



HAL
open science

Algorithmique du mouvement et planification de tâches en robotique

Thierry Simeon

► **To cite this version:**

Thierry Simeon. Algorithmique du mouvement et planification de tâches en robotique. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1999. tel-00131807

HAL Id: tel-00131807

<https://theses.hal.science/tel-00131807>

Submitted on 19 Feb 2007

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.

Habilitation à diriger des recherches

de l'Université Paul Sabatier de Toulouse

Spécialité : Robotique

présentée au

**Laboratoire d'Analyse et d'Architecture
des Systèmes du CNRS**

par

Thierry SIMEON

Docteur UPS

Chargé de Recherche au CNRS

**Algorithmique du mouvement et
planification de tâches en robotique**

Soutenue le 9 Juillet 1999 devant le jury:

G. Giralt	Directeur de recherche CNRS, Toulouse	Président
A. De Luca	Professeur, Rome	Rapporteur
C. Laugier	Directeur de recherche INRIA, Grenoble	Rapporteur
R. Paul	Professeur, Philadelphie	Rapporteur
M. Cayrol	Professeur, Toulouse	Examineur
M. Ghallab	Directeur de recherche CNRS, Toulouse	Examineur

Cette habilitation a été préparée au LAAS-CNRS
7 avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex 4 (France).
Rapport LAAS N° 99386

Table des matières

1	Synthèse des travaux de recherche	1
1	Algorithmique géométrique du mouvement	5
1.1	Méthodes de décomposition cellulaire	5
1.2	Méthodes “Bitmaps”	10
1.3	Méthodes probabilistes	12
2	Une approche géométrique de la manipulation	15
3	Planification de mouvements avec incertitude	17
3.1	Approche géométrique	18
3.2	Approche numérique	19
3.3	Expérimentations sur Hilare	21
4	Planification de mouvement sur terrain accidenté	23
4.1	Formalisation du problème	24
4.2	Algorithme de planification	25
4.3	Expérimentation sur ADAM	25
4.4	Extension à des châssis articulés	26
4.5	Robustesse des trajectoires	27
5	Plateformes logicielles	29
5.1	Move2D: Librairie pour le mouvement plan	29
5.2	Move3D: Librairie pour le mouvement dans l’espace	31
6	Conclusions et prospective de recherche	33
7	Bibliographie	35
2	Travaux et Publications	41

3 Projets et Contrats	49
1 Projets Européens	49
2 Contrats Industriels	50
3 Conventions de recherche	50

Synthèse des travaux de recherche

Introduction

Mes travaux de recherche s'inscrivent dans la problématique scientifique du groupe RIA qui porte sur l'étude et la conception de machines dotées de capacités de perception, d'action et de raisonnement, permettant de réaliser des tâches complexes dans des environnements évolutifs.

Une des particularités d'un système robotique est d'agir *par le mouvement* dans un monde physique. La capacité de planification automatique de ses mouvements est donc une composante importante de l'autonomie du système. Mon activité de recherche est principalement axée autour de cette composante.

Ce domaine de recherche, très actif durant les vingt dernières années, a reçu une formalisation rigoureuse suite aux travaux pionniers de Lozano-Perez qui introduisit en robotique le concept d'espace des configurations: le problème de planification de mouvement de corps dans l'espace est transformé en un problème de planification pour un point. De nombreuses approches ont par la suite été proposées pour la résolution de diverses instances de problèmes de planification, par des techniques visant à construire et explorer efficacement cet espace.

Dans sa version la plus simple, le problème est intrinsèquement difficile; sa complexité croît exponentiellement avec le nombre de degrés de liberté du (ou des) mobile(s). La plupart des problèmes de planification de mouvement résistent aux approches algorithmiques exactes. Il est nécessaire de concevoir des approches de

nature différente, permettant par exemple de calculer des solutions approchées ou basées sur des techniques d'exploration probabilistes. En satisfaisant une forme plus faible de complétude, ces méthodes sont capables de mieux répondre aux besoins des applications pratiques, en termes de robustesse et de performance.

La ligne forte qui se retrouve dans nos travaux a donc été de privilégier de telles méthodes effectives de planification, qui permettent par ailleurs de traiter des problèmes plus riches que la seule planification de mouvement et plus directement liés à la notion de tâches en robotique.

Le document est organisé de la façon suivante:

- Dans la première section, sont regroupées plusieurs de nos contributions à l'algorithmique géométrique du mouvement. On y trouvera des méthodes permettant de résoudre diverses variantes de problèmes de planification.
- La seconde section porte sur la planification de tâches de manipulation. La formulation géométrique que nous avons proposée, permet d'étendre le concept d'espace des configurations à la planification de tâches robotiques plus complexes, incluant des capacités de manipulation par le robot d'objets de son environnement.
- Les mouvements d'un robot s'effectuant dans un monde réel, la robustesse des mouvements planifiés est un aspect critique: il fait l'objet de la troisième section. Nos contributions sur ce thème sont parmi les rares à proposer dans un contexte de robotique mobile, des techniques de planification tenant compte des incertitudes de mouvement et intégrant des capacités de contrôle sensoriel.
- La quatrième section porte sur des techniques de planification pour des robots mobiles évoluant dans des environnements naturels, non structurés. Nos travaux sur cet axe de recherche ont conduit à des résultats originaux, et les algorithmes proposés permettent de traiter le cas de terrains fortement accidentés pour lesquels les approches classiques s'avèrent insuffisantes.

Notre activité sur ce thème s'est également traduite par une forte implication dans les projets de collaboration externes du groupe sur la robotique d'exploration planétaire (projets VAP/RISP et IARES) ainsi que dans le projet EDEN dont l'objectif scientifique est le développement, l'intégration et la mise en oeuvre de capacités de navigation autonome en environnement naturel.

- Les méthodes présentées ont toutes été implantées et testées en simulation, certaines l'ont été sur des robots réels. La cinquième section présente brièvement deux plateformes logicielles issues de ces travaux de recherche, développées afin d'intégrer les algorithmes de planification dédiés à la résolution de problèmes dans le plan ou dans l'espace.

- Enfin, la dernière section établit un rapide bilan de ces travaux et dresse quelques perspectives de recherche.

Dans chaque section, un certain nombre de références bibliographiques permettent de mieux situer nos travaux par rapport à l'état de l'art existant. Nos travaux (en chiffres gras) font référence à la liste des publications du chapitre 7.

1 Algorithmique géométrique du mouvement

1.1 Méthodes de décomposition cellulaire

Ce principe de résolution se retrouve à la base de nombreux algorithmes effectifs de planification proposés dans la littérature. Il consiste à décomposer les régions libres CS_{free} de l'espace des configurations en un ensemble de cellules et à représenter leurs relations d'adjacence dans un graphe, permettant ainsi de résoudre le problème, par nature continu, de calcul de trajectoire, par une recherche de chemin dans cette structure discrète construite de façon à capturer la topologie de CS_{free} .

L'avantage de ces méthodes est de conduire à des algorithmes qui possèdent une propriété de complétude (ou de ϵ -complétude suivant que la géométrie des cellules capture de manière exacte ou approchée les contraintes géométriques imposées par les obstacles). Leur principale limitation est la croissance exponentielle du nombre de cellules avec la dimension de CS qui limite leur applicabilité à des problèmes faiblement dimensionnés.

Dans cette section sont regroupées plusieurs de nos contributions qui ont utilisé cette approche pour résoudre des problèmes de planification divers (manipulateurs, robots mobiles non holonomes, coordination multi-robot), ceci de manière à illustrer différentes techniques permettant d'obtenir la décomposition suivant la nature des calculs géométriques mis en oeuvre:

- Dans certains cas simples, la décomposition peut être calculée de manière exacte (eg. [SS83, ABF88]): l'algorithme présenté dans la première section effectue une décomposition exacte *de la frontière* de CS_{free} pour le calcul de mouvements plans dans des environnements polyédriques. Ce type de problème se situe à notre connaissance parmi les cas les plus complexes pouvant être résolus par des approches purement géométriques.
- Dans les autres cas, l'espace libre doit être approximé par un ensemble de cellules de géométrie simple (eg. [Loz87, Fav86, Lau88][**31**]). La seconde section présente des résultats issus de nos travaux de thèse qui portaient sur des méthodes de décomposition approchée. Ces méthodes, de par la simplicité des calculs géométriques mis en oeuvre, conduisent à des algorithmes généraux, capables de résoudre en des temps raisonnables des problèmes à moins de cinq degrés de liberté.
- Les techniques de décomposition approchée peuvent également être adaptées à la spécificité de certains problèmes (eg. [BLP83, ZL91]). Le dernier paragraphe décrit deux contributions récentes dans lesquelles une décomposition spécifique est utilisée dans un contexte de robotique mobile pour *(i)* le calcul de chemins géométriques à faible coût non-holonyme et *(ii)* la coordination multi-robots.

1.1.1 Mouvements d'un polyèdre dans le plan

Dans le cas d'un mobile polygonal en translation et rotation parmi des obstacles polygonaux, les frontières des obstacles dans l'espace des configurations tri-dimensionnel (x, y, θ) sont des surfaces réglées engendrées par des droites parallèles au plan (x, y) . L'algorithme proposé par Avnaim et Boissonnat [ABF88] est l'un des rares algorithmes *exacts* proposés dans la littérature pour traiter ce cas, qui ait conduit à une implémentation effective. Il est basé sur la détermination des frontières de ces C-obstacles à partir de l'analyse des doubles contacts.

Les travaux présentés dans [24] portent sur l'extension de cet algorithme au calcul exact des placements admissibles d'un polyèdre évoluant dans un plan (ie. $CS = (x, y, \theta)$) parmi des obstacles polyédriques. L'intérêt de cette extension est de ne pas approximer les robots mobiles et les obstacles de l'environnement par les approximations polygonales résultant de leur projection au sol, et de tirer ainsi parti d'éventuelles concavités spatiales dans des espaces très contraints.

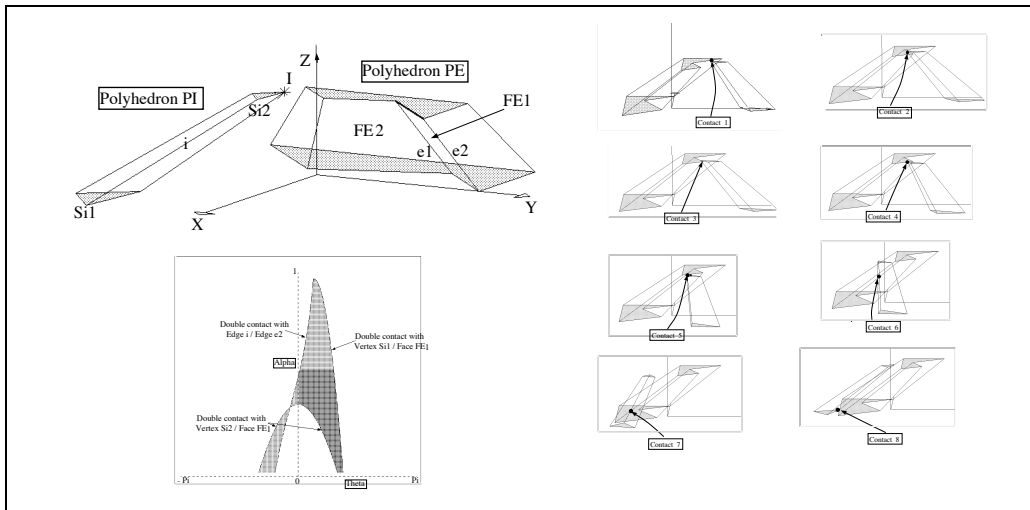


FIG. 1.1 – Courbes de double contact (gauche) et exemple de mouvement au contact (droite)

Le principe de cet algorithme est le suivant: chaque double contact est étudié relativement à l'un des simples contacts (de type sommet/face ou arête-arête) qui le composent. Un simple contact étant choisi comme référence, une courbe de double contact est obtenue en satisfaisant simultanément l'équation de référence ainsi que l'équation du second contact. L'ensemble de ces courbes est synthétisé dans un diagramme caractéristique du contact. L'étude de l'intersection de toutes ces courbes permet alors de déterminer les frontières des régions admissibles réalisant le contact de départ. Le résultat est un ensemble de facettes, correspondant aux simples contacts, et définies comme des surfaces réglées engendrées par des segments dont les extrémités sont des fonctions analytiques de θ . Il reste alors à "recoller" les différentes facettes; cette dernière opération utilise un étiquetage symbolique des doubles

contacts. La structure obtenue est un graphe d’adjacence entre les surfaces de simple contact. Ce graphe correspond à une cellularisation exacte de la frontière de l’espace des configurations admissibles. La recherche de trajectoire s’apparentera donc à une méthode de rétraction : les configurations initiale et finale devront être rétractées sur l’espace des contacts à θ constant, pour permettre la recherche d’un chemin à travers le graphe des contacts. La construction des facettes et de leur graphe d’adjacence prend un temps en $O(n_R^3 n_O^3 \log(n_R n_O))$, et la complexité du graphe obtenu est en $O(n_R^3 n_O^3)$, n_R et n_O représentant respectivement le nombre de sommets du robot et de l’environnement.

