

Action CHIR

Chirurgie, Informatique, Robotique

Sophia Antipolis

THÈME 4A

R *apport*
d'Activité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	3
3	Fondements scientifiques	4
3.1	Modélisation d'organes déformables	4
3.2	Planification et simulation de procédures chirurgicales robotisées	5
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	9
4.1	Panorama	9
5	Résultats nouveaux	11
5.1	Généralités	11
5.2	Modélisation d'organes déformables	11
5.2.1	Parallélisation de l'algorithme ICP	11
5.2.2	Modélisation du cœur	12
5.3	Planification et simulation de procédures robotiques	13
5.4	Réalité augmentée	14
5.4.1	Recalage pré/intra opératoire externe	15
5.4.2	Recalage pré/intra opératoire interne	16
5.5	Intégration temps-réel sécurisée avec réalité augmentée	17
5.5.1	Intégration : acquisition	17
5.5.2	Intégration : réseau	17
5.5.3	Première analyse formelle de l'application	19
5.5.4	Intégration : validation expérimentale	19
6	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	20
6.1	Intuitive Surgical	20
6.2	General Electric Medical System Europe	21
6.3	Actions nationales	21
6.3.1	Contrat de collaboration clinique : HEGP/INRIA	21
6.3.2	ACI "Télémédecine"	21
6.3.3	Projets VTHD ET VTHD++ soutenus par le RNRT	21
6.3.4	Projet ENDOXIROB soutenu par le RNTS :	22
7	Diffusion de résultats	22
7.1	Animation de la Communauté scientifique	22
7.2	Enseignement universitaire	22
7.3	Thèses et Stages	23
7.4	Participations à des jurys de thèse	23

7.5	Participation à des colloques, séminaires, invitations	23
8	Bibliographie	24

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]

Personnel Inria

Frédéric Devernay [CR]

Grégoire Malandain [CR, à temps partiel]

Thierry Viéville [CR, à temps partiel]

Collaborateurs cliniques

Stéphane Litrico [CHU de Nice]

Renaud Séverac-Bastide [Hôpital Européen Georges Pompidou]

Alain Carpentier [Hôpital Européen Georges Pompidou]

Ingénieur expert

Laurent Goffin

Guy Shechter [Johns Hopkins University/National Institute of Health, à partir de mai]

Ingénieur Associé

Olivier Bantiche

Chercheurs doctorants

Louaï Adhami [allocataire EGIDE]

Fabien Mourgues [allocataire moniteur normalien]

Christophe Blondel [contrat CIFRE]

Stagiaires

Stéphane Litrico [avril–septembre, neurochirurgien au CHU de Nice et DEA SIC Image Vision, UNSA]

Paulina Marquez Santoyo [juin–septembre, BS University Autonomous of Querétaro, Mexico]

Ronan Vitre [avril–septembre, École Centrale Paris et DEA MVA, ENS Cachan]

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 VINCI™. 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 4.1). 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 développés initialement dans le projet 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 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[2].

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 (FDA) 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*[2]. 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. 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 de traitement d'images. Le langage MAESTRO, 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 de 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 du bon fonctionnement des programmes avant leur exécution*. Actuellement, une partie seulement du logiciel que nous proposons est validée de façon formelle 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.

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

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

4.1 Panorama

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 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.



FIG. 1 – Le robot DA VINCI™, copropriété Inria/Hôpital Européen Georges Pompidou pendant une validation expérimentale

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) et en neurochirurgie avec le CHU de Nice (stage de DEA de Stéphane Litrico [22]). Le savoir-faire en stéréo-vision est également utilisé pour l'estimation du *brain-shift* en neurochirurgie [9]. 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 (les tests sont prévus début 2002 avec l'université d'Oxford).

5 Résultats nouveaux

5.1 Généralités

Cette année l'équipe s'est renforcée. Ceci a permis de consolider les thèmes de recherche propres à l'équipe ainsi que les résultats théoriques et expérimentaux.

L'application de pontage coronarien à l'aide d'un système télé-opéré a été réalisée dans son ensemble autour du patient/squelette Léonard (cf figure 7). Les tests sur animaux peuvent maintenant être envisagés.

Cette année a également permis à l'équipe de renforcer ses partenariats médicaux (avec des CHU locaux, nationaux et internationaux), et industriels avec la participation active des industriels à nos expérimentations.

5.2 Modélisation d'organes déformables

Participants : Christophe Blondel, Ronan Vitre, Guy Shechter, Frédéric Devernay, Grégoire Malandain, Ève Coste-Manière, Nicholas Ayache.

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

5.2.1 Parallélisation de l'algorithme ICP

L'algorithme ICP (Iterative Closest Point) permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données. Cette transformation est le plus souvent un déplacement (rotation et translation), mais elle peut être plus complexe, notamment dans le cas d'objets déformables (affine, localement affine, polynomiale). Une première tentative de parallélisation des différentes étapes de cet algorithme a été réalisée dans le cadre du stage de DEA de Ronan Vitre, en utilisant la bibliothèque MPI et l'environnement **Athapascan** du projet APACHE de l'INRIA Rhône-Alpes, de manière à pouvoir s'exécuter sur un réseau de machines hétérogènes [24]. L'application principale visée est la robotique chirurgicale, plus particulièrement

le recalage de données 3D issues d'un endoscope stéréoscopique par rapport à des modèles déformables d'organes obtenus par scanner ou IRM. L'algorithme est également utilisé dans la phase de modélisation du cœur (cf. paragraphe suivant).

