

## *Projet SHARP*

*Programmation automatique et systèmes décisionnels en  
robotique*

*Rhône-Alpes*

THÈME 3B

*R* *apport*  
*d'Activité*

2001



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>5</b>
3.1	Planification de mouvements . . . . .	5
3.2	Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement. . . . .	8
3.3	Synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D . . . . .	9
3.4	Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>13</b>
4.1	CAO-Robotique . . . . .	13
4.2	Route automatisée . . . . .	14
4.3	Réalité virtuelle . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>15</b>
5.1	Aladyn3D . . . . .	15
5.2	OpenPl . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>16</b>
6.1	Planification de mouvement . . . . .	16
6.1.1	Contraintes cinématiques . . . . .	16
6.1.2	Incertitudes liées à la localisation . . . . .	18
6.1.3	Contraintes dynamiques et connaissances partielles . . . . .	21
6.2	Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement . . . . .	22
6.2.1	Développement d'un module de localisation absolue . . . . .	23
6.2.2	Prédiction/traitement des collisions potentielles . . . . .	24
6.3	Synthèse du mouvement virtuel et interaction 3D . . . . .	25
6.3.1	Modèles Physiques et Méthodes Numériques de base . . . . .	25
6.3.2	Interactions 3D . . . . .	31
6.3.3	Simulateurs Médicaux . . . . .	32
6.3.4	Synthèse du mouvement . . . . .	33
6.4	Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique . . . . .	37
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>39</b>
7.1	Actions de développement Praxitèle et LaRA . . . . .	39
7.2	Projet Priamm "Studio virtuel" . . . . .	40
7.3	Robosoft . . . . .	40
7.4	Carsense . . . . .	41
7.5	Arcos 2003 . . . . .	41
7.6	Biba . . . . .	41

<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>41</b>
8.1	Actions régionales et nationales . . . . .	41
8.2	Relations bilatérales internationales . . . . .	42
8.2.1	Russie et Asie Centrale . . . . .	42
8.2.2	Pacifique et Asie du Sud . . . . .	42
8.2.3	Amérique du Nord . . . . .	43
8.2.4	Amérique du Sud et Amérique Centrale . . . . .	43
8.3	Accueils de chercheurs étrangers . . . . .	44
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>44</b>
9.1	Animation de la communauté scientifique . . . . .	44
9.2	Enseignements universitaires . . . . .	44
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	45
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>45</b>

# 1 Composition de l'équipe

## Responsable scientifique

Christian Laugier [DR Inria]

## Secrétariat

Véronique Roux [AJT Inria]

Dominique Vitiello

## Personnel Inria

Thierry Fraichard [CR]

Sepanta Sekhavat [CR]

## Personnel CNRS<sup>1</sup>

Emmanuel Mazer [DR]

## Ingénieur expert Inria

Juan-Manuel Ahuactzin Larios [2001-2004]

Olivier Lebeltel [à partir de mai 2000]

Kamel Mekhnacha [à partir de octobre 2000]

## Collaborateur extérieur

Pierre Bessière [CR CNRS au laboratoire Leibniz de l'Imag<sup>2</sup>]

## Chercheurs doctorants

Diego d'Aulignac [allocataire MENESR]

Christophe Coué [boursier Inria]

Ruben Garcia Senen [boursier du gouvernement mexicain, CONACYT/SFERE]

Frédéric Large [boursier Inria]

César Mendoza Serrano [boursier du gouvernement mexicain, CONACYT/SFERE]

Cédric Pradalier [allocataire MENESR]

David Raulo [allocataire MENESR]

Kenneth Sundaraj [boursier ambassade de France]

Jorge Hermosillo Valadez [boursier du gouvernement mexicain, CONACYT/SFERE]

## Stagiaires

Pierre Billiau [ingénieur ENSIMAG]

Habib Bouaziz-Viallet [ingénieur CNAM]

Anant Choksuriwong [maîtrise UJF]

Moustapha Dakkak [DEA IVR]

Sébastien Fave [licence UJF]

Ruth Lezama Morales [Universidad de las Américas, Puebla (MX)]

Francisco Moo Mena [Univ. Autonome du Yucatan (MX)]

Priscilla Pek [NTU]

Yann Petiot [maîtrise UJF]

Cédric Pradalier [DEA IVR]

Salim Renane [DEA SIPT]

Emy Sukowo [NTU]

Yoann Toussaint [DEUG Univ. de Savoie]

---

<sup>1</sup>Centre Nationale de la Recherche Scientifique.

<sup>2</sup>Inst. d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble.

Yan Ushanoff [ingénieur CNAM]  
Alejandro Vargas Hernandez [master ITESM, Cuernavaca (MX)]  
Stéphane Viera [ingénieur CNAM]

### Visiteurs

Zvi Shiller [professeur à University of California, Los Angeles]  
Danwei Wang [professeur à NTU, Singapour]

## 2 Présentation et objectifs généraux

Sharp est un projet de recherche commun entre l'Inria, le CNRS<sup>3</sup>, l'INPG<sup>4</sup>, l'UJF<sup>5</sup> Grenoble, depuis 1992 ; il est localisé à l'Inria Rhône-Alpes, et il appartient également au laboratoire Gravir<sup>6</sup> de la fédération Imag.

Le programme scientifique du projet Sharp porte sur le thème suivant : “modélisation et synthèse du mouvement et des interactions 3D en robotique”. Le terme “robotique” revêt ici un caractère particulier, dans le sens où il inclut à la fois des machines physiques (communément appelées “robots”) capables d'actions autonomes dans le monde réel, et des agents mobiles ou articulés (où “robots virtuels”) possédant des capacités de mouvements propres leur permettant d'évoluer de manière dite “intelligente” dans un monde virtuel soumis à des lois physiques semblables à celles du monde réel. Ce programme de recherche met l'accent sur les composantes “modélisation”, “autonomie du mouvement”, et “interaction physique”. Les principales applications visées sont celles de la CAO-Robotique, de la route automatisée, de la robotique d'intervention, de la santé, et des environnements virtuels dynamiques. Le programme de recherche associé s'articule autour des principaux axes suivants :

- Planification de mouvements : conception et implantation d'algorithmes de planification de mouvements ayant la capacité de prendre en compte à la fois les contraintes classiques de non collision, et celles provenant de la nature physique du monde dans lequel les robots (réels ou virtuels) évoluent (en particulier : contraintes cinématiques et dynamiques, incertitude) ;
- Architectures décisionnelles pour le mouvement : méthodologie pour le développement de structures décisionnelles pour le contrôle “intelligent” des mouvements, actions, et interactions d'agents évoluant dans des environnements dynamiques peu ou pas connus a priori ;
- Synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D : modèles et algorithmes pour le traitement en temps réel ou en temps interactif de la dynamique et des interactions physiques de corps complexes en mouvement dans un monde virtuel (mouvements divers, déformations, collisions, changements interactif de topologie, interaction haptique) ;
- Outils probabiliste pour la géométrie : développement d'outils de modélisation et de calcul probabiliste pour la géométrie, afin de traiter correctement (*i.e.* en exploitant le cadre formel de la théorie des probabilités et du calcul bayésien) les incertitudes et

---

<sup>3</sup>Centre National de la Recherche Scientifique

<sup>4</sup>Institut National Polytechnique de Grenoble

<sup>5</sup>Université Joseph Fourier

<sup>6</sup>Laboratoire informatique Graphique, Vision, et Robotique, UMR CNRS 5527

leurs impacts sur les problèmes inverses et sur les problèmes d'interprétation de données sensorielles (sujet traité en collaboration avec le Laboratoire Leibniz de l'Imag).

L'activité de recherche précédente est à la fois valorisée et fertilisée par des activités plus appliquées qui visent au développement de solutions à des problèmes industriels. Plusieurs prototypes de recherche et expérimentations réelles (*e.g.* sur des robots, des véhicules, ou des systèmes de Réalité Virtuelle) sont ainsi réalisés en relation avec des industriels et les moyens robotique de l'Inria Rhône-Alpes ; certains de ces prototypes ont déjà donné lieu à des transferts de technologies en CAO-Robotique, et dans le domaine des effets spéciaux en vidéo professionnelle.

### 3 Fondements scientifiques

Le thème central du projet Sharp est celui de "la modélisation et la synthèse du mouvement et des interactions 3D en robotique". Ce thème de recherche est abordé en mettant l'accent sur les composantes "modélisation", "autonomie du mouvement", et "interaction physique". Ceci se traduit par l'étude des quatre sujets principaux suivants : planification de mouvements, architecture décisionnelle pour l'autonomie du mouvement, synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D, outils probabiliste pour la géométrie.

#### 3.1 Planification de mouvements

La planification de mouvement est un problème fondamental largement traité en Robotique [Lat90]. Notre volonté de produire des plans exécutables dans des environnements réels nous amène à prendre en compte de façon explicite des contraintes autres que la simple contrainte géométrique de non-collision habituellement considérée. Ces contraintes découlent d'une part de la nature physique du monde réel (cinématique et dynamique des systèmes robotiques considérés, interactions de contacts, incertitudes), et d'autre part de la nature des environnements considérés (systèmes multi-robots, obstacles mobiles, environnements évolutifs, etc.). Ces différentes contraintes posent des problèmes particuliers pour lesquels nous nous attachons à trouver des solutions, tout en cherchant à maîtriser la complexité algorithmique induite. Nos travaux de recherche portent principalement sur les trois volets suivants du problème : les contraintes cinématiques, les contraintes additionnelles de l'environnement, et l'incertitude géométrique.

**Contraintes cinématiques.** Les robots mobiles à roue, sont tous soumis à la contrainte de roulement sans glissement de leurs roues sur le sol. Cette contrainte se répercute par une contrainte cinématique dite "nonholonome" sur les mouvements instantanés exécutables par le système. Ce problème intéresse tout particulièrement la communauté robotique depuis qu'il est apparu pour la première fois en 1986 [Lau86]. La nonholonomie contraint la forme géométrique

---

[Lat90] J.-C. LATOMBE, *Robot motion planning*, Kluwer Academic Press, 1990.

[Lau86] J.-P. LAUMOND, « Feasible trajectories for mobile robots with kinematic and environment constraints », *in: Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, p. 346-354, Amsterdam (NL), 1986.

des mouvements que peut effectuer le système. Cela dit, pour une grande majorité des robots mobiles considérés dans la littérature, il existe une bijection entre le chemin suivi par le système dans son espace de configuration de dimension  $n$  et la courbe 2D effectuée dans le plan de travail par un point caractéristique du robot. On peut alors raisonner dans le plan. Cependant, les robots mobiles sont aussi soumis à d'autres types de contrainte tels que l'existence d'une borne sur l'angle de braquage des roues avant d'une voiture, borne sur les vitesses et accélérations de braquage et linéaires, etc. Certaines de ces contraintes peuvent être traduites géométriquement au niveau du chemin 2D du point caractéristique du robot. Ce traitement nécessite quelquefois (c'est souvent le cas des bornes dans l'espace des commandes) un renforcement des contraintes ou la prise en compte d'un modèle plus fin du robot. Dans nos travaux, nous nous sommes efforcés d'enrichir le problème de la planification nonholonome dans le cas des robots mobiles en y intégrant d'autres contraintes fréquentes pour ces systèmes. Dans le cas de robots de type "voiture", nous utilisons des chemins dont la courbure est continue et dont la dérivée de la courbure est bornée<sup>7</sup>. Les chemins ainsi obtenus sont quasi-optimaux et présentent un grand intérêt pratique [FSD99]. Dans le cas du véhicule "Cycab" de l'Inria<sup>8</sup> [LB97], qui possède un modèle cinématique très particulier du fait de la rotation couplée de ses roues avant et arrière (ce qui permet d'accroître la manœuvrabilité du système dans des environnements fortement contraints), il faut faire face à des problèmes nouveaux de modélisation du système et de formalisation pour pouvoir résoudre le problème de planification de mouvement associé. Notre approche consiste à utiliser les outils de l'algèbre différentielle, et plus particulièrement ceux liés au concept de "platitude différentielle" [FLMR95], afin de pouvoir ramener le problème de la planification pour ce système 4D à un problème de recherche de courbes planes, comme c'est le cas pour les robots de type voitures.

**Contraintes additionnelles de l'environnement.** Comme cela a été mentionné précédemment, un robot mobile est soumis à des contraintes nonholonomes, se traduisant par une modélisation de la cinématique du système à l'aide d'une famille d'équations différentielles non intégrables. Par ailleurs, l'environnement dans lequel évolue le robot est à l'origine de contraintes qui ne peuvent généralement être intégrées directement dans cette formalisation, en particulier : la présence dans l'environnement d'obstacles ou d'autres robots, les interactions roue-sol pour un robot évoluant sur un terrain accidenté ou à adhérence irrégulière, etc.

---

<sup>7</sup>la continuité de courbure correspond à la continuité de la variation de l'angle de braquage des roues avant, tandis que la borne sur la dérivée de la courbure correspond au fait que la vitesse de variation de l'angle de braquage est limitée.

<sup>8</sup>Plate-forme expérimentale de l'Inria commercialisée par la société Robosoft, et au développement de laquelle le projet Sharp a largement contribué.

- 
- [FSD99] T. FRAICHARD, A. SCHEUER, R. DESVIGNE, « From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics*, p. 585–590, Tokyo (JP), octobre 1999.
- [LB97] L. LISOWSKI, G. BAILLE, « Specifications of a small electric vehicle : modular and distributed approach », *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Grenoble (FR), septembre 1997.
- [FLMR95] M. FLIESS, J. LÉVINE, P. MARTIN, P. ROUCHON, « Flatness and Defect of Nonlinear Systems : Introductory Theory and Examples », *Int. Journal of Control* 61, 6, 1995, p. 1327–1361.

C'est pourquoi, il est généralement nécessaire d'utiliser des planificateurs dits "locaux" aptes à prendre en compte les diverses contraintes de déplacement, et de les combiner avec des schémas algorithmiques dits "globaux" pour permettre l'évitement des obstacles. Ceci peut être fait soit par des méthodes de type "roadmap", soit par modifications successives d'un chemin sans collision calculé auparavant. Le cas de la locomotion en milieu tout-terrain est un cas typique de la difficulté qu'il y a à modéliser les équations différentielles de mouvement du robot de manière "closed form". Ceci s'explique par la présence de plusieurs facteurs qui entrent en considération, notamment la dynamique du robot, la cinématique de la chaîne du châssis si le robot est articulé, les interactions de contact roue-sol (glissement, roulement, déformation des surfaces de contact), et enfin le relief du terrain. Ceci signifie que des modèles mixtes (géométriques et physiques) couplés avec des techniques de calcul appropriées doivent être utilisés au niveau de la planification de mouvements, et que le schéma "local-global" précité doit être soigneusement adapté pour pouvoir maîtriser la forte complexité algorithmique induite [CL95].

**Incertitude géométrique.** Dans certains cas, et notamment pour la navigation en robotique mobile, il est important que les chemins calculés soient "sûrs", *i.e.* pour lesquels le robot est assuré d'atteindre son but malgré les incertitudes qui peuvent affecter le robot (incertitudes sur la position du robot ou des obstacles, sur le résultat d'une commande appliquée au robot, sur une mesure capteur, etc.). En particulier, dans le cas d'un robot mobile équipé d'un système de localisation relative (odométrie), l'incertitude sur la position du robot, de par sa nature cumulative, peut devenir telle qu'elle rende impossible le suivi d'un chemin donné. Il devient donc nécessaire de considérer ces incertitudes dès la planification, afin d'engendrer des solutions sûres; ceci se traduit en pratique par l'introduction de "stratégies de mouvement" qui peuvent inclure l'utilisation de capteurs, et de mouvements gardés ou compliants. Les premiers travaux dans ce domaine ont été réalisés dans le domaine de l'assemblage de pièces mécaniques. Un premier type d'approche consiste à calculer une séquence d'assemblage en supposant l'incertitude nulle, puis à modifier la séquence ainsi obtenue afin de prendre en compte l'incertitude. Ce type d'approche se prête bien à l'assemblage : la structure du plan final est, en général, proche de celle du plan initial, grâce à la présence de "guides géométriques" engendrés par les surfaces en contact. Ce n'est cependant pas le cas en robotique mobile. Une autre approche consiste à utiliser le concept de "pré-image" [LPMT84], *i.e.* l'ensemble des configurations à partir desquelles une commande donnée permet d'atteindre à coup sûr un objectif donné. La planification par chaînage arrière de pré-images intègre l'incertitude directement dans le processus de planification, mais elle pose des problèmes de complexité algorithmique tels que cela a limité son utilisation à des cas très simples. Notre objectif est d'aborder la prise en compte de l'incertitude dans des cas plus réalistes (robot non ponctuel et non-holonomes, mouvements non rectilignes, etc.), ce qui nous amène à développer des modèles d'incertitude

---

[CL95] M. CHERIF, C. LAUGIER, « Motion Planning of Autonomous Off-Road Vehicles Under Physical Interaction Constraints », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya (JP), mai 1995.