Au cours de l’implantation de cet algorithme, nous avons été confrontés aux problèmes de robustesse inhérents aux approches de géométrie dite exacte: problèmes issus de la représentation numérique des outils informatiques, particulièrement délicats à gérer avec ces méthodes, et aussi difficulté de traiter avec cohérence (et parfois même de répertorier) les nombreux cas dégénérés (intersections, tangence, alignements ...) qui peuvent se produire. Ces problèmes de robustesse constituent un thème de recherche important de la géométrie algorithmique; plusieurs techniques ont été proposées pour tenter de résoudre le problème (techniques de perturbations, utilisation d’arithmétique exacte, notion de robustesse d’algorithmes géométriques...), il n’existe cependant pas aujourd’hui de solution simple à ce problème qui constitue une des principales limitations des approches purement géométriques.

1.1.2 Décomposition approchée: un algorithme général pour des problèmes faiblement dimensionnés

Mes travaux de thèse, réalisée dans un contexte de robotique manufacturière, ont contribué au développement d’une algorithmique approchée, qui suite aux travaux pionniers de [Loz81, Gou84], a conduit dès la fin des années 80 aux premiers algorithmes effectifs pour traiter de manière générique les cas plus complexes de bras manipulateurs [Loz87, Fav86, Lau88] [31]. Le principe commun à ces algorithmes reposait sur le calcul d’une structuration approchée de CS_{free} (2^n -trees, cellules hyper-parallélépipédiques) à partir de calculs géométriques effectués dans l’espace cartésien (débattements valides d’une articulation, calculs de distance entre objets). La méthode que nous avons développée reposait en particulier sur:

- un mécanisme de construction de CS_{free} basé sur une analyse récursive de sous-espaces de dimension croissante, permettant ainsi de limiter l’explosion combinatoire aux régions contraintes de l’espace des configurations.
- des algorithmes efficaces de calculs de distance entre primitives¹ utilisés pour le calcul des cellules de la représentation, et des modèles hiérarchiques des

1. en particulier, l’algorithme [GJK88] mis en oeuvre pour les distances entre polyèdres est maintenant référencé et utilisé dans de nombreux travaux.

objets à partir de volumes englobants² qui permettent de limiter les calculs entre paires de primitives (les obstacles situés loin du robot étant traités de manière grossière).

- des mécanismes de propagation de distance et de réordonnancement dynamique des obstacles en fonction de leur distance au robot permettant de tester en premier les obstacles proches et de ne pas considérer, tant qu’une collision persiste, les autres obstacles de l’environnement.

La figure suivante montre un problème de dimension 4 résolu par le planificateur ainsi qu’une tranche tri-dimensionnelle d’un espace libre calculé.

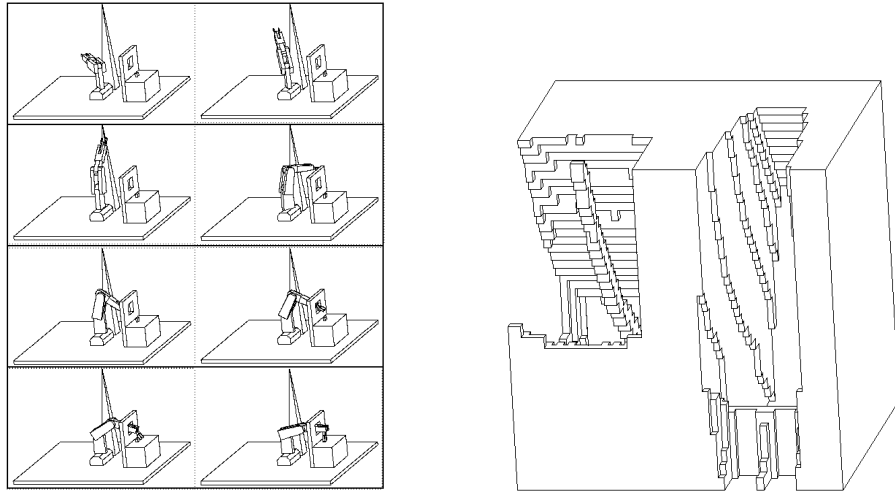


FIG. 1.2 – *Tranche tridimensionnelle de l'espace libre*

Par la suite, ces algorithmes ont été intégrés dans le système *SPARA* développé au LAAS [MVA90] pour la planification automatique de tâches de Prise et Pose par un robot manipulateur, système qui au début des années 90, n’avait d’équivalent que les systèmes *Handey* et *Sharp* respectivement développés au MIT et au LIFIA.

Le planificateur a également été appliqué à la planification de mouvements pour robots mobiles non-holonomes et a conduit à un premier algorithme permettant un calcul effectif de trajectoires [30] tenant compte de la contrainte cinématique du type Hilare.

².des techniques similaires sont aujourd’hui utilisées dans des détecteurs collision tels que *LCOLLIDE* [LM96], l’un des plus performants sur des scènes complexes.

1.1.3 Décomposition approchée: application à la coordination multi-robots

Chemins holonomes à faible coût non holonome

Le principe d'approximation de chemins holonomes sans collision par une séquence de chemins faisables [LJTM94] conduit à des performances qui dépendent de la "qualité" du premier chemin. Dans [8], cette notion de "qualité" a été formalisée par la notion de coût non holonome et une algorithmique géométrique s'appuyant sur une technique de balayage du plan a été mise au point. Ici, la décomposition est calculée pour des tranches discrètes d'orientation du robot, en alignant pour chaque tranche la droite de balayage avec la direction principale du robot (Figure 1.3-a). Cette technique permet de produire la décomposition cellulaire de l'espace adaptée à la minimisation de ce coût (Figure 1.3-b).

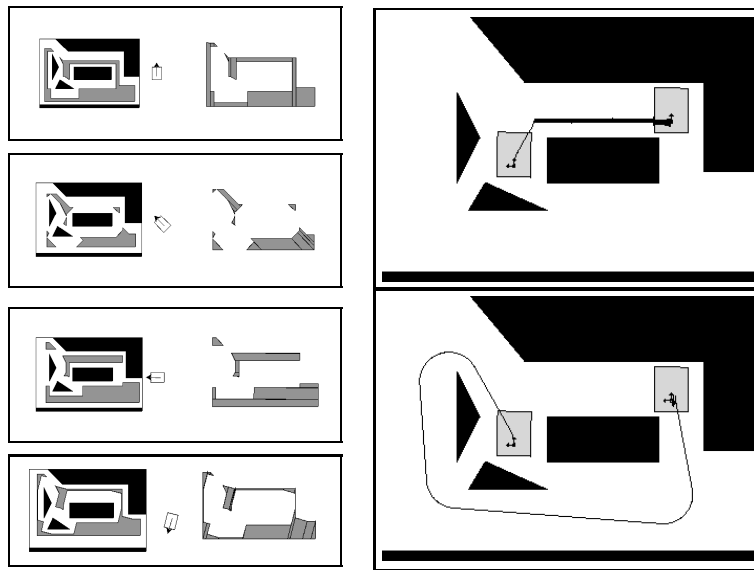


FIG. 1.3 – a/ Exemples de tranches de la décomposition trapézoïdale et b/ Solution obtenue en tenant compte du coût non holonome (bas/gauche) comparée à la solution obtenue sans tenir compte de ce coût (haut/gauche)...

Coordination multi-robots

La planification multi-robot est un problème difficile [HSS84] dont la complexité croît exponentiellement avec le nombre de robots. On distingue classiquement les approches centralisées qui raisonnent dans le produit cartésien des espaces des configurations (eg. [BLL92, SO95, LH96]) et les approches découplées qui planifient un chemin pour chaque robot indépendamment des autres et prennent en compte les

interactions a posteriori (eg. [KZ86, ELP86, OLP89]): les premières sont potentiellement complètes mais limitées à un faible nombre de robots; les secondes sacrifient la complétude afin de traiter un nombre plus élevé de robots.

Nous avons abordé le problème de la coordination multi-robot par des méthodes découplées et avons proposé un algorithme [4] basé sur une décomposition cellulaire approchée du diagramme de coordination. Ce diagramme, introduit dans [OLP89] pour la coordination de deux bras manipulateurs, est défini par l'espace des abscisses curvilignes le long des trajectoires mono-robots planifiées: la coordination se ramène alors à la recherche d'un chemin dans les régions libres du diagramme. L'efficacité de la méthode que nous avons proposée repose sur:

- l'exploitation de la structure cylindrique des obstacles dans le diagramme de dimension n . Cette structure des obstacles permet de raisonner sur une représentation implicite obtenue à partir de leur projection sur les diagrammes de coordination bi-dimensionnels (ie. entre couples de robots).
- La particularité de trajectoires produites par les planificateurs pour robots mobiles non holonomes (ie. séquences de courbes de *Reed et Shepp*) pour construire efficacement les diagrammes bi-dimensionnels [7]. Le calcul de ces diagrammes repose sur un algorithme géométrique de calcul d'intersection des domaines balayés par deux robots mobiles effectuant leur propre trajectoire (séquence de segment et arcs de cercle). Cet algorithme permet d'approximer les obstacles du diagramme par leur boîte englobante.

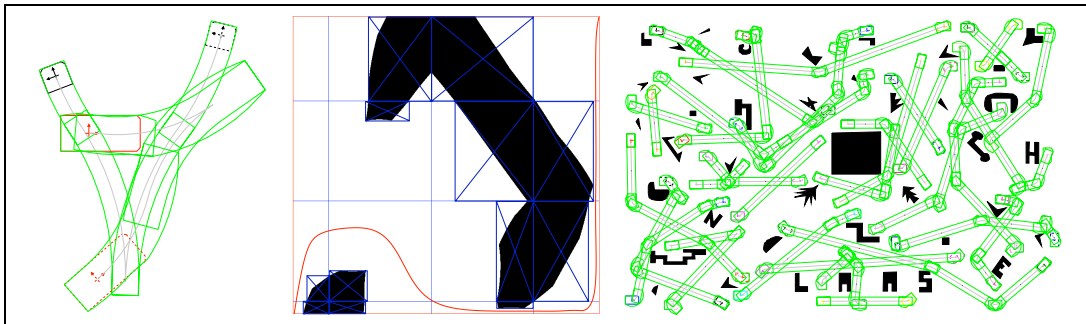


FIG. 1.4 – Domaines balayés, boîtes englobantes des diagrammes et exemple de coordination de 32 robots.

1.2 Méthodes “Bitmaps”

Les méthodes précédentes sont en général (résolution) complètes mais reposent sur le précalcul de la décomposition, étape qui s'avère généralement coûteuse en temps calcul et place mémoire et peut se justifier dans des applications pour lesquelles

ce précalcul est utilisé pour la résolution de plusieurs problèmes de planification. Dans certains cas, il est préférable d'envisager des algorithmes de planification *opportunistes* qui permettent de trouver une solution plus rapidement en évitant ces précalculs.

Ces algorithmes, popularisés par Latombe (eg. [BLL92]), ne cherchent pas à construire explicitement, ni à structurer l'espace des configurations admissible mais explorent directement cet espace en utilisant un mécanisme de guidage efficace basé sur le précalcul de potentiels numériques. Ces méthodes peuvent être considérées comme une forme simple de décomposition approchée dans la mesure où l'espace libre est représenté par une grille régulière superposée à l'espace des configurations. Son exploration est guidée par une fonction potentiel, également définie sur cet espace mais à partir d'une combinaison de potentiels numériques définis dans l'espace de travail du robot (et donc précalculables très efficacement vue la faible dimension de cet espace). L'algorithme d'exploration suit, comme dans les méthodes classiques de descente de potentiel (eg. [Kha86, FT90]) le gradient de cette fonction potentiel, mais utilise des mécanismes permettant d'échapper aux minima locaux de cette fonction. Pour des problèmes faiblement dimensionnés, une exploration de type *Best-first* revient à explorer exhaustivement l'attracteur des minima locaux rencontrés; lorsque l'attracteur est rempli, la recherche n'a pas d'autre choix que de "déborder" vers un attracteur voisin, conduisant dans ce cas à un algorithme opportuniste qui conserve la propriété de (résolution) complétude. Pour des problèmes de dimension plus élevée, l'exploration exhaustive n'étant pas envisageable, le *Randomized Path Planner* proposé dans [BLL92] utilise des marches aléatoires afin de sortir des minima locaux rencontrés, satisfaisant dans ce cas une propriété plus faible, de complétude probabiliste.