5.2.2 Modélisation du cœur

Les algorithmes développés ont pour but de produire des modèles d'organes déformables à partir d'exams cliniques tels que le scanner, l'IRM ou la coronarographie. Ces modèles sont requis comme données d'entrée pour la planification et la simulation d'intervention.

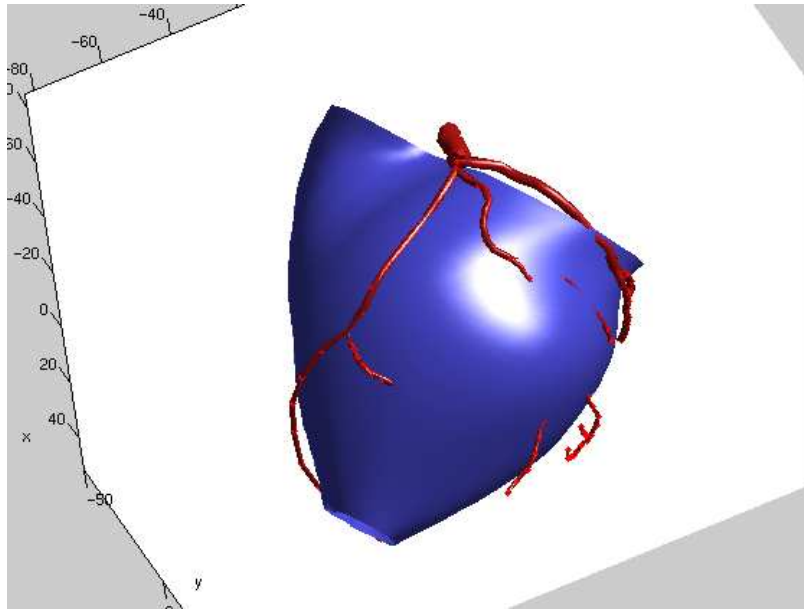


FIG. 2 – Surface IRM recalée sur l'arbre coronaire

Nos études portent sur l'ensemble formé par le cœur et les artères coronaires. La chaîne algorithmique conduisant de l'examen clinique au modèle de l'organe a été enrichie et améliorée. Cette chaîne comporte maintenant les algorithmes suivants : détection automatique d'artères, suivi 2D d'artères, reconstruction 3D stéréoscopique de l'arbre coronaire, suivi 3D d'artères, modélisation 3D + t de l'arbre coronaire, recalage 3D de la surface du cœur sur les artères. Ces algorithmes ont été validés sur les données IRM et coronarographies de 5 patients, acquises au National Heart Lung and Blood Institute of the National Institute of Health avec la collaboration de Elliot McVeigh, PHD, Arshed Quyyumi, MD et Andrew Arai, MD.

La détection des artères dans les images coronarographiques est effectuée par analyse multi-échelles. Cette méthode a été automatisée : la détermination des paramètres se fait désormais par analyse de la séquence d'images et est donc indépendante de l'examen [17].

Le suivi déformable 2D des artères a été amélioré par l'introduction d'un terme de mémoire de forme^[DJG01] et l'écriture de critères d'optimisation non linéaires. Le suivi est plus

[DJG01] M.-P. DUBUISSON-JOLLY, A. GUPTA, « Tracking Deformable Templates using a Shortest Path

robuste lors de superposition de structures [19]. D'autre part, les artères déterminées semi-interactivement peuvent maintenant être suivies sur un cycle cardiaque complet.

Utilisant les données issues d'un examen coronarographique biplan, un algorithme de suivi déformable 3D des artères a été développé afin de déterminer la position et la déformation des artères tout au long du cycle cardiaque. Cette méthode décrit complètement la géométrie et le mouvement de l'arbre coronaire.

Enfin, après avoir recalé l'arbre coronaire 3D avec la surface du myocarde déduite d'images de type scanner ou IRM, le mouvement de la surface du cœur est approché en utilisant le champ de déformation obtenu par le suivi 3D.

C'est ce modèle qui alimentera les phases de planification et de simulation, puis de réalité augmentée lorsque des validations cliniques sur patient réel seront entreprises en début d'année 2002.

5.3 Planification et simulation de procédures robotiques

Participants : Louaï Adhami, Ève Coste-Manière, Jean-Daniel Boissonnat, Stéphane Litrico, Paulina Marquez, Alain Carpentier, Renaud Severac-Bastide.

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



FIG. 3 – Le robot PECKER prototypé pour la chirurgie de l'hypophyse

De nombreuses améliorations ont été introduites au système de planification et de simulation de l'équipe, désormais appelé **STARS (Simulation and Training Architecture for**

Robotic Surgery), la plus significative étant un meilleur positionnement des bras manipulateurs sur le patient, étape qui suit l'optimisation des points d'entrée des ces derniers. Ce problème de positionnement des bras manipulateurs possédant un nombre conséquent de degrés de liberté a été traité dans sa généralité [21]. La solution proposée a été implantée dans STARS après le développement de plusieurs sous ensembles algorithmiques liés aux calculs de distance et à l'optimisation de fonctions non-linéaires.