[LPMT84] T. LOZANO-PEREZ, M. T. MASON, R. H. TAYLOR, « Automatic synthesis of fine motion strategies for robots », *Int. Journal of Robotics Research* 3, 1, 1984, p. 3-24.

plus complexes et de nouvelles techniques de planification [DIRLN96,FM98]

### 3.2 Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement.

Il est maintenant acquis que l'autonomie de mouvement dans un monde dynamique nécessite de passer par le couplage de deux types de fonctions : des “fonctions délibératives”, dotées de capacités de modélisation et de raisonnement à différents niveaux d'abstraction, et des “fonctions réactives”, qui privilégient le temps de réaction à un événement donné (l'impératif temps réel implique souvent des capacités de raisonnement plus réduites, voire nulles). Le problème abordé est alors celui du développement d'une architecture de contrôle visant à doter un véhicule de la capacité de se déplacer de façon autonome dans un environnement dynamique partiellement connu. Comme indiqué précédemment, ceci implique de coupler de manière appropriée des fonctions délibératives qui utilisent des modèles et des raisonnements variés, avec des fonctions réactives qui utilisent des données de capteurs et des comportements réactifs avec des constantes de temps différentes. Ce couplage se réalise par le biais d'une “architecture de contrôle” qui gère les interactions entre ces différentes fonctions. Trois grandes classes d'approches existent dans la littérature : délibérative [Nil84], réactive [Bro90], et hybride [ACF<sup>+</sup>98]. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser une approche de type hybride à trois composantes (Fonctionnelle, Exécutive, Décisionnelle) [LGF<sup>+</sup>98], permettant de mieux gérer les contraintes de temps réel ainsi que le couplage des niveaux délibératifs et réactifs. L'idée de base, consiste à utiliser la notion de “manœuvre type” adaptée à un objectif et à un type de situation donnés (un “contexte”). Le principe consiste à disposer d'un ensemble de schémas de contrôle (ou “manœuvre asservie à des capteurs”) associés à chaque contexte (*e.g.* parking automatique, évitement d'obstacle, etc.), et paramétrés par des informations capteurs (*e.g.* vitesse du véhicule, distance aux obstacles, etc). Cette approche est bien adaptée au contexte des véhicules automatiques en environnement partiellement structuré pour lesquels il semble exister un nombre raisonnable de schémas différents ; elle permet d'intégrer correctement les différentes couches décisionnelles tout en assurant un meilleur contrôle des mouvements exécutés par le véhicule (trajectoire, vitesses, accélérations).

- 
- [DIRLN96] F. DE LA ROSA, C. LAUGIER, J. NÁJERA, « Robust Path Planning in the Plane », *IEEE Trans. Robotics and Automation* 12, 2, avril 1996, p. 347–352.
- [FM98] T. FRAICHARD, R. MERMOND, « Path planning with uncertainty for car-like robots », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1, p. 27–32, Leuven (BE), mai 1998.
- [Nil84] N. J. NILSSON, « Shakey the Robot », *rapport de recherche n°347*, Artificial Intelligence Center, SRI International, Menlo Park (CA), 1984.
- [Bro90] R. A. BROOKS, « A Robust Layered Control System for a Mobile Robot », *in: Readings in Uncertain Reasoning*, G. Shafer et J. Perl (éditeurs), Morgan Kaufmann, 1990, p. 204–213.
- [ACF<sup>+</sup>98] R. ALAMI, R. CHATILA, S. FLEURY, M. GHALLAB, F. INGRAND, « An architecture for autonomy », *Int. Journal of Robotics Research* 17, 4, avril 1998, p. 315–337, Special issue on integrated architectures for robot control and programming.
- [LGF<sup>+</sup>98] C. LAUGIER, P. GARNIER, T. FRAICHARD, I. PAROMTCHIK, A. SCHEUER, « Motion Planning and Sensor-Guided Manœuvre Generation for an Autonomous Vehicle », *in: Field and Service Robotics*, A. Zelinsky (éditeur), Springer, 1998, p. 60–67.

### 3.3 Synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D

Les technologies de Réalité Virtuelle deviennent de plus en plus populaires dans de nouveaux secteurs d'application comme la robotique d'intervention, la santé, ou encore les loisirs (jeux vidéo en particulier). Toutes ces applications nécessitent un degré de réalisme élevé sur trois composantes essentielles du processus : le rendu graphique, la dynamique des scènes traitées, et l'interaction 3D ; elles imposent également des contraintes strictes de temps réel (ou au moins de temps interactif). L'approche généralement mise en oeuvre pour tenter d'obtenir ce réalisme au niveau de la dynamique des scènes virtuelles et de l'interaction, consiste à doter le monde virtuel de propriétés et de lois physiques semblables à celles du monde réel. C'est dans cette logique que se placent nos travaux de recherche sur la synthèse du mouvement virtuel et les interactions 3D, en s'appuyant naturellement sur les synergies qui existent entre les techniques de génération et de contrôle du mouvement en robotique, et celles habituellement mises en oeuvre en animation graphique (approches basées sur les modèles physiques). Cependant, les applications que nous considérons, qui mettent généralement en jeu des processus du monde réel (*e.g.* en robotique d'intervention ou dans le domaine médical), nous conduit à aborder le sujet sous un angle un peu différent : nous devons mettre l'accent sur le "réalisme physique" et sur les contraintes de "temps réel ou interactif".

Compte tenu de la présence de nombreuses similitudes avec les problèmes de robotique, nous avons choisi de mettre en oeuvre une approche visant à considérer une scène virtuelle comme un espace soumis aux principales lois de la physique, et dans lequel évoluent et interagissent deux classes d'objets : (1) des "objets dits inertes", dont les mouvements et/ou les déformations résultent de l'application de champs de forces (comme la gravité) ou de l'interaction physique avec d'autres objets (manipulations, collisions) ; et (2) des "objets actifs" (ou "robots virtuels") possédant des caractéristiques physiques prédéfinies (*i.e.* mécanique, cinématique, et dynamique) et dotés de capacités de mouvements propres. Certaines techniques de la robotique peuvent potentiellement être utilisées ou adaptées pour cela, comme par exemple la planification de mouvements, le contrôle du mouvement, les comportements réactifs, ou encore la détection des collisions ; la principale difficulté réside dans l'intégration de telles méthodes avec une approche basée sur l'utilisation de modèles physiques de corps solides ou déformables (comme par exemple les approches proposées en animation graphique par [Bar92] et [BW92]). Cette analyse, que nous avons faite lors de nos premiers travaux pour la prise en compte des interactions roue-sol lors de la simulation du comportement dynamique d'un véhicule tout-terrain [LJL94], a été aussi faite plus tard par des chercheurs en robotique qui ont apportés des contributions intéressantes qui vont dans le même sens (en particulier les travaux de Mirtich à Berkeley [MC94] sur les collisions entre objets rigides, ceux de Ruspini & Khatib à Stanford

- 
- [Bar92] D. BARAFF, *Dynamic Simulation of Non-Penetrating Rigid bodies*, thèse de doctorat, Cornell University, mars 1992.
- [BW92] D. BARAFF, A. WITKIN, « Dynamic Simulation of Non-penetrating Flexible Bodies », *Computer Graphics* 26, 2, juillet 1992.
- [LJL94] C. LAUGIER, A. JIMENEZ, A. LUCIANI, « Simulating Physical Interactions Between an Articulated Mobile Vehicle and a Terrain », *in: Robotics and Autonomous Systems*, 2, 11, Elsevier, 1994, ch. Special Issue on Telerobotics.
- [MC94] B. V. MIRTICH, J. F. CANNY, « Impulse-based Dynamic Simulation », *in: Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, San Francisco, CA (US), février 1994.

[RKK97] sur la simulation dynamique en robotique et sur l'interaction haptique, et ceux de Latombe & Kuffner à Stanford [Lat90] sur la planification de mouvements pour l'animation graphique).

L'approche que nous mettons en oeuvre pour résoudre ce problème nous conduit à aborder quatre sujets complémentaires dont les orientations sont guidées par les contraintes énoncées précédemment : les modèles et algorithmes de base, l'interaction 3D, et la synthèse du mouvement.

**Modèles et algorithmes de base.** Il s'agit ici de développer des modèles et des algorithmes qui permettent de reproduire le comportement dynamique des divers composants d'une scène virtuelle en temps réel ou interactif, tout en conservant une certaine cohérence physique et en essayant de contrôler les problèmes numériques liés à l'intégration des équations de la dynamique. Ces modèles comportent une composante géométrique et une composante physique. La composante géométrique est essentiellement utilisée pour le rendu graphique, pour la détection des collisions et des contacts, et pour les interactions qui mettent en jeu des modifications de topologie ; la composante physique est utilisée pour le calcul du mouvement et/ou des déformations, et pour la détermination des effets des contacts et des collisions (le choix du modèle et de la méthode d'intégration numérique étant alors liés aux caractéristiques physiques des objets considérés). La méthodologie que nous appliquons pour modéliser des objets physiques complexes comporte trois grandes étapes : (1) construction d'un maillage 2D et/ou 3D à partir d'un modèle géométrique ou d'un ensemble de points mesurés sur l'objet considéré (le niveau de résolution utilisé étant évidemment lié aux caractéristiques de déformation à prendre en compte), (2) "placage" d'un modèle physique de déformation sur le maillage géométrique précédent (*e.g.* masses-ressorts, éléments finis...), (3) identification des paramètres du modèle sur la base de comportements requis ou de mesures faites sur les objets réels. Cette approche a déjà été validée expérimentalement lors de la modélisation d'un ligament croisé de genou à partir de données mesurées sur un genou de cochon, ou lors de la simulation des déformations d'une cuisse humaine soumise à des pressions appliquées par un sonde échographique virtuelle [dCL99].

**Interaction 3D.** Il s'agit ici de développer des modèles et des algorithmes qui permettent de reproduire le comportement dynamique d'objets en interaction physique (contacts, articulations, collisions, actions produisant des modifications de structure comme la découpe, et interaction haptique). Ces modèles doivent être à la fois réalistes sur le plan physique, et efficaces sur le plan algorithmique. En effet, les interactions représentent généralement le goulot d'étranglement des systèmes de simulation, elles sont à l'origine des discontinuités qui altèrent profondément les procédures numériques de calcul, et elles constituent une base essentielle

---

[RKK97] D. C. RUPINI, K. KOLAROV, O. KHATIB, « Haptic Interaction in Virtual Environments », *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, p. 128-133, Grenoble (FR), septembre 1997.

[Lat90] J.-C. LATOMBE, *Robot motion planning*, Kluwer Academic Press, 1990.

[dCL99] D. D'AULIGNAC, M. C. CAVUSOGLU, C. LAUGIER, « Modelling the dynamics of a human thigh for a realistic echographic simulator with force feedback », *in: Proc. of the Int. Conf. on Medical Image Computer-Assisted Intervention*, Cambridge (BG), septembre 1999.

du réalisme que l'on attribue aux scènes dynamiques simulées. Les approches utilisées pour modéliser les différents types d'interactions sont par nature différentes, bien que de nombreux auteurs aient tentés d'étendre artificiellement leurs modèles de collision au traitement d'autres types d'interactions (*cf.* par exemple [MC94]). Nos travaux de recherche portent essentiellement sur trois types d'interactions : les contacts et collisions, les modifications interactives de topologie, et l'interaction haptique. Notre approche pour le traitement des contacts non restants (*e.g.* contacts de type roue-sol) et des collisions, consiste à utiliser des algorithmes optimaux de calcul de distances dérivés de la robotique (*e.g.* les algorithmes de Lin & Canny ou ceux de Gilbert & Johnson), à développer des algorithmes efficaces pour la détermination des caractéristiques géométriques des contacts et des interpénétrations, et à mettre en oeuvre des algorithmes de calcul de la réponse dynamique à la collision qui utilisent les lois connues de la mécanique et qui prennent en compte les problèmes d'intégration numérique associés [DJL98]. Les modifications interactives de structures topologiques engendrées par certaines actions (déchirement, découpe) mettent en jeu des procédures complexes de remaillage et de redistribution des propriétés physiques pour lesquelles nous avons obtenu des résultats récents dans le cadre de la simulation chirurgicale. L'interaction haptique, qui met en jeu un système mécanique articulé actif (*i.e.* de type robot), engendre des problèmes de contrôle (stabilité) et nécessite des fréquences d'échantillonnage de l'ordre du kilohertz afin de rendre le retour tactile interprétable par un opérateur humain; or la simulation dynamique de scènes complexes, même lorsque le code est optimisé, n'arrive généralement pas à des fréquences de calcul supérieures à 100 Hz. C'est pourquoi, nous nous intéressons au développement de "modèles haptique locaux" restituant en temps réel les principales caractéristiques topologiques et mécaniques locales des scènes considérées [RKK97] [Bal99].

**Synthèse du mouvement.** Le problème abordé ici est celui de la synthèse du mouvement pour des agents virtuels (ou robots virtuels). Cela englobe les aspects dynamiques du mouvement (c'est à dire la production d'un mouvement par application de forces ou de contrôles au niveau de certains organes des agents virtuels considérés), ainsi que les aspects de plus haut niveau liés au comportement et à la planification de mouvements. Notre objectif est de tenter d'appliquer des techniques que nous développons par ailleurs pour les robots réels (planificateurs géométriques, architectures décisionnelles, contrôleur de mouvements), tout en exploitant le fait que le monde virtuel permet dans certains cas de réduire la complexité globale (par suppression de certaines contraintes du monde réel, ou par introduction de "guides physiques artificiels"). Des premiers résultats sur ce point ont été obtenus pour planifier les mouvements de systèmes articulés divers, en surimposant des champs de forces fictifs sur un modèle physique de l'environnement, ou en introduisant un modèle physique simplifié d'interaction roue-sol au niveau de la composante locale d'un planificateur de trajectoire pour

- 
- [MC94] B. V. MIRTICH, J. F. CANNY, « Impulse-based Dynamic Simulation », *in: Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, San Francisco, CA (US), février 1994.
- [DJL98] A. DEGUET, A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, « A Collision Model for Deformable Bodies », *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, BC (CA), octobre 1998.
- [Bal99] R. BALANIUK, « Using Fast Local Modeling to Buffer Haptic Data », *in: Proc. of the PHANTOM Users Group Workshop*, Boston, MA (US), octobre 1999.

véhicule tout-terrain. D'autres résultats plus récents concernent le contrôle temps réel d'agents virtuels autonomes ; l'approche adoptée consiste à modéliser ceux-ci comme des robots se déplaçant dans un environnement virtuel, perçu au moyen de pseudo-capteurs, et utilisant pour se déplacer des fonctions de planification et de contrôle de mouvements.

### 3.4 Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique

La prise en compte des incertitudes est un des problèmes importants de la robotique. Raisonner sur des informations incertaines pour programmer un robot constitue un des thèmes récurrents de cette discipline. En particulier, on peut se référer aux travaux déjà ancien de Taylor, Lozano-Perez et Mason [LPM<sup>T84</sup>], ou ceux menés dans notre équipe [TP<sup>88</sup>,DIRLN<sup>96</sup>]. Pour des raisons de commodité de calcul, la plupart des chercheurs cherchent à s'écarter de la théorie des probabilités en adoptant des simplifications parfois excessives : représentation ensembliste des erreurs ou filtre de Kalman. Dans ce travail, nous souhaitons au contraire utiliser les modèles probabilistes, et plus spécialement le calcul bayésien, pour représenter l'incertitude. Nous cherchons en particulier à nous doter d'outils de modélisation et de calcul probabiliste pour la géométrie et la programmation des robots. Les résultats attendus ne doivent pas seulement nous permettre de représenter les incertitudes et de calculer leurs propagations, mais aussi de traiter dans un cadre unifié une large catégorie de problèmes robotique liée à l'incomplétude des modèles de représentation de l'environnement.

En cela nous nous inscrivons dans un mouvement international plus large : celui de la robotique probabiliste [Thr<sup>01</sup>]. Ces approches reviennent en force dans ce domaine et ont données lieu à de nombreuses démonstrations dans des environnements réels montrant des niveaux de robustesse et de complexité jamais atteints [TBB<sup>+99</sup>]. Les conséquences de l'approche probabiliste se mesurent sur les problèmes de localisation, de fusion multi-capteurs, de contrôle et de planification, mais aussi dans le domaine des architectures de commande de robot. Elle donne une vision nouvelle à la notion de modularité en remettant partiellement en cause l'intérêt du découpage en niveau que l'on trouve généralement dans les architectures classique de commande de robot.

