-ci devient le nouveau mouvement nominal qui est exécuté par le système robotique.

A l'instar des nombreuses méthodes de navigation réactives qui, d'une certaine façon, calculent elles aussi des mouvements partiels, *eg* [Kha86, BK91, FBT97b, FS98b, KS98b, BK99b, MM00, UB00, MMSA01], PMP est confronté à un certain nombre de problèmes. Il y a d'abord la question de l'optimalité des mouvements ainsi engendrés, puis celle de la convergence vers le but et enfin celle de la sûreté, *ie* la garantie de non-collision. Toutes ces questions sont des questions délicates qui restent largement ouvertes dans le cas d'environnements dynamiques. Nous verrons dans la section 1.3.3 la réponse que nous avons tenté d'apporter en ce qui concerne la question de la sûreté.

[20] Sensiblement au même moment que nous, Frazzoli arrive à la même conclusion et propose aussi la planification de mouvement partiel comme réponse à la contrainte temps-réel induite par un environnement dynamique [FDF01].

C'est en 2001 que nous avons introduit le principe PMP [Sha01]. Notre collaboration avec Frédéric Large, doctorant de l'équipe, a débouché sur une première application de ce principe [Lar03b, 27]. Nous poursuivons actuellement ce travail dans le cadre du doctorat de Stéphane Petti[21] en mettant l'accent sur la sûreté (*cf* 1.3.3), et les expérimentations sur véhicule réel. Ce travail a déjà fait l'objet de publications dans des conférences internationales en robotique, *eg* [24].

[21] Soutenance prévue en 2006.

1.3.3 Sûreté

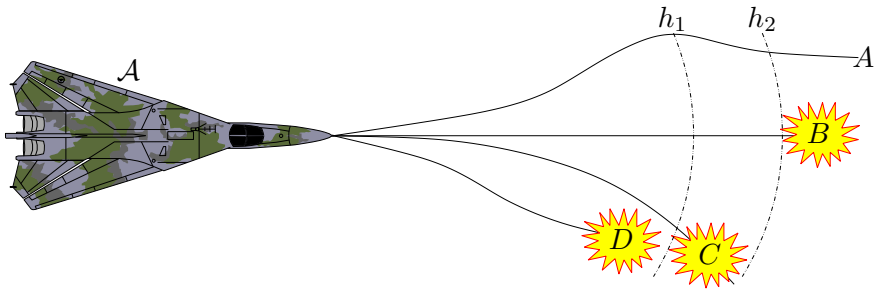


FIG. 1.9 – En deçà de l'horizon temporel h_1, les trajectoires A, B et C semblent sans danger. Au delà, ce n'est plus le cas...

Tout système qui choisit ses actions futures en restreignant son raisonnement à un horizon temporel donné est potentiellement en danger de collision. Pour s'en convaincre, considérons l'exemple de la Fig. 1.9. On y suppose que le système $\mathcal{A}$ a le choix entre seulement quatre trajectoires différentes : A, B, C et D. L'évaluation de chacune de ces trajectoires sur un horizon temporel donné h_1 conduit $\mathcal{A}$ à rejeter la trajectoire D et à choisir A, B ou C. Si, par malchance, il choisit B ou C alors c'est fini... On notera que l'augmentation de l'horizon temporel ne résout pas le problème. Seul un horizon temporel infini ou du moins supérieur au temps requis pour atteindre l'objectif fixé (en supposant que l'objectif soit sûr) garantit la sûreté du système.

Au delà de l'exemple pour le moins simplifié de la Fig. 1.9, la notion *d'état de collision inévitable* permet de mieux appréhender le problème de la sûreté, *ie* de la garantie de non collision. Illustrons cette notion sur l'exemple

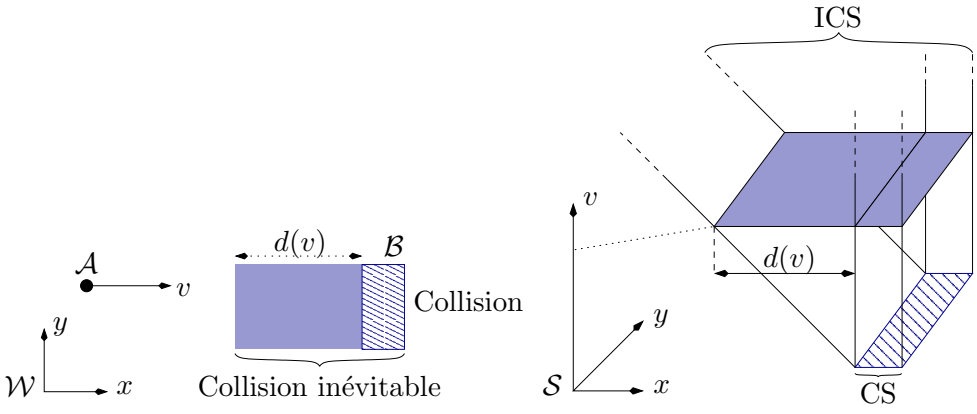


FIG. 1.10 – États de collision (CS) *vs* états de collision inévitable (ICS) : représentation dans l'espace de travail $\mathcal{W}$ du système $\mathcal{A}$ (à gauche) et dans son espace des états $\mathcal{S}$ (à droite).

de la Fig. 1.10 : $\mathcal{A}$ est une masse ponctuelle qui se déplace sur le plan $\mathcal{W}$ avec une direction constante (vers la droite) et une vitesse v variable ($\mathcal{A}$ peut freiner ou accélérer). Le triplet $(x, y, v) \in \mathcal{S}$ représente donc un état de $\mathcal{A}$. Si un obstacle $\mathcal{B}$ est présent dans $\mathcal{W}$ alors tous les états dont la position correspond à un point de $\mathcal{B}$ sont des *états de collision*. Si maintenant, on sait qu'il faut à $\mathcal{A}$ une certaine distance $d(v)$ pour freiner et s'arrêter alors tous les états dont la position est située sur la gauche de $\mathcal{B}$ à une distance inférieure ou égale à $d(v)$ ont la propriété suivante : lorsque $\mathcal{A}$ se trouve dans l'un de ces états, quoi qu'il fasse dans le futur, il va s'écraser dans $\mathcal{B}$. On peut parler alors *d'états de collision inévitable*. Il est clair qu'il peut s'écouler un temps arbitrairement long entre le moment où $\mathcal{A}$ atteint un état de collision inévitable et celui où la collision se produit effectivement. De ce fait, un processus décisionnel (délibératif ou réactif) qui ne raisonne que sur un horizon temporel borné peut conduire le système qu'il pilote dans un état de collision inévitable avec la conséquence fâcheuse que l'on sait.

L'ensemble des techniques de navigation réactives ou de planification de mouvement partiel (*cf* §1.3.2), sont évidemment affectées par ce problème de la sûreté des mouvements qu'ils calculent où des commandes à appliquer qu'ils déterminent. Si l'on considère les travaux antérieurs du point de vue de la sûreté, on constate qu'il y en a nombre important qui ne garantissent rien. C'est la foi en certaines heuristiques et dans le caractère réactif des techniques proposées qui tient lieu de seule et unique garantie... En fait, rare sont les travaux qui caractérisent de façon explicite et formelle les conditions dans lesquelles ils peuvent opérer de façon sûre. Certains travaux ont cependant essayé d'améliorer cette situation. On voit ainsi se dégager trois types de solutions au problème de la sûreté :

1. *Trajectoire de freinage* : on garantit que le système robotique ne peut se trouver que dans des états où il lui est possible de freiner et de s'arrêter sans collision, *eg* [FBT97b, BK99b, ASMK02b]
2. *Trajectoire d'évasion* : cette solution est une généralisation de la solution précédente. Plutôt qu'une trajectoire de freinage unique, on garantit l'existence d'un certain nombre de trajectoires d'évasion prédéfinies sans collision, *eg* [WBN93b, Pri99b, HKLR02, TT03b]
3. Principe de la τ-*sûreté* : on garantit que le système robotique ne peut se trouver que dans des états (d'équilibre ou non), où il est en sécurité pour τ secondes (ce qui est censé lui laissé le temps de trouver une solution d'échappement le cas échéant), *eg* [Sim96b, FS98b, FDF01, Lar03b]

Si l'on évalue ces différentes solutions à l'aune du concept d'état de collision inévitable, on réalise qu'aucune d'entre elles ne constitue *la* solution au problème de sûreté. Dans des environnements dynamiques en particulier, il y a des situations où le système robotique peut se retrouver dans un état de collision inévitable, sa sûreté n'est donc pas assurée.

La réponse que nous proposons au problème de la sûreté passe précisément par ce concept d'état de collision inévitable. Informellement, un état de collision inévitable est défini comme étant un état pour lequel, quelle que soit la trajectoire future suivie par le système robotique, une collision survient. On peut remarquer le caractère très général de cette définition : elle s'applique quel que soit le type d'obstacles (fixes et mobiles) et intègre la dynamique du système robotique considéré. Si un processus décisionnel peut garantir que le système robotique qu'il contrôle ne peut jamais se trouver dans un état de collision inévitable alors le problème de la sûreté est résolu.

Le point commun aux trois notions utilisées précédemment pour la sûreté (*ie* τ-sûreté, trajectoire de freinage et d'évasion), consiste à éviter les états pour lesquels une ou plusieurs trajectoires prédéterminées (et généralement bornées temporellement) entraînent une collision. Dans la mesure où, dans son principe même, le concept d'état de collision inévitable intègre l'ensemble des trajectoires futures possibles (sans horizon temporel), il subsume les trois notions précédentes.

D'un point de vue théorique, le concept d'état de collision inévitable est très séduisant. Il permet d'abord de définir formellement la notion de sûreté dans toute sa généralité. C'est ensuite un instrument qui permet d'analyser quel est le niveau de sûreté offert par tel ou tel processus décisionnel. Il permet enfin d'envisager le développement de processus décisionnels (délibératif ou réactif) pour lesquels la notion de sûreté a un sens. D'un point de vue pratique, se pose le problème de la caractérisation des états de collision inévitable pour un système robotique et un environnement donnés. Dans la mesure où un état de collision inévitable se défini par rapport à l'ensemble des trajectoires futures possibles que peut suivre le système robotique considéré, on imagine sans peine le challenge posé par cette caractérisation.

