

Action CHIR

Chirurgie, Informatique, Robotique

Sophia Antipolis

THÈME 4A



*R*apport
d'Activité

2000

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Composition de l'équipe | 2 |
| 2 | Présentation et objectifs généraux | 3 |
| 3 | Fondements scientifiques | 3 |
| 3.1 | Modélisation d'organes déformables | 3 |
| 3.2 | Planification et simulation de procédures chirurgicales robotisées | 4 |
| 3.3 | Intégration temps-réel sécurisée avec réalité augmentée | 6 |
| 3.3.1 | Réalité augmentée | 6 |
| 3.3.2 | Intégration temps-réel sécurisée | 7 |
| 4 | Domaines d'applications | 8 |
| 5 | Résultats nouveaux | 10 |
| 5.1 | Généralités | 10 |
| 5.2 | Modélisation d'organes déformables | 10 |
| 5.3 | Planification et simulation de procédures robotiques | 13 |
| 5.4 | Intégration temps-réel sécurisée avec réalité augmentée | 14 |
| 5.4.1 | Recalage pré/intra opératoire | 14 |
| 5.4.2 | Analyse de l'application en vue de l'intégration | 15 |
| 6 | Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux) | 16 |
| 6.1 | Intuitive Surgical | 16 |
| 6.2 | General Electric Medical System Europe | 16 |
| 7 | Actions régionales, nationales et internationales | 16 |
| 7.1 | Actions nationales | 16 |
| 7.1.1 | Contrat de collaboration clinique: HEGP/Inria | 16 |
| 7.1.2 | Télémédecine | 16 |
| 7.1.3 | RNRT VTHD | 17 |
| 7.1.4 | RNTS Endoxirob | 17 |
| 8 | Diffusion de résultats | 17 |
| 8.1 | Enseignement universitaire | 17 |
| 8.2 | Thèses et Stages | 17 |
| 8.3 | Participations à des jurys de thèse | 18 |
| 8.4 | Participation à des colloques, séminaires, invitations | 18 |
| 8.5 | Participation à des activités d'intérêt collectif | 19 |
| 9 | Bibliographie | 19 |

CHIR est une action à caractère pluridisciplinaire créée au 1^{er} janvier 2000. Elle s'inscrit dans le domaine applicatif prioritaire « Santé » défini dans le Plan Stratégique et plus particulièrement la robotique chirurgicale. L'objectif central de CHIR est d'intégrer robotique et traitement d'images pour faciliter la planification et l'exécution de procédures chirurgicales plus précises et moins invasives.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Ève Coste-Manière [CR]

Assistante de projet

Lætitia Grimaldi [TR, à temps partiel dans le projet]

Personnel Inria

Frédéric Devernay [CR]

Grégoire Malandain [CR, au 1/5 dans le projet]

Thierry Viéville [CR, au 1/5 dans le projet]

Collaborateurs cliniques

Renaud Séverac-Bastide

Alain Carpentier

Ingénieur expert

Laurent Goffin

Poste d'accueil

Olivier Bantiche

Chercheurs doctorants

Louaï Adhami [allocataire EGIDE]

Fabien Mourgues [allocataire moniteur normalien]

Christophe Blondel [contrat CIFRE, à partir du 1/11/2000]

Stagiaires

Louaï Adhami [avril–août 1999]

Éric Vecchié [avril–août 1999]

Dominique Francisci [février–juin 2000]

Fabien Mourgues [février–septembre 2000]

Arnaud Contes [juillet–août 2000]

2 Présentation et objectifs généraux

CHIR est une action à caractère pluridisciplinaire créée au 1^{er} janvier 2000. Elle s’inscrit dans le domaine applicatif prioritaire *Santé* défini dans le Plan Stratégique et plus particulièrement la robotique chirurgicale.

L’objectif central de CHIR est d’intégrer robotique et traitement d’images pour faciliter la planification et l’exécution de procédures chirurgicales plus précises et moins invasives. La procédure de pontage coronarien est l’application centrale autour de laquelle cette intégration est réalisée. Aujourd’hui, elle est effectuée en partenariat privilégié avec l’équipe du professeur Alain Carpentier à l’Hôpital Européen Georges Pompidou autour du robot télé-opéré da VinciTM. Ce robot a été acquis en copropriété entre l’Inria et Paris VI pour une installation en milieu clinique à l’HEGP.

Autour de la problématique scientifique de *l’intégration en chirurgie robotisée*, les recherches menées dans l’équipe concernent la chaîne suivante :

1. la construction et la visualisation de modèles anatomiques déformables,
2. la planification et la simulation d’interventions chirurgicales robotisées intégrant ces modèles,
3. l’intégration temps réel de procédures robotisées sécurisées avec réalité augmentée.

Les équipes de recherche Epidaure (Imagerie Médicale), Prisme (Géométrie Algorithmique), et RobotVis (Vision Artificielle) participent aujourd’hui au développement des différentes recherches requises pour chacune des briques qui interviennent dans la chaîne d’intégration.

3 Fondements scientifiques

3.1 Modélisation d’organes déformables

Mots clés : vision par ordinateur, stéréoscopie.

Résumé : *Les algorithmes et méthodes développés ici doivent permettre de construire les modèles informatiques des différents organes impliqués. Cette modélisation est nécessaire à toutes les phases d'une opération de chirurgie robotisée. C'est à cette étape que sont incorporées des données en provenance de différentes sources d'acquisition (images 2D et 3D, modèles a priori, atlas anatomiques, données biomécaniques) afin de produire des modèles réalistes du patient, des instruments chirurgicaux et de leur relation géométrique au bloc.*

La première application chirurgicale à laquelle nous nous intéressons est le pontage coronarien (voir section 4). Cette application nécessite en premier lieu la construction d'un modèle complet de l'organe concerné, le cœur. Des caractéristiques importantes à prendre en compte pour la modélisation du cœur sont :

- la grande variabilité anatomique inter-patients ;
- des mouvements importants et quasi-périodiques.

Il est donc nécessaire de construire un modèle 3D+t (c.-à-d. variant avec le temps) du cœur complet. Un modèle volumique du cœur à un instant donné du cycle cardiaque peut être obtenu à partir d'IRM. Pour obtenir un modèle 3D+t complet, on doit animer ce modèle volumique statique à partir d'un modèle 3D+t du réseau coronarien.