Les fondements théoriques de notre approche sont ceux des probabilités bayésiennes. Une formalisation rigoureuse et synthétique de cette approche peut être trouvée dans [Jay<sup>95</sup>]. Ed-

- 
- [LPM<sup>T84</sup>] T. LOZANO-PEREZ, M. T. MASON, R. H. TAYLOR, « Automatic synthesis of fine motion strategies for robots », *Int. Journal of Robotics Research* 3, 1, 1984, p. 3–24.
  - [TP<sup>88</sup>] J. TROCCAZ, P. PUGET, « Dealing with uncertainties in robot planning using program proving techniques », *in: Proc. of the Int. Symp. on Robotics Research*, R. C. Bolles et B. Roth (éditeurs), MIT Press, 1988, p. 455–466.
  - [DIRLN<sup>96</sup>] F. DE LA ROSA, C. LAUGIER, J. NÁJERA, « Robust Path Planning in the Plane », *IEEE Trans. Robotics and Automation* 12, 2, avril 1996, p. 347–352.
  - [Thr<sup>01</sup>] S. THRUN, « Probabilistic Algorithm in Robotics », *AI Magazine (Tech. Report CMU-CS-00-126)*, 2001, à paraître.
  - [TBB<sup>+99</sup>] S. THRUN, M. BENNEWITZ, W. BURGARD, A. CREMERS, F. DELLAERT, D. FOX, D. HÄHNEL, C. ROSENBER, N. ROU, J. SCHULTE, D. SHULTZ, « MIMERVA: A second generation mobile tour guide robot », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, 1999.
  - [Jay<sup>95</sup>] E. JAYNES, *Probability theory - The logic of science*, 1995, <http://bayes.wustl.edu>.

ward T. Jaynes propose en fait une théorie complète et intégrée du raisonnement probabiliste appelée “Probability as Logic” ou PaL qui étend la logique aux probabilités. Notre approche est basée sur la réalisation d’outils informatique permettant de mettre oeuvre concrètement cette théorie. Plusieurs prototypes de moteurs d’inférence ont été développés et testés sur des applications simples. Ils sont l’équivalent probabiliste des moteurs d’inférence logique tel que ProLog. Nous avons utilisé ces moteurs pour construire un système de CAO robotique probabiliste et un système de programmation de robot. Les techniques utilisées pour réaliser ces moteurs s’appuient sur des techniques de raisonnement symbolique pour la simplification des expressions, des techniques de Monte-Carlo pour l’intégration en grande dimension et sur l’utilisation d’algorithmes génétiques couplés à des méthodes de relaxation pour l’optimisation en présence de contraintes <sup>[Mek99]</sup>.

## 4 Domaines d’applications

### 4.1 CAO-Robotique

En quelques années les systèmes de Conception Assistés par Ordinateur (CAO) se sont enrichis de nouvelles fonctionnalités. Ils ne sont plus seulement utilisés pour la conception de pièces mécaniques mais aussi pour la simulation, voire la planification, de procédés industriels complexes. On parle alors plus généralement de “prototypage virtuel”. La fonctionnalité de “fitting simulation” en est un exemple concret : la conception d’un montage mécanique ne consiste plus seulement à définir la géométrie des pièces mécaniques, mais inclut aussi la possibilité de tester la faisabilité de l’assemblage, voire de le planifier. Cette tendance spectaculaire vers la simulation et la planification atteint tous les acteurs de la CAO. Elle conduit à la conception d’outils informatiques permettant la conception d’usines virtuelles, où tous les processus de fabrication peuvent être simulés (par exemple gestes des employés, fonctionnement des machines, quantité de peintures déposée, etc.) pour être optimisés. Un autre domaine d’application important est celui de la médecine et plus particulièrement celui de la chirurgie assistée par ordinateur. Il s’agit dans ce contexte d’aider le chirurgien à planifier son intervention et à le guider durant celle-ci. Dans ce contexte, nos travaux sur l’algorithmique géométrique revêtent une importance particulière car ils permettent :

- d’améliorer les performances des outils de simulation et de planification en fournissant des algorithmes de calcul de distance performants et généraux ;
- de prendre en compte la dynamique de l’interaction entre corps rigides ou déformables ;
- de fournir des outils de planification pour des systèmes non-holonomes ou pour des systèmes complexes ;
- de tenir compte des incertitudes et des erreurs de modèles.

---

[Mek99] K. MEKHNACHA, *Méthodes probabilistes bayésiennes pour la prise en compte des incertitudes géométriques: application à la CAO-robotique*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juillet 1999.

## 4.2 Route automatisée

Depuis une dizaine d'années, les différents problèmes liés aux transports routiers (sécurité, efficacité, etc.) prennent de plus en plus d'importance. Ainsi, ils ont fait et font encore l'objet de grands programmes de recherche tant du côté du secteur privé que du secteur public (*cf.* le programme européen Eurêka Prometheus sur les transports routiers [1986-1994] et les actions de développement Inria-Inrets<sup>9</sup> Praxitèle [1994-1997] et LaRa [1998-2002]).

A l'heure actuelle, les recherches portent sur de nouveaux modes de conduite assistée par ordinateur, permettant une simplification et une sécurisation de la conduite, pouvant aller jusqu'à une conduite totalement automatique sur des voies réservées. C'est le concept de la route automatisée.

Ces réflexions esquissent une prospective sur les transports routiers automatisés du futur et proposent des éléments de réponse aux problèmes de sécurité, de débit des infrastructures, de vitesse de déplacement et, en même temps, de réduction de l'impact sur l'environnement. Si la route automatisée est encore un concept assez large, on peut cependant distinguer deux grandes orientations :

- des scénarios portant essentiellement sur "l'intelligence dans le véhicule" ; ces travaux intéressent les constructeurs car il y a un marché immédiat et évolutif ;
- des scénarii portant essentiellement sur l'aspect "système" (*i.e.* avec en particulier des aspects liés à l'infrastructure) ; ces projets ont un coût plus élevé mais ce sont les seuls qui permettent de réaliser une route complètement automatisée avec de meilleures performances.

Les exemples d'applications sont les trains de véhicules avec ou sans conducteurs, l'automatisation de certains transports publics, la route automatisée pour les camions, l'autoroute à haut débit, etc. La route automatisée concerne de nombreux domaines de recherche et implique au sein de l'Inria plusieurs projets de recherche. Le projet Sharp est impliqué dans cette problématique depuis de nombreuses années (participation au projet Prometheus et à l'action de développement Praxitèle) et contribue principalement sur les aspects liés aux techniques de déplacements en mode automatique ou semi-automatique (*i.e.* conduite assistée).

## 4.3 Réalité virtuelle

La réalité virtuelle est un secteur en pleine croissance, qui recouvre des secteurs d'applications très divers comme la robotique d'intervention, le graphique, la téléconférence et le multimédia. Compte tenu de nos orientations de recherches visant à privilégier le réalisme physique, les interactions, et l'efficacité des algorithmes mis en jeu, les applications que nous considérons dans le domaine de la réalité virtuelle sont les suivantes :

**La robotique d'intervention.** Il s'agit de mettre en œuvre des robots sur des tâches d'intervention ou de maintenance à exécuter dans des environnements hostiles et/ou éloignés (sous-marin, spatial, nucléaire, militaire). Nous considérons alors le monde virtuel reconstruit comme une interface évoluée entre l'opérateur et le robot plongé dans son environnement d'opération. Cette interface permet à l'opérateur d'interagir de manière naturelle avec le robot (graphique,

---

<sup>9</sup>Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

système haptique), tout en prenant en compte implicitement les contraintes du monde réel (que ce soit pour des opérations de type téléopéré, ou pour des actions qui mettent en jeu des mécanismes de planification de mouvements). Par exemple, programmer une mission pour un véhicule d'exploration planétaire, pourra conduire à combiner des techniques de planification de trajectoires et/ou de guidage manuel, avec des techniques de simulation dynamique aptes à prendre en compte des phénomènes physiques tels que les glissements ou le patinage des roues lors de la navigation.

**Les applications médicales.** Il s'agit de doter le praticien ou le chirurgien d'outils informatiques lui permettant soit d'améliorer l'apprentissage de gestes médicaux, soit de l'aider à préparer certaines interventions chirurgicales par intégration de diverses données préopératoires et de résultats simulés des gestes opératoires projetés. Nos efforts actuels portent essentiellement sur le premier point. L'objectif est de produire des simulateurs permettant d'entraîner les praticiens et chirurgiens sur les techniques opératoires qu'ils devront utiliser (en particulier pour les nouvelles techniques de chirurgie non invasive qui nécessitent d'intervenir avec une réduction du champ visuel et gestuel), tout en donnant la possibilité de simuler de nombreux types de pathologie, même rares. Ceci devrait permettre au chirurgien néophyte d'acquérir ses réflexes sur des patients virtuels, et ainsi réduire le taux d'incidents lors des premières interventions sur des patients réels. Le travail correspondant est réalisé en relation avec des chirurgiens.

## 5 Logiciels

### 5.1 Aladyn3D

*AlaDyn3D* est un logiciel de *simulation dynamique*<sup>10</sup> développé comme une généralisation du système *Robot- $\Phi$* <sup>11</sup> : il a été conçu pour être multi-modèles et multi-méthodes, avec des mécanismes permettant l'ajout de nouveaux modèles et méthodes. Dans sa version actuelle, *AlaDyn3D* permet de traiter les mouvements et interactions physiques d'objets rigides simples (chaque objet étant représenté par un modèle géométrique et par un modèle dynamique), et de simuler les mouvements/déformations et interactions de corps déformables surfaciques (*e.g.* drapeaux) ou volumiques (*e.g.* foie). Les interactions sont alors détectées grâce à un algorithme de calcul de distance (optimisé) ; elles sont ensuite modélisées à l'aide de liaisons visco-élastiques non linéaires et de modèles de collision de type "impulsif" et "pénalité". L'intégration des équations de la dynamique peut-être fait par deux méthodes différents : une méthode de type explicite (Newton-Euler ou Runge-Kutta), et une méthode implicite à pas de temps fixe ou adaptatif. Afin de faciliter les échanges avec d'autres applications, *AlaDyn3D* est doté de filtres

---

<sup>10</sup>Un *simulateur dynamique* est un logiciel qui permet de calculer les mouvements, les déformations, et les interactions entre des objets rigides ou déformables évoluant dans un environnement soumis à des lois physiques classiques.

<sup>11</sup>*Robot- $\Phi$*  est un prototype de recherche. Un brevet logiciel a été déposé et certifié par l'Agence pour la Protection des Programmes (Inter Deposit Digital Number IDD.N.FR.001.160005.00.R.P.1996.R.P.1996.000.21000). Une version particulière de *Robot- $\Phi$*  a été intégrée dans la machine "Psy" d'effets spéciaux 3D, développée et commercialisée par la société Getris-Images GDI ; un "plug-in" pour le système 3D Studio Max (de Kinetix) a également été développé dans ce cadre.

qui permettent d'une part d'importer des modèles 3D à partir de modeleurs du commerce (3D Studio Max), et d'autre part d'exporter des animations 3D dans un format standard (Vrml 2.0) ou des animations 2D sous forme d'une séquence d'images.

*AlaDyn3D* est implantée en C++/STL/OpenGL. Une version stable et documentée fonctionnant sous Silicon Graphics/Irix 6.x et PC/Linux est disponible en accès ftp (cf. <http://www.Inrialpes.fr/sharp/modelisation/AlaDyn>).

Une nouvelle version d'AlaDyn est en cours de développement et sera bientôt disponible. Alors que la version précédente était essentiellement centrée sur la notion de "simulation dynamique", la nouvelle version se présente comme une plateforme de développement d'applications de Réalité Virtuelle plus générique, dans laquelle les équations de la mécanique Newtonienne ne constituent plus la seule manière de générer le mouvement et les interactions entre objets. Les modèles géométriques ainsi que les méthodes de détection de collision et de rendu graphique ont été optimisées de manière à respecter des contraintes de temps-réel. De plus, d'autres modèles et algorithmes de base développés au sein du projet SHARP ont été intégrés, notamment certaines méthodes de planification et de contrôle du mouvement, ainsi que des modèles d'interaction avec une interface haptique.

## 5.2 OpenPl

Après avoir développé plusieurs moteurs d'inférence probabiliste et les avoir appliqué à différents problèmes : Système CAO et programmation des robots. Nous avons développé (en collaboration avec l'équipe Laplace du laboratoire Leibniz) un premier moteur général en C++ : Ce système nommé OpenPl pour "Open Probabilistic Language" est une API permettant de développer des applications autour de l'inférence probabiliste. Les techniques utilisées sont celles déjà expérimentées dans le cadre de la programmation des robots. Notre objectif est de l'utiliser comme plateforme de réflexion nous permettant de développer une version plus élaborée rassemblant plusieurs méthodes d'inférence.

# 6 Résultats nouveaux

## 6.1 Planification de mouvement

Cette année, nos efforts en planification de mouvements se sont portés dans les trois directions suivantes : la planification sous contraintes cinématiques, la prise en compte des incertitudes liées à la localisation et la planification en présence de contraintes dynamiques et de connaissances partielles. Nous avons aussi finalisé certains travaux de l'année précédente par des publications dans des revues. Plus précisément, il s'agissait de la planification pour la manipulation dextre [11] et de la planification en environnement multi-robot [12].

### 6.1.1 Contraintes cinématiques

**Participants :** Pierre Billiau, Thierry Fraichard, Jorge Hermosillo, Sepanta Sekhavat.

Nos travaux sur les contraintes cinématiques des robots mobiles portent sur deux types de plateformes : les robots de type voiture et les robots à double-braquage de type Cycab.

En 1998, par souci de réalisme, nous avons introduit une nouvelle problématique en ce qui concerne la planification de chemin pour robot de type voiture. Outre les contraintes cinématiques usuelles (continuité de la direction tangente, courbure bornée), cette problématique prend en compte deux nouvelles contraintes : la continuité de la courbure et une borne sur la dérivée de cette courbure (problème de la ‘voiture à courbure continue’). La continuité de courbure correspond à la continuité de la variation de l’angle de braquage des roues avant du robot, tandis que la borne sur la dérivée de la courbure correspond au fait que la vitesse de variation de l’angle de braquage des roues avant est limitée.

L’année 2001 a été celle de la finalisation de nos travaux sur ce point, finalisation marquée par une publication dans la conférence internationale IEEE Robotics and Automation [22] et la préparation d’un article pour la revue IEEE Transactions on Robotics and Automation. Par ailleurs, l’implantation logicielle de la ‘méthode de guidage’ telle que proposée a été achevée, notamment en ce qui concerne l’aspect ‘propriété topologique’ (*cf.* rapport d’activité 2000). Le logiciel est maintenant utilisé pour d’autres applications dans le projet. Il va être aussi transmis à l’équipe Maia du Loria qui a souhaité l’utiliser.

Le deuxième système non holonome étudié cette année est le robot Cycab pour lequel nous avons poursuivi nos travaux antérieurs. Ce robot possède deux essieux comme une voiture, mais il a la particularité d’avoir les roues arrière qui changent d’orientation en même temps que les roues avant. Nous disposons à l’Inria Rhône-Alpes de 3 robots de cette famille. Les Cycabs font partie d’une récente famille de robots que nous dénommerons robots à “double-braquage”. D’autres exemples de ce genre de système peuvent être rencontrés aussi bien dans le milieu académique (le  $\pi$ -Car de l’IEF<sup>12</sup> de Paris) que dans le milieu industriel (les transporteurs géants du port de Singapour). L’intérêt de ce type de plateforme par rapport aux voitures standard réside dans leur plus grande manoeuvrabilité dans les environnements contraints.

Cependant, il existe à ce jour très peu de travaux sur le système à double-braquage et plus particulièrement concernant la planification. L’étude de ces systèmes nous avait permis en 2000 d’établir leur propriété de “platitude différentielle” pour une grande famille de relation fonctionnelle  $f$  entre l’angle de braquage avant et arrière [19]. La propriété de platitude est d’un grand intérêt pour la planification de trajectoire. Typiquement dans notre cas, elle implique que la planification “non holonome” pour notre système de dimension 4 (position, orientation du robot et angle de braquage) peut être ramenée à une planification “holonome” sous très faibles contraintes dans un espace de dimension 2 : l’espace des sorties linéarisantes (ou plates) du système. Le point dur était alors de trouver explicitement l’expression de ces sorties plates pour les systèmes étudiés. La recherche de ces sorties nous a permis d’apporter une contribution concernant les sorties linéarisantes des systèmes d’Engel [28]. Enfin, l’obtention de ces sorties nous a permis de résoudre le problème de la commande en boucle ouverte pour les robots mobiles à double-braquage (Fig. 1, gauche) mais aussi celui de la planification sans collision pour ces systèmes non holonomes (Fig. 1, droite). En effet, nous avons démontré dans des travaux antérieurs que si nous disposions d’une procédure de calcul de commande boucle ouverte vérifiant une certaine propriété topologique ( $TP$ -admissible <sup>[SL98]</sup>), il était possible de

---

<sup>12</sup>Institut d’Electronique Fondamentale.

