



HAL
open science

Extraction d'information dans les maillages et les volumes numériques

Jean-Luc Mari

► **To cite this version:**

Jean-Luc Mari. Extraction d'information dans les maillages et les volumes numériques. Informatique [cs]. UNIVERSITÉ DE LA MÉDITERRANÉE AIX-MARSEILLE II, 2011. tel-02464892

HAL Id: tel-02464892

<https://hal.science/tel-02464892v1>

Submitted on 3 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II



FACULTÉ DES SCIENCES DE LUMINY
163, Avenue de Luminy 13288 – MARSEILLE cedex 9

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES
Spécialité : Informatique

présentée par

Jean-Luc MARI

EXTRACTION D'INFORMATION DANS LES MAILLAGES
ET LES VOLUMES NUMÉRIQUES

soutenue le mercredi 9 novembre 2011 devant le jury composé de

Stefanie HAHMANN	Professeur à l'INP Grenoble, Rapporteur
Jean MEUNIER	Professeur à l'Université de Montréal, Rapporteur
Marc NEVEU	Professeur à l'Université de Bourgogne, Rapporteur
Marc DANIEL	Professeur à l'Université de la Méditerranée, Examineur
Pascal LIENHARDT	Professeur à l'Université de Poitiers, Examineur
Laurent LUCAS	Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, Président

*A Emilie,
à Fiona et Jack.*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les membres de mon jury qui m'ont fait l'honneur et le plaisir de participer à cette habilitation : Stefanie Hahmann, Jean Meunier et Marc Neveu qui ont accepté de rapporter sur ce manuscrit, Pascal Lienhardt et Laurent Lucas pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. Merci également à Marc Daniel pour son soutien, ses conseils et pour avoir accepté le rôle de *garant d'HDR*.

Je remercie toutes les personnes avec lesquelles j'ai collaboré à Marseille, en France ou à l'étranger. Concernant les travaux liés à la géologie numérique, je remercie tout particulièrement Sophie Viseur pour avoir initié une collaboration riche et fructueuse au travers du projet VOGP et du co-encadrement de la thèse de Dimitri Kudelski. Je remercie Cédric Clouchoux pour son amitié et sa conviction pour l'utilisation de ces algorithmes (initialement destinés à la géologie) à d'autres domaines, notamment dans le contexte médical. Concernant les travaux relatifs aux complexes simpliciaux en lien avec l'Université de Séville, je remercie très chaleureusement Pedro Real pour son énergie, ses qualités humaines, sa complicité et son soutien infailible. Je n'oublie pas les autres membres de son équipe avec lesquels j'ai eu le grand plaisir de travailler, notamment Helena Molina-Abril, Ana Pacheco, Javier Carnero et Daniel Díaz-Pernil. Concernant les travaux sur la modélisation du volume rénal, je remercie Christian Coulangue pour avoir initié ce projet ambitieux, ainsi que les autres membres de la Chaire *Technologies pour la Santé* de la *Fondation de l'Université de la Méditerranée* qui sont impliqués dans cette aventure : Vincent Vidal, Marc André, Frédéric Cohen, Pierre-Henri Rolland et Philippe Souteyrand.

Je remercie chaleureusement les étudiants dont j'ai dirigé les recherches, en thèse ou en master, et qui ont contribué à ces travaux, en particulier Guillaume Thibault, Dimitri Kudelski, Valentin Léonardi, Nicolas Jesson et Florian Graglia.

Je remercie tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans ma démarche, les co-auteurs avec lesquels j'ai eu la chance de travailler, ainsi que toutes les personnes que j'ai rencontrées en conférences ou en séminaires et qui m'ont beaucoup apporté en terme d'échanges et d'enrichissement (elles se reconnaîtront, je ne me lancerai pas dans un listage exhaustif au risque d'en oublier). Concernant le manuscrit, je tiens à remercier Christophe Lohou et Samuel Peltier pour la relecture de certains passages *discrets* et *simpliciaux*.

Enfin, *last but not least*, je remercie mes parents, ma famille, mes amis, mon épouse Emilie et mes enfants Fiona et Jack, pour leur patience, leur bonne humeur et leur soutien sans faille parfois (très) bruyant.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	7
Partie I Mémoire scientifique	13
1. Introduction	15
2. Extraction d'informations dans les volumes numériques binaires	19
2.1 Introduction	19
2.1.1 Contexte	19
2.1.2 Problématique	19
2.2 Eléments de base	20
2.2.1 Les complexes simpliciaux	20
2.2.2 Choix de la 26-adjacence	22
2.3 Travaux connexes	23
2.4 Du volume numérique binaire au complexe simplicial	24
2.4.1 Une première approche de conversion par décimation	24
2.4.2 Une approche de simplicialisation incrémentale constructive	28
2.5 Simplicialisation d'un arbre octal	30
2.5.1 Motivations	30
2.5.2 Voisinage dans un arbre octal	30
2.5.3 Discussion sur trois approches	31
2.5.4 Processus de simplicialisation	32
2.5.5 Résultats	34
2.6 Conclusion	34
2.7 Bibliographie	37
2.8 Publications associées à ces travaux	39
3. Caractérisation du volume sous la nappe par indices de forme 3D	41
3.1 Introduction	41
3.1.1 Contexte et motivations	41
3.1.2 Les données	42
3.1.3 Notion de classement	42

3.2	Caractérisation de la forme des noyaux	43
3.2.1	Travaux relatifs	43
3.2.2	Mesures et indices de forme	43
3.3	Caractérisation de la texture des noyaux	44
3.3.1	Analyse de l'homogénéité de la texture	45
3.3.2	Etude du volume sous la nappe	45
3.4	Conclusion	47
3.5	Bibliographie	49
3.6	Publications associées à ces travaux	50
4.	Détection de contours pour la reconstruction 3D de la cornée	51
4.1	Introduction	51
4.1.1	Contexte	51
4.1.2	Les données	52
4.1.3	Travaux relatifs	53
4.2	Extraction de contours à partir d'images radiales	53
4.2.1	Pré-traitement des images	53
4.2.2	Détection de deux points d'ancrage	54
4.2.3	Extraction du contour	55
4.3	Conclusion	56
4.3.1	Résultats et discussion	56
4.3.2	Vers un modèle 3D de la cornée	57
4.4	Bibliographie	58
4.5	Publication associée à ces travaux	58
5.	Détection de lignes caractéristiques dans les maillages	59
5.1	Introduction	59
5.2	Eléments de base	62
5.2.1	Les maillages surfaciques	62
5.2.2	Notions de géométrie différentielle	62
5.3	Travaux relatifs	64
5.3.1	Les méthodes de détection de lignes caractéristiques	64
5.3.2	Estimation des courbures sur les maillages triangulés	65
5.3.3	Discussion et choix d'un estimateur	66
5.4	Une première approche par extrema de courbures	66
5.4.1	Introduction	66
5.4.2	Algorithme d'extraction des lignes caractéristiques	67
5.4.3	Amélioration des résultats	72
5.4.4	Conclusion	74

5.5	Détection par labellisation des sommets et squelettisation	75
5.5.1	Motivations	75
5.5.2	Marquage des sommets	75
5.5.3	Approche par paramétrisation	76
5.5.4	Approche par squelettisation directe sur le maillage	79
5.6	Applications	86
5.6.1	Détection automatique de structures géologiques	86
5.6.2	Autres domaines d'application	87
5.7	Conclusion	89
5.8	Bibliographie	91
5.9	Publications associées à ces travaux	94
6.	Reconstruction 3D du volume rénal pour le suivi et la destruction de tumeurs	95
6.1	Introduction	95
6.2	Approches similaires	96
6.3	Reconstruction du rein	98
6.3.1	Extraction du nuage de points	98
6.3.2	Construction du maillage	101
6.3.3	Premiers résultats et discussion	102
6.3.4	Limites de l'approche	103
6.4	Conclusion	105
6.5	Personnes impliquées dans ce projet	106
6.6	Bibliographie	107
6.7	Publications associées à ces travaux	108
7.	Génération automatique de maillages à partir d'information structurelle	109
7.1	Introduction	109
7.2	Travaux similaires	111
7.3	Processus de génération du maillage englobant	112
7.3.1	Déroulement du processus : de l'esquisse au polyèdre	113
7.3.2	Construction du squelette 3D	114
7.3.3	Calcul du polyèdre englobant	115
7.3.4	Multi-résolution et surfaces de subdivision	117
7.4	Validation et exemples	119
7.4.1	Exemple : un « <i>insecte troué</i> »	119
7.4.2	Performances de l'algorithme	120
7.4.3	Déformations ultérieures	120
7.4.4	Autres exemples	120
7.5	Conclusion et perspectives	121

7.6	Bibliographie	125
7.7	Publications associées à ces travaux	126
8.	Conclusion	127
8.1	Synthèse des travaux présentés	127
8.2	Principales contributions	128
Partie II	Projet de recherche	131
9.	Travaux en cours et futurs	133
9.1	Actions à court terme	133
9.1.1	Voxels et complexes	133
9.1.2	Construction et interprétation automatiques d’affleurements numériques	134
9.1.3	Modélisation dynamique et suivi du rein	135
9.2	Actions à moyen et long termes	137
9.2.1	Etude structurelle multi-résolution d’objets discrets dynamiques	137
9.2.2	Extraction d’information dans les modèles à base de points	137
9.2.3	Généricité pour la modélisation dynamique d’organes	137
9.2.4	Génération interactive et rapide d’objets	138
Partie III	Curriculum vitæ	139
10.	Activités post-doctorales	141
10.1	En bref	141
10.2	Etudes et diplômes	142
10.3	Déroulement de carrière	142
10.3.1	Activités d’enseignement	142
10.4	Projets et collaborations nationales	145
10.5	Collaborations internationales	146
10.6	Séjours à l’étranger	146
10.7	Relations avec le monde industriel ou socio-économique	147
10.8	Participation à la vie de la communauté scientifique	147
10.8.1	Membre de comités scientifiques pour des revues	147
10.8.2	Membre de comités scientifiques pour des congrès	148
10.8.3	Rapporteur dans un jury de thèse	148
10.8.4	Membre d’un jury de thèse sans en être rapporteur	148
10.8.5	Participations à des groupes de travail	148
10.8.6	Organisation de conférences	149

10.8.7	Autres activités collectives	149
10.9	Direction de travaux de thèse	149
10.10	Encadrement de stages en Master Recherche (ex DEA)	150
10.11	Encadrement de projets et stages	150
10.11.1	Projets de fin d'études (Master 2ème année)	150
10.11.2	Projets de Master 1ère année	151
10.11.3	Projets de Master CCI (Comp. Compl. en Informatique)	151
10.11.4	Autres projets et stages	152
11.	Publications	153
11.1	Revue internationale	153
11.2	Revue nationale	154
11.3	Revue électronique	154
11.4	Invitations à des conférences internationales	154
11.5	Conférences internationales avec comité de lecture et actes	154
11.6	Conférences internationales sur abstract	156
11.7	Conférences nationales avec actes	157
11.8	Conférences sans actes	158
11.9	Thèse soutenue et thèses encadrées	158
11.10	Rapports	158
11.11	Articles soumis	158
11.12	Communications orales, séminaires	159

PREMIÈRE PARTIE

MÉMOIRE SCIENTIFIQUE

INTRODUCTION

Les travaux de recherche développés dans ce mémoire se situent dans le domaine de la *modélisation géométrique*. Il s'agit de la branche de l'informatique graphique traitant des structures de données et des algorithmes qui permettent de décrire, concevoir, analyser, comprendre et manipuler efficacement les objets géométriques.

Plus précisément, mes travaux concernent l'*extraction d'information* pour deux modes de représentation très courants en modélisation géométrique : les *objets discrets* et les *maillages*. L'un ou l'autre de ces formalismes peut devoir être manipulé, selon le format et les modalités d'acquisition des données :

- Les **objets discrets** sont constitués en dimension 2 de *pixels* au sein d'*images numériques* classiques, en dimension 3 de *voxels* empilés dans une grille cubique uniforme appelée *volume numérique*. Les propriétés topologiques de ces objets 2D ou 3D sont naturellement induites par la grille considérée. A titre d'exemple, les volumes numériques sont fréquemment utilisés en imagerie médicale ou sismique.
- Les **maillages** (ou *modèles polyédriques*) sont un mode de représentation géométrique permettant de décrire des surfaces à l'aide d'un ensemble de polygones. Ces entités dites *semi-continues* sont omniprésentes dans de nombreux domaines de l'informatique graphique, de la conception à la compréhension des formes, et trouvent des applications dans le cinéma, le jeu vidéo, la CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur), la simulation, la réalité virtuelle ou le rendu.

La plupart des modules de capture de la géométrie d'un objet 3D produisent soit des volumes numériques (par exemple les scanners et IRM en imagerie médicale, ou les camions vibreurs sismiques en géologie du sous-sol), soit des nuages de points qui sont généralement maillés dans le but d'être exploités (par exemple des scanners 3D manuels pour l'acquisition de petits objets, ou des scanners LIDAR pour la modélisation de bâtiments ou de formations géologiques). En vision par ordinateur, il est souvent nécessaire d'extraire des caractéristiques de ces modèles pour plusieurs raisons : automatisation d'une expertise, enrichissement de la connaissance sur un type donné d'objets, diagnostic assisté par ordinateur, reconstruction 3D, meilleure compréhension de la forme, etc. Dans cette optique, il faut alors pouvoir manipuler à la fois des maillages et des volumes numériques et développer des algorithmes spécifiques pour en extraire des caractéristiques pertinentes.

Lorsque cela est possible, il peut être intéressant de construire et travailler sur un modèle géométrique sous-jacent, pour avoir accès à d'autres palettes d'outils. Ces modèles peuvent être basiques (comme un simple volume numérique binaire construit à partir d'une image que l'on souhaite analyser, ou bien un maillage triangulé caractérisant un organe ou un objet géologique) ou plus élaborés (comme un *complexe simplicial*).

Cette première partie du document d'habilitation, appelée *mémoire scientifique*, se compose de six chapitres principaux qui s'articulent autour de deux blocs liés aux deux modes de représentation discrets et semi-continus, selon que les objets en jeu sont des volumes (ou des images) numériques, ou des maillages.

Le premier bloc est constitué des trois chapitres 2, 3 et 4. Il traite de l'extraction d'information dans le contexte d'images ou de volumes numériques :

- Le chapitre 2 représente la part principale de ce bloc. Il porte sur l'*extraction d'informations géométriques et topologiques dans les volumes numériques binaires*. Il s'agit de travaux effectués dans le cadre d'une collaboration très active avec l'équipe CATAM (Topologie Algébrique Algorithmique et Mathématiques Appliquées) de Pedro Real (Université de Séville) depuis 2004. Ce groupe du Département de Mathématiques Appliquées (Ecole Technique Supérieure d'Ingénieurs en Informatique) travaille dans le domaine de la topologie algébrique, et leurs études portent principalement sur l'analyse topologique d'objets discrets. Pour pouvoir travailler sur des formalismes adaptés à leurs algorithmes, notre travail a été d'intégrer des méthodes issues de la modélisation géométrique pour passer d'une représentation discrète (des volumes numériques binaires ou des arbres octaux) à une représentation structurée (les complexes simpliciaux). J'ai eu l'opportunité d'associer à ces travaux un étudiant de master en 2008 (Nicolas Jesson), et j'ai eu l'occasion de travailler avec trois doctorants de Pedro Real (Helena Molina-Abril, Ana Pacheco et Javier Carnero).
- Le chapitre 3 traite de la *caractérisation du volume sous la nappe par indices de forme 3D*. Il s'agit d'une partie des travaux de la thèse que Guillaume Thibault a soutenue en 2009, et que j'ai co-encadrée avec Jean Sequeira (projet SimGraph, LSIS). Cette thèse, financée par une allocation du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, nous a permis de travailler avec l'équipe Génétique des Maladies Neuromusculaires de Nicolas Lévy sur l'étude de noyaux de cellules atteints par la progéria, une maladie très rare. La problématique de cette thèse était de combiner des outils de reconnaissance des formes avec des méthodes de classement pour discriminer les noyaux de cellules en deux catégories (*sains* ou *pathologiques*). Dans ce chapitre, je décris des indices de forme élaborés spécifiquement pour ce contexte, qui visent à mieux caractériser la texture des noyaux de cellules en transposant les données 2D en *volume sous la nappe*, de manière à avoir accès à des outils 3D.
- Le chapitre 4 est consacré à la *détection de contours dans des images tomographiques en cohérence optique pour la reconstruction 3D de la cornée*. Il s'agit des travaux de master recherche (anciennement DEA) de Florian Graglia, co-dirigés par Jean Sequeira et moi-même. Dans le cadre d'une collaboration avec Georges Baikoff (Centre de Chirurgie Réfractive, Clinique Monticelli, Marseille), l'objectif était d'extraire les contours de la cornée depuis des images radiales, la finalité étant de pouvoir obtenir un modèle 3D de la cornée pour y effectuer des calculs dédiés à chaque patient en pré-opératoire.

Le second bloc est composé des trois chapitres 5, 6 et 7. Il porte sur l'extraction d'information dans le contexte des maillages. Ce mode de représentation peut être soit natif, soit obtenu suite à une phase de reconstruction depuis un volume numérique :

- Le chapitre 5 constitue la majeure partie de ce bloc. Il aborde la *détection de lignes caractéristiques dans les maillages*. Il s'agit des travaux de thèse de Dimitri Kudelski que je co-encadre avec Sophie Viseur du GSRC (Laboratoire de Géologie des Systèmes et des Réservoirs Carbonatés). Cette thèse est financée par un contrat d'université provenant d'une coopération avec l'entreprise pétrolière AGIP (du groupe ENI), et la soutenance aura lieu le 8 décembre 2011. Ces travaux sont l'objet d'une collaboration active avec des géologues-numériciens qui traitent des données issues de LIDAR pour représenter des affleurements numériques de formations géologiques. Une meilleure compréhension de ces objets *visibles* (par opposition aux objets du sous-sol dont les acquisitions sont sous la forme de *cubes sismiques*) doit permettre d'enrichir des modèles analogues souterrains qui sont définis par des informations partielles et de moins bonne résolution. Dans ce contexte, Dimitri Kudelski a élaboré des algorithmes

visant à extraire des lignes caractéristiques sur des affleurements numériques et ayant un sens d'un point de vue géologique. Une première approche a été développée. Elle s'appuie sur l'étude de la variation de la courbure suivie d'un filtrage directionnel pour limiter la détection d'artefacts. Une seconde approche, bien plus efficace, combine une étude de la courbure (et non plus de sa variation) avec une méthode de squelettisation originale et mise en œuvre pour ce contexte spécifique. Les résultats obtenus par cet algorithme robuste qui prend le contre-pied des approches existantes sont des lignes caractéristiques stables et connexes.

- Le chapitre 6 est consacré à la *reconstruction 3D du volume rénal en vue de la génération d'un modèle dynamique pour le suivi et la destruction de tumeurs*. Il s'agit des travaux de début de thèse de Valentin Léonardi, que je co-encadre avec Marc Daniel. Cette thèse est financée par la Fondation de l'Université de la Méditerranée et fait partie d'un projet multidisciplinaire (nommé KiTT pour *Kidney Tumor Tracking*) qui lie des chercheurs en urologie et en radiologie interventionnelle (laboratoire L2PTV, Faculté de Médecine, Université de la Méditerranée) d'une part avec des chercheurs en informatique graphique (projet G-Mod, LSIS) d'autre part. L'objectif final du projet est de détruire des tumeurs rénales en émettant un agent physique (ondes de radiofréquence, ultrasons) sans aucune effraction cutanée sur le patient. Le travail de thèse consiste plus particulièrement à extraire le rein depuis des volumes numériques 4D de la zone abdominale, d'en obtenir un modèle polyédrique dynamique, puis d'effectuer un suivi de cet organe pour la simulation de la destruction d'une tumeur. Les travaux présentés dans ce chapitre se limitent à l'extraction d'un nuage de points caractérisant le rein, et à sa reconstruction polyédrique.
- Le chapitre 7 porte sur la *génération automatique de maillages à partir d'information structurelle synthétique*. La méthode présentée s'inscrit dans le prolongement de mes travaux de thèse, qui visaient à obtenir une représentation d'une forme complexe en intégrant à la fois sa structure *globale* (vision squelette) et ses spécificités *locales* (vision maillage multi-résolution). Il ne s'agit pas à proprement parler d'une approche d'*extraction* d'information depuis un maillage, mais plutôt d'une méthode de *génération* de maillage à partir d'une information structurelle (un squelette morphologique et topologique). L'extraction d'information est ici d'ordre topologique dans la mesure où le volume délimité par le polyèdre obtenu automatiquement est topologiquement équivalent au squelette esquissé par l'utilisateur.

Une liste des références bibliographiques ainsi que des publications personnelles figure à la fin de chaque chapitre.

Le chapitre 8 clôt la première partie du document d'habilitation en exposant la synthèse de mes travaux post-doctoraux et en soulignant les contributions apportées dans le domaine de l'extraction d'information dans un cadre géométrique.

La deuxième partie de ce manuscrit est dédiée à la description de mon projet de recherche. Il s'inscrit d'une part dans le prolongement d'actions en cours, en particulier celles décrites dans les chapitres 2, 5 et 6 qui correspondent à des collaborations actives : extension d'algorithmes pour la construction de complexes simpliciaux en 4D et plus, construction et amélioration de maillages pour l'interprétation automatique d'affleurements géologiques, et suivi temps réel du rein pour la simulation de destruction de tumeurs. D'autre part, à moyen et long termes, ce projet vise à s'étendre à l'extraction d'information dans des contextes plus généraux et liés à des problématiques de plus en plus actuelles en modélisation géométrique. Le premier volet concerne l'étude des propriétés structurelles d'un objet dans un cadre à la fois *discret*, *temporel* et *multi-résolution*. Le deuxième volet relève de l'extraction d'information dans les *modèles à base de points*, qui à la différence des volumes numériques ou des maillages, ne renferment pas d'information topologique car aucune relation d'adjacence n'est définie de manière intrinsèque. Deux autres thèmes portent sur la

modélisation dynamique d'organes et la génération interactive et rapide d'objets.

La troisième et dernière partie de ce document d'habilitation est consacrée à mon curriculum vitæ. Elle se compose de plusieurs sections qui synthétisent mes activités de recherche postdoctorales : déroulement de carrière, collaborations nationales et internationales, séjours à l'étranger, relations avec le monde industriel, participation à la vie de la communauté scientifique, direction de travaux de thèse et de master recherche, et enfin liste des publications et des communications orales.

EXTRACTION D'INFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES ET TOPOLOGIQUES DANS LES VOLUMES NUMÉRIQUES BINAIRES

Ce chapitre est une synthèse des publications référencées dans la section 2.8, et plus particulièrement des articles [42] (voir la section 2.4.1) et [45] (voir les sections 2.4.2 et 2.5).

2.1 Introduction

2.1.1 Contexte

Ce chapitre présente des travaux effectués dans le cadre d'une collaboration initiée par Pedro Real, suite à une invitation de sa part au sein de son groupe de recherche en décembre 2004. Lui et les chercheurs de son équipe nommée CATAM (pour *Computational Algebraic Topology and Applied Mathematics*, Département de Mathématiques Appliquées, Ecole Technique Supérieure d'Ingénieurs en Informatique de l'Université de Séville) œuvrent à combiner des représentations algébriques avec des algorithmes liés à la modélisation géométrique, dans le but de construire des outils alternatifs pour l'analyse d'objets discrets, en particulier dans un cadre topologique.

J'ai eu l'opportunité de contribuer aux travaux de son équipe, notamment en collaborant avec trois de ses doctorants (Helena Molina-Abril, Ana Pacheco et Javier Carnero) et en y associant un étudiant de master en 2008 (Nicolas Jesson).

Pour formaliser cette collaboration, un accord-cadre de coopération bilatéral a été signé en 2005 entre l'Université de la Méditerranée et l'Université de Séville, ainsi qu'un accord Erasmus qui permet l'échange d'un à deux étudiants par an en moyenne.

2.1.2 Problématique

Les volumes numériques sont la transposition en 3D des images numériques en 2D. Les images sont composées de *pixels* (pour *picture elements*), et leurs extensions en 3D sont appelées les *voxels* (pour *volume elements*). Les volumes numériques sont utilisés dans de nombreux domaines comme structures de données de base. En informatique graphique ou en géométrie discrète, les volumes numériques proviennent essentiellement de systèmes d'imagerie médicale qui produisent de manière

native des piles 3D d'images (IRM ou scanner par exemple). On les trouve également dans d'autres disciplines, comme en sismique géologique, où les cubes de données voxelisées correspondent à des acquisitions du sous-sol.

Extraire des informations sur un objet représenté sous la forme d'un volume numérique binaire consiste généralement à étudier ses propriétés géométriques transposées au monde discret, l'élément de base sur lequel on travaille étant le voxel. Cette caractérisation géométrique peut être parfois complétée par une étude de la topologie de l'objet, dans le but d'obtenir des informations d'un autre type, par exemple le nombre de trous ou nombre de composantes connexes de l'objet. Ces indices peuvent être utilisés en reconnaissance des formes pour classifier, pour *ranger* l'objet selon des familles différentes que celles établies sur des critères purement géométriques.

La topologie d'un objet volumique discret V peut être étudiée principalement de deux manières. La première consiste à travailler directement avec la représentation discrète V et à en calculer des caractéristiques par des méthodes n'agissant que sur les voxels de l'objet. Ces attributs sont généralement des transpositions de notions topologiques continues vers l'espace discret [1, 2, 3, 4]. La seconde famille d'approches consiste à considérer une entité structurée qui soit topologiquement équivalente à V (on parle d'analogue *continu, cellulaire, simplicial, simploidal*, etc.) pour en extraire des informations topologiques avec des approches spécifiques [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Ces techniques sont utilisées dans la théorie des *AT-modèles* (modèles algébro-topologiques) de volumes numériques développée dans [12, 13] (voir section 2.6).

Pour pouvoir travailler sur des structures adaptées à la deuxième famille d'approches, celles qui sont développées dans l'équipe CATAM, notre travail a été d'intégrer des méthodes issues de la modélisation géométrique pour passer d'une représentation discrète (des volumes numériques binaires ou bien des *arbres octaux*) à une représentation *simpliciale*.

Ce chapitre se compose de cinq sections principales. Les éléments de base sont brièvement décrits dans la section 2.2, notamment la notion de complexe simplicial que nous utilisons, ainsi que les différentes adjacences dans l'espace discret. La section 2.3 présente un aperçu des travaux connexes. La section 2.4 est consacrée à l'étude de deux algorithmes de *simplicialisation* d'un volume numérique binaire. Le premier s'appuie sur une tétraédrisation de type Delaunay, suivie d'un post-traitement qui permet de retrouver la topologie initiale. La seconde approche repose sur une construction incrémentale du complexe simplicial par un ajout d'arêtes lorsque cela est possible, en veillant à ne pas produire de dégénérescences. La section 2.5 traite de l'extension des algorithmes vus précédemment non plus pour les volumes binaires, mais pour les arbres octaux (ou *octrees*). Nous détaillons l'intérêt d'utiliser de tels résultats dans le domaine de la topologie algébrique et nous présentons les travaux en cours et à venir dans la section 2.6.

2.2 Éléments de base

2.2.1 Les complexes simpliciaux

Les deux types d'entités manipulées tout au long de ce chapitre sont les volumes numériques binaires et les complexes simpliciaux. Ce qui suit est un bref rappel des définitions de ces éléments de base (se référer aux ouvrages [14, 15, 16, 17] pour plus de détails).

Un *volume numérique* V est un tableau parallélépipédique rectangle fini de points (que l'on ap-

pelle des *voxels*) à chacun desquels on associe une valeur dans \mathbb{Z} . Les coordonnées des voxels d'un volume numérique appartiennent donc à \mathbb{Z}^3 . On parle de volume numérique *binnaire* s'il n'existe que deux valeurs différentes dans V : 0 et 1. Les points à 1 représentent la forme discrète (l'*objet discret*), et les points à 0 représentent le complémentaire de la forme (ou fond de l'image).

Un *k-simplexe* est l'enveloppe convexe de $k + 1$ points linéairement indépendants, k étant la dimension de l'espace de travail. Les *k-simplexes* sont constitués d'un ensemble de faces, appelées *j-faces*, de dimensions comprises entre 0 et k . Chaque *k-simplexe* possède un nombre fini de *j-faces* qui constituent toutes des simplexes de dimensions inférieures ou égales à k (une *k-face* est le *k-simplexe* lui-même). On appelle *facette* une $(k - 1)$ -face d'un *k-simplexe*. Dans \mathbb{R}^3 , un 3-simplexe est un tétraèdre. Si l'on considère les simplexes de dimensions inférieures, ils peuvent être de quatre types : les sommets (0-simplexes), les arêtes (1-simplexes), les triangles (2-simplexes) et les tétraèdres (3-simplexes). La figure 2.1 illustre les *k-simplexes* de dimensions 0, 1, 2 et 3.

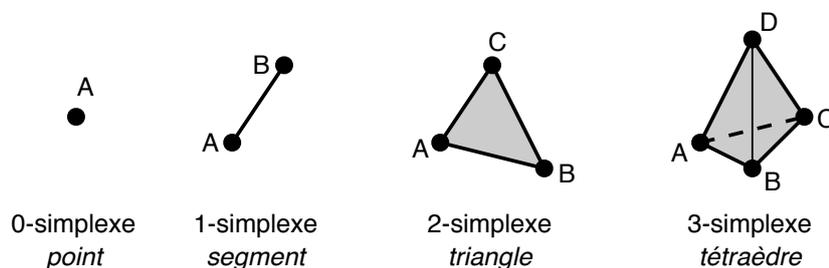


Figure 2.1. Les *k-simplexes* de dimensions 0, 1, 2 et 3.

Un *complexe simplicial* K est défini comme un ensemble de simplexes vérifiant la propriété suivante : deux simplexes de K ne s'intersectent pas du tout, ou bien s'intersectent selon un simplexe de dimension inférieure qui est leur partie commune de dimension maximale. La figure 2.2 présente en dimension 2 un complexe simplicial valide (à gauche) et un ensemble de simplexes qui ne remplit pas cette condition (à droite).



Figure 2.2. Deux ensembles de simplexes en 2D : un complexe (à gauche) et une entité non conforme (à droite).

Un complexe simplicial K constitué de simplexes de dimension maximale k est appelé *k-complexe*. On distingue deux types de *k-complexes* : les *k-complexes purs* pour lesquels à chaque *j-face* est associé un *k-simplexe*, les *k-complexes non purs* constitués de *j-faces* décrites par des *p-simplexes* de dimensions différentes avec $p \leq k$. Ainsi, un 3-complexe n'est constitué que de sommets, d'arêtes, de triangles et de tétraèdres (cf. figure 2.3).

D'autres notions liées aux complexes simpliciaux, telles que les *morphismes simpliciaux*, les complexes simpliciaux *abstrait*s, les *plongements* de complexes simpliciaux, sont développées dans [18].

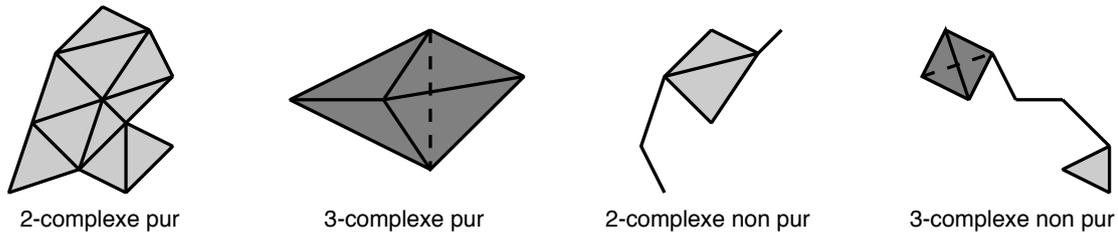


Figure 2.3. Exemples de complexes simpliciaux purs et non-purs.

2.2.2 Choix de la 26-adjacence

Les quatre relations d'adjacence les plus fréquentes dans les grilles cubiques volumiques sont la 6-adjacence (par face), la 18-adjacence (par face et par arêtes des voxels), la 26-adjacence (par face, par arêtes et par les coins des voxels), et la 14-adjacence. Cette dernière peut être considérée comme la transposition en 3D de la 6-adjacence en 2D. La figure 2.4 illustre ces quatre relations d'adjacence.

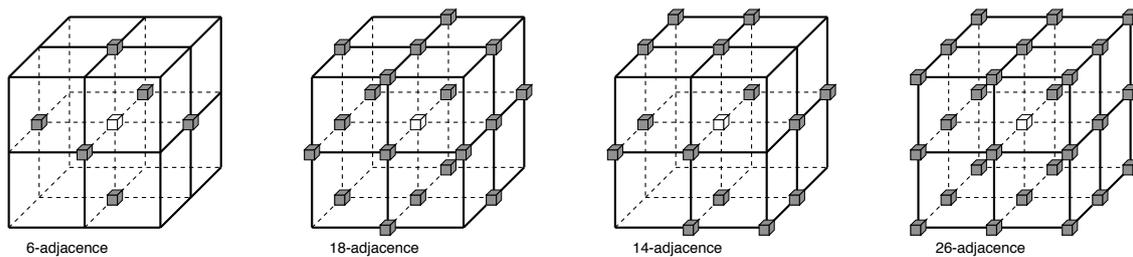


Figure 2.4. Quatre types d'adjacence dans \mathbb{Z}^3 : 6, 18, 14 et 26.

Lorsqu'il est question de tétraédriiser un volume numérique binaire, les 6-, 18- et 14-adjacences ne présentent aucune ambiguïté : en reliant tous les voxels voisins par une arête, les triangles sont construits comme les 3-cycles d'arêtes, et les tétraèdres sont les ensembles de 4 triangles mutuellement voisins (on parle de 4-coque ou de 4-hull). Il n'y a pas d'intersections d'arêtes à contrôler, de dégénérescences possibles. En revanche, la 26-adjacence est ambiguë car si l'on connecte tous les voxels qui sont voisins au sens de cette relation, alors les arêtes (qui matérialisent la relation de voisinage) peuvent s'intersecter et par conséquent, le complexe simplicial résultant s'en trouve dégénéré (voir figure 2.5). Ce problème n'existe que pour la 26-adjacence. Or il semble que cette dernière soit la plus intuitive et naturelle, et ce pour plusieurs raisons :

- Lorsque deux voxels sont en *contact*, ne serait-ce que par un de leurs coins, ils sont considérés comme *voisins*. Avec la 14-adjacence, seuls deux coins d'un voxel (sur les huit possibles) permettent de le connecter avec un autre voxel.
- Un bloc de voxels *visuellement compact* correspond bien à un complexe simplicial du même type en 26-adjacence, mais pas nécessairement en 14-adjacence : le complexe peut ne pas avoir le même nombre de composantes connexes, selon l'agencement des voxels (voir la figure 2.6 en bas).
- La 14-adjacence, tout comme la 6-adjacence en 2D, n'est pas invariante par des rotations élémentaires d'angle $\pi/2$, car il s'agit d'une relation de voisinage *directionnelle*, qui favorise une direction plutôt qu'une autre. Deux voxels voisins dans un cas ne le seront plus si l'on effectue une rotation de l'objet discret, ce qui n'est pas le cas pour des rotations élémentaires

(i.e. d'angle un multiple de $\pi/2$) avec les trois autres adjacences. La figure 2.6 illustre également ce phénomène : pour une rotation de $-\pi/2$, le bloc de voxel est caractérisé soit par une, soit par deux composantes connexes, alors que ce nombre est invariant avec la 26-adjacence (ainsi que le nombre de triangles et d'arêtes).

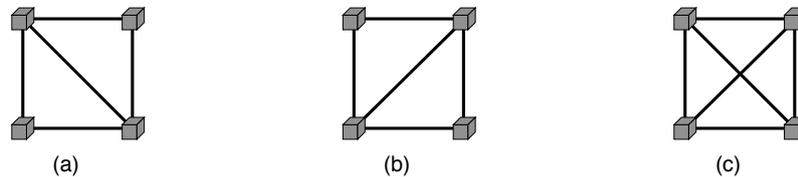


Figure 2.5. Pour quatre voxels mutuellement voisins, (a) et (b) présentent deux configurations équivalentes d'arêtes, mais (c) montre une configuration à éviter si l'on se contente de relier tous les voxels voisins entre eux.

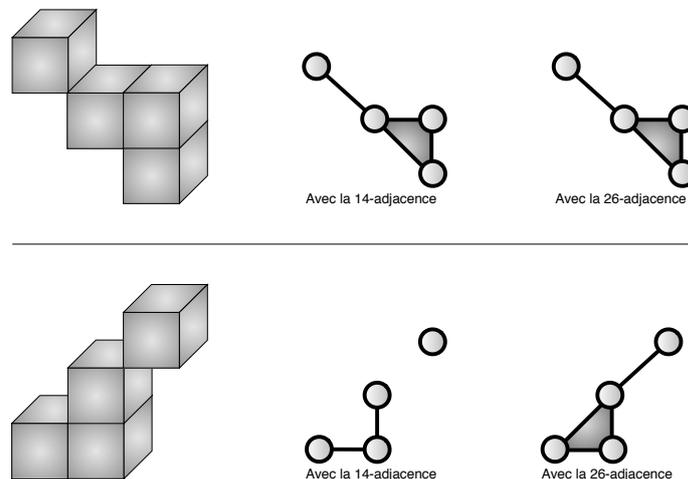


Figure 2.6. Inconvénient de la 14-adjacence : un volume plein et compact ne correspond pas au même complexe simplicial en 14-adjacence s'il subit une rotation. Dans un cas (en haut), il est composé d'une composante connexe (un triangle et une arête), et dans l'autre cas (en bas), il est composé de deux composantes (deux arêtes d'une part, et un sommet d'autre part).

Pour toutes ces raisons, notre choix se porte sur la mise en place de méthodes visant à construire des complexes simpliciaux spécifiquement pour la 26-adjacence.

2.3 Travaux connexes

Le problème de construction du complexe simplicial d'un volume numérique binaire ou d'un octree est proche mais différent de celui de la reconstruction de surfaces, pour lequel des solutions efficaces existent, comme le très classique algorithme des *Marching Cubes* [19] et ses dérivés, ou une approche plus récente et topologiquement stable élaborée par Kenmochi *et al.* [20]. Pour cette dernière, les auteurs s'appuient sur des motifs (des *patterns*) de triangulations pour obtenir une décomposition spatiale de toutes les 8-configurations possibles de voxels. Bien que l'objectif de

cette approche soit d'obtenir le *bord* d'un objet discret, un résultat partiel de l'algorithme est un complexe simplicial non-pur qui préserve la topologie de l'ensemble voxelisé initial.

Les autres techniques existantes sont plutôt orientées vers une tétraédrisation sans chercher à produire de complexes simpliciaux [21, 22, 23, 24] (se référer à [25] pour une étude détaillée sur les méthodes de maillage volumique). Par exemple, l'idée décrite dans [26] est adaptée à une visualisation rapide de volumes en passant par une tétraédrisation. Dans celle qui est développée dans [27], les auteurs exposent une technique prévenant les craquelures géométriques. L'approche présentée par Schroeder *et al.* [28] est intéressante d'un point de vue topologique : la technique proposée de tétraédrisation est robuste, peut être appliquée aux octrees et permet de décomposer le volume discret sans produire de dégénérescences telles que des jonctions en T (*T-junctions*). De plus, les auteurs s'appuient sur une tétraédrisation modifiée de Delaunay pour remplir de manière naturelle le volume par un ensemble tétraèdres.

Ainsi, outre l'approche de Kenmochi *et al.* qui procède par motifs et qui ne s'applique qu'aux volumes numériques binaires (et non au octrees), il n'existe pas dans la littérature d'autres techniques visant à produire des complexes simpliciaux non-purs, et donc pouvant préserver la topologie d'un objet discret (car des tétraèdres seuls ne permettent pas de la capturer). Dans ce chapitre, nous proposons trois approches d'extraction de complexes simpliciaux : deux algorithmes s'appliquant aux volumes binaires (le premier s'appuie sur une tétraédrisation de l'objet suivie d'une phase de suppression des structures non voulues – voir section 2.4.1 – et le second repose sur une méthode constructive incrémentale des simplexes – voir section 2.4.2 –) et une méthode dédiée aux arbres octaux (cf. section 2.5).

2.4 Du volume numérique binaire au complexe simplicial

2.4.1 Une première approche de conversion en complexe simplicial par décimation

Pour convertir un objet discret en complexe simplicial d'après la 26-adjacence, l'algorithme présenté dans cette section s'appuie sur la combinaison de deux étapes : une première de tétraédrisation, une seconde de nettoyage des tétraèdres en excès de manière à produire un complexe simplicial *non pur* (composé également de triangles, d'arêtes et de sommets) et à retrouver la topologie du volume numérique binaire initial.

2.4.1.1 Tétraédrisation de l'enveloppe convexe

En géométrie algorithmique, la tétraédrisation de Delaunay [29] pour un ensemble P de points de l'espace euclidien 3D est une tétraédrisation $DT(P)$ telle qu'aucun point de P n'est à l'intérieur de la sphère circonscrite d'un des tétraèdres de $DT(P)$. Les tétraédrisations de Delaunay maximisent le plus petit angle de l'ensemble des angles des triangles qui composent les tétraèdres, de manière à éviter les tétraèdres *allongés*.

La tétraédrisation de Delaunay existe et elle est unique si les points de l'ensemble P sont en *position générale*, c'est-à-dire si dans l'ensemble de points, on ne trouve pas quatre points qui soient coplanaires ou cinq points qui soient co-sphériques.

Lorsqu'il s'agit de produire un ensemble de tétraèdres à partir d'un ensemble de points de l'espace, il est fréquent de se tourner vers la tétraédrisation de Delaunay pour des critères évidents d'aspects des tétraèdres, mais également car les tétraèdres obtenus remplissent entièrement le volume délimité par l'enveloppe convexe des points en entrée. Ces tétraèdres forment une partition de l'enveloppe sans laisser aucun vide. Ils définissent un complexe simplicial de genre nul formé d'une composante connexe sans cavités, et ce quelle que soit la topologie du volume initial.

Bien qu'en théorie les tétraèdres ne puissent pas s'interpénétrer, en pratique et selon l'algorithme choisi pour produire une tétraédrisation de Delaunay, des dégénérescences du complexe en sortie peuvent apparaître. En particulier, la tétraédrisation de Delaunay devient inconsistante lorsqu'il s'agit de traiter des points coplanaires, comme ceux de la grille uniforme d'un volume numérique. En effet, dans notre cas spécifique, la condition de *position générale* est doublement enfreinte : étant donné que les points sont dans l'espace discret \mathbb{Z}^3 , ils sont tous coplanaires pour chaque coupe considérée. De même, les cas de co-sphéricité sont très fréquents car ils surviennent dès que 5 voxels sont mutuellement voisins (ces configurations ne sont pas rares dans un volume numérique).

La figure 2.7 illustre un tel échec du processus de tétraédrisation : on voit par transparence que des arêtes se coupent en leur milieu, sans que ce point appartienne à l'ensemble initial de sommets. Le complexe résultant est non valide et ses caractéristiques topologiques diffèrent de celles d'un complexe qui devrait être compact à cet endroit.

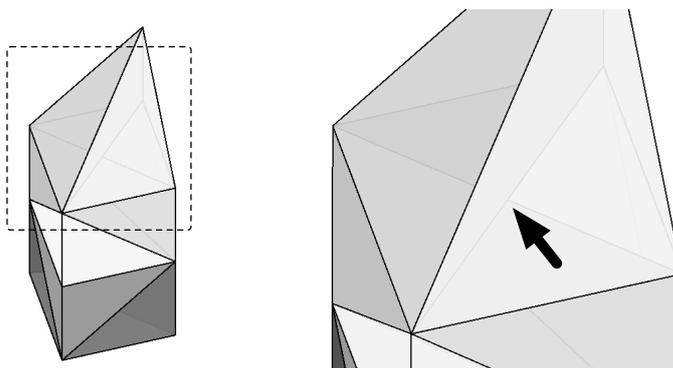


Figure 2.7. Exemple de complexe non valide généré avec un algorithme de tétraédrisation de Delaunay.

D'un point de vue de l'implémentation, le logiciel QHULL [30] échoue pour produire un ensemble valide de tétraèdres. Cet outil est un standard robuste et rapide pour le calcul en dimension quelconque d'enveloppes convexes, de tétraédrisations de Delaunay ou de diagrammes de Voronoï. Mais l'algorithme sous-jacent, dit du *QuickHull*, qui est de type incrémental, ne parvient pas à traiter les points en entrée, qui sont fortement en position *non générale*. La tétraédrisation de Delaunay résultante comporte de nombreux tétraèdres dégénérés ou qui s'interpénètrent, même en perturbant de manière randomisée les coordonnées des points dans le but d'éliminer les cas de coplanarité ou de co-sphéricité.

Pour supprimer ces dégénérescences et pour obtenir un complexe compact ne comportant pas de cavités aplaties (et de volume nul) qui induiraient une topologie non conforme à celle de l'objet discret initial, nous nous sommes tournés vers une approche efficace dédiée à la construction de *tétraédrisations régulières*. Il s'agit de tétraédrisations particulières qui prennent en entrée un nuage de points pondérés [31]. Si tous les poids sont identiques, alors la tétraédrisation régulière

correspond à la tétraédrisation de Delaunay. Le grand intérêt de cet algorithme élaboré par Edelsbrunner et Shah [32] réside dans le fait qu'aucune hypothèse n'est émise sur la position des points. L'approche s'appuie sur une technique de basculement topologique incrémental qui garantit de produire une tétraédrisation valide même si les points en entrée sont coplanaires ou co-sphériques. Cet algorithme est implémenté dans le programme REGTET [33, 34].

La tétraédrisation de Delaunay résultante n'est évidemment pas unique étant donné qu'il existe plusieurs manières de tétraédriser des configurations co-sphériques. Cela n'a pas d'importance dans la mesure où l'on cherche un complexe simplicial de topologie équivalente à celle de l'objet discret initial. Le complexe intermédiaire que l'on obtient en sortie de l'algorithme d'Edelsbrunner et Shah est un bon point de départ car il ne contient pas de tétraèdres plats, d'interpénétrations ou de croisements inconsistants d'arêtes. Cependant, la tétraédrisation de Delaunay produisant un ensemble convexe de tétraèdres, il est nécessaire de supprimer ceux qui sont indésirables pour retrouver la forme et la topologie de l'objet discret initial.

2.4.1.2 Post-traitement des simplexes

Sur la base du complexe intermédiaire convexe obtenu et pour que la topologie du complexe recherché soit équivalente à celle du volume numérique binaire de départ, il est nécessaire d'effectuer un post-traitement sur la tétraédrisation de Delaunay. En considérant que les voxels ont une taille de $1 \times 1 \times 1$, l'opération consiste à supprimer les triangles et les tétraèdres dont les arêtes ont une longueur supérieure à $\sqrt{3}$. Cette valeur est en effet appropriée aux grilles cubiques : si deux voxels sont distants d'une unité, c'est qu'ils sont 6-adjacents dans le volume numérique ; s'ils sont distants de $\sqrt{2}$, alors ils sont 18-adjacents ; et s'ils sont séparés par une distance de $\sqrt{3}$, ils sont 26-adjacents. Les arêtes qui sont plus longues doivent donc être supprimées pour préserver la topologie induite par la 26-adjacence.

