HABILITATION

préparée au

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

par

Florent LAMIRAUX

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse
Chargé de recherche CNRS

Algorithmique et commande du mouvement en robotique

---

soutenance prévue le 9 décembre 2004 devant le jury

Rapporteurs	**Alain AYACHE**
	Christian LAUGIER
	Claude SAMSON
Examinateurs	**Raja CHATILA**
	Jean-Paul LAUMOND

Table des matières

1 Curriculum Vitae **3**

2 Synthèse de mes travaux de recherche **5**
2.1 Introduction 6
2.2 Orientation de pièces planes par champs de forces 7
2.3 Planification de mouvements pour objets déformables 8
2.4 Etude des méthodes aléatoires de planification de mouvements 9
2.5 Planification et commande de mouvements pour systèmes non holonomes 12
2.5.1 Planification de mouvements pour systèmes non holonomes 12
2.5.2 Commande en boucle fermée 15
2.5.3 Optimisation de trajectoires et réactivité 17
2.5.4 Manipulation mobile 21
2.6 Intégration 21
2.6.1 La plate-forme logicielle Move3D 22
2.6.2 Le démonstrateur Hilare 2 muni de sa remorque 23
2.6.3 Environnement de simulation 23
2.6.4 Intégration à bord d'un robot distant : le Cycab 25
2.6.5 Résultats expérimentaux 26
2.7 Travaux prospectifs 29

3 Publications **32**

4 Activités liées à la recherche **37**
4.1 Partenariat 38

4.1.1 Projets européens 38
4.2 Valorisation 39
4.3 Enseignement et diffusion 40
4.4 Encadrement 40
4.5 Animation scientifique 41
4.6 Collaborations 41

I

Curriculum Vitae

Lamiraux Florent
LAAS-CNRS
7 avenue du Colonel Roche
31077 Toulouse cedex 4

Né le 23 janvier 1970

Nationalité française

Situation actuelle : chargé de recherche CNRS

Formation et diplômes

1988	Bac E
1988–1990	Classes préparatoires, Lycée Roosevelt (Reims)
1991–1993	*École Polytechnique* (Palaiseau)
1993–1994	Formation complémentaire *ENSEEIHT*, section informatique (Toulouse)
	DEA Informatique, *INP* (Toulouse)
1994–1997	Thèse de doctorat en robotique

Expérience professionnelle

1990–1991	Service militaire, armée de l'air (Apt)
1997–1999	Séjour postdoctoral à *Rice University*, Houston, États-Unis
depuis 1999	Chargé de recherche au LAAS

II

Synthèse de mes travaux de recherche

2.1 Introduction

Mes travaux de recherche s'articulent autour de la problématique du mouvement en robotique et en automatique. Ils comportent quatre composantes principales à savoir :

- l'étude des mouvements et notamment des positions d'équilibre stable d'objets plans soumis à un champ de force dans le plan,
- la planification de mouvements pour objets déformables,
- l'analyse de la complexité des méthodes aléatoires de planification de mouvements,
- la planification et la commande de mouvements en robotique pour les systèmes soumis à des contraintes de roulement sans glissement, dits non holonomes.

Cette dernière thématique, le coeur de mon travail de recherche, est le fruit de mon activité scientifique au LAAS. Elle représente l'essentiel de mon travail de thèse et de chargé de recherche au CNRS. Les deux premières composantes quant à elles constituent une parenthèse coïncidant avec un séjour post-doctoral à l'université de Rice à Houston au Texas. Je les exposerai donc brièvement et en premier, tandis que mes recherches en robotique mobile feront l'objet de l'essentiel de ce chapitre.

Les contributions que je résume dans les paragraphes qui suivent font l'objet de publications dans les revues internationales suivantes :

- IEEE Transactions on Robotics and Automation,
- IEEE Transactions on Robotics,
- IEEE Transactions on Automatic Control,
- International Journal on Robotics Research,
- IEEE Robotics And Automation Magazine.

Support numérique

La robotique est une science pluri-disciplinaire dans la pratique de laquelle se cotoient principalement des informaticiens, des automaticiens et des mécaniciens. Cette diversité est incontestablement une richesse. Elle a cependant l'inconvénient majeur que la plupart des roboticiens (moi y-compris) ne sont pas spécialistes dans tous les domaines qui composent la robotique. Pour tenir compte de cette particularité, ainsi que pour m'adresser à un public plus large, il m'a semblé utile de réaliser un cédérom de vulgarisation qui permette d'expliquer les objectifs de mes travaux. Ce cédérom, joint au présent document, contient de nombreuses animations qui, au-delà des mots, ont pour objectif de montrer que mes travaux ont réellement pour ambition de traiter les problèmes de manière pragmatique, de leur formalisation théorique à leur

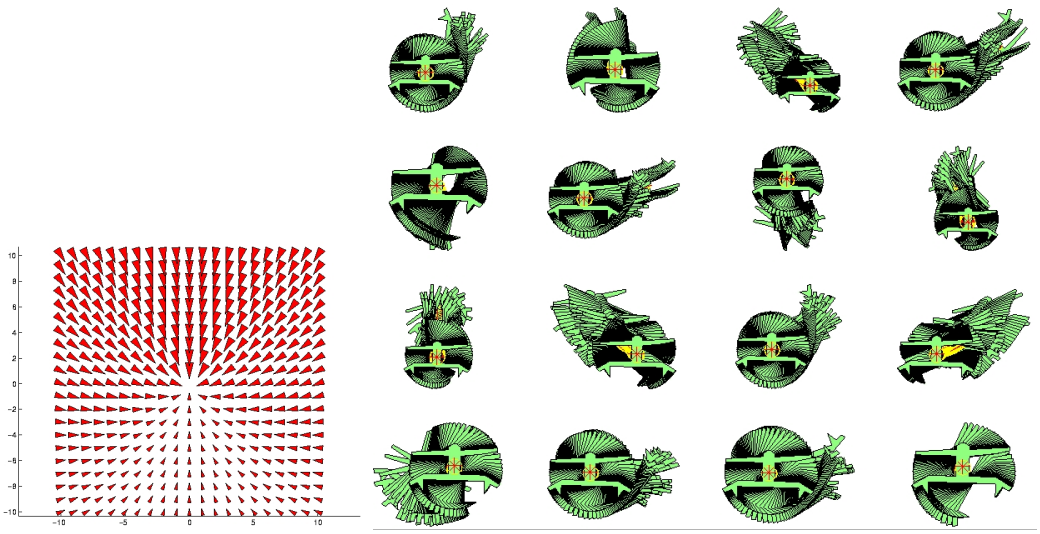


FIG. 2.1 – La combinaison d'un champ de force radial et d'un champ de force constant dans le plan permet d'orienter de façon unique des pièces non symétriques. À droite, plusieurs mouvements initiés de configurations différentes convergent vers la même position d'équilibre stable.

validation en passant par le développement informatique sur plates-formes expérimentales.

2.2 Orientation de pièces planes par champs de forces

Les travaux décrits dans cette section abordent un problème majeur de l'automatisation des processus de fabrication. En effet, dans les chaînes de fabrication industrielles, des pièces doivent souvent être orientées pour être saisies correctement. Traditionnellement, les industriels utilisent des bacs vibreurs munis de filtres mécaniques qui rejettent les pièces mal orientées dans le bac. Ces bacs sont lourds, bruyants et les filtres mécaniques spécifiques à une forme de pièce donnée. De plus, ces dispositifs ne sont pas adaptés à des pièces de petite taille. Ces différentes raisons, ainsi que l'intérêt économique évident de toute amélioration de ces systèmes conduisit des chercheurs à étudier des actionneurs qui engendrent un champ de force dans le plan à l'aide, soit de micro-jets d'air, soit de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Ces systèmes ont l'avantage d'être programmables. Le problème devient alors : étant donné une pièce, quel champ de force appliquer pour

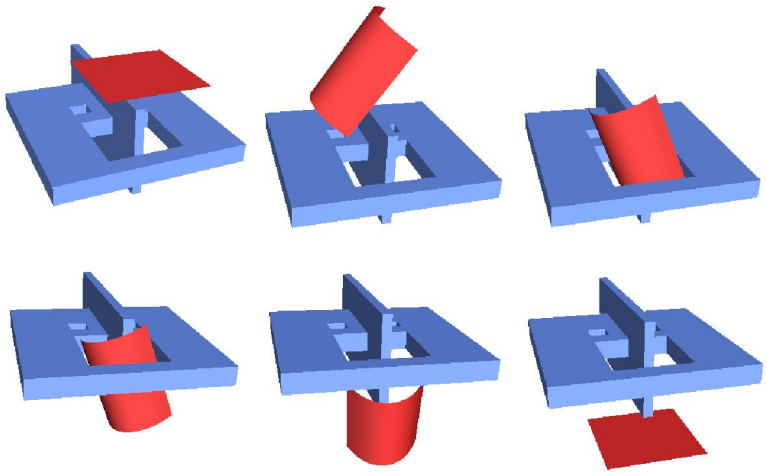


FIG. 2.2 – Exemple de chemin planifié pour une plaque déformable. La forme de la plaque pendant la déformation correspond à un modèle mécanique réaliste d'élasticité.

que cette pièce n'ait qu'une seule position d'équilibre stable dans le plan. Une équipe de chercheurs américains avait conjecturé que la combinaison d'un champ de force radial avec un petit champ de force constant permettrait d'orienter n'importe quelle pièce aux symétries près. Cette conjecture resta sans preuve pendant deux ans faute d'une formalisation adéquate du problème. En effet, les initiateurs de la conjecture raisonnaient avec des outils de la mécanique : force et moment. Ces outils ne permettaient pas de prouver le résultat recherché.

C'est alors que je proposai une modélisation duale fondée sur les fonctions de potentiel dont les champs de forces en question dérivent. Cette modélisation, ainsi que les outils de l'analyse me permirent de démontrer le résultat qui était l'élément manquant pour finaliser un article dans une revue internationale de robotique [11]. La figure 2.1 illustre ce résultat. Je poussai ensuite le formalisme un peu plus loin pour m'intéresser à des pièces symétriques [22, 8], pour lesquelles je proposai des conditions suffisantes d'unicité de la position d'équilibre stable, aux symétries près.

2.3 Planification de mouvements pour objets déformables

La planification de mouvements est traditionnellement issue de la robotique. Le problème consiste à calculer une trajectoire pour un système re-

liant deux configurations, tout en évitant les obstacles de l'environnement. Rapidement, la complexité algorithmique et la fragilité numérique des méthodes exactes de planification de mouvements suscita l'apparition de méthodes aléatoires au début des années 90. L'efficacité surprenante de ces méthodes aléatoires contribua à ouvrir le champ d'application de la planification de mouvements hors de la robotique. Le but de notre travail dans ce domaine était de s'intéresser à l'extension de ces méthodes aléatoires au cas d'objets déformables. La principale difficulté de cette extension est que l'espace des configurations de l'objet mobile est de dimension infinie.