---

[SL98] S. SEKHAVAT, J.-P. LAUMOND, « Topological Property for Collision-Free Nonholonomic Motion Planning: the Case of Sinusoidal Inputs for Chained Form Systems », *IEEE Trans. Robotics and*

l'utiliser comme un "planificateur local" dans un schéma général de planification qui permettrait le calcul d'une trajectoire faisable et sans collision pour le système (*e.g.* [16] pour le détail). L'obtention des sorties plates pour les robots à double-braquage nous a permis de proposer un planificateur local "TP-admissible" pour ce système, garantissant ainsi la complétude de l'algorithme global d'évitement d'obstacles [27].

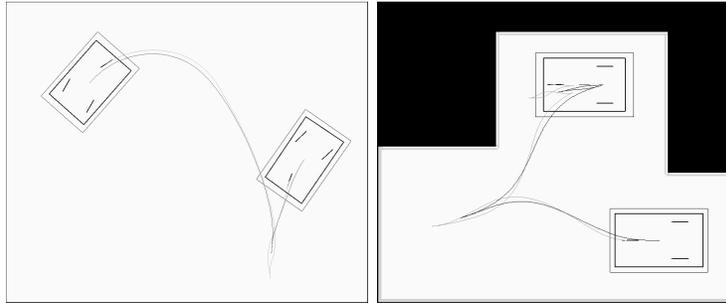


FIG. 1 – Commande en boucle ouverte calculée pour le Cycab (à gauche) et une trajectoire sans collision du Cycab à droite. La trace foncée est celle de la roue avant et la trace claire est celle des sorties linéarisantes.

### 6.1.2 Incertitudes liées à la localisation

**Participants :** Cédric Pradalier, Sepanta Sekhavat.

En règle générale, un robot mobile se localise d'abord via un dispositif odométrique. Le caractère relatif des mesures de ce capteur entraîne une dérive croissante et non bornée de l'incertitude de position. La croissance de cette incertitude peut entraîner l'échec de la mission, voire la mise en danger du robot.

Une solution à ce problème de dérive consiste à équiper le robot de dispositifs de relocalisation absolue qui reposent généralement sur la détection *d'amers*, *i.e.* d'éléments particuliers de l'environnement (*e.g.* satellites pour le GPS, radio-balises pour un goniomètre, repères visuels pour une caméra, etc.).

Planifier une trajectoire sûre revient alors à planifier une trajectoire passant suffisamment souvent par des zones où des amers sont visibles. Ainsi, l'erreur de localisation (non bornée) cumulée entre deux observations d'amers est ramenée à chaque observation, à l'imprécision de localisation à base d'amers. Cette dernière est censée être plus faible et en tout cas bornée. Évidemment la difficulté consiste à choisir une trajectoire et une suite d'amers nous permettant de contrôler la croissance de l'incertitude sur la localisation. En effet, il s'agit de s'assurer qu'entre deux zones de relocalisation le robot n'est ni perdu, ni mis en danger de collision.

Le problème communément traité dans la littérature consiste à trouver une telle trajectoire sûre. Les données de ce problème étant un environnement (contenant un ensemble d'amers naturels et/ou artificiels) et les incertitudes (sur la localisation, l'odométrie, l'exécution etc). Tandis que le problème auquel nous nous sommes intéressé et qui n'est quasiment pas abordé

dans la littérature est celui du positionnement des amers artificiels afin d'améliorer nos capacités de planification. Autrement dit, étant donné un environnement et un certain nombre d'amers, comment les placer de manière à pouvoir résoudre le maximum de problème de planification de manière sûre.

Nous avons donc considéré le cas général d'un système de localisation composé d'un ensemble d'amers (ou balises) et d'un capteur avec une ouverture angulaire et une portée bornées, capable de détecter la position relative des balises qui se trouvent dans son champ de perception (*e.g.* un capteur laser ou un système de stéréo-vision). Nous nous sommes aussi placés dans le cas général où la perception d'un nombre minimum  $n$  d'amers est nécessaire afin de permettre la localisation (par exemple  $n = 3$  pour un capteur laser et en utilisant la triangulation). Ce problème général se décline en instances particulières suivant des hypothèses sur :

- Le capteur : portée finie ou infinie par rapport aux dimensions de l'environnement, ouverture angulaire 360 ou bornée.
- Les amers : le nombre  $n$  nécessaire pour se localiser, distinguables ou pas, emplacement quelconque dans l'environnement ou limité aux bordures, visibilité directive, etc.
- L'environnement : borné ou pas, le cas polygonal, avec ou sans obstacles, etc.

Il faut noter que pour certaines combinaisons de ces paramètres, le problème du placement d'amers est équivalent au problème d'illumination, célèbre en géométrie algorithmique. Dans certains cas particuliers, nous avons démontré la validité de solutions exactes à ce problème [35].

**Espace de localisation.** Pour généraliser le traitement du problème de placement des amers, nous avons développé la notion d'espace de localisation. Cet espace contient l'ensemble des poses (position & orientation) d'un capteur ponctuel (ou assimilable) pour lesquelles il est possible de se localiser, *i.e.* il y a suffisamment d'amers visibles (suffisamment près, dans le champ de perception du capteur, et non masqués par des obstacles) pour que la localisation soit possible. Nous avons montré qu'une approximation conservatrice de cette espace pouvait être pratiquement construite assez aisément (Fig 2). Outre la représentation tridimensionnelle, cette approximation mène aux deux applications suivantes :

**Optimisation du placement des amers.** A partir de la notion d'Espace de Localisation  $EL$ , nous avons utilisé des techniques d'optimisation numérique (basées sur les algorithmes génétiques) pour trouver comment placer un ensemble fini d'amers de façon à maximiser la capacité de localisation continue. Nous avons défini à cette fin une fonction coût qui intègre le volume de  $EL$ , sa connexité et d'autres critères portant sur la qualité de la localisation. Grâce à cette méthode, nous sommes donc capable de maximiser dans un environnement donné, les capacités de localisation en vue de la planification (Fig. 3).

**Planification sous contraintes de localisation.** Grâce à la notion d'Espace de Localisation, il a été possible de définir une méthode de planification garantissant les capacités de localisation en tout point des trajectoires générées. En effet, par construction, une trajectoire complètement contenue dans cette espace permettra donc de se localiser à tout instant. Le développement d'un premier planificateur expérimental a donné des résultats encourageant. On peut voir sur la fig. 4 comment les chemins trouvés par ce planificateur s'adapte à l'envi-

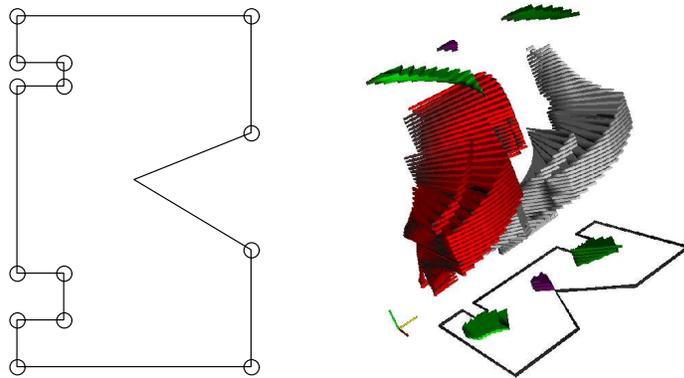


FIG. 2 – Exemple d'un environnement en forme de M (les balises sont marquées par des cercles) et son Espace de Localisation. L'axe vertical correspond à l'orientation du capteur et les niveaux de gris distinguent les différentes composantes connexes. Dans cet exemple, la portée du capteur est égale à la moitié de la largeur de l'espace, son ouverture angulaire est de  $60^\circ$  et il fallait au moins 2 balises pour réussir une localisation.

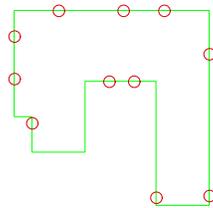


FIG. 3 – Exemple de placement de 11 balises par optimisation numérique avec la contrainte de placement sur la bordure. L'angle d'ouverture du capteur est de  $90^\circ$ , la portée du capteur est supérieur à la taille de l'environnement et un minimum de balise est nécessaire pour la localisation. Cette disposition permet une localisation dans un espace connexe de l'ordre de 50% du volume de l'espace des configurations du capteur.

ronnement et à l'emplacement des balises afin d'avoir toujours suffisamment de balise en vue. Ceci se fait si nécessaire au prix d'un mouvement opposé à la direction du plus court chemin.

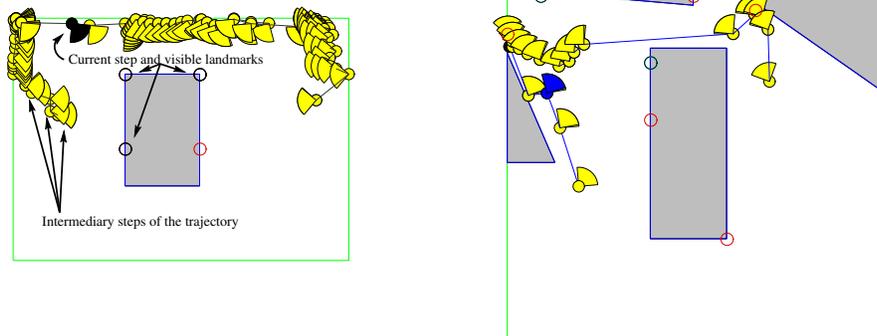


FIG. 4 – Trajectoires calculées sous la contrainte de visibilité d'au moins deux balises en tout point.

L'ensemble de ces travaux ont donné lieu à un papier soumis à la conférence internationale IEEE Robotics and Automation 2002.

### 6.1.3 Contraintes dynamiques et connaissances partielles

**Participants :** Sébastien Fave, Thierry Fraichard, Alejandro Vargas Hernández.

Dès 1992 [Fra92,Fra99], nous avons proposé le concept *d'espace des états-temps* comme cadre général pour aborder la planification de mouvement en présence de contraintes dynamiques (dynamique du système robotique et obstacles mobiles).

Planifier un mouvement en présence d'obstacles mobiles requiert la connaissance préalable des mouvements futurs de ces derniers. En général, on ne dispose pas de cette connaissance (sinon partiellement). La réponse classique à ce problème consiste à faire des hypothèses sur le comportement futur des obstacles mobiles (généralement sur la base d'informations, perceptives ou autres, disponibles au départ), puis à planifier sur la base de ces *prévisions*. Cette réponse pose évidemment le problème de la durée de validité des prévisions (qui va dépendre de nombreux facteurs).

En 2000, Hsu *et al.* [HKLR00] ont repris et appliqué l'espace des états-temps au cas d'un robot mobile évoluant sur une table à coussin d'air au milieu d'obstacles mobiles. L'utilisation de techniques stochastiques récentes de planification leur permet de recalculer une trajectoire

- 
- [Fra92] T. FRAICHARD, *Planification de mouvement pour mobile non-holonyme en espace de travail dynamique*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (F), avril 1992.
- [Fra99] T. FRAICHARD, « Trajectory planning in a dynamic workspace: a 'state-time' approach », *Advanced Robotics* 13, 1, 1999, p. 75-94.
- [HKLR00] D. HSU, R. KINDEL, J.-C. LATOMBE, S. ROCK, « Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles », *in: Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 2000.

en un temps très faible. Ils résolvent donc le problème de l'incertitude liées aux prévisions par une replanification à une fréquence suffisamment élevée.

Il nous semble malheureusement que cette approche ne puisse s'appliquer qu'à des systèmes robotiques relativement simples (ce qui était le cas chez Hsu *et al.*). En effet, l'augmentation de la complexité du robot, qui se traduit par l'augmentation du nombre de dimensions de l'espace des états-temps, va rapidement interdire de recalculer une trajectoire complète en un temps suffisamment faible<sup>13</sup>.

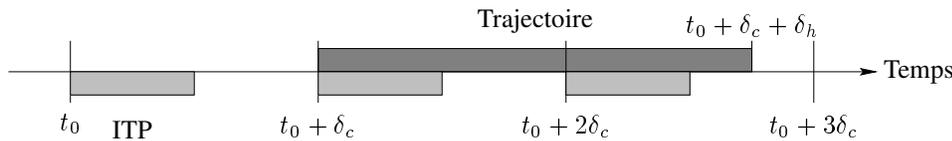


FIG. 5 – Planification itérative de trajectoire : le module ITP (Iterative Trajectory Planner) est appelé tous les  $\delta_c$ . A l'instant  $t_0$ , il calcule une trajectoire valide sur l'intervalle de temps  $[t_0 + \delta_c, t_0 + \delta_c + \delta_h]$ .  $\delta_h$  est l'horizon temporel de planification,  $\delta_h \geq \delta_c$ .

Pour aborder ce problème, nous proposons un schéma de planification qui met en œuvre le double principe de la *planification itérative* et de la *planification sur un horizon temporel*. Ce schéma est explicité dans la Fig. 5. Le principe de fonctionnement de ITP est de restreindre la planification (et donc l'exploration de l'espace des états-temps) à l'horizon  $\delta_h$  afin garantir des temps de réponse compatibles avec  $\delta_c$ . La principale difficulté à résoudre porte sur la prise en compte des collisions potentielles au delà de l'horizon  $\delta_h$ . Entre autres pistes, nous explorons la possibilité d'utiliser nos travaux sur les V-obstacles (*cf.* §6.2.2). Ce travail a commencé lors du séjour de Thierry Fraichard à Nanyang Technological University (Singapour). Les travaux de l'année 2001 ont porté sur la mise en place d'un environnement de test (en simulation à l'Inria et sur robots Khépera à Singapour) et d'un premier noyau ITP.

## 6.2 Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement

**Participants :** Jorge Hermosillo, Frédéric Large, Christian Laugier, Cédric Pradalier, Sepanta Sekhavat.

Nous avons développé au cours des dernières années les bases d'une architecture de contrôle visant à doter un robot mobile de type voiture de la capacité de se déplacer de façon autonome. Initialement basée sur une exécution séquentielle des étapes de planification puis d'exécution des tâches, cette architecture a été modifiée en 1998 pour permettre une meilleure intégration des fonctions délibératives et réactives. Cette nouvelle architecture repose sur les trois niveaux intégrant les fonctions précitées et sur le concept de "manœuvre référencée capteurs" (*cf.* rapport d'activité 99). De manière très schématique, le principe général de l'approche consiste à s'appuyer sur des mécanismes réactifs couplés avec un ensemble d'"experts de contrôle" (*i.e.* de procédures de contrôle appropriées aux fonctions de base du véhicule), une bibliothèque de

<sup>13</sup>Etant admis que la complexité de la planification croît exponentiellement avec la dimension de l'espace des états-temps du système robotique considéré.

“manœuvres référencées capteurs génériques” et des fonctions de planification de mouvements aptes à prendre en compte des contraintes variées sur le type de solution à produire.

Les travaux réalisés au cours de l’année 2001 dans le cadre du développement de notre architecture de contrôle, portent sur deux volets classiques de la problématique du contrôle d’exécution des robots mobiles : la localisation et la prédiction/traitement de collisions potentielles dans un environnement dynamique.

### 6.2.1 Développement d’un module de localisation absolue

**Participants :** Cédric Pradalier, Sepanta Sekhavat.

Les plateformes mobiles de l’Inria Rhône-Alpes ne possédaient jusqu’à cette année, que de moyens proprioceptifs de localisation (odométrie, gyroscope). Ces capteurs engendrent typiquement une erreur cumulative, non bornée sur la localisation. Dans le cadre d’expérimentations sur nos robots mobiles, il était donc nécessaire de développer un module de localisation extéroceptif fiable, robuste et aussi précis que possible.

Pour cela, en collaboration avec les Moyens Robotiques, nous avons choisi d’utiliser un système composé d’amers artificiels et d’un capteur télémétrique laser Sick (Fig. 6). Le capteur télémétrique Sick a été choisi pour sa portée supérieure à 30m, sa rapidité de réponse et surtout sa très grande précision. Les amers artificiels ont été choisis de façon à être aisément détectables et précisément localisables : il s’agit de cylindres particulièrement réfléchissants pour les rayons infra-rouge du Sick.

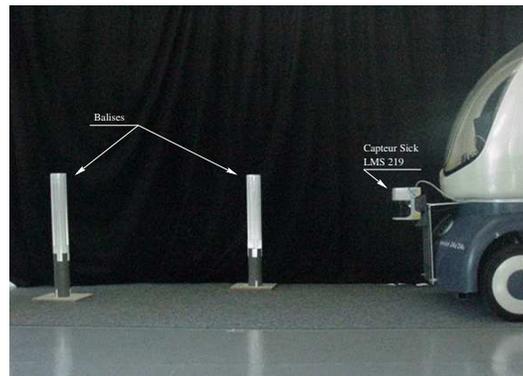


FIG. 6 – Le module de localisation extéroceptif composé d’un capteur laser Sick et des balises passives réfléchissantes.