2.4.1.3 Algorithme

On appelle V_{ert} l'ensemble initial de sommets, et T_{etra} l'ensemble de tétraèdres issus en sortie de la tétraédrisation de Delaunay. On remarque que tous les sommets de V_{ert} sont utilisés par les tétraèdres de T_{etra} (aucun n'est *orphelin* car il s'agit d'une tétraédrisation de *tous* les sommets) et aucun tétraèdre n'est plat ou dégénéré (grâce à l'utilisation de l'algorithme d'Edelsbrunner et Shah). Soit T_{ri} l'ensemble des triangles qui constituent tous les éléments de T_{etra} , et soit E_{dg} l'ensemble des arêtes qui définissent à la fois les triangles de T_{ri} et les tétraèdres de T_{etra} . Mises sous la forme de listes de pointeurs, les structures V_{ert} , E_{dg} , T_{ri} et T_{etra} peuvent être décrites comme sur la figure 2.8.

L'idée consiste à supprimer toutes les arêtes de longueur supérieure à $\sqrt{3}$, puis à répercuter les modifications sur les triangles et les tétraèdres associés pour rétablir la consistance du complexe simplicial. Par exemple, un long tétraèdre composé de trois arêtes longues et de trois arêtes courtes verra les longues supprimées (et les trois triangles associés également), ce qui laissera les courtes former le quatrième triangle restant (voir figure 2.9 en haut). Si un triangle comporte deux longues arêtes, la suppression donnera une arête orpheline et un sommet orphelin (voir figure 2.9 en bas).

L'entité obtenue est un 3-complexe simplicial composé de tétraèdres (ceux dont les arêtes sont *courtes*, c'est-à-dire de longueur inférieure ou égale à $\sqrt{3}$), de triangles (les résidus des tétraèdres inconsistants), d'arêtes (les résidus des triangles inconsistants) et parfois de sommets (lorsqu'une arête est trop longue et que ses triangles ou tétraèdres associés sont effacés mais qu'un ou deux sommets subsistent).

L'algorithme 2.1 est divisé en 7 étapes : à partir de la liste de sommets V_{ert} (les voxels du volume

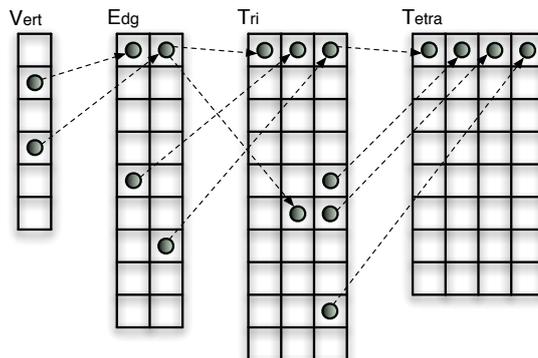


Figure 2.8. Liens entre l'ensemble des sommets V_{ert} , des arêtes E_{dg} , des triangles T_{ri} et des tétraèdres T_{etra} .

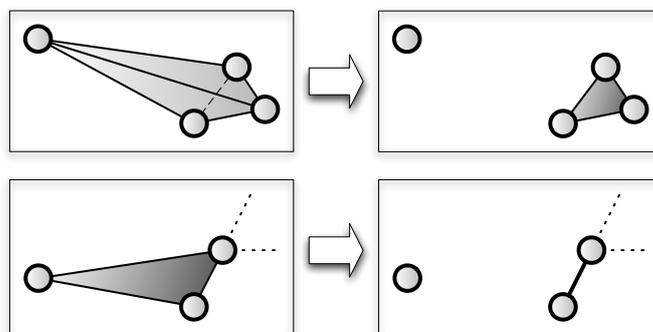


Figure 2.9. Deux exemples de suppression d'arêtes. Dans un tétraèdre, il reste un triangle (en haut). Dans un triangle, il reste une arête (en bas).

numérique binaire), l'ensemble de tétraèdres T_{etra} est construit en utilisant la méthode de tétraédri-
sation régulière de Delaunay par basculement topologique incrémental (étape 1). Les arêtes E_{dg} et
les triangles T_{ri} sont ensuite déduits de l'ensemble des tétraèdres (étape 2). Trois nouvelles listes
 \widetilde{V}_{ert} , \widetilde{E}_{dg} et \widetilde{T}_{ri} sont initialisées : elles contiendront les éléments *orphelins* du complexe simplicial,
c'est-à-dire ceux qui n'appartiennent pas à un simplexe d'ordre supérieur (étape 3). Toutes les arêtes
de E_{dg} de longueur supérieure à $\sqrt{3}$ sont supprimées, de même que les triangles et les tétraèdres
y étant associés (étape 4). A ce stade, T_{etra} est l'ensemble des tétraèdres restants, et il constitue un
3-complexe *pur*, faisant partie de la structure finale. A la fin de la construction du complexe simpli-
cial (que l'on nomme K), les ensembles de sommets, d'arêtes et de triangles orphelins sont calculés
(étapes 5, 6 et 7). Par exemple, \widetilde{E}_{dg} est le sous-ensemble des arêtes dans E_{dg} qui ne font plus partie
des triangles de T_{ri} : suite à la suppression d'arêtes, quelques triangles effacés comportent des
arêtes *courtes* qui doivent figurer dans le complexe final. Ainsi \widetilde{V}_{ert} est un 0-complexe *pur*, \widetilde{E}_{dg} est
un 1-complexe *pur* et \widetilde{T}_{ri} est un 2-complexe *pur*. L'union des 0-, 1-, 2- et 3-complexes constitue le
3-complexe simplicial final *non pur*, qui est topologiquement équivalent d'après la 26-adjacence à
l'objet discret voxelisé initial.

```

ENTREE : Liste  $V_{ert}$  de sommets (les voxels du volume numérique en jeu)
(1) Calcul de  $T_{etra}$  à partir de  $V_{ert}$  par tétraédrisation régulière
(2) Extraction des listes de triangles  $T_{ri}$  et d'arêtes  $E_{dg}$  à partir de  $T_{etra}$ 
(3) Initialisation des listes vides pour le complexe simplicial à construire :
 $\widetilde{V}_{ert} \leftarrow \emptyset$  ,  $\widetilde{E}_{dg} \leftarrow \emptyset$  ,  $\widetilde{T}_{ri} \leftarrow \emptyset$ 
(4) Pour toutes les arêtes  $i$  dans  $E_{dg}$ 
    Si  $E_{dg}(i) > \sqrt{3}$  alors
        • Supprimer tous les triangles associés dans  $T_{ri}$ 
        • Supprimer tous les tétraèdres associés dans  $T_{etra}$ 
        • Supprimer  $E_{dg}(i)$ 
(5) Calcul des sommets orphelins : les points de  $V_{ert}$  qui ne sont pas dans  $E_{dg}$ 
    sont ajoutés à  $\widetilde{V}_{ert}$ 
(6) Calcul des arêtes orphelines : les arêtes de  $E_{dg}$  qui ne sont pas dans  $T_{ri}$ 
    sont ajoutées à  $\widetilde{E}_{dg}$ 
(7) Calcul des triangles orphelins : les triangles de  $T_{ri}$  qui ne sont pas dans
 $T_{etra}$  sont ajoutés à  $\widetilde{T}_{ri}$ 
SORTIE : Complexe simplicial  $K \leftarrow \widetilde{V}_{ert} \cup \widetilde{E}_{dg} \cup \widetilde{T}_{ri} \cup T_{etra}$ 

```

Algorithme 2.1. Calcul du complexe simplicial associé à un volume numérique binaire.

2.4.1.4 Validation et exemples

Nous avons testé cet algorithme sur trois objets simples et à basse résolution : un cheval, un lapin et une bouée. La topologie des deux premiers objets est simple car ils ne présentent ni trous, ni cavités. Le troisième objet (la bouée) est un volume qui comporte un trou. Les nombres initiaux de voxels sont respectivement 164, 129 et 335. La tétraédrisation régulière produit respectivement 791, 565 et 1707 tétraèdres qui pavent les enveloppes convexes.

A titre d'exemple, le 3-complexe obtenu pour le cheval est composé d'un sommet orphelin (car un voxel de la patte arrière droite est séparé du reste du volume et crée une seconde composante connexe), 12 arêtes, 1 triangle et 448 tétraèdres.

La figure 2.10 présente les complexes simpliciaux obtenus, ainsi que des détails du cheval.

On peut remarquer que les tétraèdres longs et fins produits par la tétraédrisation de Delaunay ne font pas partie des 3-complexes finaux. En revanche, les arêtes et les triangles dont les tailles sont compatibles sont conservés. Cela conduit à des structures de topologies équivalentes aux blocs de voxels initiaux. Un simple ensemble de tétraèdres ne pourrait pas permettre une telle caractérisation de la topologie lorsque des arêtes ou des triangles sont nécessaires : l'utilisation exclusive de tétraèdres pourrait en effet connecter des parties qui ne devraient pas l'être, en considérant que l'on travaille dans une grille cubique uniforme et d'après la 26-adjacence.

2.4.2 Une approche de simplicialisation incrémentale constructive

L'approche présentée précédemment s'appuie sur une tétraédrisation préalablement calculée, puis comporte ensuite une phase de décimation des tétraèdres non souhaités. Au fur et à mesure que les tétraèdres sont supprimés, des listes de triangles, d'arêtes et de sommets sont construites.

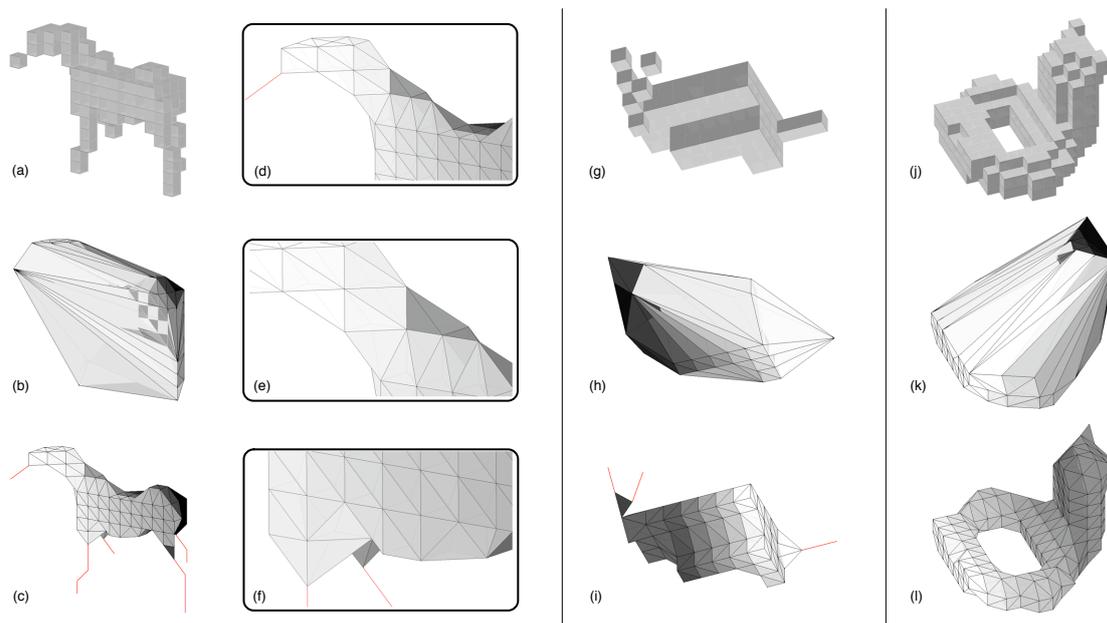


Figure 2.10. Trois exemples de complexes simpliciaux obtenus pour un cheval, un lapin et une bouée. Volumes numériques binaires (a, g, j), tétraédrisation des enveloppes convexes (b, h, k) et complexes résultants (c, i, l). Détails du complexe du cheval (d, e, f).

Dans la méthode proposée dans cette section, nous procédons à l'envers : au début de l'algorithme, le complexe simplicial est vide. Chaque voxel du volume binaire est ensuite traité et ajouté à la structure, et seules les arêtes qui ne perturbent pas la topologie sont ajoutées au complexe simplicial. De même pour les triangles et les tétraèdres. Tous ces éléments sont ajoutés au fur et à mesure à la structure simpliciale résultante. En ce sens, il s'agit d'une approche de *simplicialisation incrémentale constructive*.

2.4.2.1 Intersections entre arêtes

Les voxels sont parcourus un par un. Pour chaque voxel, on ajoute un sommet au complexe simplicial et on regarde dans son voisinage les sommets qui y figurent déjà. Pour chaque voisin du sommet en jeu, une arête est ajoutée seulement si elle ne croise aucune arête ne figurant déjà dans la structure. Seuls deux cas sont possibles dans une 8-configuration de voxels (à la rotation d'angle $\pi/2$ ou π dans les trois axes et à la symétrie près). La figure 2.11 à gauche et au centre illustre les deux configurations qui engendrent une intersection entre deux arêtes.

Pour la configuration C1, il est question d'ajouter l'arête AD (en bleu) à la structure simpliciale. Dans la grille discrète, seule l'arête BC (en pointillés rouges) peut la couper. Si BC existe déjà, alors AD n'est pas ajoutée.

Pour la configuration C2, il s'agit à présent de l'arête AH (en bleu). Les seules arêtes qui peuvent l'intersecter sont BG , CF et DE (en pointillés rouges). L'existence dans la structure de ces trois arêtes doit être vérifiée avant d'ajouter l'arête AH .

2.4.2.2 Intersections arête-triangle

Suite à ce premier test, un second est effectué pour vérifier si l'arête en jeu ne coupe pas un triangle déjà existant dans la structure. Il n'y a qu'une configuration d'intersection possible (voir la

figure 2.11 à droite).

Pour cette configuration C3, il est question d'ajouter l'arête AH (en bleu). Seuls les triangles BCE et DFG (en pointillés rouges) peuvent l'intersecter. Si l'un d'entre eux est déjà présent dans la structure, alors l'arête AH ne peut pas être ajoutée.

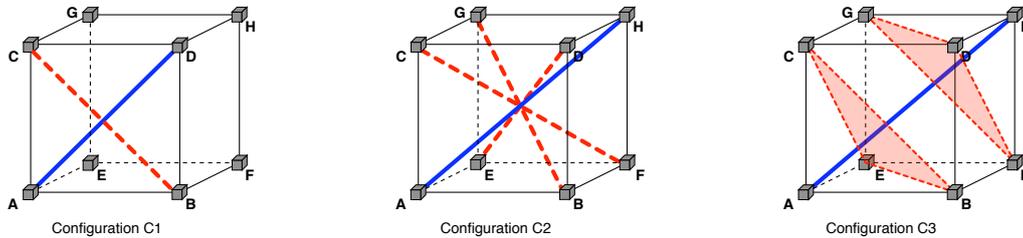


Figure 2.11. Les trois configurations possibles pour la détection des intersections.

Cette approche constructive a été appliquée dans le cadre de la simplicialisation d'arbres octaux, et les résultats obtenus sont présentés dans la section suivante.

2.5 Simplicialisation d'un arbre octal

2.5.1 Motivations

Avant de monter d'une dimension et de transposer les algorithmes vus précédemment en 4D, et éventuellement en nD si une généralisation est possible, nous nous sommes intéressés à la simplicialisation d'un mode de représentation classique des volumes numériques : les *arbres octaux* (ou *octrees*). Un octree [35] est l'extension en 3D des *quadrees* en 2D, un formalisme compact et récursif pour la représentation des images.

La méthode proposée dans cette section fait usage des approches de simplicialisation vues précédemment, l'intérêt étant qu'elle ne traite pas *tous* les voxels qui composent l'octree en jeu. Seul un sous-ensemble pertinent de ces voxels est simplicialisé.

2.5.2 Voisinage dans un arbre octal

Par analogie à \mathbb{Z}^3 , où deux voxels sont 26-adjacents lorsqu'ils sont en contact par une face, une arête ou un sommet, le voisinage généralisé dans un octree, que l'on appelle ω -voisinage, correspond au même critère de connectivité. On dira que deux octants o_1 et o_2 , de tailles respectives t_{o_1} et t_{o_2} , sont voisins s'ils sont en contact par une portion de face ou d'arête, ou par un sommet. La taille d'un octant est la longueur de ses arêtes. Ainsi, l'octant le plus petit (c'est-à-dire le voxel de \mathbb{Z}^3) qui correspond aux feuilles de l'arbre octal, est de taille 1.

En considérant que les coordonnées (x_o, y_o, z_o) de chaque octant o sont les coordonnées du sommet le plus proche de l'origine du repère, on peut formaliser la relation de ω -voisinage.

Soit o_1 et o_2 deux octants d'un arbre octal Ω , et soit t_{o_1} et t_{o_2} leurs tailles respectives (on suppose que les deux octants ne sont pas confondus).

$$\text{On pose } \begin{cases} \Delta x = x_{o_1} - x_{o_2} \\ \Delta y = y_{o_1} - y_{o_2} \\ \Delta z = z_{o_1} - z_{o_2} \end{cases} \text{ si } t_{o_1} \leq t_{o_2}, \begin{cases} \Delta x = x_{o_2} - x_{o_1} \\ \Delta y = y_{o_2} - y_{o_1} \\ \Delta z = z_{o_2} - z_{o_1} \end{cases} \text{ sinon.}$$

$$\text{Si } \begin{cases} -t_{o_1} \leq \Delta x \leq t_{o_2} \\ -t_{o_1} \leq \Delta y \leq t_{o_2} \\ -t_{o_1} \leq \Delta z \leq t_{o_2} \end{cases} \text{ alors les octants } o_1 \text{ et } o_2 \text{ sont } \omega\text{-voisins.}$$

La figure 2.12 montre quelques octants ω -adjacents et de tailles différentes d'un autre octant.

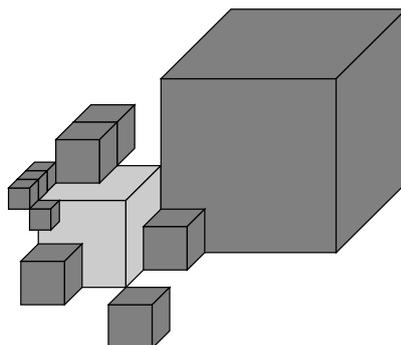


Figure 2.12. Un octant (en gris clair) et quelques uns de ses voisins de différentes tailles (en gris foncé).

2.5.3 Discussion sur trois approches

Dans le but d'obtenir un complexe simplicial depuis un arbre octal, plusieurs scénarios sont envisageables.

2.5.3.1 Méthode 1

L'octree Ω est converti en volume numérique V et un algorithme est appliqué à tous ses voxels pour obtenir un complexe simplicial $K(V)$ associé à V . Puis, tous les sommets de $K(V)$ qui sont dans les mêmes octants sont contractés en un seul sommet. Ce dernier est ainsi un représentant de l'octant en jeu. Toutes les arêtes dégénérées, les triangles et les tétraèdres sont supprimés, et les sommets multiples qui sont à la même position sont éliminés (suite à la contraction, de nombreuses entités simpliciales se trouvent écrasées en un point).

2.5.3.2 Méthode 2

L' ω -adjacence est utilisée pour créer un graphe de voisinage qui doit être simplifié après coup, pour supprimer les arêtes qui se croisent ou les triangles qui s'intersectent. Aucun passage par le volume numérique binaire associé n'est effectué, le processus est appliqué directement sur les octants.

Cette approche est difficile à mettre en œuvre car il s'agit de manipuler des « cubes » de différentes tailles, contrairement à un processus ne traitant que les voxels. Les positions des arêtes sont plus complexes à trouver dans un tel environnement discret « multi-tailles ». La suppression des arêtes ou des triangles en excès n'est pas triviale.

2.5.3.3 Méthode 3

Plutôt que de traiter tous les voxels comme dans la première méthode (alors qu'un grand nombre d'entre eux n'ont pas un réel intérêt) ou de s'appuyer sur l'octree seulement, un compromis peut être trouvé pour améliorer les performances et la pertinence de la méthode. Partant du constat que de nombreux voxels n'ont pas un rôle important car ils sont intérieurs aux octants et n'interviennent pas dans les relations de voisinage avec d'autres octants, il peut être intéressant de ne considérer que des voxels spécifiques. Seuls ceux qui sont sur le bord des octants et qui sont connectés à d'autres octants sont à prendre à compte (c'est-à-dire les voxels qui sont situés dans les zones d'adjacence des octants). Par conséquent, seules ces régions d'intérêt sont simplicialisées, puis les sommets sont contractés en fonction de leur appartenance aux octants.

Ces trois approches sont illustrées dans la figure 2.13. Nous avons choisi de développer la troisième approche (appelée A3), car elle peut s'appuyer sur des techniques existantes au niveau du voxel, et qu'elle repose sur le concept de *regroupement* (*clustering*) pour accélérer le processus.

2.5.4 Processus de simplicialisation

2.5.4.1 Vue d'ensemble

L'approche A3 se compose de cinq étapes. En partant d'une octree Ω , un sous-volume spécifique V_S est extrait (étape A3-1) et simplicialisé (étape A3-2). Les voxels sont regroupés d'après leur appartenance aux octants (étape A3-3) et les simplexes associés sont contractés (étape A3-4) et centrés (étape A3-5). Il en résulte un complexe simplicial $K(\Omega)$ topologiquement équivalent à l'octree Ω .

2.5.4.2 Les étapes de l'algorithme

Les différentes étapes sont illustrées dans la colonne de droite de la figure 2.13.

Calcul du sous-volume adjacent

Pour diminuer le nombre de voxels à traiter, un sous-volume numérique V_S est obtenu d'après le critère suivant. Un voxel v appartient à V_S si les deux conditions sont remplies (étape A3-1) :

- v est l'un des voxels du bord d'un octant ω ,
- il existe au moins un octant adjacent à ω , et cet octant est connecté par v .

Simplicialisation du sous-volume

La deuxième étape consiste à simplicialiser les *voxels d'intérêt* du sous-ensemble V_S (étape A3-2). L'une ou l'autre des techniques détaillées dans les sections 2.4.1 et 2.4.2 peut être employée. Nous avons choisi d'utiliser la seconde, celle qui repose sur une méthode incrémentale et constructive pour produire un complexe simplicial depuis un volume binaire.

Regroupement par correspondance d'après les octants relatifs et contractions de simplexes

Tous les voxels qui appartiennent au même octant sont marqués avec un identificateur unique (étape A3-3). Ils sont ensuite contractés en un point, et toutes les arêtes, les triangles et les tétraèdres associés sont soit écrasés (si tous leurs sommets ont le même identificateur), soit étirés (si certains de leurs sommets ne sont pas dans l'octant en jeu, cf. étape A3-4).

Une dernière phase de nettoyage permet de supprimer tous les points multiples qui sont aux

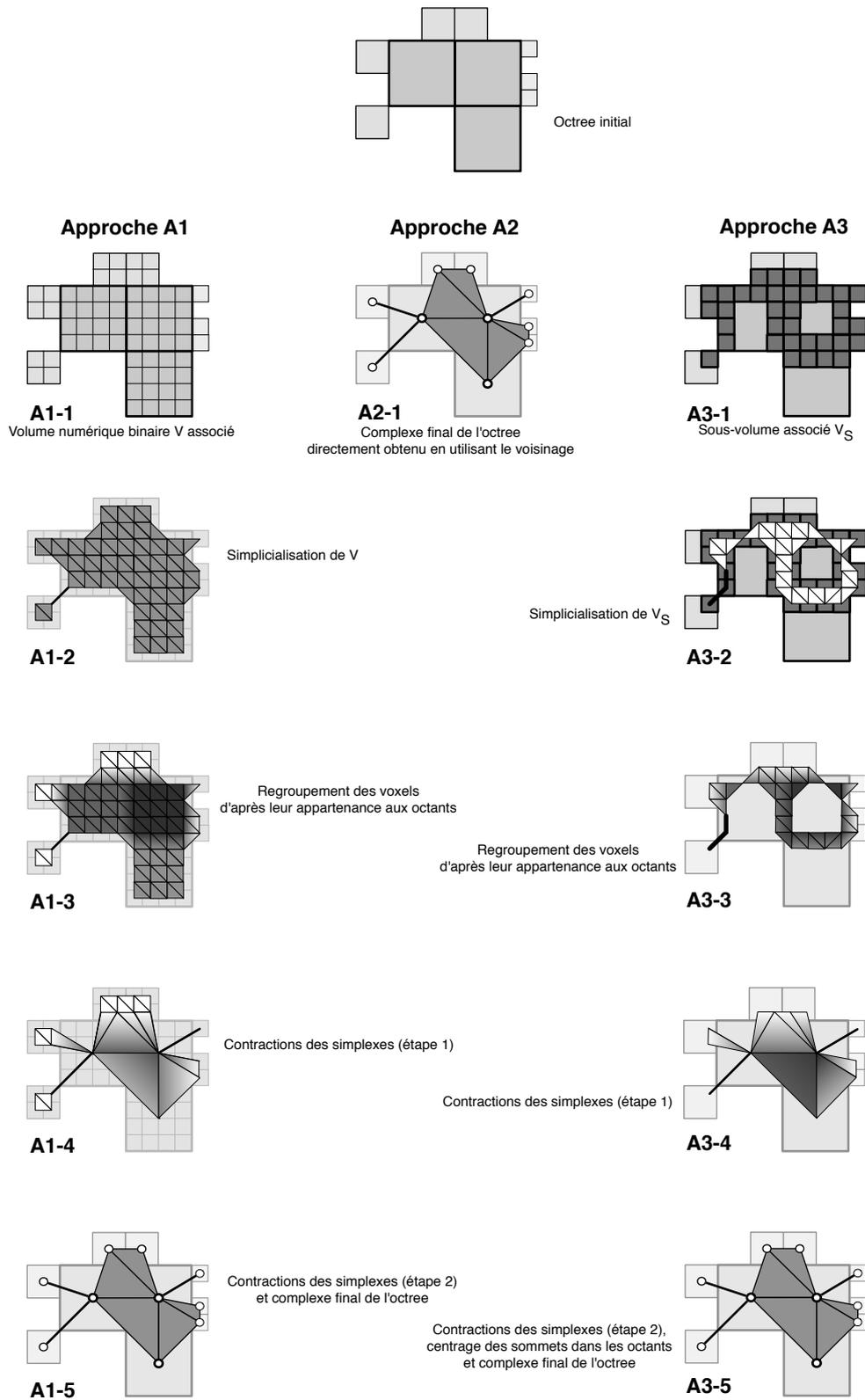


Figure 2.13. Trois approches pour simplicialiser un arbre octal.

mêmes positions. Par conséquent, le complexe simplicial final (étape A3-5) ne contient pas de simplexes dupliqués ou dégénérés.

2.5.5 Résultats

La figure 2.14 montre les résultats pour quatre exemples d'octrees : une forme simple en L (*L-shape*) composée de 9 octants, un cube (225 octants), et un cheval en deux résolutions différentes (122 octants dans une grille 16^3 et 3344 octants dans une grille 64^3). Les performances obtenues sur un Athlon 2600XP+ avec 1.5 Go RAM et sous Linux Ubuntu 7.1 sont présentées dans le tableau 2.1.

On peut remarquer que lorsque la résolution n'est pas trop basse (sinon les nombres de voxels et d'octants sont quasiment les mêmes, comme pour le cheval 16), le fait de ne considérer qu'un sous-volume d'intérêt aux zones d'adjacence permet de diminuer fortement le nombre de sommets à simplicialiser. Seuls les simplexes calculés sur la base de ces voxels sont représentés dans la deuxième colonne de la figure 2.14.

L-shape					
	4 608 vox.	28 574 edg.	46 254 tri.	22 287 tetras	4.6 s
V_S	604 vox.	6 803 edg.	9 564 tri.	4 148 tetras	0.6 s
Contraction	9 oct.	21 edg.	19 tri.	6 tetras	< 0.01 s
Cube					
	4 913 vox.	31 024 edg.	50 688 tri.	24 576 tetras	4.9 s
V_S	1 388 vox.	3 221 edg.	4 773 tri.	2 154 tetras	1.4 s
Contraction	225 oct.	908 edg.	1 116 tri.	402 tetras	< 0.1 s
Cheval 16					
$V = V_S$	164 vox.	730 edg.	1 016 tri.	448 tetras	0.2 s
Contraction	122 oct.	451 edg.	551 tri.	213 tetras	< 0.01 s
Cheval 64					
	10 974 vox.	69 576 edg.	113 838 tri.	55 236 tetras	10 s
V_S	9 978 vox.	60 915 edg.	97 071 tri.	46 094 tetras	9 s
Contraction	3 344 oct.	16 548 edg.	23 043 tri.	9 178 tetras	2 s

Table 2.1. Performances obtenues pour les quatre objets de la figure 2.14.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre consacré à l'extraction de complexes simpliciaux à partir d'objets discrets, nous avons présenté deux algorithmes qui s'appliquent aux volumes numériques binaires, et une approche qui s'appuie sur ces algorithmes pour simplicialiser des arbres octaux. La relation de voisinage considérée est la 26-adjacence dans la mesure où elle semble plus naturelle que les trois autres que l'on peut trouver dans la littérature, mais elle est ambiguë car elle génère trop d'arêtes liées à la connectivité des voxels (ou des octants) entre eux.

Les deux premières méthodes proposées dans la section 2.4 se fondent soit sur la décimation d'une tétraédrisation non dégénérée préalablement calculée, soit sur la construction arête par arête d'un complexe simplicial valide, et de ce fait elles constituent toutes deux une alternative à l'approche *par motifs* de Kenmochi *et al.* [20] (cf. section 2.3). Le troisième algorithme, dédié aux octrees et développé dans la section 2.5, permet d'obtenir un complexe simplicial conforme à l'objet initial en ne traitant qu'un sous-ensemble de *voxels d'intérêt*.

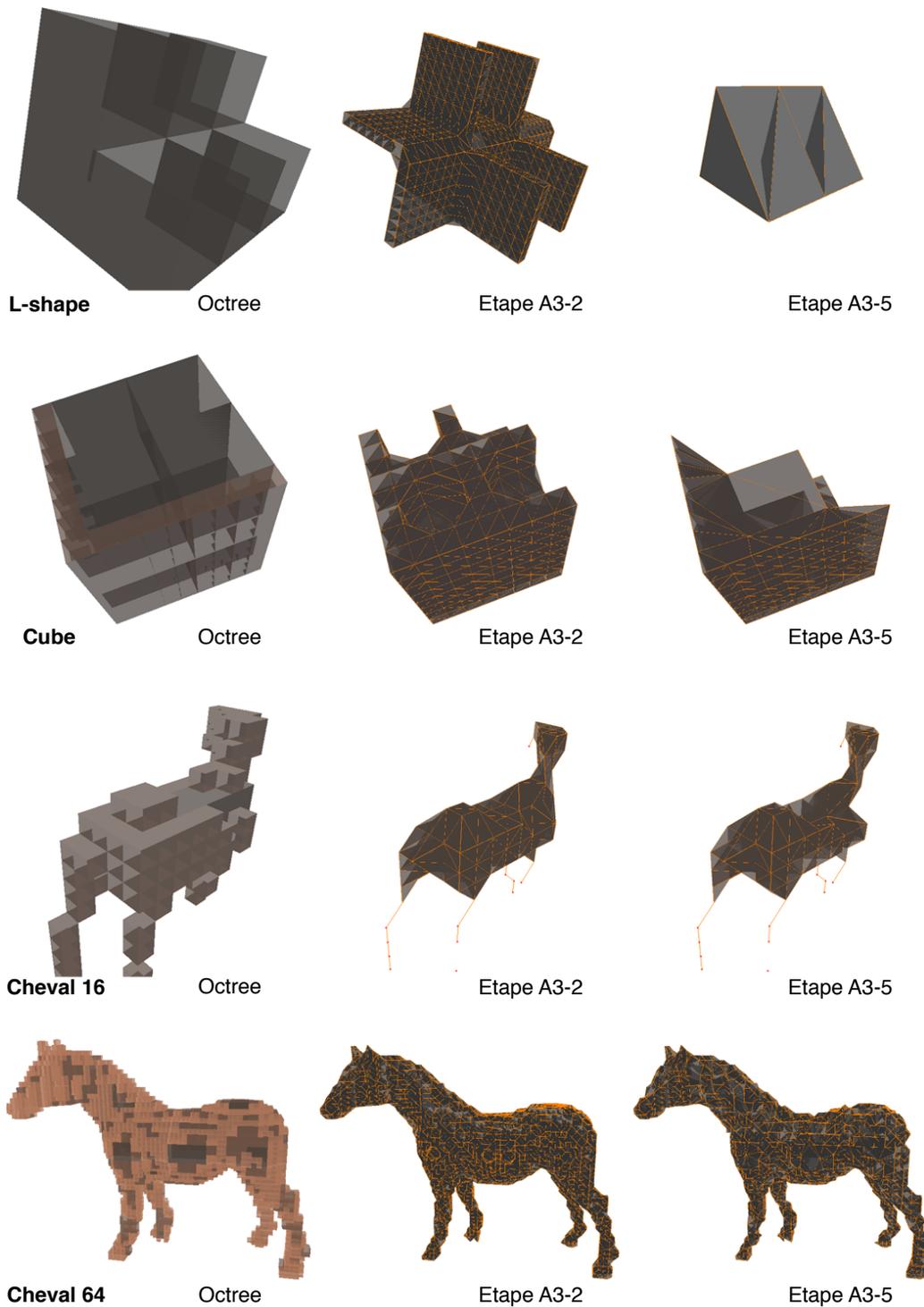


Figure 2.14. Complexes simpliciaux obtenus pour quatre objets représentés sous la forme d'octrees.

L'obtention d'un complexe simplicial est une étape incontournable, et l'intérêt des approches vues dans ce chapitre réside dans l'utilisation de techniques de topologie algébrique, qui permettent d'améliorer sensiblement la précision topologique obtenue par des algorithmes traditionnels opérant

sur les voxels. En effet, les *AT-modèles* permettent d'accéder à des informations liées à la *cohomologie* d'un objet, ce qui enrichit ainsi le nombre d'invariants topologiques utilisés habituellement : les nombres de Betti ou la caractéristique d'Euler (voir [36, 37] pour une étude du sujet). Par conséquent, la question de la construction de complexes simpliciaux associés à des volumes numériques binaires (ou à des octrees) est fondamentale, que ce soit en 3D, en 4D et plus généralement en nD , et quelle que soit la relation de voisinage discret considérée.

La théorie des *AT-modèles* [12, 13] permet de représenter un objet discret V par la combinaison d'un complexe simplicial $K(V)$ associé à V et d'une fonction particulière ϕ appelée *gradient d'homologie*. Schématiquement, un *AT-modèle* $(V, K(V), \phi)$ d'un volume binaire V donne accès à des outils algébro-topologiques spécifiques tels que les *opérateurs de bord*, de *contractibilité*, *intégraux*. Ces derniers peuvent être utilisés pour l'analyse topologique de l'objet, et plus particulièrement pour la classification topologique, l'amincissement de l'objet, l'extraction de squelette topologique et morphologique, la simplification de forme, la compression sans perte, etc. En termes algébro-homologiques, ϕ est un opérateur de chaîne d'homotopie qui connecte de manière algébrique $K(V)$ et son homologie $H(K(V))$ (voir [38]).

Cette structure « augmentée » permet à la fois de représenter la géométrie, mais aussi intrinsèquement de coder la topologie des objets discrets, contrairement aux modèles volumiques standards. De plus, l'extension en 4D (et plus généralement en nD) est plus naturelle en comparaison des approches orientées « voxels ».

La collaboration avec l'équipe CATAM de l'Université de Séville étant active, les perspectives font l'objet d'un intérêt particulier dans le chapitre 9 consacré à mon projet de recherche. Les travaux en cours et futurs spécifiques aux approches présentées dans ce chapitre s'articulent autour des points suivants :

- Une étude théorique de la complexité des algorithmes proposés doit être menée, ainsi qu'une comparaison effective des deux approches de simplicialisation (décimation d'une tétraédrisation non dégénérée et algorithme constructif incrémental) sachant que la première est dépendante d'une « boîte noire » (la méthode de tétraédrisation régulière d'Edelsbrunner et Shah [32]), ce qui n'est pas le cas de la seconde.
- Les méthodes présentées doivent être appliquées à des objets comportant un grand nombre de voxels. Le plus gros objet que nous avons traité est composé d'un peu moins de 11000 voxels et il est inscrit dans une grille 64^3 . Pour pouvoir manipuler des objets volumineux, typiquement des organes et des structures anatomiques issus d'imageurs médicaux, la taille des grilles doit au moins être de l'ordre de 512^3 .
- Dans le cadre de séquences volumiques, ces résultats doivent être étendus à la 4D dans un premier temps pour la construction de complexes simpliciaux relatifs à des volumes numériques dynamiques, puis aux objets de dimension quelconque. Par exemple, dans le cadre du premier algorithme proposé, le calcul de la tétraédrisation régulière est parfaitement transposable en nD , ainsi que les opérations de décimation des simplexes non voulus. Il faut pouvoir généraliser les approches présentées dans ce chapitre à la dimension 4, puis en dimension n par la suite.
- Une plateforme logicielle modulaire pour l'analyse topologique doit être consolidée. Un prototype appelé *Voxelo* ne fonctionnant qu'en 3D et ne prenant en compte que la 14-adjacence a été développé à l'Université de Séville. Un nouveau projet appelé *Doxelo* (pour *Dynamic Voxel*) est en gestation pour pouvoir à terme manipuler des objets simpliciaux nD . La vocation d'une telle plateforme est d'être modulaire, de manière à permettre à chacun d'implémenter ses algorithmes sous forme de *plugins* et de les comparer à ceux existants.

2.7 Bibliographie

- [1] A. ROSENFELD. “Digital topology”. In : *The American Mathematical Monthly* 86.8 (1979), pp. 621–630.
- [2] A. ROSENFELD. “Three-dimensional digital topology”. In : *Information and Control* 50 (1981), pp. 119–127.
- [3] T.Y. KONG et A. ROSENFELD. “Digital topology : introduction and survey”. In : *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 48.3 (1989), pp. 357–393.
- [4] P. K. SAHA, D.D. MAJUMDER et A. ROSENFELD. “Local topological parameters in a tetrahedral representation”. In : *Graphical Models and Image Processing* 60 (1998), pp. 423–436.
- [5] T.Y. KONG et W. ROSCOE. “Continuous analogs of axiomatized digital surfaces”. In : *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 29.1 (1985), pp. 60–86.
- [6] Pascal LIENHARDT. “Subdivisions of n-dimensional spaces and n-dimensional generalized maps”. In : *Proceedings of the 5th annual Symposium on Computational Geometry (SCG’89)*. ACM Press. Saarbrücken, Allemagne, juin 1989, pp. 228–236.
- [7] Pascal LIENHARDT. “Topological models for boundary representation : a comparison with n-dimensional generalized maps”. In : *Computer Aided Design* 23 (1 1991), pp. 59–82.
- [8] V. A. KOVALEVSKY. “Finite topology and image analysis”. In : *Advances in Electronics and Electron Physics* 84 (1992), pp. 197–259.
- [9] J.-O. LACHAUD et A. MONTANVERT. “Continuous analogs of digital boundaries : a topological approach to iso-surfaces”. In : *Graphical Models* 62 (2000), pp. 129–164.
- [10] Robin FORMAN. “A User’s Guide To Discrete Morse Theory”. In : *Séminaire Lotharingien de Combinatoire*. B48c. 2002, pp. 1–35.
- [11] S. PELTIER, S. ALAYRANGUES, L. FUCHS et J.-O. LACHAUD. “Computation of homology groups and generators”. In : *Computers and Graphics* 30 (2006), pp. 62–69.
- [12] R. GONZÁLEZ-DÍAZ et P. REAL. “Towards digital cohomology”. In : *11th IAPR International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2003*. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 2886. Naples, Italie : Springer, nov. 2003, pp. 92–101.
- [13] R. GONZÁLEZ-DÍAZ, B. MEDRANO, P. REAL et J. SÁNCHEZ-PELÁEZ. “Algebraic topological analysis of time-sequences of digital images”. In : *International Workshop on Computer Algebra in Scientific Computing, CASC 2005*. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 3718. Kalamata, Grèce : Springer, sept. 2005, pp. 208–219.
- [14] J.-M. CHASSERY et A. MONTANVERT. *Géométrie discrète en analyse d’images*. Hermès, 1991.
- [15] D. COEURJOLLY, A. MONTANVERT et J.-M. CHASSERY. *Géométrie discrète et images numériques*. Ouvrage collectif, Traité IC2. Hermès, 2007.
- [16] J. R. MUNKRES. *Elements of algebraic topology*. Addison Wesley, 1984.
- [17] Belén Medrano GARFIA. “Algebraic-topological model of representation of n-dimensional digital images”. Thèse de doctorat. Université de Séville, 2007.
- [18] Sara MERINO, Dobrina BOLTCHIEVA, Jean-Claude LÉON et Franck HÉTROUY. *Constructive Mayer-Vietoris Algorithm : Computing the Homology of Unions of Simplicial Complexes*. Rap. tech. INRIA n°7471, 2010.

- [19] W. E. LORENSEN et H. E. CLINE. “Marching cubes : A high resolution 3D surface construction algorithm”. In : *SIGGRAPH Computer Graphics* 21.4 (août 1987), pp. 163–169.
- [20] Y. KENMOCHI, A. IMIYA et A. ICHIKAWA. “Boundary Extraction of Discrete Objects”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 71.3 (1998), pp. 281–293.
- [21] T. K. DEY, C. L. BAJAJ et K. SUGIHARA. “On good triangulations in three dimensions”. In : *Proceedings of the First ACM Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications, SMA '91*. 1991, pp. 431–441.
- [22] M. BERN. “Compatible tetrahedrizations”. In : *Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Computational Geometry*. San Diego, California, USA, 1993, pp. 281–288.
- [23] H. T. TANAKA, Y. TAKAMA et H. WAKABAYASHI. “Accuracy-based sampling and reconstruction with adaptive grid for parallel hierarchical tetrahedrization”. In : *Volume Graphics* (2003), pp. 79–86.
- [24] B. CUTLER, J. DORSEY et L. McMILLAN. “Simplification and improvement of tetrahedral models for simulation”. In : *Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing 2004*. Juil. 2004, pp. 93–102.
- [25] P. ALLIEZ, D. COHEN-STEINER, M. YVINEC et M. DESBRUN. “Variational tetrahedral meshing”. In : *ACM Transactions on Graphics* 24.3 (2005), pp. 617–625.
- [26] A. J. CUADROS-VARGAS, L. G. NONATO, E. TEJADA et T. ERTL. “Generating segmented tetrahedral meshes from regular volume data for simulation and visualization applications”. In : *Proceedings of CompIMAGE'06*. 2006.
- [27] Y. ZHANG, C. BAJAJ et B. S. SOHN. “Adaptive and quality 3D meshing from imaging data”. In : *Proceedings of 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*. Seattle, WA, USA, juin 2003, pp. 286–291.
- [28] W. J. SCHROEDER, B. GEVECI et M. MALATERRE. “Compatible triangulations of spatial decompositions”. In : *IEEE Visualization 2004*. Austin, Texas, USA, oct. 2004, pp. 211–217.
- [29] B. DELAUNAY. “Sur la sphère vide”. In : *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk* 7 (1934), pp. 793–800.
- [30] C.B. BARBER, D.P. DOBKIN et H.T. HUHDANPAA. “The Quickhull algorithm for convex hulls”. In : *ACM Trans. on Mathematical Software* 22.4 (1996), pp. 469–483. URL : <http://www.qhull.org>.
- [31] C. LEE. “Regular triangulations of convex polytopes”. In : *Applied Geometry and Discrete Mathematics : The Victor Klee Festschrift* (1991). P. Gritzmann and B. Sturmfels (Eds), American Mathematical Society, pp. 443–456.
- [32] H. EDELSBRUNNER et N.R. SHAH. “Incremental topological flipping works for regular triangulations”. In : *Algorithmica* 15.3 (1996), pp. 223–241.
- [33] J. BERNAL. “Lexicographical manipulations for correctly computing regular tetrahedralizations with incremental topological flipping”. In : *NISTIR* 6335 (1999).
- [34] J. BERNAL. “REGTET : A program for computing regular tetrahedralizations”. In : *Lecture Notes in Computer Science* 2073 (2001), pp. 629–644. URL : http://math.nist.gov/~JBernal/JBernal_Sft.html.
- [35] D. MEAGHER. “Geometric modeling using octree encoding”. In : *IEEE Computer graphics and Image Processing* 19.2 (1982), pp. 129–147.

- [36] G. LOHMANN. *Volumetric image analysis*. Wiley et Teubner, 1988.
- [37] N. NIKOLAIDIS et I. PITAS. *3-D image processing algorithms*. Wiley et sons, 2001.
- [38] S. MACLANE. *Homology*. Classics in Mathematics, Springer, 1975.

2.8 Publications associées à ces travaux

- [39] Ana PACHECO, **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Determining bricks of 3–dimensional cell complexes”. In : *14th International Workshop in Combinatorial Image Analysis, IWCIA 2011*. Advances in Image Analysis and Applications (chapitre 4). Madrid, Espagne : ISBN 978-981-08-7923-5 Research Publishing Services, Reneta Barneva, Valentin E. Brimkov, Kostadin Koroutcheva et Elka Korutcheva (Eds.), mai 2011, pp. 37–48.
- [40] Ana PACHECO, **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Obtaining cell complexes associated to four dimensional digital objects”. In : *3rd International Workshop on Computational Topology in Image Context, CTIC 2010*. Chipiona, Espagne, nov. 2010, pp. 57–64.
- [41] Javier CARNERO, Daniel DÍAZ-PERNIL, **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Doxel : Towards a Software for Processing and Visualizing Topology Computations in Doxel-based 3D+t Images”. In : *16th International Conference on Applications of Computer Algebra, ACA’10*. Vlora, Albanie, juin 2010.
- [42] **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Simplicialization of Digital Volumes in 26-adjacency : Application to Topological Analysis”. In : *International Journal "Pattern Recognition and Image Analysis, Advances in Mathematical Theory and Applications" (PRIA) 19.2* (juin 2009). MAIK Nauka/Interperiodica, Pleiades Publishing Ltd., pp. 231–238.
- [43] **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Voxelo : a project for computing and visualizing geometric-topological features for nD digital images”. In : *CATIMAG’08, International Workshop on Computational Algebraic Topology within Image Context*. Conférence invitée. Séville, Espagne, nov. 2008.
- [44] Helena MOLINA-ABRIL, Pedro REAL, **Jean-Luc MARI** et Nicolas JESSON. “Algebraic Topological Models for Octrees”. In : *Algebraic Topological Methods in Computer Science 2008, ATMCS III (a satellite conference to the 5th European Congress of Mathematics)*. Paris, France, juil. 2008.
- [45] **Jean-Luc MARI**, Nicolas JESSON, Helena MOLINA-ABRIL et Pedro REAL. “Simplicialization of Octrees”. In : *International Workshop on Computational Topology in Image Context, CTIC 2008*. Poitiers, France, juin 2008.
- [46] Pedro REAL, Helena MOLINA-ABRIL et **Jean-Luc MARI**. “Simplicialization of Digital Volumes”. In : *First International Workshop on Image Mining, Theory and Applications (IMTA 2008) in conjunction with the 3rd International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2008)*. Funchal, Madeira, Portugal, jan. 2008.