Nous avons commencé à travailler sur ce concept en 2002 (DEA de Stéphane Blondin [Blo02b]). Un premier article sur ce sujet présenté à la conférence internationale Intelligent Robots and Systems [32], a été sélectionné pour figurer dans un numéro spécial de la revue Advanced Robotics [7]. Outre la formalisation du concept, cet article démontre quatre propriétés fondamentales pour la caractérisation des états de collision inévitable (dont une propriété d'approximation). Ces résultats y sont utilisés pour résoudre un problème similaire à celui abordé dans [ASMK02b], à savoir la planification de mouvement sûr pour un système robotique soumis à des contraintes perceptives et évoluant dans un environnement partiellement connu. Cet article est annexé à ce document. Depuis, nous poursuivons l'exploration de ce concept dans le cadre du doctorat de Stéphane Petti (mise en œuvre des états de collision inévitable pour garantir la sûreté de la Planification de Mouvement Partiel), ce travail a déjà fait l'objet de publications dans des conférences internationales en robotique, *eg* [24].

1.4 Modélisation de l'environnement

Par définition, la planification de mouvement nécessite d'une part, un modèle du système robotique considéré et d'autre part, un modèle de l'environnement dans lequel celui-ci évolue. Le problème de l'obtention de ces modèles ne relève pas de la planification de mouvement en tant que telle. C'est néanmoins un problème d'importance puisque sans modèle (et sans modèle de l'environnement en particulier), la notion même de planification de mouvement n'a pas de sens. L'obtention du modèle du système robotique ne pose en général pas de problème, il résulte d'un choix raisonné. Le modèle de l'environnement quant à lui peut provenir de connaissances a priori (une carte géométrique), ou être obtenu grâce aux différents capteurs qui équipent le système robotique considéré. Dans ce dernier cas, l'obtention du modèle de l'environnement est problématique. La modélisation de l'environnement d'un système robotique à partir de données perceptives constitue un problème qui demeure ouvert dans une large mesure, notamment en ce qui concerne la modélisation d'environnements dynamiques (*cf* [Thr02]).

La difficulté supplémentaire induite par les environnements dynamiques découle du fait que la planification de mouvement requiert impérativement la connaissance a priori du comportement futur des mobiles (sinon, il est impossible de faire de la planification à proprement parler). Or, les situations où l'on dispose a priori de cette connaissance du futur (car c'est bien de cela dont il s'agit), sont minoritaires. Dans la majorité des cas, on ne dispose pas de cette connaissance. Dans l'état actuel des travaux en modélisation de l'environnement, au mieux peut-on espérer obtenir un modèle de l'état courant de l'environnement incluant des informations sur la dynamique des mobiles, *eg* vitesse, accélération, *etc*. Dans cette situation, la seule solution possible est de prédire le futur en se basant sur la connaissance que l'on peut avoir du présent et éventuellement du passé.

Notre contribution à la modélisation de l'environnement porte précisément sur cet aspect prédiction. Nous nous sommes intéressés au problème de la prédiction *à long-terme* de mouvement, *ie* sur un horizon temporel qui soit compatible avec les exigences de la planification de mouvement en environnement dynamique (*cf* §1.3). Ce travail est détaillé dans la section suivante.

1.4.1 Prédiction à long-terme de mouvement

La prédiction de mouvement devient importante en robotique dès lors qu'un système robotique évolue dans un environnement dynamique au milieu de mobiles dont il ne connaît pas a priori le comportement futur. Tout processus décisionnel, qu'il soit réactif ou délibératif, raisonne, à plus ou moins long terme, sur le futur pour décider quoi faire. La prédiction de mouvement peut-être vu comme un sous-problème particulier du problème plus général connu en Intelligence Artificielle sous le nom de *reconnaissance de plan* ou *reconnaissance de comportement*, *eg* [SSL78, KA86, GGM99, NBVW03]. En reconnaissance de plan, on s'intéresse à modéliser et à reconnaître des activités de haut-niveau à fort contenu sémantique, *eg* reconnaissance d'activités humaines, reconnaissance de gestes, *etc*. La prédiction de mouvement, quant à elle, se limite à essayer de prédire la séquence d'états qu'empruntera un mobile dans le futur.

La littérature qui traite de la prédiction de mouvement est riche et très variée au point qu'il est délicat d'en offrir une vue synthétique satisfaisante. On notera cependant que, même s'il est possible de trouver quelques travaux utilisant des techniques déterministes (principalement l'analyse régressive, *eg* [TKKT91, EG98, YS01]), la majorité des travaux utilisent des techniques stochastiques mieux à même de traiter l'incertitude inhérente à tout processus de prédiction. On constate aussi que la majorité de ces travaux reposent sur une hypothèse de Markov d'ordre un et opèrent selon le principe général du filtre bayésien [TBF] : l'état $s(t+1)$ est estimé à partir de l'état courant $s(t)$ et d'une observation faite à l'instant t. Les formes particulières que peuvent prendre ce filtre bayésien sont très diverses : Filtre de Kalman, Modèle de Markov Caché, Processus Décisionnel de Markov (Partiellement Observable ou non), Réseau bayésien, *eg* [Shu91, THM+95, RV02a]. Ces travaux reposent sur un modèle de mouvement, *ie* un modèle de transition de l'état $s(t)$ à l'état $s(t+1)$, qui est prédéfini dans la plupart des cas (parfois appris, *eg* [CS96, FT02]). En fait, ces travaux ont été développés d'abord pour faire de la localisation où du suivi de cible pour lesquels l'état courant (du système robotique ou d'un mobile) est estimé à partir de la connaissance de l'état précédent et d'une observation courante. En théorie, ce type de travaux pourrait être utilisé pour estimer récursivement l'état $s(t+k), k \geq 1$. En pratique, ils ne sont adaptés que pour de la *prédiction de mouvement à court terme* (quelques pas de temps).

Plus intéressants sont les travaux qui visent à faire de la *prédiction de mouvement à long terme*. On peut distinguer ceux qui reposent sur la notion de *mouvement typique*, et ceux qui reposent sur la notion *de mouvement intentionnel*. Les premiers font l'hypothèse que, dans un environnement donné, les mobiles ne se déplacent pas au hasard. Au contraire, ils effectuent des mouvements spécifiques liés aux activités des mobiles dans cet environnement ou aux endroits qu'ils cherchent à atteindre. Une fois ces mouvements

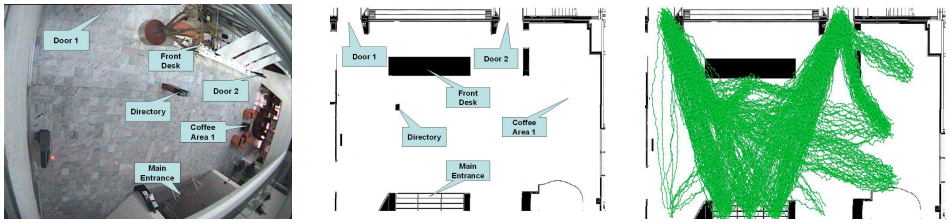


FIG. 1.11 – Dispositif expérimental pour la prédiction à long terme : l'environnement tel qu'il est observé grâce à une caméra vidéo (à gauche), la carte de cet environnement (au milieu), et une partie du corpus d'apprentissage, *ie* 500 parmi les 2000 mouvements observés par la caméra vidéo et retournés par un dispositif de tracking visuel [64] (à droite).

typiques identifiés dans une phase préliminaire d'apprentissage, ils peuvent être utilisés pour prédire le mouvement d'un mobile sur un horizon correspondant à la durée du mouvement typique, *eg* [JH95, KGW97, GS99, BBCT05]. Les travaux reposant sur la notion de mouvement intentionnel sont proches dans l'esprit de ceux reposant sur la notion de mouvement typique. Ils visent à prédire l'endroit où un mobile à l'intention de se rendre (et partant le mouvement qui y conduit). Un environnement donné comporte un certain nombre d'endroits de ce type, des buts en quelque sorte. Ces buts sont parfois prédéfinis, *eg* [FT02], mais le plus souvent identifiés dans une phase préliminaire d'apprentissage, *eg* [BG04, BBCT05] On notera que ces différents travaux opèrent selon un principe que nous appellerons *"Apprendre puis prédire"*. En d'autres termes, la prédiction intervient après une phase préliminaire d'apprentissage des mouvements typiques ou intentionnels, l'apprentissage étant réalisé sur la base d'un corpus de mouvements observés dans un environnement donné.

Notre contribution à la planification à long terme de mouvement comporte deux volets. Le premier (chronologiquement parlant) s'inscrit directement dans la lignée des travaux reposant sur la notion de mouvement typique et opère selon le principe "Apprendre puis prédire". Le deuxième est plus novateur puisqu'il vise à s'affranchir du principe "Apprendre puis prédire". Nous proposons une approche que nous appelons *"Apprendre et prédire"* qui consiste à réaliser les deux tâches simultanément. Ces contributions sont détaillées dans les deux sections suivantes.

"Apprendre puis prédire"

Le principe général de la phase d'apprentissage des approches reposant sur la notion de mouvement typique consiste à déterminer un ensemble réduit de mouvements typiques (le modèle) qui rendent compte d'un ensemble de mouvements observés dans l'environnement considéré. La technique la plus utilisée est une technique probabiliste appelée "Expectation-

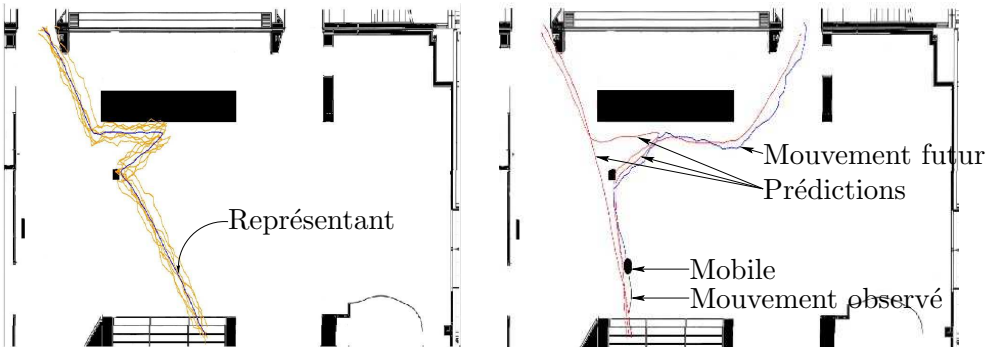


FIG. 1.12 – "Apprendre puis prédire" : un exemple de cluster obtenu et son représentant (à gauche), et un exemple de prédiction de mouvement (à droite) [3].