Notre travail consista à proposer un formalisme permettant de prendre en compte des propriétés telles que l'élasticité dans la résolution du problème. Nous mîmes ensuite en oeuvre ce formalisme en développant un planificateur de mouvements pour objets déformables [9]. La figure 2.2 montre un exemple de chemin planifié avec déformation d'une plaque élastique. Les applications potentielles de ce travail exploratoire vont de l'animation graphique, domaine dans lequel la planification de mouvements commence aujourd'hui à faire son entrée, à la manipulation de pièces flexibles comme les câbles des bras manipulateurs que l'on n'est pas capable de prendre en compte avec les méthodes traditionnelles de planification de mouvements.

2.4 Etude des méthodes aléatoires de planification de mouvements

Mes premières contributions en robotique portent sur l'étude de la complexité des méthodes aléatoires de planification de mouvements. L'objectif était de tenter d'expliquer leurs bonnes performances en moyenne.

La complexité exponentielle du problème canonique de planification de mouvements en fonction de la dimension de l'espace des configurations ainsi que la difficulté d'implanter les algorithmes de façon robuste sur des machines à précision finie est sans doute à l'origine de l'apparition des premières méthodes aléatoires de planification de mouvements. Ces méthodes ont aujourd'hui complètement supplanté les méthodes exactes et reposent sur deux types de stratégies : la première consiste à explorer l'espace libre par un processus de diffusion guidé par un champ de potentiel sur l'espace des configurations [Barraquand 1991], la seconde consiste à explorer l'espace libre en y développant un graphe [Kavraki 1996, Kuffner 2000].

Nos premiers travaux dans le domaine du mouvement en robotique furent consacrés à l'une des méthodes de la première catégorie appelée RPP (Random Path Planning) [Barraquand 1991]. Cette méthode construit un champ

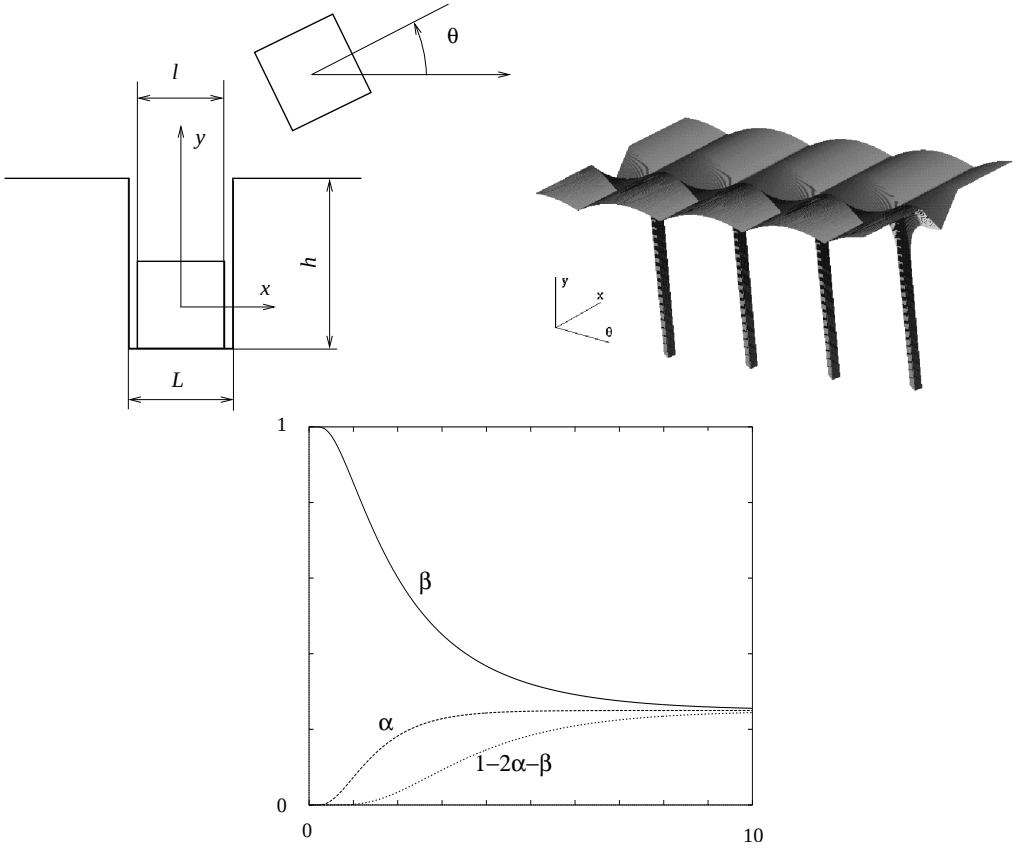


FIG. 2.3 – Caractérisation de RPP : l'algorithme se comporte comme une chaîne de Markov dont les états sont les minima locaux du champ de potentiel sur l'espace des configurations. Dans cet exemple, le robot est un carré dont la configuration finale se trouve au fond d'un couloir. Le champ de potentiel engendré par RPP a quatre minima : le but et trois minima locaux correspondant aux trois mauvaises orientations du carré au fond du couloir. En haut à droite est dessiné l'espace des configurations libres de ce système. En bas, évolution en fonction du temps des probabilités de transition d'un mouvement aléatoire issu du fond du couloir dans une orientation donnée vers la zone d'attraction des trois autres orientations possibles du carré dans le couloir.

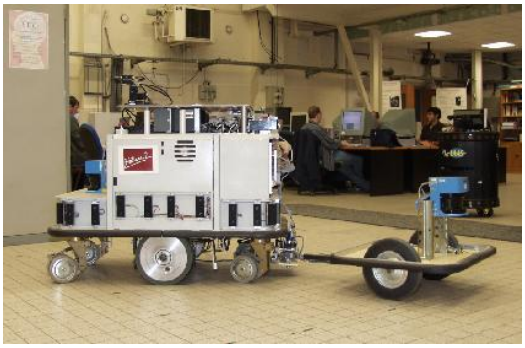


FIG. 2.4 – Le robot mobile Hilare 2 muni de sa remorque : un système non holonome.

de potentiel dans l'espace des configurations, dont le minimum global est la configuration but. Des mouvements aléatoires succèdent alors à des mouvements de descente de gradient lorsque ceux-ci se retrouvent piégés dans un minimum local. À l'époque de leur apparition, les méthodes aléatoires surprirent par leur capacité à résoudre rapidement des problèmes jusqu'alors inaccessibles. Se posa alors la question de comprendre leur efficacité. Dans ce but, nous proposâmes un modèle de caractérisation de l'algorithme RPP fondé sur une chaîne de Markov à état discret, dont les probabilités de transition sont les probabilités de présence des mouvements aléatoires produits par l'algorithme dans les zones d'attraction relatives à chaque minimum local du champ de potentiel [29]. Évidemment, dans le cas général, cette densité de probabilité est très difficile à évaluer. Nous illustrâmes donc notre modélisation par l'exemple très caractéristique des situations difficiles pour RPP d'un robot carré dont la configuration finale est au fond d'un couloir avec une orientation donnée. Les minima locaux du champ de potentiel de cet exemple sont également au fond du couloir, mais avec de mauvaises orientations. La figure 2.3 montre le robot dans son espace de travail ainsi que l'espace des configurations du système. Cet exemple illustratif permet d'évaluer approximativement le nombre de mouvements aléatoires nécessaires pour sortir d'un couloir lorsque le robot est mal orienté.

Dans le même temps, d'autres travaux s'intéressèrent à l'analyse de la complexité des méthodes d'échantillonnage aléatoire [Hsu 1999].

2.5 Planification et commande de mouvements pour systèmes non holonomes

Cette problématique englobe la plus grosse partie de ma contribution scientifique et comporte plusieurs parties. Dans un premier temps, nous abordâmes le problème de la planification de mouvements pour les systèmes à roues ou encore systèmes non holonomes en considérant à la fois les aspects locaux et les aspects globaux. Vinrent ensuite des travaux sur la réactivité dans l'exécution des mouvements pour ces systèmes. Enfin, le fil conducteur de toutes ces contributions théoriques est leur intégration dans une démonstration à bord du robot mobile Hilare 2 muni d'une remorque (Figure 2.4).

2.5.1 Planification de mouvements pour systèmes non holonomes

Les systèmes non holonomes sont des systèmes commandables dont la vitesse en toute configuration est soumise à des contraintes linéaires. Toute trajectoire n'est ainsi pas admissible pour ces systèmes. L'exemple le plus emblématique est celui de la voiture. Les contraintes de roulement sans glissement des roues sont linéaires sur l'espace des vitesses et cependant, tout l'espace des configurations est accessible par des trajectoires admissibles. La question élémentaire qui se pose alors à l'automaticien est comment produire pour un tel système des trajectoires admissibles qui rejoignent deux configurations données. Celle qui se pose au roboticien est encore plus complexe : comment rejoindre deux configurations par une trajectoire admissible et sans collision dans un environnement encombré d'obstacles. Ces deux questions occupèrent de nombreux automaticiens et roboticiens durant les années 80 et 90. Les résultats obtenus à l'époque, sans grande avancée depuis, peuvent se résumer de la façon suivante. Pour tous les systèmes jouïssant d'une propriété appelée la linéarisabilité par retour d'état ou platitude différentielle, le problème de construire une trajectoire admissible entre deux configurations du système se réduit à construire une courbe dans un espace de dimension inférieure à celle de l'espace des configurations avec des contraintes sur les dérivées aux deux extrémités [Fliess 1995, Samson 1995, Rouchon 1994]. Pour tous les autres systèmes, aucune solution exacte n'a encore été proposée.

Pour résoudre le problème de planification de mouvements en présence d'obstacles, une méthode dite méthode par approximation de trajectoire géométrique avait été développée au LAAS pour les robots de type unicycle [Laumond 1994] quelques années auparavant. Cette méthode découple les contraintes dues aux obstacles des contraintes non holonomes. Le prin-

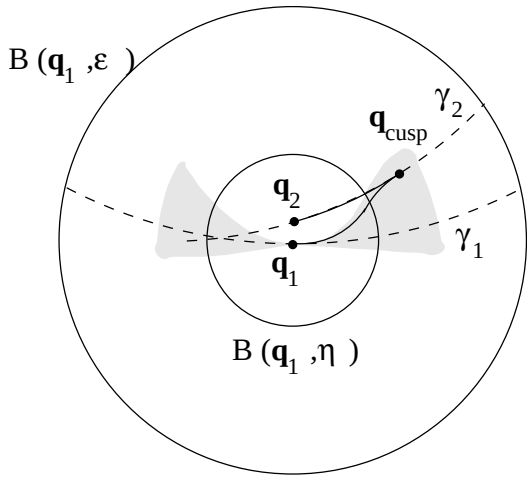


FIG. 2.5 – Méthode locale pour systèmes sans dérive à deux entrées différentiellement linéarisables. Cette méthode rend compte de la commandabilité locale en temps petit. Cela signifie que l'espace accessible d'une configuration $\mathbf{q}_1$ sans sortir d'un voisinage $B(\mathbf{q}_1, \varepsilon)$ contient un voisinage $B(\mathbf{q}_1, \eta)$ de $\mathbf{q}_1$.

cipe consiste à travailler en deux étapes : d'abord, on construit une trajectoire initiale entre les configurations initiale et but, sans tenir compte des contraintes non holonomes. A partir de cette trajectoire initiale, on construit une trajectoire admissible et sans collision en applicant une *méthode locale* entre des sous-buts choisis sur la trajectoire initiale. Une méthode locale relie tout couple de configurations par une trajectoire admissible, sans tenir compte des obstacles. Pour assurer la convergence de l'algorithme d'approximation, la méthode locale doit rendre compte de la commandabilité locale du système considéré [Sekhavat 1998], conformément à la définition suivante (figure 2.5).