CARACTÉRISATION DU VOLUME SOUS LA NAPPE PAR INDICES DE FORME 3D

Ce chapitre est une synthèse des publications référencées dans la section 3.6, et plus particulièrement des articles [22], [24] et [26].

3.1 Introduction

3.1.1 Contexte et motivations

Ce chapitre présente une partie des travaux effectués dans le cadre de la thèse de Guillaume Thibault, co-dirigée par Jean Sequeira et moi-même. Cette thèse a été financée par une allocation du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, et elle a permis de travailler avec l'équipe Génétique des Maladies Neuromusculaires de Nicolas Lévy (Unité INSERM 491 Génétique Médicale et Développement, Faculté de Médecine de Marseille, et Département de Génétique Médicale, Hôpital de la Timone, Marseille), en collaboration avec Pierre Cau (Unité INSERM 491 et Laboratoire de Biologie Cellulaire, Hôpital de la Conception, Marseille).

La problématique de cette thèse était de combiner des outils de reconnaissance des formes avec des méthodes de classement pour discriminer des noyaux de cellules en deux catégories (*sains* ou *pathologiques*), de manière à automatiser ce processus fastidieux effectué habituellement par des experts biologistes ou généticiens. La motivation de ce travail est relative à une maladie très rare : la *progeria*¹. Il s'agit d'une *laminopathie*, c'est-à-dire la conséquence d'un dysfonctionnement dans les protéines appelées *lamines*. Le plus souvent, la cause de ce trouble repose sur une mutation du gène LMNA codant pour des protéines dont le rôle est de structurer le noyau des cellules (les lamines A et C). La figure 3.1 montre deux exemples de noyaux de cellules : un sain (à gauche) et un noyau pathologique ayant un défaut de lamine A (à droite).

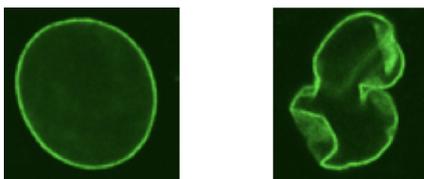


Figure 3.1. Un noyau sain (à gauche) et un noyau pathologique (à droite).

1. La *progeria*, ou *syndrome de Hutchinson-Gilford*, est une maladie génétique extrêmement rare affectant une naissance sur 4 à 8 millions et caractérisée par un vieillissement prématuré débutant dès la période néonatale.

Pour évaluer un protocole de soin sur un ensemble de cellules et juger de son efficacité, il est important de pouvoir dénombrer les noyaux pathologiques. Un patient sain possède environ 8% de noyaux pathologiques, ce pourcentage pouvant atteindre 80% chez un patient malade. Le calcul d'un pourcentage fiable pour un échantillon peut nécessiter plusieurs jours de travail à une personne. L'intérêt est donc grand à automatiser ce processus.

Pour discriminer un noyau de cellule, les experts s'appuient principalement sur deux critères : la forme et la texture. Plus un noyau aura une forme régulière, sans protubérances, plus sa texture sera homogène et plus grande sera la probabilité qu'il soit sain.

De ce fait, la thèse de Guillaume Thibault s'articule autour de ces deux points. Dans un premier temps, seule la forme est prise en compte pour caractériser et discriminer automatiquement les noyaux de cellules (section 3.2). Dans un second temps, l'étude de la texture permet d'affiner le diagnostic (section 3.3). Cette étude est effectuée d'une part sur la forme elle-même (en utilisant des estimateurs 2D) mais aussi sur le volume en élévation associé à la forme 2D, que l'on appelle *volume sous la nappe* et qui permet d'avoir accès à d'autres outils pour caractériser la texture, notamment des indices de forme 3D.

Ce chapitre est consacré principalement à la caractérisation de la texture des noyaux à partir du volume sous la nappe, le modèle géométrique sous-jacent étant alors un objet discret (un volume numérique binaire) dont il faut extraire de l'information. Pour ce faire, nous avons développé des indices de forme dédiés à la détection de *pics* et d'*abîmes* (qui correspondent respectivement à des *foci*² et des *trous* dans la texture des noyaux).

3.1.2 Les données

Les images des noyaux sont issues d'acquisitions avec un microscope à fluorescence. Le marqueur utilisé est le FITC, un *fluorochrome* qui permet de révéler en particulier la présence des lamines A et C.

Nous disposons d'un ensemble de 3300 noyaux extraits de 270 images provenant de sept patients différents. L'extraction et la segmentation des noyaux sont effectuées d'après le procédé suivant : conversion en niveaux de gris des images, lissage, seuillage par maximisation d'entropie, étiquetage des composantes connexes, élimination des petites composantes, bouchage des trous et séparation des composantes. Chaque composante ainsi obtenue correspond à un noyau de cellule.

3.1.3 Notion de classement

Effectuer un diagnostic automatique de noyaux de cellules consiste à construire une méthode (on parle de *classement*) qui détermine si un noyau est sain ou pathologique sans l'intervention d'un expert. Cette attribution d'un objet à une classe d'appartenance nécessite d'étudier un ensemble de critères, de paramètres intrinsèques à la forme. Ces valeurs descriptrices sont rangées dans un *vecteur caractéristique*. Toute la difficulté dans la construction d'un tel vecteur est de le définir avec des descripteurs suffisamment discriminants afin que les individus d'une même classe soient proches dans l'espace des caractéristiques, et que les individus appartenant à des classes différentes occupent des zones les plus éloignées possible. Quatre méthodes traditionnelles de classement ont été utilisées : les k plus proches voisins [1], les forêts aléatoires [2], les réseaux de neurones [3] et la régression logistique [4], cette dernière approche ayant donné de meilleurs résultats dans notre

2. Le terme *foci* est le pluriel de *focus*. Il s'agit d'un pic d'intensité des marqueurs fluorescents dans la texture du noyau. Leur présence devient anormale lorsque qu'ils sont trop nombreux ou de trop grande taille.

contexte.

3.2 Caractérisation de la forme des noyaux

3.2.1 Travaux relatifs

L'un des deux critères que les biologistes et les généticiens utilisent pour discriminer les noyaux de cellules repose sur la *forme*. A lui seul, ce critère permet de diagnostiquer plus de 85% des noyaux. La littérature regorge d'articles présentant des méthodes de caractérisation de formes. Elles peuvent être classées en deux grandes familles [5] : les méthodes qui s'appuient sur l'étude du contour d'une part, et les approches de caractérisation de la forme globale d'autre part. Dans la première famille, on peut citer la *chaîne de Freeman* [6] et la méthode MSGPR (pour *Multiscale curve Smoothing for Generalized Pattern Recognition*) [7]. Dans la seconde famille, la forme globale peut être décrite par un *squelette* [8], par sa *signature polaire* [9], par les *moments* [10] ou par des *histogrammes de projections* [11]. Cependant, aucune de ces approches n'est réellement adaptée à une utilisation dans un classifieur car elles produisent en sortie des vecteurs caractéristiques de trop grande dimension, ou des données géométriques non exploitables. Nous avons donc choisi de nous tourner vers des méthodes qui puissent générer des valeurs discriminantes s'appuyant sur des *indices de forme*. Ces approches sont mieux appropriées aux méthodes de classement car les valeurs ainsi produites peuvent être intégrées à un vecteur caractéristique plus court et plus pertinent, chaque quantité ayant un réel sens morphologique.

3.2.2 Mesures et indices de forme

Un *indice de forme* est une valeur sans dimension et invariante par similitude permettant de donner des renseignements chiffrés sur la forme. Ils apparaissent pour la première fois dans [12], et leurs propriétés sont étudiées dans [13] et [14]. Il est possible de compléter la caractérisation en combinant des indices de forme avec des valeurs *mesurées* sur la forme (par exemple son volume, sa surface, son périmètre, son diamètre euclidien, la longueur de son axe principal, la longueur du diamètre géodésique). La figure 3.2 illustre quelques mesures qu'il est possible d'extraire d'une forme 2D.

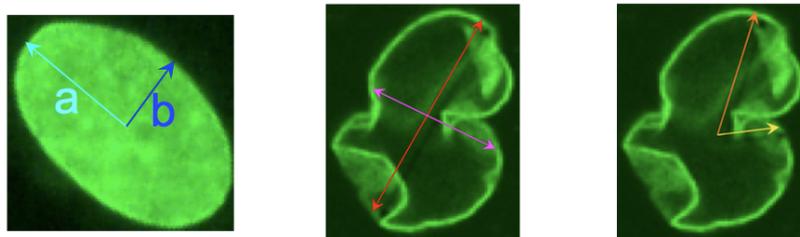


Figure 3.2. A gauche : illustration des demi-axes sur un noyau de forme normale. Au centre : axe principal (en rouge) et secondaire (en violet). A droite : plus grand rayon (en orange) et plus petit rayon (en jaune).

Sur la base de ces mesures, trois indices de forme originaux permettant de caractériser une

ellipse ont été élaborés. Par construction, ces indices tendent vers 1 lorsque la forme étudiée se rapproche de celle d'une ellipse :

$$I_1 = \pi \frac{R_{min}R_{max}}{A} \in [0, 1] \quad I_2 = \frac{\pi L_{AP}L_{AP\perp}}{4A} \in [0, 1] \quad I_3 = \frac{\pi E_D D}{2A} \in [0, 1]$$

avec R_{max} et R_{min} respectivement le plus grand et le plus petit rayon, A l'aire de la forme, L_{AP} et $L_{AP\perp}$ respectivement la longueur de l'axe principal et de l'axe secondaire, D le diamètre de la forme et E_D l'épaisseur relative à ce diamètre.

Etant donné que plus un noyau est irrégulier, non elliptique et non convexe, plus grande est la probabilité qu'il soit pathologique, nous avons également défini un indice de forme dédié à la convexité :

$$I_4 = \frac{1}{1 + N_{CCE}} \in]0, 1]$$

Il s'appuie sur le *nombre de composantes connexes d'écart* N_{CCE} qui correspond au complémentaire de la forme dans son enveloppe convexe (voir figure 3.3). Cet indice vaut 1 si la forme est convexe car aucune composante d'écart n'est trouvée. Plus la forme possède des composantes d'écart, plus l'indice tend vers 0.

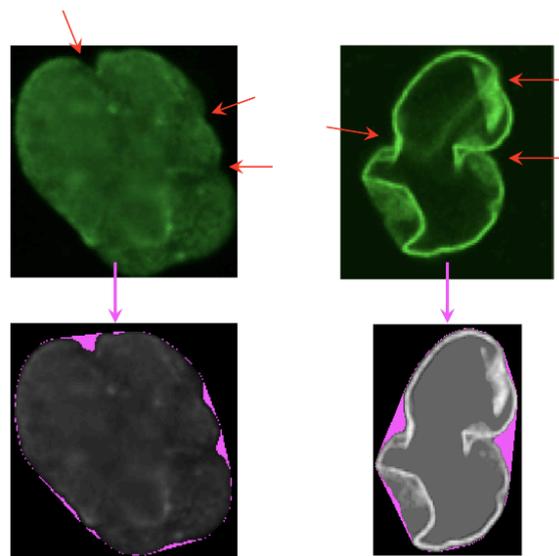


Figure 3.3. En haut : les flèches rouges pointent les zones de concavité qui caractérisent l'aspect « boursoufflé » des noyaux. En bas : les composantes connexes d'écart calculées pour les noyaux correspondants.

3.3 Caractérisation de la texture des noyaux

Pour affiner le diagnostic des noyaux de cellules, les experts biologistes et généticiens s'appuient sur un second critère : l'homogénéité de la *texture* et la présence dans celle-ci de trous et de foci.

3.3.1 Analyse de l'homogénéité de la texture

La figure 3.4 présente des exemples de textures non homogènes que peuvent avoir les noyaux de cellules.

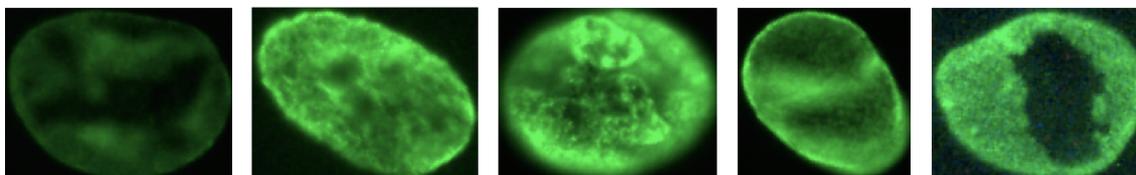


Figure 3.4. Quelques exemples de textures non homogènes dans les noyaux de cellules.

Dans le cadre de notre problématique, les outils traditionnels d'analyse de texture comme les *matrices de cooccurrences* (ou matrices de *dépendance spatiale*) et leurs *caractéristiques Haralick* [15] ne sont pas adaptées car elles constituent des méthodes de caractérisation générale de la texture.

L'approche par GLRLM (pour *Gray Level Run Length Matrix*) [16] ne permet pas d'obtenir de meilleurs résultats, même si elle semble mieux adaptée à notre problématique : cette méthode effectue le dénombrement des longueurs des segments de pixels de même niveau d'intensité dans une direction donnée et représente les résultats dans une matrice. Ainsi, elle permet de caractériser la *grossièreté* d'une texture [17], et des indices ont été spécifiquement conçus pour construire un vecteur caractéristique de la texture [18].

Sur la base de cette approche, une méthode originale a été développée pour caractériser les textures par une description statistique directement sur les *régions* des noyaux. Elle s'appuie sur une matrice appelée GLSZM (pour *Gray Levels Size Zone Matrix*) qui représente le dénombrement des tailles de toutes les régions de pixels de même niveau d'intensité. Elle est construite sur le même principe que la matrice GLRLM, mais elle ne dénombre non pas les longueurs des segments mais les tailles des régions.

Cette dernière approche par matrices GLSZM, combinée aux indices de texture des matrices GLRLM, n'améliore que peu les résultats du diagnostic des noyaux. L'étude de l'homogénéité seule ne suffit pas et pour améliorer de manière significative le modèle de classement, il faut pouvoir caractériser les noyaux qui comportent des trous et des foci dans leur texture.

3.3.2 Etude du volume sous la nappe

3.3.2.1 Principe

La présence de trous (zones sombres homogènes) et de foci (petites zones de forte intensité) intervient dans le diagnostic des noyaux de cellules. La figure 3.5 montre quelques exemples de noyaux de cellules comportant de tels éléments. On peut remarquer que leur nombre et leur taille sont variables selon le noyau pris en compte, sachant que d'après les experts biologistes, le noyau doit être considéré comme pathologique lorsque le nombre de foci est supérieur à cinq ou si le noyau contient au moins deux foci de grande taille (relativement à la taille du noyau).

Pour détecter et dénombrer des trous et des foci, il peut être intéressant de basculer d'un problème en deux dimensions vers un problème en trois dimensions, en considérant l'image comme une carte d'élévation, de manière à avoir accès à d'autres outils. Pour construire ce que nous appelons *volume sous la nappe*, la valeur de chaque pixel ne représente plus l'intensité mais une altitude, comme illustré sur la figure 3.6. Le volume numérique binaire ainsi obtenu comporte des

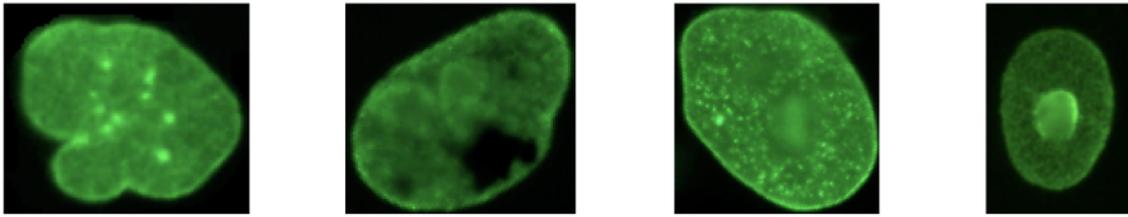


Figure 3.5. Quelques exemples de noyaux de cellules comportant des *trous* (zones sombres) et des *foci* (petites zones de forte intensité).

entités telles que des *pics*, des *lacs*, des *crêtes* ou des *failles*, toutes ayant une signification dans l'image.

Pour caractériser les trous et les foci dans les noyaux, et donc les *pics* et les *abîmes* (ou *lacs*) dans les volumes sous la nappe, il est nécessaire de transposer certaines mesures de la 2D vers la 3D. De ce fait, la mesure de l'aire A en pixels devient la mesure du volume V en voxels, et les axes principaux L_{AP} et $L_{AP_{\perp}}$ ne sont plus au nombre de deux mais de trois : L_{AP_1} , L_{AP_2} et L_{AP_3} .

Une autre approche pour détecter les trous et les foci dans une image aurait été d'utiliser des méthodes de morphologie mathématique [19] et plus particulièrement les *chapeaux haut de forme* [20]. Cependant la taille de l'élément structurant est un handicap dans notre contexte car s'il est trop petit, aucun focus ne serait détecté, et si au contraire il est trop grand, la moindre variation d'intensité dans la texture serait prise en compte. L'intérêt du volume sous la nappe est de pouvoir travailler en ajoutant une dimension et ainsi d'utiliser des indices de forme 3D pour mieux distinguer les objets d'intérêt.

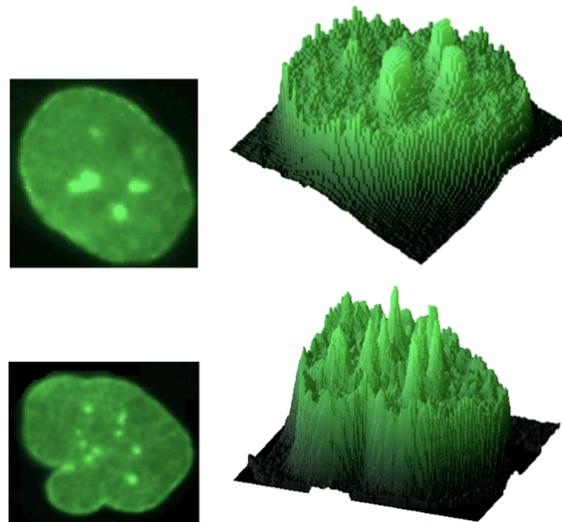


Figure 3.6. Deux noyaux de cellules et leurs volumes sous la nappe associés.

3.3.2.2 Les étapes du processus

Une fois le noyau de cellule transformé en volume sous la nappe, les pics et les lacs sont extraits (voir figure 3.7) puis caractérisés par des indices de forme 3D spécifiques. Suite à cela, une sélection des entités les plus représentatives permet de ne conserver que les pics et les lacs qui caractérisent

effectivement des foci et des trous du point de vue des experts biologistes.

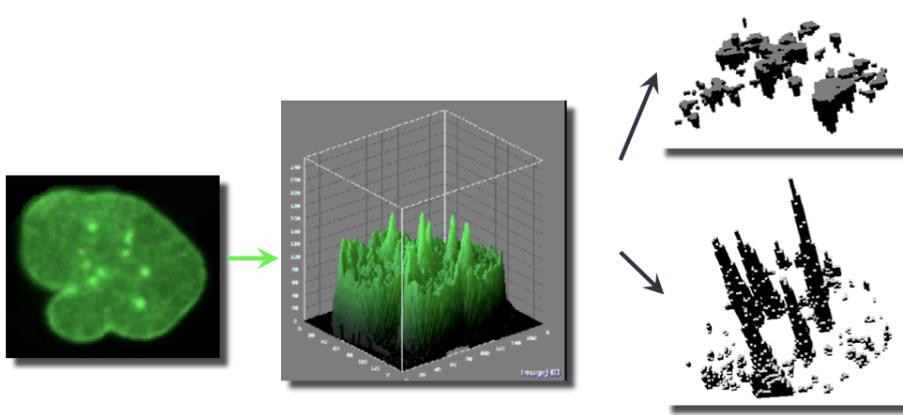


Figure 3.7. Extraction des abîmes et des pics pour un volume sous la nappe issu d'un noyau de cellule.

Les étapes du processus sont les suivantes :

- Les images des noyaux de cellules sont converties en volumes sous la nappe.
- Les lacs (respectivement les pics) sont extraits du volume par détection de tous les minimums locaux (respectivement les maximums) et par propagation aux couches supérieures (principe de l'inondation jusqu'à débordement, ou du *flooding*, utilisé dans les *watersheds* ou *lignes de partage des eaux* [21]).
- Pour ne conserver que les pics et les abîmes les plus représentatifs, quatre indices de forme ont été développés spécifiquement. Ils permettent de caractériser les éléments dont la forme se rapproche de celle d'un cylindre ou d'un cône :

$$I_5 = 2\pi \frac{R_{min}^2}{V} \sqrt{R_{max}^2 - R_{min}^2} \in [0, 1] \quad I_6 = \frac{\pi L_{AP_1} L_{AP_2}^2}{4V} \in [0, 1]$$

$$I_7 = \frac{\pi L_{AP_1} L_{AP_3}^2}{4V} \in [0, 1] \quad I_8 = \frac{\pi L_{AP_1} L_{AP_2} L_{AP_3}}{4V} \in [0, 1]$$

La figure 3.8 illustre les mesures utilisées pour ces indices de forme 3D.

- Sur la base de ces indices, un vecteur caractéristique est construit pour discriminer les éléments *pics* et *abîmes* représentatifs pour les experts. Ce filtrage par classement est effectué en utilisant la même approche (régression logistique) que pour le diagnostic global des noyaux de cellules.

Les indices de forme retenus pour compléter le vecteur caractéristique global pour le classement des noyaux sont : le nombre de foci et de trous détectés, la moyenne, la variance et la somme des volumes, ainsi que les volumes des plus petits et plus grands foci (respectivement des trous).

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré qu'il est possible de discriminer automatiquement des noyaux de cellules en utilisant des informations 2D et 3D extraites d'images de noyaux de cellules.

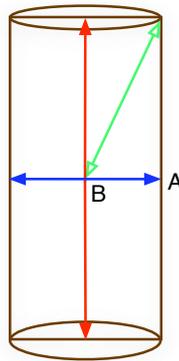


Figure 3.8. Mesures utilisées pour les indices de forme 3D caractérisant un cylindre : en rouge le premier axe, en bleu le deuxième axe ainsi que le plus petit rayon (de A à B), et en vert le plus grand rayon.

Le modèle final de classement des noyaux prend en compte des indices qui caractérisent d'une part la forme 2D, comme décrit dans la section 3.2, et d'autre part des indices dédiés à la texture (section 3.3). Cette dernière est analysée selon deux approches. La première utilise des matrices GLSZM qui permettent de caractériser les textures par une description des régions homogènes dans les noyaux. La seconde approche s'appuie sur l'étude du volume sous la nappe pour extraire de l'information à l'aide d'indices de forme 3D.

En combinant ces différentes informations sur la forme, la texture et l'étude 3D des pics et des abîmes (et donc des foci et des trous en 2D sur les noyaux), le taux de prédiction passe de 87,6% à 91,3%, ce qui est légèrement supérieur au pourcentage de répétabilité des experts biologistes. Le gain final sur le diagnostic des noyaux est donc important, et la discrimination entre les noyaux sains et pathologiques est fiable et automatisée.

Dans ces travaux dédiés à la caractérisation de noyaux de cellules, l'extraction d'information consiste à construire et utiliser des indices de forme 3D sur le volume sous la nappe associé à la texture des noyaux, dans le but de détecter des anomalies telles que des trous et des foci. Le modèle géométrique sous-jacent est ici un simple volume numérique binaire, un objet discret constitué de voxels.

Dans l'hypothèse d'une poursuite de ces travaux, les perspectives portent sur une application de cette approche à d'autres laminopathies. De manière générale, cette méthode peut être étendue à d'autres problèmes de discrimination de cellules ou de noyaux de cellules, dans un but de dénombrement pour le contrôle de l'efficacité d'un traitement par exemple. La progéria n'est pas la seule maladie concernée, des pathologies telles que certains cancers peuvent également être visées, ainsi que l'impact inattendu des trithérapies dans le traitement de patients séropositifs.

3.5 Bibliographie

- [1] E. FIX et J. HODGES. *Discriminatory analysis : Nonparametric discrimination : Consistency properties*. Tech. Rep. 4. Randolph Field, Texas, USA : USAF School of Aviation Medicine, 1951.
- [2] L. BREIMAN. “Random forests”. In : *Machine Learning* 45 (2001), pp. 5–32.
- [3] Warren Sturgis MCCULLOCH et Walter PITTS. “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”. In : *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (1943), pp. 115–133.
- [4] J. BERKSON. “Application of the logistic function to bio-assay”. In : *Journal of the American Statistical Association* 39 (1944), pp. 357–365.
- [5] D. ZHANG et G. LU. “Review of shape representation and description techniques”. In : *Pattern Recognition* 37 (2004), pp. 1–19.
- [6] H. FREEMAN. “On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations”. In : *IRE Transactions on Electronic Computers* EC-10.2 (juin 1961), pp. 260–268.
- [7] K. KPALMA et J. RONSIN. “A multi-scale curve smoothing for generalised pattern recognition (MSGPR)”. In : *Seventh International Symposium on Signal Processing and its Applications*. 2003, pp. 427–430.
- [8] H. BLUM. “A transformation for extracting new descriptors of shape”. In : *Symposium on Models for the Perception of Speech and Visual Form*. 1964, pp. 139–146.
- [9] A. TOUMI, B. HOELTZENER et A. KHENCHAF. “Classification des images ISAR pour la reconnaissance des cibles”. In : *XIIIèmes Rencontres de la Société Francophone de Classification*. 2006.
- [10] M.-K. HU. “Visual pattern recognition by moment invariant”. In : *IEEE Transactions on Information Theory* 8.2 (1962), pp. 179–187.
- [11] H. SOLTANZADEH et M. RAHMATI. “Recognition of persian handwritten digits using image profiles of multiple orientations”. In : *Pattern Recognition Letters* 25.14 (2004), pp. 1569–1576.
- [12] L. SANTALO. *Integral Geometry and Geometric Probability*. Addison Wesley, 1976.
- [13] M. COSTER et J.-L. CHERMANT. *Précis d’analyse d’images*. Editions du CNRS, 1985.
- [14] I. FILLÈRE. “Outils mathématiques pour la reconnaissance de formes”. Thèse de doctorat. Université de St Etienne, 1995.
- [15] R. M. HARALICK, K. SHANMUGAM et I. DINSTEIN. “Textural features for image classification”. In : *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 3 (1973), pp. 610–621.
- [16] M. M. GALLOWAY. “Texture analysis using grey level run lengths”. In : *Computer Graphics Image Processing* 4 (1975), pp. 172–179.
- [17] R. M. HARALICK. “Statistical and structural approaches to texture”. In : *Proceedings of the IEEE* 67 (1979), pp. 786–804.
- [18] D. XU, A. KURANI, J. FURST et D. RAICU. “Run-length encoding for volumetric texture”. In : *International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP)*. 2004, pp. 452–458.
- [19] Jean SERRA. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, 1982.

- [20] H. NETTEN, L. J. Van VLIET, H. VROLIJK, W. SLOOS, H. J. TANKE et I. T. YOUNG. “Fluorescent dot counting in interphase cell nuclei”. In : *Bioimaging* 4 (1996), pp. 93–106.
- [21] Serge BEUCHER et Fernand MEYER. “The Morphological approach of segmentation : the watershed transformation”. In : *Mathematical Morphology in Image Processing*. Marcel Dekker Publisher, New York, Dougherty E. (Editor), 1992. Chap. 12, pp. 433–481.

3.6 Publications associées à ces travaux

- [22] Guillaume THIBAUT, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Indices de Formes et de Textures - Application au Classement de Noyaux de Cellules”. In : *Revue des Sciences et Technologies de l'Information (RSTI), Série "Ingénierie des Systèmes d'Information" (ISI)* 15.2/2010 (Traitement de Données Complexes) (mar. 2010). Hermes Science Publication, Lavoisier Editions, pp. 73–96.
- [23] Guillaume THIBAUT. “Indices de formes et de textures : de la 2D vers la 3D - Application au classement de noyaux de cellules”. Thèse de doctorat. Marseille, France : Université de la Méditerranée (Aix-Marseille 2), 2009.
- [24] Guillaume THIBAUT, Bernard FERTIL, Claire NAVARRO, Sandrine PEREIRA, Pierre CAU, Nicolas LÉVY, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Texture indexes and gray level size zone matrix - Application to cell nuclei classification”. In : *10th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing, PRIP 2009*. Minsk, Biélorussie, mai 2009, pp. 140–145.
- [25] Guillaume THIBAUT, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Indices de textures : application au classement de noyaux de cellules”. In : *MajecSTIC 2008 (Manifestation des Jeunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication)*. Marseille, France, 2008.
- [26] Guillaume THIBAUT, Caroline DEVIC, Jean-François HORN, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Classification of cell nuclei using shape and texture indexes”. In : *16th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2008*. Plzen, République Tchèque, 2008, pp. 25–28.
- [27] Guillaume THIBAUT, Caroline DEVIC, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Indices de formes : de la 2D vers la 3D - Application au classement de noyaux de cellules”. In : *20èmes journées de l'AFIG, AFIG'07*. Marne-la-Vallée, France, 2007, pp. 17–24.
- [28] Guillaume THIBAUT, **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Indices de Formes : de la 2D à la 3D”. In : *Journées du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes*. Giens, France, 2007.

DÉTECTION DE CONTOURS DANS DES IMAGES TOMOGRAPHIQUES EN COHÉRENCE OPTIQUE POUR LA RECONSTRUCTION 3D DE LA CORNÉE

Ce chapitre est une synthèse de la publication [7] référencée dans la section 4.5.

4.1 Introduction

4.1.1 Contexte

Ce chapitre expose les travaux de master recherche de Florian Graglia, que Jean Sequeira et moi-même avons co-encadré en 2007. Ils portent sur une approche originale de détection des contours extérieurs et intérieurs de la cornée dans des images OCT (pour *Optical Coherence Tomography*, i.e. Tomographie en Cohérence Optique). Ces travaux ont été effectués dans le cadre d'une collaboration avec le Professeur Georges Baïkoff (Centre de Chirurgie Réfractive, Clinique Monticelli, Marseille), l'objectif étant de pouvoir préparer des interventions chirurgicales en ayant des informations précises et fiables sur la cornée d'un patient.

Les images manipulées ont la particularité d'être *radiales*, toutes les acquisitions étant centrées autour de l'*axe optique*. La figure 4.1 illustre l'agencement des coupes. En surimpression, on peut voir un modèle 3D de la cornée, de l'iris et de la *chambre antérieure*¹. Il s'agit de travaux effectués par un binôme d'étudiants de master en 2006, qui s'appuient sur un modèle B-spline surfacique. Bien que visuellement et pédagogiquement intéressants, les résultats obtenus sont malheureusement peu robustes : le modèle plaqué sur les données ne converge que dans trop peu de cas. L'intérêt de développer une méthode *stable* est donc grand, car outre ces approches réalisées dans le cadre universitaire, les logiciels fournis par les industriels eux-mêmes (et qui viennent en complément des machines d'acquisition OCT) parviennent difficilement à extraire les contours de la cornée sans l'intervention d'un manipulateur. Par exemple, sur le système Visante OCT (Carl Zeiss Meditec) d'où proviennent les images que nous avons traitées, une vingtaine de contours différents sont générés par le logiciel suite à une acquisition, et viennent se superposer à autant d'images. Le manipulateur doit alors sélectionner manuellement le contour le plus proche de celui de la cornée en jeu, car un grand nombre ne correspond pas au résultat escompté, ou présente des divergences remarquables.

1. La *chambre antérieure* de l'œil est l'espace entre l'iris et la surface interne de la cornée.

A partir d'images OCT radiales, l'approche proposée dans ce chapitre se compose de trois étapes : les images sont tout d'abord filtrées pour rehausser les contrastes et éliminer un bruit caractéristique (le *speckle*), puis deux points particuliers sont déterminés dans un second temps. Ils servent de points de départ à la troisième phase dédiée à l'extraction des contours. Cette dernière permet de construire un contour pixel par pixel en procédant par pondération d'un voisinage et en sélectionnant le meilleur candidat. De plus, une connaissance *a priori* forte est injectée en permanence dans notre algorithme pour augmenter sa robustesse.

Ce projet n'est pas allé au delà des travaux décrits dans ce chapitre, car il correspond à une collaboration ponctuelle matérialisée par un stage de master recherche. Cependant, les résultats obtenus permettent de poser des bases fiables pour l'élaboration future d'un modèle 3D de la cornée, ceci étant le but à terme d'un prolongement éventuel du projet.

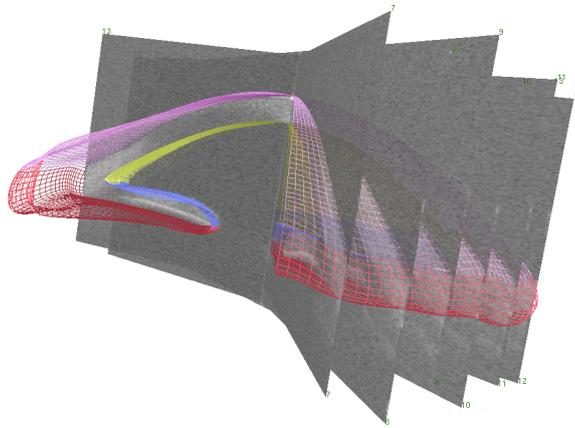


Figure 4.1. Coupes OCT agencées de manière radiale, ainsi qu'un modèle 3D de la cornée plaqué sur les données.

4.1.2 Les données

La technique d'acquisition OCT a été mise au point en 1991 et elle permet de réaliser *in vivo* des images en coupe de tissus avec une bonne résolution [1]. Elle représente une avancée majeure notamment pour les dermatologues et les ophtalmologues. Les résultats sont particulièrement remarquables en ophtalmologie car les tissus diffusants sont plus nombreux dans l'œil et il est possible d'y visualiser les structures fines et les différentes couches en profondeur, ceci avec une bonne qualité. Cette technique est comparable dans son principe à l'imagerie ultrasonore, les ondes utilisées étant dans le cas de l'OCT des ondes lumineuses.

Bien que la résolution soit élevée, les images comportent toutes un bruit caractéristique, le *speckle*, propre aux acquisitions OCT et échographiques. Il s'agit d'un bruit multiplicatif qui donne un aspect granuleux et moucheté aux images. La prise en compte de ce bruit est donc essentielle avant de pouvoir extraire une quelconque information des images.

Les données en entrée se composent pour chaque patient d'un ensemble de 18 coupes 2D radiales de la cornée. Les dimensions des images sont de 826 par 420 pixels.

4.1.3 Travaux relatifs

La problématique se résume à extraire les contours extérieurs et intérieurs de la cornée dans une image en niveaux de gris. Un tour d'horizon des méthodes de détection de contours est présenté dans la section 6.2 du chapitre 6.

Dans le cadre particulier de l'œil, des modèles markoviens ont été proposés pour extraire les contours de la rétine à partir d'images OCT radiales (voir par exemple [2]). Ces méthodes ne sont cependant pas applicables à la région cornéenne à cause de sensibles différences anatomiques et du fait qu'il est difficile d'injecter des *a priori* sur la forme de la cornée avec de tels modèles. Dans [3], les auteurs utilisent un filtre élémentaire *moyenne* en pré-traitement pour réduire de manière importante l'impact du *speckle*, et pour aider la détection de la *macula* (une petite zone de la rétine située au fond de l'œil, près du nerf optique) dans des images OCT. L'approche décrite dans [4] vise à reconstruire la surface extérieure de la cornée en utilisant une technique singulière : la *vidéokératographie* (il s'agit d'images issues de la réflexion spéculaire d'un motif sur l'œil, dans le but de générer une surface 3D). Dans [5], un modèle de la cornée à base de B-splines pour la simulation mécanique est construit à partir de données échographiques et IRM. Ces modalités d'acquisition moins précises que l'imagerie OCT ne permettent d'obtenir qu'une caractérisation de la surface de l'œil de qualité moyenne, sans prendre en considération les structures internes (comme la surface intérieure de la cornée).

4.2 Extraction de contours à partir d'images radiales

L'algorithme présenté dans cette section se compose de trois phases. La première consiste à effectuer un pré-traitement pour réduire le bruit, la deuxième réside dans la détection de deux points clés (appelés *points d'ancrage*) dans le but d'initialiser la troisième phase, celle d'extraction des contours à proprement parler.

4.2.1 Pré-traitement des images

La réduction du bruit de type *speckle* est nécessaire avant d'envisager une extraction d'information dans l'image. Ce bruit crée de grandes variations de luminance en chaque pixel qui peuvent diminuer la précision des algorithmes qui seront appliqués par la suite. La phase de pré-traitement est composée de deux filtrages successifs. Un premier *filtre de Wiener adaptatif* [6] permet de traiter le *speckle* de manière efficace, puis une combinaison de plusieurs filtres médians permet de consolider les contours et de rehausser les contrastes (voir figure 4.2).

Le filtrage de Wiener adaptatif est une méthode statistique fondée sur une estimation de la variance au voisinage de chaque pixel et une comparaison de cette quantité avec la moyenne des variances sur l'image entière. Un lissage adaptatif est réalisé en chaque pixel en fonction de l'écart des variances : plus celui-ci est grand et plus le lissage s'effectue sur une petite zone. En d'autres termes, plus il y a d'information localement dans l'image et moins la zone en question est lissée. Ce filtre est particulièrement efficace sur des images affectées par un *speckle*, car il permet de réduire le bruit de fond tout en préservant au mieux les contours.

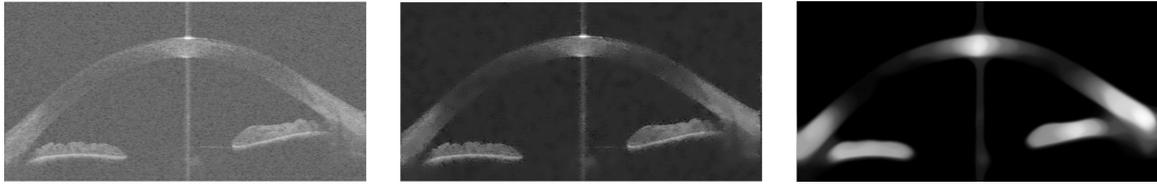


Figure 4.2. Résultat du pré-traitement : image OCT initiale (à gauche), après un filtrage de Wiener (au centre) et après une combinaison de filtres médians (à droite).

4.2.2 Détection de deux points d'ancrage

La détection des deux points de départ, que l'on appelle *points d'ancrage*, est fondamentale car ils constituent les positions initiales pour la recherche des contours haut et bas. On appelle A le point d'ancrage le plus haut du contour extérieur de la cornée (i.e. l'*épithélium*), et B le point le plus haut du contour intérieur (i.e. l'*endothélium*).

Pour trouver l'ordonnée y_A du point A , la différence entre la moyenne de la zone $Z1$ et de la zone $Z2$ est calculée pour chaque pixel (ces deux masques sont illustrés sur la figure 4.3 à gauche). Pour chaque colonne, la valeur maximale de ces différences est retenue, l'ordonnée finale y_A étant le maximum de ces valeurs. Pour calculer l'abscisse x_A , la différence entre les moyennes des zones $Z3$ et $Z4$ est effectuée pour chaque pixel d'ordonnée y_A (voir la figure 4.3 au centre), puis la moyenne des deux valeurs extrêmes (le point d'entrée dans l'épithélium et le point de sortie) permet d'estimer x_A . L'ordonnée y_B du point B est calculée en partant du point A et en calculant la valeur maximale des différences entre les zones $Z1$ et $Z2$ qui se trouvent en dessous de A . On considère enfin que les abscisses des points A et B sont les mêmes.

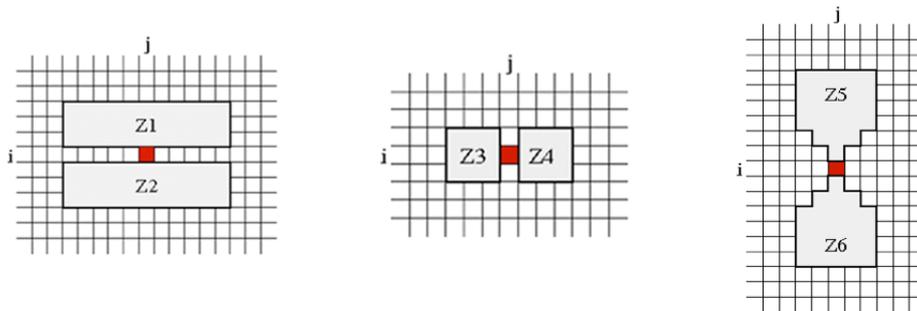


Figure 4.3. Les différentes zones utilisées pour calculer les variations.

La figure 4.4 montre le résultat obtenu pour trois images de la cornée. On peut remarquer que l'axe optique de l'image de droite comporte des défauts qui ne perturbent pas la détection des points A et B .

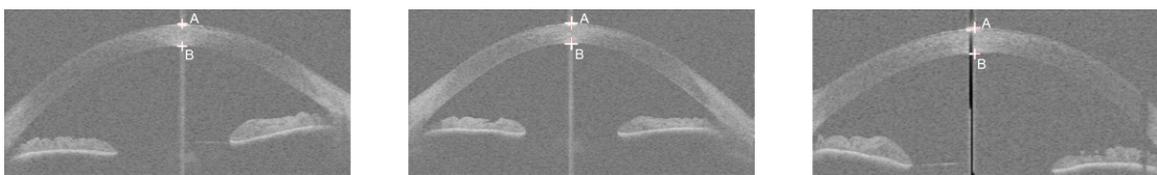


Figure 4.4. Points d'ancrage obtenus pour trois images de la cornée.

4.2.3 Extraction du contour

L'algorithme d'extraction de contour à proprement parler se compose de trois phases. Dans un premier temps, seule l'image est prise en compte pour détecter pixel par pixel les contours extérieur et intérieur de la cornée, de manière simultanée. Puis deux autres étapes viennent compléter le processus pour ajuster les contours obtenus et veiller à préserver la cohérence de l'épaisseur cornéenne et de sa courbure.

4.2.3.1 Maximisation de la différence des intensités sur deux zones d'intérêt

En partant des points d'ancrage A et B trouvés précédemment, l'algorithme procède pixel par pixel en avançant selon les x croissants pour trouver la partie droite des contours haut et bas, puis selon des x décroissants pour la partie gauche. Pour chaque pixel traité, un ensemble de pixels candidats constitué des pixels verts sur la figure 4.5 est pondéré par la différence entre les moyennes des zones $Z5$ et $Z6$ (voir la figure 4.3 à droite). Le candidat retenu est celui dont la valeur (que l'on appelle *score*) est maximale.

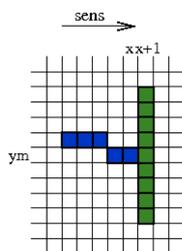


Figure 4.5. Déroulement de l'algorithme vers la droite : en bleu les points de contours déjà détectés, en vert les points candidats.

En utilisant l'information brute des images OCT suite à la première étape de pré-traitement, sans aucun autre *a priori*, les contours de la cornée sont détectés de manière satisfaisante dans la plupart des cas (voir la figure 4.6).

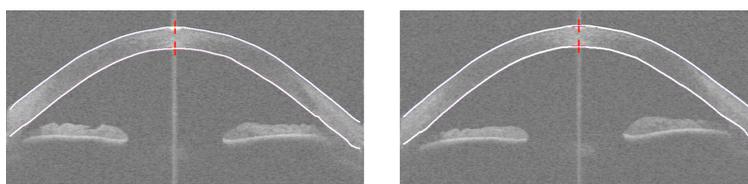


Figure 4.6. Deux exemples de contours cornéens obtenus suite à la première phase de l'algorithme.

Cependant, dans certains cas, lorsque les contrastes sont trop faibles ou que l'information est inexistante par endroits, cet algorithme échoue : les contours détectés peuvent soit s'auto-intersecter, soit être très irréguliers (voir la ligne du haut de la figure 4.7). Pour pallier ce problème et améliorer la qualité des contours obtenus, il est nécessaire d'injecter de la connaissance dans l'approche développée.

4.2.3.2 Critère de stabilité de la courbure

En partant du principe que la courbure varie peu le long de la cornée, il est possible d'éviter que les lignes extraites ne soient trop irrégulières en augmentant le score de certains points candidats qui se trouvent sur une courbe polynomiale quadratique définie par un triplet de points de contour

déjà calculés. En considérant plusieurs triplets, qui caractérisent autant de courbes, les scores des points candidats sont modifiés. Chaque triplet contribue à une ordonnée potentielle du futur pixel de contour.

La deuxième ligne de la figure 4.7 illustre les résultats obtenus suite à cette étape de régularisation. On constate que les contours sont plus lisses mais que des cas de divergence peuvent subsister.

4.2.3.3 Critère de stabilité de l'épaisseur

De même que pour la courbure, cette phase de l'algorithme s'appuie sur la faible variation de l'épaisseur de la cornée. Chaque pixel du contour (du haut par exemple) détecté participe au score des points candidats de l'autre contour (du bas par exemple) et réciproquement. Ce critère permet d'éviter qu'un contour ne diverge et ne vienne couper l'autre contour. Ce contrôle mutuel de l'épaisseur donne des résultats satisfaisants et robustes (voir la ligne du bas de la figure 4.7).

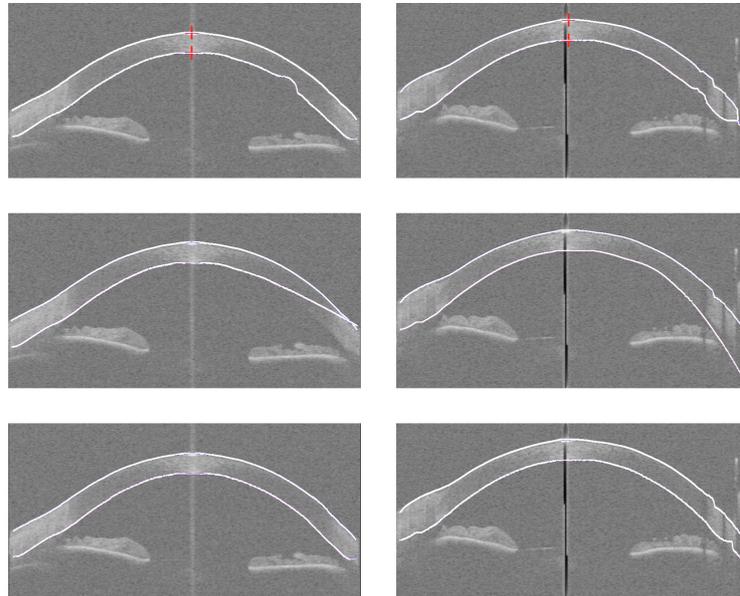


Figure 4.7. Deux exemples (un par colonne) de contours cornéens extraits. La première ligne présente les résultats obtenus par l'algorithme brut, sans ajouter de connaissance. La deuxième ligne illustre les contours détectés en utilisant le critère de courbure, et la troisième ligne montre les résultats finaux en ayant recours au critère de stabilité de l'épaisseur.

4.3 Conclusion

4.3.1 Résultats et discussion

Les travaux développés dans ce chapitre se situent dans un cadre très particulier d'extraction d'information à partir d'images OCT cornéennes. Pour guider le processus, les méthodes présentées reposent sur des *a priori* forts liés à des caractéristiques propres à la cornée.