Au niveau logiciel, le module de localisation réalisé comporte trois étages :

1. Filtrage des mesures laser de façon à extraire les positions des amers. Cet étage utilise une évaluation de l’intensité du faisceau laser réfléchi et un modèle de la variation de cette intensité en fonction de l’incidence du rayon pour déterminer efficacement la position des amers.
2. Mise en correspondance des amers détectés avec une carte en mémoire. Les balises étant non marquées, nous exploitons ici la notion d’invariant géométrique couramment utilisée

en vision par ordinateur et la notion de clique maximale, issue de la théorie des graphes.

3. Fusion des différentes sources de données : dans ce dernier étage, les données issues de la mise en correspondance sont fusionnées avec les données odométriques et les mesures d'un gyroscope grâce à un filtre de Kalman étendu.

Le résultat de l'étage 2 est bien sûr utilisé pour améliorer les résultats du filtrage de l'étage 3 mais ce résultat à son tour est utilisé par l'étage 2 à l'itération suivante afin d'aider à la mise en correspondance de balises non signées et la carte des balises. Grâce à cette architecture, nous obtenons une précision d'une dizaine de centimètre sur la position du robot, et de quelques degrés sur son orientation. Il reste à régler le problème du placement optimal des balises dans l'environnement expérimental. Les outils et méthodes présentés en § 6.1.2 seront appliqués pour traiter ce problème.

Ce module de localisation précise servira d'outil de base dans l'avenir pour nos expérimentations avec les Cycabs. La fig. 7 montre comment notre module de localisation permet de rattraper la dérive odométrique lors des expérimentations.

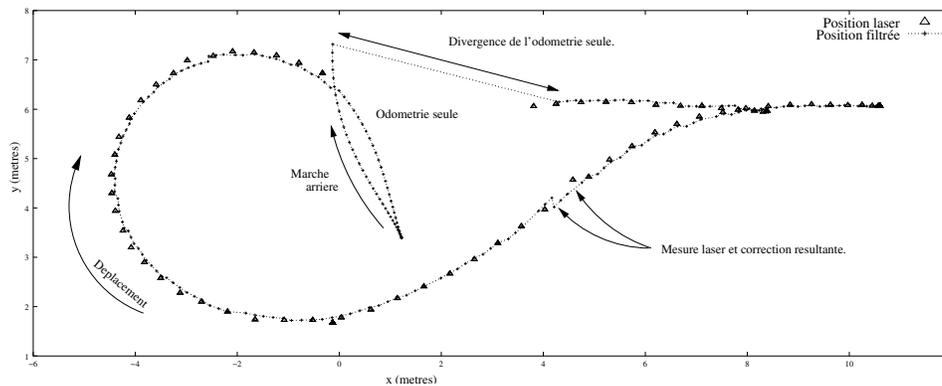


FIG. 7 – Illustration expérimentale des effets de notre module de localisation extéroceptive sur la gestion des erreurs de localisation. On constate que la dérive des données de localisation par rapport à la donnée laser reste bornée tant que les balises sont visibles et elle est inacceptable quand le laser n'est plus fonctionnel (par exemple par manque de balises visibles...).

### 6.2.2 Prédiction/traitement des collisions potentielles

**Participants :** Frédéric Large, Christan Laugier, Sepanta Sekhavat.

La prédiction des évolutions de l'environnement à l'exécution ainsi que l'évitement d'obstacle en milieu dynamique représente un volet majeur de notre architecture de contrôle. Au cours de l'année 2000, nous avons proposé, en collaboration avec le Prof. Zvi Shiller de l'université UCLA (Los Angeles, USA), une méthode de prédiction des collisions et de leur traitement. Ces travaux ont conduit cette année à un dépôt de brevet.

Notre approche est basée sur le calcul en un point donné, de l'ensemble des vecteurs vitesse permettant d'éviter l'ensemble des obstacles sur un horizon de temps  $T$ , en considérant que ces derniers suivent toujours les trajectoires prédites pendant la période  $T$ . La nouveauté

de notre approche vient du fait que nous travaillons directement en “degré 1”, c’est-à-dire sur les vitesses du véhicule et des obstacles mobiles. Il en résulte des constructions rapides d’obstacles directement dans l’espace des vitesses (les *V-obstacles*), à partir de l’estimation de la trajectoire des obstacles sur l’horizon  $T$ . Ceci permet d’obtenir à chaque instant une représentation compacte de l’espace des vitesses admissibles de notre robot (*i.e.* les vitesses n’engendrant pas de collision avec les obstacles dans un horizon  $T$ ) [29].

Si l’estimation du mouvement des obstacles n’est pas souvent remise en question, nous pouvons construire par notre approche, une trajectoire composée d’une suite de mouvements rectilignes à vitesse constante (et de durée  $\geq T$ ), évitant les obstacles fixes et mobiles et allant au but. Cette trajectoire s’obtient sur la base d’une recherche de type  $A^*$  dans un graphe de l’espace des configurations augmenté par la dimension temporelle. Le développement à partir d’un noeud de ce graphe comporte deux phases : i) la construction des *V-obstacles* à ce noeud, ii) le développement d’un nombre de branches (correspondant à une discrétisation de l’espace des vitesses admissibles) sur une longueur correspondant à un temps de parcours égal à  $T$ . Les *V-obstacles* et leur distance par rapport aux vitesses le long d’une trajectoire interviennent aussi dans le coût et l’heuristique de la recherche dans le graphe.

Cependant, dans le cas général, il s’agit d’être capable de réagir à chaque fois que notre estimation du mouvement des obstacles devient obsolète (ce qui dans le pire des cas peut se produire à chaque période d’observation). Ceci pose deux problèmes essentiels à notre approche, i) la construction temps réel de la trajectoire ou au moins une sous-trajectoire “sûre” (comprenant des constructions de *V-obstacles*), ii) l’évitement des discontinuités de vitesse trop fréquentes le long d’une trajectoire. En effet, s’il est acceptable d’avoir une trajectoire linéaire par morceau avec des discontinuités de vitesse suffisamment espacées, une trop grande fréquence de ces discontinuités pour un système soumis à des contraintes cinématiques et dynamiques (tel que la voiture) entraînerait des erreurs d’exécution qui pourrait mettre le système en danger.

Concernant le premier problème, nous avons réussi une construction des *V-obstacles* dans des temps très satisfaisants grâce à l’obtention de leur expression analytique relativement simple en fonction des trajectoires des obstacles [29]. La fig. 8 représente le résultat d’une telle construction pour un grand  $T$ . On illustre aussi sur cette figure comment la représentation compacte par les *V-obstacles* permet de résoudre certains problèmes immédiatement par le choix de la bonne vitesse, en une seule itération. Le traitement du deuxième problème constitue notre travail en cours.

## 6.3 Synthèse du mouvement virtuel et interaction 3D

### 6.3.1 Modèles Physiques et Méthodes Numériques de base

**Participants :** Diego d’Aulignac, François Boux de Casson, Christian Laugier, Kenneth Sundaraj.

**Modèles physiques.** Les derniers résultats et les différentes expérimentations menées au sein du projet ont mis en évidence la nécessité d’utiliser une approche composite qui mêle différents modèles physiques et méthodes numériques.

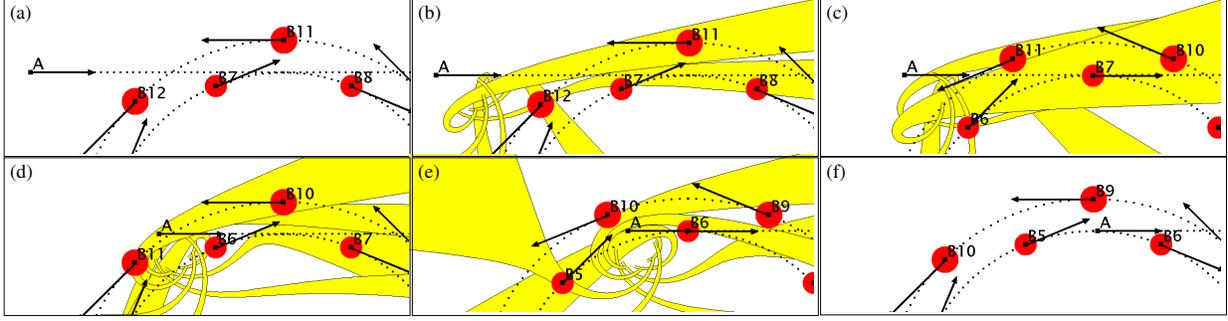


FIG. 8 – Le véhicule A s’insère dans le trafic grâce au calcul et à la mise à jour temps réel des  $V - obstacles$  lors de son mouvement. Il lui suffit de prendre soin à tout moment de vérifier que son vecteur vitesse pointe bien en dehors de la zone grise.

**Modèles masses-ressorts.** Cette année pour ce qui concerne la modélisation d’objets déformables, nous avons proposé un modèle volumique de type masses-connecteurs. Conformément à la réalité, ce modèle présente un comportement dynamique hétérogène et non-linéaire. Nous avons intégré ce modèle dans un simulateur échographique pour la cuisse humaine (Fig. 9) [37]. Le réseau est modélisé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} F &= k\Delta x \\ F &= \Delta x / (a\Delta x + b) \end{aligned} \quad (1)$$

où  $\Delta x$  est la différence entre la longueur courante des ressorts et celle au repos. Le choix d’une réponse non linéaire permet de modéliser l’incompressibilité de la cuisse au delà d’une certaine déformation. Les paramètres physiques des éléments qui représentent la surface de la cuisse sont uniformes, tandis que les paramètres des ressorts non-linéaires sont choisis non-uniformes, ceci afin de restituer fidèlement le comportement hétérogène de la cuisse.

**Modèles éléments finis.** Nous avons également proposé cette année [23] un autre modèle de déformation à base d’éléments finis tétraédriques, qui utilise le tenseur de Green-Lagrange comme mesure de déformation :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial x}{\partial a_i} \cdot \frac{\partial x}{\partial a_j} \right) - \delta_{ij} \quad (2)$$

où  $x$  est la position dans le repère du monde et  $u$  le repère du matériau. Ce tenseur a l’avantage d’être invariant à la rotation. Pour un matériau isotrope et linéaire, on peut de même calculer le tenseur de contrainte où  $\lambda$  détermine la dilatation en volume et  $\mu$  la rigidité du matériaux. Ceci permet de calculer les forces sur chaque nœud du réseau. L’intégration de ces forces dans le temps permet de simuler la dynamique de l’objet.

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (3)$$

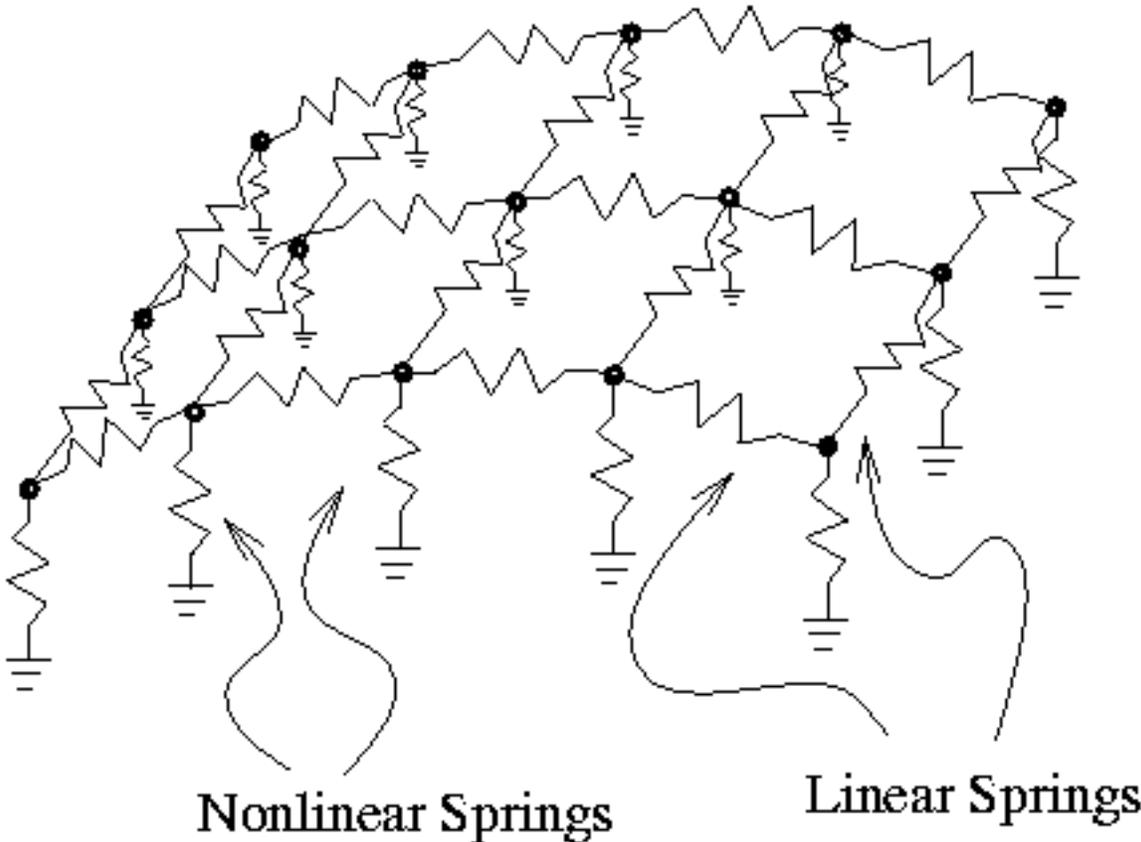


FIG. 9 – Modélisation d’une cuisse humaine à l’aide d’un double maillage masse-ressort.

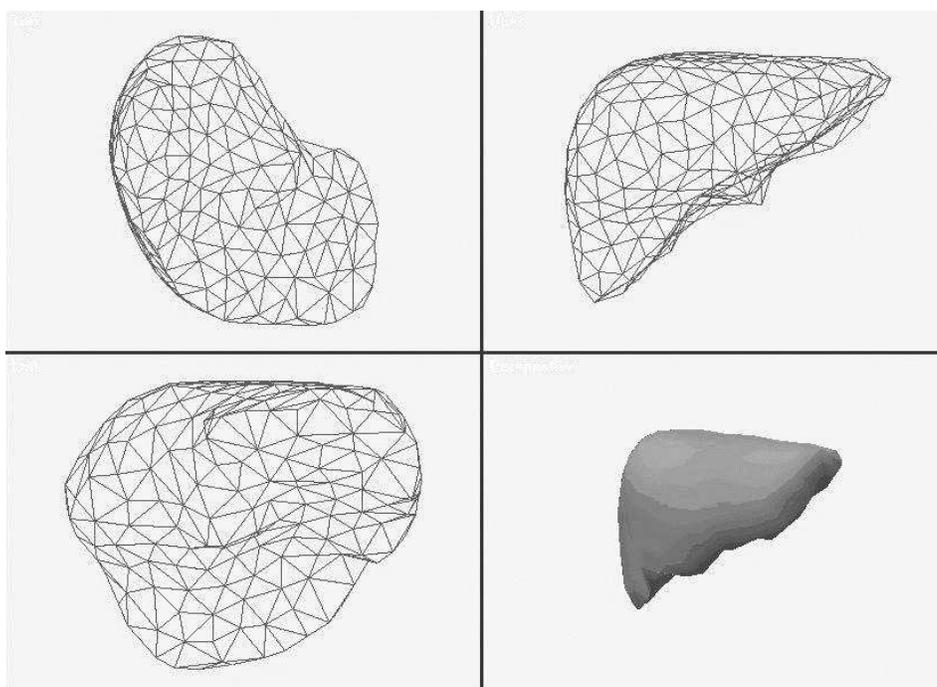


FIG. 10 – Modélisation par éléments finis d'un foie humain sous la forme d'un maillage volumétrique.

**Modèle LEM.** Le modèle LEM (**L**ong **E**lement **M**ethod), a été conçu pour la simulation en temps-réel de tissus biologiques mous. Dans ce modèle, le comportement mécanique de l'objet est caractérisé par les deux conditions aux limites suivantes :

- Le principe de Pascal qui établit que, dans un fluide incompressible en équilibre, les pressions se transmettent intégralement.
- L'incompressibilité du fluide implique que la conservation du volume doit être garantie lorsqu'il y a interaction externe et déformation de l'objet.

Le principe de cette approche est décrit dans le rapport d'activité 2000.