Définition 2.1 *Une méthode locale*

$$\begin{array}{rccl} \mathcal{ML} & \mathcal{C}\times\mathcal{C} & \rightarrow & C^1([0,1],\mathcal{C}) \\ & (\mathbf{q}_1,\mathbf{q}_2) & \rightarrow & \mathcal{ML}(\mathbf{q}_1,\mathbf{q}_2) \end{array}$$

rend compte de la commandabilité locale du système dont elle produit des trajectoires, si et seulement si

$$\begin{array}{l} \forall\varepsilon>0\ \exists\eta>0,\ \forall(\mathbf{q}_1,\mathbf{q}_2)\in\mathcal{C}\times\mathcal{C} \\ d_{\mathcal{C}}(\mathbf{q}_1,\mathbf{q}_2)<\eta \quad\Rightarrow\quad \forall s\in[0,1], d_{\mathcal{C}}(\mathbf{q}_1,\mathcal{ML}(\mathbf{q}_1,\mathbf{q}_2)(s))<\varepsilon \end{array}$$

Cette contrainte différencie notablement le problème de la planification de trajectoires sans obstacles, tel que posé en automatique non linéaire du même

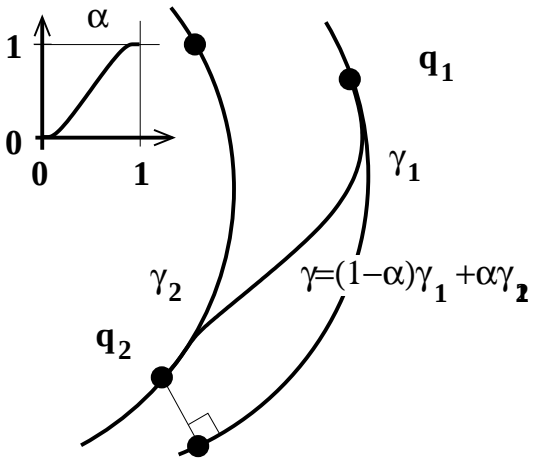


FIG. 2.6 – Principe de fonctionnement de notre méthode locale dans le cas d'un système sans dérive de dimension quatre à deux entrées. Notre méthode est fondée sur une combinaison convexe de courbes canoniques. La trajectoire du système est caractérisée par sa sortie plate et ses dérivées première et seconde. Les configurations à relier $\mathbf{q}_1$ et $\mathbf{q}_2$ spécifient chacune un point du plan, une direction de $\mathbb{S}^1$ et une courbure. A chacune de ces conditions aux limites correspond un cercle unique : γ_1 pour $\mathbf{q}_1$ et γ_2 pour $\mathbf{q}_2$. Les courbes γ_1 et γ_2 sont paramétrées de telle sorte que $\gamma_1(0)$ corresponde à la position de la sortie plate en $\mathbf{q}_1$, $\gamma_2(1)$ corresponde à la position de la sortie plate en $\mathbf{q}_2$ et $\gamma_1(1)$ soit la projection orthogonale de $\gamma_2(1)$ sur γ_1. Si α est une fonction croissante de $[0,1]$ dans $[0,1]$ dont les dérivées première et seconde sont nulles en 0 et en 1 et telle que $\alpha(1) = 1$, la combinaison convexe $\gamma = (1-\alpha)\gamma_1 + \alpha\gamma_2$ est une courbe dans le plan pour la sortie plate du système qui correspond à un chemin faisable entre $\mathbf{q}_1$ et $\mathbf{q}_2$ pour le système plat. Remarquons que si $\mathbf{q}_2$ est sur la courbe γ_1, la combinaison γ est confondue avec la courbe γ_1. Par continuité, si $\mathbf{q}_2$ est proche de la courbe γ_1, γ l'est également. Cette propriété est cruciale car elle permet en plaçant judicieusement un point de rebroussement lorsque cela est nécessaire de construire une méthode locale qui rende compte de la commandabilité locale. Voir [10] pour une description détaillée de la méthode.

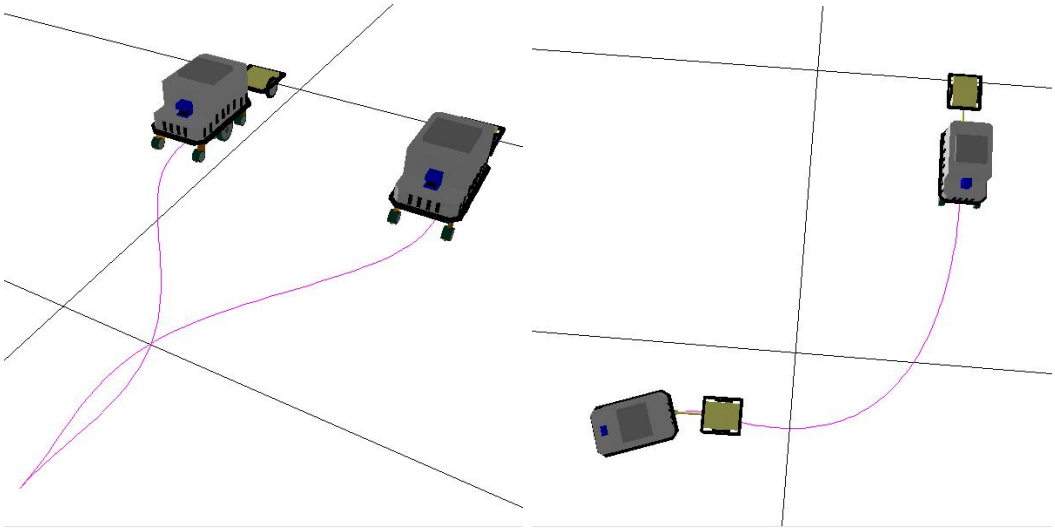


FIG. 2.7 – Exemples de trajectoires produites par la méthode locale pour systèmes plats sans dérive à deux entrées appliquée au robot mobile Hilare 2 muni d'une remorque à attache déportée derrière l'axe des roues du robot.

problème en présence d'obstacles. En effet, si le premier problème se réduit à la construction d'une courbe avec des contraintes différentielles aux bornes [Rouchon 1993], aucune solution n'existait qui rende compte de la commandabilité locale des systèmes différentiellement linéarisables à deux entrées. Notre principale contribution dans ce domaine consista à développer une telle méthode locale fondée sur la combinaison convexe de courbes canoniques associées respectivement aux configurations initiale et finale [10]. La méthode que nous avons proposée s'étend à tous les systèmes différentiellement linéarisables à deux entrées et sans dérive. La figure 2.6 en propose une brève explication. La figure 2.7 montre des exemples de chemins locaux produits par cette méthode locale.

Nous entreprîmes ensuite d'intégrer cette méthode locale dans deux schémas différents de planification de mouvements en présence d'obstacles : la méthode par approximation et la méthode de développement d'arbres par visibilité [Siméon 2000] implantée dans la plate-forme de planification de mouvements Move3D, dont nous reparlerons dans la suite de ce mémoire.

2.5.2 Commande en boucle fermée

Les outils logiciels développés grâce aux travaux décrits dans les paragraphes précédents nous permettaient de planifier des trajectoires pour divers systèmes non holonomes. Pour illustrer ces travaux, nous décidâmes d'équi-

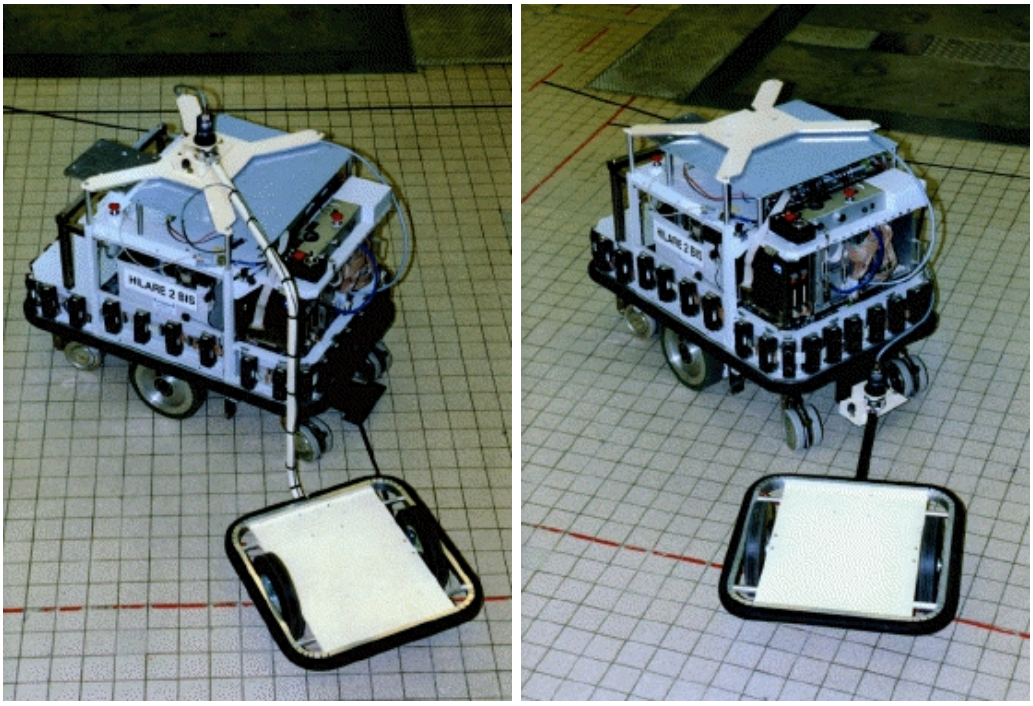


FIG. 2.8 – Le robot mobile Hilare 2 équipé d'une remorque avec deux cinématiques différentes. A gauche, la remorque est attachée au dessus de l'axe des roues du robot. A droite, elle est attachée derrière.

per le robot mobile Hilare 2 de type unicycle d'une remorque avec deux types différents de cinématique comme représenté par la figure 2.8, afin d'exécuter les mouvements ainsi planifiés. Se posa alors logiquement le problème de l'asservissement des deux systèmes considérés autour d'une trajectoire planifiée. De nombreuses solutions avaient également été proposées pour résoudre ce problème dans le cas d'un unicycle [Kanayama 1990, Samson 1991] sans remorque ou bien pour des systèmes chaînés [Samson 1995] ou encore pour des systèmes plats [Fliess 1995*a*]. Notre contribution ici fut de proposer deux lois de commande par retour d'état stabilisant permettant d'exécuter les mouvements en restant très proche des trajectoires planifiées pour nos robots [24].

