

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

en

INFORMATIQUE

présentée et soutenue publiquement par

David SARRUT

le 25 JANVIER 2000

**Recalage multimodal et
plate-forme d'imagerie médicale à
accès distant**

préparée au sein du laboratoire ERIC

sous la direction de

Serge Miguet

COMPOSITION DU JURY

Mme.	Jocelyne Troccaz	Rapporteur	(Directeur de Recherche CNRS)
M.	Christian Roux	Rapporteur	(Professeur)
Mme.	Isabelle Magnin	Examineur	(Directeur de Recherche INSERM)
M.	Ehoud Ahronovitz	Examineur	(Maître de conférences)
M.	Bernard Tourancheau	Examineur	(Professeur)
M.	Serge Miguet	Directeur de thèse	(Professeur)

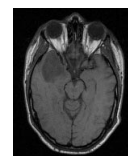
Table des matières

Introduction	1
I Recalage d'images. Application au positionnement de patient	5
1 Recalage d'images	7
1.1 Domaines d'application	8
1.2 Classification des techniques de recalage	10
1.3 Les méthodes iconiques	20
1.4 Conclusion	22
2 Mesures de similarité	23
2.1 Principes de base	24
2.2 Classification des mesures	28
2.3 Expérimentations	42
2.4 Conclusion	57
3 Interpolations	61
3.1 Introduction	62
3.2 Étude de procédures d'interpolation	64
3.3 Autres procédures d'interpolation	69
3.4 Expérimentations	72
3.5 Conclusion	82
4 Transformations géométriques d'images	83
4.1 Transformations d'images	84
4.2 Principe de la nouvelle méthode	86
4.3 Modèle d'exécution de l'algorithme	90
4.4 Expérimentations	93
4.5 Discussion et conclusion	96
5 Positionnement de patients	97
5.1 Description de la problématique	98
5.2 Travaux préalables	99
5.3 Principe	101
5.4 Justification géométrique	105
5.5 Évaluations expérimentales	109

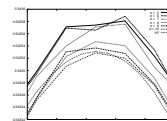
5.6	Conclusion	120
II	Santé et calculs haute-performance	121
6	ARAMIS : une plate-forme d'imagerie médicale à accès distant	123
6.1	Contexte	124
6.2	Principes généraux	127
6.3	Coeur du système	134
6.4	Conclusion	136
7	Approche surface	137
7.1	Extraction de surface triangulée	138
7.2	Détermination de la relation d'adjacence	140
7.3	Complexité et tests expérimentaux	145
7.4	Conclusion	149
	Conclusion générale	151
III	Annexes	167
A	Transformations affines et modèle sténopé	169
A.1	Matrices des transformations affines	169
A.2	Modèle sténopé	170
B	Modalités d'acquisition d'images médicales	173
B.1	Modalités d'acquisition	173
B.2	Nomenclature des données	175
C	Index des auteurs cités	177

Il était une fois ...

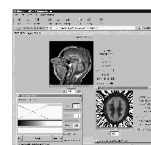
... **des images médicales.** Parmi la palette d'outils du médecin moderne, l'imagerie numérique dispose d'une place de choix. En effet, de nombreuses modalités d'acquisition sont maintenant disponibles et offrent un vaste panel d'informations anatomiques, fonctionnelles ou dynamiques. En proposant de visualiser ce qui n'est normalement pas visible (organes, activités fonctionnelles, mouvements cardiaques), les images médicales, tant sur le plan du diagnostic (détection d'une tumeur) que sur celui de la thérapeutique (contrôle du positionnement d'un patient lors d'une séance d'irradiation), deviennent incontournables. Ces images sont les données de base à partir desquelles nous avons travaillé.