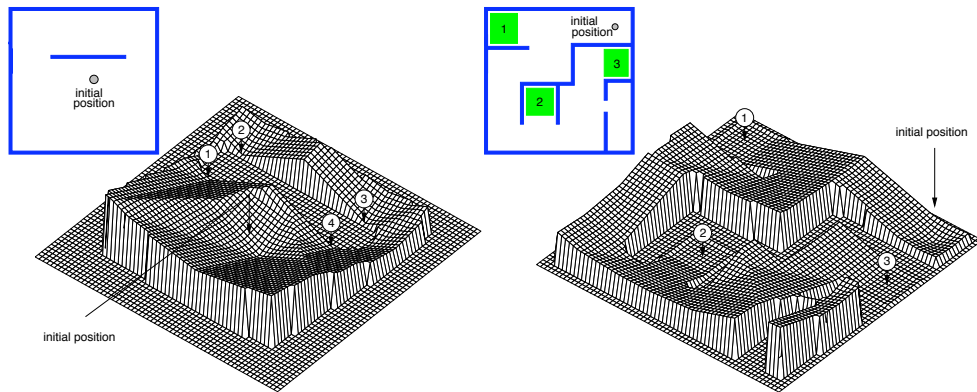


FIG. 1.5 – *Potentiel numérique d'incertitudes tenant compte de localisations a/ sur les arêtes de l'environnement et b/ passage par des zones de localisation*

L'intérêt principal de ces algorithmes est d'adapter la complexité des traitements mis en jeu par la planification à la difficulté du problème à résoudre, sur la base

d'une information globale, extraite de l'environnement sous la forme de potentiels numériques. Nous avons utilisé et adapté ce type de méthodes pour la résolution de problèmes de planification:

- en présence d'incertitudes (cf. section 3): l'algorithme proposé dans [16, 15] repose sur la construction d'un potentiel numérique d'incertitudes (Figure 1.5) qui prend en compte les possibilités de réduction d'incertitudes par des primitives de mouvements asservis capteurs (suivi de paroi, localisation) pour le calcul de stratégies de déplacements robustes.
- sur terrain accidenté (cf. section 4): dans ce cas, le potentiel numérique capture la difficulté du terrain (pente et irrégularité) pour un guidage efficace des planificateurs [22, 9]

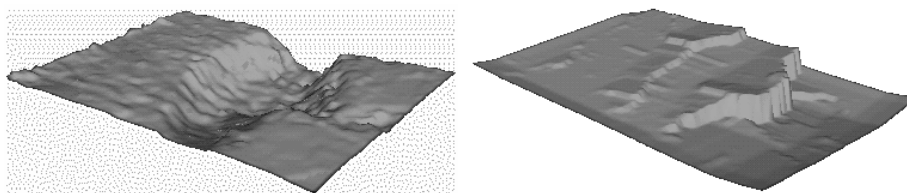


FIG. 1.6 – *Potentiel numérique associé à la franchissabilité d'un terrain accidenté*

Nous avons également utilisé ce type de méthodes pour la composante géométrique du logiciel de planification non-holonome (cf. section 5) intégré depuis plusieurs années sur les robots mobiles de la famille Hilare.

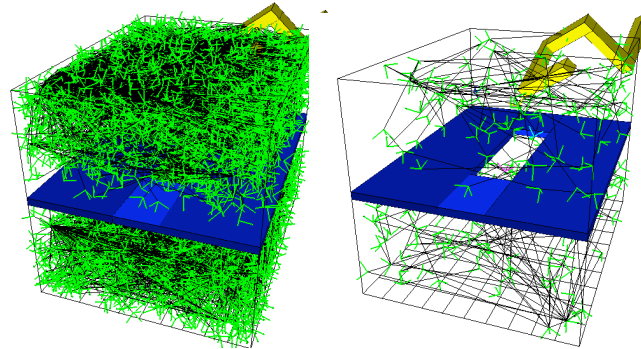
1.3 Méthodes probabilistes

Très récemment sont apparues de nouvelles méthodes de planification qui tirent partie de la puissance croissante des calculateurs. Il s'agit de méthodes probabilistes. Parmi elles, l'une consiste à engendrer aléatoirement un ensemble de configurations sans collision et à essayer de les relier au moyen d'une méthode de planification locale. Un graphe est ainsi construit qui tend à rendre compte de la connectivité de l'espace. Ces travaux trouvent leur origine à Stanford [KL94] et à Utrecht [OS95].

Dans [3], notre contribution a porté sur la réduction de la complexité du graphe. L'idée est de guider la couverture aléatoire de l'espace des configurations sans collision en exploitant la notion d'accessibilité (ou de visibilité) de la méthode locale utilisée pour relier deux configurations. Plutôt que de garder toutes les configurations sans collision comme le fait l'algorithme de base, nous ne retenons que les configurations qui améliorent la couverture de l'espace.

Le premier avantage de l'approche est qu'elle permet de définir un critère d'arrêt explicite de l'algorithme dans sa phase d'apprentissage (calcul du graphe), critère absent des approches jusqu'ici développées.

Par ailleurs le gain en temps calcul se trouve grandement amélioré. Le tableau suivant, issu d'une campagne de tests intensif, montre la performance de l'algorithme comparativement à l'algorithme classique sur l'exemple difficile de la figure 1.7.



PRM	Basic	Visibility
Roadmap size	4723	103
CS_{free} coverage	99.9%	99.7%
CPU time	3367 sec	281 sec

FIG. 1.7 – *La visibilité capture la connectivité de l'espace libre dans une structure bien plus compacte*

Par ailleurs, nous avons développé, sur la base de ces techniques probabilistes, un logiciel de planification générique s'appliquant à une grande variété de systèmes mécaniques (cf. section 5). Ce logiciel, développé dans le cadre du projet de Robotique de Service, sert actuellement de support au développement des fonctions de déplacement et de manipulation d'objets pour un (voire plusieurs) systèmes robotiques composés d'un bras manipulateur monté sur une plateforme mobile non holonome.

2 Une approche géométrique de la manipulation

Cet axe de recherche, développé en collaboration avec R. Alami et JP. Laumond, nous a conduit à proposer une approche originale pour la planification de tâches de manipulation dans un environnement encombré d'obstacles et contenant des objets déplaçables par le robot. L'apport essentiel de cette approche, basée sur une formalisation géométrique du problème, est de produire la décomposition en sous-tâches élémentaires en même temps que la séquence de mouvements du robot. Elle permet par exemple de résoudre des problèmes, mal résolus par les systèmes de programmation de robot qui reposent sur une décomposition à priori en sous-tâches élémentaires, et pour lesquels une simple tâche de déplacement du robot ne peut se faire sans une manipulation complexe des objets afin de modifier la structure de l'environnement (eg. changement de prise, déplacement d'un objet gênant...).

De manière à capturer ces changements de structures en fonction du placement des objets déplaçables dans la scène, il convient de considérer un espace des configurations *composite* associé à tous les corps mobiles (robot et objets). Cependant, et contrairement au problème du mouvement coordonné d'un système multi-robots, tout chemin de cet espace ne correspond pas forcément à une solution de manipulation. La figure suivante illustre cette différence: la solution de droite (b) correspond à un mouvement coordonné de deux disques, celle du bas (c) montre une solution à la manipulation d'un des deux disques par l'autre.

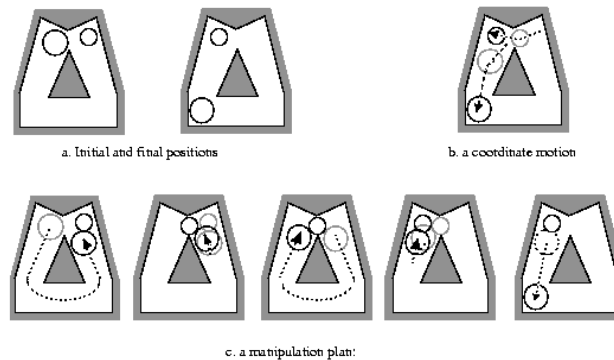


FIG. 1.8 – *Problème de manipulation mouvement coordonné*

La solution d'un problème de manipulation apparaît donc comme un chemin particulier de cet espace composite, contraint par les relations de contact (*i*) induites par la prise d'un objet par le robot (*ii*) ou caractérisant les placements valides des objets dans la scène lorsqu'ils ne sont pas déplacés par le robot. Un chemin de manipulation est alors défini par une séquence alternée de sous chemins de *transit* (le robot se déplace seul, les objets déplaçables étant posés dans la scène), et de *transfert* (le robot transporte un des objets avec une certaine position de prise), connectés par des opérations de prise/pose des objets. La résolution du problème, proposée dans

[28, 17], repose sur la structuration de l'espace libre par un *graphe de manipulation* qui permet de formaliser les sous-espaces associés aux mouvements de transfert et de transit, et de capturer la connectivité entre leurs différentes composantes. Ce schéma de résolution est appliqué dans [17] à deux instances de problèmes pour lesquels des algorithmes ont été implantés: cas de plusieurs objets manipulés par un polygone en translation (Figure 1.9) et pour un bras à trois articulations rotatives³ sous l'hypothèse de nombre fini de prises et de poses, et cas d'un seul objet déplaçable dans un environnement polygonal avec un nombre fini de prises.

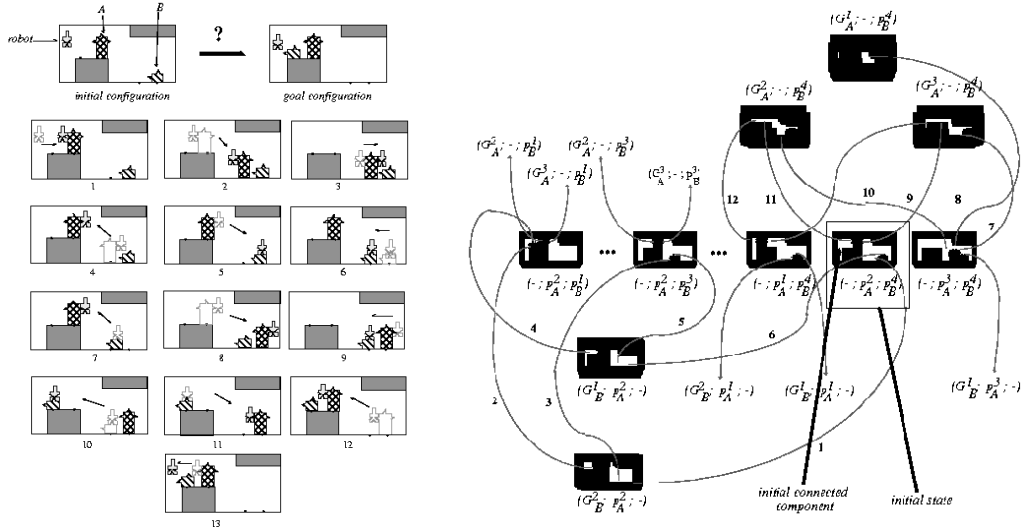


FIG. 1.9 – Exemple de solution obtenue par exploration du graphe de manipulation représenté sur la figure de droite

Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs extensions: [KL92, KL94] propose sur la base de ce formalisme des algorithmes pour résoudre des problèmes de manipulation d'un seul objet par plusieurs manipulateurs. L'approche des contraintes progressives [BF94] a également été appliquée à la résolution de plusieurs instances de problèmes. Enfin, l'algorithme proposé plus récemment dans [AGM98], permet de considérer le cas d'un manipulateur redondant.

3. sur la base du planificateur présenté dans la section 1.1.2.

3 Planification de mouvements avec incertitude

Dans sa forme classique, l’algorithmique géométrique du mouvement repose sur le calcul d’un chemin dans l’espace des configurations sans tenir compte des conditions réelles de son exécution: la plupart des techniques supposent en effet une connaissance parfaite de l’environnement ainsi qu’une parfaite exécution du mouvement alors que les situations réelles d’utilisation mettent en jeu des connaissances imprécises voire incomplètes sur les modèles, des erreurs liées au contrôle du robot ainsi que sur les données sensorielles acquises durant l’exécution.

Les problèmes posés par la prise en compte de ces incertitudes dans les raisonnements mis en jeu par la planification, ont été initialement abordés pour la synthèse de mouvements fins en robotique d’assemblage. Le formalisme sous-jacent à ces travaux repose sur le concept des préimages [LMT84, ELP86, Don88]. La complexité de l’approche dans sa forme la plus générale [Can89] a cependant limité son application à des problèmes simples; en particulier, plusieurs algorithmes ont été proposés pour la synthèse de mouvements compliant d’un robot ponctuel équipé d’un capteur d’effort (cf. [Lat91] pour une synthèse de ces travaux).

Plus récemment, les problèmes de planification avec incertitudes ont été abordés dans un contexte de robotique mobile. Dans ce cas, la sensibilité des trajectoires aux effets des incertitudes se trouve augmentée par la nature cumulative de l’erreur de position liée à une localisation relative, généralement basée sur l’odométrie. Il est donc nécessaire de considérer l’évolution de ces incertitudes dès la planification, et d’anticiper en fonction des capteurs disponibles (ultrasons, vision, laser...) sur la connaissance qui sera disponible lors de la réalisation effective des mouvements de manière à rendre les incertitudes compatibles avec les contraintes imposées par la tâche de déplacement. Parmi les techniques proposées, certaines utilisent une notion de landmark [LL95][16], l’espace de contact [RLN94] [2] ou combinent plusieurs modalités sensorielles [PS95] [LH95] [16] afin de réduire les incertitudes, d’autres reposent sur le calcul d’un champ d’incertitude de localisation afin de limiter les erreurs de mesure des capteurs [TFL94] [CML94].

Par ailleurs, des approches réactives permettent de produire des mouvements référencés capteurs, directement sur la base de données sensorielles (eg. ultrasons [Kha96] ou vision [PRK93]) locales acquises au fur et à mesure de l’exécution. Ces méthodes offrent une meilleure robustesse mais peuvent échouer en l’absence de stratégie globale.

L’objectif de nos travaux est l’amélioration de la robustesse de la boucle planification/contrôle des mouvements pour la navigation de robots mobiles. Pour cela, nous avons proposé un schéma algorithmique qui combine planification avec incertitude et modes réactifs; les algorithmes de planification utilisent la connaissance à priori sur l’environnement pour produire des primitives référencées capteurs adaptées à la robotique mobile, en tenant compte non seulement des contraintes sur les obstacles,

mais également des incertitudes de perception et de mouvement.

Les travaux présentés ci-dessous, bien que raisonnant sur des modèles simplifiés, permettent néanmoins de produire des stratégies de déplacement réalistes dont la robustesse a pu être validée expérimentalement sur les robots Hilare. Nos contributions sur ce thème ont été parmi les premières à proposer en robotique mobile, des schémas de planification intégrant des capacités de contrôle sensoriel.