Les données permettant de construire un modèle 3D+t du réseau coronarien sont des séquences d'images coronarographiques (rayons X), prises sous des angles différents et durant plusieurs périodes cardiaques. La première étape consiste à détecter dans chaque séquence la position des vaisseaux (ligne médiane et diamètre), en utilisant la redondance temporelle, avec par exemple des techniques de diffusion anisotrope ou une approche par modèles. Dans un second temps, il s'agit d'utiliser les différentes séquences, synchronisées par rapport à l'ECG mais prises à des instants différents, pour reconstruire en 3D le réseau coronarien. Cette deuxième étape revient à faire de la stéréoscopie sur des courbes dont la position 3D peut avoir légèrement changé entre les prises de vue. La stéréoscopie sur des prises de vue non-simultanées est une situation largement ignorée dans les travaux du domaine.

La dernière étape consiste enfin à fusionner le modèle volumique 3D du cœur avec le réseau coronarien 3D+t. Cette étape nécessite d'abord d'identifier des repères communs aux deux modèles (départs des coronaires), puis à animer le modèle du cœur en utilisant le mouvement des coronaires.

En plus de ce modèle cinématique du cœur, il sera nécessaire d'obtenir un modèle physique de l'ensemble du patient, pour pouvoir simuler les interactions du corps du patient et de ses organes avec l'extérieur (notamment les instruments du robot et la pesanteur).

3.2 Planification et simulation de procédures chirurgicales robotisées

Mots clés : géométrie algorithmique, modélisation et simulation robotique.

Résumé : *C'est à cette étape que sont développés les algorithmes nécessaires d'une part à l'étude et à la prédiction des effets des actions chirurgicales en utilisant*

les modèles calculés dans l'équipe, et d'autre part à l'optimisation et l'évaluation des plannings chirurgicaux. Cette phase a de plus un impact majeur sur l'enseignement de gestes chirurgicaux nouveaux dans lesquels le chirurgien manipule non plus des outils endoscopiques classiques mais la console maître du système télérobotique. Elle ouvre aussi la porte au télé-enseignement du geste grâce au couplage du simulateur et de la console maître.

Lors de la phase préopératoire, qui précède l'intervention chirurgicale, le chirurgien doit pouvoir visualiser les données/images médicales (par exemple IRM, Scanner...) acquises sur le patient et simuler différents mouvements des robots et de l'endoscope afin de déterminer la stratégie opératoire à suivre et, en particulier, optimiser le positionnement des incisions permettant l'introduction des instruments dans le corps du patient. Cette simulation nécessite la prise en compte de critères divers reliés à la fois à la nature de l'intervention et à l'anatomie du patient. Elle doit de plus prendre en compte automatiquement les tâches de « bas niveau » (gestion des contraintes mécaniques et des collisions, visualisation) pour permettre au chirurgien de se concentrer sur son intervention. On peut également envisager que ce simulateur serve pour l'apprentissage du geste ou en cours d'intervention pour éventuellement replanifier l'intervention.

Dans le domaine clinique, le positionnement des trois incisions nécessaires à l'introduction des instruments dans le corps du patient se fait actuellement de manière empirique sur la base d'un travail expérimental effectué sur des cadavres ou des animaux. Les règles utilisées ne permettent pas de pratiquer l'opération avec facilité chez tous les malades à cause des variations individuelles des rapports anatomiques.

Les travaux effectués dans l'équipe visent donc à proposer un simulateur intégré de ces procédures chirurgicales robotisées. Ils s'appuient sur les résultats de domaines de recherche comme la géométrie algorithmique et la planification de trajectoires. Trois parties principales sont à prendre en compte pour le développement de ce simulateur :

1. *Modélisation des organes et du robot* : la représentation des organes et du robot doit être suffisamment réaliste et permettre d'accélérer les calculs géométriques. La modélisation des organes doit prendre en compte des caractéristiques physiologiques comme des propriétés d'élasticité et de mouvement périodique au cours du temps (battements du cœur).

L'objectif est d'étendre les algorithmes de représentation de surfaces fondés sur les diagrammes de Voronoï et les voisins naturels développé initialement dans l'équipe INRIA PRISME pour permettre la représentation de ces objets déformables.

2. *Planification* : cette phase doit permettre d'optimiser la planification de la procédure opératoire dans son ensemble ; en particulier, elle doit prendre en compte automatiquement des contraintes mécaniques et anatomiques, calculer des trajectoires respectant ces contraintes, et positionner correctement les incisions.

Pour effectuer les calculs géométriques nécessaires, l'objectif est de développer des méthodes efficaces pour la visualisation, les tests de collision entre les bras du robot ou entre un robot et un organe, et le calcul de déformations et de trajectoires.

3. *Simulation* : le simulateur doit permettre de visualiser d'un point de vue quelconque l'ensemble des organes, calculer la vue de l'endoscope, et rendre compte d'efforts de contact (déformation des organes et retour sensoriel). Le simulateur gèrera aussi les collisions entre les bras du robot qui se trouvent en dehors du corps du patient.

Ce simulateur est connectable à la console maître du robot DA VINCI pour permettre la simulation du geste dans les conditions opératoires.

3.3 Intégration temps-réel sécurisée avec réalité augmentée

Mots clés : recalage, réalité augmentée, intégration logicielle, temps réel, méthodes formelles, architecture de contrôle.

Résumé : *Lors du couplage de la phase pré-opératoire avec la phase per-opératoire, il s'agit enfin d'intégrer au système robotique les modèles et les plannings chirurgicaux construits et élaborés aux étapes précédentes. Ce couplage s'exerce sous la forme de superposition d'images par incorporation en temps-réel des images en provenance de la phase de planification.*

Il faut ici fournir la méthodologie et les outils nécessaires à l'intégration des différents composants logiciels et matériels requis pour un fonctionnement en temps réel dans un cadre clinique. L'utilisation de méthodes formelles permettra de certifier la correction d'un maximum de sous-systèmes.

3.3.1 Réalité augmentée

Le corps du patient et les organes étant déformables, il est nécessaire de calculer leur déformation, en utilisant notamment les images endoscopiques. Ce recalage peut être basé sur des primitives issues d'une image monoscopique (recalage 2D/3D), ou sur une reconstruction locale 3D de la surface observée par un endoscope stéréoscopique (recalage 2.5D/3D).