Les résultats obtenus par cette approche dédiée sont significatifs et robustes. Une première phase de pré-traitement visant à réduire le *speckle* s'appuie sur un filtrage efficace qui utilise un

filtre de Wiener adaptatif. Puis une phase d'initialisation, essentielle au bon déroulement ultérieur du processus, permet de détecter les deux points d'ancrage sur épithélium et sur l'endothélium. Un problème à ce stade conduirait à un échec de l'algorithme d'extraction de contour. Sur les quatre jeux de données que nous avons à disposition (soit 72 coupes radiales), ces points clés ont systématiquement été détectés correctement, même lorsque l'axe optique est absent ou fortement altéré. Suite à cela, l'approche d'extraction de contours à proprement parler consiste en une analyse brute de l'image en maximisant la différence entre deux zones d'intérêt autour de pixels candidats, puis elle combine les résultats obtenus à deux *a priori* spécifiques à la cornée : deux critères de courbure et d'épaisseur sont utilisés pour améliorer sensiblement les contours en sortie.

L'originalité de cette approche réside dans une prise en compte de deux types d'informations dans les images traitées : les intensités *locales* des pixels, et les paramètres *globaux* fournis par les contours déjà calculés et induits à ceux qu'il reste à extraire.

4.3.2 Vers un modèle 3D de la cornée

En l'état, les contours résultants peuvent aider les ophtalmologistes pour le diagnostic d'anomalies, et pour une étude pré-opératoire en chirurgie réfractive des caractéristiques de la cornée d'un patient.

Bien qu'en dimension 2, les données sont agencées autour de l'axe optique de l'œil. Il est donc naturel de se poser la question de la reconstruction surfacique à partir de coupes radiales, l'information 3D étant sous-jacente aux modalités des acquisitions.

La figure 4.8 à gauche illustre une surface B-spline cubique obtenue à partir des 18 contours extraits et caractérisant l'endothélium, la face intérieure de la cornée. La figure 4.8 à droite montre un modèle 3D du *segment antérieur*² de l'œil obtenu par un binôme d'étudiants de master en 2006.

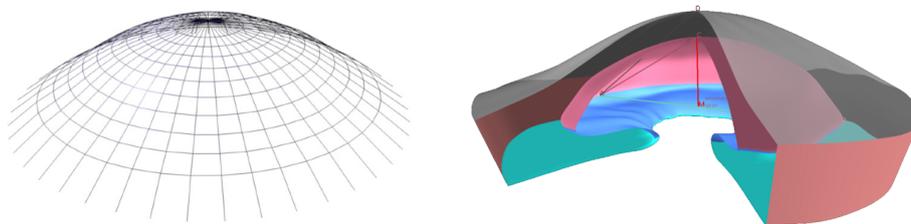


Figure 4.8. A gauche : modèle surfacique de l'endothélium obtenu à partir des contours extraits par notre approche. A droite : modèle 3D du *segment antérieur* de l'œil.

L'intérêt de construire un modèle géométrique 3D de la cornée spécifique à chaque patient est motivé par plusieurs raisons. Outre un but pédagogique de description de l'organe et d'étude virtuelle de sa structure, un modèle précis et fiable peut permettre d'effectuer des calculs de courbures en pré-opératoire pour planifier, voire simuler, une intervention de rabotage (pour corriger au mieux une myopie par exemple). Dans ce cas, une estimation sûre de l'épaisseur de la cornée est nécessaire. Plus généralement, un modèle du segment antérieur complet et des dimensions de la chambre antérieure en fonction de chaque patient doit mener à la fabrication de prothèses « sur mesure » que l'on pourrait insérer dans cette cavité, pour un traitement plus précis et une meilleure tolérance de ces implants intra-oculaires dans le but de corriger des anomalies de la réfraction telles que la myopie, l'hypermétropie, l'astigmatisme ou la presbytie.

2. Le *segment antérieur* comprend tous les organes de l'œil se trouvant en avant du cristallin : la cornée, l'iris et le cristallin.

4.4 Bibliographie

- [1] D. HUANG, E. A. SWANSON, C. P. LIN, J. S. SCHUMAN, W. G. STINSON, W. CHANG, M. R. HEE, T. FLOTTE, K. GREGORY, C. A. PULIAFITO et J. G. FUJIMOTO. “Optical Coherence Tomography”. In : *Science* 254 (1991), pp. 1178–1181.
- [2] D. KOOZEKANANI, K. BOYER, et C. ROBERTS. “Retinal Thickness Measurements from Optical Coherence Tomography Using a Markov Boundary Model”. In : *IEEE Transactions on Medical Imaging* 20.9 (2000), pp. 900–916.
- [3] H. ISHIKAWA, D. M. STEIN, G. WOLLSTEIN, S. BEATON, J. G. FUJIMOTO et J. S. SCHUMAN. “Macular segmentation with optical coherence tomography”. In : *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 46.6 (2005), pp. 2012–2017.
- [4] M. HALSTEAD, B. BARSKY, S. KLEIN et R. MANDELL. “Reconstructing Curved Surfaces From Specular Reflection Patterns Using Spline Surface Fitting of Normals”. In : *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. 1996, pp. 335–342.
- [5] Mathieu LAMARD et Béatrice COCHENER. “Modélisation de l’œil en vue de simulations de chirurgies réfractives”. In : *Journal Français d’Ophtalmologie* 24.8 (2001), pp. 813–822.
- [6] Jae S. LIM. *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. Prentice Hall, 1990, p. 548.

4.5 Publication associée à ces travaux

- [7] Florian GRAGLIA, **Jean-Luc MARI**, Georges BAÏKOFF et Jean SEQUEIRA. “Contour Detection of the Cornea from OCT Radial Images”. In : *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2007*. Lyon, France, août 2007, pp. 5612–5615.

DÉTECTION DE LIGNES CARACTÉRISTIQUES DANS LES MAILLAGES

Ce chapitre est une synthèse des publications référencées dans la section 5.9, et plus particulièrement des articles [55] (voir la section 5.4), [49] et [54] (voir la section 5.5.3), et [52] (voir la section 5.5.4).

5.1 Introduction

Ce chapitre présente les travaux effectués dans le cadre de la thèse de Dimitri Kudelski que j'ai co-dirigée avec Sophie Viseur du GSRC (Laboratoire de Géologie des Systèmes et des Réservoirs Carbonatés, Université de Provence) au sein d'un projet qu'elle a initié avec l'entreprise pétrolière ENI-AGIP en 2008. Ce projet nommé VOGP (pour *Virtual Outcrop Geology Projet*) se compose de deux parties. Une première, dans laquelle j'interviens, est axée vers l'informatique graphique et plus particulièrement vers la modélisation géométrique. Il s'agit d'élaborer des méthodes pour construire des modèles géologiques à partir de données d'*affleurements virtuels*. Ces derniers sont des maillages représentant des formations géologiques *visibles* (par opposition aux données sismiques qui sont des acquisitions du sous-sol non visible) obtenues à partir de données LIDAR¹. La seconde partie du projet VOGP est orientée vers la géologie numérique, l'objectif étant de réaliser un modèle des systèmes sédimentaires qui affleurent dans la zone du Gargano (Italie du Sud). La conjonction des deux problématiques (géométrique et géologique) a pour but de mieux comprendre les affleurements pour mieux appréhender le sous-sol dans des zones pétrolifères stratégiques.

Dans le domaine pétrolier, les géologues s'appuient traditionnellement sur deux types de données : les cubes sismiques (qui modélisent une zone de grande taille mais de manière peu précise) et les carotages (qui sont des échantillons très précis du sous-sol, mais sur une zone très localisée). A l'heure où le LIDAR est en plein essor, il constitue une troisième modalité d'acquisition des formations géologiques de plus en plus utilisée. Il joue un rôle complémentaire aux deux approches traditionnelles et il a pour vocation de permettre une meilleure compréhension des modèles souterrains. C'est la combinaison de ces trois types de données qui permet aux géologues de procéder par analogie : lorsque les informations sont de mauvaise qualité en sismique, le fait d'étudier un affleurement proche (à quelques dizaines de kilomètres, sur la côte lorsque cela est possible)

1. Le LIDAR est l'acronyme de l'expression anglaise *Light Detection And Ranging*. Un LIDAR est un dispositif de télédétection qui balaye son champ de vision avec un faisceau laser et mesure la distance pour chaque point balayé, permettant la reconstruction d'un modèle tridimensionnel de la scène.

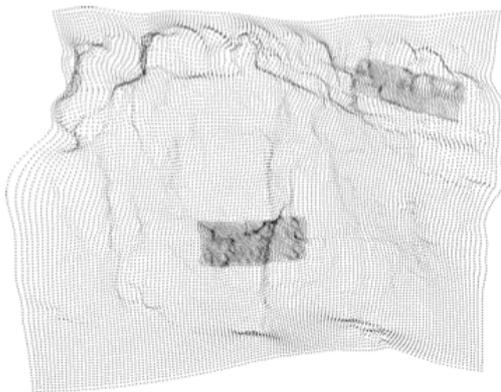
et d'extrapoler le comportement des objets géologiques à proximité peut permettre d'améliorer considérablement la précision des modèles géologiques. De plus en plus, les acquisitions LIDAR viennent en complément des autres modalités pour augmenter la pertinence et la fiabilité des représentations géologiques.

Les affleurements fournissent un support important pour les observations *in situ*. Ils sont utilisés comme base pour la recherche de données analogues et jouent donc un rôle primordial dans la prospection pétrolière. Durant les campagnes d'acquisition des données, la géométrie des affleurements est tout d'abord capturée par LIDAR par voie terrestre, aérienne ou hélicoptée. Ces informations sont généralement complétées par des photographies prises sur le terrain. L'ensemble de ces données constitue un *DOM*² [1].

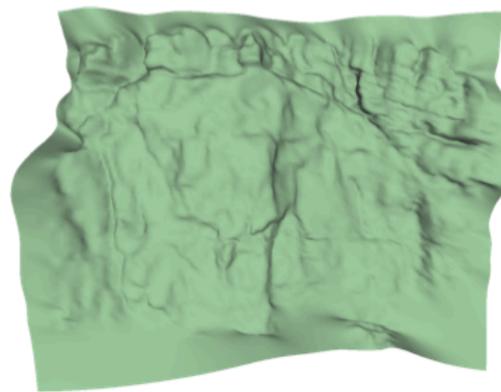
La numérisation d'un affleurement par LIDAR se fait le plus souvent par l'intermédiaire de plusieurs acquisitions sous la forme de nuages de points. Ces derniers sont ensuite fusionnés, traités puis triangulés pour obtenir un maillage surfacique correspondant à l'intersection entre le *massif rocheux* et la *topographie* (i.e. le relief), comme illustré par la figure 5.1. Toutefois, ces nuages peuvent atteindre plusieurs millions de points pour quelques kilomètres d'acquisition. Par conséquent le travail d'interprétation se révèle être une phase fastidieuse et chronophage, et l'automatisation d'une partie de cette étape constitue un enjeu fondamental et le principal objectif des travaux présentés dans ce chapitre.



(a) Affleurement de la Marcouline. Cassis, France.



(b) Nuage de points *LIDAR* après nettoyage.



(c) Construction du modèle surfacique.

Figure 5.1. Traitement des données : du terrain à l'affleurement numérique.

2. Acronyme de l'expression *Digital Outcrop Model* pour *Modèle Numérique d'Affleurement*. Support numérique permettant de visualiser la stratigraphie, la fracturation, la géométrie, etc.

Mieux comprendre un affleurement, représenté sous forme numérique, signifie notamment d'être capable d'*extraire de l'information* ayant un sens d'un point de vue géologique. Une tâche courante pour un géologue qui analyse un affleurement consiste à *dessiner* des lignes particulières via les outils graphiques intégrés à un *modeleur géologique*³. Nous nous sommes focalisés plus particulièrement sur la détection de structures telles que les limites des *couches stratigraphiques* (i.e. les frontières entre les *strates*) ou les *fractures* (issues du plissement ou de la cassure des couches). Du fait de l'érosion, ces objets se manifestent visuellement le long de la surface d'affleurement comme des traces linéaires. Ces éléments géologiques se déclinent sous plusieurs formes et peuvent varier tout au long de la fracture ou de la limite stratigraphique (cf. figure 5.2). Il est à noter qu'ils sont situés dans les parties fortement concaves de la surface d'affleurement (en considérant que la normale est orientée vers l'extérieur).

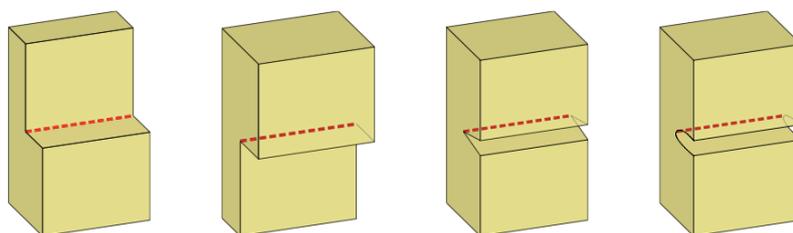


Figure 5.2. Motifs des différents objets géologiques recherchés.

La problématique de détection d'objets géologiques se résume donc à l'extraction de lignes caractéristiques situées dans les zones fortement concaves. Dans ce contexte, nous avons élaboré deux algorithmes visant à détecter de telles lignes sur des maillages surfaciques. La première approche développée s'appuie sur l'étude de la variation de la courbure suivie d'un filtrage directionnel pour limiter la détection d'artefacts. La seconde approche, plus efficace, combine une étude de la courbure (et non plus de sa variation) avec une méthode de squelettisation originale et mise en œuvre pour ce cadre spécifique. Ce dernier algorithme, qui prend le contre-pied des approches existantes, est robuste et il permet d'obtenir des lignes caractéristiques à la fois stables et connexes.

Ce chapitre se compose de la manière suivante. La section 5.2 est consacrée à la description des éléments de base relatifs aux maillages et à la géométrie différentielle. La section 5.3 dresse un panorama des méthodes connexes à notre problématique. Dans la section 5.4, nous détaillons la première approche de détection d'objets géologiques qui repose sur l'intégration d'une connaissance *a priori* et sur l'utilisation de propriétés différentielles du troisième ordre. Puis dans la section 5.5, nous décrivons la seconde méthode proposée : elle s'appuie sur l'utilisation de propriétés différentielles du deuxième ordre, et elle intègre un algorithme de squelettisation sur les maillages dans le but d'extraire des lignes caractéristiques. Enfin, la section 5.6 est consacrée à la validation des approches développées dans le cadre géologique ainsi que dans d'autres domaines applicatifs.

3. *Gocad* (pour *Geological Object Computer Aided Design*) et *Petrel* sont deux exemples de modeleurs géologiques.

5.2 Éléments de base

5.2.1 Les maillages surfaciques

Un *maillage surfacique* est la représentation discrète, approchante et par morceaux de la surface continue d'un objet. Il est constitué d'un ensemble V de n sommets p_i tels que $p_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3$ avec $1 \leq i \leq n$. Ces sommets sont reliés entre eux par des *arêtes* contenues dans un ensemble E où $E = \{(p_i, p_j) | p_i, p_j \in V\}$. L'ensemble F de *faces* du maillage est défini par des suites d'arêtes telles que $F = \{(e_1, \dots, e_i, \dots, e_m) | e_i \in E\}$ avec $1 \leq i \leq m$.

Les arêtes d'un maillage traduisent les relations topologiques entre les sommets, et il est alors possible de définir la notion de *voisinage* : on considère que deux sommets p_i et p_j sont voisins si l'arête (p_i, p_j) appartient à l'ensemble E . On appelle *valence* $N(p_i)$ le nombre de voisins d'un sommet p_i . On parle de maillage *triangulé* s'il est composé uniquement de triangles. Si le maillage contient des arêtes de bord, on dit qu'il est *ouvert* (il est dit *fermé* dans le cas contraire).

- Le terme *conforme* est aussi utilisé pour qualifier un maillage qui respecte les critères suivants :
- chaque arête intérieure comporte deux faces adjacentes (ou une seule s'il s'agit d'une arête de bord) ;
 - l'intersection de deux éléments du maillage est un élément du maillage et de dimension inférieure.

Le dernier point évoqué implique d'une part que l'intersection entre deux faces adjacentes est une arête, et d'autre part que l'intersection entre deux arêtes adjacentes est un sommet.

Les données numériques d'affleurements étant initialement des nuages de points issus de plusieurs acquisitions LIDAR, il est nécessaire de procéder à plusieurs opérations avant de les exploiter : recalage des différents sous-nuages de points, assemblage, nettoyage pour supprimer du mieux possible le bruit, puis construction du maillage représentant la surface d'affleurement. Dans le cadre de nos travaux, ces étapes sont considérées comme étant réalisées en amont. Ainsi, les maillages étudiés dans ce chapitre sont surfaciques, ouverts, triangulés, conformes et *non réguliers* (i.e. la valence en chaque sommet n'est pas fixée).

5.2.2 Notions de géométrie différentielle

La géométrie différentielle est une discipline des mathématiques visant à étudier les propriétés locales d'une géométrie par le biais d'outils issus du calcul différentiel. Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons en particulier à la notion de *courbure* (se référer à [2] pour une étude approfondie du sujet).

La courbure en un point d'une courbe contenue dans le plan est définie comme étant l'inverse du rayon du cercle tangent à la courbe en ce point. Cette définition ne pouvant pas s'appliquer aux courbes gauches ou aux surfaces, on utilise alors la notion de *courbure normale*. Dans le cas d'une surface S , on note n le vecteur normal en un point de S et t un vecteur tangent. Le plan construit à partir des vecteurs n et t intersecte la surface en une courbe. Cette dernière est alors utilisée pour le calcul de la courbure. En un point *régulier* d'une surface, il existe une infinité de vecteurs tangents, et donc autant d'intersections entre les plans générés et la surface. Les deux valeurs extrêmes de la courbure normale sont appelées les *courbures principales* : k_1 est la *courbure maximale*, et k_2 la *courbure minimale*. Les directions du vecteur t associées à ces valeurs sont les deux *directions principales* t_1 et t_2 .

Il existe deux autres quantités habituellement utilisées pour décrire localement la géométrie d'une surface. La première est la *courbure moyenne* H . Elle est définie par :

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2}$$

La seconde quantité est la *courbure gaussienne* K . Elle correspond au produit des deux courbures principales :

$$K = k_1 \cdot k_2$$

Les signes de H et K mettent en avant huit types de formes qu'il est possible de rencontrer en un point régulier d'une surface (voir figure 5.3).

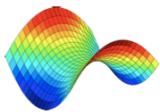
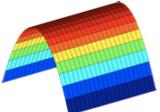
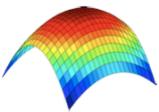
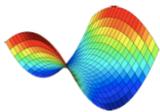
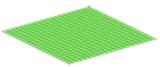
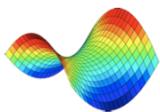
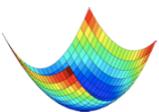
	$K < 0$	$K = 0$	$K > 0$
$H < 0$	<i>saddle ridge</i> 	<i>ridge</i> 	<i>peak</i> 
$H = 0$	<i>minimal</i> 	<i>flat</i> 	<i>impossible</i>
$H > 0$	<i>saddle valley</i> 	<i>valley</i> 	<i>pit</i> 

Figure 5.3. Types de formes en un point d'une surface, selon les courbures moyenne et gaussienne.

L'aspect d'un modèle 3D peut être caractérisé par sa géométrie locale, notamment par l'étude des variations de courbures en chacun des points de sa surface. En effet, en certains points de la surface, la courbure atteint des extrema locaux qui forment des *lignes caractéristiques*. On parle alors de *lignes de crêtes* et de *lignes de ravins*, selon que la surface est convexe ou concave localement (cf. figure 5.4).

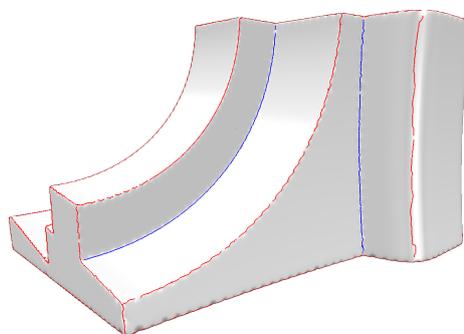


Figure 5.4. Lignes de crêtes (en rouge) et de ravins (en bleu) sur un modèle de pièce mécanique (*fandisk*).

Ces deux notions sont définies par les *coefficients d'extrémalité* e_1 et e_2 introduits par Thirion [3]. Il s'agit des dérivées directionnelles des courbures principales dans le sens des directions principales de courbures :

$$e_1 = \frac{\partial k_1}{\partial t_1}, \quad e_2 = \frac{\partial k_2}{\partial t_2}$$

Les lignes de crêtes et de ravins étant des extrema de courbures, elles peuvent être déduites par les coefficients d'extrémalité. Les lignes de crêtes (zones convexes) correspondent alors à :

$$e_1 = 0, \quad \frac{\partial e_1}{\partial t_1} < 0, \quad k_1 > |k_2| \quad (5.1)$$

tandis que les lignes de ravins (zones concaves) sont définies par :

$$e_2 = 0, \quad \frac{\partial e_2}{\partial t_2} > 0, \quad k_2 < -|k_1| \quad (5.2)$$

Ces notions de lignes de crêtes et de ravins sont un support pour répondre à notre problématique. En effet, les structures géologiques recherchées sont situées dans les parties concaves des affleurements. Pour cette raison, nous nous intéressons plus particulièrement aux lignes de ravins. Cependant, les notions de crêtes et de ravins sont dépendantes de l'orientation des normales à la surface : en inversant les normales à la surface, les crêtes deviennent ravins et réciproquement. En conséquence, les méthodes proposées dans ce chapitre peuvent être aisément transposées au problème opposé de l'extraction d'arêtes saillantes.

5.3 Travaux relatifs

Dans cette section, nous présentons brièvement les méthodes de détection de lignes caractéristiques que l'on trouve dans la littérature. La détermination d'un estimateur de courbure étant importante lors de la caractérisation locale de la géométrie, nous abordons ensuite les différentes techniques qui existent dans le contexte particulier des maillages triangulés, puis nous discutons du choix effectué pour répondre à notre problématique.

5.3.1 Les méthodes de détection de lignes caractéristiques

On peut classer les approches de détection de lignes caractéristiques sur maillages triangulés dans deux familles : d'une part celles qui s'appuient sur des propriétés géométriques locales de la surface, les courbures principales y jouant un rôle important, et d'autre part les méthodes qui reposent sur la segmentation de régions.

5.3.1.1 Critères géométriques

Concernant ce premier groupe d'approches, il s'agit d'identifier les extrema de courbures directement à partir des valeurs des courbures principales. Pour ce faire, Rössl *et al.* [4] utilisent un seuillage manuel des courbures et une extraction des lignes par opérateurs morphologiques. Outre cette approche, de nombreuses méthodes s'appuient sur l'étude de la *variation* des courbures en utilisant les coefficients d'extrémalité présentés dans la section 5.2.2. Une annulation des dérivées

de courbures permet d'extraire soit des maxima (i.e. des lignes de crêtes) soit des minima de courbures (i.e. des lignes de ravins). Parmi ces approches, celle de Ohtake *et al.* repose sur le calcul de ces propriétés différentielles en chaque point du maillage à partir d'une approximation globale de la surface par une fonction implicite, le passage par zéro des dérivées de courbures étant caractérisé par le fait que le signe des coefficients d'extrémalité est différent aux deux sommets d'une arête [5]. De la même façon, Yoshizawa *et al.* s'appuient sur le même critère de détection, mais ils fondent leurs calculs sur une approximation de la surface par un polynôme bicubique [6]. Dans le but de réduire les opérations coûteuses d'approximation, des opérateurs discrets dédiés au calcul des coefficients d'extrémalité ont été élaborés [7].

Des méthodes reposant sur des critères géométriques autres que différentiels ont été proposées : par détection d'arêtes saillantes à partir d'un seuillage appliqué à l'*angle dièdre*⁴ [8], par croissance de régions suite à une classification des sommets selon leurs normales [9], par la prise en considération de l'aire des triangles du maillage [10].

D'autres approches par critères contextuels existent : par *saillance de maillage* pour mettre en évidence l'importance visuelle d'une région [11], par contours actifs transposés aux maillages [12], ou en utilisant la théorie de Morse pour la recherche de *points critiques* [13].

5.3.1.2 Segmentation de régions

Cette seconde famille de méthodes vise à partitionner une surface en plusieurs régions satisfaisant un certain critère (d'aire, de courbure, de planéité, etc.). Les problématiques de segmentation et de détection de lignes caractéristiques sont duales car les frontières des régions à segmenter peuvent être considérées comme étant les lignes à trouver (voir [14, 15, 16] pour des études approfondies dans ce domaine). Parmi les différents types d'approches, il est possible de citer celles qui s'appuient sur une croissance de région en respectant un critère de courbure [17] ou de planéité [18], celles reposant sur des probabilités d'appartenance [19], sur une approximation par primitives [20], voire sur des techniques de traitement d'images telles que les bassins versants étendus à la segmentation de maillages surfaciques [21].

5.3.2 Estimation des courbures sur les maillages triangulés

Les estimateurs de courbure jouent un rôle crucial pour la détection de lignes caractéristiques, et ils doivent refléter un compromis entre complexité de calcul, robustesse au bruit et qualité des résultats obtenus. Ils se divisent en deux groupes :

- D'une part les estimateurs qui utilisent une *approximation locale* du maillage par une surface continue et connue analytiquement, telle qu'un carreau de Bézier [22] ou une surface polynomiale de degré deux (approche de Hamann [23]), trois (approche de Goldfeather et Interrante [24]) voire plus [25]. Il est aussi possible de procéder à une analyse en composantes principales pour approcher localement le maillage [26].
- D'autre part les estimateurs qui reposent sur des *opérateurs discrets* et qui procèdent à une approximation du tenseur de courbures afin de déterminer les courbures et directions principales [27], ceci dans le but d'étudier les variations des normales au voisinage d'un sommet du maillage [28]. Deux contributions ont eu une influence majeure au sein des estimateurs discrets : celle de Meyer *et al.* qui propose une méthode fondée sur les cellules de Voronoï [29] et celle de Cohen-Steiner et Morvan qui utilise la théorie des cycles normaux [30].

4. Sur un maillage, l'*angle dièdre* est l'angle situé sur une arête et formé entre les normales des deux faces incidentes.

Dans [31], une étude comparative précise que les estimateurs du premier groupe produisent des résultats précis et robustes, mais parfois aux dépens de la complexité algorithmique. Le second groupe renferme quant à lui des approches développées dans le but de pallier l'inconvénient des temps de calcul trop longs.

5.3.3 Discussion et choix d'un estimateur

L'une des principales limites des méthodes par segmentation de régions est la nécessité d'utiliser un fort *a priori* sur le nombre final de ces zones, qui est généralement déterminé manuellement ou via une heuristique. De plus, la sur-segmentation est un problème classique dans ce type d'approches : il faut mettre en place d'autres traitements pour lutter contre ce phénomène, en fusionnant des régions non significatives. Pour ces raisons, nous nous sommes attelés à élaborer des solutions s'appuyant sur les propriétés géométriques du maillage permettant d'une part d'éviter le problème de sur-segmentation, et d'autre part de s'abstraire de la notion d'échelle.

Concernant le choix d'un estimateur de courbures, outil nécessaire pour caractériser les propriétés différentielles d'un maillage surfacique, il n'existe pas de consensus sur la meilleure façon de calculer les courbures sur un polyèdre. D'un côté les techniques par approximation locale sont relativement lourdes mais elles sont robustes au bruit, et par ailleurs les approches discrètes sont très sensibles à la qualité de la triangulation. Notre choix s'est porté sur l'estimateur développé par Goldfeather et Interrante [24] qui repose sur une approximation locale par un polynôme bicubique. Celui-ci représente un compromis entre robustesse et rapidité d'exécution (voir [31]).

5.4 Une première approche d'extraction de lignes par extrema de courbures

5.4.1 Introduction

Cette section développe la première approche que nous avons élaborée pour extraire des lignes caractéristiques correspondant à des objets géologiques tels que des fractures ou des limites stratigraphiques, depuis des maillages surfaciques irréguliers représentant des affleurements numériques 3D. Notre algorithme se rapproche des méthodes traditionnelles dans la mesure où il est question d'étudier la variation de la courbure pour en extraire des extrema. Ces derniers correspondent aux lignes recherchées qui longent les zones fortement concaves des affleurements. L'apport principal de notre approche est d'ajouter de la connaissance *a priori* à la phase de détection pour d'une part *filtrer* les lignes obtenues, et d'autre part pour améliorer la connectivité des lignes entre elles. En effet, deux facteurs sont à prendre en compte : l'érosion arbitraire des affleurements fait apparaître des éléments n'ayant aucune signification, et les limites stratigraphiques sont très fréquemment coupées par des fractures.

La méthode que nous proposons consiste tout d'abord en une estimation des courbures et de leurs dérivées, puis d'une extraction des lignes de ravins qui intègre un filtrage directionnel spécifique. Une phase d'amélioration des résultats vient compléter le processus en effectuant un lissage et une reconnexion des lignes.

5.4.2 Algorithme d'extraction des lignes caractéristiques

5.4.2.1 Estimation des courbures et leurs dérivées

En chaque point p du maillage, la surface est approchée par le polynôme bicubique suivant, comme proposé par [24] et en considérant le voisinage de p :

$$f(x, y) = \frac{A}{2}x^2 + Bxy + \frac{C}{2}y^2 + Dx^3 + Ex^2y + Fxy^2 + Gy^3$$

Cette expression peut être résolue par la méthode des moindres carrés (cf. [24]). La matrice de *Weingarten* est ensuite déterminée comme suit :

$$W = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$$

Les courbures et directions principales correspondent alors respectivement aux valeurs propres et aux vecteurs propres de W .

Afin d'estimer les dérivées de courbures dans le sens de leurs directions principales, il est possible d'utiliser les coefficients D, E, F et G comme il est détaillé dans [6] :

$$e = \frac{\partial k}{\partial t} = \begin{bmatrix} u^2 \\ v^2 \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} D & E \\ F & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad t = (u, v)$$

Le vecteur t désigne soit t_1 , et par conséquent l'expression ci-dessus permet d'obtenir le coefficient d'extrémalité e_1 , soit t_2 qui donne lieu au calcul du coefficient d'extrémalité e_2 .

5.4.2.2 Calcul des extrema de courbures

Afin de déterminer la position des points constituant les lignes de ravins, sur la base des coefficients d'extrémalité, chaque arête $[p_1, p_2]$ du maillage est analysée et testée selon plusieurs critères énoncés par Ohtake *et al.* dans [5] (cf. section 5.2.2, équation 5.2). En premier lieu, il faut vérifier qu'il n'y ait pas d'angle obtus entre les vecteurs $t_2(p_1)$ et $t_2(p_2)$ et, le cas échéant, inverser le signe de $e_2(p_2)$ et le sens de $t_2(p_2)$. Cette arête contient alors un sommet de ravin si la relation suivante est vérifiée :

$$k_2(p_1) < -|k_1(p_1)| \quad \text{et} \quad k_2(p_2) < -|k_1(p_2)|$$

Ensuite, un extremum de courbure est caractérisé par l'annulation de la dérivée de courbure, ce qui signifie qu'un coefficient d'extrémalité est égal à zéro. Par conséquent, le signe des coefficients d'extrémalité en p_1 et p_2 doit être différent :

$$e_2(p_1)e_2(p_2) < 0$$

Un dernier test est appliqué dans le but de savoir si la dérivée atteint un extremum le long de l'arête :

$$e_2(p_1)[(p_2 - p_1) \cdot t_2(p_1)] < 0 \quad \text{et} \quad e_2(p_2)[(p_1 - p_2) \cdot t_2(p_2)] < 0$$

Lorsque les conditions précédentes sont réunies, l'existence d'un sommet de ravin sur l'arête $[p_1, p_2]$ est vérifiée. Il reste à en calculer les coordonnées par une interpolation linéaire entre les sommets de l'arête :

$$p_{\text{ravin}} = \frac{|e_2(p_2)|p_1 + |e_2(p_1)|p_2}{|e_2(p_1)| + |e_2(p_2)|}$$

Ce procédé de détection de sommets de ravins est illustré à la figure 5.5. Ce dernier est appliqué à toutes les arêtes du maillage. Suite à cette phase, les lignes sont définies à partir des sommets de ravins en construisant un ensemble de polygones. Chaque triangle du maillage peut comporter zéro à trois sommets de ravins. Une ligne est construite s'il y a deux points de ravins détectés. Si la face triangulaire comporte trois sommets de ravins, alors ces derniers sont reliés un à un avec le barycentre de la face (voir figure 5.6).

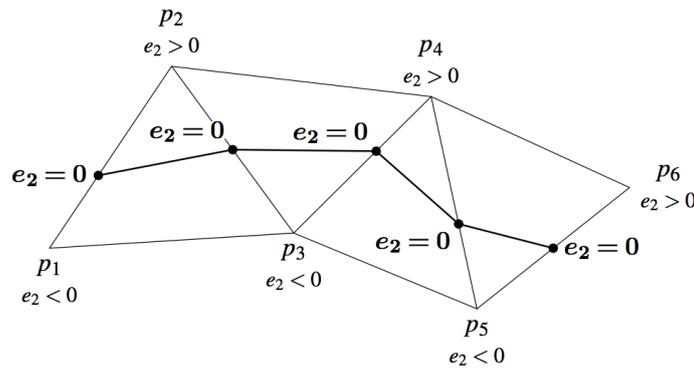


Figure 5.5. Construction des sommets de ravins.

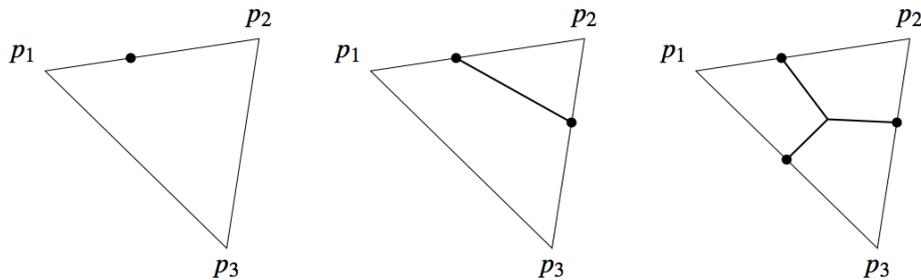


Figure 5.6. Construction des lignes de ravins selon le nombre de sommets détectés sur les faces triangulaires.

5.4.2.3 Filtrage directionnel

D'un point de vue géologique, l'intégralité des lignes obtenues ne constitue pas l'ensemble des éléments recherchés. Il est donc nécessaire d'effectuer un filtrage directionnel pour ne conserver que les lignes de ravins orientées dans une direction spécifique, celle-ci étant renseignée par l'utilisateur. Outre l'élimination des lignes qui ne sont pas conformes à une direction donnée, l'objectif est aussi d'extraire les structures peu sinueuses qui se rapportent très fréquemment à des fractures ou des limites stratigraphiques.

Jusqu'à présent, les lignes détectées correspondent à des minima de courbures et sont situées dans les zones fortement concaves du maillage. Pour un point p de la surface, les directions principales de courbures t_1 et t_2 sont contenues dans le plan \mathcal{P} orienté selon la normale n_p en p . Ainsi t_1 et t_2 indiquent respectivement la direction de la plus forte et de la plus faible variation de courbure. Dans le cas d'une surface concave, le vecteur t_2 a tendance à suivre le fond du ravin, comme illustré sur la figure 5.7. Partant de ce constat, il est concevable de s'appuyer sur ce vecteur t_2 afin de le comparer à la direction renseignée par l'utilisateur, ceci afin de réaliser un filtrage des lignes caractéristiques.

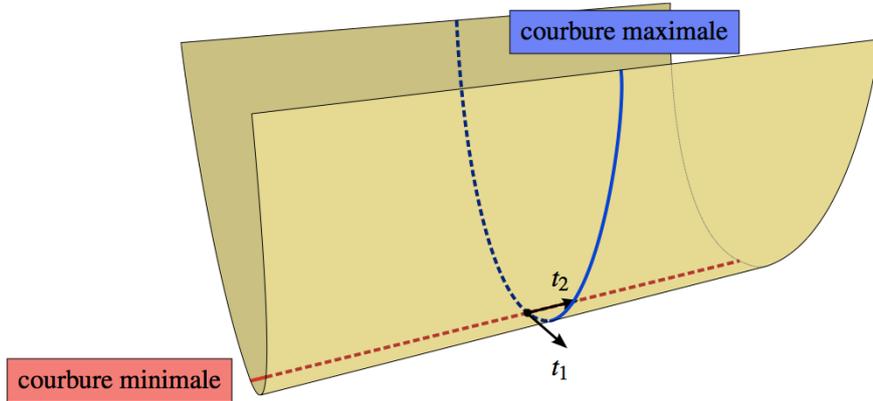


Figure 5.7. Directions principales d'une surface concave.

La méthode de filtrage directionnel proposée se compose de plusieurs étapes. Un sommet de ravin appartient à une arête $[p, q]$ du maillage. Ce sommet n'est conservé que si les deux vecteurs $t_2(p)$ et $t_2(q)$ sont colinéaires à la direction \mathcal{D} spécifiée par l'utilisateur. Dans le cas contraire, le sommet de ravin est supprimé. Cette vérification s'opère à partir d'un test sur la valeur absolue du produit scalaire entre le vecteur t_2 et \mathcal{D} . Toutefois, la direction \mathcal{D} est renseignée de façon globale sur la surface d'affleurement. Or, cette dernière n'est pas forcément plane et peut varier localement de direction. Par conséquent, il n'est pas assuré que le vecteur \mathcal{D} soit contenu dans le plan local \mathcal{P} d'un sommet, orienté selon sa normale. Dans ce cas, le test sur la valeur absolue du produit scalaire ne demeure plus un critère suffisamment discriminant pour supprimer ou conserver les lignes. Pour pallier cette difficulté, \mathcal{D} subit une rotation afin de se placer dans le plan local \mathcal{P} . Cette rotation est définie par :

$$\begin{aligned} \text{axe} &= \mathcal{D} \times n, \\ \text{angle} &= \frac{\pi}{2} - \arccos(\mathcal{D} \cdot n), \end{aligned}$$

où l'opérateur \times désigne le produit vectoriel, \cdot le produit scalaire et n la normale en un point.

Avec cette opération, le vecteur \mathcal{D} , transformé en \mathcal{D}' , est nécessairement contenu dans le plan local \mathcal{P} . Il est à noter qu'une projection du vecteur \mathcal{D} aurait pu être envisagée. Toutefois, une telle approche peut engendrer un vecteur \mathcal{D}' nul lorsque le plan local se retrouve perpendiculaire à la surface d'affleurement.

Le calcul de la valeur absolue du produit scalaire, que l'on notera α , est effectué entre \mathcal{D}' et les vecteurs t_2 des sommets p et q de l'arête sur laquelle se trouve un sommet de ravin. La figure 5.8 illustre le procédé de filtrage.

La direction \mathcal{D} est spécifiée de façon globale par l'utilisateur et correspond à l'orientation principale des structures géologiques à extraire. Toutefois, ces dernières n'étant pas complètement linéaires et pouvant avoir des changements locaux d'orientation, un seuil de tolérance T a été ajouté à la valeur de α . Déterminé par l'utilisateur, T peut varier entre 0 et $\pi/2$. Ainsi, lorsque T est égal à 0, les vecteurs t_2 et \mathcal{D}' doivent être strictement colinéaires pour qu'un sommet de ravin soit conservé lors du filtrage. Dans le cas où ce seuil est égal à $\pi/2$, tous les sommets de ravins sont retenus.

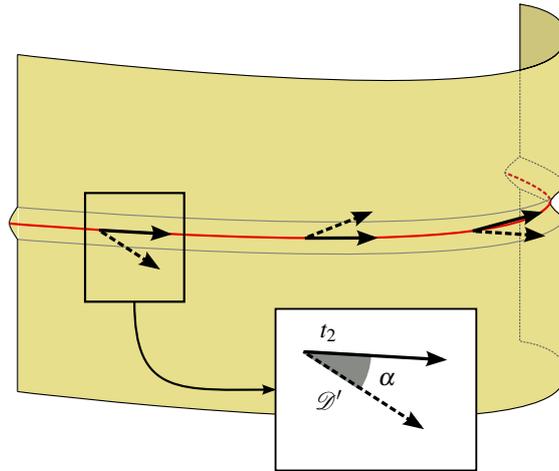


Figure 5.8. Les lignes extraites sont filtrées selon la direction principale de courbure t_2 . L'utilisateur spécifie globalement sur la surface d'affleurement une direction de recherche \mathcal{D} . Celle-ci est remplacée, par rotation, dans le repère local à chaque sommet. Enfin, le filtrage s'effectue à partir d'un seuil appliqué à la valeur absolue du produit scalaire α , calculé entre la direction principale t_2 et \mathcal{D}' , la direction transformée.

5.4.2.4 Premiers résultats et discussion

La série d'images de la figure 5.9 résume les différentes étapes de l'algorithme présenté. Deux paramètres ont une influence sur les résultats : la direction globale des objets géologiques et le seuil de tolérance accordé pour l'extraction de structures légèrement sinueuses, tous deux renseignés par l'utilisateur. Les effets de cette interaction sont illustrés par les figures 5.10 et 5.11.

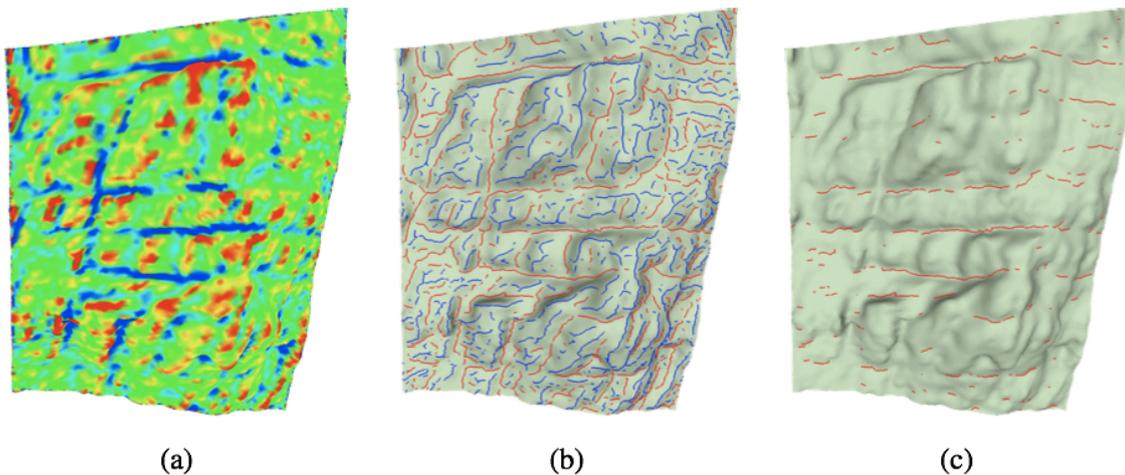


Figure 5.9. Les différentes étapes de la méthode proposée pour l'extraction d'objets géologiques sur un affleurement numérique (secteur du Pas Morta, Vercors) : (a) les estimateurs différentiels sont calculés en chaque sommet du maillage, (b) les extrema de courbures sont détectés et correspondent aux lignes de crêtes et de ravins (respectivement en bleu et en rouge), (c) la connaissance *a priori* est ajoutée, sous la forme d'un filtre directionnel, afin d'extraire lignes de ravins ne représentant que les objets géologiques et de supprimer les moins pertinentes.

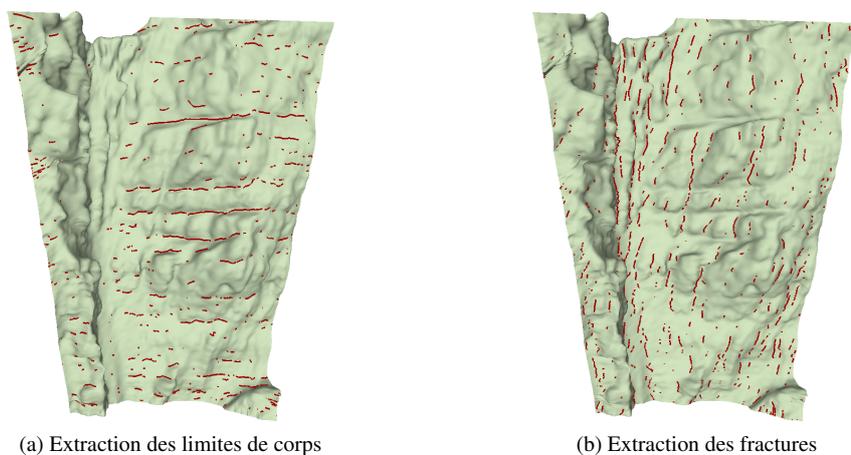


Figure 5.10. Influence de la direction de recherche au cours de l'extraction (sommet de Malaval, Vercors).

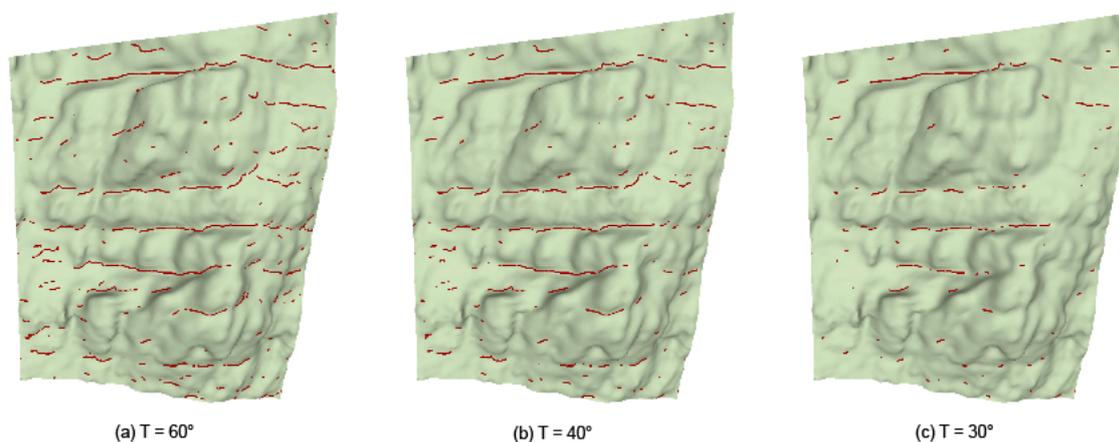


Figure 5.11. Influence du seuil de tolérance au cours de l'extraction (secteur du Pas Morta, Vercors).

Bien qu'il soit possible de déterminer de manière automatique les deux paramètres (par une analyse en composantes principales par exemple), il est intéressant de noter qu'ils sont évalués de façon contextuelle afin de laisser le contrôle à l'utilisateur. La direction de recherche est un critère visible sur l'affleurement par le géologue. Elle correspond à l'orientation globale des éléments géologiques. Le seuil de détection sert quant à lui à contraindre plus ou moins l'extraction des lignes. Il est ainsi possible d'obtenir des structures complètement rectilignes ou au contraire peu sinueuses selon les observations *in situ*.