3.1 Approche géométrique

Le planificateur proposé dans [18] considère le cas d'un robot circulaire se déplaçant dans un environnement polygonal en présence d'incertitudes provenant des erreurs de contrôle ainsi que de l'imprécision des capteurs. Les hypothèses de départ sont que le robot dispose d'un capteur de position qui utilise l'odométrie (et conduit donc à une erreur cumulative) et de capteurs de proximité (par exemple ultrasons) qui lui permettent de détecter le contact avec les obstacles par des commandes gardées ou d'assurer des commandes de type "suivi de paroi". L'algorithmique qui a été implantée produit directement un plan de déplacement, permettant à partir d'une position initiale incertaine d'atteindre le but par une séquence de ces primitives réduisant les incertitudes.

Ces primitives sont définies par la situation initiale à partir de laquelle elles peuvent s'appliquer, par la situation finale qui doit être atteinte, et par l'enveloppe des différentes trajectoires qui peuvent être exécutées. A titre d'exemple, la primitive `MOVE_until_CONTACT` effectue un déplacement en ligne droite en accumulant une incertitude due au capteur de position. La condition de terminaison est basée sur un retour proximétrique de détection de contact. En d'autres termes, le mouvement s'effectue jusqu'à ce qu'un mur visible soit détecté, annulant ainsi l'incertitude de position suivant la normale à cette paroi. Les autres paramètres de la fonction d'incertitude du capteur de proximétrie sont déterminés par la projection de l'enveloppe du mouvement sur la paroi. Avec la primitive de suivi `FOLLOW_WALL`, l'incertitude croît linéairement suivant la direction de la paroi et reste fixe le long de sa normale. L'incertitude se trouve réduite lorsque le robot détecte la fin de la paroi.

L'approche est basée sur un modèle géométrique de visibilité de type "forward projection", tenant compte de l'évolution des incertitudes, qui caractérise les enchaînements possibles entre différentes primitives de suivi du paroi. Cette étape, détaillée dans [2], se ramène à la construction de "régions de visibilité" dans l'espace des paramètres (x, θ) des primitives : x représente la distance parcourue en mode "suivi de paroi", θ la direction du mouvement gardé. La figure 1.10 montre, pour un environnement composé de 7 segments (haut/gauche), les régions de cet espace garantissant l'atteignabilité du segment e_7 , à partir d'un suivi de paroi le long de e_1 (haut/droite). Les figures du bas montrent, pour deux évolutions différentes des incertitudes, quels sont les segments e_i atteignables à partir de e_1 .

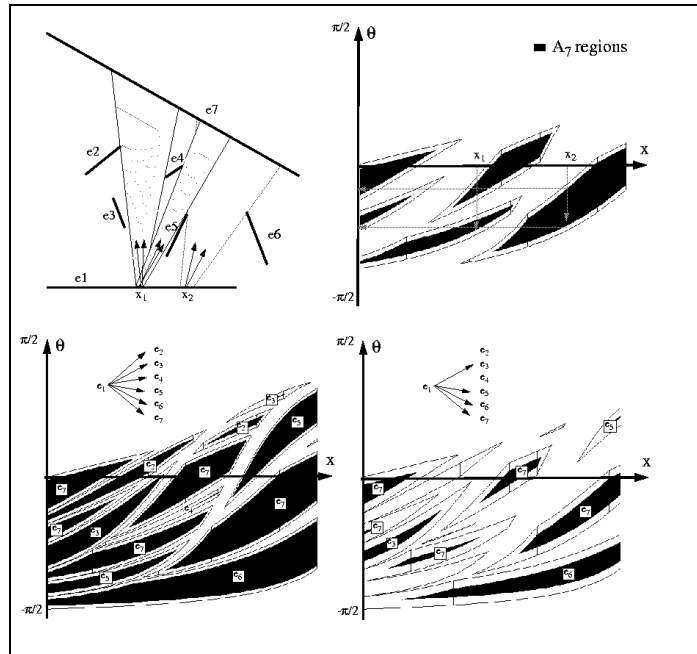


FIG. 1.10 – Exemples de régions d’adjacence calculées à partir d’un suivi de l’arête e_1 pour différentes évolutions des incertitudes

La notion d’adjacence induite par ces régions permet de définir un graphe dont l’exploration conduit à la solution du problème de planification.

3.2 Approche numérique

Les difficultés posées par l’extension des calculs géométriques de cet algorithme à des problèmes plus complexes, nous ont conduit à proposer une nouvelle méthode [16], basée sur des techniques de propagation de potentiels numériques (cf. Figure 1.5). Cette méthode permet de considérer des classes de stratégies plus complexes, alternant des séquences de mouvements asservis sur l’odométrie, avec plusieurs types de primitives asservies sur les capteurs externes. Une propriété intéressante de l’approche est de tenir compte de l’incertitude accumulée par l’odométrie lors de séquences de mouvement dans l’espace libre, et de ne faire appel aux primitives asservies que lorsque la tâche à exécuter le nécessite.

Elle intègre dans le même processus, la mise à profit de l’espace de contact et l’utilisation de régions de localisation du robot pour rendre le but atteignable. En plus du capteur de position relative (odométrie) et des capteurs proximétriques (ultrasons), le robot dispose ici d’un capteur de localisation absolue (eg. caméra fixe dans l’environnement) auquel il peut faire appel lorsqu’il se trouve dans la région de visibilité du capteur. Dans l’implantation actuelle, ces régions sont fournies au planificateur; on pourrait également envisager leur calcul automatique pour des capteurs (caméra

ou télémètre laser) montés sur le robot, par un seuillage du champ d'incertitude (SUF) proposé dans [TFL94].

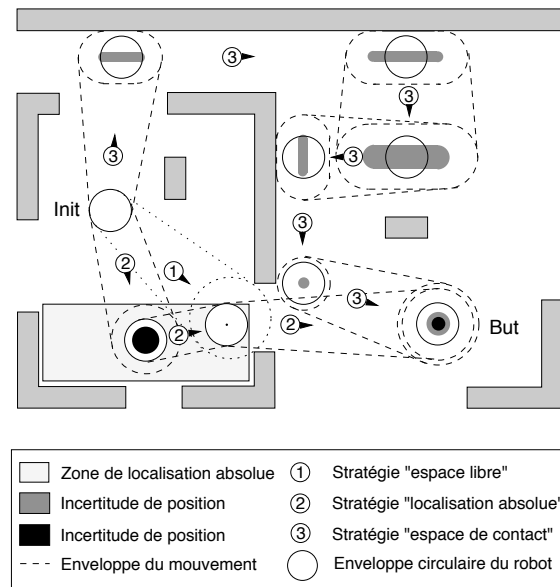


FIG. 1.11 – Exemples de stratégies de déplacement produites par le planificateur

La figure 1.11 illustre le type de problèmes résolus par le planificateur. La première stratégie (① sur la figure), exclusivement basée sur des mouvements odométriques accumule une erreur trop importante pour garantir le passage de la porte. Une première possibilité (stratégie ②) consiste à mettre à profit la zone de localisation absolue, où l'incertitude reste suffisamment faible pour rejoindre le but. Un autre type de stratégie envisageable utilise l'espace de contact pour appliquer des mouvements référencés capteurs qui assurent une relocalisation partielle du robot (stratégie notée ③). Le choix de la meilleure stratégie peut alors se poser en terme de distance de parcours, ou d'incertitude tolérée sur la position finale.

La figure 1.12 montre des résultats produits dans différentes conditions: les deux stratégies conduisent au même but à partir d'une même configuration initiale; l'exemple du haut correspond à un but fixé avec une précision plus faible que dans l'exemple du bas. Cet exemple illustre la sensibilité des stratégies de navigation d'un robot mobile aux effets des incertitudes.

Les algorithmes ont également été étendus au cas d'environnements contraints qui nécessitent de s'affranchir de l'approximation circulaire du robot lors des mouvements de suivi de paroi et de considérer un modèle d'incertitude directionnelle [15].

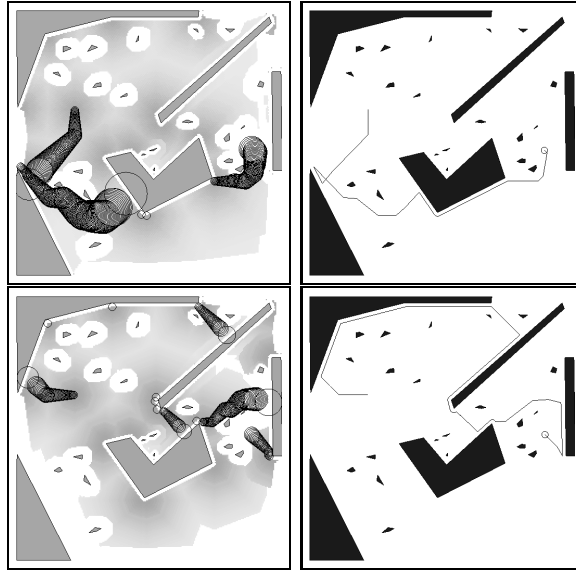


FIG. 1.12 – Exemples de stratégies de déplacement

3.3 Expérimentations sur Hilare

Ces travaux ont débouché sur la mise en oeuvre et la validation des algorithmes dans des expérimentations réelles utilisant ce planificateur pour produire les commandes référencées capteurs implantées sur le robot Hilare-2 [10]. Ces mouvements asservis sont basés sur la notion de Potentiel de Tâche [Kha96], qui généralise la méthode classique des potentiel, en combinant plusieurs potentiels, caractéristiques des actions à réaliser, et définis dans l'espace des paramètres associés aux mesures capteurs. L'instantiation de ce Potentiel de Tâche permet de définir et d'implanter sur les robots des primitives de mouvements asservis capteurs telles que: mouvement jusqu'au contact, mise en parallèle, suivi de paroi ou accostage.

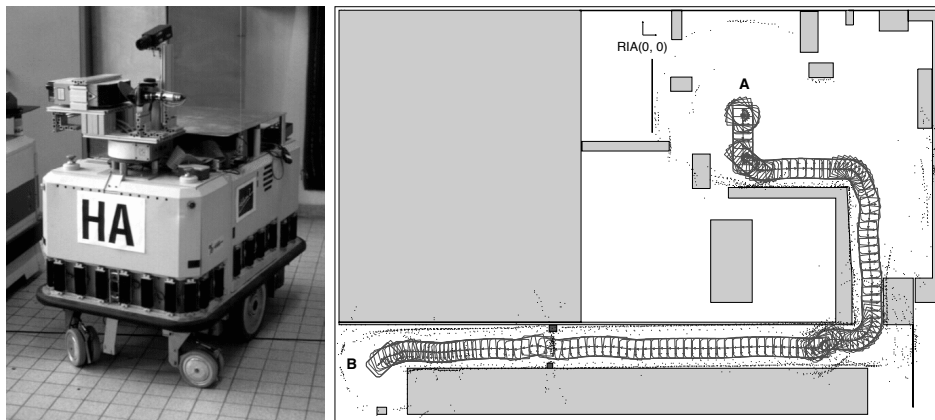


FIG. 1.13 – Trace d'une réalisation de la stratégie de déplacement (recherche, suivi de paroi, relocalisation sur les sommets) produite par le planificateur

La figure 1.13 illustre une stratégie planifiée et réalisée par le robot dans les couloirs du LAAS en partant de la salle d'expérimentation du groupe RIA, exemple qui s'avérait jusqu'ici particulièrement difficile dans le cas d'une exécution s'appuyant uniquement sur une trajectoire géométrique. Ces expérimentations confirment la robustesse apportée par les schémas de planification géométrique intégrant des capacités de contrôle sensoriel.

Le plan suivant correspond aux primitives produites par le planificateur et exécutées par le robot pour l'exemple précédent. On peut noter que ce plan ne contient aucun paramètre de position absolu, tous les déplacements sont exprimés en relatif par rapport à la position courante du robot.

```
MOVE(dteta=-.57 , l=1.64)
MOVE_UNTIL_CONTACT(dcontact=.13 , Lmax=.48)
TURN(dteta=1.22)
MOVE_ARC(dteta=.35 , r=1.05)
FOLLOW_WALL(side=RIGHT , d_wall=.34 ,
            wall0=(L1=2.03 , L2=.59, corner=(type=CONVEX , dteta=-1.51)),
            wall1=(L1=5.22 , L2=.38, corner=(type=CONVEX , dteta=-1.57)),
            wall2=(L1=.29 , L2=.0))
MOVE_ARC(dteta=.34 , r = 1.05)
TURN(dteta=.43)
MOVE_UNTIL_CONTACT(dcontact=.07 , Lmax=.27)
TURN(dteta=-.43)
MOVE_ARC(dteta=-.35, r=1.05)
FOLLOW_WALL(side=LEFT, d_wall=.34,
            wall0=(L1=14.11 , L2=2.41,corner=(type=CONVEX , dteta=1.57)))
MOVE(dteta=.0 , l=.43)
MOVE(dteta=.08, l=1.16)
MOVE(dteta=.7 , l=.68)
```

4 Planification de mouvement sur terrain accidenté

Pour un robot mobile se déplaçant dans un environnement naturel et fortement accidenté, la planification de mouvement est un problème plus complexe que lorsque le robot évolue sur un sol plan encombré d'obstacles. En effet, les contraintes liées au terrain amènent à revoir la notion d'obstacle : une portion de terrain peut constituer un obstacle ou non suivant la manière de la traverser et la structure du système mécanique du robot. De même, la notion de trajectoire sûre revêt un caractère plus complexe de par la nature des contraintes mises en jeu : il s'agit de combiner des critères qui représentent des propriétés de non-collision, de stabilité et de faisabilité cinématique voire dynamique, afin d'exploiter au mieux les capacités de locomotion du véhicule considéré.