Les résultats de la modélisation et du recalage devront alors être utilisés pour guider le chirurgien dans son geste, par incrustation d'informations significatives pour celui-ci dans les images endoscopiques. Ces informations pourront être par exemple la localisation globale de l'endoscope par rapport au réseau coronarien (dans le cas du pontage cardiaque), et la position des artères présentes dans le champ de vision. Le problème essentiel consiste à visualiser dans des images instantanées un modèle recalé par rapport à des images acquises auparavant, et donc à estimer le mouvement 3D de l'endoscope et des organes entre ces deux instants.

Concernant la phase de recalage temps réel pour une application de réalité augmentée, les travaux en cours s'intéressent plutôt à la chirurgie du cerveau qu'à la chirurgie cardiaque. La difficulté de la chirurgie cardiaque réside essentiellement dans le fait que le déplacement des organes entre la phase pré-opératoire et per-opératoire est important, ce qui justifie l'utilisation de méthodes de recalage pour mesurer ces déplacements. De plus, dans le cas d'une opération à coeur battant, le coeur possède un mouvement propre important, qu'il est nécessaire de mesurer et de compenser.

3.3.2 Intégration temps-réel sécurisée

Le développement de systèmes de robotique chirurgicale repose essentiellement sur la mise en œuvre de nombreux algorithmes provenant de différents domaines de recherche (automatique, vision, imagerie médicale, géométrie, informatique temps-réel, reconnaissance de la parole, etc). L'intégration de ces différents composants dans un cadre informatique commun, par sa complexité et son hétérogénéité, requiert l'utilisation de méthodes de génie logiciel comme, par exemple, la définition d'une architecture de programmation [9].

Aux considérations générales de génie logiciel viennent s'ajouter des préoccupations essentielles de sécurité et de fiabilité intrinsèques au domaine médical. En effet, bien que la sécurité soit un souci générique en robotique, celle-ci prend une nouvelle dimension lorsque les robots doivent être utilisés en contact et à proximité des humains, en manipulant de surcroît des instruments chirurgicaux pouvant entraîner la mort. La sécurité des patients ou du personnel médical au bloc dépend de systèmes dont la conception et le fonctionnement interne dépassent leur compétence initiale. Il faut donc garantir que le système est fiable et qu'il répond à leurs attentes en matière de fonctionnement et de sécurité.

Pour satisfaire cette préoccupation, des procédures légales de certification sont en cours d'utilisation par des instances officielles comme la Communauté Européenne ou la Food & Drug Administration pour garantir que les différentes parties (matérielles et logicielles) des systèmes robotiques sont conformes aux normes (par exemple la norme IEC601) avant autorisation de commercialisation.

À l'heure actuelle, la partie logicielle des quelques robots médicaux proposés dans l'industrie est principalement validée par *tests*. On réalise des tests unitaires, où chaque sous-programme du logiciel est testé indépendamment des tests d'intégration. Ceux-ci examinent ensuite le bon fonctionnement de l'ensemble du logiciel. Les tests de validation fonctionnelle permettent eux de vérifier le bon fonctionnement en situation réelle, lorsque le logiciel est connecté à la ressource physique qu'il pilote, c'est-à-dire le système robotique et son ensemble de capteurs. Malheureusement, ces tests ne permettent pas d'affirmer qu'un logiciel est correct, car seul un sous-ensemble fini des exécutions possibles est testé.

Pour garantir de manière plus exhaustive la sécurité logicielle d'une application de robotique médicale, nous proposons de continuer les développements autour de notre *méthodologie de programmation temps réel, basée sur l'utilisation de méthodes formelles* [6]. L'introduction de ces méthodes qui utilisent très largement des vérifications mathématiques est totalement novatrice dans le contexte de la robotique médicale.

Spécification et programmation d'applications : un système de robotique médicale est en lui-même un système complexe pour lequel la spécification du contrôle est un exercice délicat. Il est donc nécessaire de structurer la partie logicielle dans *une architecture de contrôle*. On souhaite assurer que l'exécution temps réel des différents modules informatiques est respectée et que le comportement de l'application reste correct dans tous les modes de fonctionnement, y compris en présence de pannes. Pour ce faire, nous poursuivons les études déjà entreprises dans le contexte d'ORCCAD¹ [5]. Au delà des algorithmes de contrôle du robot, son utilisation dans notre contexte de chirurgie cardiaque robotisée devra être adaptée pour permettre l'exécution temps réel de nombreux algorithmes de vision et traitement d'images. Les premiers résultats

1. <http://www.inrialpes.fr/iramr/pub/Orccad/>

obtenus dans ce domaine [3] seront approfondis. Le langage MAESTRO [10, 4], qui est dédié à la programmation de missions robotiques sera également étendu dans ce contexte. L'objectif est de permettre à un non informaticien de programmer, à un haut niveau d'abstraction, la totalité de l'intervention, sans avoir à se soucier des détails d'implémentation sous-jacents.

Cette activité implique la définition, d'une part, des entités manipulées (lois de commande, algorithmes de vision et traitement d'image, de génération de trajectoires...), et, d'autre part, de la sémantique et de la syntaxe des primitives de manipulation de ces entités.

Validation : nous proposons d'utiliser des méthodes formelles afin d'apporter *la preuve rigoureuse (car mathématique) du bon fonctionnement des programmes avant leur exécution*. Actuellement, une partie seulement du logiciel que nous proposons est validée de façon formelle [4] et nous souhaitons étendre les vérifications à *l'ensemble du logiciel de contrôle*.

Dans l'environnement de programmation MAESTRO, certaines propriétés du comportement global de l'application (logique d'enchaînement des algorithmes) sont garanties à l'aide de vérifications par méthodes comportementales. Cependant, la vérification formelle des programmes obtenus est pour l'instant effectuée, de façon classique, sur des automates finis. Nous étudierons la possibilité d'*effectuer des diagnostics*, c'est-à-dire d'interpréter les résultats de la vérification formelle, afin d'éclairer l'utilisateur sur les modifications à apporter au programme source MAESTRO en cas d'erreur.

L'extension naturelle du système de vérification consiste à prouver que chacun des algorithmes pris séparément ne provoquera pas d'erreur d'exécution, par exemple de dépassement de capacité de calcul sur des nombres réels (division par zéro, validité des opérations mathématiques, etc) ou de manipulation incohérente des variables. En nous inspirant des travaux en cours pour la vérification du code de micro-contrôleurs embarqué dans des stimulateurs cardiaques, nous prévoyons d'étudier l'adéquation du système COQ en collaboration avec l'équipe LOGICAL pour vérifier le code des différentes actions mises en œuvre lors de la réalisation d'une application.