D'autre part, un nouveau format d'échange de modèles géométriques de robots a été mis au point, permettant de s'interfacer avec des systèmes robotiques « classiques ». Par exemple, une collaboration avec le CNRS/LIRMM a permis de modéliser leur robot SCALPP dans notre système afin de simuler sur données médicales les trajectoires nécessaires au prélèvement de la peau. Ce format nous permettra également d'intégrer les modèles du robot conçu dans le cadre du projet ENDOXiROB, dès que ceux-ci seront disponibles.

De plus ce format permet de prototyper de nouveaux robots chirurgicaux. En particulier, dans le cadre du stage de DEA de Stéphane Litrico (interne en neurochirurgie au CHU de Nice), un robot endoscopique [22] a été prototypé (fig. 3). L'objet du stage a été d'élaborer un schéma d'assistance robotique à la chirurgie hypophysaire et de tester le modèle en simulant une intervention robotisée.

La simulation dans STARS profite des résultats de l'équipe EPIDAURE dans le domaine des modèles déformables. Une première intégration de leurs bibliothèques a été effectuée pour les modèles pré-calculés. D'autres extensions de modèles plus sophistiqués sont en cours.

Côté résultats cliniques, une forte collaboration avec la compagnie Intuitive qui fabrique le robot DA VINCI a permis d'améliorer l'étape du recalage des résultats de planification avec le robot et le patient au bloc. Cette étape limitait jusqu'alors les essais de validations. À ce stade, les premières validations animales du système de planification auront lieu début 2002.

Enfin, différentes améliorations visant à accroître le degré de réalisme dans la simulation ont été ajoutées, comme par exemple une meilleure représentation graphique des conditions opératoires. La formalisation des « temps opératoires » a également été étudiée d'un point de vue clinique et simulation [22] et une première abstraction a été proposée puis formalisée en ESTEREL.

De plus des premiers résultats avec un appareil de retours d'effort de type Phantom ont été obtenus dans le cadre du stage d'ingénieur de Paulina Marquez [23] : un ensemble de contraintes haptiques est intégré pour limiter les gestes d'un apprenti chirurgien lors de la simulation de l'ablation de l'hypophyse. Ces travaux préfigurent les recherches menées dans le cadre d'ENDOXiROB autour de l'ajout dans STARS de contraintes haptiques pour la chirurgie télé-opérée [13].

5.4 Réalité augmentée

Mots clés : superposition d'images, recalage pré/per opératoire, système d'acquisition et traitement d'images, stéréoscopie.

5.4.1 Recalage pré/intra opératoire externe

Participants : Olivier Bantiche, Frédéric Devernay, Ève Coste-Manière, Thierry Viéville.

Le but de ce recalage est la mise en correspondance, au bloc opératoire, du corps du patient sur la table d'intervention et du modèle anatomique externe de ce même patient préalablement construit à partir de ses données médicales. Il s'agit de « pointer » directement sur le corps du patient les points d'incision qui ont été déterminés sur le modèle lors de la planification de l'intervention. Une solution basée sur la vision a été retenue.

On effectue dans un premier temps une reconstruction en 3D du torse du patient allongé sur la table d'opération. Cette acquisition est faite en utilisant un système de vision composé d'un appareil photo numérique et d'un vidéo-projecteur prototypé dans l'équipe :

- l'appareil et le projecteur sont au préalable calibrés grâce à une même série de clichés d'une mire de calibration sur laquelle on projette une texture connue ;
- le principe de reconstruction utilise une méthode de stéréoscopie dite active, un schéma de lumière structurée étant projeté sur le torse, alors que l'appareil numérique en prend un cliché ;
- une méthode d'appariement des points par corrélation permet alors, par triangulation, de reconstituer la 3D dans l'image.

Cette acquisition se faisant en un seul cliché, on est affranchi du problème posé par les mouvements respiratoires du patient.

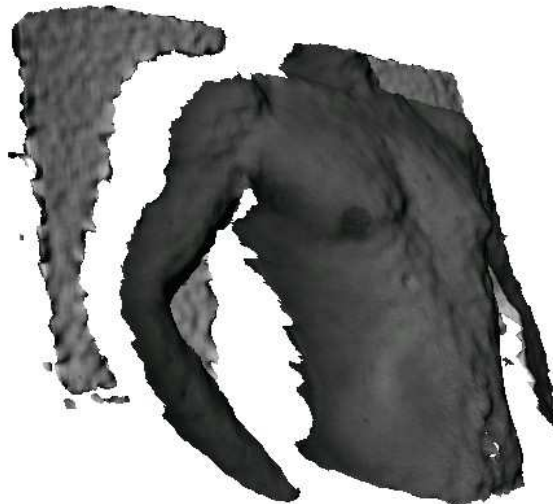


FIG. 4 – Exemple de torse reconstruit avec le système de stéréoscopie

Dans un deuxième temps cette reconstruction devra être recalée avec le modèle du patient, reconstruit après segmentation de la peau, en utilisant l'algorithme ICP (Iterative Closest Point).

Enfin la position des trois points d'incision étant connue sur le modèle, le recalage permet d'en déduire la position dans le repère de la reconstruction et, par calibrage, dans l'image du projecteur. On peut fournir une image constituée de trois points au projecteur de telle sorte qu'il se projette sur le thorax du patient aux points d'incision. Au delà des trois points, l'image plus complète du modèle des organes du patient pourra également être projetée, pour permettre au chirurgien de visualiser les organes au travers de la peau.