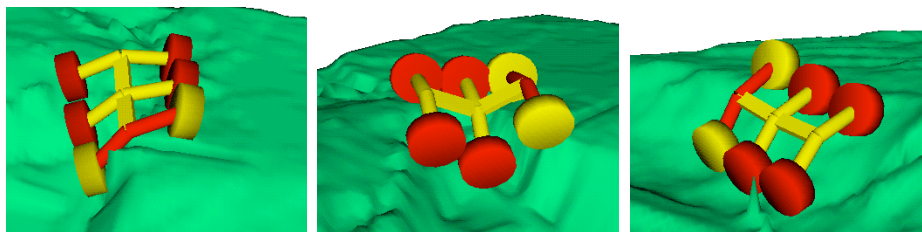


FIG. 1.14 – Exemples de contraintes sur les placements (*collision, limites mécaniques, stabilité*)

Nos contributions⁴ sur cet axe de recherche, abordé jusqu'alors dans la littérature comme un problème de génération d'itinéraires (eg. [GM86, LM91]) ou de calcul de trajectoires optimales en temps pour des robots ponctuels (eg. [SC90]), ont permis par une formalisation dans l'espace des configurations [25], de proposer des algorithmes raisonnant sur des modèles réalistes de la structure mécanique du robot [22, 14], pour la planification de mouvements contraints dans le cas de terrains très irréguliers. Les modèles manipulés dans nos travaux sont essentiellement de nature géométrique; ils permettent la mise en oeuvre d'algorithmes efficaces capables de résoudre des problèmes réalistes avec des temps calcul suffisamment faibles pour envisager leur intégration dans un système de navigation de robots mobiles [1]. Des modèles plus complexes [MLF93], ou intégrant également les caractéristiques dynamiques du robot et de ses interactions avec le terrain ont été considérés dans d'autres travaux (eg. [BBB93, CLMF94]), ce qui permet au prix de traitements nettement plus lourds, de simuler de manière réaliste le comportement dynamique du robot sur des terrains éventuellement déformables.

⁴ ces travaux, ont été initiés par le projet VAP/RISP (Robotique d'Intervention sur Site Planaire), et poursuivis dans le projet Eureka IARES

4.1 Formalisation du problème

L'approche initialement proposée pour un châssis rigide muni de suspensions passives (thèse de B. Dacre-Wright) repose sur la combinaison de techniques d'exploration d'un espace discret représentant l'espace des configurations du robot, et d'algorithmes pour vérifier localement la validité de trajectoires élémentaires.

Pour ce type de châssis, le placement du robot est défini par une minimisation de l'énergie liée aux déformations des suspensions. Cette minimisation permet de ramener le positionnement du robot, défini par six paramètres, à la position d'un point dans un espace de dimension trois (deux translations par rapport aux axes horizontaux, 1 rotation par rapport à l'axe vertical). Les contraintes géométriques sur le placement (stabilité, collision, butées mécaniques...) définissent dans cet espace des obstacles fictifs qui correspondent aux configurations pour lesquelles au moins une des contraintes n'est pas vérifiée. Un obstacle est donc un objet complexe de cet espace. Les frontières de ces obstacles ne pouvant être calculées analytiquement (à cause de la minimisation), une modélisation exacte des configurations admissibles n'est pas envisageable. La méthode repose donc sur une représentation discrète de cet espace. Une représentation de type "octree" est calculée dans [23], par la combinaison de techniques de décomposition hiérarchique, et de tests évaluant la validité de régions cubiques de l'espace des configurations, à partir des expressions associées aux variations des paramètres de placement.

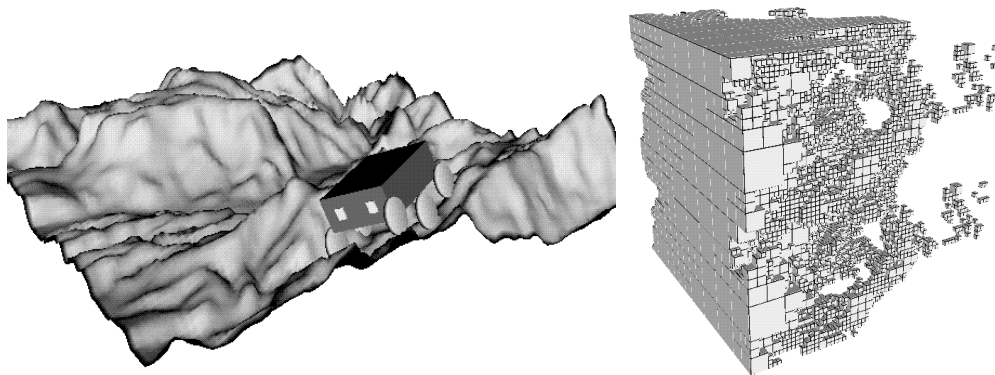


FIG. 1.15 – *Modèle numérique du terrain et régions libres de $CS = (x, y, \theta)$*

Une fois les régions libres calculées, la planification se ramène à une recherche de chemin dans le graphe d'adjacence entre ces régions, la trajectoire étant calculée de manière à satisfaire les contraintes cinématiques du robot.

4.2 Algorithme de planification

Ce précalcul reste cependant une étape coûteuse et la construction de ce modèle global n'offre qu'un intérêt réduit lorsque le modèle de terrain évolue entre chaque appel du planificateur (ce qui est généralement le cas dans le contexte de la robotique d'intervention). Il est donc préférable d'utiliser des méthodes plus opportunistes [22] [23] qui construisent incrémentalement ce graphe à partir de la configuration initiale jusqu'à aboutir dans une cellule contenant la configuration finale. Le développement du graphe est réalisé en considérant l'équation de contrôle du système et un nombre fini de contrôles élémentaires. Les déplacements élémentaires admissibles depuis les états déjà explorés sont obtenus à partir de ces contrôles appliqués durant un court incrément de temps, permettant ainsi de tenir compte des contraintes cinématiques du robot.

Des techniques d'élagage sont utilisées afin de limiter l'expansion du graphe. De plus, le développement étant guidé par une fonction heuristique tenant compte de la difficulté du terrain (cf. Figure 1.2), le planificateur n'explore dans la plupart des cas qu'une faible portion de l'espace libre avant de trouver la solution, ce qui améliore notablement son efficacité.

4.3 Expérimentation sur ADAM



FIG. 1.16 – Planification des déplacements du robot ADAM sur le terrain accidenté du LAAS.

Cet aspect, lié à la génération des mouvements sur terrain accidenté, a été l'un des résultats marquants mis en oeuvre dans le projet interne EDEN (Expérimentation de Déplacement en Environnement Naturel) qui intègre les travaux du groupe en Robotique d'Intervention. La première phase d'EDEN, réalisée avec le robot mobile tout-terrain ADAM, a permis de démontrer des capacités de navigation autonome dans un environnement naturel et a priori inconnu. L'approche adaptative qui a été mise en oeuvre [20][1], construit au fur et à mesure des déplacements une carte

de navigabilité dans laquelle les régions de terrain sont étiquetées selon leur nature (plat, accidenté, obstacle, inconnu). Le mode de déplacement adéquat est sélectionné selon le type du terrain, ce qui permet d’adapter la complexité des algorithmes à la complexité de l’environnement. Le *mode planifié 3D*, sélectionné dans le cas de terrain accidenté, utilise les algorithmes de planification décrits ci-dessus, sur la base d’un modèle géométrique précis du terrain [19] construit incrémentalement au cours des déplacements du robot.

4.4 Extension à des châssis articulés

Le changement de support expérimental lié au remplacement du châssis ADAM par le robot LAMA de type “Marsokhod”, nous a conduit à étudier l’extension du planificateur à des structures de locomotion plus complexes, composés de plusieurs essieux articulés. Un effort particulier a porté sur le développement d’algorithmes performants pour les calculs géométriques utilisés par le planificateur.

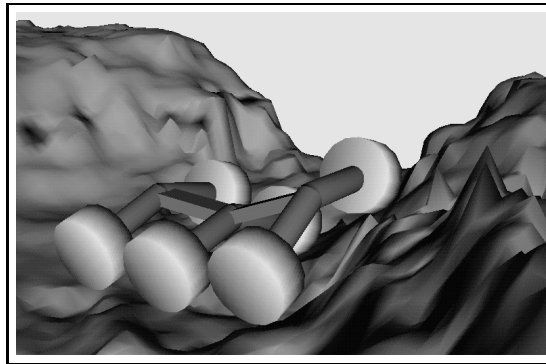


FIG. 1.17 – *Placement du châssis articulé*

En particulier, l’algorithme proposé dans [14] pour le placement d’un châssis articulé sur le terrain (cf. figure 1.17), repose sur le pré-calcul de surfaces associées aux paramètres de placement d’un essieu en fonction de sa position sur le terrain. Ce pré-calcul permet de ne plus considérer la géométrie des essieux, qui se trouvent ainsi “transformés” en un point lors de l’étape de planification.

Le calcul d’un modèle hiérarchique du terrain, représenté par une structure de type “quadtree” approximant le terrain par une hiérarchie de boîtes englobantes, conduit également à des algorithmes performants de détection de collision.

Les résultats de simulation présentés dans la thèse de A. Hait, confirment la performance globale du planificateur qui s’approche de celle obtenue par les algorithmes “classiques”, raisonnant sur des modèles polygonaux du robot et des obstacles.

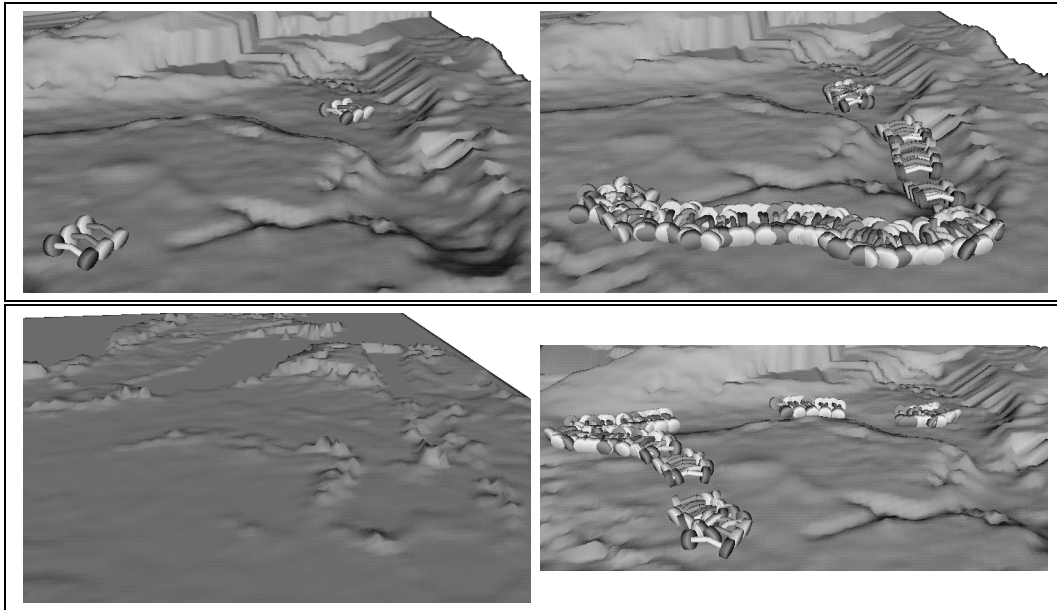


FIG. 1.18 – Exemple de trajectoire calculée sans/avec prise en compte des incertitudes

4.5 Robustesse des trajectoires

Les travaux ont également porté sur l'amélioration de la robustesse des algorithmes vis à vis des incertitudes dans le modèle du terrain et de l'erreur sur la position du robot [14]. En ce qui concerne le modèle du terrain, l'incertitude sur les élévations se traduit par deux enveloppes de terrain (supérieure et inférieure) à partir desquelles on détermine les placements extrêmes du robot afin de garantir la validité des placements pour tout relief compris entre ces deux enveloppes. Pour la position du robot, la prise en compte d'un domaine d'incertitude sur la configuration du robot, permet de déterminer ces placements extrêmes à partir des placements de chaque essieu sur le domaine, garantissant ainsi la validité d'un couloir de déplacement de taille donnée (position et orientation) autour de la trajectoire calculée.

Les figures 1.18 du haut montrent un exemple de terrain ainsi que des positions intermédiaires d'une trajectoire calculée sans tenir compte des incertitudes. Les figures du bas montrent que la prise en compte des incertitudes sur les élévations du terrain (figure de gauche) conduit à une stratégie de mouvement très différente et plus robuste (figure de droite).