L'objectif est de rendre la programmation et la validation des applications robotiques accessibles à des utilisateurs non spécialistes des méthodes théoriques sous-jacentes et de faciliter ainsi leur diffusion.

4 Domaines d'applications

La télé-chirurgie mini-invasive est particulièrement bien adaptée à l'opération qui consiste à pratiquer un pontage de l'artère coronaire inter-ventriculaire (IVA) obstruée ou occluse, en utilisant l'artère mammaire interne gauche (MIG). Cette opération est réalisée en deux temps : 1) la dissection de la MIG qui est située sur la face interne de la paroi thoracique le long du bord gauche du sternum, 2) l'anastomose de l'extrémité distale de cette artère à l'IVA.

À l'opposé de l'opération couramment pratiquée par une incision longitudinale du sternum longue de 30 cm, l'opération dite « mini-invasive » se fait de manière totalement endoscopique par un robot chirurgical télé-manipulé. Pour la réaliser, le robot télé-opéré DA VINCI a été choisi par l'équipe du professeur Alain Carpentier et notre équipe (figure 1) pour les avantages qu'il offre par rapport aux autres systèmes télé-opérés : la vision tridimensionnelle et la dextérité du poignet mécanique. L'intervention est réalisée en utilisant trois incisions de 1 cm nécessaires



FIG. 1 – Le robot da VinciTM acquis en copropriété Inria/Hôpital Européen Georges Pompidou

à la mise en place des deux instruments et de l'endoscope à l'intérieur du thorax. Celles-là sont disposées de façon triangulaire sur le côté latéral gauche du thorax. *La position des incisions constitue l'aspect le plus important de la stratégie opératoire.* En effet, de cette position dépendent la visualisation et l'exposition des structures anatomiques concernées (c.-à-d. de l'IVA et de la MIG).

Or, les variations anatomiques d'un patient à l'autre rendent illusoire la définition d'une règle pratique qui permettrait le calcul de la position des incisions idéales pour chaque cas. Cependant, il s'agit de positionner les trois incisions de façon que les instruments puissent accéder sans difficulté à tout le trajet de la MIG et de l'IVA et qu'il n'y ait ni conflit interne (entre instruments) ni conflit externe (entre bras robotisés porteurs d'instruments).

Lors de la phase per-opératoire se pose ensuite un problème de repérage des structures anatomiques cibles et en particulier celui de l'IVA avec laquelle doit être effectuée l'anastomose. En chirurgie conventionnelle, l'utilisation d'une large incision permet une vision directe de grand angle à l'intérieur du thorax ainsi qu'une éventuelle manipulation du cœur, toutes deux propices à l'analyse des rapports anatomiques. Ces deux accès directs sont supprimés et avec eux la possibilité de repérer la totalité du trajet de l'IVA lorsqu'on utilise une approche endoscopique.

Par conséquent *des outils de planification et simulation préopératoire et d'augmentation per-opératoire* seraient très utiles pour chaque opération. Les outils préopératoires nécessitent :

- *une reconstruction numérique* tridimensionnelle et temporelle de la zone d'intérêt de chaque patient, c'est-à-dire de la cage thoracique, du trajet des artères IVA et MIG, du thorax, etc,

- *un calcul automatique du positionnement des trois incisions* et
- *la simulation de la procédure chirurgicale* que les mouvements des bras manipulateurs permettent de réaliser à partir de ces configurations.

En *phase per-opératoire*, seul un système de *chirurgie augmentée* par superposition en temps réel d'images numériques sur les images fournies par l'endoscope permettra au chirurgien de compléter la vision volumique réduite que lui fournit l'endoscope 3D.

Si l'application de pontage coronarien en chirurgie cardiaque est l'application centrale de CHIR, son analyse et sa réalisation progressive font apparaître des extensions possibles à d'autres types de chirurgies. Le système de planification de procédures télé-opérées est en cours de transposition dans le cadre de la chirurgie générale/digestive (avec l'équipe de GB. Cadière Hôpital St Pierre, Bruxelles). Le savoir-faire en stéréo-vision est testé sur des applications de *brain-shift* en neurochirurgie. Le recalage intra-opératoire couplé à la réalité augmentée est évidemment transférable à plusieurs types de chirurgie avec invasion réduite, en particulier à la chirurgie endoscopique à l'Ircad (Thèse de Stéphane Nicolau, Epidaure), ou à la chirurgie du sein (avec l'université d'Oxford).

5 Résultats nouveaux

5.1 Généralités

Cette année, deux premières briques illustrent la multidisciplinarité et la transversalité des actions de Chir. Elles sont le point de départ de l'application de pontage coronarien effectué à l'aide d'un système télé-opéré et ont nécessité des recherches et des développements nouveaux. Au départ, aucune méthode répondant aux spécifications et directement intégrable dans la globalité de l'application n'était disponible dans aucune des équipes. En particulier, en plus des recherches propres induites, chacune de ces nouvelles briques propose l'adaptation et l'intégration de différents savoir-faire, parfois directement des codes sources, provenant des trois équipes Epidaure, Prisme et RobotVis.

De plus, des résultats préliminaires sur le recalage des données pré et intra opératoire avaient été réalisés lors d'un stage en 99. L'analyse de l'application dans sa globalité est un travail parallèle pour lequel seuls des résultats préliminaires sont disponibles.

5.2 Modélisation d'organes déformables

Participants : Frédéric Devernay, Grégoire Malandain, Olivier Faugeras, Fabien Mourgues, Christophe Blondel, Arnaud Contes.

Mots clés : vision par ordinateur, stéréoscopie, contours déformables, suivi.

L'utilisation de la chirurgie mini-invasive pose le problème, pendant l'opération, du repérage des structures anatomiques concernées (artères coronaires, principalement) dans un environnement dont on a une vision très partielle, via l'endoscope. La solution proposée ici consiste à assister le chirurgien lors de l'opération en lui proposant une localisation précise,

par exemple sous la forme d'une carte locale du champ visuel et des structures environnantes. Cette localisation pourra par la suite lui être restituée en temps réel par réalité augmentée sur les images endoscopiques.

Afin d'aider le chirurgien, il est donc nécessaire de modéliser dynamiquement l'arbre coronaire intéressant à partir de séquences de coronarographies rayons X préopératoires synchronisées par rapport à l'électrocardiogramme. Seule la reconstruction de l'arbre coronaire gauche est nécessaire et une reconstruction exhaustive de toutes les ramifications n'est pas utile dans ce contexte.