Les résultats obtenus concordent globalement avec les éléments édités manuellement par les géologues. De plus, le temps d'exécution est très court puisqu'il faut moins d'une seconde pour traiter une surface d'environ 50000 triangles sur une machine équipée d'un processeur Intel Core 2 Duo cadencé à 2.4 Ghz et ayant 4 Go de RAM, depuis l'estimation des courbures jusqu'au filtrage des lignes. Cependant, il arrive parfois qu'un objet géologique soit incomplet ou représenté par plusieurs segments bien qu'il s'agisse d'un seul et même élément. Les principales raisons de ce problème de connectivité s'expliquent d'une part par la présence d'*ombilics*. En effet, ces points localement sphériques ou plats ont des courbures et des directions principales égales. Par conséquent,

en ces points, il est impossible de distinguer les courbures maximales des courbures minimales, et donc de différencier les crêtes et les ravins lorsqu'ils existent. Ces résultats se retrouvent d'autre part altérés du fait de la forte complexité des surfaces d'affleurements et du bruit inévitablement lié au système d'acquisition.

5.4.3 Amélioration des résultats

Diverses optimisations sont possibles dans le but d'augmenter d'une manière générale la connectivité et donc de relier les segments décrivant le même objet géologique. La méthode proposée dans cette section repose essentiellement sur des estimateurs différentiels de troisième ordre obtenus à partir des coordonnées, des normales et des courbures principales des sommets. Elles sont sensibles au bruit et peuvent engendrer des calculs imprécis et des artefacts qu'il est essentiel de minimiser. Il est alors envisageable d'appliquer un procédé en amont afin d'atténuer au mieux les erreurs.

5.4.3.1 Pré-traitement de lissage

Les maillages traités sont construits à partir d'acquisitions LIDAR, et il existe un bruit inhérent, comme pour toute technologie d'acquisition, du fait des erreurs de mesure. Appliquer un lissage permet alors d'atténuer les impacts de ces imprécisions. Pour améliorer la qualité du maillage sans en modifier la topologie (pour qu'aucun sommet ne soit ajouté ou retiré durant le procédé) et pour réduire les signaux de haute fréquence de la surface, nous nous sommes tournés vers un *lissage laplacien*. Sa faible complexité algorithmique ainsi que sa capacité à minimiser le bruit font de lui un filtre très efficace et couramment employé.

L'opérateur discret du filtrage laplacien se présente sous la forme :

$$p' = p + \lambda \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \sum_{i=1}^n w_i (q_i - p)$$

avec $0 \leq \lambda \leq 1$, $\{q_1, \dots, q_n\}$ le voisinage de p , et w_i les poids strictement positifs de chacun des voisins q_i . Le paramètre λ impose une contrainte sur le déplacement du sommet traité. Chaque sommet est déplacé itérativement selon la direction du laplacien.

Plutôt que de travailler, par exemple, sur les normales, nous avons choisi d'appliquer un lissage directement sur les coordonnées des sommets, pour qu'il soit ainsi répercuté sur le calcul des normales et des courbures. Malgré tout, une fois les courbures obtenues, les sommets sont replacés à leurs positions initiales et les normales sont recalculées afin de contraindre la détection d'objets géologiques à la géométrie de la surface d'affleurement.

En considérant plusieurs critères décrits selon l'ordre d'importance suivant :

1. concordance géologique,
2. connectivité des lignes,
3. position correcte,
4. réduction d'artefacts,

il en ressort que l'approche de Desbrun *et al.* [32] pour le calcul des poids w_i reposant sur les co-tangentes permet de limiter les distorsions qui peuvent apparaître sur les maillages triangulés irréguliers, en comparaison d'autres approches traditionnelles que nous avons implémentées, notamment celle de Fujiwara [33] et celle de Taubin [34]. La connectivité est améliorée, ce qui permet de détecter des objets géologiques plus longs se rapprochant ainsi de ceux qui peuvent être observés à l'affleurement. Les résultats obtenus après un filtrage de type laplacien montrent à la fois une

connectivité accrue ainsi que des lignes parasites supprimées. Toutefois, il arrive encore que des lignes ne soient pas connectées bien qu'elles devraient l'être. Pour pallier ce problème, nous avons proposé une seconde approche visant à obtenir de meilleurs résultats.

5.4.3.2 Post-traitement de reconnexion par cônes de vision

Yoshizawa *et al.* [6] ont proposé une méthode permettant de joindre les lignes déconnectées pour rassembler les segments décrivant une seule et même structure. En chaque point de terminaison d'un segment, le voisinage de premier ordre est analysé et s'il existe un autre point terminal et que des contraintes sur les angles formés par les segments sont respectées, alors ils sont rassemblés. Cette procédure reste cependant limitée au voisinage de degré 1 et elle est de plus dépendante de la triangulation de la surface (voir figure 5.12).

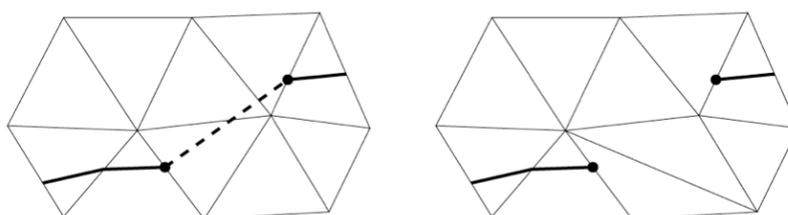


Figure 5.12. Illustration du post-traitement de reconnexion proposé dans [6] : sur la gauche, les lignes peuvent être reconnectées, mais l'aspect local de ce processus et sa dépendance à la triangulation ne permettent pas de relier les deux segments sur le schéma de droite.

Pour s'affranchir de la triangulation, nous proposons une approche de reconnexion s'appuyant sur des *cônes de vision*. Un cône est associé à chaque point de terminaison d'une ligne caractéristique. Sa hauteur est infinie, son demi-angle au sommet est fixé expérimentalement à une valeur de $\pi/6$ et son orientation est celle du dernier segment de la polyligne (cf. figure 5.13).

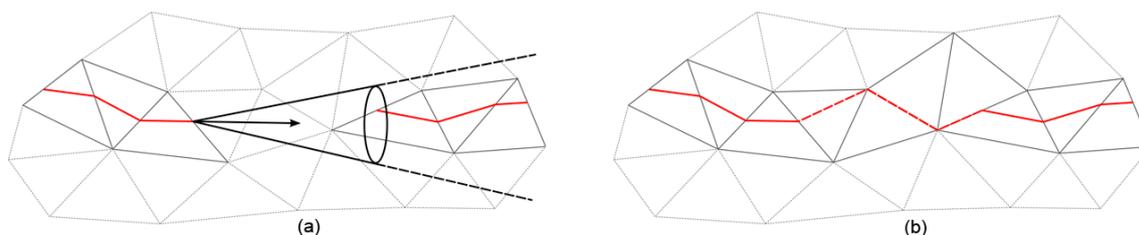


Figure 5.13. Procédure de reconnexion de lignes par cône de vision : (a) orientation du cône de vision selon la direction du segment terminal d'une ligne ; (b) reconnexion des deux lignes par calcul du plus court chemin.

Chaque cône de vision est analysé : lorsqu'un point terminal d'une ligne se trouve dans l'un des cônes de vision, les lignes peuvent être reconnectées. Si plusieurs points se trouvent dans le cône de vision, le point le plus proche est retenu. Afin de rejoindre correctement deux lignes par un ensemble de segments définis le long du maillage, l'algorithme de Dijkstra de calcul du plus court chemin dans un graphe connexe est utilisé [35] (les poids des arcs sont définis à partir des longueurs des arêtes).

La méthode de reconnexion développée, qui repose sur une détection de lignes caractéristiques par extrema de courbures, permet d'obtenir des résultats satisfaisants comme le montre la figure 5.14, et le réseau de lignes extraites reste en cohérence avec les observations géologiques.

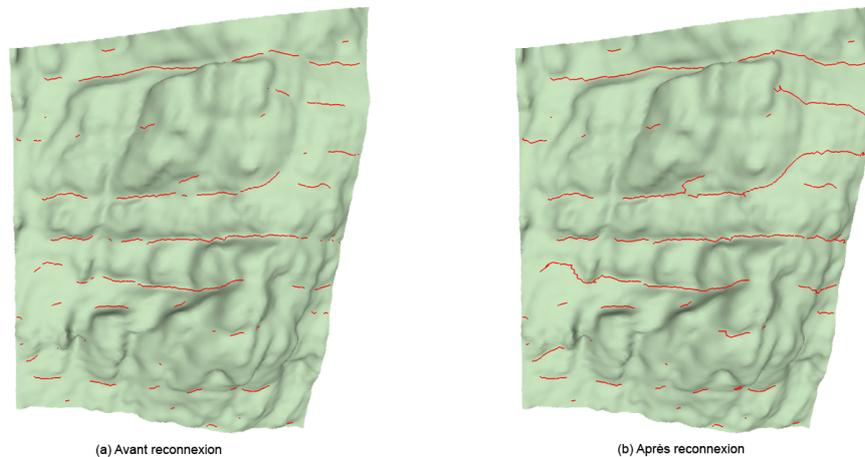


Figure 5.14. Résultats obtenus après la phase de reconnexion reposant sur les *cônes de vision*.

5.4.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté une première approche visant à extraire les objets géologiques depuis des surfaces triangulées issues de données d’affleurements de type LIDAR. La complexité, la rugosité des affleurements ainsi que le bruit inhérent aux modalités d’acquisition rendent cette extraction difficile. Les courbures et les directions principales ont permis de détecter les lignes de ravins. Dans le but de ne retenir que les objets recherchés, à savoir les limites stratigraphiques et les fractures, nous avons intégré un filtrage directionnel reposant sur deux paramètres renseignés par l’utilisateur : l’orientation globale des structures et la valeur du seuil de tolérance afin de contraindre la détection à des structures linéaires ou peu sinueuses. Cependant, les propriétés différentielles de troisième ordre étant sensibles au bruit, il est nécessaire d’une part de lisser les données, puis d’autre part de reconnecter les segments qui correspondent à une seul objet géologique, même en présence de points ombilics qui sont localement sphériques ou plats. Pour cela, nous avons proposé d’ajouter un pré-traitement par filtrage laplacien, puis d’utiliser une méthode de reconnexion s’appuyant sur la notion de *cônes de vision*.

Bien que les résultats obtenus correspondent à la géologie observée sur les affleurements, quelques limites apparaissent : des problèmes de connectivité subsistent malgré les traitements supplémentaires mis en œuvre, et de plus il est difficile de générer naturellement des intersections entre différentes lignes. Cette première approche ne permet pas, par exemple, de refléter le cas où une fracture coupe plusieurs limites stratigraphiques.

De ce fait, la section qui suit présente une nouvelle approche plus robuste de détection d’objets géologiques, reposant sur des propriétés différentielles plus fiables et sur des opérateurs morphologiques afin de conserver la connectivité des lignes extraites.

5.5 Détection de lignes caractéristiques par labellisation des sommets et squelettisation sur la surface

5.5.1 Motivations

Malgré les améliorations apportées à la méthode proposée dans la section précédente pour limiter les instabilités et augmenter la connectivité des lignes, le fait de travailler sur des estimateurs de troisième ordre, c'est-à-dire sur la *variation* des courbures, reste handicapant. Pour réduire la sensibilité au bruit, l'approche développée dans cette section permet de diminuer l'étude différentielle du maillage surfacique d'un degré, en ne s'appuyant que sur les courbures. Pour ce faire, l'idée repose sur le principe d'une squelettisation d'une zone candidate répondant à un critère de courbure simple. En sortie, les lignes obtenues sont des représentants pertinents des zones de forte concavité et donc des objets géologiques à extraire. Les deux étapes du processus sont :

- un marquage des sommets du maillage afin de caractériser les points candidats constituant un objet géologique ;
- une extraction des lignes caractéristiques à partir d'opérateurs topologiques dans le but de garantir une forte connectivité.

5.5.2 Marquage des sommets

L'aspect concave ou convexe d'une surface peut être caractérisé uniquement par des propriétés du second ordre : les courbures moyenne H et gaussienne K . Les différents types de formes en un point régulier en fonction de ces deux quantités est présenté à la figure 5.3. Par conséquent, il est possible de s'appuyer sur une telle information pour réaliser l'extraction d'objets géologiques.

Les structures recherchées sont situées dans les parties concaves des surfaces d'affleurement. Ces zones correspondent aux trois types de formes de la ligne du bas de la figure 5.3, c'est-à-dire lorsque la courbure moyenne est positive. La figure 5.15 illustre les différentes formes existantes pour une courbure moyenne positive.

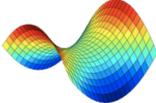
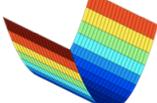
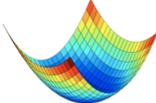
	$K < 0$	$K = 0$	$K > 0$
$H > 0$	<p><i>saddle valley</i></p> 	<p><i>valley</i></p> 	<p><i>pit</i></p> 

Figure 5.15. Les types de formes recherchés pour caractériser les zones de ravins.

Les sommets concaves du maillage surfacique font potentiellement partie d'un objet géologique recherché. Il est possible de marquer ces sommets p_i de la façon suivante :

$$label(p_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } H_{p_i} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Cette labellisation génère plusieurs sous-ensembles de sommets connexes qui définissent des régions d'intérêt. Cette étape permet de transformer l'information différentielle de courbure en une

carte binaire plaquée sur le maillage. Toute la difficulté réside désormais dans la transformation de ces zones en lignes caractéristiques. En géométrie discrète, il s'agit d'une opération connue sous le nom de *squelettisation*. Elle vise à représenter, de façon la plus fidèle qui soit, un objet de dimension n par un ensemble d'éléments de dimensions $n - 1$. Par conséquent, le squelette d'un volume 3D sera un ensemble de surfaces, celui d'une surface 2D sera un ensemble de lignes, etc.

Le squelette est un descripteur géométrique, morphologique (il donne l'*allure globale* de l'objet) et topologique robuste. Introduit par Blum en 1967 [36], de nombreuses définitions ont été proposées depuis (se référer à [37] pour une étude du sujet).

A première vue, il n'y a aucune raison pour que la position du squelette d'une région concorde pleinement avec celle d'une ligne à extraire par les méthodes classiques de détection. Les sommets marqués composant les régions d'intérêt correspondent tous à des zones concaves de l'affleurement et des points constituant potentiellement des objets géologiques. Toutefois, la représentation la plus fidèle de ces régions d'intérêt reste le squelette car il s'avère être un descripteur robuste tenant compte à la fois de la forme globale et surtout de sa topologie. Il garantit également une forte connectivité des résultats répondant ainsi au but premier de la méthode développée. D'un point de vue purement visuel, ce choix est justifié même si une ligne ne concorde pas totalement avec la définition mathématique d'une ligne de courbure. En somme, il est préférable de négliger quelque peu la position des lignes au profit de la connectivité des résultats puisque les traitements postérieurs de reconnexion restent des procédés très contraints. Par ailleurs, dès lors que la connectivité est assurée, les lignes peuvent être repositionnées par des algorithmes d'optimisation.

Les données d'affleurements traitées sont représentées par des surfaces triangulées irrégulières. Les régions d'intérêt surfaciques (constituées de triangles) définies lors du processus de marquage correspondent à un ensemble de 2-variétés plongées dans l'espace 3D. Celles-ci doivent alors être amincies par une squelettisation afin d'obtenir les lignes caractérisant fidèlement leur géométrie et leur topologie. Généralement, les méthodes de squelettisation s'appliquent sur des données régulières telles que des grilles de pixels pour la 2D ou de voxels pour la 3D. Avant de pouvoir extraire les lignes depuis les régions d'intérêt, il est donc nécessaire de passer une étape de paramétrisation pour *déplier* les régions d'intérêt en grilles régulières 2D.

5.5.3 Approche par paramétrisation

5.5.3.1 Paramétrisation des régions

Une *paramétrisation* $\chi(u, v)$ d'une surface S plongée dans \mathbb{R}^3 définit une correspondance bijective entre S et un domaine paramétrique D de \mathbb{R}^2 :

$$\chi(u, v) = \begin{pmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{pmatrix} \text{ avec } (u, v) \in D.$$

De nombreuses applications comme le remaillage, le *morphing* ou encore l'imagerie cérébrale reposent sur l'utilisation de la paramétrisation de surfaces. L'objectif premier des méthodes de paramétrisation reste cependant le plaquage de textures sur des surfaces afin d'améliorer la richesse du rendu de modèles polyédriques. Cette application nous intéresse plus particulièrement car le but de notre approche est de *déplier* les régions d'intérêt pour obtenir une représentation régulière. Ainsi, à chaque sommet (x, y, z) d'une région d'intérêt, des coordonnées paramétriques (u, v) vont être associées.

La paramétrisation de maillages n'est pas un problème trivial car il faut minimiser les distor-

sions engendrées, privilégier la conservation des angles, des aires ou des longueurs selon le type de données à traiter et l'application finale (se référer à [38], [39] ou [40] pour des études approfondies du sujet).

Dans notre cas, nous souhaitons paramétriser les régions d'intérêt afin d'obtenir une représentation régulière dans le but d'extraire facilement le squelette de chacune de ces régions. Or, nous ne disposons d'aucun *a priori* sur ces régions si ce n'est qu'elles sont concaves. Par conséquent, il est nécessaire de choisir une paramétrisation qui minimise au mieux les distorsions angulaires. Notre choix s'est porté sur la méthode *ABF++* proposée par [41].

Une fois que les sommets sont marqués comme concaves, chaque région d'intérêt est isolée indépendamment par un parcours en profondeur. Les régions sont ensuite paramétrisées pour définir une représentation régulière de chacune d'elles. Il reste ensuite à extraire le squelette depuis ces grilles régulières.

5.5.3.2 Extraction des lignes caractéristiques

Suite à l'étape de labellisation, les informations de courbures ont été transformées en une carte binaire qui décrit l'appartenance ou non d'un sommet à une zone concave et donc potentiellement à un objet géologique. Nous avons choisi le squelette comme descripteur de forme afin de caractériser une région d'intérêt par une ligne décrivant sa topologie et sa géométrie. Pour le calcul du squelette, de nombreuses méthodes existent : par l'extraction de maxima locaux d'une carte de distance [42], par le diagramme de Voronoï [43] ou par simulation d'un feu de prairie [44]. Une fois le squelette extrait de la forme, des *branches* non significatives peuvent apparaître et un algorithme d'*ébarbulage* peut alors être appliqué pour les supprimer sans altérer la topologie et la connectivité (voir figure 5.16).

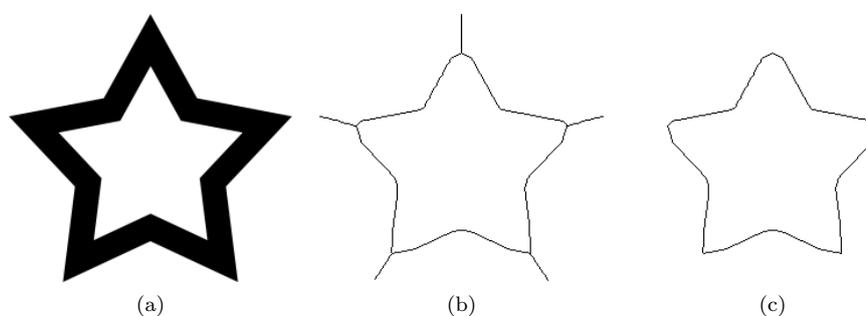


Figure 5.16. La forme initiale (a), son squelette avant (b) et après (c) la phase d'ébarbulage.

Toutefois, une famille d'approches permettant de préserver la topologie de l'objet initial repose sur la notion d'*amincissement homotopique*. Il s'agit en réalité d'algorithmes itératifs *érodant*, passe par passe, l'objet tout en tenant compte de la topologie. La méthode présentée dans [45] est celle communément utilisée pour le calcul de squelette dans une grille régulière 2D. Elle repose sur un traitement en deux passes qui supprime les points selon plusieurs conditions. Par convention, un pixel est à 1 lorsqu'il fait partie de l'objet et 0, dans le cas contraire. Le voisinage d'un pixel P_i est quant à lui défini par une matrice 3×3 telle que :

N_7	N_0	N_1
N_6	P_i	N_2
N_5	N_4	N_3

Lors de la première passe de l'algorithme, un pixel P_i doit être supprimé lorsqu'il satisfait les conditions suivantes :

- (a) $2 \leq B(P_i) \leq 6$,
- (b) $A(P_i) = 1$,
- (c) $N_0 \cdot N_2 \cdot N_4 = 0$,
- (d) $N_2 \cdot N_4 \cdot N_6 = 0$,

où $B(P_i)$ correspond au nombre de voisins de P_i appartenant à l'objet et $A(P_i)$, au nombre de transitions 0-1 dans l'ensemble ordonné des voisins de P_i $\{N_0, N_1, N_2, \dots, N_7\}$. La seconde et dernière passe de l'algorithme consiste en une modification des conditions (c) et (d) qui deviennent alors :

- (c') $N_0 \cdot N_2 \cdot N_6 = 0$,
- (d') $N_0 \cdot N_4 \cdot N_6 = 0$.

La figure 5.17 montre quelques exemples d'utilisation de la méthode proposée dans [45].

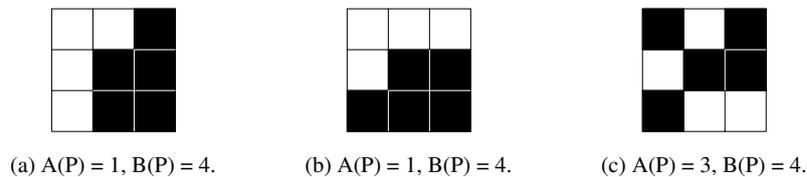


Figure 5.17. Sur l'illustration (a), le pixel central lors de la première passe est supprimé car il satisfait les conditions précédemment évoquées. Le pixel central de l'illustration (b) sera quant à lui retiré lors de la seconde passe de l'algorithme. Enfin, le pixel central de l'illustration (c) est conservé car le nombre de transitions est différent de 1.

Plusieurs améliorations de l'algorithme originel ont été proposées, notamment une version à partir de masques [46]. Nous nous sommes appuyés sur cette dernière, plus rapide et plus robuste, pour réaliser l'étape de squelettisation afin d'extraire les lignes caractéristiques depuis les régions d'intérêt paramétrisées.

Suite à cette phase de squelettisation, la fonction réciproque χ^{-1} permet de passer de l'espace 2D à l'espace 3D afin de plaquer les lignes obtenues sur le maillage.

5.5.3.3 Discussion

La figure 5.18 illustre les étapes de l'algorithme proposé. Les régions d'intérêt définies par les sommets marqués correspondent potentiellement à des structures géologiques. De plus, l'utilisation du squelette pour représenter chaque région s'avère être un choix pertinent étant donné qu'il caractérise à la fois la géométrie et la topologie.

La connectivité des lignes extraites est élevée, ce qui permet à la fois de décrire un objet géologique par une seule ligne et de générer des intersections entre ces lignes. Cependant, la position de certains éléments détectés n'est pas toujours adéquate à cause d'une mauvaise estimation des propriétés différentielles ou d'une distorsion trop importante lors de la paramétrisation. De plus, les régions d'intérêt doivent être nécessairement *développables*. Il arrive parfois que cette étape de paramétrisation ne converge pas dans le cas de surface à topologie trop complexe (notamment celles comportant des trous). Un autre inconvénient majeur concerne le temps d'exécution : la méthode de paramétrisation est non-linéaire et augmente de ce fait la complexité algorithmique de l'approche.

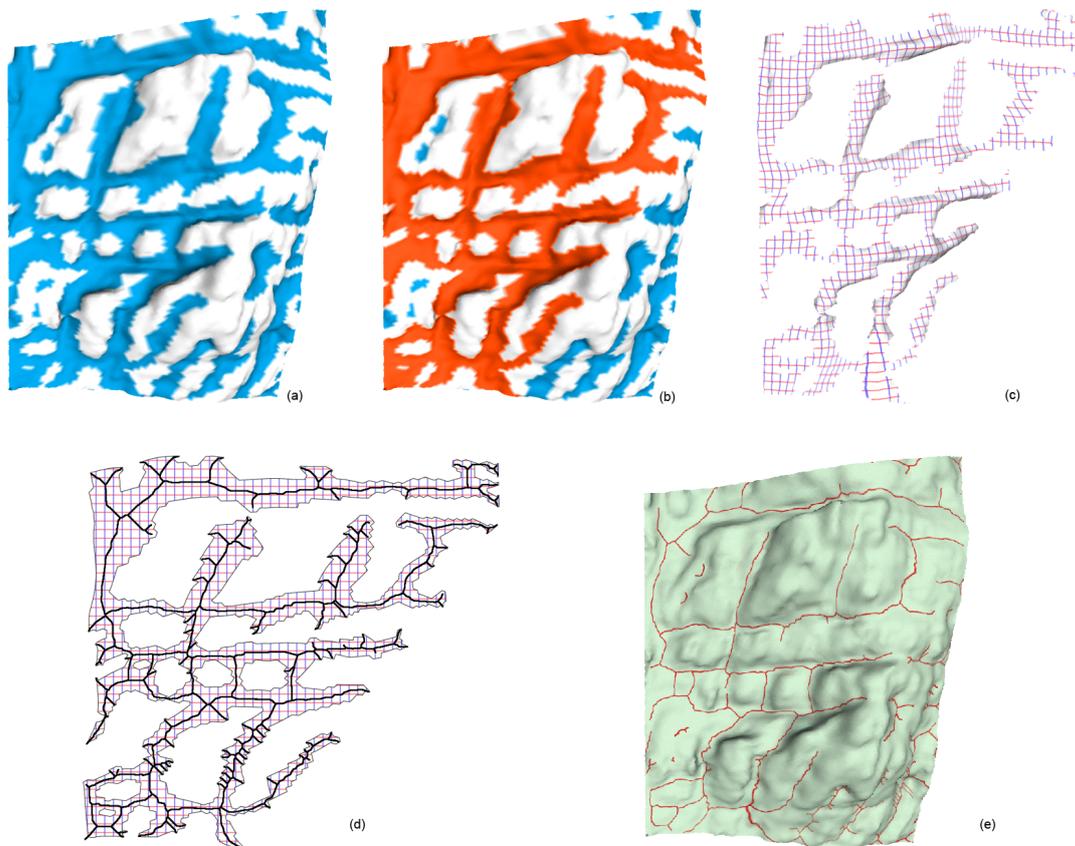


Figure 5.18. Les étapes de l’algorithme s’appuyant sur la paramétrisation puis la squelettisation de zones d’intérêt : marquage des régions (a), prise en compte d’une zone (b), paramétrisation (c), squelettisation (d) et résultat obtenu (e).

Les points soulevés nous ont alors poussés à définir un nouvel opérateur de squelettisation directement applicable aux maillages triangulés et non réguliers. Cette solution est détaillée dans la section qui suit.

5.5.4 Approche par squelettisation directe sur le maillage

5.5.4.1 Squelettisation des régions

Très peu de travaux concernant la squelettisation de maillages surfaciques, plongés dans l’espace 3D, ont été développés. Toutefois, dans les travaux de Rössl *et al.*, les auteurs abordent le problème de détection de lignes caractéristiques d’une façon identique à la nôtre. Ils définissent un procédé d’amincissement itératif reposant sur un classement des sommets et un opérateur de squelettisation [4].

L’algorithme présenté par Rössl *et al.* organise les sommets selon trois classes : *center*, *disk* et *complex*. Soit R , une région définie à partir d’un sous-ensemble de sommets connexes du maillage et $\mathcal{V}(p_i)$, le voisinage ordonné d’un sommet p_i . Un sommet p_i est noté comme *center* si et seulement si :

$$\mathcal{V}(p_i) \subseteq R$$

Dans ce cas, tous les sommets de l'ensemble $\mathcal{V}(p_i)$ sont classés comme *disk*. D'un point de vue topologique, un sommet classé comme *disk* est équivalent à un point *simple* [47], c'est-à-dire un point qui ne modifie pas la topologie de l'objet s'il est supprimé ou ajouté.

Enfin, la dernière catégorie marque les sommets comme *complex* lorsque :

$$C(p_i) \geq 4$$

où $C(p_i)$ exprime la *complexité* du sommet p_i . Celle-ci est déduite à partir du nombre de *transitions* qu'il existe au sein du voisinage de p_i . À l'instar des définitions liées à la squelettisation en 2D, une *transition* existe lorsque deux sommets consécutifs, q_i et q_{i+1} , ont un marquage différent :

$$\text{label}(q_i) \neq \text{label}(q_{i+1})$$

Les ensembles obtenus à l'issue de cette classification sont alors marqués S_{disk} , S_{center} et $S_{complex}$ pour les sommets respectivement identifiés comme *disk*, *center* et *complex*.

L'opérateur final de squelettisation Sk défini par Rössl *et al.* repose donc sur les trois définitions introduites précédemment. Il vise à supprimer les sommets *disk* aux frontières de l'objet et peut s'écrire en d'autres termes de la manière suivante :

$$Sk(R) = R \setminus (S_{disk} \cap \overline{S_{complex} \cup S_{center}})$$

Cet opérateur est appliqué itérativement jusqu'à idempotence pour obtenir le squelette final Sk_R de la région surfacique R .

Un point négatif non négligeable de cet algorithme est qu'il est limité à des maillages *réguliers*. Les figures 5.19 et 5.20 montrent les résultats obtenus par une telle approche appliquée à des maillages réguliers et non réguliers. La rupture de la connectivité des lignes peut survenir pour certaines configurations à cause des sommets *disk* qui peuvent évoluer en une classe différente et ainsi modifier la topologie du squelette. Une autre limite de cet algorithme se produit lors de l'ébarbulation : les sommets terminaux du squelette sont alors supprimés, et lorsque l'ensemble R ne contient aucun sommet *center* et *complex*, alors tous les sommets sont éliminés. Ce cas est illustré à la figure 5.21. Par conséquent, nous avons adapté et modifié cette approche afin de répondre à la problématique de squelettisation des maillages *non réguliers*.

La première modification de l'algorithme concerne les classes. En n'utilisant que les trois classes *disk*, *center* et *complex* définies précédemment, certains sommets pouvaient ne pas être marqués. Pour cette raison, nous proposons d'ajouter une quatrième classe *outer* qui regroupe l'ensemble de tels sommets. Ainsi, une région R est définie de la façon suivante :

$$S_{outer} = R \setminus (S_{disk} \cup S_{center} \cup S_{complex})$$

En outre, une priorité est définie entre les différentes classes. De ce fait, un sommet marqué comme *disk* ne peut évoluer qu'en sommet de type *center*, *complex* ou *outer*. Concernant les autres classes, leur priorité est considérée comme équivalente.

L'opérateur de squelettisation de Rössl *et al.* repose sur un procédé d'amincissement. Les sommets *disk* du bord de l'objet sont retirés itérativement. Toutefois, il arrive que certains points soient effacés bien qu'appartenant au squelette final. Dans ce cas, le squelette ne caractérise donc plus la topologie de l'objet. La figure 5.22 illustre ce problème : une fois les sommets P_1 et P_2 supprimés, le squelette n'est plus connecté à cet endroit même si ces points ont un sens topologique.

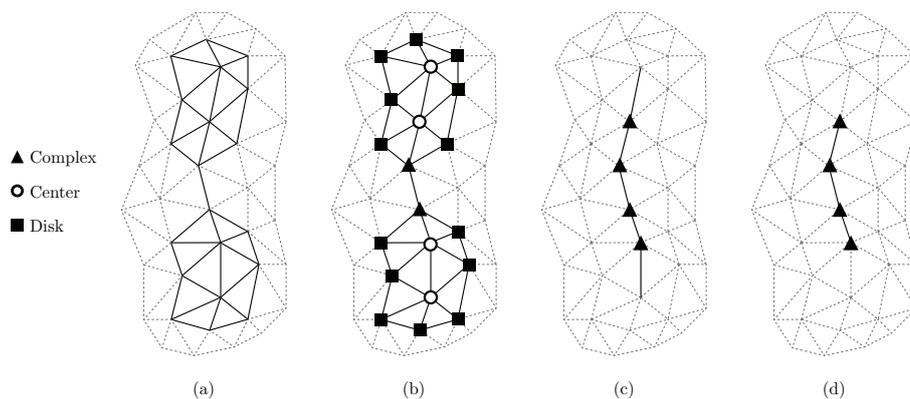


Figure 5.19. Illustration de l’algorithme de Rössl *et al.* : de gauche à droite, un ensemble de sommets est isolé (a), chaque sommet est marqué en fonction de la classe à laquelle il appartient (b), puis l’opérateur de squelettisation est appliqué jusqu’à idempotence (c) et un ébarbulage est effectué pour supprimer les petites branches (d).

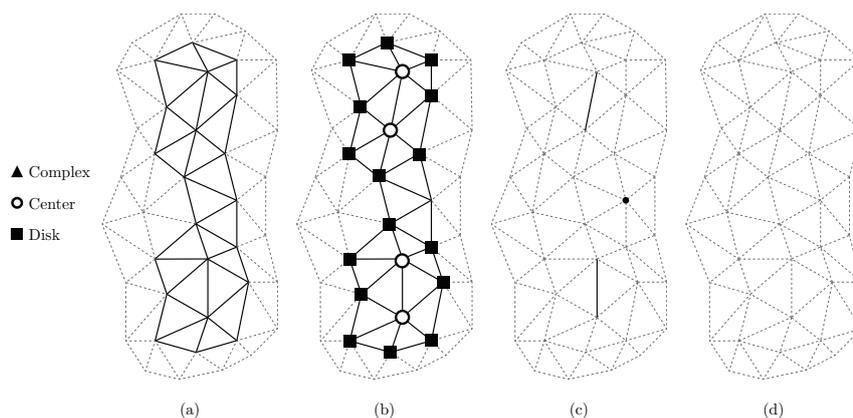


Figure 5.20. Exemple d’un résultat problématique de l’approche de Rössl *et al.* : tous les sommets *disk* sont supprimés, ce qui conduit à une rupture de la topologie du squelette final. De gauche à droite : l’ensemble de points candidats (a), affectation des sommets aux différentes classes (b), application de l’opérateur de squelettisation (c) et ébarbulage du squelette (d).

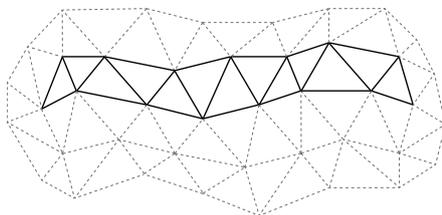


Figure 5.21. Sur cet exemple, aucun sommet n’est marqué à cause de la configuration particulière de l’ensemble R . D’après la définition de Rössl *et al.*, le squelette correspond exactement à R et ne contient aucun sommet *complex*. Ainsi, le résultat final sera vide car l’opérateur d’ébarbulage ne conserve que les sommets *complex*.

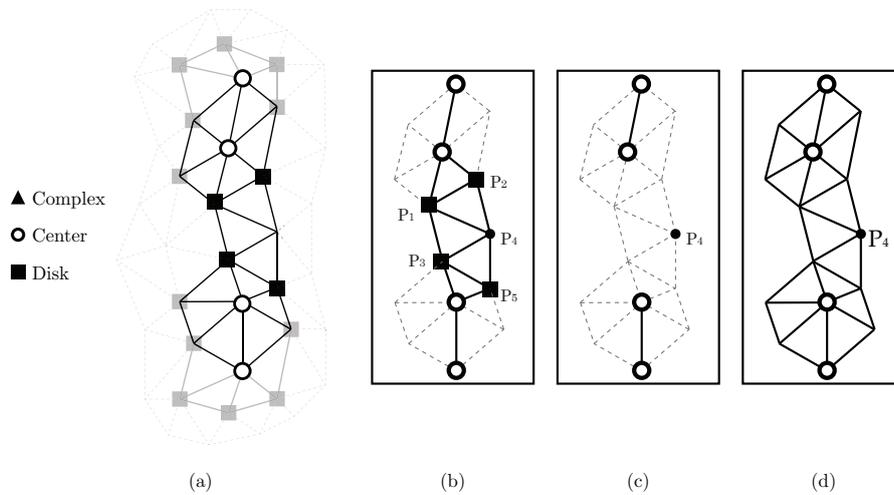


Figure 5.22. Tous les sommets sont classés d'après la définition de Rössl *et al.* (a). Au cours de l'exécution de l'algorithme de squelettisation, tous les sommets *disk* sont supprimés (b) bien que certains caractérisent la topologie de la région (c). Le résultat obtenu est un squelette dont la topologie a été altérée (d).

Ainsi, afin de corriger ce biais, nous proposons une seconde modification de l'algorithme original. Lors de la squelettisation, il n'est pas nécessaire de supprimer tous les sommets *disk*. Un sommet peut changer de classe suite à la suppression de certains sommets de son voisinage. Dès lors, avant de supprimer un sommet, il est essentiel de vérifier si ce dernier n'évolue pas en une autre classe. L'opérateur de squelettisation se résume alors à l'algorithme 5.2.

```

ENTREE : Région  $R$  définie à partir d'un sous-ensemble de sommets du maillage
Répéter jusqu'à idempotence
  Pour chaque sommet  $p_i \in R$  faire
    Si  $p_i$  est un sommet disk alors
      • Calculer la complexité du sommet  $p_i$ 
      • Si la classe de  $p_i$  ne change pas alors
        Supprimer  $p_i$ 
SORTIE : Squelette de  $R$ 

```

Algorithme 5.2. Squelettisation d'une région.

La figure 5.23 présente les différentes étapes de l'opérateur de squelettisation. L'étape de mise à jour des sommets est illustrée par la figure 5.24.

Pour garantir un squelette d'épaisseur nulle, notamment lorsque la région n'est composée que de sommets de type *outer*, une étape supplémentaire de nettoyage est ajoutée. Le squelette ne doit en effet contenir que deux types de sommets pour ne pas être « épais » :

- des sommets de classe *outer* n'ayant qu'un seul voisin *complex*, composant les nœuds terminaux des branches du squelette ;
- des sommets de classe *complex* constituant les nœuds internes des branches du squelette.

Dès lors, pour obtenir le squelette final, il est nécessaire dans un premier temps de supprimer itérativement les sommets *outer* ayant plus de deux sommets marqués. Puis, dans un second temps, les sommets *outer* possédant plus d'un sommet marqué sont éliminés.

L'algorithme de squelettisation proposé permet d'obtenir un squelette d'une région définie sur un maillage non structuré, ce qui n'était pas le cas avec l'approche décrite par Rössl *et al.*

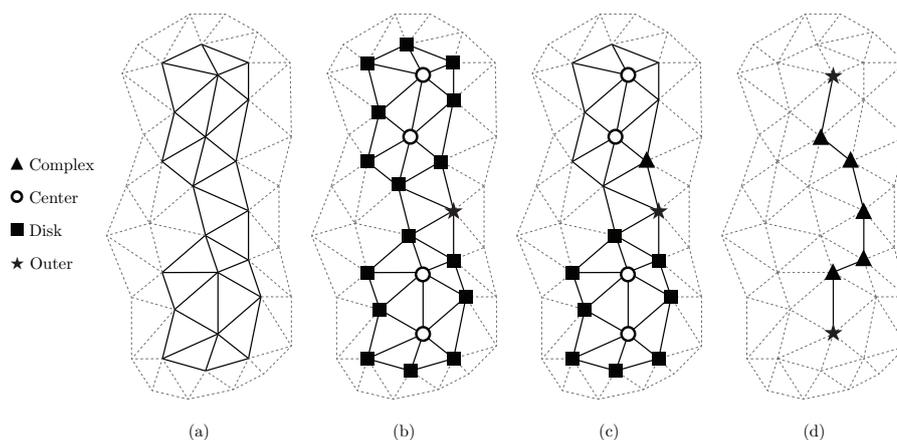


Figure 5.23. Illustration de l'approche proposée. A présent, les sommets sont rangés en quatre classes (b), et au cours de l'opération de squelettisation, une phase de mise à jour peut modifier la classe d'un sommet (c). Le squelette obtenu est connexe et de même topologie que la région R (d).

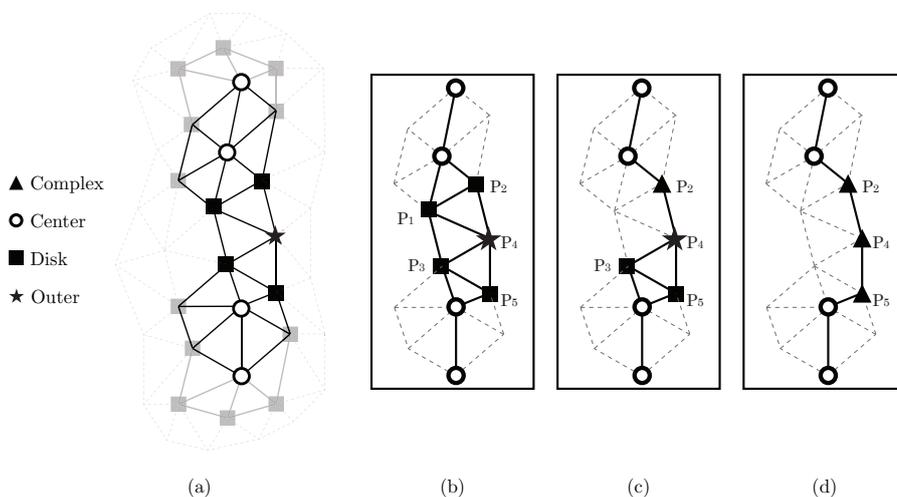


Figure 5.24. Les sommets sont tout d'abord marqués (a), et les sommets *disk* sont supprimés (b) après vérification de leurs classes (c). Lors de la suppression de P_1 et de la phase de mise à jour, la classe de P_2 change de *disk* à *complex* et celle de P_4 de *outer* à *complex*. Ces deux sommets ne sont donc pas supprimés, le squelette obtenu est connexe et il caractérise correctement la topologie de la région R (d).

5.5.4.2 Extraction des lignes caractéristiques

Le squelette calculé par la méthode proposée précédemment permet de garantir la topologie et donc de décrire de façon robuste une région. Le procédé de détection de lignes caractéristiques est décrit dans l'algorithme 5.3.

```

ENTREE : Maillage  $M$ 
Pour chaque sommet  $p_i \in M$  faire
    • Calculer la courbure moyenne  $H_{p_i}$  du sommet  $p_i$ 
    • Marquer  $p_i$  à 1 si  $H_{p_i} > 0$ 
Isoler l'ensemble des régions d'intérêt de  $M$  par un parcours en profondeur
Pour chaque région  $R_i \in M$  faire
    • Appliquer l'algorithme de squelettisation sur  $R_i$ 
SORTIE : Lignes caractéristiques de  $M$ 

```

Algorithme 5.3. Détection des lignes caractéristiques sur un maillage.

La figure 5.25 illustre les résultats obtenus sur des maillages réguliers, hétérogènes ou irréguliers. L'entité résultante correspond à ce que l'on peut attendre d'un squelette, elle est un descripteur fiable de la géométrie et de la topologie de l'ensemble initial R .

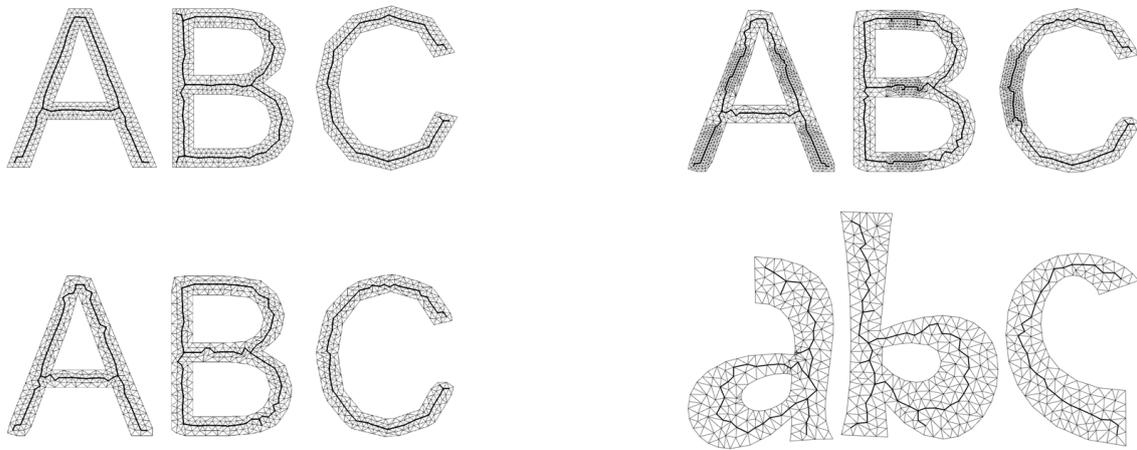


Figure 5.25. Application de notre algorithme de squelettisation sur une triangulation 3D régulière (en haut à gauche), sur une triangulation 3D hétérogène (en bas à gauche) et sur des triangulations irrégulières (colonne de droite).

La figure 5.26 montre les résultats produits lorsque la méthode est appliquée à des données d'affleurements numériques, en comparaison avec deux approches de détection de lignes (Yoshizawa *et al.* [6] et DeCarlo *et al.* [48]). Avec les méthodes traditionnelles, le problème principal réside dans la préservation de la connectivité au cours de l'extraction. Il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement *a posteriori* afin de compléter et reconnecter certains éléments.

