

**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

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I Recalage d'images. Application au positionnement de patient</b>	<b>5</b>
<b>1 Recalage d'images</b>	<b>7</b>
1.1 Domaines d'application . . . . .	8
1.2 Classification des techniques de recalage . . . . .	10
1.3 Les méthodes iconiques . . . . .	20
1.4 Conclusion . . . . .	22
<b>2 Mesures de similarité</b>	<b>23</b>
2.1 Principes de base . . . . .	24
2.2 Classification des mesures . . . . .	28
2.3 Expérimentations . . . . .	42
2.4 Conclusion . . . . .	57
<b>3 Interpolations</b>	<b>61</b>
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
<b>4 Transformations géométriques d'images</b>	<b>83</b>
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
<b>5 Positionnement de patients</b>	<b>97</b>
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
<b>II</b>	<b>Santé et calculs haute-performance</b>	<b>121</b>
<b>6</b>	<b>ARAMIS : une plate-forme d'imagerie médicale à accès distant</b>	<b>123</b>
6.1	Contexte . . . . .	124
6.2	Principes généraux . . . . .	127
6.3	Coeur du système . . . . .	134
6.4	Conclusion . . . . .	136
<b>7</b>	<b>Approche surface</b>	<b>137</b>
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
	<b>Conclusion générale</b>	<b>151</b>
<b>III</b>	<b>Annexes</b>	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Transformations affines et modèle sténopé</b>	<b>169</b>
A.1	Matrices des transformations affines . . . . .	169
A.2	Modèle sténopé . . . . .	170
<b>B</b>	<b>Modalités d'acquisition d'images médicales</b>	<b>173</b>
B.1	Modalités d'acquisition . . . . .	173
B.2	Nomenclature des données . . . . .	175
<b>C</b>	<b>Index des auteurs cités</b>	<b>177</b>

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I Recalage d'images. Application au positionnement de patient</b>	<b>5</b>
<b>1 Recalage d'images</b>	<b>7</b>
1.1 Domaines d'application . . . . .	8
1.2 Classification des techniques de recalage . . . . .	10
1.3 Les méthodes iconiques . . . . .	20
1.4 Conclusion . . . . .	22
<b>2 Mesures de similarité</b>	<b>23</b>
2.1 Principes de base . . . . .	24
2.2 Classification des mesures . . . . .	28
2.3 Expérimentations . . . . .	42
2.4 Conclusion . . . . .	57
<b>3 Interpolations</b>	<b>61</b>
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
<b>4 Transformations géométriques d'images</b>	<b>83</b>
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
<b>5 Positionnement de patients</b>	<b>97</b>
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
<b>II</b>	<b>Santé et calculs haute-performance</b>	<b>121</b>
<b>6</b>	<b>ARAMIS : une plate-forme d'imagerie médicale à accès distant</b>	<b>123</b>
6.1	Contexte . . . . .	124
6.2	Principes généraux . . . . .	127
6.3	Coeur du système . . . . .	134
6.4	Conclusion . . . . .	136
<b>7</b>	<b>Approche surface</b>	<b>137</b>
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
	<b>Conclusion générale</b>	<b>151</b>
<b>III</b>	<b>Annexes</b>	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Transformations affines et modèle sténopé</b>	<b>169</b>
A.1	Matrices des transformations affines . . . . .	169
A.2	Modèle sténopé . . . . .	170
<b>B</b>	<b>Modalités d'acquisition d'images médicales</b>	<b>173</b>
B.1	Modalités d'acquisition . . . . .	173
B.2	Nomenclature des données . . . . .	175
<b>C</b>	<b>Index des auteurs cités</b>	<b>177</b>