A ce stade de nos travaux, nous disposions d'un dispositif expérimental permettant de planifier puis d'exécuter des mouvements dans un environnement réel d'intérieur. Le plan de l'environnement constitué de segments de droite permettait de planifier des mouvements sans collision et les méthodes de suivi de trajectoire permettaient de corriger les écarts du robot à sa trajectoire planifiée lors de l'exécution du mouvement. La mesure de la position du robot pendant son mouvement était assurée par des roues odométriques

montées sur l'axe des roues motrices du robot d'une part et par un capteur d'angle monté sur l'articulation entre le robot et la remorque d'autre part. Il est bien connu que les capteurs odométriques procurent une bonne précision pour des déplacements de faible amplitude mais sont insuffisants pour des mouvements plus longs. En d'autres termes, notre système expérimental se révéla efficace pour planifier et exécuter des manoeuvres dans la salle de robotique du laboratoire mais fut incapable de s'aventurer dans les couloirs. L'imprécision grandissante de la localisation rendait la collision inévitable. Une autre source d'échec de notre démonstration résidait dans l'incapacité de certains de mes collègues à fermer les portes des armoires entreposées dans la salle d'expérimentation. Ces obstacles, absents du plan de l'environnement modélisé pour la phase de planification, provoquaient invariablement une collision lors de l'exécution du mouvement.

2.5.3 Optimisation de trajectoires et réactivité

Pour corriger les carences de notre système expérimental préliminaire, il faut avoir trois choses à l'esprit. La première est que planifier une trajectoire sans collision pour un système non holonome en présence d'obstacles est une opération coûteuse en temps de calcul. La deuxième est que l'on dispose rarement d'une localisation précise avec une fréquence suffisamment élevée pour réaliser un asservissement précis. La troisième enfin est que le plan de l'environnement utilisé pour planifier les mouvements peut être entaché d'imprécisions ou omettre des obstacles absents au moment de la construction de ce plan, à l'exemple des portes d'armoire ouvertes. Les deux derniers points se traduisent par une conséquence commune. Dans le référentiel du robot, les obstacles du plan ne se trouvent pas exactement là où ils le devraient et des obstacles supplémentaires peuvent être présents. Dans les deux cas, la trajectoire planifiée, exprimée dans le référentiel du robot peut se trouver en collision. Il fut donc nécessaire de doter notre robot de capteurs permettant de détecter ces obstacles, au moins pour stopper le mouvement avant qu'une collision ne se produise. Pour éliminer les collisions détectées, la solution apparemment la plus simple eût consisté à relocaliser le robot par rapport à des amers de l'environnement puis à intégrer les obstacles imprévus dans le plan de l'environnement avant de replanifier une trajectoire. Les méthodes de planification de trajectoires que nous utilisions à ce moment-là, et que nous continuons à utiliser aujourd'hui, sont cependant très mal adaptées à l'introduction d'obstacles nouveaux dans leur modèle. En effet, leur efficacité dans des environnements constitués de très nombreux obstacles repose sur l'initialisation au démarrage de nombreuses structures de données dépendant de l'environnement. La remise en cause de cet environnement implique donc

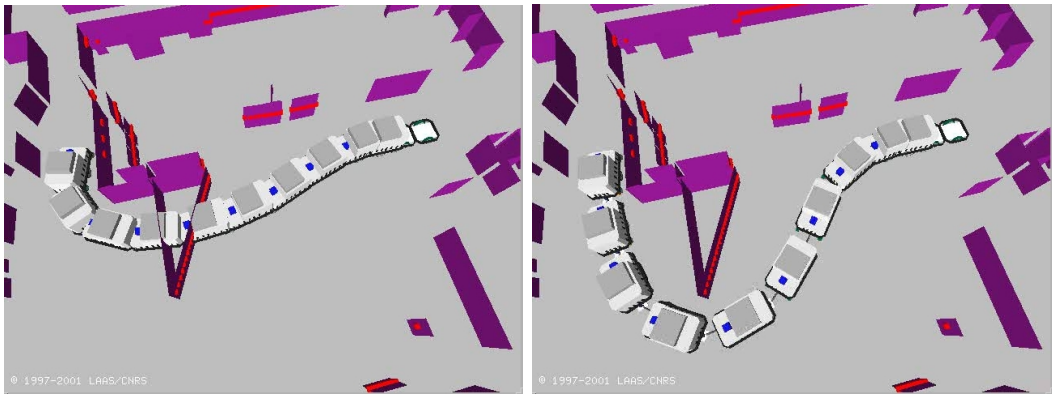


FIG. 2.9 – Exemple de déformation d'une trajectoire planifiée pour le système Hilare 2 muni d'une remorque pour éviter un obstacle absent de sa carte. Le robot se trouve en haut à droite, à l'origine de la trajectoire.

de lourds calculs.

La problématique de l'évitement réactif d'obstacles a intéressé de nombreux chercheurs ces dernières années. Différentes approches furent proposées pour différents types de systèmes et d'applications. [Large 2002] décrit une méthode d'évitement d'obstacles pour une voiture dans un environnement comprenant des obstacles mobiles. [Quinlan 1993] propose une méthode de déformation de trajectoire fondée sur des potentiels répulsifs engendrés par les obstacles. Cette méthode, relativement simple ne s'applique cependant qu'à des systèmes sans contrainte cinématique avec une extension à une cinématique de type unicycle [Khatib 1997]. La méthode que nous avons proposée s'applique à n'importe quel type de système. Elle permet de traiter des systèmes à cinématique et à géométrie complexes.

Le principe de notre méthode repose sur l'optimisation d'une fonctionelle sur l'espace des trajectoires du système. Cette fonctionnelle décroît lorsque la trajectoire s'éloigne des obstacles et croît lorsqu'elle s'en approche. La trajectoire est ainsi déformée en perturbant les entrées de la trajectoire courante sur un intervalle dit intervalle de déformation. La perturbation des entrées de la trajectoire assure une décroissance au premier ordre de la fonctionelle d'une part et l'invariance de la trajectoire aux bornes de l'intervalle de déformation d'autre part. Un mécanisme de régulation permet en outre de maîtriser les vitesses dans les directions interdites du système afin de respecter les contraintes non holonomes. Les détails techniques de la méthode sont exposés dans [1, 6]. La figure 2.9 montre un exemple de trajectoire déformée pour le robot Hilare 2 muni de sa remorque.

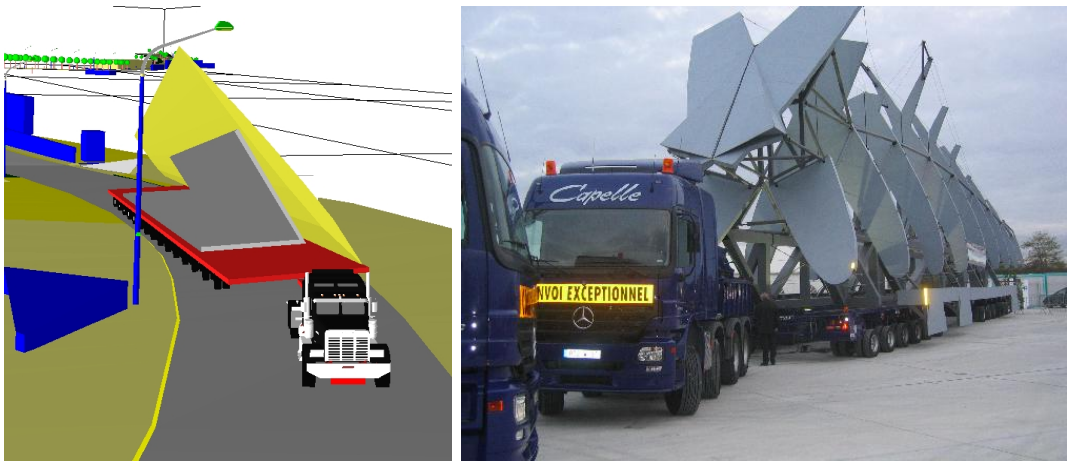


FIG. 2.10 – Modèle du convoi transportant l'aile de l'Airbus A 380 dans le village de Gimont (à gauche). Maquette grandeur nature pour la validation de l'itinéraire (droite)

Application : Mission Grand Itinéraire

La méthode de déformation de trajectoires décrite ci-dessus, initialement développée pour nos robots mobiles a rapidement trouvé une autre application que nous n'avions pas imaginée d'abord mais qui se révéla possible du fait du souci de généricité qui caractérise la plus grande partie de mes travaux et qui avait présidé aux choix scientifiques et techniques tout au long de la phase de conception puis de développement. Un problème nous fut soumis par la Direction Régionale de l'Equipement Midi-Pyrénées dans le cadre de la mission Grand Itinéraire.

Le problème consistait à valider l'itinéraire des convois transportant les composants du futur gros porteur Airbus A 380 à travers les petites routes de campagne. De nombreux villages avaient été déviés, mais quelques-uns devaient être traversés par les convois. La taille exceptionnelle des charges, 13 mètres de haut, 8 mètres de large et 40 mètres de long rendait le transport encore plus exceptionnel que les transports exceptionnels classiques. La Direction Régionale de l'Equipement, en charge de l'aménagement des infrastructures, avait pour mission de déterminer les passages délicats et éventuellement de prévoir des aménagements afin de rendre possible le passage des convois. Le problème de validation est en fait un problème de planification de mouvements. Les convois, constitués de tracteurs et de remorques, entrent dans la catégorie des systèmes non holonomes. Pour cette raison, la Direction Régionale de l'Equipement fit appel à notre expertise.