Dans notre cas, la principale contrainte concernant la connectivité est respectée du fait des propriétés de l'opérateur de squelettisation proposé. De plus, il est possible de produire des intersections entre les lignes. De ce fait, les traitements sont allégés puisqu'il n'est plus nécessaire

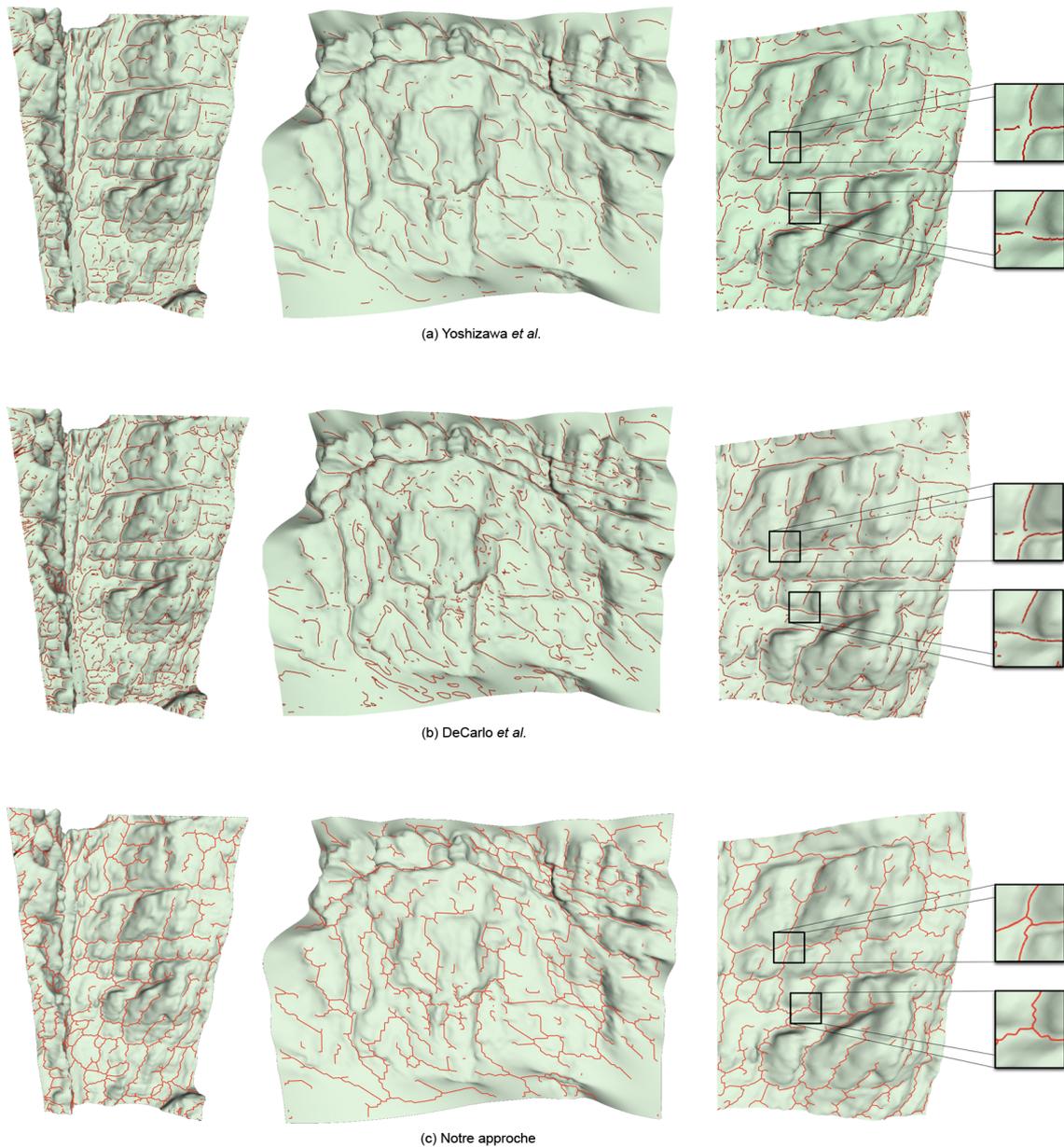


Figure 5.26. Application des trois algorithmes à des données LIDAR d’affleurements géologiques. De gauche à droite, par colonne : sommet de Malaval (Vercors), secteur de la Marcouline (Cassis), secteur du Pas Morta (Vercors).

d’appliquer des procédés supplémentaires pour la reconnexion de lignes.

La méthode mise en place permet d’extraire rapidement les objets géologiques depuis une surface triangulée irrégulière. En effet, les opérateurs développés ont une faible complexité algorithmique et il suffit d’une seconde pour traiter un maillage de 50000 triangles, sur une machine équipée d’un processeur Intel Core 2 Duo cadencé à 2.4 Ghz et de 4 Go de RAM.

5.5.4.3 Comparaison

La table 5.1 permet de mieux comprendre les différences entre notre approche et les deux autres méthodes traditionnelles testées [6] et [48]. Les trois algorithmes réalisent l'extraction des lignes correctement. La distinction principale réside dans la connectivité des résultats obtenus. Les deux premières approches produisent des lignes fragmentées contrairement à celles extraites par notre algorithme.

	Yoshizawa	DeCarlo	Notre approche
<i>Estimation des courbures</i>	Approximation locale	Tenseur de courbures	Approximation locale
<i>Méthode de détection</i>	Dérivées de courbures	Dérivées de courbures	Courbures moyennes
<i>Ordre</i>	3 ^e ordre	3 ^e ordre	2 ^e ordre
<i>Post-traitement(s)</i>	Filtrage + reconnexion	Filtrage	Aucun

Table 5.1. Propriétés et résumés des différentes approches.

5.6 Applications

Dans cette section, nous revenons sur le domaine applicatif qui constitue le fil directeur de ces travaux, c'est-à-dire la détection de structures géologiques. Nous complétons notre étude par une application de nos approches sur d'autres objets polyédriques tels que des modèles 3D usuels en informatique graphique et des surfaces corticales pour l'extraction du fond des sillons.

5.6.1 Détection automatique de structures géologiques à partir de modèles numériques 3D d'affleurements

Comme nous l'avons vu tout au long de ce chapitre, l'aide à la détection de lignes relatives aux limites stratigraphiques ou aux fractures est primordiale pour les géologues-numériciens. Le fait d'automatiser ce processus évite un travail fastidieux de tracé de lignes sur des modèles géologiques 3D, et représente un réel gain de temps pour l'interprétation ultérieure de ces données surfaciques.

L'approche décrite dans la section 5.4 qui repose sur le calcul des variations des courbures couplé à un filtrage directionnel permet d'obtenir des résultats satisfaisants, notamment grâce à l'ajout de connaissance *a priori*. Cependant, la méthode développée dans la section 5.5 s'appuyant sur une labellisation des sommets et une squelettisation sur la surface produit de meilleurs résultats car la connectivité des lignes est automatique.

Dans le cadre géologique, les résultats sont sensiblement les mêmes quelle que soit la variante utilisée (par paramétrisation des zones d'intérêt ou par squelettisation directe sur le maillage) car les affleurements numériques sont généralement *dépliables*, contrairement à des objets plus complexes tels que ceux présentés dans la section 5.6.2 qui suit. Une différence réside dans le temps de calcul qui est nettement plus rapide pour la seconde variante. En effet, la phase de paramétrisation de la première variante est une étape coûteuse.

5.6.2 Autres domaines d'application

5.6.2.1 Modèles 3D usuels de test en informatique graphique

Les deux variantes par squelettisation développées dans la section 5.5 ont été appliquées à des objets non géologiques fréquemment utilisés pour tester les algorithmes de traitement de maillages.

La figure 5.27 illustre les résultats obtenus par la première variante (par paramétrisation) sur le modèle *Feline*⁵ composé de 258K sommets. La figure 5.28 présente les lignes extraites sur le même objet, mais en utilisant la seconde variante (par squelettisation directe du maillage).

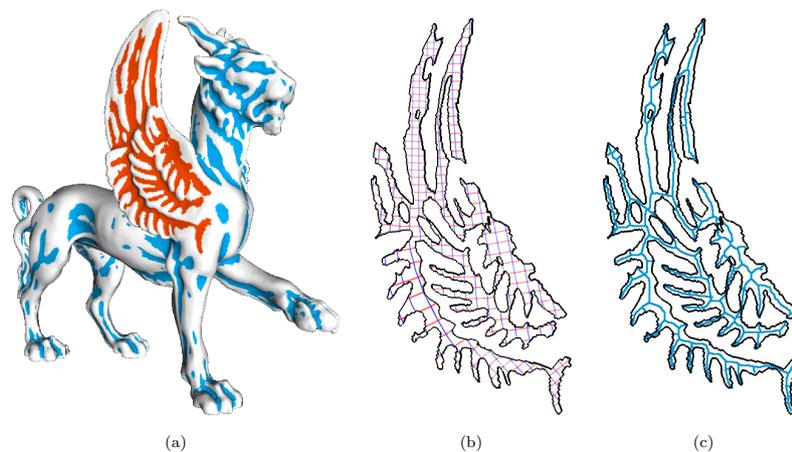


Figure 5.27. Extraction de lignes caractéristiques avec une phase de paramétrisation sur le modèle *Feline* (258K sommets). Une région d'intérêt est isolée (en rouge) (a). Cette région est ensuite dépliée en 2D par une méthode de paramétrisation (b). Les lignes caractéristiques sont extraites par amincissement itératif (c).

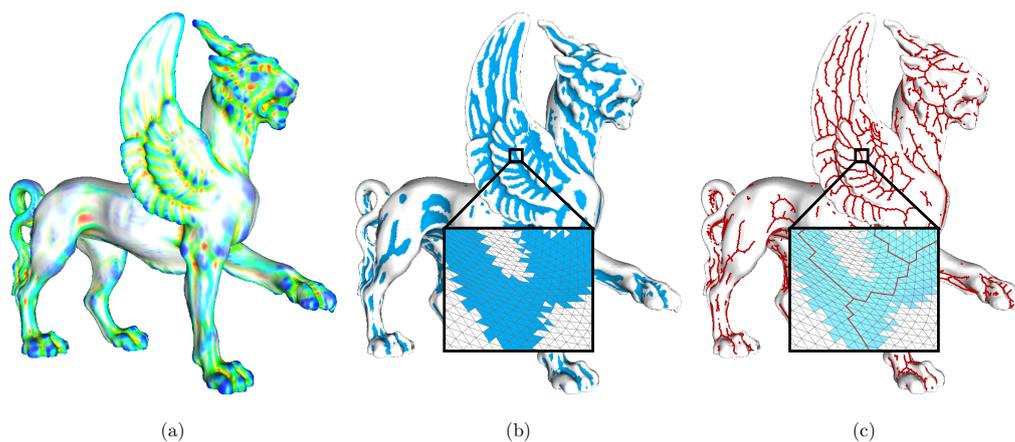


Figure 5.28. Extraction de lignes caractéristiques par squelettisation directe sur un maillage sur le modèle *Feline* (258K sommets). Les courbures H et K sont estimées (a). Les ensembles sont ensuite définis sur le maillage triangulé, d'après les signes de H et de K (b). Les lignes caractéristiques sont obtenues après la phase de squelettisation (c).

5. Caltech Multi-Res Modeling Group.

La figure 5.29 montre la comparaison des résultats obtenus entre trois approches : celle de Yoshizawa *et al.* [6], celle de DeCarlo *et al.* [48] et la nôtre sur le modèle *Dinosaur*⁶ constitué de 129K sommets. Dans les deux premiers cas, les algorithmes tendent à produire des lignes non continues, alors que notre méthode préserve la connectivité des lignes détectées.

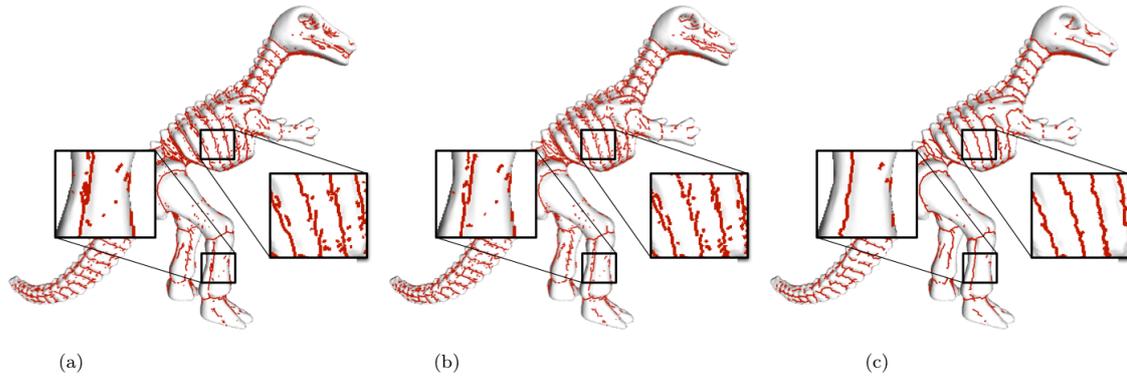


Figure 5.29. Comparaison de notre approche (c) avec celles de Yoshizawa *et al.* [6] (a) et de DeCarlo *et al.* [48] (b) sur le modèle *Dinosaur* (129K sommets). Les deux premiers algorithmes ont tendance à produire des lignes fragmentées à cause du bruit et de la présence de points ombilics.

La figure 5.30 présente les lignes caractéristiques obtenues pour deux derniers objets : une surface très lisse et régulière (*Cosine Plane*⁷, 2,5K sommets) et une plus complexe (*Armadillo*⁸, 166K sommets).

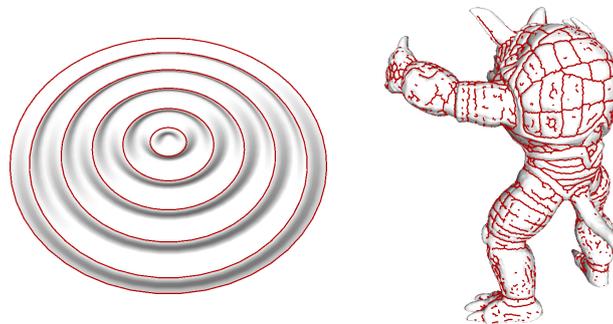


Figure 5.30. Résultats obtenus avec notre approche par squelettisation directe sur un maillage sur les modèles *Cosine Plane* (2,5K sommets) et *Armadillo* (166K sommets).

5.6.2.2 Surfaces corticales

En imagerie cérébrale, la détection du fond des sillons est un problème fondamental pour plusieurs raisons : l'identification et la labellisation de zones corticales, le recalage entre plusieurs patients, ou entre plusieurs surfaces corticales d'un même patient à des instants différents, la construction d'un cerveau « moyen » pour l'étude d'une population (fœtus, nouveaux-nés, etc.).

La figure 5.31 illustre les résultats obtenus par notre approche d'extraction s'appuyant sur le

6. Cyberware.

7. Shin Yoshizawa.

8. Stanford University.

marquage des sommets et la squelettisation directement sur le maillage. L'intérêt principal réside ici dans la capacité à obtenir des lignes connectées aux endroits où les sillons se croisent. Selon les individus, certains d'entre eux peuvent parfois être composés de plusieurs branches, et s'affranchir de telles variations anatomiques locales permet d'obtenir une représentation globale et stable du schéma sulcal.

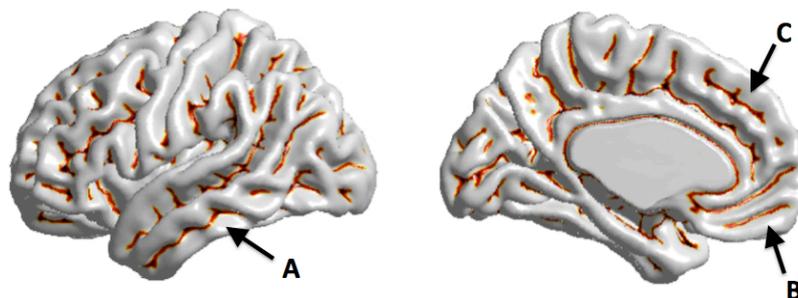


Figure 5.31. Extraction de sillons sur une surface corticale moyenne construite à partir de 135 cerveaux adultes.

Ces travaux sont le fruit d'une collaboration avec le laboratoire APBIRL (*Advanced Pediatric Brain Imaging Research Laboratory*) du *Children's National Medical Center* à Washington, DC (cf. [50, 53]).

5.7 Conclusion

Nous avons vu au cours de ce chapitre que les méthodes classiques de détection de lignes caractéristiques dans les maillages reposent généralement sur des propriétés différentielles de troisième ordre, et que les résultats obtenus par de telles techniques ont une faible connectivité. Dans un contexte géologique, il arrive que certains objets ainsi extraits ne soient pas représentés par une seule ligne. De plus, il est possible d'observer sur l'affleurement des limites stratigraphiques qui intersectent des fractures, ce qui provoque un échec des algorithmes classiques pour gérer ces croisements constitués de points ombilics. Pour pallier ces problèmes, nous avons proposé deux approches visant à détecter des structures ayant un sens géologique à partir de données LIDAR d'affleurements numériques.

La première méthode présentée s'appuie sur le calcul d'extrema des courbures suivi d'une étape de filtrage directionnel, qui permet d'ajouter de la connaissance à la détection de lignes dans le contexte géologique. Pour améliorer les résultats, deux procédés sont appliqués : un pré-traitement de lissage et un post-traitement de reconnexion par cônes de vision.

La seconde approche développée repose sur le fait qu'il est possible d'améliorer la détection de lignes caractéristiques, correspondant aux lignes dites *de ravins* sur un polyèdre, en ne travaillant plus sur des estimateurs du troisième ordre, trop sensibles au bruit, mais en s'appuyant sur un critère simple de courbure permettant de marquer des sommets candidats, puis en appliquant un algorithme de squelettisation. Cette approche se décline en deux variantes. Dans la première, une paramétrisation des zones d'intérêt est effectuée, ce qui produit des lignes caractéristiques fortement connectées. Cependant, les régions doivent être développables et l'étape de paramétrisation est relativement lente et peut générer des distorsions. Pour obtenir un squelette qui reflète mieux

la géométrie des zones d'intérêt, une seconde variante est proposée pour pratiquer la squelettisation directement sur le maillage surfacique. Pour ce faire, des règles ont été définies pour classer les sommets en quatre catégories afin de procéder à un amincissement homotopique fiable. En ne supprimant que les points simples (i.e. ceux qui ne modifient pas la topologie de la zone sur le maillage), le squelette de chaque région est extrait. La simplicité de cet opérateur permet d'obtenir un faible temps de calcul.

D'un point de vue géologique, les lignes extraites, dites de *ravins*, correspondent à des zones de forte concavité qui caractérisent les limites stratigraphiques et les fractures sur les affleurements numériques.

Les méthodes développées dans ce chapitre ont également été appliquées à d'autres types d'objets, tels que des modèles 3D de test usuels ou des surfaces corticales. Les résultats obtenus ont été comparés à deux autres approches classiques. Il en ressort que notre méthode par labellisation de sommets est robuste au bruit, que les portions de lignes d'un même objet sont mieux connectées et que la détection d'intersections est possible, ce qui n'est pas le cas des autres techniques.

Les perspectives sont nombreuses et font l'objet d'une attention particulière dans le chapitre 9 relatif à mon projet de recherche. Outre les actions à court terme qui concernent l'amélioration de maillages issus de données LIDAR ainsi que l'interprétation automatique, les travaux en cours portent principalement sur l'optimisation du placement des lignes. En effet, comme mentionné dans la section 5.5.2, il n'y a pas à première vue de raison pour que la position du squelette d'une région concorde pleinement avec celle d'une ligne à extraire. Même si la représentation la plus fidèle de ces régions d'intérêt reste ce descripteur morphologique et topologique, une ligne détectée ne coïncide pas totalement avec la définition mathématique d'une ligne de courbure. Dans notre approche par labellisation de sommets, nous avons quelque peu négligé la position des lignes au profit de la connectivité des résultats, car les traitements postérieurs de reconnexion sont des procédés très contraints. Pour repositionner les lignes, nous envisageons de déplacer les sommets extraits le long des arêtes du maillage, d'une manière similaire à l'approche directionnelle décrite dans la section 5.4 où les lignes caractéristiques sont tracées sur les triangles du polyèdre. La détermination de la direction de déplacement des sommets de la polyligne reste à définir, probablement en prenant en compte les maxima de la courbure moyenne dans le voisinage de chaque sommet.

5.8 Bibliographie

- [1] Jérôme A. BELLIAN, Charles KERANS et David C. JENNETTE. “Digital Outcrop Models : Applications of Terrestrial Scanning LIDAR Technology in Stratigraphic Modeling”. In : *Journal of Sedimentary Research* 75.2 (2005), pp. 166–176.
- [2] Manfredo P. do CARMO. *Differential Geometry of Curves and Surfaces, T. 2*. Prentice Hall, 1976.
- [3] Jean-Philippe THIRION. “The Extremal Mesh and the Understanding of 3D Surfaces”. In : *International Journal of Computer Vision* 19.2 (1996), pp. 115–128.
- [4] Christian RÖSSL, Leif KOBELT et Hans-Peter SEIDEL. “Extraction of Feature Lines on Triangulated Surfaces using Morphological Operators”. In : *AAAI Spring Symposium on Smart Graphics*. T. 00-04. Mar. 2000, pp. 71–75.
- [5] Yutaka OHTAKE, Alexander BELYAEV et Hans-Peter SEIDEL. “Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 23.3 (août 2004), pp. 609–612.
- [6] Shin YOSHIZAWA, Alexander BELYAEV et Hans-Peter SEIDEL. “Fast and robust detection of crest lines on meshes”. In : *Proceedings of the 2005 ACM symposium on Solid and physical modeling (SPM '05)*. Cambridge, Massachusetts, USA, 2005, pp. 227–232.
- [7] Klaus HILDEBRANDT, Konrad POLTHIER et Max WARDETZKY. “Smooth feature lines on surface meshes”. In : *Proceedings of the third Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Vienne, Autriche, 2005.
- [8] Andreas HUBELI et Markus GROSS. “Multiresolution feature extraction for unstructured meshes”. In : *Proceedings of the conference on Visualization '01 (VIS '01)*. San Diego, California : IEEE Computer Society, 2001, pp. 287–294.
- [9] Hyun Soo KIM, Han Kyun CHOI et Kwan H. LEE. “Feature detection of triangular meshes based on tensor voting theory”. In : *Computer-Aided Design* 41.1 (jan. 2009), pp. 47–58.
- [10] Kouki WATANABE et Alexander G. BELYAEV. “Detection of Salient Curvature Features on Polygonal Surfaces”. In : *Computer Graphics Forum* 20.3 (sept. 2001), pp. 385–392.
- [11] Chang Ha LEE, Amitabh VARSHNEY et David W. JACOBS. “Mesh saliency”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 24.3 (juil. 2005), pp. 659–666.
- [12] Yunjin LEE et Seungyong LEE. “Geometric Snakes for Triangular Meshes”. In : *Computer Graphics Forum* 21.3 (2002), pp. 229–238.
- [13] Jan SAHNER, Britta WEBER, Steffen PROHASKA et Hans LAMECKER. “Extraction Of Feature Lines On Surface Meshes Based On Discrete Morse Theory”. In : *Computer Graphics Forum* 27.3 (2008), pp. 735–742.
- [14] M. ATTENE, S. KATZ, M. MORTARA, G. PATANE, M. SPAGNUOLO et A. TAL. “Mesh Segmentation - A Comparative Study”. In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications 2006, SMI'06*. IEEE Computer Society, 2006.
- [15] A. AGATHOS, I. PRATIKAKIS, S. PERANTONIS, N. SAPIDIS et P. AZARIADIS. “3D mesh segmentation methodologies for CAD applications”. In : *Computer-Aided Design and Applications* 4.6 (2007), pp. 827–841.
- [16] Ariel SHAMIR. “A survey on Mesh Segmentation Techniques”. In : *Computer Graphics Forum* 27.6 (2008), pp. 1539–1556.

- [17] Guillaume LAVOUÉ, Florent DUPONT et Atilla BASKURT. “A new CAD mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis”. In : *Computer-Aided Design* 37.10 (sept. 2005), pp. 975–987.
- [18] Alan D. KALVIN et Russell H. TAYLOR. “Superfaces : Polygonal Mesh Simplification with Bounded Error”. In : *IEEE Computer Graphics and Applications* 16.3 (mai 1996), pp. 64–77.
- [19] Sagi KATZ et Ayellet TAL. “Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 22.3 (juil. 2003), pp. 954–961.
- [20] Marco ATTENE, Bianca FALCIDIENO et Michela SPAGNUOLO. “Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives”. In : *The Visual Computer* 22.3 (mar. 2006), pp. 181–193.
- [21] Sébastien DELEST, Romuald BONÉ et Hubert CARDOT. “Fast segmentation of triangular meshes using waterfall”. In : *International Conference on Visualisation, Imaging and Image Processing (VIIP’06)*. Palma De Mallorca, Spain, août 2006, pp. 308–312.
- [22] Anshuman RAZDAN et MyungSoo BAE. “Curvature estimation scheme for triangle meshes using biquadratic Bézier patches”. In : *Computer-Aided Design* 37.14 (déc. 2005), pp. 1481–1491.
- [23] B. HAMANN. “Curvature approximation for triangulated surfaces”. In : Springer-Verlag, 1993, pp. 139–153.
- [24] Jack GOLDFEATHER et Victoria INTERRANTE. “A novel cubic-order algorithm for approximating principal direction vectors”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 23.1 (jan. 2004), pp. 45–63.
- [25] F. CAZALS et M. POUGET. “Estimating differential quantities using polynomial fitting of osculating jets”. In : *Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing (SGP ’03)*. 2003, pp. 177–187.
- [26] Helmut POTTMANN, Johannes WALLNER, Yong-Liang YANG, Yu-Kun LAI et Shi-Min HU. “Principal curvatures from the integral invariant viewpoint”. In : *Computer-Aided Geometric Design* 24.8-9 (nov. 2007), pp. 428–442.
- [27] G. TAUBIN. “Estimating the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation”. In : *Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision (ICCV ’95)*. IEEE Computer Society, 1995.
- [28] Szymon RUSINKIEWICZ. “Estimating Curvatures and Their Derivatives on Triangle Meshes”. In : *Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2nd International Symposium (3DPVT ’04)*. IEEE Computer Society, 2004, pp. 486–493.
- [29] M. MEYER, M. DESBRUN, P. SCHRÖDER et A. BARR. “Discrete Differential Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds”. In : *International Workshop on Visualization and Mathematics*. 2002.
- [30] David COHEN-STEINER et Jean-Marie MORVAN. “Restricted Delaunay triangulations and normal cycle”. In : *Proceedings of the nineteenth annual symposium on Computational geometry (SCG ’03)*. 2003, pp. 312–321.
- [31] Timothy GATZKE et Cindy M. GRIMM. “Estimating Curvature on Triangular Meshes”. In : *International Journal of Shape Modeling* 12.1 (2006), pp. 1–28.
- [32] Mathieu DESBRUN, Mark MEYER, Peter SCHRÖDER et Alan H. BARR. “Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow”. In : *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH ’99)*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999, pp. 317–324.

- [33] K. FUJIWARA. “Eigenvalues of laplacians on a closed riemannian manifold and its nets”. In : *Proceedings of the American Mathematical Society* 123.8 (1995), pp. 2585–2594.
- [34] Gabriel TAUBIN. “A signal processing approach to fair surface design”. In : *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '95)*. ACM, 1995, pp. 351–358.
- [35] E. W. DIJKSTRA. “A note on two problems in connexion with graphs”. In : *Numerische Mathematik* 1 (1959), pp. 269–271.
- [36] Harry BLUM. “A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape”. In : *Models for the Perception of Speech and Visual Form*. MIT Press, 1967, pp. 362–380.
- [37] D. ATTALI. “Squelettes et graphes de Voronoï 2D et 3D”. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1995.
- [38] Michael S. FLOATER et Kai HORMANN. “Surface Parameterization : a Tutorial and Survey”. In : 2005, pp. 157–186.
- [39] Alla SHEFFER, Emil PRAUN et Kenneth ROSE. “Mesh parameterization methods and their applications”. In : *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision* 2.2 (jan. 2006), pp. 105–171.
- [40] Kai HORMANN, Bruno LÉVY et Alla SHEFFER. “Mesh parameterization : theory and practice”. In : *ACM SIGGRAPH 2007 courses*. ACM, 2007.
- [41] Alla SHEFFER, Bruno LÉVY, Maxim MOGILNITSKY et Alexander BOGOMYAKOV. “ABF++ : fast and robust angle based flattening”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 24.2 (avr. 2005), pp. 311–330.
- [42] A. ROSENFELD et J.L. PFALTZ. “Sequential operations in digital picture processing”. In : *Journal of ACM* 13.4 (1966), pp. 471–494.
- [43] R. OGNIWICZ et M. ILG. “Voronoi skeletons : Theory and applications”. In : *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Proceedings CV-PR'92)*. 1992, pp. 63–69.
- [44] Frédéric LEYMARIE et Martin D. LEVINE. “Simulating the Grassfire Transform Using an Active Contour Model”. In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.1 (jan. 1992), pp. 56–75.
- [45] T. Y. ZHANG et C. Y. SUEN. “A fast parallel algorithm for thinning digital patterns”. In : *Communications of the ACM* 27.3 (mar. 1984), pp. 236–239.
- [46] Gerhard X. RITTER et Joseph N. WILSON. *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*. CRC Press, Inc., 2000.
- [47] Gilles BERTRAND. “Simple points, topological numbers and geodesic neighborhoods in cubic grids”. In : *Patterns Recognition Letters* 15 (1994), pp. 1003–1011.
- [48] Douglas DECARLO, Adam FINKELSTEIN, Szymon RUSINKIEWICZ et Anthony SANTELLA. “Suggestive contours for conveying shape”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 22.3 (2003), pp. 848–855.

5.9 Publications associées à ces travaux

- [49] Dimitri KUDELSKI, Sophie VISEUR, Giovanni SCROFANI et **Jean-Luc MARI**. “Feature Line Extraction on Meshes through Vertex Marking and 2D Topological Operators”. In : *International Journal of Image and Graphics (IJIG)* (2011). World Scientific Publishing. (A paraître).
- [50] Cédric CLOUCHOUX, Dimitri KUDELSKI, Ali GHOLIPOUR, Simon K. WARFIELD, Sophie VISEUR, Marine BOUYSSI-KOBAR, **Jean-Luc MARI**, Alan C. EVANS, Adre J. Du PLESSIS et Catherine LIMPEROPOULOS. “Quantitative in-vivo MRI measurement of cortical development in the fetus”. In : *Brain Structure and Function* (2011). (A paraître).
- [51] Dimitri KUDELSKI. “Détection automatique d’objets géologiques à partir de données numériques d’affleurements 3D”. Thèse de doctorat. Marseille, France : Université de Provence (Aix-Marseille 1), déc. 2011.
- [52] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Extraction of feature lines with connectivity preservation”. In : *Computer Graphics International, CGI 2011* (electronic proceedings). Ottawa, Canada, juin 2011.
- [53] Cédric CLOUCHOUX, Dimitri KUDELSKI, Marine BOUYSSI-KOBAR, Sophie VISEUR, Adre Du PLESSIS, Alan C. EVANS, **Jean-Luc MARI** et Catherine LIMPEROPOULOS. “Cortical Pattern Detection for the Developing Brain : a 3D Vertex Labeling and Skeletonization Approach”. In : *Journal of Medical Informatics & Technologies* 16 (ISSN 1642-6037) (oct. 2010), pp. 161–166.
- [54] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “3D Feature Line Detection based on Vertex Labeling and 2D Skeletonization”. In : *Shape Modeling International Conference, SMI 2010*. Aix-en-Provence, France : IEEE Computer Society Publisher, juin 2010, pp. 246–250.
- [55] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Feature Line Detection on Triangulated Meshes - A Geological Application”. In : *18th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2010*. Plzen, République Tchèque, fév. 2010, pp. 39–46.
- [56] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Détection de lignes caractéristiques par labellisation de sommets et squelettisation”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2010*. Dijon, France, mar. 2010, pp. 97–104.
- [57] Dimitri KUDELSKI, Sophie VISEUR et **Jean-Luc MARI**. “Détection de lignes caractéristiques sur maillages triangulés d’acquisition LIDAR - Application à la géologie”. In : *REFIG, Revue Electronique Francophone d’Informatique Graphique (ISSN 1954-3190)* 3.3 (déc. 2009), pp. 1–9. URL : <http://www.irit.fr/REFIG/>.
- [58] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Extraction et amélioration de lignes caractéristiques sur données géologiques”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2009*. Toulouse, France, mar. 2009, pp. 5–14.
- [59] Dimitri KUDELSKI, Sophie VISEUR et **Jean-Luc MARI**. “Détection de lignes caractéristiques sur maillages triangulés d’acquisition LIDAR - Application à la géologie”. In : *21èmes journées de l’AFIG, AFIG’08*. Toulouse, France, nov. 2008, pp. 171–179.

RECONSTRUCTION 3D DU VOLUME RÉNAL EN VUE DE LA GÉNÉRATION D'UN MODÈLE DYNAMIQUE POUR LE SUIVI ET LA DESTRUCTION DE TUMEURS

Ce chapitre est une synthèse de la publication [26] référencée dans la section 6.7.

6.1 Introduction

Ce chapitre présente des travaux récents, débutés en septembre 2010 dans le cadre de la thèse de Valentin Léonardi, co-dirigée par Marc Daniel et moi-même. Cette thèse, financée par la Fondation de l'Université de la Méditerranée, fait partie d'un projet multidisciplinaire qui a la particularité de lier les compétences de chercheurs et d'enseignants-chercheurs de l'Université de la Méditerranée dans le domaine médical d'une part (urologie et radiologie interventionnelle) et dans le domaine de l'informatique graphique (modélisation géométrique) d'autre part.

Le projet (nommé KiTT pour *Kidney Tumor Tracking*) se situe dans le contexte du traitement mini-invasif des tumeurs rénales par le développement d'une nouvelle approche totalement non invasive. Il s'agit, sous le contrôle de l'imagerie (*tomodensitométrie*¹ du rein et de la tumeur), de transmettre un agent physique (ondes de radiofréquence, ultrasons) par voie transcutanée pour réaliser une destruction tumorale sans aucune effraction cutanée.

A l'heure actuelle, le traitement des tumeurs rénales peut être effectué par une approche mini-invasive percutanée non chirurgicale de type *thermothérapie* : la *radiofréquence*. Il s'agit :

- de localiser la tumeur sous repérage tomodensitométrique ;
- d'insérer une électrode de radiofréquence au centre de la tumeur, toujours sous repérage tomodensitométrique ;
- de délivrer un courant de radiofréquence permettant un échauffement de la tumeur supérieur à 62°C pendant un temps suffisant pour entraîner une mort cellulaire et donc une destruction tumorale.

1. Les termes ou abréviations pour désigner la *tomodensitométrie* sont nombreux. On parle notamment de *TDM*, de *scanographie*, de *CT-scan* (pour *Computed Tomography*) ou plus usuellement d'imagerie *scanner*. Il s'agit d'une technique d'imagerie médicale combinant un balayage d'un faisceau de rayons X avec un traitement par ordinateur pour obtenir des coupes 2D (que l'on peut empiler pour obtenir des volumes 3D) des structures anatomiques d'un patient.

Les autres techniques de destruction tumorale percutanées (*cryothérapie, micro-ondes, électroporation irréversible, etc.*) nécessitent toutes également la mise en place, sous contrôle de l'imagerie, d'une aiguille au centre de la tumeur pour délivrer l'agent physique de destruction tumorale.

L'enjeu est ici de développer à moyen terme une nouvelle approche *totale non invasive* pour le traitement des tumeurs rénales.

La première difficulté rencontrée est le mouvement du rein (en raison de la respiration) car il faut pouvoir suivre précisément la cible tumorale et adapter en continu de manière très rapide le faisceau d'ondes de sorte que celui-ci se focalise toujours au centre de la tumeur.

L'objectif de la thèse qui débute est de poser la première pierre d'un suivi en temps réel du volume rénal sous repérage tomodensitométrique. Avant la phase de *tracking* à proprement parler de la tumeur, des étapes incontournables de détection, d'extraction d'information géométrique, de modélisation dynamique du rein devront être effectuées.

La première année de thèse de Valentin Léonardi a été consacrée à l'élaboration d'une première approche pour l'extraction d'un nuage de points caractérisant le contour 3D du rein. Les données en entrée sont des volumes numériques en niveaux de gris, stockés au format DICOM, provenant de coupes CT-scan.

L'approche développée se schématise comme suit :

- Dans un premier temps, un *a priori* fort sur l'intensité des voxels est utilisé pour ne garder que les tissus susceptibles de correspondre au volume rénal. Même si d'autres organes sont malgré tout détectés, ce seuillage brut élimine une grande partie des données, qui ne sont donc plus à considérer par la suite.
- Le manipulateur clique au milieu du rein dans la coupe médiane de la pile d'images. À partir de cette information de localisation, un premier ensemble de voxels est extrait, par propagation au sein de chaque coupe (puis dans les coupes du dessus et du dessous), le critère étant lié à la similarité des niveaux de gris.
- Pour combler les trous et gommer les protubérances mineures, des opérateurs classiques de morphologie mathématique sont utilisés pour rendre le volume rénal plus compact.
- La frontière de cet ensemble de voxels caractérise le contour du rein. Cependant, ce nuage de points est très bruité et pour obtenir une reconstruction acceptable, il est nécessaire d'utiliser un algorithme fortement approximant pour produire un modèle polyédrique du rein. Nous nous sommes tournés vers une méthode récente et efficace : l'algorithme dit *de Poisson* proposé par Kazhdan *et al.* [1].

Ce chapitre est divisé de la façon suivante. La section 6.2 est consacrée à une courte étude des approches similaires dédiées à la reconstruction d'organes dans un cadre de modélisation géométrique. Dans la section 6.3, nous décrivons plus précisément le processus qui vise à extraire le nuage de points du rein ainsi que l'algorithme utilisé pour obtenir un maillage approximant, puis nous présentons des premiers résultats et nous discutons les limites de l'approche.

6.2 Approches similaires

Avant la phase de reconstruction à proprement parler (surfactive ou volumique), il est nécessaire d'extraire un nuage de points plus ou moins bruité qui caractérise les contours de l'organe à modéliser. Plus les informations fournies par cette première phase seront précises, plus le modèle

géométrique sera pertinent et de bonne qualité. Cette étape préalable peut être assimilée à une étape de *segmentation* dans la mesure où l'on travaille directement sur les voxels du volume numérique provenant d'une acquisition scanner, dans le but de les agglomérer entre eux pour caractériser la zone du volume rénal. Suite à cette phase, seuls les voxels de bord seront retenus pour former le nuage de points à approximer.

Les approches visant à segmenter un volume numérique sont très nombreuses, le lecteur pourra se référer à des ouvrages dédiés pour une étude approfondie du sujet [2, 3]. Pour n'en citer que quelques-unes, certaines méthodes exploitent des techniques de classification pour grouper les pixels ou les voxels par paquets homogènes [4]. La segmentation peut être réalisée en utilisant des classifieurs bayésiens [5], les *K-means* [6], elle peut être couplée à des champs aléatoires de Markov [7] ou des réseaux de neurones [8]. Les approches par croissance de région consistent à initialiser un point (une *graine*) à l'intérieur de la structure anatomique à segmenter, puis à faire croître itérativement une région à partir du point initial, en agglomérant les pixels voisins selon des critères d'homogénéité [9]. D'autres approches efficaces sont issues des concepts de la morphologie mathématique [10, 11], dont la plus célèbre est sans doute la transformation *watershed* (i.e. *ligne de partage des eaux*) élaborée par Serge Beucher [12]. Les modèles déformables sont également souvent utilisés en segmentation : une structure déformable dite *active* (contour en 2D ou surface en 3D) est initialisée au plus près des régions à segmenter, puis des forces lui sont appliquées pour qu'elle évolue afin d'épouser au mieux la frontière d'une zone d'intérêt [13, 14]. Ce type d'approches peut s'appuyer sur des maillages multi-résolution et dont la topologie est adaptable en fonction des données à reconstruire [15].

Les méthodes de reconstruction de surfaces qui prennent en entrée soit un nuage de points non structuré, soit un volume numérique binaire sont également abondantes, notamment les approches dédiées à la reconstruction d'organes. Il peut être question de *triangulation couche à couche* pour mailler de manière cohérente deux couches 2D dont les contours diffèrent [16]. Il peut être fait usage des *surfaces implicites*, particulièrement bien adaptées à ce type de problématique, que ce soit *sans* information structurelle [17] ou bien avec un *squelette* et une fonction de potentiel [18, 19]. Certaines approches pour la simulation sont dédiées à un organe en particulier, le cœur par exemple [20], et d'autres conservent un caractère générique [21]. Dans sa thèse, Villard utilise un algorithme proche des bien connus *Marching Cubes* [22] pour obtenir un modèle 3D des poumons [23].

Dans le cadre du projet KiTT et concernant la phase de segmentation, nous avons choisi de ne pas utiliser d'approches nécessitant une base d'apprentissage car nous ne disposons pas d'un nombre suffisant de reins pré-segmentés pour que la méthode soit robuste. De plus, le temps d'exécution doit être court pour permettre une utilisation durant une intervention médicale : une fois le patient endormi, il doit être possible à terme de faire des acquisitions scanner volumiques, d'extraire des nuages de points des contours du rein à différents instants, puis de reconstruire l'organe et de modéliser son mouvement pour le suivi et la destruction de tumeur. Sur une plage de 30 minutes, seules une dizaine seront consacrées à la phase d'acquisition et de reconstruction. Peu de méthodes parviennent à segmenter des volumes numériques à différentes phases du cycle respiratoire dans le temps imparti. Nous avons opté pour une méthode de type croissance de région, que nous avons combinée avec des opérateurs classiques de morphologie mathématique pour régulariser les résultats obtenus. En l'état, cette approche est suffisamment rapide dans notre contexte médical. Toutefois, des pistes de recherche pour améliorer l'extraction du nuage de points du rein sont proposées dans le chapitre 9.

Notre approche comporte des points communs avec celle développée par Lin *et al.* [24] car il

s'agit également d'une méthode de type croissance de région pour détecter le rein dans des images abdominales CT-scan. Des régions d'intérêt de forme elliptique sont agencées de manière automatique sur chaque coupe (en s'appuyant sur la position de la colonne vertébrale). Cependant, le volume rénal ressort nettement des données utilisées grâce à l'emploi d'un produit de contraste, ce qui n'est pas le cas de nos acquisitions. En effet, notre algorithme doit pouvoir être efficace sans l'utilisation d'une substance radio-opaque. Cette dernière ne permet de détecter les reins que lors d'un court instant avant de se diffuser dans les organes voisins. Dans notre cadre, les reins doivent rester visibles pendant toute l'intervention, ce qui interdit l'usage d'un tel dispositif d'aide à la détection.

Pour la phase de reconstruction, nous avons opté pour une approche rapide, efficace et robuste au bruit, l'*algorithme de Poisson* [1], de manière à initialiser un premier modèle géométrique et ainsi obtenir un maillage approximant (et qui pourra éventuellement subir des déformations ultérieures, selon la piste de recherche envisagée par la suite). Cette approche est brièvement décrite dans la section 6.3.2.

6.3 Reconstruction du rein

L'approche de reconstruction du volume rénal proposée se décompose en deux étapes. La première consiste à extraire le nuage de points qui définit au mieux le contour du rein, à partir d'un cube de données (issu d'une acquisition scanner) caractérisant la *cavité abdominale*. La seconde étape est celle de reconstruction à proprement parler, et qui, sur la base du nuage de points, fournit un modèle polyédrique de l'organe.

6.3.1 Extraction du nuage de points

La phase d'extraction du nuage de points du rein est composée de trois sous-étapes. Dans un premier temps, un double seuillage permet de ne conserver que les niveaux de gris pertinents. Une propagation est ensuite effectuée, en partant du centre du rein et en évoluant de coupe en coupe pour éliminer les voxels relatifs aux autres organes. Dans un troisième temps, un post-traitement est effectué pour consolider l'objet discret obtenu et boucher les trous éventuels.

6.3.1.1 Seuillage préliminaire

Les données en entrée sont une pile d'images au format DICOM², format standard en imagerie médicale, issue d'une acquisition tomodynamométrique. Les images au format DICOM sont codées sur 16 bits et les valeurs des pixels sont exprimées en Unités Hounsfield (HU). Ces valeurs sont directement liées à la capacité d'absorption des rayons X d'un corps (de -1000 pour l'air à +400, voire plus, pour l'os). L'intervalle d'HU des tissus qui composent le rein est $[0, 40]$. En éliminant les voxels qui sont hors de cet intervalle, seul le rein et quelques zones correspondant à d'autres organes dont les tissus ont une absorption semblable sont conservés. On appelle R cette région d'intérêt *volumique*, et R_k la région d'intérêt de la coupe d'indice k .

2. pour *Digital Imaging and COmmunications in Medicine*.

6.3.1.2 Segmentation et propagation sur les différentes coupes

Suite à ce double seuillage, une *graine* $g_{n/2}$ est initialisée manuellement (par un clic souris effectué par le manipulateur) au centre du rein, sur l'image médiane $I_{n/2}$ de la pile d'acquisition scanner $[I_1, \dots, I_n]$. Cette graine définit le premier pixel de la région qui va subir une croissance. Une double propagation est ensuite effectuée : de $I_{n/2}$ vers I_n (propagation vers le bas du volume) et de $I_{n/2}$ vers I_1 (propagation vers le haut du volume). La figure 6.1 illustre ce processus de propagation coupe à coupe vers le haut et vers le bas du volume numérique.

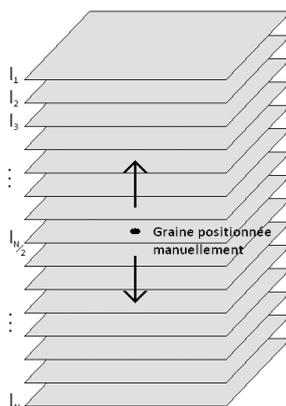


Figure 6.1. Propagation de la graine initiale $g_{n/2}$ à l'ensemble des images.

Une heuristique est utilisée pour chaque image I_k de la pile : un filtre gaussien est appliqué à chaque coupe I_k , puis une propagation est effectuée de manière récursive, en partant de la graine g_k et en considérant le 8-voisinage, jusqu'à exploration de toute la région R_k . Plus un pixel $p \in R_k$ non encore traité est proche de la graine g_k et plus une valeur t associée (appelée *seuil de tolérance*) est élevée. Pour être marqué comme un pixel appartenant au rein, l'écart entre l'intensité de p et m_{rein} (la moyenne des niveaux de gris présents dans les zones du rein détectées sur toutes les images précédemment analysées) doit être inférieur au seuil t . Que le pixel p soit marqué comme « appartenant au rein » ou non, ses voisins non encore traités sont explorés récursivement, jusqu'à ce qu'aucun pixel ne soit plus éligible. Pour une coupe I_k , on appelle S_k l'ensemble des pixels que l'on obtient en sortie de cette phase de croissance. Il s'agit d'un sous-ensemble de la région d'intérêt R_k .

Outre le placement manuel de la première graine $g_{n/2}$ dans la coupe médiane $I_{n/2}$, la position des autres graines g_k dans les coupes adjacentes est calculée en fonction de la coupe précédente : si la propagation évolue vers le *bas*, c'est-à-dire de $I_{n/2}$ vers I_n , alors g_k est le barycentre des points de contour détectés dans la coupe I_{k-1} ; si la propagation évolue vers le *haut*, c'est-à-dire de $I_{n/2}$ vers I_1 , alors g_k est le barycentre des points de contour détectés dans la coupe I_{k+1} (voir figure 6.2).

6.3.1.3 Post-traitement

L'approche décrite précédemment, de type *croissance de région*, comporte deux inconvénients majeurs. D'une part, la zone S_k n'est formée que d'une seule composante connexe car la propagation s'effectue en ne tenant compte que du 8-voisinage, sans possibilité de « saut » sur une autre composante connexe. D'autre part, sur certaines coupes où les niveaux de gris sont très proches les uns des autres, les zones du rein détectées *débordent* sur d'autres organes voisins (la rate ou le foie principalement).

Pour limiter les débordements vers d'autres organes, la plage des niveaux de gris initiale $[0, 40]$

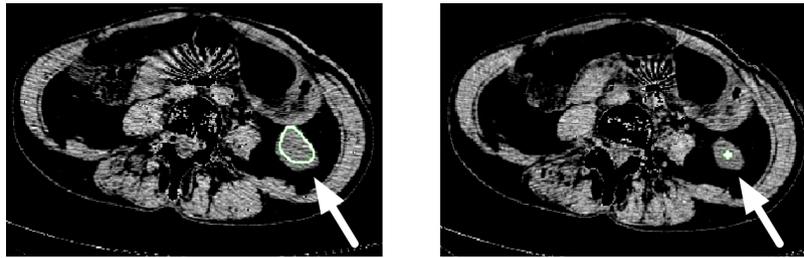


Figure 6.2. A gauche : contour du rein droit pour une image I_k . A droite : nouvelle graine pour l'image I_{k+1} , issue du barycentre du contour rénal en I_k (la propagation s'effectue ici vers le bas).

sur les images DICOM est restreinte. Pour ce faire, la somme des histogrammes des niveaux de gris (présents dans tous les ensembles segmentés S_k) est calculée, de manière à ne conserver que le pic de niveaux de gris correspondant aux intensités des pixels dont les occurrences sont les plus nombreuses.