Maximisation" (EM) [Har58, DLR77]. Par itération successive, EM cherche à identifier un modèle qui maximise la vraisemblance des mouvements observés. EM souffre de deux défauts : la nécessité de connaître a priori le nombre de mouvements typiques et sa complexité qui a limité son utilisation à la classification d'un nombre relativement faible de mouvements observés (de l'ordre de 20 dans [GS99] et de l'ordre de 100 dans [BBCT05]). Pour tenter de résoudre ces problèmes, il nous a semblé pertinent d'aborder le problème d'un point de vue "clustering". On ne cherche pas d'emblée le modèle qui maximise un critère donné. On cherche d'abord à partitionner les mouvements observés en un ensemble de "clusters" de mouvements similaires (le calcul du modèle se faisant dans une deuxième étape). Cette approche permet d'envisager l'utilisation de l'un des nombreux algorithmes de clustering disponibles dont précisément ceux qui ne nécessitent pas la connaissance a priori du nombre de clusters (*cf* [JM99]). Nous avons donc proposé une mesure de similarité entre mouvements observés ainsi qu'un procédé de calcul d'un modèle étant donné un ensemble de clusters. Après avoir testé différents algorithmes de clustering et avoir comparé leurs capacités de prédiction à celles d'EM, nous avons retenu l'algorithme "Complete-Link" [Kin67] comme répondant le mieux au problème posé. La Fig. 1.11 montre le dispositif expérimental qui a été utilisé pour les tests. Un exemple de cluster obtenu et un exemple de prédiction de mouvement (prédictions les plus probables) sont présentés dans la Fig. 1.12.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du DEA de Dizan Vasquez [Vas03b]). Il a fait l'objet de présentations dans les principales conférences internationales en robotique [31, 27] et d'une soumission récente à la revue Int. Journal of Robotics Research [3].

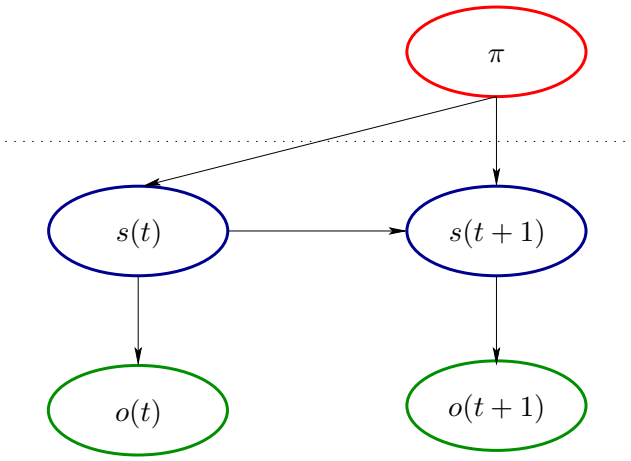


FIG. 1.13 – Représentation graphique du Modèle de Markov Caché augmenté de π, la variable but. $s(t)$ (resp. $o(t)$) représente l'état du mobile à l'instant t (resp. l'observation correspondante).

"Apprendre et prédire"

Le principe "Apprendre puis prédire" limite les capacités de prédiction aux mouvements typiques qui sont présents dans le corpus d'apprentissage. Un mouvement typique absent du corpus ou un mouvement typique qui apparaît après la phase d'apprentissage (en cas par exemple de modification de la structure de l'environnement) ne pourra jamais être prédit. Pour pallier ce problème, nous proposons une approche que nous appelons *"Apprendre et prédire"* qui consiste à réaliser les deux tâches simultanément. L'apprentissage se fait de façon continue au fur et à mesure que des mouvements sont observés dans l'environnement, le modèle prédictif étant mis au jour de façon incrémentale. La prédiction peut se faire à tout moment en utilisant le modèle prédictif disponible à un instant donné. A notre connaissance, c'est la première approche de prédiction de mouvement qui opère selon ce principe. Outre la notion de mouvement typique, cette nouvelle approche repose aussi sur la notion de mouvement intentionnel et fait donc l'hypothèse que les mobiles cherchent à atteindre ou à passer par des endroits spécifiques de l'environnement, *ie* des buts qu'il faut identifier. Le modèle que nous avons retenu pour modéliser les mouvements est une variante du Modèle de Markov Caché (MMC) [Rab90]. A la manière d'un Modèle de Markov Caché Abstrait [BVW02], nous complétons MMC par une variable qui représente le but que le mobile cherche à atteindre. Pour un mobile donné, la transition de l'état $s(t)$ à l'état $s(t+1)$ est conditionné par le but qu'il cherche à atteindre (Fig. 1.13).

Dans ce cadre markovien, nous nous attachons à résoudre les deux problèmes d'identification suivants : l'identification des états et l'identification des buts.

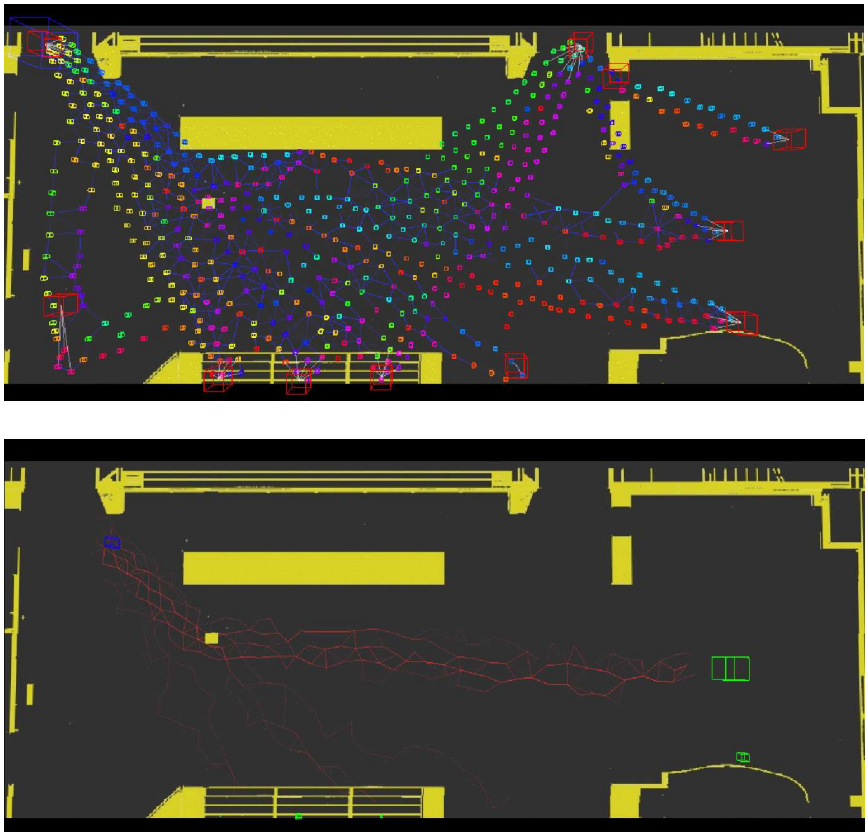


FIG. 1.14 – " Apprendre et prédire" : le réseau d'états obtenu et les buts identifiés (les cubes) après observation et apprentissage de n mouvements observés (en haut), et un exemple de prédiction de mouvement (en bas) [1].

L'identification des états que peuvent prendre les mobiles est un problème qui, à notre connaissance, n'a pas été abordé précédemment. L'ensemble des états résulte généralement d'une discrétisation régulière de l'environnement, *eg* [BVW02, OMM04, BBCT05]. Ce type d'approche n'est plus envisageable dès lors que la taille de l'environnement devient importante ou que la définition d'un état devient complexe, *eg* si l'on ajoute la vitesse du mobile à sa position (ce qui peut être nécessaire si l'on souhaite affiner la prédiction de mouvement d'un mobile). Nous proposons donc un schéma adaptatif d'identification de l'ensemble des états du MMC basé sur une technique de type "Vector Quantization" [LBG80] (le problème en effet est celui d'obtenir une représentation discrète compacte d'un espace continu, l'espace des états en l'occurrence). Notre choix s'est porté sur un algorithme de type "Growing Neural Gas" [Fri95] qui a l'avantage d'être performant et surtout de nature incrémentale : l'ensemble des états discrets s'adapte progressivement aux observations qui sont faites dans l'environnement. L'algorithme

converge quand la distorsion[22] passe en dessous d'un seuil donné. Il peut cependant continuer à évoluer au gré des observations successives. C'est aussi un algorithme de ce type qui est utilisé pour l'identification des buts. Dans ce cas, l'algorithme opère sur les états finaux des mouvements observés. La Fig. 1.14-haut illustre un exemple d'ensemble d'états et de buts ainsi obtenus. Les états sont connectés entre eux et constituent le réseau sous-jacent de notre MMC. Les probabilités de transition d'un état à un autre en fonction du but à atteindre sont apprises conjointement à l'identification des états et des buts. Classiquement, le MMC disponible à un instant donné peut être utilisé pour prédire le mouvement futur du mobile observé (Fig. 1.14-bas).

Ce travail en cours s'inscrit dans le cadre du doctorat de Dizan Vaquez. Il a fait l'objet d'une première publication dans une conférence internationale en robotique [25] et d'une soumission récente à la revue Int. Journal of Robotics Research [1]. Cet article est annexé à ce document.

[22] L'erreur d'approximation.

1.5 Perspectives

C'est une tendance déjà observable aujourd'hui mais il est évident que les générations futures de systèmes robotiques seront déployés dans des environnements de plus en plus complexes. Ces environnements seront dynamiques : ils contiendront des mobiles de différentes natures dont les comportements dynamiques seront très variés. Ces environnements seront aussi partiellement connus, notamment en ce qui concerne leurs aspects dynamiques. Dans ces conditions, la nécessité de poursuivre notre travail dans le domaine de la planification de trajectoire et selon la philosophie que nous avons indiqué en introduction de ce document nous semble une évidence.

La prise en compte de la contrainte temps-réel au travers du principe de la *planification de mouvement partiel* est un premier point qu'il faut poursuivre. Outre l'aspect sûreté déjà abordé, nous travaillons actuellement sur le problème du couplage entre le niveau planification et le niveau contrôle (doctorat de Stéphane Petti). Par ailleurs, il nous faudra aussi essayer d'apporter des réponses aux problèmes de la convergence et de l'optimalité des trajectoires calculées selon ce principe.

En ce qui concerne l'aspect sûreté, le concept *d'état de collision inévitable* nous semble un point très important dont il convient aussi de poursuivre l'exploration que ce soit d'un point de vue théorique ou d'un point de vue pratique. De ce dernier point de vue, il sera certainement très fructueux d'envisager ce concept sous un angle probabiliste.