Cette année, nous avons proposé une nouvelle méthode [30] pour construire le modèle LEM à l'aide d'un maillage convexe ou concave. Ce modèle est construit à partir d'un maillage surfacique triangulaire de l'objet. Nous avons expérimenté cette méthode dans le cadre de la modélisation du foie humain. Les résultats obtenus sont montrés dans la fig. 11

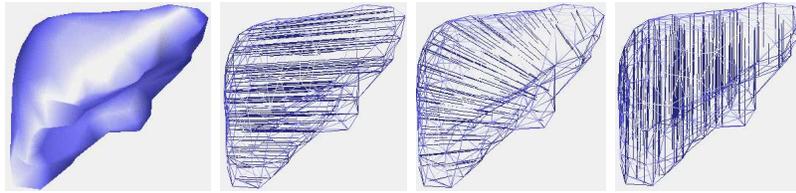


FIG. 11 – Discretisation d'un foie humain en Éléments Longs

**Méthodes numériques.** Les équations différentielles de la dynamique d'un système de particules ou d'éléments peuvent être décrites de manière générale comme :

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx &= \sum F^{ext} \\ \dot{v} &= M^{-1}(-Cv - Kx + \sum F^{ext}) \\ \dot{x} &= v \end{aligned} \quad (4)$$

où  $M$ ,  $C$  et  $K$  sont respectivement les matrices de masse, viscosité et rigidité de taille  $3n \times 3n$  et où  $x$  est une particule ou un élément. Ce système d'équations peut être résolu soit en dynamique soit en statique selon les caractéristiques de l'objet simulé.

**Résolution dynamique.** La résolution dynamique peut être obtenue en utilisant une méthode d'intégration *explicite* ou *implicite*.

**(a) Intégration explicite.** Dès lors que la force agissant sur une particule est connue, il est possible d'évaluer les changements de vitesse et de position de cette particule. La méthode la plus simple est l'intégration de Newton-Euler :

$$\begin{aligned} v_i^{t+\Delta t} &= v_i^t + \Delta t a_i^t \\ x_i^{t+\Delta t} &= x_i^t + \Delta t v_i^t \end{aligned} \quad (5)$$

Toutefois, dans les cas de la simulation d'objets faiblement élastiques (réseau de ressorts de forte raideur), cette méthode d'intégration simple présente l'inconvénient de nécessiter un

pas de temps critique au delà duquel les instabilités numériques conduisent à la divergence du système. Cette approche a été cependant utilisée avec succès pour simuler le comportement dynamique d'un foie humain à déformation non-linéaire et modélisé par un réseau de masses-resort [BdC00]. C'est la faible rigidité et la forte viscosité du modèle qui rend ceci possible.

**(b) Intégration implicite.** Afin d'éviter les problèmes causés par des connecteurs trop raides, nous avons aussi utilisé une méthode d'intégration implicite dans [37]. Ici, la vitesse et la position sont obtenues par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} v_i^{t+\Delta t} &= v_i^t + \Delta t a_i^{t+\Delta t} \\ x_i^{t+\Delta t} &= x_i^t + \Delta t v_i^{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (6)$$

Si on note  $y$  l'état du système et  $f(y)$  sa dérivée, nous pouvons généraliser cette formulation sous la forme d'un système linéaire décrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} f(y^t) &= \lambda y^t \\ y^{t+\Delta t} &= y^t + \Delta t f(y^{t+\Delta t}) = y^t + \Delta t \lambda y^{t+\Delta t} \\ y^{t+\Delta t} &= \frac{y^t}{1-\lambda \Delta t} \end{aligned} \quad (7)$$

où  $\lambda$  est une constante. Pour des équations linéaires, l'intégration ne peut pas diverger. Dans le cas d'équations non linéaires, il existe toutefois une possibilité de divergence (*cf.* [10] pour une caractérisation de cela).

**Résolution statique.** Si la dynamique de notre système n'est plus essentielle, comme dans le cadre de la simulation de tissus mous, nous pouvons alors réduire la complexité du système en ignorant la vitesse.

Dans le modèle LEM, à l'équilibre, la pression externe et interne sont parfaitement équilibrées [30]. Par conséquent, nous pouvons obtenir les déplacements en appliquant le principe de la conservation du volume (Fig. 12). Soit un objet mou décrit par une matrice de rigidité  $A$  supposée constante, on peut calculer un changement d'état  $x$  résultant de l'application d'une pression externe et de la gravité, toutes deux décrites par la matrice  $b$ . Le problème à résoudre est le suivant :

$$x = A^{-1}b \quad (8)$$

Cependant, cette méthode n'est valide que pour de *petites* déformations. A contrario, dans le cas de grandes déformations [10], la matrice de rigidité  $A$  ne peut plus être considérée comme constante, et le système devient non-linéaire. La solution que nous avons adoptée repose alors sur la méthode itérative de Newton-Raphson. Cette méthode consiste à réduire de manière itérative l'erreur résiduelle [23].

---

[BdC00] F. BOUX DE CASSON, *Simulation dynamique de corps biologiques et changements de topologie interactifs*, Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry (FR), décembre 2000.

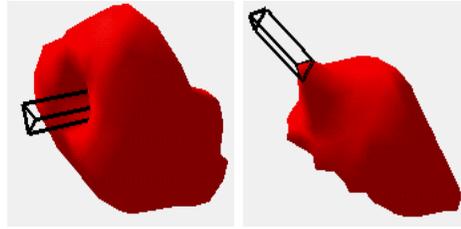


FIG. 12 – Déformations simulées en utilisant une méthode de résolution statique.

### 6.3.2 Interactions 3D

**Participants :** François Boux de Casson, Christian Laugier, Olivier Lebeltel, César Mendoza-Serrano, Kenneth Sundaraj.

**La détection de collision.** La détection de collision consiste à comparer les positions relatives des objets en mouvement afin de déterminer si, à un instant donné, ces objets sont en situation de collision. Les différentes méthodes à envisager dépendent des choix de modélisation des objets (surface implicite, soupe de polygones) mais aussi de leurs propriétés géométriques (convexe ou concave), et physiques (rigide ou déformable).

Cette année, nous avons implémenté notre algorithme de détection de collision dans un simulateur médical pour le foie [23] et dans un simulateur dynamique pour le modèle LEM [30]. Cet algorithme utilise une hiérarchie de type arbre binaire de boîtes englobantes alignées sur les axes (AABB “Axes Aligned Bounding Boxes”) et applique un parcours récursif dans le voisinage de tous les éléments en intersection afin de localiser les éléments en contact. Cette approche permet de converger rapidement vers les régions de collisions et de calculer une approximation du volume d’interpénétration fictive, pour des objets convexes ou concaves, rigides ou faiblement déformable.

**Interaction haptique et modifications de topologie.** Au cours des années 1999 et 2000, nous avons entamé une étude portant sur l’interaction haptique [dBL00] et sur les modifications topologiques interactives des objets [BdC00] ( déchirement et découpe 2D ). Pendant l’année 2001 nous avons poursuivi ce travail et amélioré les algorithmes proposés [26].

L’interaction haptique nécessite des fréquences de mise à jour de l’ordre du kilohertz afin de donner une sensation réaliste du toucher. Les simulations dynamiques des objets virtuels n’arrivent pas à des fréquences de calcul supérieures à 50 Hz. Cette différence de fréquence peut provoquer des problèmes d’instabilité dans le système haptique.

Pour résoudre ce problème, nous séparons le processus de simulation et le processus haptique. Ces deux processus interagissent par le biais d’un modèle intermédiaire : le modèle local.

---

[dBL00] D. D’AULIGNAC, R. BALANIUK, C. LAUGIER, « A Haptic Interface for a Virtual Exam of the Human Thigh », in : *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3, p. 2452–2457, San Francisco, CA (US), avril 2000.

Dans des travaux précédents [dBL00] [BL00] nous avons construit le modèle local à base de sphères ou de plans, cependant cette approche n'est valable que pour des objets peu déformables.

Cette année, nous avons proposé [26] de construire un modèle local plus complexe, adapté aux objets fortement déformables et qui respecte les contraintes de mise à jour haptique. La construction de ce modèle est faite à partir de la topologie locale de l'objet (ensemble de certaines facettes planes de l'objet).

Dans les cas de modifications topologiques telles que la découpe, nous avons pris en compte trois critères importants : (1) la préservation des principales caractéristiques physiques (volume, masse, élasticité), (2) la restitution d'effets visuels réalistes, (3) le respect des contraintes de simulation en temps réel. Pour cela, au lieu de diviser les facettes du maillage initial en facettes plus petites, nous les "séparons". Cette "séparation" permet d'éviter la disparition de matériau et réduit l'augmentation de la complexité du modèle [BdC00].

Enfin, nous avons réalisé l'intégration du retour d'effort avec la modélisation de la découpe [25]. Le résultat ainsi obtenu fournit à l'utilisateur une sensation beaucoup plus réaliste de toucher et de manipulation au cours de la simulation d'une opération de découpe. Le modèle local utilisé repose sur une modélisation de l'outil de découpe sous la forme d'un point. Afin d'améliorer le réalisme de la simulation, nous travaillons actuellement à intégrer au modèle local une représentation en volume de l'outil de découpe haptique.

### 6.3.3 Simulateurs Médicaux

**Participants :** Diego d'Aulignac, Christian Laugier, César Mendoza-Serrano, Salim Renane, Stéphane Viera.

Dans le cadre du projet CAESARE, nous avons développé un modèle de masses-ressorts du foie humain. Cependant, suite à nos évaluations expérimentales, nous avons observé que ce modèle présente un comportement qualitativement plus proche de celui de la vésicule biliaire (hétérogénéité, non-linéarité). Donc, nous avons utilisé le modèle de masses-ressorts pour la vésicule biliaire alors que pour le foie humain nous avons utilisé le modèle d'élément fini de Green-Lagrange.

Afin de tester nos modèles de simulation physique et nos algorithmes de découpe nous avons simulé une manipulation de laparoscopie : la séparation de la vésicule du foie humain. Dans ce processus, nous avons utilisé un modèle masses-ressorts pour le tissu que relie la vésicule au foie. Ensuite, nous avons simulé des opérations de découpe surfacique sur le tissu pour permettre de séparer la vésicule (Fig. 13).

Dans les années précédentes, un modèle physique de la cuisse humaine a été développé dans le cadre d'un simulateur échographique pour la détection des thromboses veineuses. Dans

- 
- [dBL00] D. D'AULIGNAC, R. BALANIUK, C. LAUGIER, « A Haptic Interface for a Virtual Exam of the Human Thigh », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3, p. 2452-2457, San Francisco, CA (US), avril 2000.
- [BL00] R. BALANIUK, C. LAUGIER, « Haptic interfaces in generic virtual reality systems », *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.
- [BdC00] F. BOUX DE CASSON, *Simulation dynamique de corps biologiques et changements de topologie interactifs*, Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry (FR), décembre 2000.

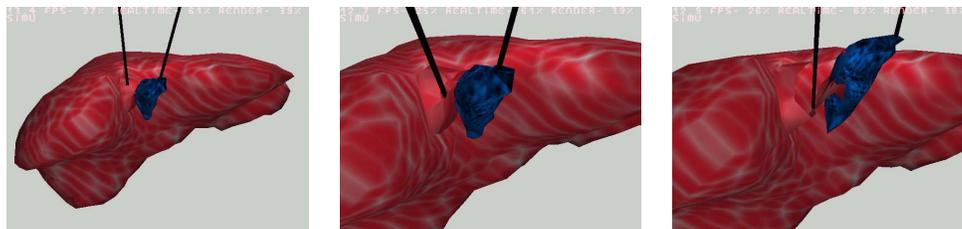


FIG. 13 – Simulation de la découpe du tissu qui relie la vésicule et le foie humain



FIG. 14 – Génération en ligne des images échographiques en fonction de l'interaction avec le modèle physique de la cuisse humaine.

la poursuite de ce but, nous avons cette année, en collaboration avec l'équipe GMCAO<sup>14</sup> du laboratoire TIMC-IMAG<sup>15</sup>, intégré un générateur d'images échographiques suite au stage de M. Vieira [37].

À partir des données échographiques acquises, nous avons procédé à la construction d'une représentation 3D, permettant la génération des images en temps-réel pour toute position et orientation de la sonde échographique virtuelle contrôlée à l'aide d'une interface haptique. Ces images peuvent alors être adaptées pour prendre en compte la déformation de la cuisse due à la pression exercée avec la sonde virtuelle. Toutes ces réalisations ont permis le développement d'un premier prototype pour la simulation du geste échographique (Fig. 14).

#### 6.3.4 Synthèse du mouvement

**Participants :** Juan-Manuel Ahuactzin, Christian Laugier, Olivier Lebeltel, David Raulo, Yan Uschanoff.

Il s'agit ici de définir des mécanismes aptes à engendrer automatiquement certaines classes

<sup>14</sup>Gestes Médicaux et Chirurgie Assistés par Ordinateur

<sup>15</sup>Techniques de l'Imagerie, de la Modélisation et de la Cognition

de mouvements et de comportements pour un agent virtuel (ou “Robot virtuel”). On considère alors que l’agent virtuel est doté de capacités de mouvement autonome.

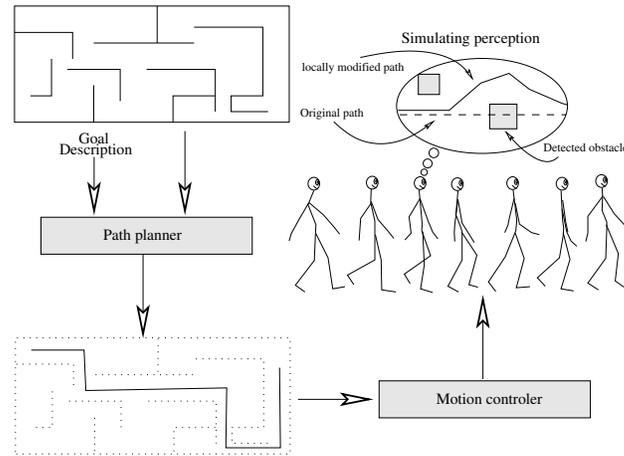


FIG. 15 – Structure décisionnelle pour un agent autonome virtuel.

Ces deux dernières années, nous avons développé les principes de base d’une fonction de déplacement autonome en environnement virtuel. Cette fonction comporte un mécanisme de planification de trajectoires sans collision dérivé de la Robotique, un contrôleur de mouvement permettant de suivre de manière réactive une trajectoire donnée, des mécanismes de perception simplifiés et enfin un système de programmation de comportements réactifs. Ce principe a été implanté dans notre plate-forme logicielle AlaDyn3D et utilisé pour donner à des personnages articulés certains comportements : “footballeur”, navigation dans un labyrinthe, évitement réactif d’obstacles mobiles. Les personnages évoluent dans un environnement virtuel soumis aux lois de la Physique de Newton et pouvant comporter des corps déformables.

Chaque personnage ou “Robot Virtuel” est alors représenté par une hiérarchie de chaînes cinématiques et de corps solides (*cf.* rapport d’activité 1999) : chaque segment correspond à un solide (*e.g.* l’avant-bras gauche), et chaque nœud à une articulation, pouvant comprendre chacune de 1 à 3 degrés de liberté (des rotations). A chaque instant, la *position* du personnage dans le monde virtuel est définie par le repère associé à la racine de l’arbre cinématique, et sa *posture* est décrite par l’ensemble des valeurs articulaires. Sa position relative par rapport aux obstacles et objets d’intérêt (*e.g.* le ballon) est alors calculée en fonction de sa perception de l’environnement (perception globale ou locale selon le cas). Afin d’accélérer le calcul des collisions, des boîtes englobantes ont été associées à cette structure (Fig. 16).

Le “contrôleur de mouvement” comporte deux fonctions complémentaires : la fonction de “locomotion” qui assure la coordination du mouvement des divers éléments du robot virtuel lors d’un déplacement réalisé dans un mode prédéfini, et la fonction de “suivi de chemin” qui génère les paramètres globaux (orientation, vitesse, accélération) du déplacement.

**Locomotion.** Pour la fonction de *locomotion* (marche ou course), nous avons utilisé une méthode classique consistant à coupler des données issues de capture du mouvement humain

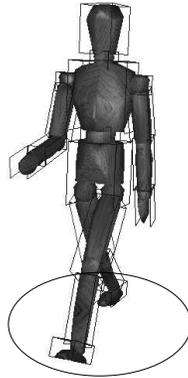


FIG. 16 – Modèle du Robot Virtuel (chaînes cinématiques, corps rigides articulés, boîtes englobantes pour le calcul des collisions).

avec un algorithme d'interpolation par courbes de Bézier. Nous avons ajouté la possibilité d'importer des fichiers H-ANIM (format de description d'humanoïdes de synthèse dérivé du standard VRML97 pour le WEB), ceci permettant de doter le personnage de plusieurs "jeux" de locomotion. Les travaux des projets Bip et Imagis sur la simulation de locomotion bipède pourraient s'intégrer dans cette approche.

**Suivi de chemin** En ce qui concerne le *suivi de chemin*, deux approches ont été abordées. Dans un premier temps nous avons utilisé un contrôleur de type PID auquel ont été ajoutées quelques contraintes simples sur les vitesses et accélérations linéaires et angulaires. Le chemin à suivre est fourni en temps réel par un planificateur de trajectoires (Fig. 15), un comportement de navigation dirigée vers un but en présence d'obstacles étant ainsi réalisé.