Des tests de reconstruction de torse, ainsi que de reprojection de points choisis sur un modèle ont été effectués. Dès que l'algorithme ICP aura été introduit dans la chaîne, une maquette complète de ce système de recalage pourra être testée pour l'application en chirurgie cardiaque.

Une autre application clinique de ce système est prévue en janvier 2002 en collaboration avec l'Université de Oxford (Vision Lab, Mike Brady) dans le cadre de la localisation précise de tumeurs du sein avant résection.

5.4.2 Recalage pré/intra opératoire interne

Participants : Fabien Mourgues, Frédéric Devernay, Ève Coste-Manière, Olivier Faugeras.

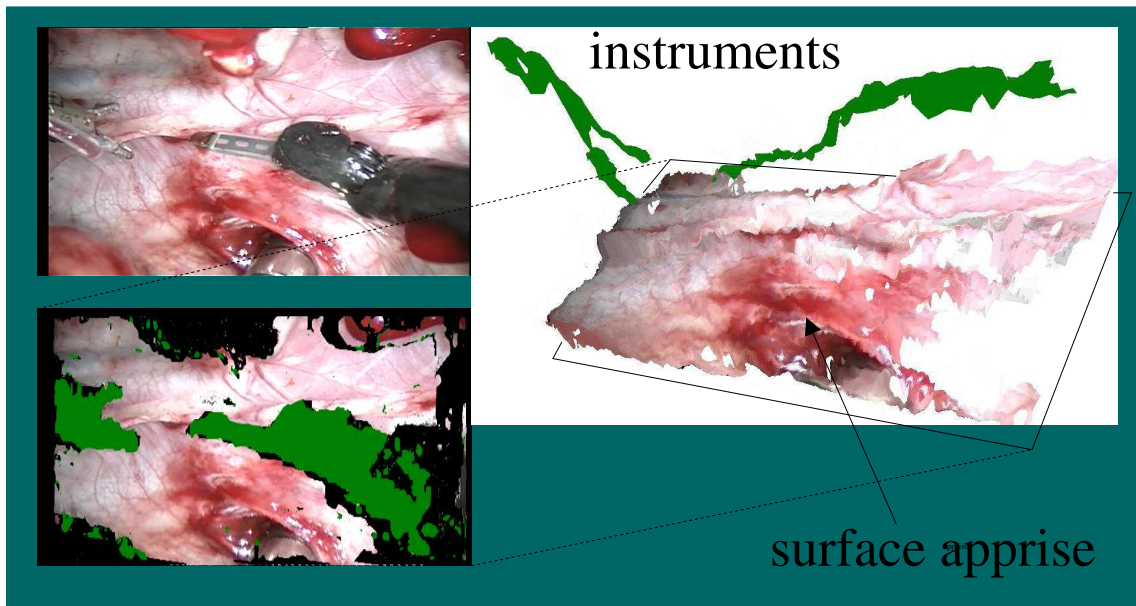


FIG. 5 – Exemple de reconstruction 3D locale sur images in vivo

Le recalage pré/intra opératoire externe permet de mettre en correspondance le patient au bloc avec son modèle anatomique externe préopératoire. En revanche, la superposition d'informations relatives à l'anatomie interne du patient requiert la prise en compte des mouvements et déformations des organes internes qui interviennent entre le préopératoire et le per-opératoire mais aussi pendant la phase opératoire (interaction du chirurgien avec les organes, mouvements

et déformations « naturels » tels les battements cardiaques ou la respiration). Une possibilité de recalage passe par l'extraction de données surfaciques des organes à partir des vues stéréoscopiques endoscopiques délivrées au chirurgien. La reconstruction en 3D du champ opératoire demande une calibration précise de l'endoscope, calibration des modèles de caméra mais aussi de l'extrémité du bras endoscopique dans le cas d'un endoscope robotisé. Cette calibration doit être la moins contraignante possible en situation opératoire. Le modèle du bras endoscopique robotisé peut aussi être intégrable dans un simulateur de chirurgie robotisée sous la forme d'endoscopie virtuelle. Les premiers essais ont été réalisés avec le bras endoscopique stéréo du robot DA VINCI, bras endoscopique modulaire avec un endoscope échangeable.

Dans un deuxième temps, l'obtention d'une reconstruction 3D locale des organes demande de rendre les divers instruments (robotisés ou non) présents dans le champ opératoire « transparents » afin de ne garder qu'un modèle des organes observés. Une méthode reconstruction/classification [10] permet d'obtenir de bons résultats avec des images in vivo.

Une reconstruction 3D plus globale est nécessaire pour contraindre le problème de recalage. Il est nécessaire alors de prendre en compte le mouvement endoscopique par suivi de points d'intérêts ou en utilisant un modèle géométrique direct dans le cas d'un endoscope robotisé. Ensuite la fusion des reconstructions 3D locales demande une bonne paramétrisation de la surface reconstruite pouvant évoluer vers une représentation paramétrique dynamique. Des travaux sont en cours sur ce sujet et les premiers tests ont été effectués sur un coeur en plastique.

5.5 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, réseau, recalage.

5.5.1 Intégration : acquisition

Participants : Olivier Bantiche, Laurent Goffin, Frédéric Devernay.