En environnement dynamique partiellement connu, la prédiction de mouvement à long terme est un point clé pour l'autonomie de mouvement. Une telle prédiction n'est envisageable que si l'on dispose tout d'abord d'un modèle du présent. La *modélisation d'un environnement dynamique* est une problématique largement abordée par ailleurs mais qui reste ouverte. Nous avons commencé à travailler sur ce point dans le cadre de la thèse de doctorat de Christophe Coué [Cou03b]. C'est un point sur lequel nous continuerons à travailler en collaboration notamment avec le Prof. Olivier Aycard.

Enfin, dans le cas où les mobiles sont eux-mêmes doués de raison, il devient important d'étudier l'influence que peut avoir le système robotique que l'on cherche à piloter sur leurs propres comportements, influence qu'il convient alors d'intégrer dans notre processus décisionnel. Cet aspect *réfléchi* [KP05] de la navigation nous semble aussi une piste importante à explorer.

1.6 Références bibliographiques

[AM89] J. C. Alexander et J. H. Maddocks : On the kinematics of wheeled mobile robots. *Int. Journal of Robotics Research*, 8(5):15–27, 1989.

[ASMK02b] R. Alami, T. Siméon et K. Madhava Krishna : On the influence of sensor capacities and environment dynamics onto collision-free motion plans. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 2395–2400, Lausanne (CH), septembre-octobre 02.

[BBCT05] M. Bennewitz, W. Burgard, G. Cielniak et S. Thrun : Learning motion patterns of people for compliant robot motion. *Int. Journal of Robotics Research*, 24(1):31–48, 2005.

[BCL94b] J.-D. Boissonnat, A. Cérézo et J. Leblond : A note on shortest paths in the plane subject to a constraint on the derivative of the curvature. Research Report 2160, Inst. Nat. de Recherche en Informatique et en Automatique, Rocquencourt (FR), janvier 1994.

[BDG85c] J.E. Bobrow, S. Dubowsky et J.S. Gibson : Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths. *Int. Journal of Robotics Research*, 4(3):3–17, Fall 1985.

[BEF95a] J. Borenstein, H. R. Everett et L. Feng : *Navigating Mobile Robots : Sensors and Techniques*. A. K. Peters, 1995.

[Bel61] R. Bellman : *Adaptive Control Processes : A Guided Tour*. Princeton University Press, 1961.

[BG04] A. Bruce et G. Gordon : Better motion prediction for people-tracking. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, New Orleans, LA (US), avril 2004.

[BK91] J. Borenstein et Y. Korem : The vector field histogram — fast obstacle avoidance for mobile robts. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 7(3):278–288, juin 1991.

[BK99b] O. Brock et O. Khatib : High-speed navigation using the global dynamic window approach. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 341–346, Detroit, MI (US), mai 1999.

[BL89c] J. Barraquand et J.-C. Latombe : On non-holonomic mobile robots and optimal maneuvering. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 3(2):77–103, 1989.

[Blo02b] S. Blondin : Planification de mouvements pour véhicule automatisé en environnement partiellement connu. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juin 2002.

[BSA95b] B. Bouilly, T. Siméon et R. Alami : A numerical technique for planning motion strategies of a mobile robot in presence of uncertainty. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1327–1332, Nagoya (JP), mai 1995.

[BV02b] J. Bruce et M. Veloso : Real-time randomized path planning for robot navigation. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 2383–2388, Lausanne (CH), septembre-octobre 2002.

[BVW02] H. H. Bui, S. Venkatesh et G. West : Policy recognition in the abstract hidden markov model. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 17:451–499, décembre 2002.

[CBDN96] G. Campion, G. Bastin et B. D'Andréa-Novel : Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Trans. Robot. Autom*, 12(1):47–62, février 1996.

[CDRX88b] J. Canny, B. Donald, J. Reif et P. Xavier : On the complexity of kynodynamic planning. *In Proc. of the Symp. on the Foundations of Computer Science*, pages 306–316, White Plains, NY (US), novembre 1988.

[Cou03b] C. Coué : *Modèle bayésien pour l'analyse multimodale d'environnements dynamiques et encombrés : application à l'assistance à la consuite automobile en milieu urbain.* Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, décembre 2003.

[CR87b] J. Canny et J. H. Reif : New lower bound techniques for robot motion planning problems. *In Proc. of the IEEE Symp. on the Foundations of Computer Science*, pages 49–60, Los Angeles, CA (US), octobre 1987.

[CRR90] J. Canny, A. Rege et J. Reif : An exact algorithm for kinodynamic planning in the plane. *In Proc. of the ACM Symp. on Computational Geometry*, pages 271–280, Berkeley, CA (USA), 1990.

[CS96] C. C. Chang et K.-T. Song : Dynamic motion planning based on real-time obstacle prediction. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2402–2407, Minneapolis, MN (US), avril 1996.

[DLR77] A. Dempster, N. Laird et D. Rubin : Maximum likelihood from incomplete data via the Em algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society*, 39(1):1–38, 1977.

[Dub57b] L. E. Dubins : On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and termi-

nal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 79:497–517, 1957.

[DX90b] B. Donald et P. Xavier : Provably good approximation algorithms for optimal kinodynamic planning for cartesian robots and open-chain manipulators. *In Proc. of the ACM Symp. on Computational Geometry*, pages 290–300, Berkeley, CA (USA), 1990.

[EG98] A. Elnagar et K. Gupta : Motion prediction of moving objects based on autoregressive model. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 28(6):803–810, novembre 1998.

[ELP87] M. Erdmann et T. Lozano-Perez : On multiple moving objects. *Algorithmica*, 2:477–521, 1987.

[Eng80] J. Engelberger : *Robotics in Practice : Management and Applications of Industrial Robots*. Kluwer Academic Publishers, 1980.

[FBT97b] D. Fox, W. Burgard et S. Thrun : The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 4(1):23–33, mars 1997.

[FDF01] E. Frazzoli, M. A. Dahleh et E. Feron : Real-Time Motion Planning for Agile Autonomous Vehicle. *In Proc. of the American Control Conf.*, pages 43–49, Arlington, VA (US), juin 2001.

[Fri95] B. Fritzke : A growing neural gas network learns topologies. *Advances in Neural Information Processing Systems*, pages 625–632, 1995.

[FS89a] K. Fujimura et H. Samet : A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 5(1):61–69, février 1989.

[FS90] K. Fujimura et H. Samet : Motion planning in a dynamic domain. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 324–330, Cincinnatti, OH (USA), mai 1990.

[FS98b] P. Fiorini et Z. Shiller : Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *Int. Journal of Robotics Research*, 17(7):760–772, juillet 1998.

[FSLC93b] S. Fleury, Ph. Souères, J.-P. Laumond et R. Chatila : Primitives for smoothing paths of mobile robots. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 832–839, Atlanta, GA (US), mai 1993.

[FT02] A. F. Foka et P. E. Trahanias : Predictive autonomous navigation. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 490–495, Lausanne (CH), septembre-octobre 2002.

[GGM99] R. P. Goldman, W. Geib et C. A. Miller : A new model of plan recognition. *In Proc. of the Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Stockholm (SE), juillet 1999.

[GMR92] K. Y. Goldberg, M. T. Mason et A. Requicha : Geometric uncertainty in motion planning : summary report and bibliography. Rapport technique IRIS-297, University of Southern California, 1992.

[GS99] S. Gaffney et P. Smyth : Trajectory clustering with mixtures of regression models. Rapport technique 99-15, Dept. of Information and Computer Science, Univ. of California, Irvine, CA (US), 1999.

[Har58] H. Hartley : Maximum likelihood estimation from incomplete data. *Biometrics*, 14:174–194, 1958.

[HKLR02] D. Hsu, R. Kindel, J.-C. Latombe et S. Rock : Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles. *Int. Journal of Robotics Research*, 21(3):233–255, March 2002.

[HSS87] J. E. Hopcroft, J. T. Schwartz et M. Sharir, éditeurs. *Planning, Geometry, and Complexity of Robot Motion*. Intellect, 1987.

[HWLC94] B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger et J. Collins : *Global Positioning System : Theory and Practice*. Springer-Verlag, 4^{th} édition, 1994.

[Jaz70] A.M. Jazwinsky : *Stochastic Processes and Filtering Theory*, volume 64. Academic, 1970.

[JC89b] P. Jacobs et J. Canny : Planning smooth paths for mobile robots. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2–7, Scottsdale, AZ (US), mai 1989.

[JH95] N. Johnson et D. Hogg : Learning the distribution of object trajectories for event recognition. *In Proc. of the British Machine Vision Conf.*, Glasgow (GB), 1995.

[JHCP89] P. Jacobs, G. Heinzinger, J. Canny et B. Paden : Planning guaranteed near-time-optimal trajectories for a manipulator in a cluterred workspace. Research Report ESRC 89-20/RAMP 89-15, Engineering Systems Research Center, Univ. of California., Berkeley, CA (USA), octobre 1989.

[JM99] A. K. Jain et P. J. Murty, M. N.and Flynn : Data clustering : a review. *ACM Computing Surveys*, 31(3):264–323, 1999.

[KA86] H. Kautz et J. F. Allen : Generalised plan recognition. *In Proc. of the Nat. Conf. on Artificial Intelligence*, pages 32–37, Philadelphia, PA (US), août 1986.

[KGW97] E. Kruse, R. Gutsche et F. M. Wahl : Acquisition of statistical motion patterns in dynamic environments and their application to mobile robot motion planning. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 712–717, Grenoble (FR), septembre 1997.

[Kha86] O. Khatib : Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Int. Journal of Robotics Research*, 5(1), 1986.

[Kin67] B. King : Step-wise clustering procedures. *J. Am. Stat. Assoc.*, 69:86–101, 1967.

[KP05] B. Kluge et E. Prassler : Reflective navigation. *In Proc. of the workshop on Autonomous Navigation in Dynamics Environments*, Barcelona (ES), avril 2005. Workshop held in association with the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.

[KS98b] N. Y. Ko et R. Simmons : The lane-curvature method for local obstacle avoidance. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 1615–1621, Victoria, BC (CA), octobre 1998.

[KSLO96b] L. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe et M. H. Overmars : Probabilistic roadmaps for path planning in high dimensional configuration spaces. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 12:566–580, 1996.

[KZ86b] K. Kant et S. Zucker : Toward efficient trajectory planning : the path-velocity decomposition. *Int. Journal of Robotics Research*, 5(3):72–89, Fall 1986.

[Lam98] A. Lambert : *Planification de tâches sûres pour robot mobile par prise en compte des incertitudes et utilisation de cartes locales.* Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne (FR), octobre 1998.

[Lar03b] F. Large : *Navigation Autonome d'un Robot Mobile en Environnement Dynamique et Incertain.* Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry (FR), novembre 2003.