Dans l'implantation actuelle, le planificateur géométrique consiste en une version générique de l'algorithme *ACA* [MAB98]. Ce planificateur est implanté orienté objet et permet de définir un problème de planification de trajectoires grâce à la dérivation de quatre classes appelées *path driver*, *goal predicate*, *obstacle discriminator* et *local planner*. Ces quatre classes contiennent des fonctions virtuelles à être écrites par l'utilisateur en fonction du problème de planification de trajectoires à résoudre. De cette façon, notre planificateur peut chercher une solution au problème sans s'occuper du type de trajectoires utilisées, du but à atteindre, des obstacles de l'environnement ou du planificateur local utilisé. L'idée générale du planificateur générique est de pouvoir écrire facilement et rapidement des planificateurs pour des tâches différentes ou similaires des robots virtuels. En plus, l'information obtenue lors de la résolution d'un problème de planification de trajectoires (*i.e.* un ensemble de balises dans l'espace de recherche du problème) pourrait être utilisée pour atteindre des buts de caractéristiques différentes.

**Programmation bayésienne.** Une seconde approche a été abordée pour doter les "robots virtuels" de comportements autonomes : nous avons utilisé les méthodes de *programmation*

---

[MAB98] E. MAZER, J.-M. AHUACTZIN, P. BESSIÈRE, « The Ariadne's Clew Algorithm », *Journ. of Artificial Intelligence Research* 9, July-December 1998, p. 295–316.

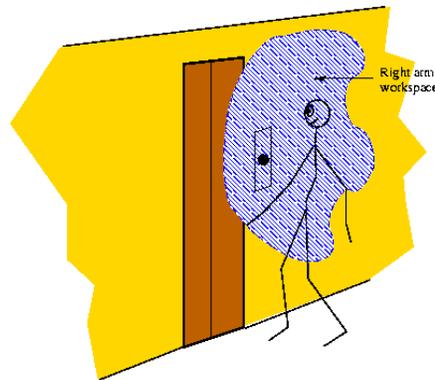


FIG. 17 – Espace de travail pour une tâche de cinématique inverse.

*Bayésiennes* qui avaient été utilisées avec succès sur des petits robots mobiles (par O. Lebel tel dans le cadre de sa thèse<sup>[Leb99]</sup>). Ces techniques permettent de décrire des comportements réactifs définis comme des *dépendances probabilistes* entre les variables sensorielles, motrices, plus éventuellement des variables internes des personnages. Il est ainsi possible de construire indépendamment plusieurs comportements simples (comme l'évitement réactif d'obstacles mobiles, le suivi de contour, etc...) puis de les *composer* hiérarchiquement ou les *séquence* en temps réel suivant ce qui est perçu de l'environnement. Les variables motrices peuvent être par exemple les vitesses linéaires et angulaires des personnages. Les *modes de locomotion* dont nous avons parlé précédemment peuvent être considérés comme des variables internes. Les variables sensorielles sont fournies par des "*capteurs virtuels*". Nous avons notamment construit un capteur de proximité des obstacles comme un pré-traitement appliqué aux informations géométriques du monde virtuel, basé sur une variante de l'algorithme GJK de calcul de distances entre objets polyédriques. Cette méthode de spécification des comportements offre l'avantage de fonctionner dans des environnements dont la configuration n'est pas connue a priori (il n'est pas utile d'en construire préalablement une carte) ou lorsque celui-ci évolue dynamiquement au cours du temps.

Notre approche a été validée expérimentalement avec un environnement dynamique simulé comportant des obstacles rigides (murs), des objets déformables (drapeaux que l'on peut déformer et/ou déchirer), un ballon dont le comportement est soumis aux lois de la physique de Newton, et un personnage articulé autonome ayant la capacité de "jouer au ballon" de manière automatique (et en temps réel). Ainsi, la version générique de l'*ACA* a déjà permis de planifier des trajectoires pour un personnage virtuel autonome qui cherche à atteindre des buts fixes ou mobiles, de même que pour un véhicule holonome. Actuellement nous développons les classes dérivées pour résoudre les problèmes suivants : (1) amener une extrémité du personnage virtuel (*e.g.* sa main) vers une position déterminée (cinématique inverse, Fig. 17) (2) déplacer un objet d'une position à une autre (manipulation).

D'autres expérimentations ont été menées pour tester l'approche Bayésienne. Dans le même

---

[Leb99] O. LEBELTEL, *Programmation bayésienne des robots*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), octobre 1999.

type d’environnement que précédemment, nous avons pu contrôler simultanément cinq personnages avec un même comportement réactif d’évitement d’obstacles (Fig. 18). Celui-ci s’est avéré peu coûteux en calculs et très robuste aux changements rapides de trajectoires des obstacles (par exemple lorsque l’expérimentateur prend le contrôle de l’un des personnages et tente d’intercepter un des autres).

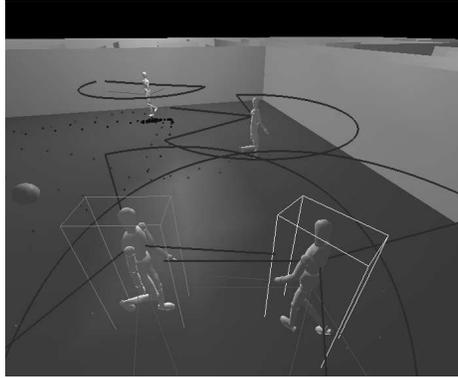


FIG. 18 – Comportement d’évitement réactif et capteurs virtuels.

Le travail actuel porte sur l’*apprentissage* des comportements réactifs ainsi que sur la combinaison dans le formalisme bayésien de ceux-ci avec les fonctions plus “haut niveau” apportées par le planificateur de trajectoires. Nous pensons en effet que ces deux approches sont complémentaires et doivent être combinées dans notre architecture décisionnelle de manière à permettre de générer des comportements plus sophistiqués.

## 6.4 Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique

**Participants :** Pierre Bessière, Emmanuel Mazer, Kamel Mekhnacha, Olivier Lebeltel, Ruben Garcia, Carla Koike.

Plusieurs moteurs d’inférence probabilistes ont été développés dans le passé en collaboration avec le laboratoire Leibniz. Ces moteurs ont été utilisés dans le domaine de la programmation des robots et dans celui de la CAO robotique. Ces travaux ont fait l’objet de deux thèses obtenues avec les félicitations du jury. [Leb99][Mek99], le papier de Kamel Mekhnacha [MMB00] sur un modèleur CAO probabiliste a reçu le prix du **meilleur papier de la conférence IROS 2000**.

Les techniques probabilistes ont été utilisées sur la plate-forme “portique + bras” mise à disposition par les moyens robotiques de l’Inria. L’objet de ce test est la réalisation d’un système main-oeil entièrement probabiliste (Thèse de Ruben Garcia) (Fig. 19).

---

[Mek99] K. MEKHNACHA, *Méthodes probabilistes bayésiennes pour la prise en compte des incertitudes géométriques: application à la CAO-robotique*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juillet 1999.

[MMB00] K. MEKHNACHA, E. MAZER, P. BESSIÈRE, « A Robotic CAD system using a Bayesian framework », in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.

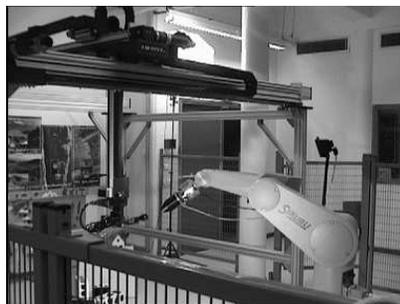


FIG. 19 – Application de l'inférence probabiliste au contrôle de robot : suivi par la tête mobile (portique) d'une cible portée par un bras



FIG. 20 – Application de l'inférence probabiliste au contrôle d'un robot mobile pendant la fête de la science

La nouvelle version du moteur d'inférence à été utilisée sur un robot mobile équipé d'une tourelle mobile supportant une mini-caméra. Cet ensemble a été présenté à la fête de la science 2001. Il a fonctionné durant toute la manifestation(trois jours) (Fig. 20).



FIG. 21 – Application de l'inférence probabiliste à la détermination de la cinématique du genoux

Le même moteur d'inférence est utilisé dans le domaine médical comme composant d'un ancillaire informatisé d'aide à la pose de prothèse du genou (collaboration avec AESCULAP). L'intégration du moteur dans le système de navigation d'aide au chirurgien permet à celui-ci de tenir compte des incertitudes lors de son intervention. Le système a été testé avec succès dans la détermination de la cinématique du genou (Fig. 21).

Par ailleurs, le moteur d'inférence à été utilisé dans le projet CARSENSE pour la fusion multi-modale. Dans ce projet il s'agit de fusionner au mieux des informations provenant de plusieurs sources (radar, laser, ultra-son, vision) dans le but de construire incrémentalement une carte de l'environnement. La fig. 22 montre le résultat de la fusion sur des données synthétiques.

Le moteur a été intégré avec le simulateur dynamique Aladyn pour la commande probabiliste d'avatar. L'intérêt de l'approche étant d'injecter une part d'incertain dans le comportement des joueurs virtuels.

Citons enfin une application du moteur d'inférence au calcul probabiliste de coût de revient. Nous avons appliqué notre principe dans le cadre d'une collaboration avec une société de transport et de location de containers maritime. Dans ce cas, c'est le calcul de coût qui est concerné, car de nombreux paramètres tels que la durée de transport, de déchargement ou de l'immobilisation des containers sont extrêmement incertains. Notre système va permettre de donner une réponse avec un écart-type. A l'ingénieur commercial d'utiliser cet écart-type, soit pour prendre des risques, soit au contraire pour se donner des marges confortables.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Actions de développement Praxitèle et LaRA

Le projet Sharp a participé activement à l'action de développement Praxitèle (<http://www-rocq.inria.fr/praxitele/>) [1994-1997] portant sur le concept du transport urbain public et individuel. Nous participons maintenant à une nouvelle action de développement baptisée LaRA (<http://www.lara.prd.fr>) sur le thème de la "route automatisée", qui implique

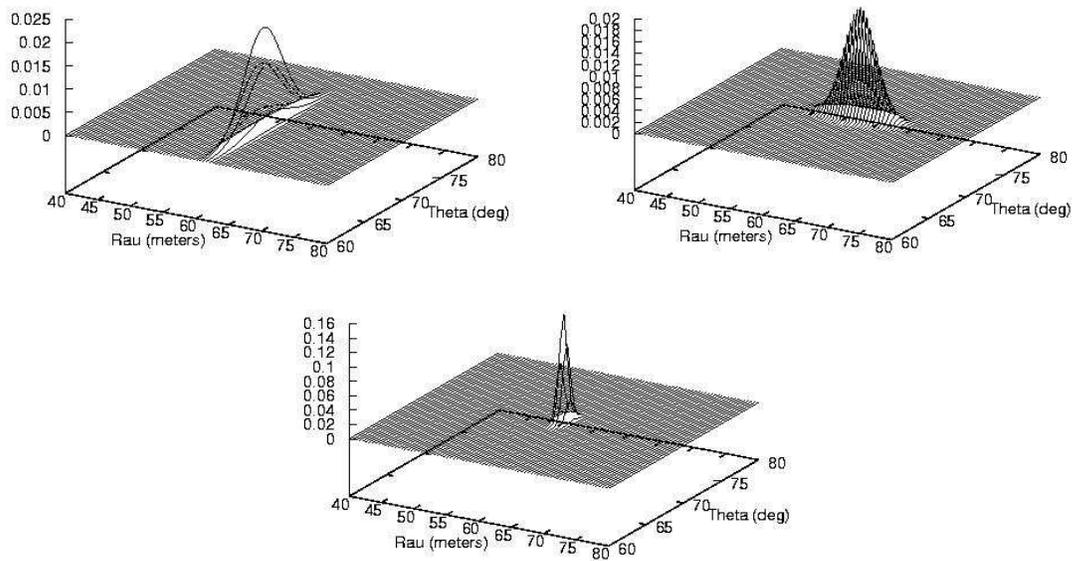


FIG. 22 – Application de l’inférence probabiliste à la fusion capteur dans le cadre du projet CARSENSE : fusion pour la détection d’un objet. En haut à gauche, mesure du capteur 1 ; en haut à droite, mesure du capteur 2 ; en bas, résultat de la fusion.

des organismes de recherche (Inrets, Inria, LCPC, ENCPC, ENSMP, ENST) et des partenaires industriels (Thomson-Detexsys, EDF, PSA, Renault, etc.). Dans LaRA, tout comme dans Praxitele, la contribution de Sharp porte sur l’aspect “conduite automatique”.

## 7.2 Projet Priamm “Studio virtuel”

Le projet Sharp participe activement au programme PRIAMM<sup>16</sup> du ministère de l’industrie dans le cadre du projet VISTÉO<sup>17</sup>. Ce projet a commencé en mai 2000 pour une durée de 24 mois. L’objectif de ce projet est de développer un ensemble d’outils logiciels permettant la mise en œuvre de studios virtuels physiquement réalistes incluant des interactions “physiques” entre le personnage réel et le studio virtuel dans lequel il est plongé. Ce projet, pour lequel la société Getris Image GDI est maître d’œuvre, implique les projets Sharp et Movi de l’Inria.

## 7.3 Robosoft

Dans le cadre de nos travaux dans le domaine du transport urbain public et individuel, nous avons initialisé un accord portant sur l’industrialisation de véhicules de type Cycab, dont trois exemplaires ont été vendus à NTU (Singapour). Depuis, Robosoft a été choisi par l’Inria, suite à un appel d’offre, pour industrialiser les véhicules Cycab.

<sup>16</sup>Programme pour l’Innovation dans l’Audiovisuel et le Multimédia.

<sup>17</sup>Système temps-réel intégrant vidéos et mondes virtuels

## 7.4 Carsense

Projet européen IST 12224 Carsense “Sensing of Car Environment at Low Speed Driving” (<http://www.carsense.org>, <http://www.cordis.lu/ist/projects.htm>) [janvier 2000-décembre 2003]. Ce projet européen porte sur la mise au point d’un système de perception multi-capteurs destiné à être embarqué sur un véhicule automobile. Il implique un certain nombre d’industriels européens du secteur automobile (Renault, BMW, Lucas Varity, Thomson Detexys, Ibeo, etc.) et des instituts de recherche (Inria, Inrets, Livic). Dans ce projet, nous traitons la partie fusion de données.

## 7.5 Arcos 2003

Action fédérative élaborée dans le cadre du PREDIT, le projet ARCOS 2003 a l’ambition de réussir une approche globale du système “véhicule-conducteur-infrastructure”, en vue de contribuer à l’amélioration de la sécurité routière (avec un objectif de réduction de 30% des accidents!). L’équipe Sharp intervient dans le thème 3 de ce projet qui a pour titre la “Synthèse de l’information et élaboration de la commande”. Ce grand projet inclue de nombreux laboratoires français travaillant dans le domaine des véhicules et de la route (ENSMP, INRETS/LIVIC, SUPELEC, UTC...) ainsi que les plus grands constructeurs automobiles français (PSA et Renault).

## 7.6 Biba

Le projet BIBA [*Nov. 2001-Octobre 2005*] s’inscrit dans le programme IST de la Communauté Européenne. Les 2 objectifs du projet sont d’utiliser le raisonnement probabiliste bayésien pour, d’une part, reconsidérer notre façon d’élaborer les artefacts non-virtuels, et d’autre part, comprendre comment les systèmes biologiques utilisent la logique probabiliste dans leur environnement. Les partenaires sont : GRAVIR, University College of London (Département de Physiologie), University College of Cambridge (Laboratoire de physiologie), le Collège de France (Laboratoire de physiologie de la perception et de l’action), l’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et le Massachusetts Institute of Technology (Laboratoire des systèmes non-linéaires).

# 8 Actions régionales, nationales et internationales

## 8.1 Actions régionales et nationales

**Projet Gravir-Leibniz.** Ce projet sur la prise en compte de l’incertitude (avec le laboratoire Leibniz) à reçu le label Imag pour quatre ans et obtenu pour cela un soutien financier de l’Imag.

**Pôles CNRS Structures et Machines Intelligentes.** Nous sommes impliqués dans quatre de ces pôles : “Robots autonomes d’intervention sur site non-coopératif” (coordinateur : Laas à Toulouse), “Coopération homme-machine pour l’aide à la conduite automobile” (coordinateur : laboratoire Heudiasyc à Compiègne), “Aide au geste chirurgical” (coordinateur : laboratoire

TIMC à Grenoble) et “Téléopération et Réalité Virtuelle” (coordinateur : Commissariat à l'énergie Atomique).