Le système d'acquisition Xir-Acqui [20] propose une bibliothèque permettant l'acquisition locale ou déportée (RPC via VTHD), en temps réel ou en différé, de données très différentes (Vidéo, Matrices, Coordonnées articulaires du robot DA VINCI,...) à travers une interface unique et générique. Il est intégré dans le simulateur STARS et dans les modules de réalité augmentée en sur-couche des pilotes physiques. Il est également utilisé en tant que vecteur de communication inter-modulaire.

5.5.2 Intégration : réseau

Participants : Olivier Bantiche, Laurent Goffin, Frédéric Devernay.

Un protocole de communication de type client/serveur a été implanté au coeur du système d'acquisition Xir-Acqui. Ce protocole est implémenté à l'aide de la bibliothèque de communica-

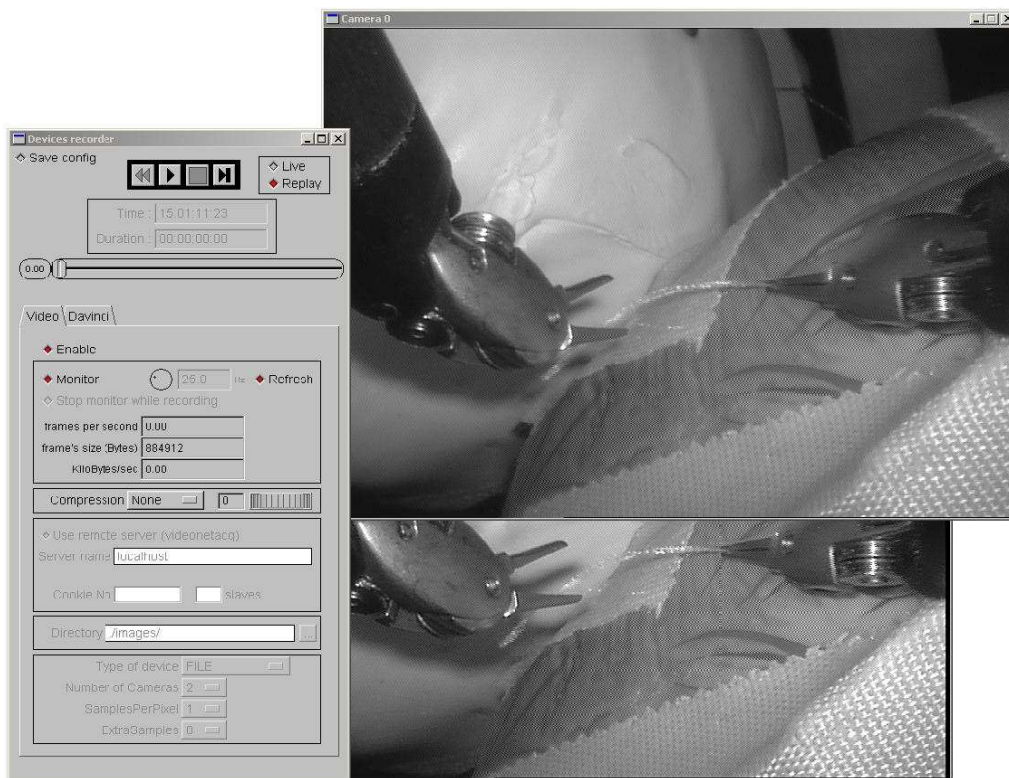


FIG. 6 – Interface du système d'acquisition

tion RPC (Remote Procedure Call). On peut ainsi utiliser Xir-Acqui pour faire des acquisitions à partir des ressources physiques d'une machine distante sur laquelle un serveur est lancé. Il est également possible pour plusieurs clients de venir se connecter sur une même ressource, l'un d'entre eux agissant en tant que « maître » (accès lecture / écriture), les autres en « esclaves » (lecture seule). Lors des expérimentations avec le robot à l'HEGP, ce système est utilisé notamment pour récupérer en temps réel, via le réseau VTHD (Vraiment Très Haut Débit), les images des caméras endoscopiques ainsi que les coordonnées articulaires du robot. Ces données peuvent alors être analysées et traitées à Sophia-Antipolis, puis les résultats (matrices de transformation, images) renvoyés vers l'HEGP. Ces échanges sont utiles pendant le développement des algorithmes de réalité augmentées et entrent dans le cadre de l'expérimentation VTHD [15].

Ce travail pose également les bases de la participation au projet VTHD++, notamment pour le retour d'effort à distance et l'utilisation partagée du robot dans le cadre de l'enseignement du geste chirurgical.

5.5.3 Première analyse formelle de l'application

Participants : Louaï Adhami, Ève Coste-Manière, Gilles Dowek, Stéphane Litrico.

L'analyse des différentes applications chirurgicales abordées dans l'équipe (pontage coronaire et exérèse hypophysaire principalement) est effectuée en commun avec les cliniciens. Elle permet d'identifier et de raffiner au fur et à mesure les différents « temps opératoires » et la gestuelle chirurgicale correspondante et constitue le point de départ de la définition sémantique des tâches élémentaires chirurgicales robotisées. Une première formalisation en ESTEREL a été proposée pour différentes procédures (recalage du robot au bloc, dissection de l'artère mammaire..) qui ont été intégrées dans STARS.