... **des algorithmes de traitement et d'analyse d'images.** Analyser une image médicale tridimensionnelle est un procédé long et délicat pour un opérateur humain. D'un point de vue informatique, le traitement et l'analyse des images a cependant donné lieu à un certain nombre d'applications automatiques ou semi-automatiques dont le but est d'aider le médecin : délimitation de zones d'intérêt, visualisation de structures 3D, évaluation quantitative des dimensions des organes, localisation d'anomalies, suivi de l'évolution de pathologies *etc.* La majeure partie de ce document est consacrée à l'étude de l'un de ces traitements, le *recalage* d'images, dont le but est de mettre en correspondance un couple d'images, de manière à utiliser simultanément les deux types d'informations que ces images contiennent.



... **des moyens d'accès.** Les traitements informatiques manipulant de grandes quantités de données, telles les images médicales, demandent des moyens matériels importants et coûteux. Comme il est (encore ?) inenvisageable de proposer à chaque médecin un ordinateur assez puissant, capable d'effectuer tous les traitements d'analyse d'images dont il a besoin, un *accès* à des centres de calcul *distants* doit lui être proposé. C'est ce domaine de recherche qui est au centre de la deuxième partie de ce document.



Les recherches présentées dans ce document s'insèrent dans un projet financé par la région Rhône-Alpes et nommé *Santé et Calcul Haute-Performance*, visant à apporter des techniques informatiques performantes dans les environnements hospitaliers. De plus, notre travail s'inscrit dans le cadre des activités de recherche autour des techniques informatiques pour l'imagerie médicale, qui ont tout d'abord débutées au LIP² et qui sont actuellement poursuivies au laboratoire ERIC³, au sein de

2. Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme de Lyon

3. Équipe de Recherche en Ingénierie des Connaissances

l'équipe *Images* dirigée par S. MIGUET. Parmi les développements précédents, nous nous inscrivons également à la suite de ceux effectués dans le cadre d'une collaboration avec des médecins du centre de lutte contre le cancer Léon Bérard, et initiés par F. FESCHET et S. MIGUET. Il s'agit de la poursuite des travaux concernant le positionnement automatique du patient en radiothérapie conformationnelle.

La première partie de cette thèse porte ainsi sur le recalage d'images. Il s'agit d'une problématique centrale en analyse d'images et qui n'apparaît pas uniquement dans le domaine médical, puisqu'au-delà même de l'application directe de ces algorithmes, se pose la notion de *similarité* entre images. Si l'on demande à un être humain de statuer sur la ressemblance entre deux images, il y a de fortes chances qu'il demande auparavant à partir de *quels critères de similarité* il doit baser sa réponse. Le même principe s'applique dans le domaine de l'imagerie numérique : il n'existe pas de critère de similarité à portée universelle. Une bonne partie de la recherche dans ce domaine est basée sur l'extraction de primitives — points, courbes, surfaces — essayant au mieux de caractériser l'information commune des images. D'origine plus récente, une autre voie consiste à étudier de manière globale les liens statistiques entre les intensités des images, sans étape de segmentation. C'est dans cette démarche-ci que se sont situés nos travaux.

Le parti pris de ne pas recourir à une étape de segmentation n'est pas une contrainte liée à un défi quelconque. Le but est en effet d'essayer d'étudier des approches alternatives dans les cas où les images ne sont pas d'assez bonne qualité pour être, sinon correctement, du moins rapidement segmentées. Ce problème se pose en particulier avec les images utilisées pour contrôler le positionnement du patient lors d'une séance d'irradiation, grâce à l'imagerie *portale* en cancérologie. À plus long terme, la complémentarité des deux approches, avec et sans segmentation, devrait permettre d'améliorer différents traitements.

Organisation de la thèse

Nous avons choisi de présenter les travaux sous la forme de chapitres relativement courts, centrés sur une problématique particulière. Ces chapitres sont organisés en deux parties, la première consacrée au recalage d'image et la seconde à une proposition de plate-forme d'imagerie médicale.