**GDR Coopération Homme-Machine pour l'Assistance à la Conduite** Ce GDR du CNRS a démarré en septembre 1999. Il a pour mission l'étude de l'activité de conduite automobile et l'identification et la mise au point de fonctions d'assistance destinées à en améliorer le confort et la sécurité. Nous y sommes impliqués en compagnie de chercheurs issus des secteurs des Sciences pour l'Ingénieur, des Sciences de la Vie et des Sciences Humaines et Sociales.

**Projet Caesare** Ce projet d'une durée de deux ans est soutenu par le ministère de la Recherche (programme “Télémédecine”). Outre Sharp, il implique cinq projets Inria (Epidaure, Sinus, Imagis, Mostra et M3n), l'Ircad<sup>18</sup> de Strasbourg et la société ESI. L'objectif de ce projet est de proposer des méthodes et algorithmes pour modéliser de la façon la plus précise possible, tout en garantissant une simulation interactive, des opérations de découpe et de déchirement sur des modèles dynamiques. L'implantation des méthodes est terminée pour les objets surfaciques et en cours de finition pour les corps volumiques.

#### Collaborations internes à l'Inria

- Avec le projet Imagis sur le thème de l'animation et de simulation dynamique.
- Avec le service des Moyens Robotiques de l'Inria Rhône-Alpes, sur le Cycab et l'intégration de capteurs.
- Avec le projet Movi, sur le thème du Studio Virtuel (programme Priamm).

## 8.2 Relations bilatérales internationales

### 8.2.1 Russie et Asie Centrale

**Institut Franco-Russe Liapunov.** L'institut Liapunov qui est un institut commun de l'Inria et de l'Académie des Sciences de Russie, nous a accordé son soutien pour une collaboration de deux ans avec l'université de St. Petersburg (équipe du Prof. V. A. Yakubovich) sur le thème *Controller design for autonomous car steering* [juillet 2000 – juin 2002]. Ce projet est consacré au problème de la conception d'un contrôleur qui assure le mouvement stable et robuste d'un véhicule le long d'un chemin imposé et inconnu d'avance.

### 8.2.2 Pacifique et Asie du Sud

**Collaboration avec le Japon.** Depuis octobre 1997, une collaboration dans le domaine des systèmes multi-robots a démarré avec l'institut Riken de Tokyo. Des visites croisées ont eu lieu au cours des trois dernières années.

---

<sup>18</sup>Institut de la Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif.

**Collaboration avec Singapour.** Le laboratoire commun, baptisé *Intelligent Vehicle Lab*, entre l'Université Technologique Nanyang de Singapour (NTU) et l'Inria a été inauguré en novembre 1998, dans le cadre de la collaboration scientifique sur le thème des véhicules autonomes signée par les présidents des deux institutions 2 mois plus tôt.

Depuis, cette collaboration s'est concrétisée : (a) par un nombre importants de visites et séjours croisés (d'une semaine à plusieurs mois) de chercheurs, (b) par l'accueil d'étudiants singapouriens à l'Inria (niveau undergraduate et graduate), et (c) par l'organisation en novembre 1999 à Singapour d'un symposium sur le transport intelligent.

### 8.2.3 Amérique du Nord

**Collaboration avec l'université de Vancouver (Canada).** La collaboration sur les aspects manipulation dextre, commencée lors de la visite du professeur K. Gupta à Grenoble en 1995, s'est poursuivie par plusieurs séjours longs de Moëz Cherif, et par des visites croisées. K. Gupta était en visite en juin 2000 et plusieurs publications communes sont apparues en 2000 et 2001.

**Collaboration avec l'université de Californie, Berkeley (USA).** Dans le cadre du programme France-Berkeley, une collaboration d'un an sur le thème de la simulation dynamique avait été menée en 2000-2001. Cette collaboration s'est poursuivie cette année dans le cadre d'un nouveau projet sur les simulateurs de chirurgie soutenu par le fonds France-Berkeley (avec l'équipe de S. Sastry). Plusieurs séjours croisés de chercheurs ont eu lieu.

**Collaboration avec l'université de Stanford.** L'étude de retour d'effort dans des environnements virtuels et les déformations élastiques non-linéaires ont été les sujets de collaboration avec le Centre de Technologie Avancée en Chirurgie de l'Université de Stanford. Plusieurs séjours croisés de chercheurs ont eu lieu.

### 8.2.4 Amérique du Sud et Amérique Centrale

**Collaboration avec le Mexique.** Le réseau thématique Image & Robotique est un réseau qui a été mis en place à la suite des journées Franco-Mexicaines d'informatique et de d'automatique (JFMIA'99) qui ont eu lieu à Xalapa au Mexique en Mars 1999. Le principal objectif du réseaux Image & Robotique est de promouvoir et d'accroître les coopérations Franco-Mexicaines dans le domaine de l'Image et de la Robotique, et ceci au niveau des aspects scientifique, académique, et industriel. Ce réseau a été mis en place de manière effective en 2000. Il supporte depuis une école d'été annuelle, des échanges d'étudiants et des visites croisées.

**Coopération avec l'université de Brasilia (Brésil).** Dans le cadre du programme de coopération Inria-Brésil, nous avons collaboré jusqu'en 2001 avec l'université de Brasilia sur les thèmes robotique mobile et programmation des robots.

### 8.3 Accueils de chercheurs étrangers

En 2001, le projet Sharp a accueilli les chercheurs étrangers suivants :

- Prof. Zvi Shiller, Professeur à University of California, Los Angeles.
- Prof. Danwei Wang, Professeur associé à Nanyang Technological University, Singapour.

## 9 Diffusion de résultats

### 9.1 Animation de la communauté scientifique

- C. Laugier et J-M. Ahuactzin ont participé en tant que responsable principal et organisateur local à l'Ecole d'été en Image & Robotique effectuée à Cuernavaca (Mexique) en juin-juillet 2001.
- C. Laugier a participé au comité de programme des conférences internationales suivantes : IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'2001), Int. Conf. on Field and Service Robotics (FSR'2001), IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'2001).
- C. Laugier est membre depuis 1997 du steering-advisory committee de la conférence IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), et depuis 2000 de l'advisory committee de la conférence internationale Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV).
- C. Laugier est membre du steering committee du réseau européen en robotique EURON.
- C. Laugier est membre du comité scientifique du programme national de robotique Robéa.

### 9.2 Enseignements universitaires

Outre des interventions ponctuelles en second cycle universitaire, les membres du projet ont assuré les enseignements suivants :

- Cours "Motion planning" : Ecole d'été en Image & Robotique, Cuernavaca (MX) [juin-juillet 2001]. *Enseignants : J-M. Ahuactzin et Th. Fraichard.*
- Cours "Direct/Inverse kinematics, path generation, robot programming and applications" : Ecole d'été en Image et Robotique, Cuernavaca (MX) [juin-juillet 2001]. *Enseignant C. Laugier.*
- Cours "Bayesian robot programming" : Ecole d'été en Image et Robotique, Cuernavaca (MX) [juin-juillet 2001]. *Enseignant : O. Aycard & J. Diard*
- Cours de "Robotique" : Cours d'été de l'Université Stendhal, Centre Universitaire d'Etudes Françaises, Grenoble (FR) [août 2001]. *Enseignant : Th. Fraichard.*
- Cours "Architecture et programmation des robots" : DEA "Imagerie, Vision, Robotique" de l'INPG, Grenoble (FR). *Enseignant : C. Laugier.*
- Cours "Robotique et autonomie de mouvement" : DEA "Imagerie, Vision, Robotique" de l'INPG, Grenoble, (FR). *Enseignant : C. Laugier.*
- TD-TP de Robotique : DEA "Imagerie, Vision, Robotique" de l'INPG, Grenoble, (FR). *Enseignant : Th. Fraichard.*
- Cours "Robotique" : en valeur C du Cnam. *Enseignant : C. Laugier et J. Troccaz.*

- Cours “Robotique et planification de mouvement” : Ecole Int. des Sciences et du Traitement de l’Information, Cergy Pontoise (FR). *Enseignant* : C. Laugier.

### 9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

La diffusion des résultats et la participation active à des manifestations scientifiques internationales représentent deux aspects essentiels de l’activité du projet. On se reportera à la bibliographie pour en avoir la liste. Concernant les invitations aux différentes manifestations scientifiques :

- C. Laugier a fait une conférence plénière sur invitation à IAV’2001 : "Some steps towards autonomous cars".
- C. Laugier a fait une conférence sur invitation à ISRR’2001 : "Towards a realistic medical simulator using virtual environments and haptic interaction".

## 10 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l’équipe

- [1] C. BARD, C. LAUGIER, C. MILÉSI-BELLIER, J. TROCCAZ, B. TRIGGS, G. VERCELLI, « Achieving dextrous grasping by integrating planning and vision based sensing », *Int. Journal of Robotics Research* 14, 5, octobre 1995, p. 445–464.
- [2] M. CHERIF, « Motion planning for all-terrain vehicles : a physical modeling approach for coping with dynamic and contact interaction constraints », *IEEE Trans. Robotics and Automation* 15, 2, 1999, p. 202–218.
- [3] A. DEGUET, A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, « Models and Algorithms for the Collision of Rigid and Deformable Bodies », *in : Robotics : the algorithmic perspective*, P. K. Agarwal, L. E. Kavraki, et M. T. Mason (éditeurs), A K Peters, 1998, p. 327–338, Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. Houston, TX (US). March 1998.
- [4] T. FRAICHARD, « Trajectory planning in a dynamic workspace : a ‘state-time’ approach », *Advanced Robotics* 13, 1, 1999, p. 75–94.
- [5] A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, « Dynamic Simulation : Model, Basic Algorithms, and optimization », *in : Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, Toulouse (FR), juillet 1996.
- [6] C. LAUGIER, P. GARNIER, T. FRAICHARD, I. PAROMTCHIK, A. SCHEUER, « Motion Planning and Sensor-Guided Manoeuvre Generation for an Autonomous Vehicle », *in : Field and Service Robotics*, A. Zelinsky (éditeur), Springer, 1998, p. 60–67.
- [7] E. MAZER, P. BESSIÈRE, J.-M. AHUACTZIN, « The Ariadne’s Clew Algorithm », *Journ. of Artificial Intelligence Research* 9, July-December 1998, p. 295–316.
- [8] A. SCHEUER, T. FRAICHARD, « Continuous-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles », *in : Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2, p. 997–1003, Grenoble (FR), septembre 1997.
- [9] B. TRIGGS, C. LAUGIER, « Automatic Task Planning for Robot Vision », *in : Proc. of the Int. Symp. on Robotics Research*, G. Giralt, G. Hirzinger (éditeurs), Munchen (DE), octobre 1995.

## Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [10] D. AULIGNAC, *Modélisation de l'interaction avec objets déformables en temps-réel pour des simulateurs médicaux*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), dec 2001.

## Articles et chapitres de livre

- [11] M. CHERIF, K. K. GUPTA, « Global Planning for Dexterous Reorientation of Rigid Objects : Finger Tracking with Rolling and Sliding », *Int. Journal of Robotics Research* 20, 1, janvier 2001, p. 57–84.
- [12] M. CHERIF, M. VIDAL, C. LAUGIER, « A Roadmap-based Algorithm for Planning Handling Operations in Changing Industrial Plants », *Int. Journ. of Robotics and Automation*, 2001, accepted, Dec. 1999.
- [13] I. COSTA FERREIRA, R. BALANIUK, « Static Solution for Real Time Deformable Objects with Fluid Inside », *ERCIM News* 44, janvier 2001, p. 44–45.
- [14] C. LAUGIER, G. DOBIAS, « Rapport de mission ITS au Japon », *Transport/Environnement/Circulation*, 167, 2001, p. 15–24.
- [15] C. LAUGIER, T. FRAICHARD, « Decisional architectures for motion autonomy », *in : Intelligent vehicle technologies*, L. Vlacic, F. Harashima, et M. Parent (éditeurs), Butterworth-Heinemann, 2001.
- [16] J.-P. LAUMOND, F. LAMIRAUX, S. SEKHAVAT, « Planification de mouvement pour robots mobiles non holonomes », *in : La robotique mobile*, J.-P. Laumond (éditeur), Hermès, 2001, p. 21–102.
- [17] E. MAZER, O. LEBELTEL, P. BESSIÈRE, K. MEKHNACHA, « Programmation des robots », *in : Analyse et modélisation des robots manipulateurs*, E. Dombre (éditeur), Hermès, 2001, ch. 6, p. 243–278.
- [18] K. MEKHNACHA, E. MAZER, P. BESSIÈRE, « The design and implementation of a Bayesian CAD modeler for robotic applications », *Advanced Robotics* 15, 1, 2001, p. 45–70.
- [19] S. SEKHAVAT, J. HERMOSILLO, « Cycab Bi-steerable Cars — A New Family of Differentially Flat Systems », *Advanced Robotics*, 2002, A paraître.

## Communications à des congrès, colloques, etc.

- [20] CARSENSE CONSORTIUM, « CARSENSE - New environment sensing for advanced driver assistance systems », *in : Proc. of the ITS Conference*, Sidney (AU), 2001.
- [21] C. COUE, P. BESSIÈRE, « Chasing an Elusive Target With A Mobile Robot », *in : Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Hawaii, HI (US), octobre-novembre 2001.
- [22] T. FRAICHARD, J.-M. AHUACTZIN, « Smooth Path Planning for Cars », *in : Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seoul (KR), mai 2001.
- [23] C. LAUGIER, C. MENDOZA SERRANO, K. SUNDARAJ, « Towards a Realistic Medical Simulator using Virtual Environments and Haptic Interaction », *in : Proc. of the Int. Symp. on Robotics Research*, Lome (AU), novembre 2001.
- [24] C. LAUGIER, S. SEKHAVAT, L. LARGE, J. HERMOSILLO, Z. SHILLER, « Some steps towards autonomous cars », *in : Proc. of the IFAC Symp. on Intelligent Autonomous Vehicles*, p. 10–18, Sapporo (JP), septembre 2001.

- [25] C. MENDOZA SERRANO, C. LAUGIER, F. BOUX DE CASSON, « Virtual Reality Cutting Phenomena using Force Feedback for Surgery Simulations », in : *Proc. of the Int. Conf. on Interactive Medical Image Visualization and Analysis*, Utrecht (NL), octobre 2001.
- [26] C. MENDOZA SERRANO, C. LAUGIER, « Realistic Haptic Rendering for Highly Deformable Virtual Objects », in : *Proc. of the Int. Conf. on Virtual Reality*, Yokohama (JP), mars 2001.
- [27] S. SEKHAVAT, J. HERMOSILLO, P. ROUCHON, « Motion Planning for a Bi-Steerable Car », in : *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, p. 3294–3299, Seoul (KR), mai 2001.
- [28] S. SEKHAVAT, P. ROUCHON, J. HERMOSILLO, « Computing the Flat Outputs of Engel Differential Systems The Case Study of the Bi-steerable Car », in : *Proc. of the American Control Conf.*, Arlington, VA (US), juin 2001.
- [29] Z. SHILLER, F. LARGE, S. SEKHAVAT, « Motion Planning in Dynamic Environments : Obstacles Moving Along Arbitrary Trajectories », in : *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, p. 3716–3721, Seoul (KR), mai 2001.
- [30] K. SUNDARAJ, C. LAUGIER, I. COSTA FERREIRA, « An approach to LEM modeling : Construction, Collision Detection and Dynamic Simulation », in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Hawaii, HI (US), octobre-novembre 2001.

### Rapports de recherche et publications internes

- [31] P. BILLIAU, « Implantation d’une méthode de guidage pour véhicule de type voiture », *Rapport de stage de formation d’ingénieurs*, Ecole Nat. Supérieure d’Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble, Grenoble (FR), septembre 2001.
- [32] H. BOUAZIZ VIALLET, « Hardware spécialisé pour machine probabiliste », *Mémoire de fin d’études*, Conservatoire Nat. des Arts et Métiers, Grenoble (FR), janvier 2002, A paraître.
- [33] M. DAKKAK, « Simulation distribuée de scènes interactives », *Mémoire de Diplôme d’Etudes Approfondies*, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juin 2001.
- [34] S. FAVE, « Conception d’un simulateur graphique d’environnements dynamiques 2D », *Rapport de stage IUP Miage 2*, Univ. Joseph Fourier, Grenoble (FR), septembre 2001.
- [35] C. PRADALIER, « Conception d’un système de localisation pour un robot mobile : utilisation d’un télémètre laser et placement d’amers dans l’environnement », *Mémoire de Diplôme d’Etudes Approfondies*, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juin 2001.
- [36] Y. USHANOFF, « Développement du concept d’agent autonome évoluant dans un monde virtuel », *Mémoire de fin d’études*, Conservatoire Nat. des Arts et Métiers, Grenoble (FR), janvier 2002, A paraître.
- [37] S. VIEIRA, « Intégration de Modèles Déformables avec un Générateur d’images échographiques », *Mémoire de fin d’études*, Conservatoire Nat. des Arts et Métiers, Grenoble (FR), décembre 2001.