Pour pallier le problème de la composante connexe unique, qui provoque une détection partielle du rein, les pixels des régions d'intérêt R_k n'ayant pas été retenus par la croissance de région redeviennent candidats pour faire partie de l'ensemble final. Pour chaque coupe I_k , si un pixel appartient à la région R_k et que son niveau de gris a un grand nombre d'occurrences (c'est-à-dire qu'il est dans l'intervalle restreint, obtenu lors de la phase précédente), alors ce pixel fait effectivement partie du volume numérique binaire final. La figure 6.3 montre une composante connexe séparée du bloc principal, qui n'aurait pas été prise en compte avec une approche par croissance de région standard.

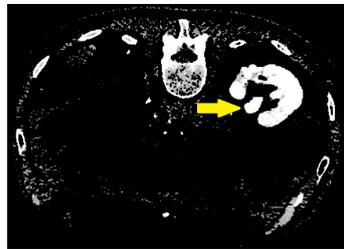


Figure 6.3. Prise en compte des composantes connexes pour chaque coupe du rein.

Le fait d'utiliser un critère lié aux valeurs d'intensités des pixels se justifie dans la mesure où les zones qui définissent le rein sur les coupes ont une texture homogène. Il n'y a pas de grandes variations d'intensité, ce qui permet de resserrer l'intervalle des niveaux de gris de manière conséquente. Cela n'exclut cependant pas le fait de proposer une approche prenant en compte la caractérisation de texture, dans le cadre de travaux futurs.

Des opérations classiques de morphologie mathématique sont réalisées sur chaque coupe dans le but de consolider le volume numérique obtenu et de boucher les trous. Un *filtre séquentiel alterné* composé de plusieurs opérations duales est appliqué (la taille des éléments structurants augmentant à chaque étape) : une *fermeture* pour lier toutes les zones qui forment l'ensemble du rein, une *ouverture* pour éliminer les petites particules, puis une *fermeture* pour consolider le contour. Un algorithme de bouchage de trous classique (qui repose sur les propagations géodésiques en partant du bord de chaque image) termine cette succession de routines morphologiques. La figure 6.4 montre une coupe avant et après l'application des opérateurs : la zone morcelée issue de la phase de croissance de région décrite plus haut devient plus compacte et plus nette.

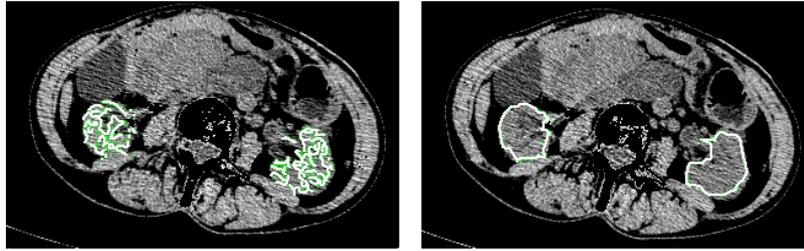


Figure 6.4. Résultat obtenu suite au post-traitement : avant (à gauche) et après (à droite) l'application d'opérateurs de morphologie mathématique.

Le volume numérique binaire obtenu par empilement des zones détectées sur chaque coupe est au final un objet discret plein. Il est donc possible d'en conserver la *croûte* (c'est-à-dire les voxels de bord, ceux n'ayant pas leurs 26 voisins tous *dans* l'objet) pour générer un nuage de points à reconstruire. Ce nuage étant malgré tout très bruité, il n'est pas concevable d'utiliser des algorithmes de maillage interpolants, mais plutôt une approche fortement approximante, rapide et robuste.

6.3.2 Construction du maillage

Pour obtenir un modèle polyédrique à partir du nuage de points obtenu, nous avons choisi d'utiliser un algorithme récent et efficace, élaboré par Kazhdan *et al.* [1]. Cette approche, appelée *reconstruction de surface de Poisson* par ses auteurs, produit un maillage surfacique approchant un nuage de points préalablement orienté.

L'idée consiste à exprimer la surface à reconstruire comme la solution d'une équation de Poisson, et ainsi basculer d'un problème géométrique vers un problème classique en analyse vectorielle (qui a des applications notamment en électrostatique et en gravitation universelle). Etant donné qu'on cherche à extraire une isosurface approchant le nuage de points initial, on peut considérer que cette approche se situe dans le cadre des *surfaces implicites*.

L'objectif est de calculer une *fonction indicatrice* χ dans l'espace 3D, qui vaut 1 à l'intérieur du modèle et 0 en dehors, pour ensuite obtenir la surface reconstruite en extrayant l'isosurface adéquate. Le principe est de mettre en relation le nuage de points (orienté) avec cette fonction indicatrice. On peut remarquer que le gradient de cette fonction χ est nul presque partout (car la fonction indicatrice est constante presque partout) sauf autour des points de la surface à reconstruire (le gradient est alors égal à la normale orientée vers l'intérieur de la surface). On peut donc considérer que le nuage de points orienté initial est un échantillon du gradient de la fonction indicatrice cherchée (voir figure 6.5). Ainsi, une formulation du problème revient à trouver la fonction χ dont le gradient approche au mieux un champ de vecteurs \vec{V} défini par le nuage de points :

$$\nabla\chi = \vec{V}$$

En appliquant l'opérateur de divergence, ce problème variationnel se transforme en problème standard de Poisson, c'est-à-dire qu'il s'agit de calculer la fonction χ dont le laplacien (la divergence du gradient) est égal à la divergence du champ de vecteurs \vec{V} :

$$\Delta\chi = \nabla \cdot \nabla\chi = \nabla \cdot \vec{V}$$

L'algorithme se compose de quatre étapes, on note M le solide à reconstruire, ∂M sa surface et χ_M sa fonction indicatrice :

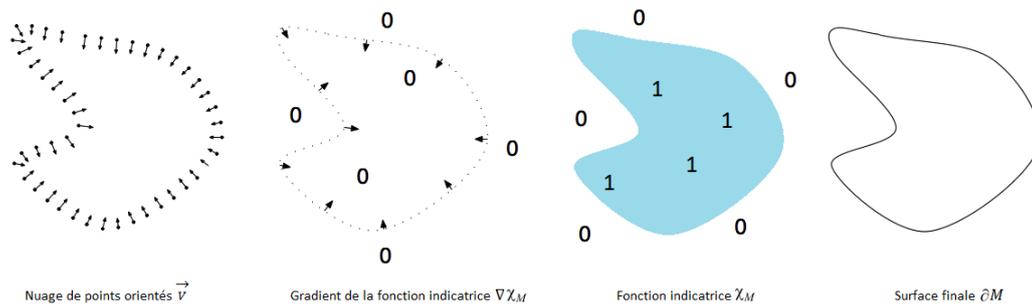


Figure 6.5. Illustration de la reconstruction de Poisson en 2D.

- La première est une étape de discrétisation et de définition des fonctions. Chaque point du nuage initial est muni d'une normale en calculant celle d'un plan passant au plus près de ses k plus proches voisins, puis l'espace est découpé en *octree*, sa profondeur étant définie de telle sorte que chaque point du nuage soit dans une feuille de l'arbre octal.
- La deuxième phase consiste en la définition du champ de vecteurs \vec{V} . A ce stade, chaque nœud de l'octree (même ceux ne comportant pas de points du nuage initial) est doté d'une normale, par interpolation par rapport aux octants voisins.
- En troisième lieu et \vec{V} étant à présent défini, la résolution de l'équation de Poisson permet de calculer la fonction indicatrice χ_M . Les méthodes de résolution sont diverses et nous ne les détaillons pas ici.
- Pour obtenir la surface recherchée ∂M , la dernière phase de l'algorithme repose sur la caractérisation d'une isovaleur telle que l'isosurface associée approche au mieux le nuage de points initial. Cette isovaleur est obtenue en évaluant χ_M pour chaque point du nuage et en calculant la moyenne de ces valeurs. La représentation polyédrique de cette isosurface est finalement obtenue par la méthode décrite dans [25], qui est une approche similaire à l'algorithme classique des *Marching Cubes* [22] mais adaptée aux octrees.

6.3.3 Premiers résultats et discussion

Pour évaluer cette première ébauche d'approche pour l'extraction de points caractérisant le rein et la reconstruction polyédrique, nous avons travaillé sur un volume numérique issu d'une acquisition tomodensitométrique de la cavité abdominale. Le cube de données est composé de 176 coupes en niveaux de gris, chacune de résolution 512×512 pixels. Dans chaque image, les reins ne dépassent pas une zone de 60×60 pixels chacun. La figure 6.6 montre les nuages de points obtenus pour les reins gauche et droit, ainsi que leurs reconstructions.

On remarque que le post-traitement ne permet pas toujours de supprimer les débordements dans les organes voisins des reins, notamment en ce qui concerne la partie basse (le *pôle inférieur*) du rein droit. La forme globale reste cependant acceptable et donne une idée correcte de la morphologie de l'organe. De plus, lorsque les débordements ont lieu sur des coupes isolées, voire sur deux ou trois coupes successives, le polyèdre obtenu n'en est que très peu affecté grâce à la capacité de la méthode de reconstruction de Poisson à produire un modèle *approximant* et robuste.

Les nombres de points des nuages initiaux sont respectivement 23000 pour le rein gauche et 35000 pour le droit. Les modèles polyédriques obtenus sont composés de 1000 sommets et de 2000 faces triangulaires environ, pour une profondeur d'octree de 5. La perte des détails est donc conséquente (même si par la même occasion, les erreurs de segmentations sont atténuées), et l'on

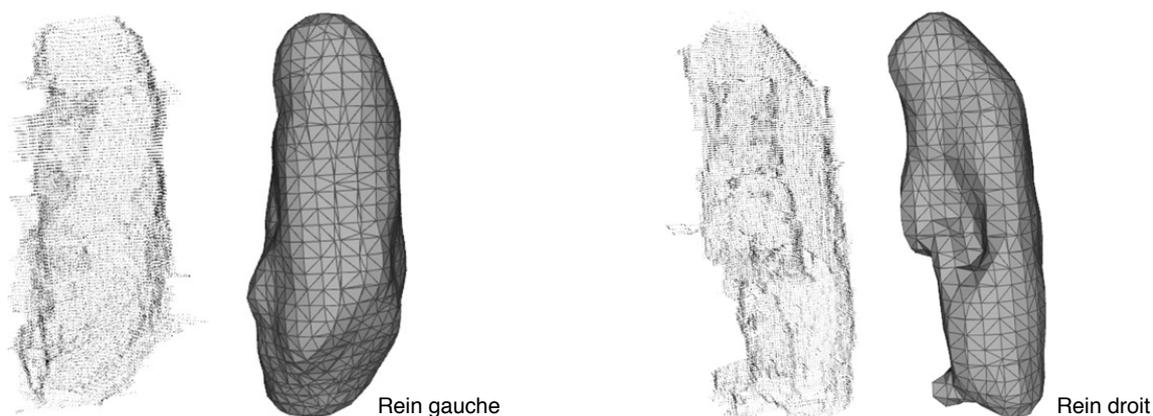


Figure 6.6. Nuages de points obtenus pour deux reins (gauche et droit) et leurs reconstructions.

peut ainsi imaginer utiliser les maillages résultants dans un cadre de modèles déformables. En effet, le nombre de points joue un grand rôle sur le temps d'exécution des algorithmes liés à ces approches, qui peut atteindre plusieurs heures. En travaillant avec peu de points, on peut espérer réduire ce temps pour une utilisation efficace dans un environnement médical où la durée de traitement ne devra pas excéder 30 minutes.

Les performances en termes de temps de calcul sont satisfaisantes : chaque rein est traité en une trentaine de secondes sur un ordinateur possédant un processeur Intel Quad Core Q6660 cadencé à 2,41GHz et 3 Go de RAM. Le goulot d'étranglement de l'approche réside dans l'application des opérateurs de morphologie mathématique (cette phase représente 70% du temps d'exécution).

Un grand avantage de l'approche développée est qu'elle ne nécessite pas d'injection de produit de contraste dans le corps du patient. Les données s'en trouveraient certes améliorées, mais il serait plus difficile de calibrer l'approche de segmentation étant donné que les effets d'un tel produit sont très variables au cours du temps. En effet, durant les premières secondes, seul le centre du rein serait sur-contrasté ; durant les secondes suivantes, le rein entier serait très marqué, puis tous les organes voisins seraient ensuite atteints par le produit radio-opaque, de manière durable. Bien que la fenêtre temporelle d'acquisition puisse éventuellement être adaptée à une seule acquisition scanner, elle serait trop courte pour obtenir plusieurs acquisitions de contraste homogène au cours d'une phase respiratoire complète (notre objectif est d'avoir quatre acquisitions de manière à pouvoir modéliser le mouvement du rein durant un cycle respiratoire complet). Pour cette raison, nous avons choisi de ne pas travailler sur un rein sur-contrasté par ce type de produit, car nous souhaitons que notre approche soit applicable dans les conditions médicales effectives, même si la segmentation est rendue par conséquent plus difficile.

La figure 6.7 montre les modèles 3D obtenus pour les deux reins, ainsi que les contours de ceux-ci sur trois plans de coupe du volume numérique initial.

6.3.4 Limites de l'approche

Bien que rapide, la méthode d'extraction du nuage de points caractérisant le volume rénal produit des débordements sur les autres organes voisins qui, s'ils sont trop nombreux et sur plusieurs coupes consécutives, ne peuvent pas être gommés par la méthode de construction d'un maillage approximant. Dans ce cas, les protubérances non souhaitées figurent sur la reconstruction finale

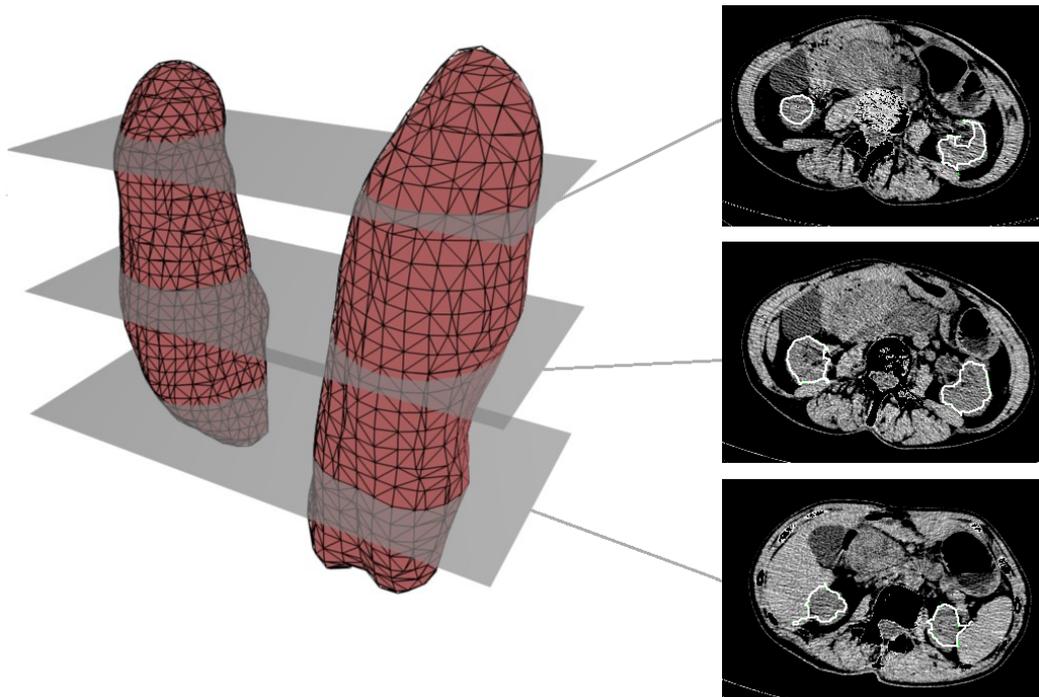


Figure 6.7. Modèles 3D obtenus pour les deux reins et contours associés à trois plans de coupe.

du rein, sans avoir de réel sens anatomique. Il est donc nécessaire d'améliorer notablement cette phase, pour obtenir un nuage de points moins bruité, et donc pour pouvoir éventuellement utiliser des algorithmes de maillage moins approximatifs.

Concernant le polyèdre obtenu avec la méthode de reconstruction de Poisson, il est possible que certaines zones comportent des dégénérescences locales (des régions localement non-manifold, des triangles très allongés, des auto-intersections). Il est également possible, selon la profondeur de l'octree choisie, d'obtenir un maillage constitué de plusieurs composantes connexes. La question du choix de la méthode de reconstruction se pose donc. Bien que l'approche choisie ait des avantages certains en termes d'approximation de surface, elle a cependant des inconvénients si elle est utilisée telle quelle, sans modifications liées au contexte de travail. On peut imaginer mettre en place une phase de post-traitement propre à l'étape de reconstruction, permettant par exemple d'éliminer les éventuelles petites composantes connexes, les triangles dégénérés, etc. Mais un problème peut néanmoins subsister : le contrôle de l'erreur. Il est en effet difficile à gérer avec les approches par isosurfaces, car la géométrie de la surface reste malgré tout imprécise comparée à d'autres techniques. Ce dernier point peut être un handicap sérieux dans un environnement médical où la validation et la précision jouent un rôle important. C'est pour cette raison principalement que nous pensons nous tourner vers des approches par modèles déformables, probablement plus robustes (si le modèle initial comporte une seule composante connexe, alors le modèle déformé n'en n'aura qu'une également), plus précises, mais vraisemblablement plus lentes.

6.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode semi-automatique de reconstruction en 3D du rein. Malgré une approche de type *croissance de région* améliorée notamment par l'application d'opérateurs de morphologie mathématique, le nuage de points obtenu reste très bruité et il faut alors utiliser une méthode approximante, nous avons choisi la méthode de reconstruction de Poisson, pour pouvoir obtenir une surface maillée caractérisant les contours du volume rénal.

Tant que les *débordements* de la croissance de région dans les organes voisins du rein restent isolés, l'approche de Poisson est robuste et permet de produire un polyèdre satisfaisant. En revanche, si ces débordements touchent plusieurs coupes consécutives, certaines parties de ces organes voisins ont tendance à être reconnues comme une zone appartenant au rein. Nos travaux futurs seront donc orientés dans cette direction, avec pour objectif prioritaire la réduction de cet inconvénient majeur.

En parallèle, nous envisageons d'intégrer les modèles déformables à notre travail pour deux raisons : d'une part ils pourraient se prêter efficacement à la segmentation de la zone d'intérêt (pour éviter d'utiliser un algorithme d'approximation surfacique), et d'autre part pour passer d'une *pose*, d'un *keyframe* à l'autre par déformation pour modéliser le déplacement du rein lié aux mouvements respiratoires.

L'initialisation de notre approche étant manuelle, elle comporte l'avantage (en plus d'accélérer et de rendre plus robuste la détection du nuage de points) de pouvoir être utilisée pour la reconstruction d'autres organes. En l'état actuel, aucune supposition n'est faite sur la position ou la forme de l'organe à segmenter, et il est donc envisageable d'appliquer notre méthode à des organes de morphologie et de densité semblables, comme par exemple le foie ou la rate.

Ces travaux sur la reconstruction du rein (statique à l'heure actuelle) à partir d'acquisitions scanner 3D en sont à leurs débuts. Les pistes de recherche sont nombreuses, et elles font l'objet d'un développement spécifique dans le chapitre 9 relatif à mon projet de recherche. Outre les actions à court terme qui y figurent, on peut remarquer notamment :

- qu'il faut utiliser les informations de gradient et de laplacien pour ne plus s'appuyer sur les intensités des voxels uniquement, et ainsi enrichir les critères pour la phase de croissance de région et la rendre plus précise et adaptée aux données.
- qu'il est nécessaire de ne plus raisonner en termes de niveaux de gris, mais plutôt en étudiant l'agencement et la structure des niveaux de gris à l'intérieur du rein. Cela revient à utiliser des algorithmes d'analyse de textures qui peuvent être soit classiques, soit ceux développés dans le chapitre 3 par exemple, en exploitant des indices de formes 3D pour caractériser la texture en la considérant comme un volume sous la nappe.
- que l'on peut se tourner vers des approches par surfaces déformables tant pour le passage d'un instant t_i à un instant t_{i+1} au cours du cycle respiratoire pour modéliser le mouvement du rein, que pour reconstruire le rein et donc éviter d'utiliser un algorithme approximant tel que la méthode de Poisson. Ce dernier point aurait en outre l'avantage de contraindre fortement la topologie du modèle pour n'obtenir qu'une seule composante connexe.
- qu'il serait intéressant d'explorer les approches de *morphing*, sur la base de modèles du rein reconstruits à plusieurs instants, de manière à passer de l'un à l'autre en utilisant des approches alternatives aux modèles déformables (qui s'appuient traditionnellement plutôt sur des critères énergétiques pour converger vers un état optimal).
- qu'un modèle de rein dit *générique* (un rein *moyen*, sans erreur de segmentation, et de haute résolution) pourrait être utilisé pour s'approcher au mieux du nuage de points caractérisant les contours de l'organe. Suite à une initialisation de sa position (en faisant une analyse en

composantes principales par exemple), le modèle générique pourrait alors être déformé, avec la garantie de bien représenter l'anatomie du rein, ce qui n'est pas toujours le cas avec des approches comportant moins d'*a priori* sur la forme.

Ce domaine de recherche est actif et d'autres sociétés (Philips, General Electric, Siemens par exemple) travaillent actuellement sur le développement de logiciels pour la modélisation et le suivi d'organes, dont le rein. Les enjeux sont donc grands en termes de reconstruction d'organes et de chirurgie non invasive.

Dans ce contexte de recherche en informatique graphique lié au monde médical, le caractère innovant du projet KiTT se décline sous deux formes :

- D'un point de vue informatique : la reconstruction d'objets (et donc d'organes) à partir de données réelles en mouvement est un sujet d'actualité, en particulier en modélisation géométrique. Cette problématique peut se transposer dans de nombreuses applications, et le domaine médical en fait partie. Des approches très différentes sont disponibles dans la littérature, et le fait d'explorer des pistes dans le cadre très particulier du volume rénal d'après des données DICOM issues de CT-scan peut donner lieu à des avancées originales.
- D'un point de vue médical, un *tracking* efficace sous scanner permettra de faciliter et d'améliorer les traitements percutanés mini-invasifs et devrait permettre d'envisager un traitement tumoral non invasif. Actuellement ce traitement est proposé pour des organes non mobiles de type utérus ou prostate. Sa transposition à des organes mobiles comme le rein est d'un intérêt majeur.

6.5 Personnes impliquées dans ce projet

Outre la branche "informatique" composée de Marc Daniel, Valentin Léonardi et moi-même, les personnes impliquées dans le projet KiTT sont :

- Christian Coulange, initiateur du projet et responsable du Service d'Urologie à l'Hôpital de la Conception,
- Vincent Vidal, directeur du laboratoire L2PTV et membre du Service de Radiologie du Professeur Bartoli à l'Hôpital de la Timone,
- Marc André, radiologue au Service de Radiologie du Professeur Chagnaud à l'Hôpital de la Conception,
- Frédéric Cohen, radiologue au Service de Radiologie du Professeur Bartoli à l'Hôpital de la Timone,
- Pierre-Henri Rolland, chercheur INSERM au laboratoire L2PTV.

6.6 Bibliographie

- [1] M. KAZHDAN, M. BOLITHO et H. HOPPE. “Poisson Surface Reconstruction”. In : *Proceedings of the 4th Eurographics Symposium on Geometry Processing, SGP’06*. Juin 2006, pp. 61–70.
- [2] Linda G. SHAPIRO et George C. STOCKMAN. *Computer Vision*. New Jersey, Prentice-Hall, 2001.
- [3] O. WIRJADI. *Survey of 3D image segmentation methods*. Rapport de recherche. Fraunhofer ITWM Institut, 2007.
- [4] T. LEI et W. SEWCHAND. “A new stochastic model-based image segmentation technique for X-ray CT images”. In : *IEEE Transactions on Medical Imaging* 11.1 (mar. 1992), pp. 62–69.
- [5] Z. LIANG, J. MACFALL et D. HARRINGTON. “Parameter estimation and tissue segmentation from multispectral MR images”. In : *IEEE Transactions on Medical Imaging* 13.3 (sept. 1994), pp. 441–449.
- [6] D. L. PHAM et J. L. PRINCE. “Adaptative fuzzy segmentation of magnetic resonance images”. In : *IEEE Transactions on Medical Imaging* 18.9 (sept. 1999), pp. 737–752.
- [7] Y. ZHANG, M. BRADY et S. SMITH. “Segmentation of brain MR images through a hidden Markov random field model and the expectation-maximization algorithm”. In : *IEEE Transactions on Medical Imaging* 20.1 (jan. 2001), pp. 45–57.
- [8] C.-C. LEE, P.-C. CHUNG et H.-M. TSAI. “Identifying multiple abdominal organs from CT image series using a multimodule contextual neural network and spatial fuzzy rules”. In : *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 7.3 (sept. 2003), pp. 208–217.
- [9] L. RUSKÓ, G. BEKES et M. FIDRICH. “Automatic segmentation of the liver from multi- and single-phase contrast-enhanced CT images”. In : *Medical Image Analysis* 13.6 (2009), pp. 871–882.
- [10] Georges MATHERON. *Éléments pour une théorie des milieux poreux*. Paris : Masson, 1967.
- [11] Jean SERRA. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. T. 1. London : Academic Press, 1982.
- [12] Serge BEUCHER et Fernand MEYER. “The Morphological approach of segmentation : the watershed transformation”. In : *Mathematical Morphology in Image Processing*. Marcel Dekker Publisher, New York, Dougherty E. (Editor), 1992. Chap. 12, pp. 433–481.
- [13] H. DELINGETTE. *Simplex Meshes : a general representation for 3D shape reconstruction*. Rapport de recherche 2214. INRIA, mar. 1994.
- [14] E. BARDINET, L. D. COHEN et N. AYACHE. “A parametric deformable model to fit unstructured 3D data”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 71.1 (1998), pp. 39–54.
- [15] J.-O. LACHAUD et A. MONTANVERT. “Deformable Meshes with Automated Topology Changes for Coarse-to-fine 3D Surface Extraction”. In : *Medical Image Analysis* 3.2 (1999), pp. 187–207.
- [16] J.-D. BOISSONNAT. “Shape reconstruction from planar cross-sections”. In : *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 44 (1988), pp. 1–29.
- [17] E. GALIN et S. AKKOUCHE. “Fast surface reconstruction from contours using implicit surfaces”. In : *Implicit Surface’98 Conference* 3 (1998), pp. 139–144.

- [18] Eric BITTAR, Nicolas TSINGOS et Marie-Paule GASCUEL. “Automatic reconstruction of unstructured 3D data : Combining a medial axis and implicit surfaces”. In : *Computer Graphics Forum (Eurographics’95 Proc.)* T. 14. 1995, pp. 457–468.
- [19] Stéphanie PRÉVOST et Laurent LUCAS. “An efficient voxel-based visualization system from an implicit skeletal surface characterization”. In : *Journal of Visualization and Computer Animation* 11 (2000), pp. 39–49.
- [20] M. SERMESANT, H. DELINGETTE et N. AYACHE. “An Electromechanical Model of the Heart for Image Analysis and Simulation”. In : *IEEE Transactions in Medical Imaging* 25.5 (2006), pp. 612–625.
- [21] S. COTIN, H. DELINGETTE et N. AYACHE. “Real-time elastic deformations of soft tissues for surgery simulation”. In : *IEEE Transactions On Visualization and Computer Graphics* 5.1 (1999), pp. 62–73.
- [22] W. E. LORENSEN et H. E. CLINE. “Marching cubes : A high resolution 3D surface construction algorithm”. In : *SIGGRAPH Computer Graphics* 21.4 (août 1987), pp. 163–169.
- [23] Pierre-Frédéric VILLARD. “Simulation du mouvement pulmonaire pour un traitement oncologique”. Thèse de doctorat. France : Université Claude Bernard (Lyon 1), sept. 2006.
- [24] D.-T. LIN, C.-C. LEI et S.-W. HUNG. “Computer-aided kidney segmentation on abdominal CT images”. In : *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 10.1 (jan. 2006), pp. 59–65.
- [25] R. WESTERMANN, L. KOBBELT et T. ERTL. “Real-time exploration of regular volume data by adaptive reconstruction of iso-surfaces”. In : *The Visual Computer* 15 (1999), pp. 100–111.

6.7 Publications associées à ces travaux

- [26] Valentin LÉONARDI, **Jean-Luc MARI**, Vincent VIDAL et Marc DANIEL. “3D Reconstruction from CT-Scan Volume Dataset - Application to Kidney Modeling”. In : *SCCG 2011, 27th Spring conference on Computer Graphics*. Viničné, Slovaquie : ACM Press Publisher, avr. 2011, pp. 141–148.
- [27] Valentin LÉONARDI, **Jean-Luc MARI**, Vincent VIDAL et Marc DANIEL. “Reconstruction 3D du Volume Rénal à partir d’Acquisitions Scanner Volumiques”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2011*. Grenoble, France, mar. 2011, pp. 83–92.

GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DE MAILLAGES À PARTIR D'INFORMATION STRUCTURELLE SYNTHÉTIQUE

Ce chapitre est une synthèse des publications [26], [27] et [28] référencées dans la section 7.7.

7.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce chapitre se situent dans la continuité de ma thèse. Elle portait sur la modélisation de formes complexes en considérant à la fois les caractéristiques globales d'une forme, ainsi que ses spécificités locales. Il s'agissait de pouvoir gérer de manière indépendante les propriétés topologiques, morphologiques et géométriques d'une forme, et ce à l'aide d'un *modèle multi-couches* qui puisse coder à la fois l'information structurelle via une entité appelée *squelette interne*, ainsi que les détails géométriques de l'objet grâce à une couche *externe* multi-résolution. Dans ce modèle, le squelette interne a pour but de caractériser non seulement la topologie de l'objet, mais également sa *forme globale*, son *allure*. En complément, le rôle de la couche externe est de s'appuyer sur ces informations topologiques et morphologiques du squelette pour représenter la géométrie, raffnable à volonté, de l'objet.

La problématique de ce chapitre ne porte pas sur l'extraction d'information à partir de données géométriques, mais sur le processus inverse, à savoir l'utilisation d'une information synthétique pour représenter, pour concevoir un objet 3D. La démarche n'est plus dans la compréhension d'une forme, mais dans la génération d'une forme. L'information sur laquelle on s'appuie à présent peut être vue comme une *esquisse* caractérisant la topologie et la forme globale d'un objet à modéliser. Sur la base de cette entité structurelle, on se propose de décrire une méthode permettant de construire une première approximation surfacique, un polyèdre grossier *englobant* le squelette.

La conception d'une forme s'effectue généralement en partant d'une surface basique, une primitive géométrique simple que l'on raffine étape par étape en ajoutant des détails, un peu comme on travaillerait de l'argile. L'approche que nous développons dans ce chapitre est différente, dans le sens où elle s'apparenterait plutôt à la création d'un objet de l'*intérieur*, à partir d'une esquisse qui définirait la forme globale, la structure intrinsèque de l'objet.

Pour construire une première approximation surfacique de l'objet, la méthode proposée dans ce chapitre s'appuie sur un squelette composé de *voxels* pour pouvoir bénéficier des relations de voisinages naturelles d'un *volume numérique binaire* et ainsi simplifier le problème de la caractérisation de la topologie de la forme à générer. En considérant la 26-adjacence dans une grille cubique,

le squelette discret permet de caractériser la topologie du maillage englobant construit de manière automatique : si par exemple un *cycle* de voxels est esquissé, alors la surface résultante comportera un *trou*, et si le squelette comporte une *coque*, alors l'objet généré aura une *cavité*. Cette caractérisation de la surface de sortie par une esquisse voxélisée est également vérifiée pour les composantes connexes.

A partir de ce descripteur de forme, un polyèdre M , dont la topologie est caractérisée par le squelette et d'après la 26-adjacence, est généré. Pour cela, un ensemble de points est créé autour des sommets du squelette. La position de ces points est primordiale pour préserver la topologie du squelette. Ils sont ensuite connectés entre eux pour former une triangulation basique, sans que des arêtes ne se croisent ou que des triangles ne s'intersectent. Nous verrons par exemple que le maillage fermé obtenu est bien adapté à une utilisation dans le cadre de la subdivision de surfaces.

Les surfaces de subdivision ont la capacité de prendre en charge des topologies arbitraires. De ce fait, on peut considérer le maillage M obtenu comme le *polyèdre de contrôle* d'une surface de subdivision, ce qui garantit de produire un ensemble de maillages de topologies équivalentes. Si le solide délimité par M est homotope au squelette, alors les solides délimités par les différentes surfaces raffinées le sont aussi.

Un autre avantage des surfaces de subdivision est leur aptitude naturelle à gérer la *multi-résolution*. Une fois qu'un polyèdre de contrôle est généré par esquisse interactive, il peut être décliné en plusieurs *niveaux de détails* (on parle aussi de *LoDs* pour *Levels of Detail*) au sein d'un seul modèle. Ainsi, selon le contexte, un maillage plus ou moins détaillé peut être utilisé. Une application directe de ces maillages multi-résolution, générés à partir de simples esquisses, est l'intégration dans les logiciels de modélisation 3D.

Pour définir l'apparence globale d'un objet, le *designer* dessine une esquisse 3D dans une grille cubique régulière. La création de la forme est simple car elle s'appuie sur une modélisation à base de voxels. L'esquisse, une fois convertie en squelette, fournit un descripteur de forme adapté à des modifications géométriques ultérieures plus détaillées.

Dans ce chapitre, nous utilisons le terme *squelette* pour faire le pont entre deux mondes : la géométrie discrète et la conception d'objet. En géométrie discrète, le squelette est lié à la notion d'*axe médian*, c'est-à-dire à l'ensemble des boules maximales centrées dans un objet, ou encore au squelette *érodé* obtenu par amincissement homotopique. En modélisation géométrique, il s'agit plutôt d'une structure positionnée à l'*intérieur* d'une forme et qui peut soit donner une information sur cette forme, soit être utilisée pour animer la forme qui l'entoure.

Le voxel est l'unité élémentaire d'un volume numérique binaire, d'un objet défini dans \mathbb{Z}^3 . Tout comme dans le chapitre 2, nous utilisons la 26-adjacence pour définir les relations de connexité entre les voxels car elle semble être la plus naturelle et la plus intuitive d'un point de vue du concepteur : lorsque deux voxels *sont en contact* non seulement par une face, mais aussi par une arête ou seulement par un coin, alors on considère qu'ils sont *voisins*. Le choix de cette 26-adjacence se répercute sur la surface à construire : si deux voxels ne sont pas 26-voisins, alors les surfaces englobantes associées ne doivent pas se toucher pour pouvoir préserver la topologie définie par l'esquisse 3D.

Ce chapitre est divisé en trois parties. La section 7.2 présente brièvement une étude des travaux similaires. La section 7.3 décrit notre approche de génération de surface qui s'appuie sur un squelette topologique et voxélisé pour créer un maillage basique. Nous verrons que ce dernier est transposable très facilement en multi-résolution en utilisant un algorithme classique de subdivision de surfaces. Des exemples d'objets générés automatiquement sont présentés dans la section 7.4.

7.2 Travaux similaires

Les approches de génération de surfaces les plus remarquables et qui s'appuient sur des squelettes sont indéniablement les *surfaces implicites* [1]. Les modèles implicites permettent de générer des formes englobantes de manière intuitive, en ne partant que d'un squelette constitué de primitives simples : des points, des segments, des courbes, des triangles ou des carreaux de surfaces. Les surfaces obtenues sont continues et naturellement lisses.

Traditionnellement, les surfaces implicites sont définies par un squelette et une fonction de potentiel. Le choix du scalaire associé à la fonction détermine une isosurface qui *habille* le squelette. De nombreuses approches existent pour la conception de formes [2], la reconstruction [3] ou l'animation [4].

Parmi les techniques implicites, les approches par *convolution* sont particulièrement adaptées à la modélisation interactive [5]. Grâce à une définition alternative de la fonction de distance, de telles surfaces ne présentent pas de *bosses* aux zones de jonctions, ce qui est un réel problème avec les approches implicites classiques [6].

Une autre manière de modéliser des formes interactivement repose sur la notion de *sculpture virtuelle implicite*. L'objet est manipulé comme de l'argile en utilisant des outils à la place de primitives squelettiques [7].

Les *surfaces implicites variationnelles* sont utilisées dans le projet *BlobMaker* qui vise à modéliser des formes libres à l'aide d'esquisses. Les opérations principales consistent à procéder à des *gonflements* pour créer des formes 3D à partir de tracés en 2D [8]. Les approches développées dans [9] et [10] sont d'autres techniques élaborées sur la même idée.

L'approche par *F-rep* pour la modélisation de volume est efficace pour représenter une large variété de formes [11, 12]. Elle permet d'unifier la modélisation CSG¹, les surfaces *sweep* et la conception par *méta-boules*, mais elle souffre d'un manque de contrôle intuitif et ergonomique. En effet, ce formalisme n'intègre aucune information structurelle.

L'approche par *Skins* fait le lien entre la modélisation implicite par squelette et les surfaces de subdivision [13]. Il s'agit d'une représentation de surfaces qui utilise des particules pour sculpter un objet de manière interactive. Néanmoins, les performances en termes de temps de calcul sont mauvaises et des problèmes d'auto-intersections peuvent apparaître au cours de la manipulation de la forme, étant donné que la topologie du squelette est déconnectée du maillage de subdivision englobant.

Cependant, les techniques de modélisation implicite souffrent toutes du même inconvénient : le contrôle de la topologie de la surface à modéliser est difficile à cause du problème de *mélange non souhaité* des primitives qui peut survenir lorsque deux éléments du squelette sont proches. Pour contrer ce handicap, les *graphes de mélange* sont souvent utilisés pour déterminer si des primitives implicites doivent se mélanger ou non. Ce processus ralentit les manipulations interactives et les rend moins intuitives. De plus, un autre inconvénient des surfaces implicites est que le rendu temps-réel est difficile à atteindre. En effet, le temps de calcul de toutes les fonctions de potentiel devient rapidement excessif lorsque le nombre de primitives augmente.

Traditionnellement, pour créer une forme de manière interactive avec un logiciel de modélisation 3D (qu'il soit dédié à la CAO ou bien à l'animation et aux jeux vidéos), le *designer* utilise des primitives simples telles que des cubes, des sphères ou des cônes pour obtenir un modèle grossier de l'objet final. Des modificateurs de type *extrusion*, de *raffinement local* ou *surface de révolution*

1. Constructive Solid Geometry.

(on parle aussi de *spinning*) permettent de modéliser des formes plus complexes, mais l'utilisation de descripteurs de forme comme les squelettes est assez rare. La plupart du temps, on procède dans le sens inverse : l'objet est d'abord créé, puis un squelette est ajouté ultérieurement dans un but d'animation.

De nombreux travaux traitent de la génération de maillages polygonaux à partir d'un axe médian ou d'une surface médiane [14, 15, 16]. Nous ne développons pas cette famille d'approches car bien que dédiées à la génération de polyèdres, elles ne sont pas liées à l'esquisse mais plutôt au maillage par éléments finis. Du reste, nous ne détaillons pas non plus les approches de type *marching surfaces*, dérivées de l'algorithme classique de Lorensen *et al.* [17] car des fissures (on parle aussi de *cracks*) peuvent apparaître sur des configurations particulières et le maillage généré ne serait par conséquent pas fermé. Ceci peut avoir des répercussions sur la topologie de l'objet, qui n'est plus en adéquation avec celle du squelette. Cependant, l'approche de type *marching cubes* de Kenmochi *et al.* est un cas particulier : elle est topologiquement robuste et elle s'attache à produire un maillage caractérisant le bord d'un objet discret [18]. Bien que cette méthode soit efficace et liée à notre problématique, la surface résultante ne répond pas totalement à nos besoins, à savoir obtenir une surface *englobante*, un maillage *offset* de l'ensemble initial de voxels. En effet, dans cette approche, les centres des voxels sont précisément les sommets du maillage. Par conséquent, un voxel isolé ne produirait aucune surface, alors que nous voudrions qu'il soit entouré par une *coque* polyédrique.

Dans des travaux antérieurs dans le cadre doctoral [19], nous développons l'idée d'utiliser un squelette à la fois comme descripteur de forme, mais aussi et surtout comme structure topologique. Dans un cadre de conception interactive, la *couche externe* du modèle est un polyèdre obtenu en maillant un ensemble de points relativement dense issu d'une surface implicite. L'entité structurelle du modèle, le *squelette interne*, est constituée d'un ensemble de sommets inscrits dans une grille cubique de manière à induire des relations topologiques non ambiguës. De ce fait, un échantillon de points est calculé (d'après des paramètres implicites dépendants de la résolution de la grille) puis maillé pour obtenir un polyèdre caractérisant la couche externe. Selon le nombre de points que l'on choisit, cette dernière étape de triangulation peut échouer si le nuage de points n'est pas assez dense.

Par conséquent, pour poursuivre dans cette voie qui consiste à contrôler la topologie d'un objet en utilisant les relations d'adjacence naturelles d'un volume numérique binaire (le squelette interne de la forme), il faut améliorer la phase de génération de points qui entourent le squelette de telle sorte que la densité soit faible d'une part (pour obtenir un maillage grossier), et constante d'autre part (pour ne pas dépendre de la résolution de la discrétisation). Il s'agit donc d'élaborer une approche qui puisse placer des points puis les relier, d'après des règles capables de répercuter de manière fiable la topologie du squelette sur le maillage englobant.

7.3 Processus de génération du maillage englobant

Le processus de génération de maillage se déroule comme suit. Dans un premier temps, le *designer* dessine une esquisse 3D dans une grille cubique. Cette dernière est ensuite convertie en squelette constitué de sommets, d'arêtes, de triangles et de tétraèdres qui caractérisent les relations d'adjacence entre les voxels de l'esquisse. Puis le maillage est généré automatiquement en englobant la structure squelettique. Ce polyèdre représente la forme de manière globale, et il s'agit

d'un point de départ approprié à la multi-résolution pour des surfaces de subdivision. Toutes les opérations effectuées sur le maillage résultant sont réalisées en respectant la topologie définie par l'esquisse.

7.3.1 Déroulement du processus : de l'esquisse au polyèdre

Le processus de génération développé met en jeu trois entités : une esquisse discrète constituée de voxels, son squelette associé et qui caractérise la topologie de la forme, puis la surface maillée englobante.

La figure 7.1 illustre une esquisse constituée de voxels (non encore connectés), son squelette associé et le polyèdre basique résultant. La figure 7.2 montre le squelette (i.e. l'esquisse *connectée*), les points générés automatiquement avant la phase de maillage, et le polyèdre obtenu.

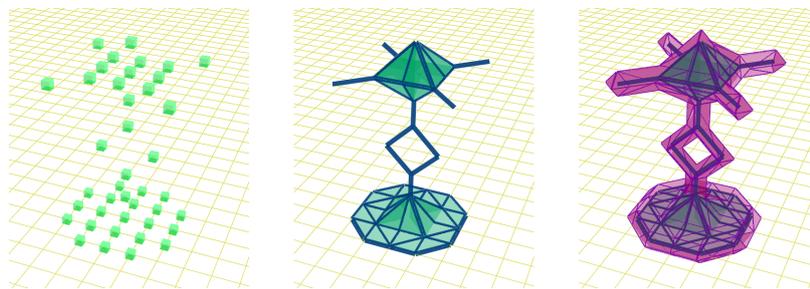


Figure 7.1. Esquisse, squelette et polyèdre résultant.

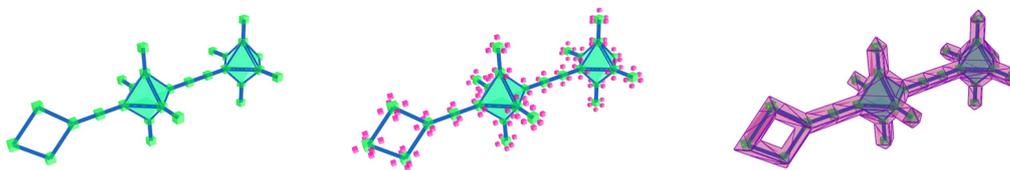


Figure 7.2. Squelette (esquisse connectée), points entourant le squelette, et polyèdre résultant.

Pour construire un ensemble de voxels édités interactivement par un *designer*, il est tout d'abord nécessaire de choisir la résolution de la grille (par exemple un pavé 32^3 de l'espace discret \mathbb{Z}^3). Suite à cela, le *designer* dessine les voxels en sachant que la 26-adjacence sera utilisée pour déterminer les voxels qui doivent être connectés.

Au cours de cette étape d'édition des voxels, l'algorithme construit au fur et à mesure un squelette : des segments, des triangles et des tétraèdres sont générés pour mettre en évidence les relations de connexité entre les voxels.

Une fois le squelette calculé à partir de l'esquisse discrète, un algorithme spécifique est appliqué pour générer une forme basique dont la topologie est définie par le squelette. Ceci est valable car les sommets de la surface sont situés à des positions « sûres » relativement aux voxels du squelette, pour garantir la topologie du maillage ultérieur.

Le polyèdre obtenu est un descripteur géométrique pertinent de l'objet esquissé. Ce maillage caractérise la forme globale, à bas niveau de résolution. Pour cette raison, il est naturel de le considérer comme le *polyèdre de contrôle* d'une surface de subdivision. En utilisant par exemple un schéma approximant tel que celui de Loop (voir section 7.3.4), la surface obtenue sera légèrement

à l'intérieur du volume du polyèdre initial. Ceci permet d'éviter des auto-intersections et donc de préserver la topologie, même à un niveau de résolution élevé.

7.3.2 Construction du squelette 3D

On appelle *squelette* la structure interne de la forme à dessiner, à concevoir. Ce descripteur morphologique et topologique est constitué de quatre types d'éléments : les sommets (édités interactivement par un *designer*), les arêtes, les triangles et les tétraèdres (calculés pour caractériser les relations d'adjacence entre les sommets). En d'autres termes, le squelette est un *complexe simplicial* (voir chapitre 2) composé des sommets de l'esquisse initiale, à laquelle on ajoute des segments, des triangles et des tétraèdres de manière cohérente et relativement à la 26-adjacence.

7.3.2.1 Edition interactive de l'esquisse

L'esquisse 3D est éditée interactivement dans l'espace discret \mathbb{Z}^3 : chaque voxel est positionné dans une grille régulière (voir figure 7.3).

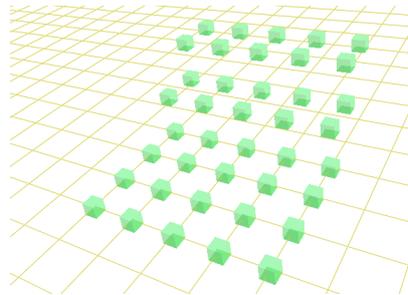


Figure 7.3. Edition de l'esquisse dans une grille régulière 3D.