Enfin, la prise en compte par les algorithmes de contraintes de perception, liées en particulier à la visibilité d'amers permettant de localiser le robot, nous a conduit à proposer une approche de planification [9] intégrant les tâches de recalage sur les amers (figure 1.19). Le modèle d'incertitude considéré dans ce cas, dépend du chemin suivi et des éventuels recalages effectués sur les amers. Afin de limiter la complexité du problème, l'approche proposée raisonne en deux étapes. La première

étape s'appuie sur un calcul des régions de visibilité des amers et sur des modèles simplifiés des contraintes de placement et d'incertitudes, afin de déterminer la séquence des recalages nécessaires. Le résultat est un chemin composé de portions passant par les régions de visibilité de certains amers, alternées avec des portions le long desquelles aucun amer n'est visible. La seconde étape transforme le chemin calculé en une trajectoire vérifiant l'ensemble des contraintes du problème.

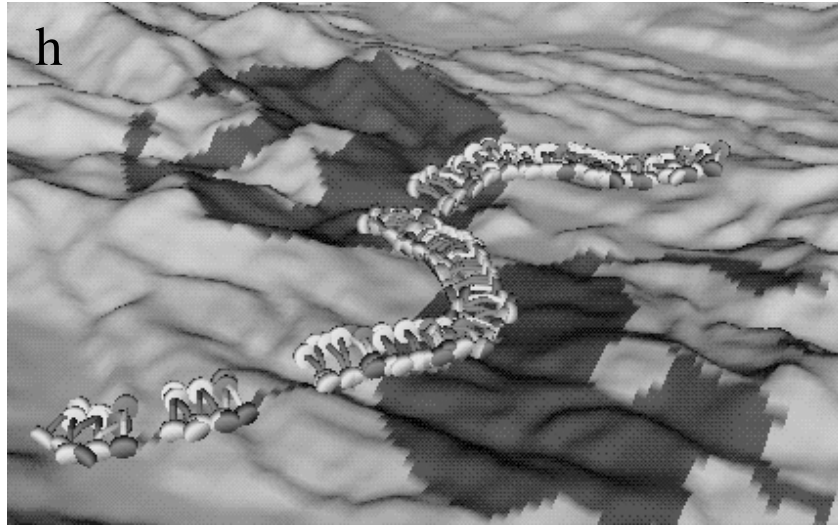


FIG. 1.19 – *Trajectoire passant par deux regions de localisation*

5 Plateformes logicielles

Cette section présente deux outils de planification, respectivement dédiés à la résolution de problèmes dans le plan ou dans l'espace, développés dans le cadre du projet Robotique de Service.

5.1 Move2D : Librairie pour le mouvement plan

Move2D est une librairie de modélisation d'environnements polygonaux et de systèmes mécaniques évoluant dans le plan. La librairie intègre des planificateurs de mouvement pour robots (circulaires ou polygonaux) soumis à des contraintes cinématiques de type "voiture". La librairie offre également les fonctionnalités nécessaires au développement rapide de nouveaux planificateurs de mouvement dans le plan.

Calculs géométriques de base :

- Géométrie des polygones : Move2D intègre des fonctions de calcul de distance et de tests de collision entre polygones.
- Géométrie Bitmap : les objets polygonaux Move2D sont automatiquement convertis en éléments d'une grille ("bitmap"). La bibliothèque intègre des opérations géométriques de base, telles que calcul de cartes de distance, calcul de diagramme de Voronoi (Figures 1.20) et test de collision.

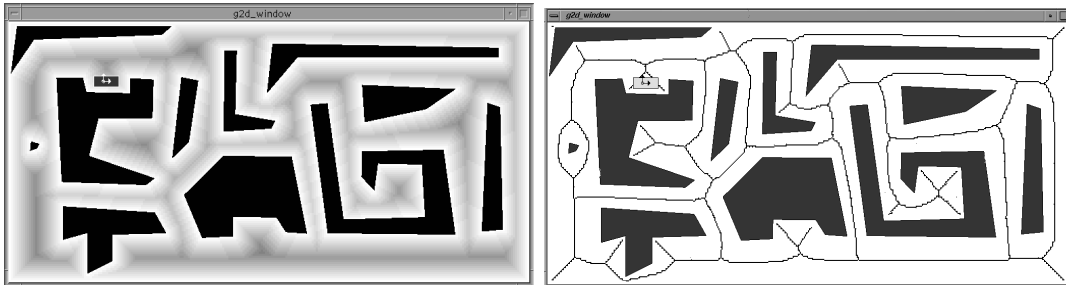


FIG. 1.20 – Carte de distance et diagramme de Voronoi

Planificateur pour un polygone en translation rotation : Move2D intègre un planificateur de mouvements sans collision pour un polygone quelconque évoluant en translation et rotation dans le plan parmi des obstacles polygonaux (Figure 1.21)

Planificateur pour robots mobiles : Move2D intègre un planificateur de mouvement pour robot mobile non holonome. Des contraintes telles que un rayon de

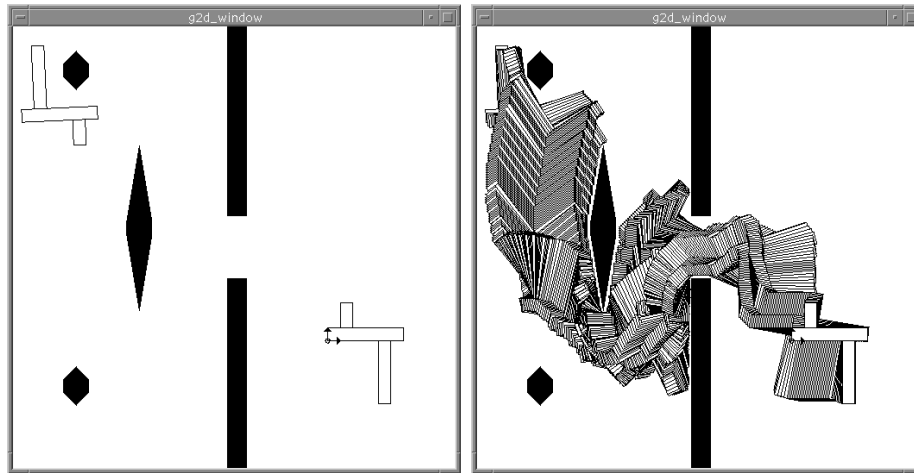


FIG. 1.21 – Planification de mouvement pour un polygone en translation et rotation : un problème difficile traité en 4 secondes sur Sparc Ultra 10

braquage minimum sont prises en compte. Le planificateur engendre automatiquement les manœuvres à effectuer (Figures 1.22).

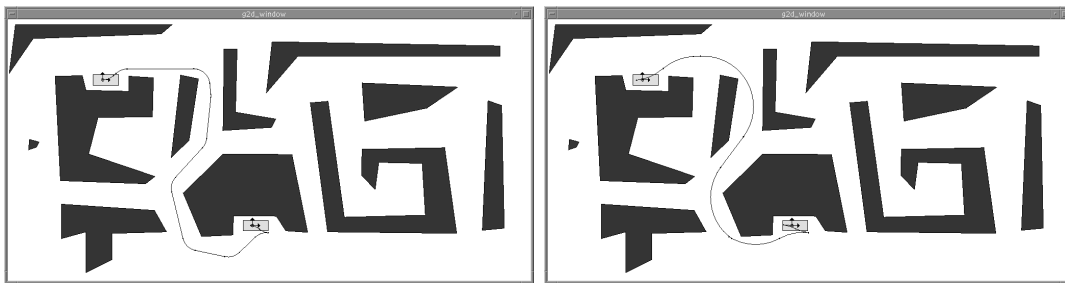


FIG. 1.22 – Planification de mouvement pour robot mobile : deux solutions à un même problème avec deux bornes différentes sur le rayon de giration (0.5 seconde sur Sparc Ultra 10)

Dans le cadre du projet de Robotique de service, ce planificateur est intégré depuis plusieurs années à l'architecture temps réel embarquée sur les robots Hilare, et a été utilisé de manière intensive dans plusieurs expérimentations.

5.2 Move3D : Librairie pour le mouvement dans l'espace

Move3D est une extension de Move2D basée sur les mêmes fonctionnalités de modélisation de systèmes mécaniques et permettant l'implantation rapide d'algorithmes géométriques traitant de polyèdres.

La librairie intègre actuellement des algorithmes de test de collision efficaces ainsi qu'un planificateur général; elle offre également les fonctionnalités nécessaires au développement rapide de nouveaux planificateurs de mouvement dans l'espace.

Move3D est accompagné d'un interface graphique permettant de définir le problème de planification, d'appeler les algorithmes et de visualiser les mouvements planifiés.

Les principales fonctionnalités de la librairie Move3D sont les suivantes :

Modélisation de systèmes mécaniques : Move3D permet de modéliser des scènes contenant un ou plusieurs systèmes mécaniques représentés par des polyèdres articulés, se déplaçant dans un environnement encombré d'obstacles également polyédriques.

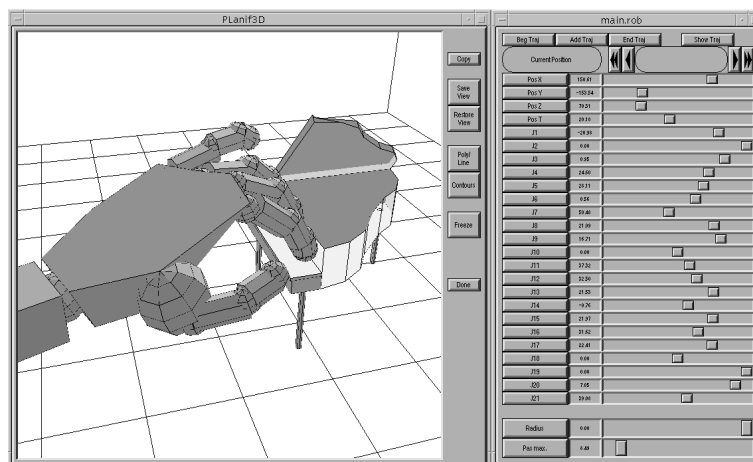


FIG. 1.23 – Modèle d'une main (25 articulations) et son interface de contrôle

Calculs géométriques de base : Move3D intègre des fonctions de calcul de distance et de tests de collision (basées sur les bibliothèques *Icollide* et *Vcollide* [LM96]) permettant de traiter efficacement des scènes complexes composées d'un grand nombre d'objets polyédriques.

Un planificateur "général" Move3D intègre un planificateur de mouvement permettant de traiter la diversité des structures mécaniques modélisables par la

librairie. Le planificateur est basé sur les techniques d'exploration probabilistes décrites section 1.3. La figure suivante montre des exemples de trajectoires calculées pour diverses structures mécaniques. Les temps indiqués correspondent au précalcul du graphe capturant la connectivité de l'espace des configurations; une fois ce précalcul effectué, la résolution de problèmes de planification est très rapide.

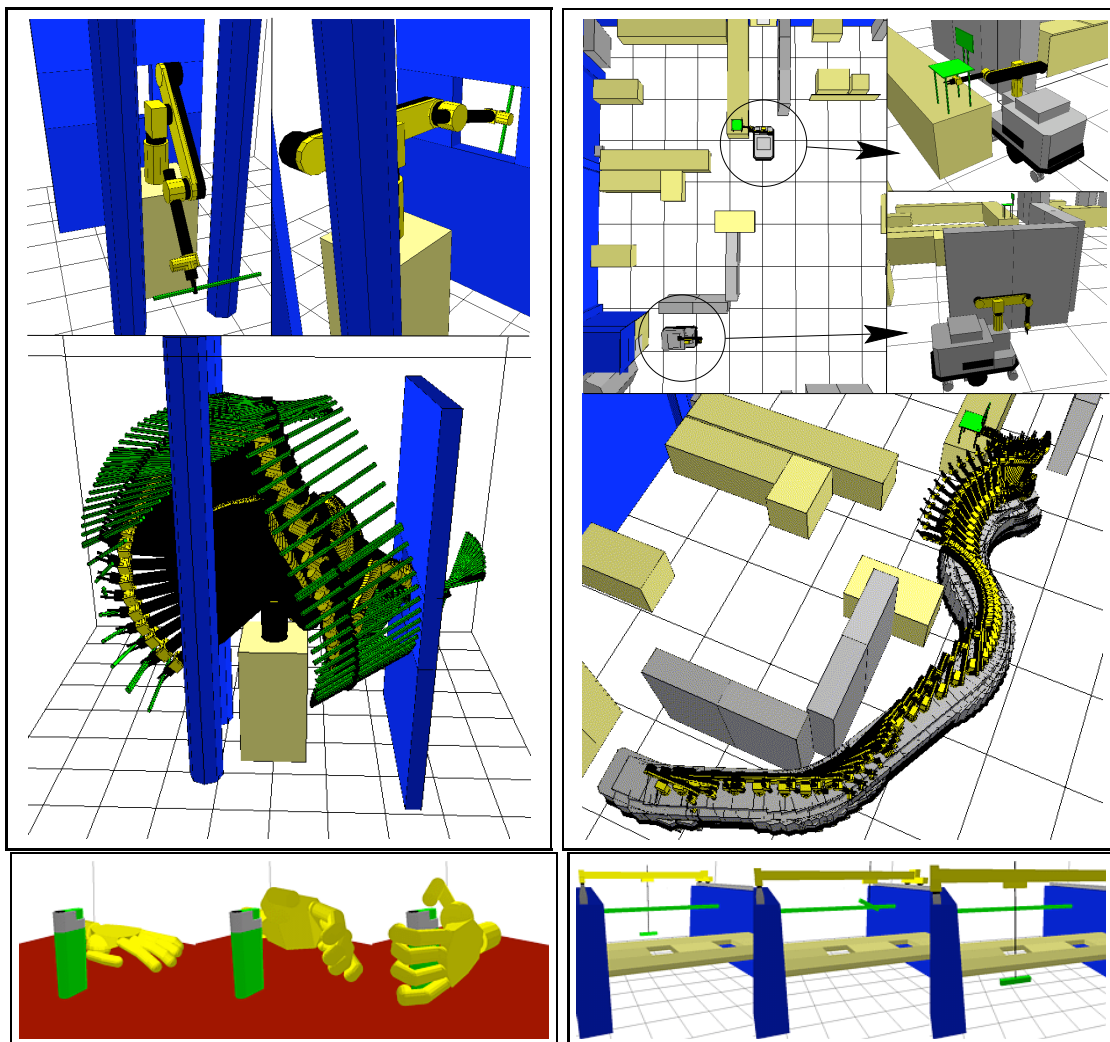


FIG. 1.24 – Exemples de trajectoires calculées par Move3D: bras manipulateur à 6ddl (220 sec.), manipulateur mobile nonholonome à 9ddl (0 sec.), main à 25ddl (400 sec.), pont roulant à 4ddl (60 sec.)