D'autre part, une collaboration a été mise en place avec Gilles Dowek (Projet Logical, Inria Rocquencourt) afin d'investiguer l'utilisation de méthodes formelles pour augmenter la sûreté de fonctionnement du système. Plus particulièrement, il s'agit de démontrer formellement, dans le système COQ, des propriétés des algorithmes utilisés. Un post-doctorant en commun entre nos deux équipes débutera au mois de janvier 2002 afin de démontrer dans STARS que les points d'entrée et la position initiale du robot permettent effectivement d'atteindre toute la zone opératoire sans danger et vérifier la sûreté de l'alarme de collision. Cette recherche repose sur une formalisation mathématique des notions de collision, de trajectoire, et finalement d'espace géométrique ensuite traduite en COQ

5.5.4 Intégration : validation expérimentale

Participants : Toute l'équipe.

De nombreuses expérimentations sont effectuées au bloc opératoire. Au delà de la validation individuelle des différents thèmes de l'équipe (planification, recalage, réseau, réalité augmentée..) elles permettent de fédérer les travaux de l'équipe autour d'une application unique (fig. 7) et de confronter les résultats de recherche aux besoins applicatifs [7]. En particulier, la première expérimentation bi-localisée entre l'HEGP et l'INRIA Sophia validant la procédure chirurgicale complète (depuis la planification jusqu'à la réalité augmentée via le réseau VTHD) a eu lieu



FIG. 7 – Expérimentation sur Léonard entre l'HEGP et l'INRIA Sophia

au mois d'octobre 2001 (toujours sur le squelette Léonard). Chaque étape de la procédure de pontage coronarien a ainsi été validée avant que l'intégration complète puisse être rendue robuste et sûre. Les tests sur animaux sont prévus en fin d'année.

6 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

6.1 Intuitive Surgical

Le contrat de collaboration de recherche signé avec la société Intuitive Surgical (USA) qui développe et commercialise le système robotisé DA VINCI choisi par l'équipe comme base d'intégration se poursuit. 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. Pour ce faire, de nouvelles interfaces d'accès au système ont été développées par Intuitive Surgical cette année.

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.

Cette année, un « API user group » (API : Application Programming Interface permettant d'accéder au robot) a été mis en place. Ève Coste-Manière et Louaï Adhami participent à l'élaboration du cahier des charges de cette interface avec Nick Swarup et Ken Salisbury (Intuitive

Surgical, USA).

Cyril Coirier (Field Engineer) et Adrian Lobontiu (Clinical Specialist) participent aux nombreuses campagnes expérimentales effectuées autour des thèmes de la collaboration [7].

6.2 General Electric Medical System Europe

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

6.3 Actions nationales

6.3.1 Contrat de collaboration clinique : HEGP/INRIA

Le contrat de collaboration 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 se poursuit. 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).

Des campagnes de validations cliniques et expérimentales sont organisées à l'HEGP de façon régulière (environ bimensuelles) en fonction de l'avancement des travaux à valider.

6.3.2 ACI "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.

6.3.3 Projets VTHD ET VTHD++ soutenus par le RNRT

Projet VTHD : Vraiment Très Haut Débit L'équipe participe au projet VTHD (Vraiment Très Haut Débit, <http://www.vthd.org>) du Réseau National de la Recherche en Télécommunication (RNRT). L'objectif du sous-projet est d'expérimenter sur un réseau expérimental à 2.5 GigaBit, un ensemble d'applicatifs en télémédecine. 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. Les

partenaires principaux sont France Télécom et l'INRIA pour la partie concernant les aspects médicaux.

Projet VTHD++ : Vraiment Très Haut Débit ++ L'équipe est partenaire du projet Vraiment Très Haut Débit ++ (VTHD++) qui fait suite au projet VTHD du Réseau National de la recherche en Télécommunication. Les aspects temps-réel et qualité de service seront étudiés dans des applications de simulation temps-réel entre le simulateur développé dans l'équipe et le système télé-opéré. Les aspects retour d'effort à distance sont au centre de la participation de CHIR.

6.3.4 Projet ENDOXIROB soutenu par le RNTS :

Le projet ENDOXIROB (<http://www.endoxirob.com>) a été labellisé par le Réseau National des Technologies pour la Santé (RNTS). Il a débuté au printemps 2001. L'objectif est de développer un robot téléopéré pour la chirurgie endoscopique en réunissant des laboratoires de recherche (LIRMM/CNRS, LAAS/CNRS, CEA, CHIR/INRIA...), des équipes médicales (CHU Ranguel Toulouse,...) et des industriels français (Sinters).

7 Diffusion de résultats

7.1 Animation de la Communauté scientifique

Ève Coste-Manière est membre des comités scientifique de ISER International Symposium on Experimental Robotic, et ICRA, IEEE Robotics and Automation, IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems IROS, IARP. Elle est aussi membre des comités de lecture des revues : International Journal of Robotics Research, IEEE Transactions of Robotics and Automation, International Journal of Human-Computer Interaction.

Frédéric Devernay a été membre du comité d'organisation du workshop IEEE Multimedia Signal Processing (MMSP01) à Cannes, en octobre 2001.

7.2 Enseignement universitaire

Ève Coste-Manière est responsable du module d'enseignement *Robotique Chirurgicale* du DESS Génie Biomédical (15 heures), du module *Robotique chirurgicale* 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) ainsi qu'aux différentes journées d'accueils des étudiants organisées à Sophia : école des ponts, des mines, polytechnique, normale supérieure...