[Lat91a] J.-C. Latombe : A fast path planner for a car-like indoor mobile robot. *In Proc. of the Nat. Conf. on Artificial Intelligence*, Anaheim, CA (US), juillet 1991.

[Lat91c] J.-C. Latombe : *Robot motion planning.* Kluwer Academic Press, 1991.

[Lau86c] J.-P. Laumond : Feasible trajectories for mobile robots with kinematic and environment constraints. *In Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, pages 346–354, Amsterdam (NL), décembre 1986.

[Lau87d] J.-P. Laumond : Finding collision-free smooth trajectories for a non-holonomic mobile robot. *In Proc. of the Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pages 1120–1123, Milan (IT), août 1987.

[Lau98c] J.-P. Laumond, éditeur. *Robot motion planning and control*, volume 229 de *Lecture Notes in Control and Information Science*. Springer, 1998.

[LBG80] Y. Linde, A. Buzo et R. M. Gray : An algorithm for vector quantizer design. *IEEE Trans. on Communications*, 28:84–95, 1980.

[LC93] Z. Li et J. Canny, éditeurs. *Nonholonomic Motion Planning*. Kluwer Academic Press, 1993.

[LFPCM97b] N. Le Fort-Piat, I. Collin et D. Meizel : Planning robust displacement missions by means of robot-tasks and local maps. *Robotics and Autonomous Systems*, 20:99–114, 1997.

[LJTM94b] J.-P. Laumond, P. E. Jacobs, M. Taïx et R. M. Murray : A motion planner for non-holonomic mobile robots. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 10(5):577–593, octobre 1994.

[LK01] S. M. Lavalle et J. J. Kuffner : *Algorithmic and Computational Robotics : New Directions*, chapitre Rapidly-Exploring Random Trees : Progress and Prospects, pages 293–308. A K Peters, 2001.

[LL95] A. Lazanas et J.-C. Latombe : Motion planning with uncertainty : a landmark approach. *In Artificial Intelligence*, volume 76, pages 287–317, 1995.

[LL01b] F. Lamiraux et J.-P. Laumond : Smooth motion planning for car-like vehicles. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 17(4):498–502, août 2001.

[LLFP00] A. Lambert et N. Le Fort-Piat : Safe task planning integrating uncertainties and local maps federations. *Int. Journal of Robotics Research*, 19(6):597–611, juin 2000.

[LPMT84a] T. Lozano-Perez, M. T. Mason et R. H. Taylor : Automatic synthesis of fine motion strategies for robots. *Int. Journal of Robotics Research*, 3(1):3–24, 1984.

[LS93] G. Lafferière et H. Sussmann : A differential geometric approach to motion planning. *In* Z. Li et J. Canny, éditeurs : *Nonholonomic Motion Planning*, pages 235–270. Kluwer, 1993.

[LSCG89a] J.-P. Laumond, T. Siméon, R. Chatila et G. Giralt : Trajectory planning and motion control for mobile robots.

In J.-D. Boissonnat et J.-P. Laumond, éditeurs : *Geometry and Robotics*, volume 391 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 133–149. Springer, 1989.

[MAB98b] E. Mazer, J.-M. Ahuactzin et P. Bessière : The Ariadne's Clew algorithm. *Journ. of Artificial Intelligence Research*, 9:295–316, July-December 1998.

[MM00] J. Minguez et L. Montano : Nearness diagram navigation (ND) : a new real time collision avoidance approach. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 2094–2100, Takamatsu (JP), novembre 2000.

[MMC96] Ph. Moutarlier, B. Mirtich et J. Canny : Shortest paths for a car-like robot to manifolds in configuration space. *Int. Journal of Robotics Research*, 15(1):36–60, 1996.

[MMSA01] J. Minguez, L. Montano, T. Siméon et R. Alami : Global nearness diagram navigation (GND). *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 33–39, Seoul (KR), mai 2001.

[MNC92] S. Monaco et D. Normand-Cyrot : An introduction to motion planning under multi-rate digital control. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Decision and Control*, pages 1780–1785, Tucson, AZ (US), 1992.

[MS93] R. M. Murray et S. S. Sastry : Nonholonomic motion planning : steering using sinusoids. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 38:700–716, 1993.

[NBVW03] N. T. Nguyen, H. H. Bui, S. Venkatesh et G. West : Recognizing and monitoring high-level behaviours in complex spatial environments. *In IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Madison, WI (US), juin 2003.

[Nil84c] Nils J. Nilsson : Shakey the robot. Rapport technique 323, AI Center, SRI International, Menlo Park, CA (US), avril 1984.

[Ó'Dś7b] C. Ó'Dúnlaing : Motion planning with inertial constraints. *Algorithmica*, 2:431–475, 1987.

[Oga90b] K. Ogata : *Modern Control engineering*. Prentice Hall, 1990.

[OMM04] S. Osentoski, V. Manfredi et S. Mahadevan : Learning hierarchical models of activity. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Sendai (JP), octobre 2004.

[PA05] J. Peng et S. Akella : Coordinating multiple robots with kinodynamic constraints along specified paths. *Int. Journal of Robotics Research*, 24(4):295–310, avril 2005.

[Pri99b] A. R. Pritchett : Pilot performance at collision avoidance during closely spaced parallel approaches. *Air Traffic Control Quartely*, 7(1):47–75, 1999.

[PS95] L.A. Page et A.C Sanderson : Robot motion planning for sensor-based control with uncertainties. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1333–1340, Nagoya (JP), mai 1995.

[Rab90] L. R. Rabiner : A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition. *Readings in speech recognition*, pages 267–296, 1990.

[RBFT99] N. Roy, W. Burgard, D. Fox et S. Thrun : Coastal navigation-mobile robot navigation with uncertainty in dynamic environments. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 35–40, Detroit, MI (US), mai 1999.

[RFLM93] P. Rouchon, M. Fliess, M. Lévine et Ph. Martin : Flatness, motion planning and trailer system. *In IEEE Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control*, pages 2700–2705, San Antonio, TX (US), décembre 1993.

[RS85b] J. H. Reif et M. Sharir : Motion planning in the presence of moving obstacles,. *In Proc. of the IEEE Symp. on the Foundations of Computer Science*, pages 144–154, Portland, OR (US), octobre 1985. Published in JACM, 41 :4, July 1994, pp. 764–790.

[RS90b] J. A. Reeds et L. A. Shepp : Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards. *Pacific Journal of Mathematics*, 145(2):367–393, 1990.

[RV02a] P. Riley et M. Veloso : Planning for distributed execution through use of probabilistic opponent models. *In Proc. of the Int. Conf. on AI Planning and Scheduling*, pages 72–81, 2002.

[Sch98b] A. Scheuer : *Planification de chemins à courbure continue pour robot mobile non-holonome*. Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), janvier 1998.

[SD85] Z. Shiller et S. Dubowsky : On the optimal control of robotic manipulators with actuator and end-effector constraints. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 614–620, St Louis, MI (USA), mars 1985.

[SD88] Z. Shiller et S. Dubowsky : Global time optimal motions of robotic manipulators in the presence of obstacles. *In Proc.*

of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 370–375, Philadelphia, PA (USA), avril 1988.

[SH85] G. Sahar et J. H. Hollerbach : Planning of minimum-time trajectories for robot arms. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 751–758, St Louis, MI (USA), mars 1985.

[Sha01] Projet Sharp : Programmation automatique et systèmes décisionnels en robotique. Rapport d'activité annuel, Inst. Nat. de Recherche en Informatique et en Automatique, 2001.

[Shu91] Q. Shu : Hidden markov model for dynamic obstacle avoidance of mobile robot navigation. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 7(3):390–397, juin 1991.

[Sim96b] R. Simmons : The curvature-velocity method for local obstacle avoidance. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3375–3382, Minneapolis, MN (US), avril 1996.

[SJ72b] H. J. Sussmann et V. Jurdjevic : Controllability of nonlinear systems. *Journal of Differential Equations*, 12:95–116, 1972.

[SL90] Z. Shiller et H-H. Lu : Robust computation of path constrained time-optimal motion. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 144–149, Cincinnatti, OH (USA), mai 1990.

[SL98b] A. Scheuer et Ch. Laugier : Planning sub-optimal and continuous-curvature paths for car-like robots. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 25–31, Victoria, BC (CA), octobre 1998.

[SL98d] S. Sekhavat et J.-P. Laumond : Topological property for collision-free nonholonomic motion planning : the case of sinusoidal inputs for chained form systems. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 14(5):671–680, octobre 1998.

[SL03] A Sanchez Lopez : *Contributiob à la planification de mouvements en robotique : approches probabilistes et déterministes.* Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier (FR), juillet 2003.

[Sle81] A. W. Sleeswyk : Vitruvius' odometer. *Scientific American*, 245(4):188–200, octobre 1981.

[SLG90] C.L. Shih, T.T. Lee et W.A. Gruver : Motion planning with time-varying polyhedral obstacles based on graph search and mathematical programming. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 331–337, Cincinnatti, OH (USA), mai 1990.

[SLL+97] S. Sekhavat, F. Lamiraux, J.-P. Laumond, G. Bauzil et A. Ferrand : Motion planning and control for Hilare pulling a trailer : experimental issues. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque, NM (US), avril 1997.

[SO95b] P. Svestka et M. H. Overmars : Probabilistic path planning. Technical Report UU-CS-1995-22, Dept. of Computer Science, Utrecht University (NL), mai 1995.

[SSL78] C. F. Schmidt, N. S. Shridharan et Goodson J. L. : The plan recognition problem : an intersection of psychology and artificial intelligence. *Artificial Intelligence*, 11(1, 2):45–83, août 1978.

[Tay76] R. Taylor : *Synthesis of manipulator control programs from task-level specifications*. Thèse de doctorat, Dept. of Computer Science, Stanford University, CA (US), 1976.

[TBF] S. Thrun, W. Burgard et D. Fox : *Probabilistic Robotics*. To be published.

[TFL94b] H. Takeda, C. Facchinetti et J.-C. Latombe : Planning the motions of a mobile robot in a sensory uncertainty field. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(10):1002–1017, octobre 1994.

[THM+95] S. Tadokoro, M. Hayashi, Y. Manabe, Y. Nakami et T. Takamori : Motion planner of mobile robots which avoid moving human obstacles on the basis of stochastic prediction. *In Proc. of the Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pages 3286–3291, Vancouver, BC (CA), octobre 1995.

[Thr02] S. Thrun : Robotic mapping : a survey. *In* G. Lakemeyer et B. Nebel, éditeurs : *Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium*. Morgan Kaufmann, 2002.