6 Conclusions et prospective de recherche

La ligne forte qui a été à la base de notre activité de recherche est que la robotique se fait *avec des robots*. Notre souci a été, et reste, de proposer des méthodes effectives de planification. Au manque de robustesse et à la forte complexité des algorithmes exacts, nous avons choisi la perte de complétude et privilégié les notions de complétude approchée ou probabiliste (beaucoup plus réaliste en pratique), la performance et la robustesse. C'est le sens des différentes contributions que l'on retrouve tant au niveau des robots de service que des robots d'exploration.

Par ailleurs, nous avons enrichi le cadre conceptuel d'exploration de l'espace des configurations d'un mobile pour modéliser des problèmes plus riches que la seule planification de mouvements et plus directement liés à la notion de *tâches* en robotique. C'est le cas des tâches de manipulation, c'est également le cas des tâches de mouvements référencés capteur.

Notre prospective est dominée par trois axes principaux :

- la poursuite de travaux en robotique proprement dite. Il s'agit là de renforcer les aspects planification de mouvement référencés capteurs. Un cadre conceptuel reste à définir pour fusionner l'espace des configurations d'un système mécanique avec l'"espace perceptuel" de ce système, qui permette non plus seulement de planifier un chemin dans l'espace mais une séquence de mouvements asservis.
Il s'agit d'autre part de poursuivre les travaux en planification de tâches de manipulation dans le contexte de la robotique mobile. Pour l'heure, seul un cadre conceptuel a été dégagé. Le problème est combinatoirement complexe. Nous souhaitons développer une approche de type probabiliste.
- la poursuite des travaux en algorithmique géométrique pour la planification du mouvement. A ce niveau, ce sont les fonctions de base des planificateurs que nous entendons améliorer : tests de collision sur des ensembles de données complexes (millions de polygones), élaboration de nouvelles méthodes locales plus performantes du point de vue calculatoire...
- l'ouverture vers des domaines d'application nouveaux, tels que la CAO et le graphique. Ces champs d'application se distinguent de la robotique par le fait que le mouvement planifié est exactement celui qui est exécuté. L'environnement n'est plus réel mais virtuel. Le problème semble plus simple. Il reste que chacun de ces deux nouveaux champs d'application apporte ses contraintes spécifiques (nouvelles contraintes cinématiques ou mouvement au contact en CAO, rendu réaliste du mouvement en graphique).

7 Bibliographie

- [AGM98] JM. Ahuactzin, K. Gupta and E. Mazer. Manipulation planning for redundant robots: a practical approach. In *Practical motion planning in robotics*, Wiley Pubs, 1998.
- [ARIS95] R. Alami, F. Robert, FF Ingrand and S. Suzuzi. Multi-robot cooperation through incremental plan merging. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya (Japan), 1995.
- [ABF88] F. Avnaim, J-D. Boissonnat and B. Faverjon. A practical exact motion planning algorithm for polygonal objects admist polygonal obstacles. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia USA*, 1988.
- [BLL92] J. Barraquand, B. Langlois and JC. Latombe. Numerical potential field techniques for robot path planning. In *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, vol 22 no 2 , 1992.
- [BF94] J. Barraquand and P. Ferbach. A penalty function method for constrained motion planning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego (USA), 1994.
- [BBB93] F. Ben Amar & Ph. Bidaud. Dynamic analysis of off-road vehicles. In *International Symposium on Experimental Robotics*, 1995.
- [BLP83] R.A. Brooks and R. Lozano-Perez. A subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation. In *8th Int. Joint. Conference on Artificial Intelligence*, Karlsruhe (Germany), 1983.
- [Can89] J. Canny. On computability of fine motion plans. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale (USA), 1989.
- [CLMF94] M. Cherif, Ch. Laugier, C. Milesi-Bellier, and B. Faverjon. Planning the motions of an all-terrain vehicle by using both geometric and physical models In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San-Diego (USA), 1994.
- [CH92] P. C. Chen and Y. Hwang. Sandros: a motion planner with performance proportional to task difficulty. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice (France), 1992.

- [CML94] I. Collin, D. Meizel and N. Lefort-Piat. Local maps design and task function approach for mobile robots. In *IEEE International Conference on Robots and Systems*, Munich (Germany), 1994.
- [RLN94] F. De la Rosa, C. Laugier and J. Najera. Planning motion strategies in the contact space under geometric uncertainty constraints. In *Revue d'Intelligence Artificielle, vol 8 no 3*, 1994.
- [Don88] B.R. Donald. A geometric approach to error detection and recovery for robot motion planning with uncertainty. In *Artificial Intelligence, vol 37*, 1988.
- [ELP86] M. Erdmann and T. Lozano-Perez. On multiple moving objects. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco (USA), 1986.
- [Fav86] B. Faverjon. Object Level programming of industrial robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco (USA), 1986.
- [FT90] B. Faverjon, P. Tournassoud. A practical approach to motion planning for manipulators with many ddl. In *5th International Symposium on Robotic Research*, 1990.
- [GM86] D. Gaw & A. Meystel. Minimum-time navigation of an unmanned mobile robot in a 2-1/2 world with obstacles. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco (USA), 1986.
- [PRK93] R. Pissard-Gibollet P. Rives and K. Kapellos. Development of a reactive mobile robot using real time vision. In *International Symposium on Experimental Robotics, Kyoto (Japan)*, 1993.
- [GJK88] E.G. Gilbert, D.W. Johnson and S.S. Keerthi. A fast procedure for computing the distance between Objects. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol 4, 1988.
- [Gou84] L. Gouzenes. Strategies for solving collision-free trajectories problems for mobile or manipulator robot. *International Journal of Robotics Research*, vol 3 no 4, 1984.
- [GG95] G. Gupta and Z. Guo. Motion planning for many degrees of freedom: sequential search with backtracking. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol 11 No 6, 1995.
- [HSS84] JE. Hopcroft, JT. Schwartz and M. Sharir. On the complexity of motion planning for multiple independant objects: PSPACE-hardness of the warehouseman's problem. *International Journal of Robotics Research*, vol 3, 1984.

- [KZ86] K. Kant and S. Zucker. Toward efficient trajectory planning: the path velocity decomposition. *International Journal of Robotics Research*, vol 5 no 3, 1986.
- [Kha86] O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, vol 5 no 1, 1986.
- [KL94] L. Kavraki and JC Latombe. Randomized preprocessing of configuration space for fast path planning . In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego (USA), 1994.
- [KKL96] L. Kavraki, L. Kolountzakis and JC. Latombe. Analysis of probabilistic roadmaps for path planning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis (USA), 1996.
- [Kon91] K. Kondo. Motion planning with six degrees of freedom by multistrategic bidirectional heuristic free-space enumeration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol 7 No 3, 1991.
- [Kha96] M. Khatib. *Contrôle du mouvement d'un robot mobile par retour sensoriel*. PhD thesis, LAAS-CNRS, Toulouse, France, December 1996.
- [KL92] Y. Koga and JC Latombe. Experiments on dual-arm manipulation planning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice (France), 1992.
- [KL94] Y. Koga and JC Latombe. On multi-arm manipulation planning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego (USA), 1994.
- [Lat91] J.C Latombe. *Robot Motion Planning*. Kluwer Pub., 1991.
- [LJTM94] J.P. Laumond, P. Jacobs, M. Taïx, and R. Murray, A motion planner for nonholonomic mobile robot. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol 10 no 5, 1994.
- [Lau88] C. Laugier. Planning robot motions in the SHARP system. In *CAD-based programming ofr sensory robots*, vol 50, 1988.
- [LH95] S. La Valle. and S. Hutchinson. Evaluating motion strategies under non-deterministic or probabilistic uncertainties in sensing and control. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis (USA), 1996.
- [LH96] S. La Valle and S. Hutchinson. Optimal motion planning for multiple robots having independants goals. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis (USA), 1996.

- [LL95] A. Lazanas and J.C. Latombe. Motion planning with uncertainty: a landmark approach. *Artificial Intelligence*, 76:287–317, 1995.
- [LM91] A. Liegeois and C. Moignard. Optimal motion planning of a mobile robot on a triangulated terrain model. In *Lecture Notes in Computer Science*, 708, Laugier Eds, Springer-Verlag, 1993.
- [LM96] M.C. Lin and D. Manocha. Collision detection: Algorithms and Applications. In *Algorithms for Robotic Motion and Manipulation (WAFR)*, 1996.
- [Loz81] T. Lozano-Perez. Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, vol 11 no 10, 1981.
- [Loz87] T. Lozano-Perez. A simple motion planning algorithm for general robot manipulators. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol 3, no 3, 1987.
- [LMT84] T. Lozano-Perez, M.T. Mason, and R.H. Taylor. Automatic synthesis of fine motion strategies for robots. *The International Journal of Robotics Research*, 3(1):3–24, 1984.
- [MVA90] I. Mazon, P. Violero and R. Alami. Automatic Planning of Pick and Place Operations in Presence of Uncertainties. In *IEEE International Workshop On Intelligent Robots and Systems, Tsuchiura, Japan*, July 1990.
- [MLF93] Ch. Milési-Bellier, Ch. Laugier & B. Faverjon. A kinematic simulator for motion planning of a mobile robot on a terrain. In *IEEE International Conference On Intelligent Robots and Systems*, Yokohama (Japan), 1993.
- [OLP89] P. O’Donnell and T. Lozano-Perez. Deadlock-Free and Collision-free coordination of two robot manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale (USA), 1989.
- [OS95] M. Overmars and P. Svestka. A Probabilistic learning approach to motion planning. In *Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR94)*, K. Goldberg et al (Eds), AK Peters, 1995.
- [PS95] L.A. Page and A. Sanderson. Robot motion planning for sensor-based control with uncertainties. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya (Japan), 1995.
- [SS83] J.T. Schwartz and M. Sharir. On the piano’s mover problem I: the case of a two dimensional rigid body amidst polygonal barriers. In *Communications on Pure and Applied Mathematics*, no 36, 1983.
- [SC90] Z. Shiller & J.C. Chen. Optimal motion planning of autonomous vehicles in three dimensional terrains. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati (USA), 1990.

- [SO95] P. Svestka, M. Overmars. Coordinated motion planning for multiple car-like robots using probabilistic roadmaps. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya (Japan), 1995.
- [TFL94] H. Takeda, C. Facchinetti, and 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, 1994.
- [ZL91] D. Zhu and J.C. Latombe. New heuristic algorithms for hierarchical path planning. In *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol 7 no 1, 1991.

Travaux et Publications

Revue Scientifiques

- [1] R. Chatila, S. Lacroix, T. Siméon, M. Herrb.
Planetary exploration by a mobile robot: mission teleprogramming and autonomous navigation.
Autonomous Robots Journal, Vol. 2, n° 4, p 333-344, 1995. (LAAS report 95270).
- [2] T. Siméon, R. Alami.
Planning robust motion strategies for a mobile robot in a polygonal world.
Revue d'Intelligence Artificielle, Vol. 8, n° 4, p383-401, December 1994. (LAAS report 95078).

Conférences Internationales

- [3] C. Nissoux, T. Simeon, JP Laumond. Visibility based probabilistic roadmaps.
IEEE International Conference on Robots and Systems, Corée, October 1999. (LAAS report 99057, february 1999).
- [4] S. Leroy, J.-P. Laumond, T. Simeon.
Multiple path coordination for mobile robots: a geometric algorithm *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, Stockholm (Sweden), August 1999.