1 - État de l'art : il s'agit d'une étude bibliographique de différentes méthodes de recalage d'images. Après une rapide description des *applications* de la problématique du recalage, nous essayons de situer nos travaux dans le contexte scientifique actuel, en mettant l'accent sur notre parti pris, à savoir l'absence d'étape de segmentation.

Les chapitres suivants déclinent ensuite trois aspects du recalage d'images par méthodes *iconiques*, c'est-à-dire sans segmentation :

2 - Mesures de similarité : après avoir défini la nature des *liens* entre les images que nous voulons évaluer, une classification de différentes mesures est présentée. Une série d'expériences dans laquelle nous essayons d'illustrer la capacité de ces mesures à évaluer une similarité entre *couples* d'images, et non plus uniquement entre différentes positions de deux images, termine le chapitre.

3 - Procédures d'interpolation : parmi les différentes étapes d'un recalage, l'interpolation est celle qui intervient le plus souvent. En étudiant le comportement des procédures d'interpolation usuelles, d'autres méthodes originales sont proposées et comparées.

4 - Procédés de transformation d'images : en termes de temps de calcul, l'étape la plus coûteuse dans une procédure de recalage d'images est le calcul de la mesure de similarité, au travers ou non d'un histogramme joint. Nous proposons dans ce chapitre un algorithme original, permettant au prix d'une perte de précision contrôlée, d'accélérer substantiellement la totalité du processus.

Ensuite, le dernier chapitre de la première partie décrit une application des travaux précédents :

5 - Positionnement de patient : en radiothérapie conformationnelle, diverses modalités d'acquisition d'images sont utilisées afin de fournir un ensemble d'images utilisées pour contrôler la position du patient par rapport à l'appareil d'irradiation. La plupart des méthodes permettant d'effectuer ce placement de manière automatique et précise, fait usage d'étape(s) de segmentation, dont la qualité conditionne la précision du résultat. Nous proposons dans ce chapitre l'étude d'une autre voie, utilisant des procédures de recalage iconique par mesure de similarité, afin de simuler une recherche par le contenu dans un ensemble d'images pré-calculées. Une série d'expériences illustre la précision de cette approche, même pour des déplacements du patient importants, incluant des rotations hors-plan.

Toujours dans le cadre du projet *Santé et Calcul Haute-Performance* mais extérieur à la problématique du recalage, la deuxième partie du document est consacrée à la description d'une plate-forme d'imagerie médicale. Ensuite, nous étudions plus précisément un outil de ce système, à travers une approche par extraction de surface grâce à l'algorithme des Marching-Cubes.

6 - ARAMIS : il s'agit du nom du prototype qui a été développé au cours de cette thèse (*A Remote Access Medical Imaging System*). Le chapitre présente rapidement le domaine de recherche de ce travail — les techniques dites de *Metacomputing* — et décrit les protocoles utilisés dans le système. Cette plate-forme permet, à partir d'un poste de travail banalisé, d'activer des calculs parallèles de traitement et d'analyse d'images médicales sur des serveurs de calcul distants. Les outils intégrés au sein du serveur proviennent d'une partie des développements réalisés durant les activités de recherche sous la direction de S. MIGUET.

7 - Calcul de relation d'adjacence : le dernier chapitre décrit un algorithme permettant de calculer la relation d'adjacence d'une surface triangulée extraite par l'algorithme des Marching-Cubes. Nous prouvons la linéarité de cette approche et présentons également des résultats expérimentaux.

Ces chapitres sont suivis de la bibliographie (page 166) et de trois annexes. La première présente les matrices des transformations utilisées, transformations affines et modèle sténopé, et la seconde propose un résumé de quelques modalités d'acquisition d'images médicales. Finalement en annexe C, un index des auteurs cités conclut le document.

Contribution

Chaque chapitre correspond, en partie tout du moins, à un travail ayant fait l'objet d'une publication, excepté pour l'étude bibliographique et pour le chapitre consacré au positionnement de patient. La rédaction d'un article sur ce dernier travail est en cours.