Ève Coste-Manière a participé à plusieurs enseignements pluridisciplinaires chirurgie / informatique avec un cours sur la robotique médicale : cours européen de chirurgie laparoscopique (Bruxelles, avril et novembre 2001), postgraduate course « Robotics in Cardiac Surgery : 2001 » de la Society for Heart Disease à Londres (juillet 2001). Elle a participé également au Dea Sciences chirurgicales, option « Biologie chirurgicale et organes artificiels » (Paris, Hôpital Henri Mondor).

Frédéric Devernay a participé aux cours *Multimédia : Interface et Programmation* (3h cours, 20h TD) et *Techniques graphiques 3D* (20h TD) à l'ESSI (Université de Nice Sophia Antipolis), et a donné le cours Unix Utilisateur au Mastère MBDS (CERAM, Sophia Antipolis).

Fabien Mourgues a encadré 64 heures de TDs et TPd d'informatique industrielle et électronique numérique à l'UNSA.

7.3 Thèses et Stages

Thèses en cours dans le projet :

- Louaï Adhami, « Planification d'interventions chirurgicales robotisées », École des Mines de Paris.
- Fabien Mourgues, « Modélisation dynamique du cœur et réalité augmentée pour la chirurgie robotisée », UNSA.
- Christophe Blondel, « Modélisation 3D et 4D des vaisseaux coronariens à partir de séquences de projections rayons X », UNSA.

Stages effectués dans le projet :

- Paulina Marquez, «Haptic Simulation of a Robotic System in Pituitary Surgery», Rapport de stage d'ingénieur University Autonomous of Querétaro, Mexico.
- Stéphane Litrico, «Assistance robotique à la chirurgie hypophysaire», DEA SIC Image Vision, UNSA.
- Ronan Vitre, «ICP parallèle», rapport de DEA Vision et apprentissage (ENS Cachan).

7.4 Participations à des jurys de thèse

Ève Coste-Manière a participé aux jurys de thèse suivants :

- Stefaan C. Sonck Thiebaut sur *Semantics of Software Components for Robot Manipulation* (ARL & Robotics Lab, Stanford University, décembre 2000), rapporteur,
- François Gaspard (Robotvis, Directeur de thèse Thierry Viéville) : *Localisation et Calibration avec un Zoom* (UNSA, Janvier 2001), examinatrice,
- Jorge Brieva (équipe de J.-L. Coatrieux, Rennes, février 2001) « Analyse structurelle par mise en correspondance de lignes en angiographie cardiaque », examinatrice,
- Emmanuel Dubois (équipe GMCAO, Grenoble) : *Chirurgie Augmentée, un cas de Réalité augmentée ; conception et réalisation centrées sur l'utilisateur* (juillet 2001), examinatrice.

7.5 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Ève Coste-Manière effectue la présentation introductive « Informatique, robotique et Chirurgie » au colloque « Imagerie numérique, robotique et chirurgie » organisé au Val de Grâce par les Profs Desgeorges et Merle, Novembre 2001.

L'équipe CHIR, et ses collaborateurs clinique (HEGP) et industriel (Intuitive Surgical) ont présenté leurs travaux multidisciplinaires aux responsables des Réseaux Nationaux de Recherche en Télécommunication et des Technologies pour la Santé lors d'une expérimentation au bloc autour du squelette Léonard en octobre 2001 (voir paragraphe expérimentation).

Fabien Mourgues et Frédéric Devernay ont participé au Intl. Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality, New York, Octobre 2001.

Louaï Adhami, Ève Coste-Manière et Fabien Mourgues ont participé à la conférence MIC-CAI2001, Utrecht, octobre 2001) et présenté les premiers résultats de la reconstruction 3D du réseau coronaires.

Louaï Adhami a participé en tant qu'orateur au tutorial sur la robotique médicale organisé en préambule de ICAR2001 (Intl Conference on Advanced Robotics), Budapest, Août 2001.

Ève Coste-Manière a participé au congrès « Robotics in Cardiac Surgery 2001 », the society of heart disease en juin 2001 à Londres où elle a fait un exposé commun avec le prof. Alain Carpentier.

Fabien Mourgues a présenté ses travaux sur la modélisation 3D+t de l'arbre coronaire à partir de séquences angiographiques au congrès francophone de vision par ordinateur, ORASIS 2001, juin 2001.

Olivier Bantiche a participé aux journées France Télécom autour du réseau VTHD et y a présenté les activités liées au projet en robotique chirurgicale, mai 2001.

Christophe Blondel a participé à trois réunions CIFRE à General Electric où il a présenté « la détection automatique des artères » et « le suivi à mémoire de forme ».

Le Dea de Stéphane Litrico est proposé au prix Médical Bayer.

Ève Coste-Manière a participé dans le cadre de la formation permanente aux cours « accompagnement des managers » et « secouriste sauveteur ». Olivier Bantiche a participé à la formation « assistant en ingénierie système », Christophe Blondel et Fabien Mourgues ont participé à la formation « communication scientifique en anglais », Guy Shechter suit les cours « français pour étrangers » et Laetitia Grimaldi a suivi la formation « anglais en immersion » à Cork en Irlande.

8 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] J.-D. BOISSONNAT, M. YVINEC, *Algorithmic Geometry*, Cambridge University Press, UK, 1998.
- [2] È. COSTE-MANIÈRE, B. ESPIAU, « Special Issue on Integrated Architecture for Robot Control and Programming », *International Journal of Robotics Research* 17, 4, 1998.
- [3] O. FAUGERAS, *Three-Dimensional Computer Vision : a Geometric Viewpoint*, MIT Press, 1993.