Des modèles tri-dimensionnels de deux villages posant problèmes furent

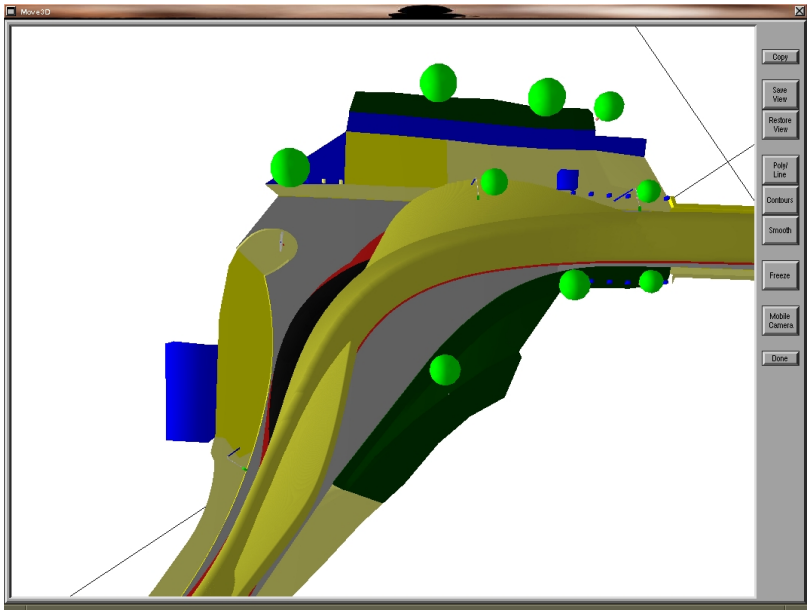


FIG. 2.11 – Exemple d'une trajectoire optimisée (traversée de Gimont, Gers) pour un véhicule à cinématique complexe transportant une aile de l'A380. L'image montre l'espace balayé par les différents éléments du véhicule.

construits par des géomètres sur le terrain, tandis que les modèles géométriques et cinématiques des convois nous furent fournis par Capelle, le transporteur choisi par Airbus. Le problème étant un problème de planification de mouvements, il semblait naturel de le résoudre en utilisant les techniques de planification de mouvements pour systèmes non holonomes pour lesquels, nous avions beaucoup contribué par nos travaux passés. Deux obstacles s'opposaient cependant à cette démarche logique. Le premier était que la cinématique des convois ne jouissait d'aucune propriété intéressante du point de vue de l'automatique : ni platitude différentielle, ni rien. Le second résidait dans les piètres performances des méthodes de planification de mouvements pour des problèmes où le système doit traverser des passages étroits. Or faire rouler un camion sur une route consiste typiquement à chercher un chemin dans un long passage étroit dans l'espace des configurations. Bien sûr, nous eussions pu développer des heuristiques spécifiques à ce type de problème. Nous préférâmes le transformer en un problème d'optimisation. Pour cela, nous développâmes un petit simulateur de conduite afin de produire une trajectoire initiale sur la route, comportant éventuellement des collisions. Ensuite, nous intégrâmes notre méthode de déformation de trajectoires dans la plate-forme logicielle KineoWorks de Kineo CAM, partenaire du projet. Le logiciel ainsi obtenu permettait d'optimiser la distance des convois aux obstacles et de



FIG. 2.12 – Le robot mobile Hilare 2 bis muni du bras GT6A.

tester différentes hypothèses d'aménagement dans les villages concernés. Cet outil permit à Kineo CAM de mener les études commandées par la Direction Régionale de l'Equipement. La figure 2.10 montre le modèle numérique du convoi transportant l'aile ainsi que la maquette physique. La figure 2.11 montre l'espace balayé par ce convoi dans une courbe de Gimont.

2.5.4 Manipulation mobile

Dans le cadre d'un projet Robea, j'encadre les travaux d'intégration d'un étudiant en thèse à l'ENI de Tarbes. Son sujet consiste à amener un robot mobile muni d'un bras manipulateur en contact avec un mur puis de suivre le mur en gardant le contact. L'intégration s'effectue sur la plate-forme expérimentale Hilare 2 bis muni d'un bras GT6A (Figure 2.12).

2.6 Intégration

Tous les travaux de recherche que je viens de décrire jusqu'à présent sont guidés par le fil conducteur commun de l'intégration. L'intégration permet de valider non seulement chaque composant du système, mais également l'architecture qui les organise. L'un des grands défis de l'avenir pour la recherche en robotique réside dans la conception de systèmes complexes. Les problèmes liés à la complexité des systèmes doués d'un certain degré d'autonomie sont

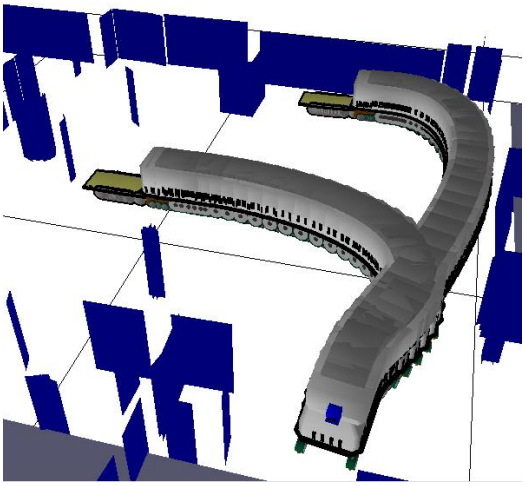


FIG. 2.13 – Exemple de trajectoire planifiée par Move3D dans le modèle de la salle de robotique du LAAS.

cependant difficiles à formaliser et sont relativement peu abordés dans la communauté robotique mondiale.

L'intégration, en ce qui me concerne, se manifeste dans deux réalisations principales. La première est la plate-forme logicielle Move3D. La seconde est le démonstrateur Hilare 2 muni de sa remorque. Une troisième intégration à bord du Cycab de l'INRIA Rhône-Alpes permet de montrer la généricité de l'approche de déformation de trajectoires.

2.6.1 La plate-forme logicielle Move3D

Move3D est un logiciel générique de planification de mouvements [Siméon 2000]. Le qualificatif "générique" en fait sa principale particularité. Il peut en effet planifier des mouvements pour n'importe quel type de système articulé dans n'importe quel environnement, et peut prendre en compte certaines contraintes cinématiques. L'environnement et la chaîne cinématique constituant le robot sont spécifiés en entrée, tandis que les contraintes cinématiques sont prises en compte au niveau des méthodes locales. Dans la version initiale de Move3D, développée sous la direction de Thierry Siméon, seules trois méthodes locales étaient implantées. Les seuls systèmes non holonomes pouvant être pris en compte étaient les robots à deux roues motrices de type unicycle comme Hilare 2. J'envisageai donc d'intégrer la méthode locale décrite dans la partie 2.5.1 dans Move3D. L'architecture logicielle et le choix des structures de données représentant des chemins locaux ne permettaient

cependant pas de prendre en compte la cinématique du robot Hilare 2 muni de sa remorque. J'entrepris alors en collaboration avec Thierry Siméon de réorganiser l'architecture logicielle en représentant les chemins locaux par une structure orientée objet. En effet, les chemins locaux sont des trajectoires dans l'espace des configurations d'un système et constituent les arêtes des graphes construits par les algorithmes de planification implantés dans Move3D, mais ces structures de données sont polymorphes et dépendent du système considéré. Des méthodes (au sens programmation objet) différentes sont ainsi associées à chaque type de chemin local mais sont appelées indifféremment par les algorithmes de planification de mouvements. Ainsi, par exemple, la fonction qui permet de calculer la configuration $\mathbf{q}(s)$ correspondant à une valeur du paramètre s le long d'un chemin local est différente s'il s'agit d'un chemin local linéaire ou d'un chemin local issu de la méthode décrite dans la partie 2.5.1. Cette différence est cependant invisible au niveau des algorithmes de planification de mouvements.

Cette réécriture ouvrit la voie à de nombreuses applications qui vont aujourd'hui de l'animation graphique de personnages virtuels à la planification de mouvements pour plusieurs robots et contribua à rendre le logiciel Move3D industrialisable car adaptable à différents domaines d'applications industrielles.

La figure 2.13 montre un exemple de trajectoire planifiée par Move3D en utilisant la méthode locale décrite dans la partie 2.5.1.

2.6.2 Le démonstrateur Hilare 2 muni de sa remorque

Les travaux de planification et contrôle réactif de mouvements décrits dans les parties précédentes sont aujourd'hui intégrés dans un démonstrateur : le robot Hilare 2 muni de sa remorque (Figure 2.4).

Ce démonstrateur en est encore a un stade primitif quant à son autonomie de mouvement. Il est pourtant frappant de constater l'écart entre le caractère primitif et la complexité algorithmique de ce démonstrateur. La Figure 2.14 montre l'organisation des différents modules fonctionnels dont chacun est composé de plusieurs milliers de lignes de code.

2.6.3 Environnement de simulation

La lourdeur d'utilisation du démonstrateur Hilare 2 muni de sa remorque, due pour une part à sa complexité informatique et pour une autre part à l'utilisation du système d'exploitation temps-réel VxWorks rend difficile le test de chaque composant lorsqu'une amélioration est apportée. Pour cette raison, en parallèle du démonstrateur ont été développés des composants de simulation.

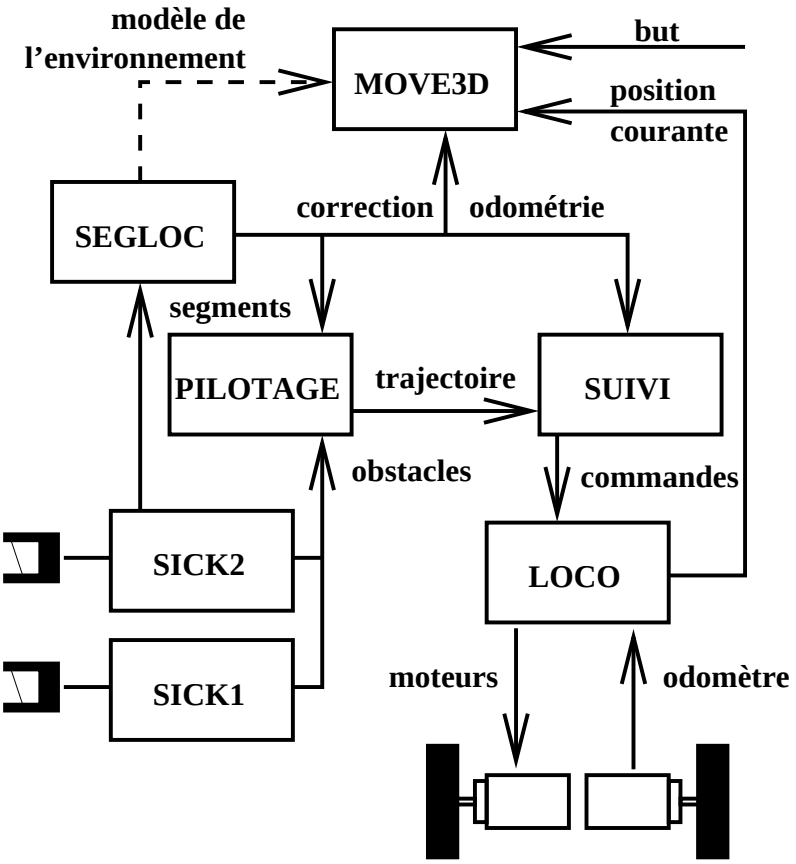


FIG. 2.14 – Architecture de notre démonstrateur Hilare 2 muni de sa remorque. Le module **LOCO** assure en temps réel l'asservissement en position du système sur la base de la position estimée par l'odométrie et d'une consigne en position et vitesse fournie par le module **SUIVI**. Ce dernier commande la vitesse de parcours de la trajectoire courante en fonction des collisions détectées pendant le mouvement. Il ralentit le parcours lorsque la première collision sur la trajectoire est proche de la position courante et accélère dans le cas contraire. Le module **PILOTAGE** déforme la trajectoire courante en fonction des obstacles perçus. Les modules **SICK1** et **SICK2** permettent de détecter les obstacles. Ils assurent également la segmentation des données sous forme de segments de droite. Le module **SEGLOC** assure la localisation du robot dans une carte globale constituée de segments de droite. Enfin, Move3D permet de planifier des trajectoires sans collisions dans la carte de l'environnement produite par **SEGLOC**.