Plusieurs types d'appareils sont actuellement disponibles dans les hôpitaux pour effectuer les examens de coronarographie. Parmi ceux-ci, les angiographes rayons X 2D de type LC sont particulièrement répandus (nous reviendrons sur les différents types d'appareils dans le chapitre consacré à l'imagerie médicale des artères coronaires). Les données utilisées pour effectuer la reconstruction proviennent d'un angiographe 2D avec rotation motorisée de la chaîne d'acquisition. Elles se présentent sous la forme d'une séquence rayons X avec injection d'un produit de contraste, non soustraite, prise en rotation autour du patient, cœur battant. Typiquement trois cycles cardiaques sont exploitables (entre la diffusion suffisante du produit de contraste et son évanouissement dans l'organisme). On dispose de plus de l'électrocardiogramme (ECG) afin de repérer les vues de la séquence (typiquement 30 vues par cycle cardiaque). Les méthodes classiques de reconstructions 3D à partir de deux points de vue posent le problème des appariements de structures et d'ambiguïté. L'idée dans l'utilisation d'une séquence en rotation est de tirer parti de la continuité du changement de point de vue pour propager les étiquetages d'artères.

La méthode développée [13] s'articule donc ainsi :

- une première étape consiste à extraire des structures 2D intéressantes dans une image de la séquence, nous introduisons un outil semi-interactif de sélection des lignes centrales des artères basé sur une réponse multiéchelle,
- ensuite un suivi 2D de ces structures est effectué au cours de la séquence grâce à une description hiérarchique du réseau et une modélisation sous forme de B-splines des artères jusqu'à atteindre une autre image du même instant cardiaque,
- une première reconstruction 3D des structures peut alors être effectuée (figure 2),
- ce premier modèle évolue ensuite au cours du reste de la séquence ou bien s'affine de manière rétroactive.

L'ensemble des algorithmes utilisés ou développés pour cette application ont été intégrés dans une interface homme-machine conviviale, dont le but est d'être utilisable par un cardiologue qui ignore tout des traitements sous-jacents (figure 3).

Les travaux de l'équipe ChIR sur la modélisation du cœur s'orientent dans deux directions complémentaires. D'une part, Christophe Blondel a commencé une thèse en collaboration avec General Electric Medical Systems sur la reconstruction de l'arbre coronaire à des fins de diagnostic. D'autre part, les travaux continuent pour la fusion du modèle 3D+t des coronaires avec un modèle 3D complet mais statique du cœur, afin de construire un modèle 3D+t complet.

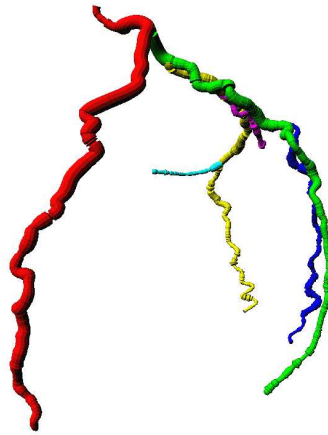


FIG. 2 – Reconstruction 3D de l'arbre coronaire à partir de deux séquences angiographiques.

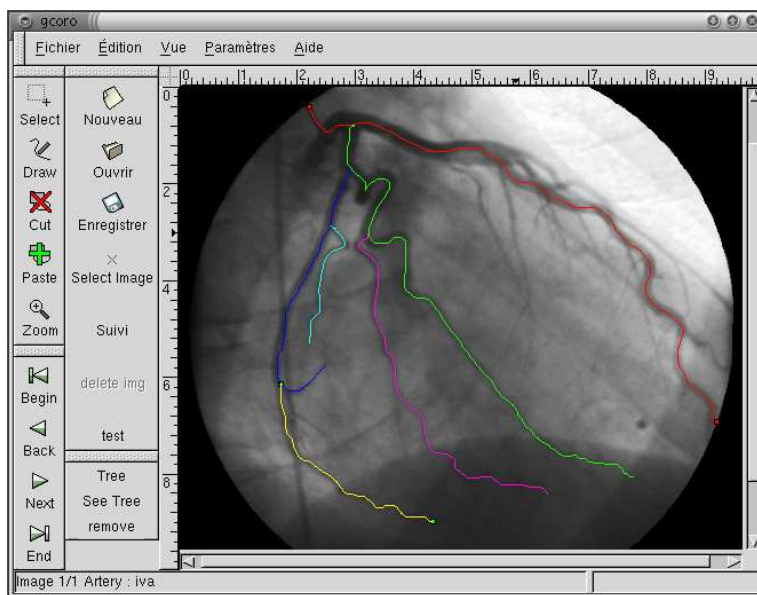


FIG. 3 – Outil interactif de reconstruction 3D de l'arbre coronaire à partir de séquences angiographiques.

5.3 Planification et simulation de procédures robotiques

Participants : Louaï Adhami, Ève Coste-Manière, Jean-Daniel Boissonnat, Frédéric Cazals, Alain Carpentier, Renaud Severac-Bastide.

Mots clés : géométrie algorithmique, planification et simulation, validation clinique.

Dans l'état actuel, la phase pré-opératoire de planification du positionnement du robot sur le patient avant simulation du geste opératoire aborde la reconstruction 3D des organes du patient (à partir d'une segmentation manuelle du cœur, et automatique du reste des entités anatomiques d'intérêt), la modélisation du système robotisé, la planification du positionnement et des trajectoires du robot et la détection des collisions entre robots et organes ou entre robots, et la simulation des procédures chirurgicales télé-opérées à l'aide de souris 3D.

- Initialement, Nuages, bibliothèque du domaine public issue du projet PRISME a été directement utilisée [11]. Par la suite, plusieurs méthode ont été essayées, notamment celle des voisins naturels en 3D issu également du projet PRISME^[BC00]. Le savoir-faire autour du système de coordonnées des voisins naturels est central à l'approche.
- Différentes méthodes de détections de collision ont été testées et intégrées (par exemple PQP, bibliothèque domaine public de l'université de North Carolina, et une détection de collision exploitant directement les caractéristiques de la carte graphique OpenGL)^[LGN99] sur différents types de collision (organes/robot, robot/robot). En ce qui concerne les collisions robot/robot, une méthode dédiée adaptée à la structure du robot à été mise au point [11]. Quand au collisions organes/robots, les travaux sur la hierarchie de delaunay ^[Dev98] sont exploités pour obtenir une méthode cohérente avec la structure de données utilisée dans la reconstruction.