Articles et chapitres de livre

- [4] È. COSTE-MANIÈRE, « Robotique appliquée et chirurgie », *in : La science au présent 2001*, Encyclopaedia Universalis, 2001, ch. La robotique : état des lieux et perspectives par Bernard Espiau, p. 252 in 245-256.
- [5] È. COSTE-MANIÈRE, L. ADHAMI, R. SEVERAC-BASTIDE, J.-D. BOISSONNAT, A. CARPENTIER, « Planification et simulation de chirurgie mini-invasive robotisée », *Comptes rendus de l'académie des sciences*, (In Press, 2001).
- [6] F. DEVERNAY, O. FAUGERAS, « Straight lines have to be straight : Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments », *Machine Vision and Applications* 13, 1, 2001, p. 14-24, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/devernay-faugeras:01.pdf>.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [7] È. COSTE-MANIÈRE, L. ADHAMI, R. SEVERAC-BASTIDE, A. LOBONTIU, J. K. J. SALISBURY, J.-D. BOISSONNAT, N. SWARUP, G. GUTHART, E. MOUSSEAU, A. CARPENTIER, « Optimized Port Placement for the Totally Endoscopic Coronary Artery Bypass Grafting using the DA VINCI Robotic System », *in : Lecture Notes in Control and Information Sciences, Experimental Robotics VII*, D. Russ, S. Singh (éditeurs), 271, Springer, 2001, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/coste-maniere-adhami-et-al:01.pdf>.
- [8] F. DEVERNAY, F. MOURGUES, È. COSTE-MANIÈRE, « Towards Endoscopic Augmented Reality for Robotically Assisted Minimally Invasive Cardiac Surgery », *in : Proc. Intl. Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality*, IEEE (éditeur), p. 16–20, 2001.
- [9] O. FLEIG, F. DEVERNAY, J.-M. SCARABIN, P. JANNIN, « Surface reconstruction of the surgical field from stereoscopic microscope views in neurosurgery », *in : Proc. CARS'2001 (Computer Assisted Radiology and Surgery)*, Berlin, 2001.
- [10] F. MOURGUES, F. DEVERNAY, È. COSTE-MANIÈRE, « 3D reconstruction of the operating field for image overlay in 3D-endoscopic surgery », *in : Proceedings of International Symposium on Augmented Reality*, octobre 2001.
- [11] F. MOURGUES, F. DEVERNAY, G. MALANDAIN, È. COSTE-MANIÈRE, « 3D+t Modeling of Coronary Artery Tree from Standard Non Simultaneous Angiograms », *in : Lecture Notes in Computer Sciences, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI2001, 2208*, Springer-Verlag, p. 1320–1322, octobre 2001.
- [12] F. MOURGUES, F. DEVERNAY, G. MALANDAIN, È. COSTE-MANIÈRE, « Modélisation 3D+t de l'arbre coronaire à partir de séquences angiographiques », *in : Journées Orasis 2001*, p. 155–162, Cahors, France, 2001.
- [13] N. TURRO, O. KHATIB, È. COSTE-MANIÈRE, « Haptically Augmented Teleoperation », *in : IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, mai 2001, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/turro-khatib-et-al:01.ps.gz>.
- [14] C. VESTRI, F. DEVERNAY, « Using Robust Methods for Automatic Extraction of Buildings », *in : Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Hawaii, décembre 2001.

Rapports de recherche et publications internes

- [15] O. BANTICHE, *Compte rendu d'avancement de participation au projet VTHD*, July 2001.
- [16] C. BLONDEL, « Appariement de coronaires par stéréoscopie trinoculaire : étude de faisabilité », *rapport de recherche*, ChIR - GEMS (AMA), October 2001.
- [17] C. BLONDEL, « Détection automatique des coronaires par analyse multi-échelle », *rapport de recherche*, ChIR - GEMS (AMA), June 2001.
- [18] C. BLONDEL, « Modélisation 3D et 3D+t des coronaires : synthèse bibliographique », *rapport de recherche*, ChIR - GEMS (AMA), February 2001.
- [19] C. BLONDEL, « Suivi 2D à mémoire de forme : application aux coronaires », *rapport de recherche*, ChIR - GEMS (AMA), September 2001.
- [20] L. GOFFIN, *User manual of the Xir-Acqui API*, September 2001.

Divers

- [21] L. ADHAMI, È. COSTE-MANIÈRE, J.-D. BOISSONNAT, « Planning and Simulation of Minimally Invasive Surgery using Tele-Operated Manipulators », Workshop on Medical Robotics, 10th International Conference on Advanced Robotics, August 2001, <ftp://ftp-sop.inria.fr/chir/publis/adhami-coste-maniere-boissonnat:01.pdf>.
- [22] S. LITRICO, *Assistance robotique à la chirurgie hypophysaire*, Mémoire, Dea Sic Image, Vision, Unsa, 2001.
- [23] P. MARQUEZ-SANTOYO, *Haptic Simulation of a Robotic System in Pituitary Surgery*, Mémoire, fin d'études à l'Universidad Automoma de Queretéro, Mexico, Mexico, October 2001.
- [24] R. VITRE, *Parallélisation de l'algorithme ICP*, Mémoire, Dea ENS Cachan, 2001.