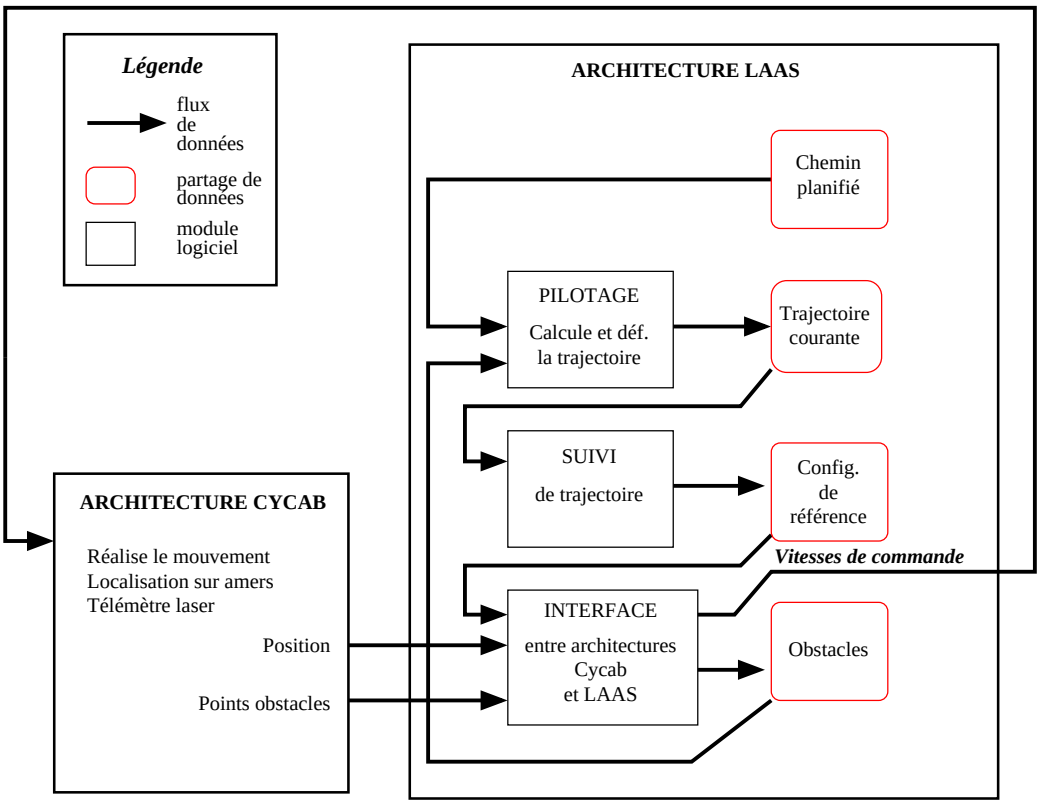


FIG. 2.15 – Architecture des fonctions d'évitement local d'obstacles intégrées sur le robot Cycab de l'INRIA Rhône-Alpes. Les modules de pilotage et de suivi sont les principaux composants de la méthode de déformation de trajectoire. Un module d'interface permet de réaliser la connexion entre l'architecture LAAS et l'architecture du Cycab.

Ces composants logiciels ont été développés par de nombreuses personnes qui se sont succédé au LAAS. J'ai assuré l'organisation et la coordination de ces développements.

2.6.4 Intégration à bord d'un robot distant : le Cycab

Dans le cadre du projet Robea ParkNav, la méthode d'évitement réactif d'obstacles a été intégrée à bord du Cycab de l'INRIA Rhône-Alpes. Cette application a permis de démontrer outre la généricité de la méthode, l'utilité et la pertinence des outils de simulation décrits précédemment. En effet, l'expérimentation sur plate-forme nécessite un effort de développement spécifique pour adapter à un second robot le code développé pour un premier robot. Bien que d'un faible niveau scientifique, ce travail est en général coûteux

en temps. Si le second robot est sur un site distant, l'adaptation peut donc demander un long séjour d'une ou plusieurs personnes sur le site distant.

Pour réaliser le portage de nos algorithmes de déformation de trajectoire pour systèmes non holonomes, nous adoptâmes donc une stratégie différente qui nous permit d'économiser beaucoup de temps et de déplacements inutiles. Dans un premier temps, Cédric Pradalier, un étudiant de l'INRIA Rhônes-Alpes vint au LAAS avec des logiciels de simulation du robot Cycab. Il y resta trois jours pendant lesquels il installa ses logiciels de simulation sur les ordinateurs du LAAS et en transféra la maîtrise à Olivier Lefebvre, un étudiant du LAAS. Ce dernier put ainsi développer pendant trois semaines des interfaces permettant de connecter informatiquement les logiciels de simulation du Cycab avec la méthode de déformation de trajectoires. Il en résulta un environnement de simulation du robot Cycab muni des algorithmes d'évitement réactif d'obstacles, dont l'architecture est représentée sur la figure 2.15. Dans un troisième temps, après avoir testé les différentes connexions, Olivier Lefebvre se rendit à Grenoble où il put en trois jours installer les algorithmes sur le Cycab et réaliser les premiers tests. La figure 2.18 montre un exemple de mouvement d'évitement d'un obstacle pour ce robot.

2.6.5 Résultats expérimentaux

Le démonstrateur brièvement décrit précédemment nous a permis de collecter un grand nombre de données expérimentales pendant les nombreuses heures de fonctionnement. Il serait fastidieux de les développer ici. Aussi, je me limiterai à montrer le résultat de quelques mouvements pendant lesquels le robot a évité des obstacles non modélisés dans son plan.

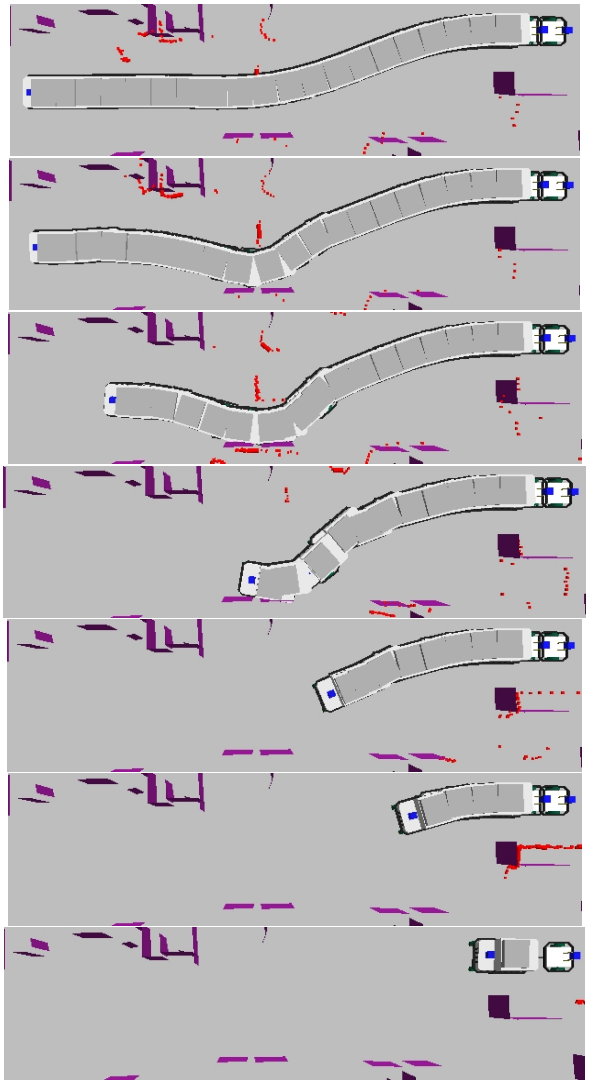


FIG. 2.16 – Cette bande dessinée montre comment le robot mobile Hilare 2 muni de sa remorque évite un obstacle rendant sa trajectoire initiale en collision. Les points clairs sont les obstacles détectés par le télémètre laser à balayage monté sur la remorque. Au début, le robot est à gauche. Ensuite, il déforme sa trajectoire et progresse dessus au fur et à mesure que la première collision s'éloigne.

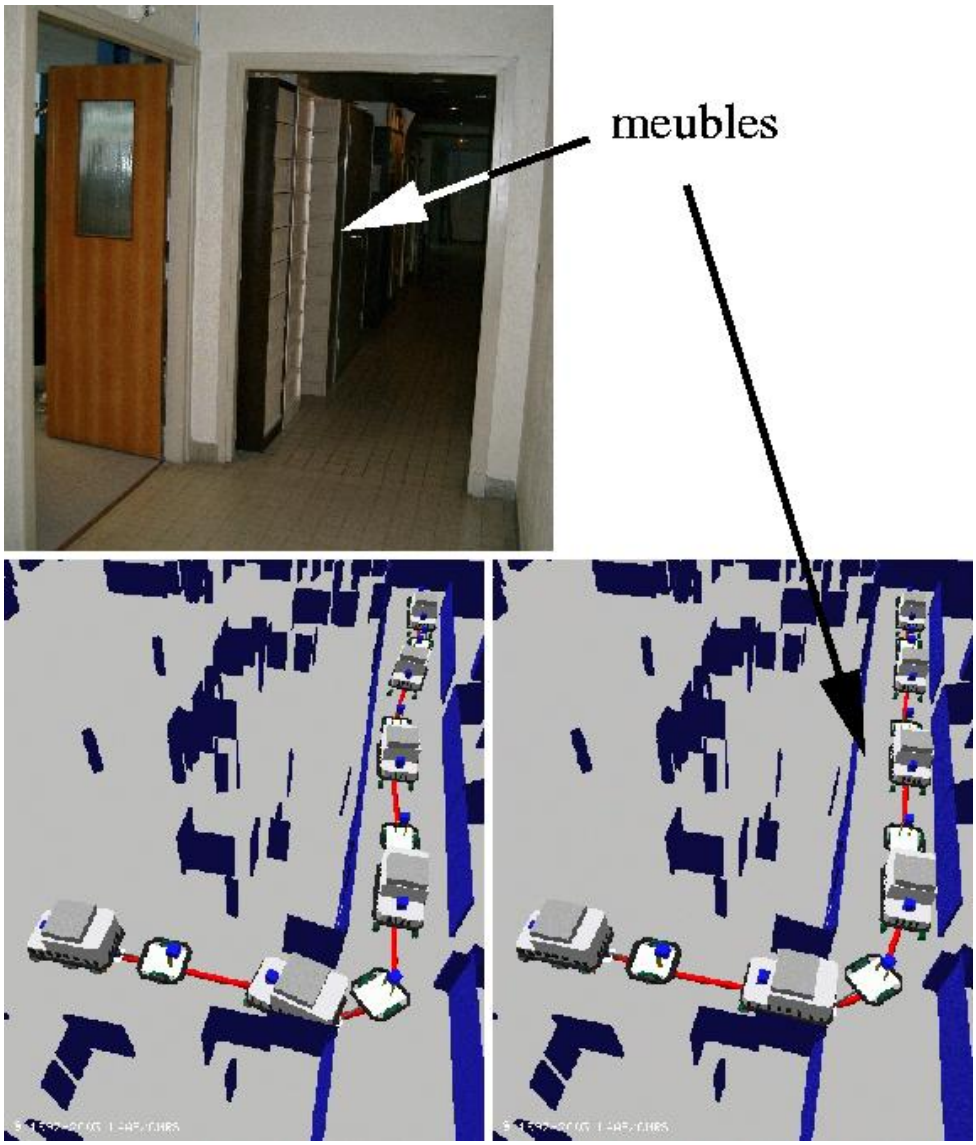


FIG. 2.17 – Cet exemple illustre un cas typique de fonctionnement de la méthode de déformation de trajectoire. La figure en bas à gauche montre une trajectoire planifiée par Move3D dans les couloir du LAAS, sur la base d'un plan de l'environnement construit au printemps 2003. Durant l'été 2003, des travaux de rénovation de la salle de robotique nous obligèrent à stocker temporairement des meubles dans les couloirs, comme le montre la photographie en haut. La trajectoire planifiée après les travaux mais dans un plan obsolète était donc en collision. L'image en bas à droite montre la trajectoire exécutée par le robot après déformation et évitement des obstacles absents du plan.