Avec l'arrivée de Renaud Severac-Bastide aux commandes de la collaboration côté HEGP, la première étape de validation clinique au bloc a commencé autour du planning opératoire produit par notre système de planification/simulation.

Pour ce faire, de nouvelles données (CT-scan et coronarographies) acquises sur Léonard, un squelette doté d'un cœur plastique, ont été intégrées dans le système (figure 4). D'autre part, la mise en œuvre par Intuitive Surgical, des interface (APIs) développées pour ouvrir l'accès au robot Da Vinci à l'équipe, permet de mettre en œuvre le protocole de validation établi entre l'HEGP et CHIR. La validation est effectuée autour de Léonard, avant d'envisager des validations ultérieures sur animal.

D'autres part, des résultats préliminaires ont été obtenus avec Nicolas Turro, en PostDoctorat à l'université de Stanford et Oussama Khatib autour de la téléopération

-
- [BC00] J.-D. BOISSONNAT, F. CAZALS, « Natural neighbour coordinates of points on a surface », *RR n° 4015*, INRIA, 2000.
- [LGN99] J. LOMBARDO, M. GASCUEL, F. NEYRET, « Realtime collision detection for virtual surgery », *in: Proceedings of Computer Animation*, p. 33–39, mai 1999.
- [Dev98] O. DEVILLERS, « Improved incremental randomized Delaunay triangulation », *in: Proc. 14th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom.*, p. 106–115, 1998.

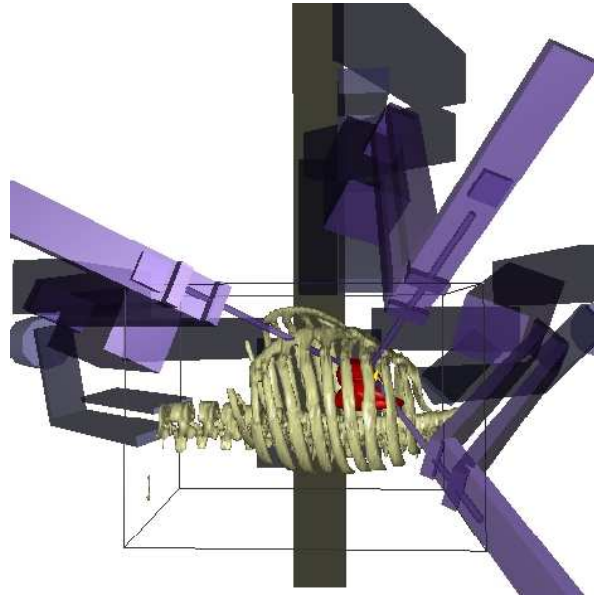


FIG. 4 – Simulation du positionnement du robot Da Vinci sur le patient Léonard.

5.4 Intégration temps-réel sécurisée avec réalité augmentée

Participants : Toute l'équipe.

Mots clés : intégration et architecture logicielles, programmation orientée domaine, environnement de programmation, temps réel, preuves formelles, réalité augmentée, recalage.

5.4.1 Recalage pré/intra opératoire

Ce problème constitue l'une des premières étapes nécessaires à la mise en œuvre d'incrustation d'images pour la réalité augmentée. Il s'agit de recalcr les résultats de la planification préopératoire en phase intra opératoire au bloc. Des résultats préliminaires de recalage pré-opératoire avaient été obtenus dans le cadre de travaux communs aux projets Epidaire et RobotVis^[BFAD95,Dev97,FA96]. Un premier stage a eu lieu en 1999 [14] pour intégrer les résultats de stéréo-vision et de recalage surface/surface. Un nouveau stage en collaboration Chir/Epidaure a eu lieu cette année et a permis notamment de valider une solution matérielle

[BFAD95] F. BETTING, J. FELDMAR, N. AYACHE, F. DEVERNAY, « A New Framework for Fusing Stereo Images with Volumetric Medical Images », in : *First International Conference on Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine*, Springer-Verlag (éditeur), 905, Nice, France, avril 1995.

[Dev97] F. DEVERNAY, *Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces*, thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, France, février 1997, <ftp://ftp-sop.inria.fr/robotvis/html/Thesis/devernay:97.ps.gz>.

[FA96] J. FELDMAR, N. AYACHE, « Rigid, affine and locally affine registration of free-form surfaces », *Int. J. Comp. Vision*, 1996, p. 99–119.

installée dans un bloc opératoire à l'Ircad, Strasbourg (stage de Gérald Bianchi, co-encadré par G. Malandain et F. Devernay). Ce stage se poursuit par la thèse de Stéphane Nicolau au sein du projet Epidaure (co-encadré par F. Devernay).

Le recalage intra-opératoire pose un problème nettement plus difficile, puisque le chirurgien interagit avec l'environnement, et notamment les organes du patient. Il est donc nécessaire de tenir compte des déformations possibles des organes pour effectuer le recalage des données acquises par exemple par l'endoscope ou par une sonde à ultrasons pendant l'opération. Fabien Mourgues a commencé une thèse sur la réalité augmentée à partir d'images endoscopiques stéréoscopiques, et les premiers résultats de reconstruction 3D montrent que l'endoscope stéréo permet une reconstruction de la surface visible avec une précision raisonnable. Ces reconstructions doivent ensuite être recalées par rapport aux modèles déformables des organes, pour connaître précisément la position de l'endoscope par rapport à la zone à opérer, puis superposer ces informations dans les images endoscopiques.

5.4.2 Analyse de l'application en vue de l'intégration

L'analyse de l'application dans son ensemble est effectuée afin d'identifier les différents algorithmes utiles, utilisables, disponibles pour l'exécution de la chaîne d'intégration sûre (passage de la phase pré-opératoire à la phase per-opératoire) de manière nominale et lors de comportements dégradés. Les savoir-faire acquis lors du développement d'ORCCAD/MAESTRO et de différentes applications industrielles interviennent dans cette étape. Les résultats restent cependant encore préliminaires mais s'enrichissent au fur et à mesure de la disponibilité des briques et de la compréhension du problème dans sa globalité. Potentiellement, l'environnement de programmation ORCCAD/MAESTRO lui-même pourrait être réutilisé. L'analyse de faisabilité en cours permettra de conclure. Mais son adéquation à des applications de robotique/vision temps-réel est en cours de tests et de validation.