## Table des figures

2.1	Notations pour un histogramme joint . . . . .	25
2.2	Coupes de volume 3D . . . . .	27
2.3	Exemples d'étapes de recalage . . . . .	27
2.4	Exemples d'histogrammes joints . . . . .	27
2.5	Liaison des intensités . . . . .	31
2.6	Différentes fonctions $f$ . . . . .	37
2.7	Coupes $IRM - T_1$ . . . . .	43
2.8	Coupes $IRM - T_2$ . . . . .	44
2.9	Coupes $IRM - DP$ . . . . .	45
2.10	Coupes $TEP$ . . . . .	46
2.11	Coupes $CT$ . . . . .	47
2.12	Couple $(T_1-TEP)$ . . . . .	49
2.13	Couple $(DP-TEP)$ . . . . .	50
2.14	Couple $(T_1-CT)$ . . . . .	50
2.15	Couple $(T_2-CT)$ . . . . .	51
2.16	Couple $(T_1-TEP)$ . . . . .	52
2.17	Couple $(DP-TEP)$ . . . . .	52
2.18	Couple $(T_1-CT)$ . . . . .	53
2.19	Couple $(T_2-CT)$ . . . . .	53
2.20	Résultats des recalages (information mutuelle) . . . . .	56
2.21	Résultats des recalages ( $u$ de Theil, $f r$ ) . . . . .	56
2.22	Résultats des recalages (rapport de corrélation $\eta^2$ ) . . . . .	57
2.23	Petit jeu : découvrez le patient ! . . . . .	58
3.1	Interpolations classiques . . . . .	64
3.2	Exemple 2D pour $\Upsilon_{PPV}$ , $\Upsilon_{LIN}$ et $\Upsilon_{VP}$ . . . . .	65
3.3	Artefacts dus à l'interpolation linéaire . . . . .	66
3.4	Illustration d'artefacts dû à l'utilisation conjointe de l'information mutuelle et $\Upsilon_{VP}$ . . . . .	67
3.5	Non-égalité des positions spatiales sous-pixéliques . . . . .	68
3.6	Entropie de $\Omega$ suivant les positions sous-pixéliques des points . . . . .	68
3.7	Illustration de la pondération de $\mu_0$ . . . . .	69
3.8	Correction des artefacts liés à $\Upsilon_{VP}$ . . . . .	70
3.9	$\omega_0$ en fonction de la position de $\mathbf{x}$ , (configuration décrite page 65) . . . . .	71
3.10	Intersection entre l'intensité interpolée linéairement et le plan $Z = 4$ . . . . .	71

3.11	Recalages <i>TEP</i> sur $T_1$ , par information mutuelle . . . . .	74
3.12	Recalages <i>TEP</i> sur <i>DP</i> , par information mutuelle . . . . .	75
3.13	Recalages <i>TEP</i> sur $T_2$ , par Rapport de Corrélacion . . . . .	76
3.14	Recalages <i>CT</i> sur $T_1$ , par information mutuelle . . . . .	77
3.15	Comparaison entre $\Upsilon_{ME}$ et $\Upsilon_{PPV}$ . . . . .	78
3.16	Erreur en fonction du nombre d'itérations, $(T_1, TEP)$ . . . . .	79
3.17	Erreur en fonction du nombre d'itérations, $(DP, TEP)$ . . . . .	80
3.18	Erreur en fonction du nombre d'itérations, $(T_1, TEP)$ , avec $\eta^2$ . . . . .	80
3.19	Erreur en fonction du nombre d'itérations, $(T_2, CT)$ . . . . .	81
3.20	Erreur durant la procédure d'optimisation du critère (point de départ très éloigné) . . . . .	81
3.21	Erreur durant la procédure d'optimisation du critère (point de départ moins éloigné) . . . . .	82
4.1	<i>Forward mapping</i> et <i>backward mapping</i> . . . . .	85
4.2	Ensemble $\Phi_m$ de voxels: notations . . . . .	87
4.3	Point dans l'image de référence: notations . . . . .	87
4.4	Bloc $\Phi_m$ transformé et projeté. . . . .	88
4.5	Décalages d'adresses mémoire. . . . .	89
4.6	$s_{opt}(n, \sigma)$ en fonction de $\sigma_x$ , pour trois valeurs de $n$ (10, 5 et 1 millions de voxels) . . . . .	92
4.7	$s_{opt}(n, \sigma)$ en fonction de $n$ , pour trois valeurs de $\sigma_x$ (2, 5 et 10) . . . . .	93
4.8	Précision pour chaque $\sigma \in [0 : 10]$ . . . . .	94
4.9	Zoom de la figure 4.8 (l'axe $Ox$ représente une distance d'un demi-voxel) . . . . .	95
4.10	Proportion (en pourcentage) du nombre de poids égal à zéro, en fonction de $\sigma$ . . . . .	95
5.1	Coupe d'un examen scanner. . . . .	98
5.2	Deux types d'images utilisées en radiothérapie . . . . .	99
5.3	Comparaison entre le déplacement 3D d'un cube et une série de transformations 3D/2D . . . . .	104
5.4	Erreur des déplacements estimés par différentes méthodes en fonction de translations de $\mathbf{H}$ . . . . .	107
5.5	Erreur des déplacements estimés par différentes méthodes en fonction de rotations de $\mathbf{H}$ . . . . .	108
5.6	Erreur des déplacements estimés par différentes méthodes en fonction de transformations composées . . . . .	108
5.7	<i>pseudo-MVI</i> utilisées lors des tests . . . . .	110
5.8	Échantillon de l'ensemble $\Gamma_1$ (vue de profil) . . . . .	111
5.9	Échantillon de l'ensemble $\Gamma_2$ (vue de face) . . . . .	112
5.10	Résultats des recalages en fonction de $\phi_m$ et $\psi_n$ , vue de profil . . . . .	113
5.11	Résultats des recalages en fonction de $\theta_m$ et $\phi_n$ , vue de face . . . . .	114
5.12	DRR et MVI de l'objet artificiel . . . . .	115
5.13	Résultat des recalages en fonction de $\phi_m$ et $\psi_n$ . . . . .	116
5.14	Erreurs $\varepsilon_{m,n}$ en fonction de $\phi_m$ et $\psi_n$ . . . . .	118