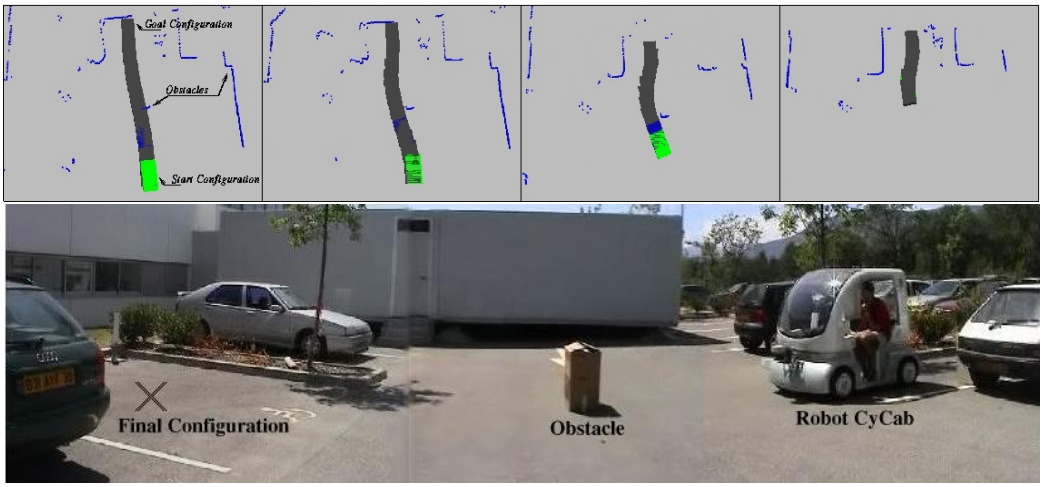


FIG. 2.18 – Cette figure montre les premiers tests d'évitement réactif d'obstacles par le Cycab à Grenoble sur le site de l'INRIA Rhône-Alpes. La trajectoire initiale est en collision avec l'obstacle au milieu de l'image du bas. Après déformation, le Cycab rejoint sa configuration finale en évitant l'obstacle.

2.7 Travaux prospectifs

Depuis deux ans, je travaille avec Michel Taïx et un doctorant sur la planification de primitives d'asservissement sur des amers de l'environnement. L'objectif de ce travail est de prendre en compte les contraintes de localisation dès la phase de planification. Le principe fondamental consiste à produire une séquence de paires amer-capteur pondérées par des coefficients réels positifs le long de la trajectoire planifiée. Les coefficients représentent l'importance de chaque paire amer-capteur dans le processus de localisation lors du mouvement et varient le long de la trajectoire. Les mouvements sont ainsi décrits localement par rapport à des amers plutôt que dans un repère global. Les amers sont choisis en fonction de leur qualité propre d'une part, par exemple, un long mur droit permet de se localiser précisément dans une direction à l'aide d'un télémètre laser, et du danger qu'ils représentent lors de l'exécution du mouvement d'autre part. Ainsi, pour franchir une porte, il vaut mieux se localiser sur les montants de la porte pour bien passer au milieu. Les premiers résultats de ce travail prospectif sont exposés dans [13].

Références

[Barraquand 1991] J. Barraquand and J.-C. Latombe. *Robot Motion Planning : A Distributed Representation Approach* International Journal of Robotics Research, vol. 10, n° 6, pp 628–649, June 1991.

[Fliess 1995] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon *Flatness and defect of non-linear systems : introductory theory and examples* International Journal of Control, vol 61, n° 6, pp 1327–1361, 1995.

[Fliess 1995*a*] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon *Design of Trajectory Stabilizing Feedback for Driftless Flat Systems* European Control Conference, Rome, pp 1882–1887, Septembre 1995.

[Hsu 1999] D. Hsu, J.-C. Latombe et R. Motwani *Path Planning in Expansive Configuration Spaces* International Journal of Computational Geometry and Applications, vol 9 n° (4–5), pp 495–512, 1999.

[Kanayama 1990] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki et T. Nogushi *A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 384–289, Cincinnati, Ohio, 1990.

[Kavraki 1996] L. E. Kavraki, P. Švestka, J.-C. Latombe et M. Overmars *Probabilistic Roadmaps for Fast Path Planning in High Dimensional Configuration Spaces* IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol 12, n° 4, pp 566–580, 1996.

[Khatib 1997] M. Khatib and H. Jaouni and R. Chatila and J.-P. Laumond *Dynamic path modification for car-like nonholonomic mobile robots* IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, pp 2920–2925, avril 1997.

[Kuffner 2000] J. Kuffner et S. LaValle *RRT-Connect : An Efficient Approach to Single-Query Path Planning* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 473–479, San Francisco, avril 2000

[Large 2002] F. Large, S. Sekhavat, Z. Shiller et C. Laugier *Toward Real-Time Global Motion Planning in a Dynamic Environment Using the NLVO Concept* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, pp 607–612, octobre 2002.

[Laumond 1994] J.P. Laumond, P.E. Jacobs, M. Taix, and R.M. Murray *A Motion Planner for Nonholonomic Mobile Robots* IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol 10, pp 577–593, 1994.

[Quinlan 1993] S. Quinlan et O. Khatib *Elastic Bands : Connecting Path Planning and Control* IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, pp 802–807, mai 1993.

[Rouchon 1993] P. Rouchon, M. Fliess, J. Lévine et P. Martin *Flatness and Motion Planning : the Car with n trailers* European Control Conference, Gronigen Pays-Bas, pp 1518–1522, Juin 1993.

[Rouchon 1994] P. Rouchon *Necessary Condition and Genericity of Dynamic Feedback linearization* Journal of Mathematical Systems, Estimation, and Control, vol 4, n° 2, 1994.

[Samson 1991] C. Samson et K. Ait-Abderrahim *Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Cart in Cartesian Space* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 1136–1141, Sacramento, California, 1991.

[Samson 1995] C. Samson *Control of Chained Systems. Application to Path Following and Time-Varying Point-Stabilization* IEEE Transaction on Automatic Control, vol 40, n° 1, pp 64–77, Janvier 1995.

[Sekhavat 1998] S. Sekhavat and J.P. Laumond *Topological Property for Collision-Free Nonholonomic Motion Planning : the Case of Sinusoidal Inputs for Chained Form Systems* IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol 14, pp 671–680, 1998.

[Siméon 2000] T. Simeon, J.-P. Laumond and C. Nissoux *Visibility-Based Probabilistic Roadmaps for Motion Planning* Journal of Advanced Robotics, vol 14, n° 6, pp 477–494, 2000.

III

Publications

Chapitres de livre

[1] F. Lamiraux, D. Bonnafous et C. Van Geem, Path optimization for nonholonomic Systems : Application to reactive obstacle avoidance and path planning", Control Problems in Robotics. Springer tracts in advanced robotics. A. Bicchi, H. Christensen and D. Prattichizzo Eds. Springer 2002.

[2] J.P. Laumond, F. Lamiraux et S. Sekhavat, "Planification de mouvements pour robots mobiles non holonomes", La robotique mobile. Systèmes automatisés. Ed. J.P. Laumond. Hermes Sciences, 2002.

[3] K. Böhringer, B. Donald, L. Kavraki et F. Lamiraux, "A Distributed Universal Device for Planar Part Feeding : Unique Part Orientation in Programmable Force Fields", Distributed Manipulation. Kluwer Academic Publishers. Eds K. F. Böhringer, H. Choset, 2001.

[4] J.P. Laumond, S. Sekhavat et F. Lamiraux, "Guidelines in nonholonomic motion planning for mobile robots", Robot Motion Planning and Control. Lectures Notes in Control and Information Sciences 229. Ed. J.P. Laumond. Springer, N°ISBN 3-540-76219-1, pp. 1–53, 1998.

Revues scientifiques à comité de lecture

[5] F. Lamiraux, J.-P. Laumond, C. VanGeem, D. Boutonnet et G. Raust "Trailer-Truck Trajectory Optimization for Airbus A380 Component Transportation", IEEE Robotics and Automation Magazine : numéro spécial Robotic Technologies Applied to Intelligent Transportation Systems, à paraître en 2005.

[6] F. Lamiraux, D. Bonnafous et O. Lefebvre, "Reactive Path Deformation for Nonholonomic Mobile Robots", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, à paraître en 2004.

[7] F. Lamiraux et J.P. Laumond, "Smooth Motion Planning for Car-Like Vehicles", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol 17, No 4, août 2001.

[8] F. Lamiraux et L. Kavraki, "Positioning of Symmetric and Non-Symmetric Parts Using Radial and Constant Fields : Computation of all Equilibrium Configurations", *International Journal of Robotics Research*, Vol 20, No 8, août 2001.

[9] F. Lamiraux et L. Kavraki, "Planning Paths for Elastic Objects", *International Journal of Robotics Research*, vol 20, N 3, pp 188–208, mars 2001.

[10] F. Lamiraux et J.P. Laumond, "Flatness and small-time controllability of multi-body mobile robots : application to motion planning", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol 45, No 10, pp 1878–1881, Octobre 2000.

[11] K. Böhringer, B. Donald, L. Kavraki et F. Lamiraux, "Part orientation in one or two stable equilibria using programmable vector fields", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, avril 2000.

[12] F. Lamiraux, S. Sekhavat et J.P. Laumond, "Motion planning and control for Hilare pulling a trailer", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol 15, No 4, pp 640–652, août 1999.

Congrès scientifiques à comité de lecture

[13] A. Malti, M. Taïx et F. Lamiraux "Sensor-landmark motion planning in mobile robots", à paraître dans *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotic Systems*, septembre 2004.