En parallèle, un stage de DEA informatique [12] a proposé la définition d'un langage permettant d'interpréter les résultats de la vérification formelle effectuée sur un programme MAESTRO. En effet, l'un des inconvénients majeurs de l'approche adoptée est que l'utilisateur du système programme les missions en MAESTRO, mais qu'il doit effectuer les vérifications sur le formalisme de destination ESTEREL. L'étude a permis de :

- définir un langage d'expression de propriétés à vérifier sur les programmes MAESTRO,
- traduire ces propriétés en observateurs ESTEREL que l'on combine avec le programme ESTEREL global pour appliquer les outils de vérifications proposés par l'équipe MEIJE,
- présenter le résultat de ces vérifications (un chemin d'exécution mettant en défaut la propriété à vérifier), en animant le programme source original.

Un prototype de ce langage MAESTROVERIF a été réalisé avec l'environnement CENTAUR (projet Lemme avec la participation d'Yves Bertot). Il permet d'effectuer des diagnostics sur ces résultats avec un haut niveau d'abstraction, afin d'éclairer l'utilisateur sur les modifications à apporter au programme source MAESTRO en cas d'erreur.

6 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

6.1 Intuitive Surgical

Un contrat de collaboration de recherche a été signé avec la société Intuitive Surgical, Inc. qui développe et commercialise le système robotisé da Vinci choisit par l'équipe comme base d'intégration. Ce contrat scelle l'achat en copropriété INRIA/Paris VI du système da Vinci installé en milieu clinique à l'HEGP et garantit en particulier l'ouverture du système robotisé pour permettre la validation des travaux de recherche menés dans l'équipe.

Les thèmes abordés dans la collaboration sont ceux de la simulation de procédures chirurgicales effectuées avec un système télé-opéré, et de la réalité augmentée par incrustation d'images.

6.2 General Electric Medical System Europe

Une thèse sous contrat CIFRE est en cours avec General Electric Medical Systems, sur le sujet « Modélisation 3D et 4D des vaisseaux coronariens à partir de séquences de projections rayons X ».

7 Actions régionales, nationales et internationales

7.1 Actions nationales

7.1.1 Contrat de collaboration clinique: HEGP/Inria

Un contrat de collaboration a été signé entre l'Inria (équipe CHIR) et l'assistance publique Hôpitaux de Paris/Paris VI (équipe du Professeur Alain Carpentier, Hôpital Européen Georges Pompidou) pour le développement de la robotique et de l'imagerie en chirurgie. Il scelle l'achat en co-propriété entre l'Inria et Paris VI du système da Vinci installé à l'HEGP.

Les thèmes de l'aide au positionnement des bras et instruments du robot da Vinci en fonction du type d'opération et de la configuration du malade, le repérage des structures anatomiques cibles (notamment l'artère mammaire interne et les artères coronaires sont au cœur de la collaboration (en liaison avec la collaboration entre l'Inria/CHIR et Intuitive Surgical, Inc).

7.1.2 Télémédecine

Ce projet réunit des médecins, des informaticiens et des industriels français pour étudier dans sa globalité une application de chirurgie cardiaque télérobotique. L'objectif est d'aboutir à des solutions logicielles innovantes apportant une valeur ajoutée clinique clairement identifiée.

Les différents thèmes de l'équipe y sont abordés: modélisation dynamique du cœur, planification et simulation de procédures chirurgicales robotisées, réalité augmentée, le tout intégré de façon sûre. La validation clinique se fait avec l'équipe de chirurgie cardiaque du professeur Alain Carpentier.

7.1.3 RNRT VTHD

L'équipe participe au projet Vraiment Très Haut Débit (VTHD) du Réseau National de la recherche en Télécommunication. L'objectif du sous-projet est d'expérimenter sur un réseau expérimental à 2.5 GigaBit, un ensemble d'applicatifs en télé-médecine. Pour ce faire l'Hôpital Européen Georges Pompidou a été raccordé au réseau.

Les actions concernent le traitement à distance d'images de différentes modalités dans des applications de type « tableau blanc » médical permettant une interactivité avec les équipes délocalisées de radiologues, chirurgiens et chercheurs en imagerie médicale et robotique. D'autre part, les aspects temps-réel et qualité de service pourront être mis à contribution dans des applications de simulation temps-réel entre le simulateur développé dans l'équipe et le système télé-opéré.

7.1.4 RNTS Endoxirob

Le projet EndoXirob a été labellisé par le Réseau National des Technologies pour la Santé. Il devrait débiter en Janvier 2001. L'objectif est de développer un robot téléopéré pour la chirurgie endoscopique en réunissant des laboratoires de recherche, des équipes médicales et des industriels français.

8 Diffusion de résultats

8.1 Enseignement universitaire

1. Ève Coste-Manière est responsable du module d'enseignement *Robotique Chirurgicale* du DESS Génie Biomédical (15 heures), du module *Introduction à la Robotique* dans le DEA Image et Vision de l'Université Nice Sophia Antipolis (15 heures). Elle participe également à l'enseignement Robotique en deuxième année à l'ESSI (UNSA)
2. Ève Coste-Manière a participé à plusieurs enseignements pluridisciplinaires chirurgie / informatique avec un cours sur la robotique médicale : cours Européen de chirurgie laparoscopique (Bruxelles, février et novembre 2000), cours international de chirurgie laparoscopique et thoracique (Cadiz, mars 2000), journées de chirurgie laparoscopiques (Toulouse, mai 2000).
3. Frédéric Devernay a encadré 20h de TD Techniques graphiques 3D à l'ESSI (Sophia Antipolis), et a donné le cours Unix Utilisateur au Mastère MBDS (CERAM, Sophia Antipolis).
4. Fabien Mourgues a encadré 60 heures de TPs d'électronique à l'IUT Génie des Télécommunications et Réseau.

8.2 Thèses et Stages

Thèses en cours dans le projet :

1. Louaï Adhami, « Planification d'interventions chirurgicales robotisées », ENSMP.

2. Fabien Mourgues, « Modélisation dynamique du cœur et réalité augmentée pour la chirurgie robotisée », UNSA.
3. Christophe Blondel, « Modélisation 3D et 4D des vaisseaux coronariens à partir de séquences de projections rayons X », UNSA.

Stages effectués dans le projet :

1. Louaï Adhami, « Planification d'interventions chirurgicales robotisées », UNSA, DEA ARAVIS.
2. Éric Vecchie, « Recalage de Données 3D en Situation Opératoire », UNSA, DEA ARAVIS.
3. Fabien Mourgues, « Reconstruction 3D+t du réseau coronarien », UNSA, DEA ARAVIS, mention très bien.
4. Dominique Francisci, « Utilisation de méthodes formelles pour analyser des applications de robotique médicale avec un haut niveau d'abstraction », UNSA, DEA Informatique.
5. Arnaud Contes, « Réalisation d'une Interface Homme-Machine pour la reconstruction 3D+t à partir de séquences coronarographiques », UNSA, Maîtrise Informatique.