---

6.1	L'applet ARAMIS dans un navigateur . . . . .	130
6.2	Configuration clients/serveurs avec deux niveaux de réseaux . . . . .	131
6.3	Visualiseurs de volumes . . . . .	132
6.4	Éditeur de couleur (exécution <i>locale</i> ) . . . . .	132
6.5	Trackball virtuel . . . . .	133
6.6	Résultat d'un rendu volumique, activé localement et exécuté de manière distante . . . . .	133
6.7	Décomposition d'une requête . . . . .	135
7.1	Définition d'une <i>cellule</i> , d'une <i>coupe</i> et d'une <i>couche</i> d'une image 3D . . . . .	139
7.2	Triangulations des 14 configurations standard . . . . .	139
7.3	Cas ambigus . . . . .	140
7.4	Structure de données de la surface extraite . . . . .	141
7.5	Les 4 configurations correspondantes aux 4 valeurs de $\mathcal{D}$ . . . . .	143
7.6	Exemple d'une surface générée dans une couche (les couleurs des facettes correspondent à leur coordonnée sur l'axe $Oy$ ) . . . . .	144
7.7	Partie de la liste de triangles générée à partir de l'exemple précédent . . . . .	145
7.8	Comparaison des temps de calcul des deux algorithmes . . . . .	147
7.9	Distribution du coût cumulé pour chaque déplacement dans la liste, algorithme naïf . . . . .	147
7.10	Distribution du coût cumulé pour chaque déplacement dans la liste, nouvel algorithme . . . . .	148
7.11	Surface extraite par l'algorithme des Marching-Cubes sur une image de tomographie X . . . . .	148
7.12	Surface décimée, 50% des facettes ont été supprimées . . . . .	149
A.1	Modèle sténopé (ici en 2D) . . . . .	170
B.1	Définition des pixels et des voxels . . . . .	175



## Liste des tableaux

1.1	Différents états de l'art sur le recalage d'images . . . . .	18
1.2	Thèses sur le recalage . . . . .	19
2.1	Liens entre les $f$ -divergences . . . . .	37
2.2	Lien entre différentes mesures . . . . .	40
2.3	Synthèse des mesures . . . . .	41
2.4	Résumé des mesures comparées . . . . .	48
2.5	Résumé des tests effectués et liste des figures correspondantes . . . . .	49
3.1	Rapports entre les temps de calcul des interpolations . . . . .	72
3.2	Résumé des tests effectués et liste des figures correspondantes . . . . .	73
4.1	Limite de l'accélération suivant la procédure d'interpolation. . . . .	92
4.2	Résultats expérimentaux (voir le texte) . . . . .	93
5.1	Déplacements estimés . . . . .	117