[14] D. Bonnafous, F. Lamiraux, "Sensor based trajectory following for nonholonomic systems in highly cluttered environment", *IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robotics Systems (IROS)*, Las Vegas, octobre 2003.

[15] B. Bayle, J.-Y. Fourquet, F. Lamiraux et M. Renaud, "Kinematic control of wheeled mobile manipulators", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2002)*, Lausanne (Suisse), 30 Septembre - 4 Octobre 2002, pp.1572-1577.

[16] F. Lamiraux et D. Bonnafous, "Reactive Trajectory Deformation for Nonholonomic Systems : Application to Mobile Robots", *IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp 3091–3104, Washington D.C., Mai 2002.

[17] T.Simeon, J.P.Laumond et F.Lamiraux, "Towards a software development kit for motion synthesis in virtual worlds", *7th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM'2001)*, Berkeley (USA), 25-27 Octobre 2001, pp.854-863.

[18] T.Simeon, J.P.Laumond et F.Lamiraux "Move3D : a generic platform for path planning", *IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP'2001)*, Fukuoka (Japon), 28-29 Mai 2001, pp.25-30.

[19] F. Lamiraux et J.P. Laumond, "Smooth motion planning for car-like vehicles", *6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, Venise, juillet 2000.

[20] F. Lamiraux et L. Kavraki, “Positioning and Orienting a Class of Symmetric Parts Using a Combination of a Unit-Radial and a Constant Force Fields”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, avril 2000.

[21] E. Anshelevich, S. Owens, F. Lamiraux et L. Kavraki, “Deformable Volumes in Path Planning Applications”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, avril 2000.

[22] F. Lamiraux et L. Kavraki, “Positioning symmetric and non-symmetric parts using radial and constant force fields”, *Algorithmic and Computational Robotics : New Directions*, B. Donald, K. Lynch, and D. Rus editors, AK Peters, Natick, MA., pp 37–49, 2000.

[23] F. Lamiraux et L. Kavraki, “Path planning for elastic plates under manipulation constraints”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit 1999.

[24] F.Lamiraux et J.P. Laumond, ”A practical approach to feedback control for a mobile robot with trailer”, *IEEE international Conference on Robotics and Automation*, Bruxelles 1998.

[25] L. Kavraki, F. Lamiraux et C. Holleman, ”Towards planning for elastic objects”, P. K. Agarwal, L. E. Kavraki et M. Mason editeurs, *Robotics : The Algorithmic Perspective*, A.K. Peters, pp 313–325, Houston 1998.

[26] F. Lamiraux et J.P. Laumond, ”From paths to trajectories for multi-body mobile robots”, *5th International Symposium on Experimental Robotics*, pp 237–245, Barcelone 1997.

[27] S. Sekhavat, F. Lamiraux, J.P. Laumond, G. Bauzil et A. Ferrand, “Motion planning and control for Hilare pulling a trailer : experimental issues”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque 1997.

[28] F. Lamiraux et J.P. Laumond, ”Flatness and small-time controllability of multi-body mobile robots : application to motion planning”, *4th European Control Conference*, Bruxelles 1997.

[29] F. Lamiraux et J.P. Laumond ”On the expected complexity of random path planning”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 3014–3019, Minneapolis, 1996.

Rapports de contrat

[30] F. Lamiraux, “Définition d’un système de guidage pour le convoi exceptionnel destiné à l’acheminement des pièces d’assemblage du fu-

tur A 380", *Rapport LAAS No02588*. Contrat LAAS-CNRS/DRE No 141266600, Décembre 2002.

[31] T. Simeon , J.-P. Laumond , C. Van Geem , J. Cortes , A. Sahbani , F. Lamiraux , M. Overmars , N. Mcphater , J.-L. Bouchet, "Second year deliverables of the MOLOG project", *Rapport LAAS No01207* Projet ESPRIT 4 LTR 28226 MOLOG, Février 2001, 149p.

Thèse

[32] F. Lamiraux, "Robots mobiles à remorque : de la planification de chemins à l'exécution de mouvements", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, septembre 1997.

IV
Activités liées à la recherche

Outre les développements et les publications rapportés dans les deux premiers chapitres de ce mémoire, mon activité de chercheur compte trois composantes qui donnent tout leur sens aux outils et méthodes décrits précédemment. La première est une activité de partenariat avec des acteurs industriels ou académiques.

4.1 Partenariat

Ces dernières années, je me suis efforcé de confronter mes travaux de recherche passés à la vision pragmatique de partenaires industriels. Pour cela, j'ai pris contact avec nombre d'entre eux, des PME aux grands groupes pour trouver des terrains de collaboration. Ces contacts commencent à porter leurs fruits et une thèse CIFRE doit commencer à la rentrée 2004 avec le groupe PSA, tandis que Renault Véhicules Industriels s'intéresse de près à nos fonctions de manoeuvres automatiques. Les termes d'une collaboration avec ces derniers sont en cours de définition.

Mission Grand Itinéraire

Dans le cadre de la mission "Grand-Itinéraire", la Direction Régionale de l'Équipement de Midi-Pyrénées signa avec le LAAS un contrat d'expertise sur les spécifications d'un système d'aide au pilotage des convois dans les villages présentant des difficultés. Le principal résultat de cette collaboration est un rapport [30].

4.1.1 Projets européens

Dans le cadre de mes activités en robotique au LAAS, je suis intervenu dans différents projets européens.

- Projet ESPRIT 3 BRA **PROMotion** (1992–1995).
  Ce projet a réuni plusieurs groupes de recherche dans les domaines de la robotique (LAAS, Institut de Cybernétique de Barcelone), de la géométrie algorithmique (INRIA Sophia-Antipolis, Université d'Utrecht), des mathématiques (ENS Paris) et de la théorie de la commande (Université de la Sapienza de Rome) sur le thème de la planification de mouvement en robotique.
- Projet ESPRIT 4 **MOLOG** (1999–2002).
  L'objectif du projet MOLOG (MOtion for LOGistics) était d'adapter les techniques issues des travaux sur l'algorithmique du mouvement en robotique à un contexte de logistique industrielle. Dans ce contexte, il

s'agissait d'automatiser les études de faisabilité d'opérations de maintenance dans des installations industrielles complexes, telles que les transports de charges lourdes ou l'acheminement de matériel par divers engins de manutention. Le projet regroupait deux partenaires industriels (Cadcentre UK et EDF) et deux partenaires académiques (LAAS et l'Université d'Utrecht).

– Projet IST-2001-39250 **MOVIE** (2002–2005) L'objectif de ce projet est de développer des techniques de planification de mouvement capables de calculer en temps réel des mouvements visuellement réalistes pour plusieurs entités autonomes navigant dans des environnements virtuels complexes. Les partenaires de ce projet sont le LAAS, l'Université d'Utrecht, l'Université de Tel-Aviv et Kineo CAM.

Projets nationaux

– Projet Robea **Manipulation mobile non holonome** (2001–2004)
L'objectif de ce projet est d'appliquer au problème de la manipulation mobile non holonome des techniques de commande non linéaire telles que les fonctions transverses ou le formalisme des fonctions de tâches. Les partenaires en sont le LAAS, l'INRIA Sophia Antipolis, l'ENI de Tarbes et le LSIIT de Strasbourg.

– Projet Robea **Parknav** (2002–2005)
L'objectif de ce projet est de développer des techniques d'évitement dynamique d'obstacles pour des robots non holonomes fondées sur la détection des obstacles par vision. Les partenaires du projet sont le LAAS, l'INRIA Rhône-Alpes et l'IRISA de Rennes.

4.2 Valorisation

Kineo CAM

La valorisation occupe également une part importante de mes activités. Dès 2000, je fus impliqué dans la création de la société Kineo CAM avec trois de mes collègues chercheurs du LAAS : Jean-Paul Laumond, Thierry Siméon et Malik Ghallab, dans le cadre des modalités de l'article 25.2 de la loi sur l'innovation. Mon premier travail dans ce cadre fut de repenser en collaboration avec mes partenaires la structure du logiciel Move3D dont la valorisation est la raison d'être première de Kineo CAM. Cette refonte permit au logiciel d'être plus modulaire et de pouvoir s'adapter à une plus grande diversité d'applications.

Grand Itinéraire

Outre le rapport mentionné précédemment, la mission "Grand Itinéraire" a également donné lieu à un transfert de logiciel du LAAS vers Kineo CAM. Le problème dans cette deuxième opération consistait à valider l'itinéraire des convois à travers Gimont et Lévignac. Pour résoudre ce problème, j'adaptai la méthode de déformation réactive de trajectoire pour en faire une méthode d'optimisation locale de trajectoire. C'est cette version de la méthode qui fut ensuite transférée à Kineo CAM afin de mener les études de faisabilité de l'itinéraire.

4.3 Enseignement et diffusion

Mes activités d'enseignement et de diffusion scientifique se décomposent en plusieurs opérations :

- d'une part, je dispense des cours de robotique à l'École Normale Supérieure de Paris depuis plusieurs années,
- ensuite, je prends activement part aux journées portes ouvertes du LAAS dans le cadre des journées "Science en fête",
- pendant le SITEF 2002, un salon toulousain sur les technologies du futur, j'ai présenté pendant quatre jours au public la démonstration "Hilare-remorque" devant un public professionnel et devant le grand public,
- enfin, j'ai réorganisé le site web du groupe robotique et intelligence artificielle dans lequel je présente mes travaux ainsi que les travaux de ceux de mes collègues qui veulent bien me fournir de la matière : `http ://www.laas.fr/RIA`.

4.4 Encadrement

Depuis que je suis au LAAS, j'ai encadré trois thèses :

1. David Bonnafous qui a soutenu en décembre 2003,
2. Abed Malti, co-encadré avec Michel Taïx, actuellement en deuxième année,
3. Olivier Lefebvre, actuellement en première année,

J'interviens en support technique à Vincent Padois, un doctorant de l'ENI de Tarbes dans le cadre du projet Robea "Manipulation mobile non holonome".

J'ai également encadré ou co-encadré dix stagiaires DEA ou étudiants ingénieurs.

4.5 Animation scientifique

- Depuis début 2003, je suis membre du Conseil Scientifique du pôle Robotique et Systèmes Autonomes (ROSA) au sein du LAAS,
- depuis début 2002, je suis en charge de l'organisation des séminaires
  - du groupe Robotique et Intelligence Artificielle,
  - du pôle ROSA.

4.6 Collaborations

La plupart de mes travaux scientifiques sont menés dans le cadre de collaborations avec des partenaires français ou étrangers :

- Lydia Kavraki, Rice University, Houston, États-Unis,
- Bruce Donald, Dartmouth College, Hanover, États-Unis,
- Karl Böhringer, Washington University, Seattle, États-Unis,
- Christian Laugier, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble,
- Claude Samson, INRIA Sophia Antipolis,
- Jim Crowley, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble,
- Radu Horaud, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble,
- Javier Minguez, Université de Saragosse, Espagne.