[TKKT91] S. Tadokoro, M. Kioi, I. Kimura et T. Takamori : A robot control model for prevention of accidents and its 3-D visual simulation. *IMACS Annals on Computing and Applied MAthematics*, 11(1–4):559–564, 1991.

[TMS95] D. Tilbury, R. Murray et S. Sastry : Trajectory generation for the n-trailer problem using Goursat normal form. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 40(5):802–819, 1995.

[TT03b] R. Teo et C. Tomlin : Computing danger zones for provably safe closely spaced parallel approaches. *Journal of Guidance, Dynamics and Control*, 26(3):434–443, mai-juin 2003.

[UB00] I Ulrich et J. Borenstein : VFH* : Local obstacle avoidancd with look-ahead verification. *In Proc. of the IEEE*

Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 2505–2511, San Francisco, CA (US), avril 2000.

[Udu77] S. Udupa : Coilision detection and avoidance in computer controlled manipulators. *In Proc. of the Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Cambridge, MA (US), aug 1977.

[Vas03b] D. Vasquez : Estimation de mouvement des obstacles mobiles : une approche statistique. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), septembre 2003.

[vdBO04] J.P. van den Berg et M.H. Overmars : Roadmap-based motion planning in dynamic environments. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 1598–1605, Sendai (JP), octobre 2004.

[VitBC] M.P. Vitruvius : *De Architectura*. c. 27 BC.

[WBN93b] T. S. Wikman, M. S. Branicky et W. S. Newman : Reflexive collision avoidance : a generalized approach. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 3, pages 31–36, Atlanta, GA (US), mai 1993.

[YS01] H Yu et T. Su : A destination driven navigator with dynamic obstacle motion prediction. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2692–2697, Seoul (KR), mai 2001.

Chapitre 2

Activités d'animation de la recherche

2.1 Encadrement

2.1.1 Doctorants

- Vasquez Gomea Alejandro Dizan, doctorant de l'INPG, *Navigation en environnement dynamique incertain [Octobre 2003-...].*
- Petti Stéphane, doctorant de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, *Planification itérative de trajectoire pour véhicule en environnement dynamique [Janvier 2003-...].*
- Coué Christophe, doctorant de l'INPG, *Modèle bayésien pour l'analyse multimodale d'environnements dynamiques encombrés [Octobre 2000-Décembre 2003].*
- Scheuer Alexis, doctorant de l'INPG, *Planification de chemins à courbure continue pour robots non-holonomes [Octobre 1992-Janvier 1998].*
- Garnier Philippe, doctorant de l'INPG, *Contrôle d'exécution réactif de mouvement de véhicules en environnement dynamique structuré [Novembre 1994-Décembre 1995].*

2.1.2 Masters, DEA

- Rishikesh Parthasarathi, Master "Mathématique, Informatique" de l'INPG-UJF, spécialité "Image, Vision, Robotique", *Etats de collision inévitable pour véhicule de type voiture [Septembre 2005-Juin 2006].*
- Burlet Julien, Master "Mathématique, Informatique" de l'INPG-UJF, spécialité "Intelligence, Interaction, Information", *Processus décisionnels de Markov appliqués à l'exécution de mouvement [Septembre 2003-Juin 2004].*
- Vargas Hernández Alejandro, Master "Mathématique, Informatique" de l'INPG-UJF, spécialité "Image, Vision, Robotique", *Couplage per-*

ception embarquée et "débarquée" pour la localisation [Septembre 2003-Septembre 2004].

- Vasquez Gomea Alejandro Dizan, DEA "Imagerie, Vision et Robotique" de l'INPG, *Prédiction à long terme des mouvements d'obstacles mobiles [Septembre 2002-Septembre 2003].*
- Blondin Stéphane, DEA "Imagerie, Vision et Robotique" de l'INPG, *Planification de mouvement et contraintes perceptives [Septembre 2001-Juin 2002].*
- Fabrice Vincent, DEA "Imagerie, Vision et Robotique" de l'INPG, *Modélisation de l'environnement et localisation d'un véhicule [Septembre 1996-Juin 1997].*
- Mermond Raphaël, DEA "Imagerie, Vision et Robotique"de l'INPG, *Planification de chemins pour robots mobiles non-holonomes en présence de contraintes d'incertitudes géométriques [Septembre 1995-Juin 1996].*
- Scheuer Alexis, DEA "Imagerie, Vision et Robotique" de l'INPG, *Planification de chemins à courbure continue pour robots non-holonomes [Septembre 1991-Juin 1992].*

2.1.3 Ingénieurs, Maîtrises, *etc*

- Eric Boniface, élève ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), *Conception d'un serveur de "cartes dynamiques" pour environnements dynamiques [Novembre 2004-Octobre 2005].*
- Ortega Hernandez Hugo, Master de l'Institut Technologique de Monterrey, Campus de Monterrey (MX), *Détection et suivi d'objets mobiles à l'aide d'une caméra orientable [Avril-Juillet 2004].*
- Schaerer Joël, élève ingénieur de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA), *Calcul des Etats de Collision Inévitables [Août 2003-Décembre 2003].*
- Hélin Frédéric, élève ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), *Conception d'un serveur de "cartes dynamiques" pour environnements dynamiques [Janvier 2003-Juillet 2003].*
- Burlet Julien, Magistère de l'UJF, *Processus décisionnels de Markov appliqués à la planification de mouvement [Octobre 2002-Septembre 2003].*
- Vargas Hernández Alejandro, Master de l'Institut Technologique de Monterrey, Campus de Cuernavaca (MX), *Planification itérative de trajectoire [Septembre 2001-Février 2002].*
- Billiau Pierre, élève ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble, *Méthodes de guidage pour véhicules de type voiture [Juillet-Septembre 2001].*
- Fave Sébastien, élève ingénieur de l'Ecole Universitaire d'Informatique de l'UJF, *Planification iterative pour véhicule en espace de travail dynamique [Juillet-Septembre 2001].*

- Kok Hin Chan, élève ingénieur de NTU (School of Mechanical and Production Engineering), *Planification et contrôle des mouvements du véhicule Cycab [Janvier-Juin 2000].*
- Richard Desvigne, élève ingénieur de l'Ecole des Hautes Etudes Industrielles de Lille (FR), *Planification de chemins à courbure continue pour véhicules non-holonomes [Juin-Novembre 1999].*
- Gilles Liévin, ingénieur, *Planification réactive de mouvement de véhicules de type voiture [Septembre 1989-Août 1990].*

2.2 Enseignement

2.2.1 Ecoles d'été

- **Robotique**, Summer school on Automatic Control for Production Systems, Grenoble *[Depuis 2001]*.
- **Algorithmique du mouvement**, Summer School on Image and Robotics : Guanajuato (MX), *juillet 2005* ; Sophia Antipolis (FR), *juin 2004* ; Puebla (MX), *juillet 2003* ; Toulouse, *juillet 2002* ; Cuernavaca (MX), *juillet 2001* ; Grenoble, *juin 2000*.

2.2.2 Troisième cycle

- **Algorithmique du mouvement**, Post-Master de l'Ecole Doctorale "Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique", INPG-UJF, Grenoble, *printemps 2005, printemps 2006*.
- **Algorithmique du mouvement**, Master 2 "Mathématique, Informatique", spécialité "Image, Vision, Robotique" (ex DEA), INPG-UJF, Grenoble *[Depuis 2001]*.
- **Programmation des robots**, Master "Mathématique, Informatique", spécialité "Image, Vision, Robotique" (ex DEA), INPG-UJF, Grenoble *[Depuis 1994]*.

2.2.3 Second cycle

- **Intelligence Artificielle**, Master 1 "Mathématique, Informatique", UJF Grenoble, *printemps 2006*.
- **Ingénierie de la connaissance**, Polytech'Grenoble (école d'ingénieurs), *automne 2005*.
- **Algorithmique du mouvement**, Cycle "C", informatique, Conservatoire National des Arts et Métiers, Grenoble, *mai 2002*.
- **Algorithmique du mouvement**, cours invité, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologies (ISSAT), Damas (SY), *février 2000*.
- **Programmation des robots**, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble *[1988-1991,1995-1996]*.

2.2.4 Premier cycle

- **Technologie informatique**, Inst. Universitaire de Technologie, Grenoble *[1988-1993]*.

2.3 Actions de recherche

2.3.1 Coordination

- Projet franco-coréen Star **SafeMove**, "Dependable Robotic Navigation" *[Janvier 2004-Décembre 2005].*
- Projet français Robea **ParkNav**, "Interprétation de scènes dynamiques complexes et planification réactive de mouvements" *[Octobre 2002-Septembre 2005].*
- Projet franco-mexicain Lafmi **NavDyn**, "Navigation of an Autonomous Vehicle in a Dynamic Environment" *[Octobre 2002-Septembre 2004].*

2.3.2 Responsabilité d'un Workpackage

- Projet européen IST **Carsense**, "Sensing of Car Environment at Low Speed Driving", workpackage "Sensor Data Fusion" *[Janvier 2000-Décembre 2002].*
- Projet européen Inco-Copernicus "Multi-agent robot systems for industrial applications in the transport domain", workpackage "Navigation of Mobile Robots" *[Février 1997-Janvier 1999].*

2.3.3 Participation

- Projet européen IST **Cybercars 2**, "Close Communications for Cooperation between Cybercars" *[Janvier 2006-Décembre 2008].*
- Projet français Predit **Mobivip**, "Véhicules individuela publiques pour la mobilité en centre ville" *[Novembre 2003-Octobre 2006].*
- Projet européen IST **Cybercars**, "Cybernetic Cars for a New Transportation System in the Cities" *[Août 2001-Juillet 2004].*
- Groupe de Recherche du CNRS "Coopération homme-machine pour l'aide à la conduite automobile" *[Septembre 1999-Août 2003[*
- Programme français de R&D **La Route Automatisée** *[Janvier 1998-Décembre 2001]*
- Projet de l'Institut franco-russe Liapunov, "Contrôle optimal de véhicules non-holonomes" *[Janvier 1997-Décembre 1998].*
- Action de développement Inria-Inrets **Praxitèle** *[Mai 1993-Juin 1997].*
- Pôle "Machines intelligentes" du CNRS sur l'assistance à la conduite automobile *[Janvier 1994-Décembre 1997].*
- Projet européen Cost-13 "Modelling an Autonomous Agent in a Multi-Agent World" *[Janvier 1988-Décembre 1989].*
- Projet européen Eurêka **Prometheus Pro-Art**, "Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety" *[Janvier 1987-Décembre 1994].*

2.4 Collaborations

2.4.1 Chercheurs, Professeurs

- Prof. Hajime Asama, Distributed Adaptive Robotics Research Unit, Institut Riken, Saitama (JP).
- Prof. Jose-Luis Gordillo, Centro de Sistemas Intelligentes, Tecnológico de Monterrey (MX).
- Prof. Matthew Mason, Manipulation Laboratory, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA (US).
- Prof. Michel Pasquier, Intelligent Systems Laboratory, School of Computer Engineering, Nanyang Technological University (NTU), Singapour.
- Prof. Zvi Shiller, Department of Mechanical Engineering-Mechatronics, College of Judea and Samaria, Ariel (IL).