8.3 Participations à des jurys de thèse

Ève Coste-Manière a participé aux jurys de thèses (soutenues à l'université de Nice Sophia Antipolis, spécialité Informatique) de Nicolas Turro [4] (co-directrice de thèse avec Robert de Simone, Action Tick) et Soraya Arias [3] (co-directrice de thèse avec Thierry Viéville, projet RobotVis).

Frédéric Devernay a participé au jury de la thèse de Christophe Vestri (UNSA).

8.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Les 25 et 26 septembre 2000 a eu lieu la « retraite » CHIR, à Giens. Ce fut l'occasion d'assister à des exposés des membres de CHIR, des projets Epidaure, Prisme, RobotVis, et de l'équipe clinique de l'Hôpital Européen Georges Pompidou. Les discussions et débats ont permis de mieux cerner les rôles respectifs de CHIR, des autres projets Inria, et de l'équipe clinique dans le projet. Le programme de la journée est consultable sur le site CHIR.

Ève Coste-Manière et Louaï Adhami ont participé à la conférence MICCAI2000, Pittsburgh, octobre 2000) où ils ont présenté les premiers résultats du simulateur de procédures chirurgicales robotisées.

Ève Coste-Manière et Jean-Daniel Boissonnat ont participé au workshop *Key Research Issues and Opportunities in Motion Planning* organisé par Jean-Claude Latombe et Jean-Paul Laumond à Toulouse en juin 2000.

Ève Coste-Manière a participé au congrès Chirurgie 2000 organisé à Paris en juin 2000 par Alain Carpentier.

Ève Coste-Manière est membre des comités scientifique de ISER2000 (International Symposium on Experimental Robotics, décembre 2000) [8], MICCAI2000 (Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, octobre 2000) [7] et ICRA2000 (IEEE Robotics and Automation, avril 2000) [9].

Ève Coste-Manière est membre du Jury qui a décerné le *Best Paper Award* à la conférence *IEEE Robotics and Automation*, San Francisco, avril 2000.

Ève Coste-Manière a co-organisé avec Reid Simmons (The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University) une session spéciale sur les Architectures de contrôle en robotique lors de la conférence ICRA2000.

Ève Coste-Manière est membre des comités de lecture des revues : International Journal of Robotics Research, IEEE Transactions of Robotics and Automation.

Frédéric Devernay a donné un séminaire à l'École Polytechnique, « Vision stéréoscopique et applications ».

8.5 Participation à des activités d'intérêt collectif

È. Coste-Manière est adjointe du chargé de mission de la formation par la recherche de l'Inria. Un des faits marquants cette année concerne la participation à la refonte du site web National de l'Inria, rubrique « *Travailler/Se Former à l'Inria* ».

9 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] J.-D. BOISSONNAT, M. YVINEC, *Algorithmic Geometry*, Cambridge University Press, UK, 1998.
- [2] O. FAUGERAS, *Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint*, MIT Press, 1993.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [3] S. ARIAS, *Formalisation et Intégration en Vision par Ordinateur*, thèse de doctorat, Université de Nice, 1999.
- [4] N. TURRO, *MaestRo: Une approche formelle pour la programmation d'applications robotiques*, thèse de doctorat, Université de Nice - Sophia Antipolis, septembre 1999, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/turro:99.pdf>.

Articles et chapitres de livre

- [5] J.-J. BORRELLY, E. COSTE-MANIÈRE, B. ESPIAU, K. KAPellos, R. PISSARD-GIBOLLET, D. SIMON, N. TURRO, « The ORCCAD Architecture », *International Journal of Robotics Research* 17, 4, 1998, p. 338–359, <http://www.inrialpes.fr/iramr/pub/0rccad/>.
- [6] È. COSTE-MANIÈRE, B. ESPIAU, « Special Issue on Integrated Architecture for Robot Control and Programming », *International Journal of Robotics Research* 17, 4, 1998.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [7] L. ADHAMI, È. COSTE-MANIÈRE, J.-D. BOISSONNAT, «Planning and Simulation of Robotically Assisted Minimal Invasive Surgery», *in: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI2000*, Pittsburgh, octobre 2000, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/adhami-coste-maniere-et-al:00.pdf>.
- [8] È. COSTE-MANIÈRE, L. ADHAMI, R. SEVERAC-BASTIDE, K. SALISBURY, J.-D. BOISSONNAT, N. SWARUP, G. GUTHART, E. MOUSSEAU, D. BLANCHARD, A. CARPENTIER, «Optimized Port Placement for the Totally Endoscopic Coronary Artery Bypass Grafting using the da Vinci Robotic System», *in: Seventh Intl. Symposium on Experimental Robotics*, Hawaii, décembre 2000.
- [9] È. COSTE-MANIÈRE, R. SIMMONS, «Architecture: the backbone of robotics system», *in: International Conference of Robotics and Automation, ICRA2000*, San Francisco, avril 2000, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/coste-maniere-simmons:00.pdf>.
- [10] E. COSTE-MANIÈRE, N. TURRO, «The MAESTRO Language and its Environment: Specification, Validation and Control of Robotic Missions», *in: IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'97*, 2, p. 836, Grenoble, France, septembre 1997.

Divers

- [11] L. ADHAMI, *Planification d'interventions chirurgicales robotisées: application à la chirurgie cardiaque*, Mémoire, DEA ARAVIS, Université de Nice - Sophia Antipolis, septembre 2000, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/adhami:99.pdf>.
- [12] D. FRANCISCI, *Utilisation de méthodes formelles pour analyser des applications de robotique*, Mémoire, DEA Informatique, Université de Nice - Sophia Antipolis, septembre 2000.
- [13] F. MOURGUES, *Modélisation 3D+t de l'arbre coronaire à partir d'une séquence cinéangiographique*, Mémoire, DEA ARAVIS, Université de Nice - Sophia Antipolis, juin 2000, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/mourgues:00.pdf>.
- [14] E. VECCHIÉ, *Recalage de données 3D en Situation opératoire*, Mémoire, DEA ARAVIS, Université de Nice - Sophia Antipolis, septembre 1999, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/vecchie:99.pdf>.