- [5] A. Hait, T. Simeon, M. Taix.
Robust motion planning for rough terrain navigation. *IEEE International Conference on Robots and Systems*, Corée, October 1999. (LAAS report 98419, october 1998).
- [6] C. Van-Geem, T. Simeon, JP. Laumond.
Mobility analysis for feasibility studies in CAD models of industrial environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroy, April 1999. (LAAS report 98417, october 1998).
- [7] T. Simeon, J.-P. Laumond, S. Leroy.
A collision checker for car-like robots coordination. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Brussels, April 1998. (LAAS report 97423, october 1997).
- [8] T. Simeon, J.-P. Laumond, S. Leroy.
Computing good holonomic collision-free paths to steer nonholonomic mobile robots. *IEEE International Conference on Robots and Systems, Grenoble (France)*, September 1997 (LAAS report 97019, January 1997).
- [9] A. Hait, T. Simeon, M. Taix.
A Landmark-based Motion Planner for Rough Terrain Navigation. *4th International Symposium on Experimental Robotics, Barcelona*, June 1997 LAAS report 97214, February 1997).
- [10] M. Khatib, T. Simeon
Sensor-based motion planning and control for the Hilare mobile robot. *IEEE International Conference on Robots and Systems, Grenoble (France)*, Video session, September 1997. (LAAS report 97554)
- [11] M. Khatib, B. Bouilly, T. Simeon, R. Chatila.
Indoor Navigation with Uncertainty using Sensor-based Motions. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque (USA)*, May 1997. (LAAS report 97169)
- [12] C. Chatila, S. Lacroix, M. Devy and T. Simeon.
Autonomous outdoor mobile robot navigation. The EDEN project. *Advance REsearch Workshop on Autonomous Robotic System, Coimbra (Portugal)*, June 1997. (LAAS report 97263)
- [13] R. Chatila, S. Lacroix, S. Betge-Brezetz, M. Devy, T. Siméon
Autonomous mobile robot navigation for planet exploration: The EDEN project. *Workshop WT1 "Planetary Rover Technology and Systems", Minneapolis(USA)*, April 1996 (LAAS report 96031, March 1996).

- [14] A. Hait, T. Siméon.
Motion planning on rough terrain for an articulated vehicle in presence of uncertainties. *IEEE International Conference on Robots and Systems, Osaka (Japan)*, November 1996. (LAAS report 96088, March 1996).
- [15] B. Bouilly, T. Siméon.
A sensor-based motion planner for mobile robot navigation with uncertainty. *International Workshop on Reasoning with Uncertainty in Robotics (RUR'95)*, Amsterdam, December 1995. (LAAS report 95422, October 1995).
- [16] B. Bouilly, T. Siméon, R. Alami.
A numerical technique for planning motion strategies for a mobile robot in presence of uncertainties. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya (Japan)*, May 1995. (LAAS report 94385, October 1994).
- [17] R. Alami, J.-P. Laumond, T. Siméon
Two Manipulation planning algorithms. *The First Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. (WAFR'94)*, San Francisco (USA), February 1994. edited by A.K. Peters Pub, Boston MA. 1994 (LAAS report 94239, February 1994)
- [18] R. Alami, T. Siméon.
Planning robust motion strategies for a mobile robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego (USA)*, May 1994. (LAAS report 93005, October 1993).
- [19] F. Nashashibi, P. Fillatreau, B. Dacre-Wright, T. Siméon.
3D autonomous navigation in a natural terrain. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego (USA)*, May 1994. (LAAS report 93382, October 1993)
- [20] S. Lacroix, R. Chatila, S. Fleury, M. Herrb, T. Siméon.
Autonomous navigation in outdoor environment: adaptive approach and experiment. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego (USA)*, May 1994. (LAAS report 94052, October 1993).
- [21] F. Richard, H. Chochon, O. Faugeras, P. Grandjean, T. Siméon.
Autonomous navigation for a planetary rover. *2nd International Symposium on Missions, Technologies and Design of Planetary Rovers, Moscow (Russia)*, May 1994. (LAAS report 94539, October 1994).
- [22] T. Siméon, B. Dacre Wright.
A Practical Motion Planner for All-Terrain Mobile Robots. *IEEE International Conference on Robots and Systems, Yokohama (Japan)*, July 1993. (LAAS report 92475, December 1992).

- [23] B. Dacre Wright, T. Siméon.
Free Space Representation for a mobile robot moving on a rough terrain. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta (USA)*, May 1993. (LAAS Report 92350, October 1992).
- [24] T. Siméon, M. Taix, P. Juhel and J.P. Laumond.
Polyhedron placement for planar motions. In *8th International CARs&FOF Conference, Metz*, August 1992. Reprinted in *F. Vernadat, M. Cotsaftis Eds, Elsevier*, 1993. (LAAS Report 92228).
- [25] T. Siméon.
Motion planning for a non holonomic mobile robot on three dimensional terrains. In *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Osaka (Japan)*, November 1991. Reprinted in *C. Laugier Ed., Springer-Verlag*, 1993 (LAAS Report 91290, August 1991).
- [26] R. Chatila, J.P. Laumond and T. Siméon.
Motion Planning for a Planetary Rover. In *First IARP International Workshop in Robotics on Space, Pisa (Italy)*, June 1991. (LAAS Report 91242).
- [27] R.P. Paul, J. Funda, T. Siméon and T. Lindsay.
Teleprogramming for Autonomous underwater Manipulation Systems. In *Intervention '90 of the Marine Technology Society*, June 1990.
- [28] R. Alami, T. Siméon and J.P. Laumond.
A geometrical Approach to planning Manipulation Tasks. The case of discrete placements and grasps. In *Robotics Research: The Fifth International Symposium, Tokyo (Japan)*, August 1989. (LAAS Report 89045).
- [29] J.P. Laumond, T. Siméon.
Motion Planning for a two degrees of freedom mobile robot with towing. In *IEEE International Conference on Control and Applications, Jerusalem*, April 1989. (LAAS Report 89148).
- [30] J.P. Laumond, T. Siméon, R. Chatila and G. Giralt.
Trajectory Planning and Motion Control of Mobile Robots. In *IUTAM/IFAC Symposium on Dynamics and Controlled Mechanical Systems, Zurich*, June 1988. Reprinted in *G. Schweitzer, M. Mansour Eds, Springer Verlag*, 1989. (LAAS report 88215).
- [31] T. Siméon.
Planning Collision Free Trajectories by a Configuration Space Approach. In *Geometry and Robotics, Toulouse*, May 1988. Reprinted in *Lecture Notes in Computer Science, 391, Boissonnat and Laumond Eds, Springer Verlag*, 1989. (LAAS report 88161).

- [32] J.P. Laumond, T. Siméon, R. Chatila and G. Giralt.
Trajectory Planning and Motion Control of Mobile Robots. In *Geometry and Robotics, Toulouse*, May 1988. Reprinted in *Lecture Notes in Computer Science, 391, Boissonnat and Laumond Eds, Springer Verlag, 1989*. (LAAS report 87387).

Revue de vulgarisation

- [33] S.Lacroix, M. Ghallab, J.P.Laumond, T.Simeon
Intelligence artificielle et robotique. *Bulletin de l'AFIA, n27, pp.15-23, Novembre 1996*. (LAAS report 96528).

Congrès nationaux

- [34] R. Alami, T. Siméon.
Planification de trajectoires robustes en présence d'incertitudes.
In *Journées Planification et Contrôle de Mouvement du PRC-IA et GRECO Automatique, Toulouse*, January 1993.
- [35] T. Siméon, B. Dacre Wright.
Planification de trajectoires sur terrain accidenté.
In *Journées Planification et Contrôle de Mouvement du PRC-IA et GRECO Automatique, Toulouse*, January 1993.
- [36] T. Siméon.
Planification de trajectoires pour robot mobile sur terrain accidenté.
In *Journées Nationales du PRC Intelligence Artificielle, Grenoble*, September 1991. Reprinted in *Lecture Notes in Computer Science, 708, C. Laugier Eds, Springer Verlag, 1993*.

Thèse

- [37] T. Siméon.
Génération automatique de trajectoires sans collision et planification de tâches de manipulation en robotique.
Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, January 1989.

Rapports de Recherche

- [38] J. Funda, T. Siméon.
Teleprogramming: overcoming communication delays in remote manipulation. GraspLab report, University of Pennsylvania, 1990.
- [39] J.P. Laumond, T. Siméon, M. Taix and P. Juhel.
Placement d'un polyèdre sur un plan encombré de polyèdres. Rapport LAAS 91160, May 1991.

Rapports de Contrat

- [40] T. Siméon, C Van geem, JP. Laumond. Contrat LAAS-EDF. Rapport de phase 1. Rapport LAAS 97522, Decembre 1997.
- [41] Rapport Final du projet inter-Prc VIA.
Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 1996.
- [42] T. Siméon, A. Hait. Projet IARES: Sous Système GDA. Rapport final de fin de phase C. Rapport LAAS 96140, Mars 1996.
- [43] S. Lacroix, T. Siméon, R. Chatila. Projet IARES: Sous Système GDA. Tache 4.4: Stratégies de déplacement et de perception pour la navigation.
Rapport LAAS 94512, Décembre 1994.
- [44] T. Siméon, B. Bouilly. Projet IARES: Generation des déplacements autonomes. Etudes complémentaires sur la tache 4.5. Rapport LAAS 94359, Juillet 1994.
- [45] T. Siméon, B. Dacre Wright Planificateur de trajectoire sur terrain accidenté. Contrat MRE-Alcatel Alsthom. Rapport LAAS 94412, Janvier 94.
- [46] Etudes préminaires IARES sur la Generation des déplacements autonomes. Rapport intermédiaire LAAS 93272, Juillet 1993.
- [47] Etudes préminaires IARES sur la Generation des déplacements autonomes. Rapport final LAAS 93537, Décembre 1993.
- [48] R. Chatila, J.P. Laumond, T. Siméon. Projet VAP. Axe fonctionel: Génération des déplacements autonomes, Rapport 5.3F de fin de phase 5, Decembre 1992.
- [49] R. Chatila, J.P. Laumond, T. Siméon, M. Taix. Projet VAP. Thème 4: Génération des déplacements autonomes, Rapport 4.4F de fin de phase 4, Janvier 1992.
- [50] R. Chatila, J.P. Laumond, T. Siméon. Projet VAP. Thème 4: Génération des déplacements autonomes, Rapport 3.4F de fin de phase 3, Janvier 1991.

- [51] R. Chatila, J.P. Laumond, T. Siméon. Projet VAP. Thème 4: Génération des déplacements autonomes, Rapport 2.4F de fin de phase 2, Mai 1990.
- [52] R. Chatila, J.P. Laumond, T. Siméon. Projet VAP. Thème 4: Génération des déplacements autonomes, Rapport 1.4F de fin de phase 1, Janvier 1990.

Projets et Contrats

Les différents thèmes de recherche sur lesquels je travaille m'ont amené à participer aux projets suivants:

1 Projets Européens

- Projet **VAP/RISP** (1989-1993) - Projet EUREKA **IARES** (1993-1996)

J'ai participé, au sein du groupement RISP (Robotique d'intervention sur Site Planétaire qui regroupait dans un partenariat avec le CNES plusieurs organismes de recherche (CEA, CNRS, INRIA ONERA) sur le thème 4 "Génération des Déplacements Autonomes" [52, 51, 50, 49, 48].

Après 1993, les études se sont poursuivies dans le cadre du projet IARES auquel ont participé la France (groupement RISP et industriels - Matra-Marconi, Alcatel-Espace, Sagem, Cybernetix, ITMI, ROLL -), ainsi que la Russie, la Hongrie et l'Espagne, en vue de la réalisation d'un démonstrateur sol d'un robot d'exploration planétaire. J'ai assuré la responsabilité pour le LAAS, du sous-système Génération des Déplacements Autonomes, en liaison avec Alcatel-Espace [46, 47, 44, 43, 42, 21].

- Projet ESPRIT3 BRA **PROMotion** (1992-1995)

Ce projet a réuni plusieurs groupes de recherches dans les domaines de la robotique (LAAS, Institut de Cybernetique de Barcelone), de la géométrie

algorithmique (INRIA Sophia-Antipolis, Université d'Utrecht), des mathématiques (ENS Paris), et de la Théorie du Contrôle (Université la Sapienza de Rome) sur le thème de la planification du mouvement en robotique

J'ai participé avec J.P. Laumond (responsable LAAS et coordinateur) à la phase d'élaboration ainsi qu'aux divers workshops et réunions de revue de ce projet.

- Projet ESPRIT4 LTR **MOLOG** (1999-2002)

L'objectif du projet MOLOG (Motion for LOGistics) est d'adapter la technologie issue des travaux sur l'algorithmique du mouvement en robotique, à un contexte de logistique industrielle. Dans ce contexte, il s'agit d'automatiser les études de faisabilité d'opérations de maintenance dans des installations industrielles complexes, telles que les transport de charges lourdes ou l'acheminement de matériel par divers engins de manutention.

Le projet regroupe deux partenaires industriels (Cadcentre -UK- et EDF) et deux partenaires académiques Utrecht et le LAAS. J'assume la responsabilité du site LAAS.

2 Contrats Industriels

- Contrat **LAAS/EDF-DER** (1998)

sur l'application de techniques de la planification de mouvement à des problèmes de maintenance de centrales. Le travail porte sur l'adaptation d'algorithmes probabilistes à des environnements complexes d'installations industrielles [6, 40].

3 Conventions de recherche

- Projet M.R.E. “Modélisation Géométrique et Modélisation de mouvements pour robots mobiles tout terrain” (1993-1994).

J'ai assuré, coté LAAS, l'animation du projet dont l'objectif était l'intégration d'algorithmes de planification développés par Alcatel-Alsthom Recherche, l'INRIA et le LAAS dans le logiciel ACT développé par Aleph Technologie [45].

- Projet du PRC Intelligence Artificielle:

Participation au groupe “Raisonnement Géométrique pour la planification de mouvements [36, 34, 35].

– Projet inter-PRC *VIA*:

Projet portant sur la “Perception et raisonnement géométrique pour le mouvement dans le monde réel” qui regroupait plusieurs projets INRIA (Sophia, Rennes, Grenoble) et le LAAS. Ma participation concernait les aspects planification avec incertitude [41].