2.4.2 Post-Doctorants

- Dr. Guo Dong, post-doctorant de NTU (School of Mechanical and Production Engineering), *Fusion de données multi-capteurs pour la perception de l'environnement d'un véhicule [Novembre 1999-Octobre 2000].*
- Dr. Alain Lambert, post-doctorant de l'Université de Technologie de Compiègne (FR), *Planification de stratégies de déplacements sûrs pour véhicules non-holonomes [Avril-Octobre 1999].*

2.5 Diffusion

2.5.1 Exposés invités, séminaires

- *Safe motion planning in dynamic environments.* Motion Planning in Virtual Environments workshop, Toulouse (FR), *janvier 2005.*
- *Motion planning in uncertain environments.* France-Singapour Workshop, Grenoble (FR), *novembre 2004.*
- *Tools for autonomous navigation.* Korea-France Symp. on Dependable Navigation), Seoul (KR) *octobre 2004.*
- *Outils pour la conduite automatique.* Séminaire In'Tech Sophia, Antibes (FR), *juin 2004.*
- *Systèmes de transport Intelligents.* Colloque de l'Institut Français de Navigation, Paris (FR), *mars 2004.*
- *Inevitable collision states : a step towards safer robots.* Tokyo University (JP), *décembre 2002.*
- *From path to motion planning.* Riken Institute, Saitama (JP), *octobre 2002.*
- *Advanced motion planning techniques for robotic vehicles.* School of Computer Engineering, NTU, *janvier 2001.*
- *Continuous-curvature path planning for car-like vehicles.* Riken Institute, Saitama (JP), *novembre 1999.*
- *From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths.* Intelligent Robot Laboratory, Tsukuba (JP), *novembre 1999.*
- *Faisabilité de manoeuvres automatisées.* Groupe de recherche "Coopération homme-machine pour l'assistance à la conduite", Cluny (FR), *septembre 1999.*
- *Planning sub-optimal and continuous-curvature paths for car-like robots.* Universidade de Brasilia (BR), *novembre 1998.*
- *Car-like robots and moving obstacles.* Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA (US), *janvier 1994.*
- *Planification de mouvement en environnement dynamique.* Lifia, Grenoble (FR), *avril 1993.*
- *Smooth path planning for a nonholonomic vehicle in a structured world.* Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes, Toulouse (FR), *mars 1991.*
- *Motion planning in a multi-agent world.* Artificial Intelligence Laboratory, Bruxelles (BE), *juillet 1990.*

2.5.2 Organisation de manifestations

Participation à des comités de programme

- Int. Conf. Robotics : Science and Systems (RSS), Philadelphia, PA (US), *[Août 2006].*

- IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), *[Depuis 2005]*.
- IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), *[Depuis 1997]*.
- Iberoamerican Conf. on Artificial Intelligence (IBERAMIA), Puebla (MX), *novembre 2004*.
- Int. Symp. on Automotive Technology and Automation (ISATA). Florence (IT), *juin 1992*.
- European Prometheus Workshop on Intelligent Co-pilot. Grenoble, *décembre 1991*.

Participation à des comités d'organisation

- IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). Grenoble, *septembre 1997*.
- European Prometheus Workshop on Intelligent Co-pilot. Grenoble, *décembre 1991*.

Organisation de sessions invitées

- *Autonomous vehicle technologies for complex environnements*, Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Kunming (CN), *décembre 2004*.
- *Inria-NTU joint research on mobile robotics* , Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Singapour, *décembre 2002*.
- *Tools for future transport systems* , Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Singapour, *décembre 2000*.

Présidence de sessions

- IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA).
- IEEE-RSJ Int. Conf. on Robots and Systems (IROS).
- Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV).

2.6 Valorisation

2.6.1 Logiciels

- Une libraire de calcul de chemin à courbure continue et à dérivée de courbure bornée pour véhicule de type voiture (*cf* 1.2.1) est gracieusement mise à disposition. Elle a été utilisée, notamment, par le Prof. Srinivas Akella du Rensselaer Polytechnic Institute (Troy, New-York) dans le cadre d'un travail sur l'optimisation de trajectoire dans un contexte multi-véhicule [PA05] ainsi que dans le doctorat de Abraham Sanchez Lopez de l'Université de Montpellier [SL03].

2.6.2 Brevets

- Brevet français #0552735 (déposé le 9 septembre 2005) lié au travail de doctorat de Christophe Coué [Cou03b]. Titre de l'invention : *Procédé d'assistance à la conduite d'un véhicule et dispositif associé.*

2.7 Activités diverses

2.7.1 Comités de lecture[1]

Revues

- Int. Journ. of Robotics Research.
- IEEE Trans. on Robotics.
- IEEE Trans. on Robotics and Automation.
- IEEE Trans. on Control Systems Technology.
- IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics.
- Int. Journ. on Robotics and Autonomous Systems.
- Int. Journ. on Mechatronics
- Revue d'Intelligence Artificielle.

Conférences

- Int. Conf. Robotics : Science and Systems (RSS).
- IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA).
- IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI).
- Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV).
- IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning (ISATP).
- IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR).
- IEEE/IEEJ/JSAI Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems (IAS).
- Iberoamerican Conf. on Artificial Intelligence

2.7.2 Evaluation de projets

- Expert auprès de la Commission Européenne pour l'évaluation de projets dans le cadre du 6^{eme} PCRD[2] (Information Society Technologies).

2.7.3 Administration de la Recherche

- Membre du Conseil du laboratoire Gravir *[Janvier 2003-...]*.
- Membre du Comité d'Unité de Recherche (CUR) de l'Inria Rhône-Alpes (Collège des chercheurs) *[Février 2001-...]*.
- Membre de la Commission Locale Hygiène et Sécurité (CLHS) de l'Inria Rhône-Alpes *[Septembre 2000-...]*.
- Membre suppléant de la Commission Administrative Paritaire (CAP) de l'Inria (Collège des chargés de recherche) *[Janvier 1997-Janvier 2000]*.

[1] Evaluation régulière d'articles pour des revues et des conférences.
[2] Programme Cadre de Recherche et Développement.

Chapitre 3

Publications

3.1 Articles de revue en cours de soumission

[1] D. Vasquez, Th. Fraichard, O. Aycard et C. Laugier : Intentional motion on-line learning and prediction. *Int. Journal of Robotics Research*, Submitted in November 2005. *[pdf]*.

[2] J. Burlet, Th. Fraichard et O. Aycard : Robust navigation using markov models. *Robotics and Autonomous Systems*, Submitted in October 2005. *[pdf]*.

[3] D. Vasquez, Th. Fraichard et C. Laugier : Long-term motion prediction of future motion through visual observation and learning. *Int. Journal of Robotics Research*, Submitted in October 2005. *[pdf]*.

3.2 Articles de revue

[4] C. Coué, C. Pradalier, C. Laugier, Th. Fraichard et P. Bessière : Bayesian occupancy filtering for multi-target tracking : an automotive application. *Int. Journal of Robotics Research*, 25(1):19–30, janvier 2006. *[pdf]*.

[5] Th. Fraichard : Cybercar : l'alternative à la voiture particulière. *Navigation (Paris)*, 53(209):53–74, janvier 2005. *[www]*.

[6] Th. Fraichard et A. Scheuer : From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths. *IEEE Trans. on Robotics*, 20(6):1025–1035, décembre 2004. *[www]*.

[7] Th. Fraichard et H. Asama : Inevitable collision states. a step towards safer robots ? *Advanced Robotics*, 18(10):1001–1024, 2004. *[www]*.

[8] Th. Fraichard et Ph. Garnier : Fuzzy control to drive car-like vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 34(1):1–22, décembre 2000. *[pdf]*.

[9] Th. Fraichard : Motion planning for autonomous car-like vehicles. *ERCIM News*, 42:26–28, juillet 2000. *[html]*.

[10] C. Laugier, Th. Fraichard, Ph. Garnier, I. E. Paromtchik et A. Scheuer : Sensor-based control architecture for a car-like vehicle. *Autonomous Robots*, 6(2):165–185, avril 1999. *[pdf]*.

[11] Th. Fraichard : Trajectory planning in a dynamic workspace : a 'state-time space' approach. *Advanced Robotics*, 13(1):75–94, 1999. *[pdf]*.

[12] Th. Fraichard : Trajectory planning amidst moving obstacles : path-velocity decomposition revisited. *Journal of the Brazilian Computer Science Society — Special issue on Robotics*, 4(3):5–13, avril 1998. *[pdf]*.

[13] Th. Fraichard et I. Mazon : Projet sharp : Robotique en environnement réel. *Bulletin de l'Association Française d'Intelligence Artificielle*, 27:30–31, novembre 1996.

3.3 Chapitres de livres

[14] C. Laugier et Th. Fraichard : Decisional architectures for motion autonomy. *In* L. Vlacic, F. Harashima et M. Parent, éditeurs : *Intelligent vehicle technologies*, chapitre 11, pages 333–391. Butterworth-Heinemann, 2001. *[pdf]*.

[15] C. Laugier, Ph. Garnier, Th. Fraichard, I. Paromtchik et A. Scheuer : Motion planning and sensor-guided manœuvre generation for an autonomous vehicle. *In* A. Zelinsky, éditeur : *Field and Service Robotics*, pages 60–67. Springer, 1998.

[16] Th. Fraichard et R. Mermond : Path planning with kinematic and uncertainty constraints. *In Intelligent Autonomous Systems*, pages 30–37. Ufa University Press, 1998.

[17] A Scheuer et Th Fraichard : Continuous-curvature path planning for car-like vehicles. *In Intelligent Autonomous Systems*, pages 46–55. Ufa University Press, 1998.

[18] Th. Fraichard et C. Laugier : Kinodynamic planning in a structured and time-varying workspace. *In* C. Laugier, éditeur : *Geometric Reasoning for Perception and Action*, volume 708 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 19–37. Springer-Verlag, 1993. *[pdf]*.

[19] Th. Fraichard et Y. Demazeau : Motion planning in a multi-agent world. *In* Y. Demazeau et J.P. Muller, éditeurs : *Decentralized A.I.*, pages 137–153. North-Holland, 1990. *[pdf]*.

3.4 Acte de conférences

[20] Th. Fraichard et C. Laugier, éditeurs. *Proc. of the European Prometheus Workshop on Intelligent Co-Pilot*, Grenoble (FR), décembre 1991.

3.5 Conférences avec comité de lecture

[21] S. Petti et Th. Fraichard : Partial motion planning framework for reactive planning within dynamic environments. *In Proc. of the IFAC/AAAI Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Barcelona (SP), septembre 2005. *[www]*.

[22] S. Petti et Th. Fraichard : Safe navigation of a car-like robot in a dynamic environment. *In Proc. of the European Conf. on Mobile Robots*, Ancona (IT), septembre 2005. *[www]*.

[23] J. Burlet, Th. Fraichard et O. Aycard : Robust navigation using markov models. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, AB (CA), août 2005. *[www]*.

[24] S Petti et Th. Fraichard : Safe motion planning in dynamic environments. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, AB (CA), août 2005. *[www]*.

[25] D. Vasquez, Th. Fraichard, O. Aycard et C. Laugier : Intentional motion on-line learning and prediction. *In Proc. of the Int. Conf. on Field and Service Robotics*, pages 604–615, Port Douglas, QLD (AU), juillet 2005.

[26] D. Vasquez, F. Large, Th. Fraichard et C. Laugier : Moving obstacles' motion prediction for autonomous navigation. *In Proc. of the Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, volume 1, pages 149–154, Kunming, China, décembre 2004. *[www]*.

[27] D. Vasquez, F. Large, Th. Fraichard et C. Laugier : High-speed autonomous navigation with motion prediction for unknown moving obstacles. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 82–87, Sendai (JP), octobre 2004. *[www]*.

[28] F. Large, D Vasquez, Th. Fraichard et C Laugier : Avoiding cars and pedestrians using v-obstacles and motion prediction. *In Proc. of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pages 375–379, Pisa (IT), juin 2004. *[www]*.

[29] J. Burlet, O. Aycard et Th. Fraichard : Robust motion planning using markov decision processes and quadtree decomposition. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2820–2825, New Orleans, LA (US), avril 2004. *[www]*.

[30] O. Lefebvre, F. Lamiraux, C. Pradalier et Th. Fraichard : Obstacles avoidance for car-like robots. integration and experimentation on two robots. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 4277–4282, New Orleans, LA (US), avril 2004. *[www]*.

[31] D. Vasquez et Th. Fraichard : Motion prediction for moving objects : a statistical approach. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 4, pages 3931–3936, New Orleans, LA (US), avril 2004. *[www]*.

[32] Th. Fraichard et H. Asama : Inevitable collision states. a step towards safer robots ? *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 388–393, Las vegas, NV (US), octobre 2003. *[www]*.

[33] C. Coué, Th. Fraichard, P. Bessière et E. Mazer : Using bayesian programming for multi-sensor multi-target tracking in automotive applications. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei (TW), mai 2003. *[www]*.

[34] C. Coué, Th. Fraichard, P. Bessière et E. Mazer : Multi-sensor data fusion using bayesian programming : an automotive application. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne (CH), octobre 2002. *[pdf]*.

[35] C. Coué, Th. Fraichard, P. Bessière et E. Mazer : Using bayesian programming for multi-sensor data fusion in automotive applications. *In Proc. of the IEEE Intelligent Vehicle Symp.*, Versailles (FR), juin 2002. *[pdf]*.

[36] Th. Fraichard et J.-M. Ahuactzin : Smooth path planning for cars. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul (KR), mai 2001. *[pdf]*.

[37] D. Guo, Th. Fraichard, M. Xie et C. Laugier : Color modeling by spherical influence field in sensing driving environment. *In Proc. of the IEEE Intelligent Vehicle Symp.*, pages 249–254, Dearborn, MI (US), octobre 2000.

[38] Th. Fraichard et A. Lambert : Planning safe paths for nonholonomic car-like robots navigating through computed landmarks. *In Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, pages 447–454, Venezia (IT), juillet 2000. *[pdf]*.

[39] A. Lambert et Th. Fraichard : Landmark-based safe path planning for car-like robots. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2046–2051, San Francisco, CA (US), avril 2000. *[pdf]*.

[40] Th. Fraichard, A. Scheuer et R. Desvigne : From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths. *In Proc. of the IEEE Int.*

Conf. on Advanced Robotics, pages 585–590, Tokyo (JP), octobre 1999. *[pdf]*.

[41] C. Laugier, Th. Fraichard, I. E. Paromtchik et Ph. Garnier : Sensor-based control architecture for a car-like vehicle. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 216–222, Victoria, BC (CA), octobre 1998.

[42] Th. Fraichard et R. Mermond : Path planning with uncertainty for car-like robots. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 27–32, Leuven (BE), mai 1998. *[pdf]*.

[43] Th. Fraichard et R. Mermond : Integrating uncertainties and landmarks in path planning for car-like robots. *In Proc. of the IFAC Symp. on Intelligent Autonomous Vehicles*, volume 2, pages 397–402, Madrid (ES), mars 1998. *[pdf]*.

[44] C. Laugier, Ph. Garnier, Th. Fraichard, I. E. Paromtchik et A. Scheuer : Motion planning and sensor-guided manœuvre generation for an autonomous vehicle. *In Proc. of the Int. Conf. on Field and Service Robotics*, pages 56–65, Canberra (AU), décembre 1997.

[45] A. Scheuer et Th. Fraichard : Continuous-curvature path planning for car-like vehicles. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 997–1003, Grenoble (FR), septembre 1997. *[pdf]*.

[46] A. Scheuer et Th. Fraichard : Collision-free and continuous-curvature path planning for car-like robots. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 867–873, Albuquerque, NM (US), avril 1997.

[47] C. Laugier, I. E. Paromtchik, Ph. Garnier et Th. Fraichard : Motion control of an autonomous vehicle through sensor-guided manœuvres. *In Proc. of the Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore (SG), décembre 1996.

[48] A. Scheuer et Th. Fraichard : Planning continuous-curvature paths for car-like robots. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 1304–1311, Osaka (JP), novembre 1996. *[pdf]*.

[49] Ph. Garnier et Th. Fraichard : A fuzzy motion controller for a car-like vehicle. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 1171–1178, Osaka (JP), novembre 1996.

[50] Th. Fraichard et A. Scheuer : Car-like robots and moving obstacles. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 64–69, San Diego, CA (US), mai 1994. *[pdf]*.

[51] Th. Fraichard et C. Laugier : Dynamic trajectory planning, path-velocity decomposition and adjacent paths. *In Proc. of the Int. Joint*

Conf. on Artificial Intelligence, volume 2, pages 1592–1597, Chambéry (FR), septembre 1993. *[pdf]*.

[52] Th. Fraichard : Dynamic trajectory planning with dynamic constraints : a 'state-time space' approach. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 1394–1400, Yokohama (JP), juillet 1993. *[pdf]*.

[53] Th. Fraichard et C. Laugier : Path-velocity decomposition revisited and applied to dynamic trajectory planning. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 40–45, Atlanta, GA (US), mai 1993. *[pdf]*.

[54] Th. Fraichard et C. Laugier : Kinodynamic planning with moving obstacles : the case of a structured workspace. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 1524–1531, Raleigh, NC (US), juillet 1992. *[pdf]*.

[55] Th. Fraichard et C. Laugier : Kinodynamic planning in a structured and time-varying 2D workspace. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1500–1505, Nice (FR), mai 1992. *[pdf]*.

[56] Th. Fraichard, M. Hassoun et C. Laugier : Reactive motion planning in a dynamic world. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics*, pages 1028–1032, Pisa (IT), juin 1991.

[57] Th. Fraichard et C. Laugier : On line reactive planning for a non holonomic mobile in a dynamic world. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 432–437, Sacramento, CA (US), avril 1991.

[58] Th. Fraichard : Smooth trajectory planning for a car in a structured world. *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 318–323, Sacramento, CA (US), avril 1991.

[59] Th. Fraichard, C. Laugier et G. Liévin : Robot motion planning : the case of non-holonomic mobiles in a dynamic world. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 757–764, Tsuchiura (JP), juillet 1990.

[60] Th. Fraichard et C. Laugier : Planning movements for several coordinated vehicles. *In Proc. of the IEEE-RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pages 466–472, Tsukuba (JP), septembre 1989.

3.6 Publications académiques

[61] Th. Fraichard : *Planification de mouvement pour mobile non-holonome en espace de travail dynamique*. Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), avril 1992.

[62] Th. Fraichard : Un système de planification de mouvement en univers multi-agents. Mémoire de diplôme d'etudes approfondies, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juin 1988.

3.7 Livrables de contrats/projets

[63] Th. Fraichard : *SafeMove*. décembre 2004. Yearly activity report, French-Korea STAR project.

[64] Th. Fraichard, éditeur. *ParkNav : interprétation de scènes dynamiques complexes et planification réactive de mouvements*, octobre 2004. Rapport d'activité à deux ans, projet CNRS-ROBEA.

[65] Th. Fraichard : *NavDyn : navigation d'un véhicule autonome en environnement dynamique*. octobre 2004. Rapport final, projet franco-mexicain du LAFMI.

[66] Th. Fraichard, éditeur. *ParkNav : interprétation de scènes dynamiques complexes et planification réactive de mouvements*, octobre 2003. Rapport d'activité à un an, projet CNRS-ROBEA.

[67] Th. Fraichard : *NavDyn : navigation d'un véhicule autonome en environnement dynamique*. octobre 2003. Rapport d'activité à un an, projet franco-mexicain du LAFMI.

[68] Th. Fraichard et C. Coué, éditeurs. *Sensor data fusion*, novembre 2002. Deliverable D17, European project IST-1999-12224 Carsense : Sensing of Car Environment at Low Speed Driving.

Chapitre 4

Publications annexées

1. Th. Fraichard et A. Scheuer. From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths. *IEEE Trans. on Robotics*, 20(6) :1025–1035, 2004. *[www]*.
2. Th. Fraichard. Trajectory planning in a dynamic workspace : a 'state-time space' approach. *Advanced Robotics*, 13(1) :75–94, 1999. *[pdf]*.
3. Th. Fraichard et H. Asama. Inevitable collision states. a step towards safer robots ? *Advanced Robotics*, 18(10) :1001–1024, 2004. *[www]*.
4. D. Vasquez, Th. Fraichard, O. Aycard et C. Laugier. Intentional Motion On-line Learning and Prediction. *Int. Journal of Robotics Research*, Submitted in November 2005. *[pdf]*.