7.3.2.2 Représentation de l'adjacence des voxels

Pour chaque voxel ajouté itérativement par le *designer*, il y a potentiellement autant d'arêtes à éditer que de 26-voisins à cet instant de la phase de dessin de l'esquisse. En utilisant l'approche incrémentale constructive décrite à la section 2.4.2, une arête est ajoutée à la structure du squelette si elle ne coupe pas une arête déjà présente, de manière à maintenir une entité topologique cohérente et non dégénérée. Les triangles sont ensuite construits en considérant tous les 3-cycles d'arêtes. Puis de manière analogue, les tétraèdres sont ajoutés à la structure du squelette en prenant en compte les groupes de quatre triangles mutuellement voisins.

La figure 7.4 montre une séquence d'édition élémentaire : trois sommets forment un triangle (un cycle de trois arêtes) et un quatrième point est ajouté pour constituer un second triangle, sans croisement d'arêtes.



Figure 7.4. Séquence d'édition dans un plan.

Sur la base des voxels édités précédemment à la figure 7.3, la figure 7.5 présente les arêtes du

squelette (à gauche) et les triangles et les tétraèdres qui en résultent (à droite).

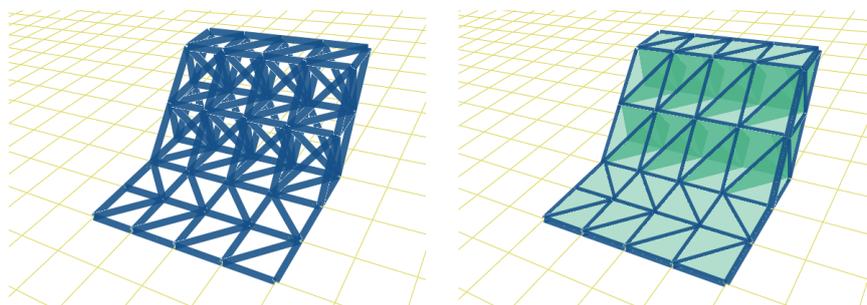


Figure 7.5. Arêtes (à gauche), triangles et tétraèdres (à droite) du squelette.

7.3.3 Calcul du polyèdre englobant

Le maillage à calculer doit *entourer* le squelette, et ce dernier doit caractériser la topologie de l'objet solide à modéliser. En particulier, il faut veiller à interdire toute auto-intersection. L'objet doit avoir le même nombre de composantes connexes que son squelette. De plus, si ce dernier comprend respectivement un cycle ou une coque, le solide borné par le polyèdre généré doit alors comporter un trou ou une cavité. Le nombre de cycles détermine donc le *genre* de l'objet à construire, et le nombre de coques définit le nombre de cavités (on parle aussi de *voids* en anglais) de l'objet discret. Pour parvenir à une caractérisation topologique robuste, des règles spécifiques doivent être élaborées pour positionner des sommets et pour les mailler.

7.3.3.1 Création des sommets

Les sommets du polyèdre de base sont créés comme suit. Pour chaque voxel du squelette, jusqu'à six sommets du maillage peuvent être générés. En fonction du nombre et de la position des voisins d'un voxel, certains de ces points ne sont pas créés pour que le maillage puisse effectivement englober le squelette, sans que des points ne soient à l'intérieur de la forme à construire.

Pour simplifier le problème, on considère qu'un voxel a une taille $a \times a \times a$, et on choisit de fixer a à la valeur 10 pour illustrer notre approche. La distance entre les centres de deux voxels 6-adjacents est ainsi de 10 unités.

Soit $S(x, y, z)$ un voxel du squelette. Pour un voxel isolé S , 6 points du maillage sont générés : $P_1(x-4, y, z)$, $P_2(x+4, y, z)$, $P_3(x, y-4, z)$, $P_4(x, y+4, z)$, $P_5(x, y, z-4)$ et $P_6(x, y, z+4)$ (voir la figure 7.6, à gauche). Le fait de choisir une valeur inférieure à la moitié de la distance entre deux voxels (ici 4) permet de prévenir des interactions entre deux voxels non adjacents. Les points du maillage relatifs à un voxel du squelette ne sont pas positionnés à plus de 4 unités, pour garder une zone de sécurité et éviter que des auto-intersections ne surviennent au cours de la phase de maillage.

Lorsque deux voxels sont 6-connexes (i.e. ils sont connexes par une face), seuls 5 points par voxel doivent être générés, au lieu de 6. Pour ce faire, des *marqueurs de connexion par face* sont mis à jour durant la phase d'esquisse. Il y a un marqueur par face, pour chacun des voxels. Six booléens sont alloués à chaque voxel (*haut*, *bas*, *gauche*, *droite*, *devant* et *derrière*) : si ce voxel a des voisins *par face*, alors les points du maillage situés dans la direction des faces voisines ne sont pas ajoutés à la structure finale qui devra être triangulée (voir la figure 7.6, à droite). Naturellement, si un voxel intérieur au squelette a ses 6 voxels adjacents pour chaque face, alors aucun point du maillage n'est généré.

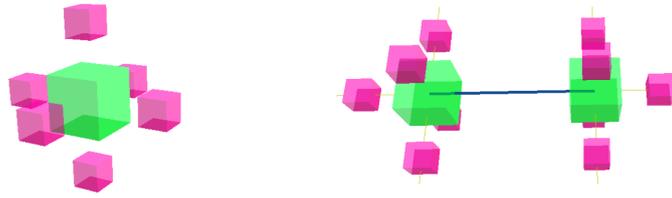


Figure 7.6. A gauche : points entourant un voxel isolé. A droite : deux voxels 6-adjacents.

7.3.3.2 Règles pour le maillage des sommets

Une fois les points entourant le squelette créés, il reste une étape capitale qui consiste à mailler ces sommets dans le but d'obtenir un polyèdre englobant qui reflète la topologie de l'esquisse initiale.

L'idée consiste à générer dans un premier temps toutes les arêtes réalisables entre les points P_i d'après des règles spécifiques de connexion, puis dans un deuxième temps de construire les triangles du maillage, de manière à obtenir la *croûte* polyédrique finale de l'objet.

Avant d'ajouter une arête E au maillage, une série de tests sont effectués. Soient P_1 et P_2 les points qui définissent E . Cette dernière est ajoutée à la liste des arêtes si ses coordonnées satisfont l'une des conditions suivantes (les coordonnées x , y et z sont permutable pour obtenir toutes les conditions possibles) :

- $P_1x = P_2x \pm 10$ et $P_1y = P_2y$ et $P_1z = P_2z$
- $P_1x = P_2x \pm 4$ et $P_1y = P_2y \pm 4$ et $P_1z = P_2z$
- $P_1x = P_2x \pm 10$ et $P_1y = P_2y \pm 10$ et $P_1z = P_2z$
- $P_1x = P_2x \pm 10$ et $P_1y = P_2y \pm 6$ et $P_1z = P_2z \pm 6$
- $P_1x = P_2x \pm 10$ et $P_1y = P_2y \pm 4$ et $P_1z = P_2z \pm 4$ (pour connecter les arêtes diagonales comme illustré sur la figure 7.7 à gauche).
- $P_1x = P_2x \pm 10$ et $P_1y = P_2y \pm 6$ et $P_1z = P_2z \pm 4$ (voir la figure 7.7 à droite).

Ces règles relient tous les points associés aux voxels adjacents, pour former un maillage englobant le squelette.

De plus, une arête E n'est pas ajoutée à la liste si :

- elle coupe une arête existante dans la liste.
- elle coupe une arête ou un triangle du squelette.

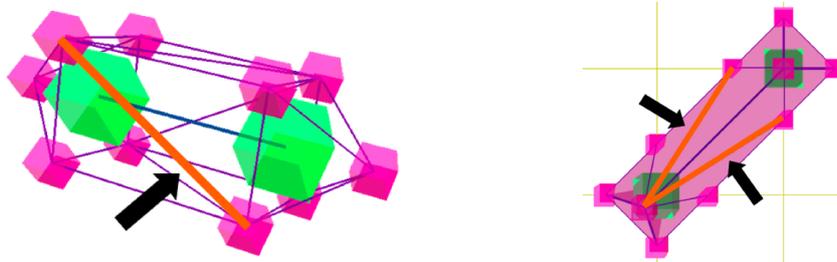


Figure 7.7. Création des liens entre les sommets du maillage selon des règles géométriques spécifiques.

L'étape finale consiste à construire les triangles du polyèdre : le calcul est similaire à celui détaillé dans la section 7.3.2.2 : la liste des arêtes est parcourue et tous les 3-cycles sont ajoutés à

l'ensemble des triangles. Un dernier test est alors pratiqué : si une arête du squelette intersecte un triangle du maillage, alors il n'est pas retenu pour le polyèdre résultant final.

La figure 7.8 illustre le maillage associé au squelette le plus simple composé d'un seul voxel (à gauche), ainsi que les polyèdres englobants pour des squelettes composés de deux ou trois voxels (au centre et à droite).

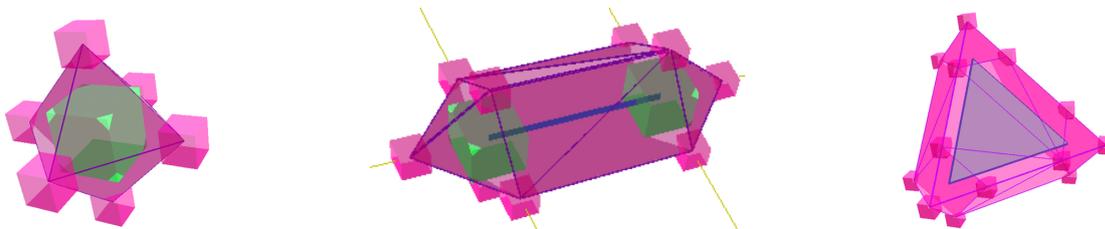


Figure 7.8. A gauche : un voxel seul génère un octaèdre. Au centre et à droite : polyèdres obtenus pour deux squelettes simples.

La figure 7.9 présente le processus de triangulation dans son intégralité pour un squelette simple qui caractérise une surface à un trou : l'esquisse est tout d'abord éditée dans une grille cubique, des segments, des triangles et des tétraèdres sont ensuite calculés pour définir le squelette, puis les points entourant le squelette, les arêtes et les triangles du maillage sont générés.

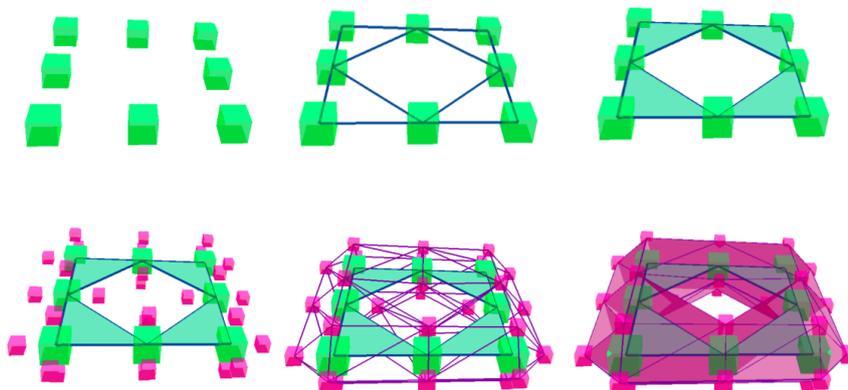


Figure 7.9. Les différentes étapes du processus de génération de maillage.

Ces maillages sont simples et basiques : ils définissent la forme globale d'un objet créé de manière interactive, et ils sont ainsi adaptés pour être utilisés en tant que *polyèdres de contrôle* en combinaison avec le formalisme des surfaces de subdivision. Ainsi une édition multi-résolution peut être pratiquée ultérieurement sur le maillage obtenu, en fonction du niveau de résolution souhaité. Parmi les nombreux schémas de subdivision à disposition, nous avons naturellement convergé vers ceux dédiés aux maillages triangulaires, et plus particulièrement vers le schéma de Loop.

7.3.4 Multi-résolution et surfaces de subdivision

On parle d'un modèle géométrique *multi-résolution* s'il a la capacité de renfermer plusieurs *niveaux de détails* (que l'on appelle *LoD*, pour *Levels of Detail* en anglais). Le lecteur pourra se référer à [20] pour une étude approfondie des concepts généraux et des structures de données pour

les maillages multi-résolution. En fonction du contexte, un objet peut être représenté soit par une forme grossière (un maillage en basse résolution), soit par une forme raffinée (un modèle détaillé en haute résolution).

Dans ce cadre, les *surfaces de subdivision* sont apparues il y a une trentaine d'années, suite aux travaux de Catmull et Clark [21], et de Doo et Sabin [22]. Cette approche ne s'est développée que récemment dans un large panel d'applications en informatique graphique et en CFAO [23]. Une raison de cet essor est l'émergence des techniques de multi-résolution, qui s'appuient sur des surfaces dont les géométries sont de plus en plus complexes.

Le principe consiste à subdiviser chaque polygone d'un maillage d'après un schéma spécifique. Lorsque le nombre d'itérations augmente, les surfaces obtenues sont de plus en plus lisses. En pratique, seules quelques itérations suffisent pour obtenir un rendu lissé satisfaisant pour la plupart des domaines applicatifs.

Les algorithmes de subdivision sont définis récursivement. Le processus commence avec un maillage polygonal donné, appelé *polyèdre de contrôle*, auquel on applique un schéma de raffinement de manière à produire de nouveaux sommets et de nouvelles faces.

Les schémas de subdivision peuvent être soit interpolants (on peut citer les schémas Butterfly ou de Kobbelt par exemple), soit approximants (tels que ceux de Doo-Sabin, Midedge, Catmull-Clark ou Loop). Dans notre cas, parce que les surfaces de subdivision sont utilisées pour leur qualité de multi-résolution, il est naturel de choisir un schéma approximant pour avoir la garantie que le maillage obtenu à chaque subdivision soit toujours *intérieur* au polyèdre initial. En effet, un schéma interpolant produirait un maillage « circonscrit » aux points du polyèdre de contrôle, qui les engloberait et pourrait mener à des auto-intersections.

Notre choix s'est donc porté sur le schéma de Loop [24] car d'une part il est approximant, et d'autre part il est intrinsèquement dédié aux maillages triangulés, comme le sont ceux produits par notre algorithme. La figure 7.10 montre trois itérations de ce schéma de subdivision sur un objet simple : chaque triangle est divisé en quatre triangles plus petits. Les anciens et les nouveaux sommets sont déplacés, chaque position étant le barycentre pondéré des voisins du sommet en jeu (des *masques de subdivision* sont utilisés pour déterminer les poids à appliquer).

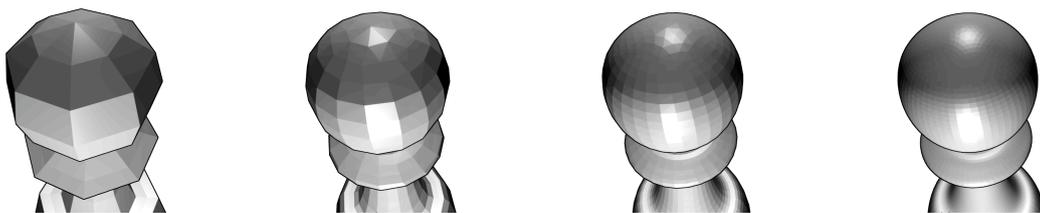


Figure 7.10. Trois itérations du schéma de subdivision de Loop, à partir d'un polyèdre de contrôle simple (à gauche).

Ainsi, d'une part un polyèdre basique est généré automatiquement, sa topologie étant caractérisée par le squelette, et d'autre part il est possible d'obtenir plusieurs niveaux de détails de ce modèle grâce à l'utilisation des surfaces de subdivision d'après le schéma de Loop. Cette combinaison de notre approche de construction de maillage avec les surfaces de subdivision permet de produire des modèles multi-résolution de topologie arbitraire, ceci de manière intuitive et ergonomique. A un haut niveau de résolution, il est de ce fait envisageable d'éditer les détails et les spécificités locales d'un objet initialement esquissé.

7.4 Validation et exemples

Dans cette section, nous illustrons notre approche par plusieurs exemples de conception de forme, depuis l'esquisse jusqu'à la surface raffinée finale, et en passant par le maillage généré automatiquement. Une vidéo est disponible à l'adresse suivante :

http://bitly.com/surface_sketching

7.4.1 Exemple : un « *insecte troué* »

On se propose de décrire étape par étape la construction d'un *insecte imaginaire*, pour illustrer la manière de caractériser la topologie de l'objet (il s'agit ici d'une surface de genre 1, et dont le solide associé comporte deux cavités).

7.4.1.1 Esquisse de l'insecte

Tout d'abord, les caractéristiques globales de la forme à concevoir sont définies dans une grille cubique, comme le montre la figure 7.11 (a,b,c). Ceci est effectué en utilisant un curseur 3D et en déplaçant un *plan d'édition* (la grille en jaune sur la figure).

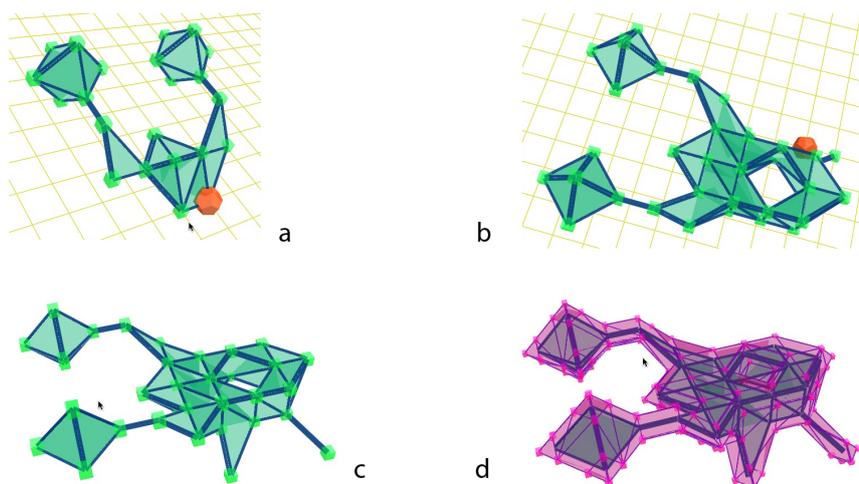


Figure 7.11. Esquisse dans une grille 3D (a,b,c). Génération du maillage (d).

Au cours de l'édition des voxels de l'esquisse, les sommets, les arêtes, les triangles et les tétraèdres sont construits pour caractériser la topologie de l'objet.

7.4.1.2 Polyèdre englobant

Dans un second temps, le polyèdre englobant est automatiquement généré d'après les règles définies dans la section 7.3.3. La figure 7.11 (d) illustre les sommets générés à la suite de la phase de maillage. Le polyèdre obtenu entoure l'esquisse. On peut noter la présence du trou dans la surface et des deux cavités de l'insecte, initialement définies par un cycle et par deux coques.

7.4.1.3 Niveaux de détails

A partir du polyèdre englobant, les niveaux de détails sont construits en utilisant le schéma de subdivision de Loop. De la gauche vers la droite, la figure 7.12 présente le polyèdre de contrôle de

départ M , deux niveaux de subdivision (les deux cavités et le trou sont indiqués) et la surimposition de M sur le deuxième niveau. Grâce à l'utilisation d'un schéma approximant, on peut remarquer que M entoure le maillage subdivisé.

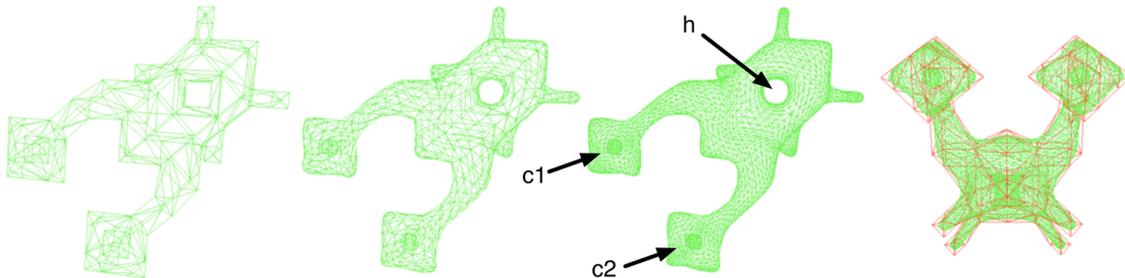


Figure 7.12. Quelques niveaux de subdivision.

7.4.2 Performances de l'algorithme

La complexité de la méthode de construction de maillage est linéaire relativement au nombre de voxels qui constituent le squelette. En effet, pour chaque voxel, seulement un petit nombre de sommets englobants peuvent être créés (jusqu'à 6). Pour chaque sommet, il y a six cas potentiels pour éditer une arête (voir la section 7.3.3.2). En pratique, le temps de calcul est quasi-instantané, le squelette étant composé d'un nombre raisonnable de voxels car c'est l'utilisateur qui les définit interactivement.

7.4.3 Déformations ultérieures

La figure 7.13 montre que l'on peut éditer ultérieurement les maillages créés avec notre approche dans le contexte d'un modèleur 3D (il s'agit ici du logiciel libre Blender [25]). L'insecte est déformé localement et globalement en utilisant des outils spécifiques (ici l'*outil d'édition proportionnel*).

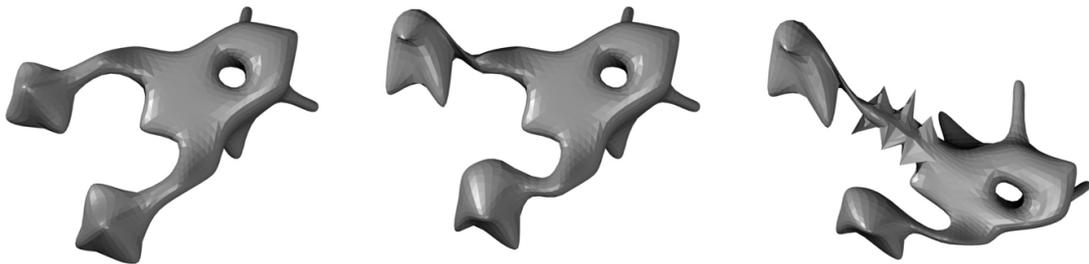


Figure 7.13. Edition du maillage avec un logiciel de modélisation 3D.

7.4.4 Autres exemples

Les figures 7.14, 7.15, 7.16 et 7.17 illustrent le processus dans sa totalité pour un objet de genre 1 (une *araignée trouée*) : tout d'abord l'esquisse du squelette, puis la génération automatique du

polyèdre englobant, quelques niveaux de subdivision, et en dernier lieu l'édition du maillage par ajout de détails locaux sur la surface raffinée.

La figure 7.18 montre quelques étapes du *design* d'une simple cavité, la figure 7.19 présente la réalisation d'un trou à partir de la cavité lorsque deux voxels sont retirés du squelette. La figure 7.20 montre la création de deux tores entrelacés, en esquissant deux cycles non connexes de voxels. Le dernier exemple est un objet à plusieurs trous (voir figure 7.21) : un premier squelette est défini (a, b) dans le but d'obtenir un polyèdre initial basique (c). Puis le squelette est réédité (d, e, f) pour produire l'objet final (g).

7.5 Conclusion et perspectives

L'approche que nous avons proposée dans ce chapitre consiste à générer un maillage de manière automatique à partir d'un descripteur de forme composé de voxels. Ce dernier est dessiné interactivement dans une grille 3D. Il représente l'apparence globale de l'objet à modéliser. Additionnellement, nous avons montré que les polyèdres obtenus pouvaient être combinés avec les surfaces de subdivision, et ainsi permettre une déclinaison multi-résolution du modèle. Les maillages raffinés produits sont parfaitement adaptés à la manipulation dans le cadre de logiciels de modélisation 3D.

Notre principale contribution est l'élaboration d'une nouvelle méthode de génération de surface à partir d'un squelette topologique, couplée aux surfaces de subdivision pour obtenir un modèle à plusieurs niveaux de détails.

Les perspectives de travail s'articulent principalement autour de la possibilité de rendre le squelette topologique plus flexible, moins contraint par la grille cubique qui, même si elle s'avère pratique pour esquisser la structure globale d'une forme, peut avoir des limites.

- Dans un premier temps, il pourrait être intéressant de ne plus considérer une grille de construction fixe, mais dont les voxels auraient une taille variable en fonction de l'importance des détails morphologiques à représenter. Dans cet esprit, les *octrees* seraient une première étape pour travailler à partir d'un squelette lui-même multi-résolution.
- L'étape suivante serait d'utiliser, pour les squelettes, des complexes simpliciaux dont les coordonnées des sommets seraient dans \mathbb{R}^3 , la principale difficulté étant alors de placer les points du maillage et de les mailler sans que la topologie en soit affectée. Le fait de ne plus travailler en tirant parti des relations d'adjacence simplificatrices d'une grille cubique serait alors un grand handicap à surmonter, et il faudra alors établir de nouvelles règles géométriques itératives pour construire le maillage englobant, en évitant de passer par la lourdeur de « gonflements implicites » de surfaces.
- Une direction de recherche pourrait être de ne plus construire les arêtes du polyèdre englobant en utilisant les règles définies dans la section 7.3.3.2, mais plutôt en utilisant une *table de configurations* et en comparant le voisinage de chaque voxel du squelette avec un ensemble de 26-configurations pré-calculées, un peu à la manière de l'algorithme des *Marching Cubes* [17].
- Une piste à explorer serait d'appliquer l'esquisse interactive au domaine de l'animation, pour une utilisation plus poussée dans le cadre des logiciels de modélisation. Le squelette topologique et structurel pourrait alors se transposer en *squelette pour l'animation d'objet* une fois la phase de création terminée.

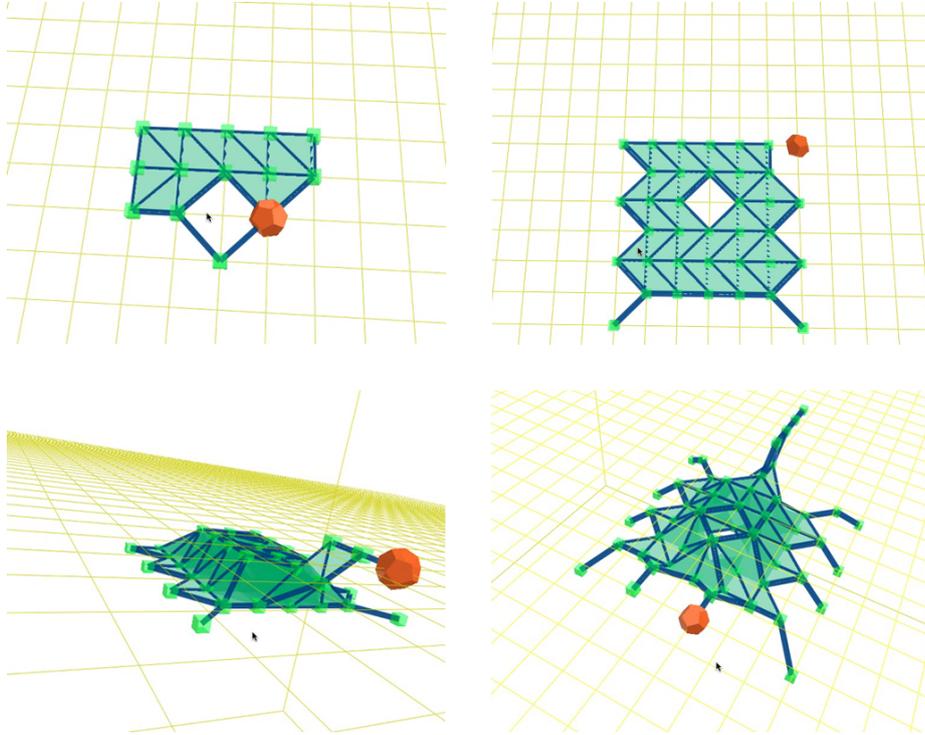


Figure 7.14. Esquisse de l'*araignée trouée*.

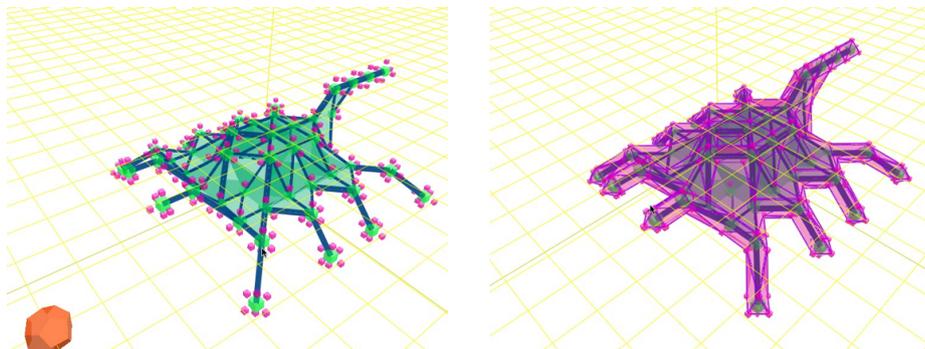


Figure 7.15. Génération du maillage englobant de l'*araignée*.

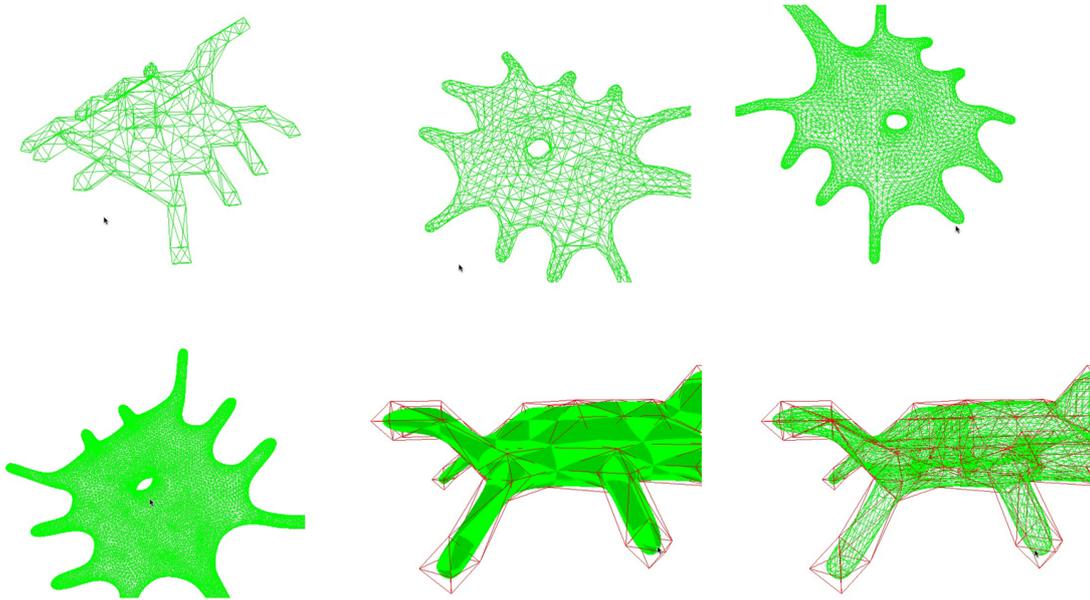


Figure 7.16. Quelques niveaux de subdivision du modèle de l'araignée.

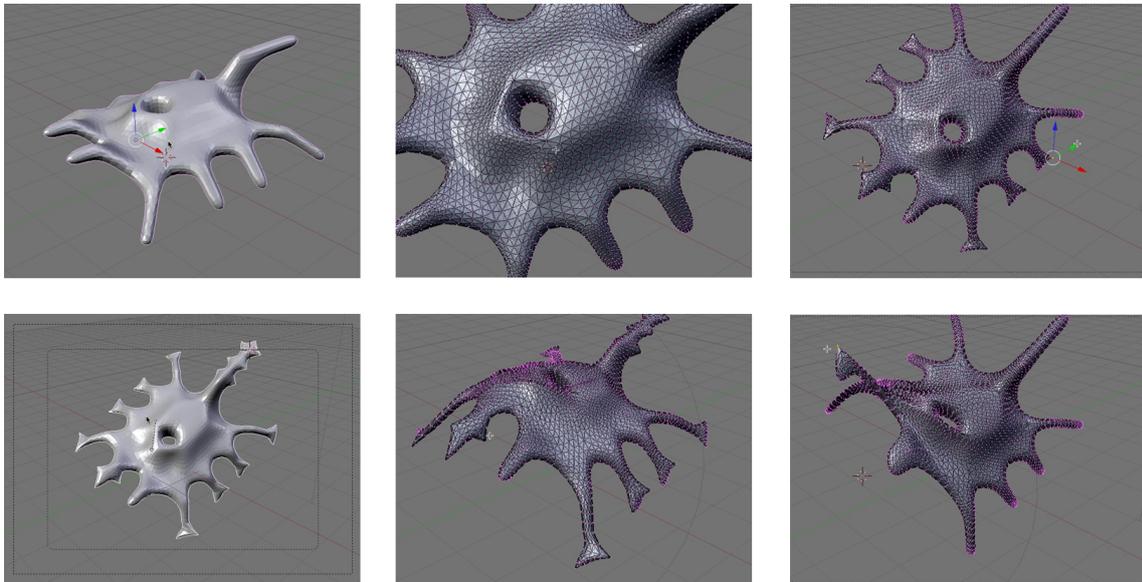


Figure 7.17. Quelques étapes lors de l'édition du maillage de l'araignée, ajout de détails sur la surface raffinée.

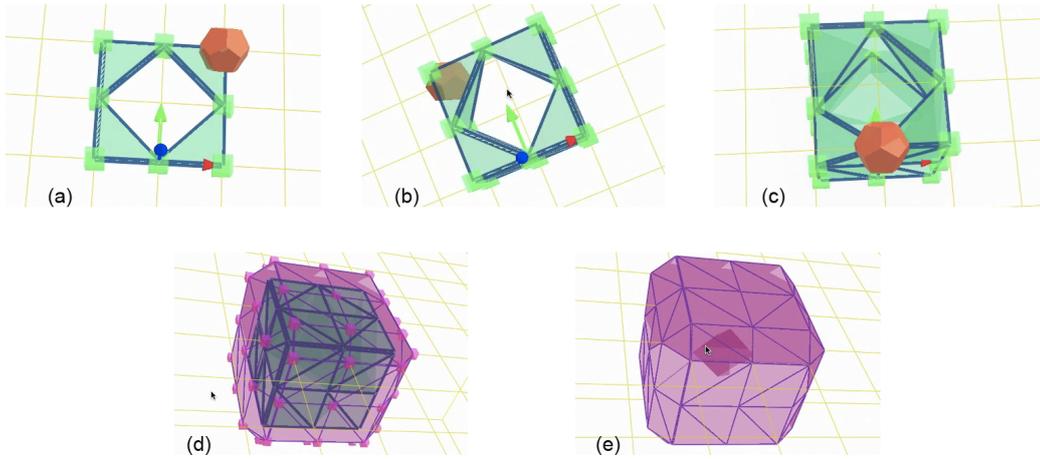


Figure 7.18. Conception d'une cavité.

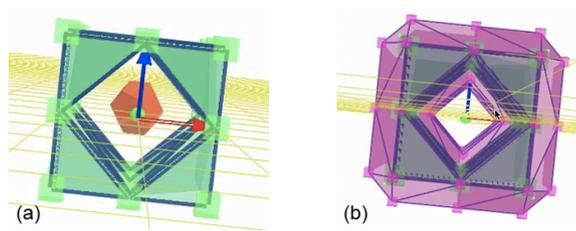


Figure 7.19. Conception d'un trou.

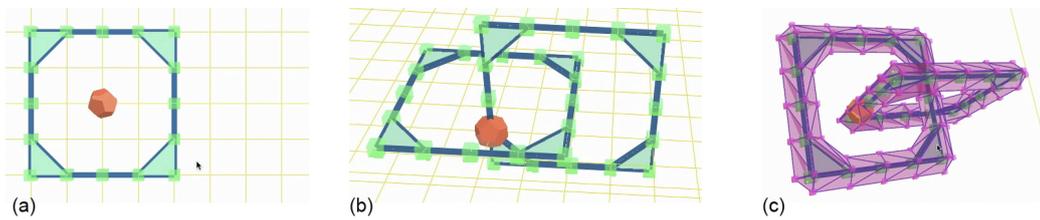


Figure 7.20. Deux tores entrelacés.

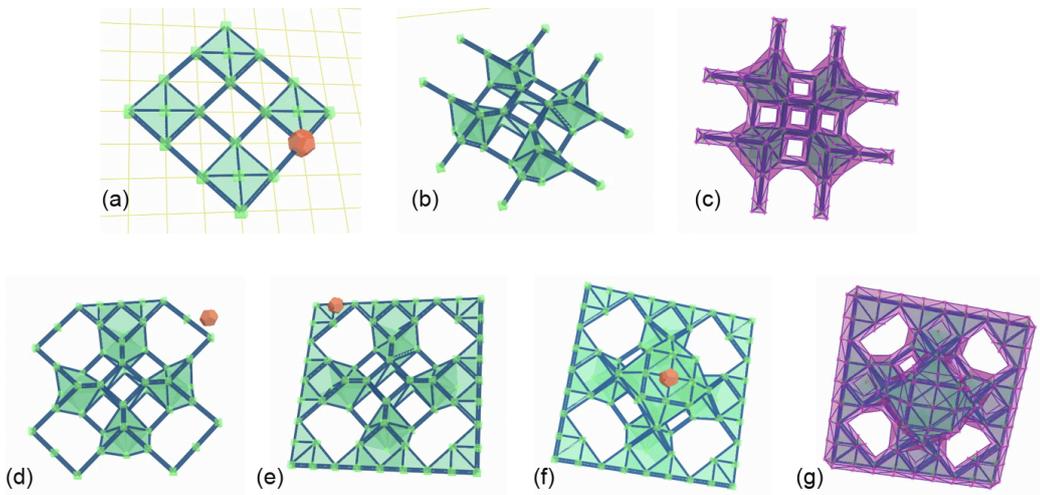


Figure 7.21. Objet à plusieurs trous.

7.6 Bibliographie

- [1] J. BLOOMENTHAL, C. BAJAJ, J. BLINN, M.-P. CANI-GASCUEL, A. ROCKWOOD, B. WYVILL et G. WYVILL. *Introduction to implicit surfaces*. Computer Graphics and Geometric Modeling series. Morgan Kaufmann Publisher, 1997.
- [2] J. BLOOMENTHAL et B. WYVILL. “Interactives techniques for implicit modeling”. In : *Computer Graphics* 24.2 (1990), pp. 109–116.
- [3] Eric BITTAR, Nicolas TSINGOS et Marie-Paule GASCUEL. “Automatic reconstruction of unstructured 3D data : Combining a medial axis and implicit surfaces”. In : *Computer Graphics Forum (Eurographics’95 Proc.)* T. 14. 1995, pp. 457–468.
- [4] B. WYVILL, C. MCPHEETERS et G. WYVILL. “Animating soft objects”. In : *The Visual Computer* 2.4 (1986), pp. 235–242.
- [5] A. SHERSTYUK. “Interactive shape design with convolution surfaces”. In : *Shape Modeling International SMI’99, International Conference on Shape Modeling and Applications*. Aizu-Wakamatsu, Japan, mar. 1999, pp. 56–65.
- [6] A. ALEXE, L. BARTHE, M.-P. CANI et V. GAILDRAT. “Shape modeling by sketching using convolution surfaces”. In : *Pacific Graphics*. Macau, China, oct. 2005.
- [7] E. FERLEY, M.-P. CANI et J.-D. GASCUEL. “Resolution adaptive volume sculpting”. In : *Graphical Models, Special Issue on Volume Modelling*. T. 63. 6. 2001, pp. 459–478.
- [8] B. De ARAUJO et J. JORGE. “Blobmaker : free-form modelling with variational implicit surfaces”. In : *Proceedings of "12° Encontro Português de Computação Grafica" (12° EPCG)*. Porto, Portugal, 2003, pp. 17–26.
- [9] T. IGARASHI, S. MATSUOKA et H. TANAKA. “Teddy : a sketching interface for 3D freeform design”. In : *SIGGRAPH ’99*. New York, NY, USA, 1999, pp. 409–416.
- [10] A. BERNHARDT, A. PIHUIT, M.-P. CANI et L. BARTHE. “Matisse : Painting 2D regions for Modeling Free-Form Shapes”. In : *EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, SBIM 2008*. Annecy, France, 2008, pp. 57–64.
- [11] A. PASKO, V. ADZHIEV, A. SOURIN et V. SAVCHENKO. “Function representation in geometric modeling : concepts, implementation and applications”. In : *The Visual Computer* 11.8 (1995), pp. 429–446.
- [12] A. PASKO, V. ADZHIEV, B. SCHMITT et C. SCHLICK. “Constructive Hypervolume Modeling”. In : *Graphical Models* 63.6 (2001), pp. 413–442.
- [13] L. MARKOSIAN, J. M. COHEN, T. CRULLI et J. HUGUES. “Skin : a constructive approach to modeling free-form shapes”. In : *Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH’99)* (1999), pp. 393–400.
- [14] C. M. HOFFMANN. “Medial-axis approach to mesh generation”. In : *Lecture Notes : Princeton Conference*. Computer Science Department, Purdue University. Juil. 1996.
- [15] D. J. SHEEHY, C. G. ARMSTRONG et D. J. ROBINSON. “Shape description by medial surface construction”. In : 2.1 (mar. 1996), pp. 62–72.
- [16] R. RAAB, C. GOTSMAN et A. SHEFFER. “Virtual woodwork : Making toys from geometric models”. In : *International Journal of Shape Modeling* 10.1 (2004), pp. 1–30.
- [17] W. E. LORENSEN et H. E. CLINE. “Marching cubes : A high resolution 3D surface construction algorithm”. In : *SIGGRAPH Computer Graphics* 21.4 (août 1987), pp. 163–169.

- [18] Y. KENMOCHI, A. IMIYA et A. ICHIKAWA. “Boundary Extraction of Discrete Objects”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 71.3 (1998), pp. 281–293.
- [19] Jean-Luc MARI et Jean SEQUEIRA. “Closed Free-Form Surface Geometrical Modeling – A New Approach with Global and Local Characterization”. In : *International Journal of Image and Graphics (IJIG)* 4.2 (avr. 2004). World Scientific Publishing, pp. 241–262.
- [20] E. DANOVARO, L. De FLORIANI, P. MAGILLO, E. PUPPO et D. SOBRERO. “Level-of-detail for data analysis and exploration : A historical overview and some new perspectives”. In : *Computers and Graphics (Pergamon)* 30.3 (2006), pp. 334–344.
- [21] E. CATMULL et J. CLARK. “Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes”. In : *Computer Aided Design* 10.6 (1978), pp. 350–355.
- [22] D. DOO et M. SABIN. “Analysis of the behaviour of recursive division surfaces near extraordinary points”. In : *Computer Aided Design* 10.6 (1978), pp. 356–360.
- [23] P. SCHRÖDER et D. ZORIN. “Subdivision for modeling and animation”. In : *Course notes of Siggraph 98. ACM SIGGRAPH*. 1998.
- [24] C. LOOP. *Smooth subdivision surfaces based on triangles*. Master thesis. University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- [25] BLENDER. “Free open source 3D content creation suite, available for all major operating systems under the GNU General Public License”. URL : <http://www.blender.org/>.

7.7 Publications associées à ces travaux

- [26] **Jean-Luc MARI**. “Automatic Surface Generation with a Voxel-Based Skeleton Defining Topological Constraints”. In : *International Journal of Shape Modeling (IJSM)* 16.1-2 (déc. 2010). World Scientific Publishing, pp. 173–194.
- [27] **Jean-Luc MARI**. “Surface sketching with a voxel-based skeleton”. In : *15th IAPR International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2009*. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 5810. Montréal, Canada : Springer-Verlag, S. Brlek, C. Reutenauer et X. Provençal (Eds.), sept. 2009, pp. 325–336.
- [28] **Jean-Luc MARI**. “Automatic Mesh Generation from 3D Internal Sketch and Topological Constraints”. In : *17th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphi-Con'2007*. Moscou, Russie, juin 2007, pp. 9–16.

CONCLUSION

8.1 Synthèse des travaux présentés

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent de plusieurs approches dédiées à l'extraction d'information dans le contexte graphique. Selon le type de données en entrée, les méthodes, les formalismes et les outils à employer sont différents, et deux grands axes ont pu s'en dégager.

Le premier bloc concerne l'obtention d'information dans un cadre initialement discret, c'est-à-dire lorsque la matière première est constituée de voxels ou de pixels. Dans les trois projets exposés, il a été question de se placer à un niveau local pour mieux comprendre les relations entre les entités élémentaires (le plus souvent des voxels) pour construire une structure géométrique ayant un sens topologique (un complexe simplicial), pour définir des descripteurs de forme 3D ayant un sens au niveau perceptuel dans une image représentant des noyaux de cellules, ou pour tracer un contour précis ayant un sens anatomique correspondant à la cornée.

Le second bloc est relatif à l'extraction d'information dans un cadre dit *semi-continu*, c'est-à-dire s'appuyant en entrée sur des maillages. Les trois projets présentés placent la représentation polyédrique au centre de différentes problématiques : détection de lignes ayant un sens géologique, création d'un maillage adapté au suivi d'un organe, génération d'une surface dont la topologie est définie par une esquisse.

Bien que reposant sur des types de données différents, ces deux axes ont un point commun : l'utilisation de techniques propres à la modélisation géométrique pour mieux comprendre une forme, quelle soit discrète ou polyédrique, surfacique ou volumique. Que les coordonnées des primitives élémentaires soient définies dans \mathbb{Z}^3 ou dans \mathbb{R}^3 , il s'agit de manipuler les notions de connexité, d'adjacence, d'arête et de triangle, de courbure ou de contour. De plus, la topologie joue presque systématiquement un rôle fondamental, que ce soit d'un point de vue de la caractérisation d'un solide (volumes numériques, complexes simpliciaux) ou bien relativement à une zone surfacique sur un maillage (lignes connectées extraites sur une surface d'affleurement). Ces blocs ne sont en effet pas hermétiques et des concepts sont parfois empruntés aux deux axes à la fois, comme par exemple dans les chapitres 2 et 7 où les voxels cohabitent avec les complexes simpliciaux, ou bien comme dans le chapitre 6 où la construction d'un maillage surfacique s'appuie sur des données voxelisées.

8.2 Principales contributions

Ces travaux de recherche sont le fruit de diverses collaborations. Qu'elles soient internationales, nationales, locales ou relevant d'encadrements en thèse ou en master, ces collaborations ont naturellement permis d'impliquer de nombreux étudiants. Au cœur du processus de recherche, ils sont de fait pleinement associés aux contributions attachées à ces travaux.

Le chapitre 2 avait pour thème l'*extraction d'informations géométriques et topologiques dans les volumes numériques binaires*. Nous avons proposé deux approches ayant pour but de construire un complexe simplicial à partir d'un objet représenté par un ensemble de voxels. La première méthode repose sur une décimation d'une tétraédrisation non dégénérée calculée en amont, la seconde méthode s'appuie sur la construction d'un complexe simplicial arête par arête. Elles constituent toutes deux une alternative aux approches existantes. De plus, nous avons également décrit un algorithme dédié à la simplicialisation des arbres octaux ne traitant qu'un sous-ensemble de voxels d'intérêt.

Le chapitre 3 portait sur la *caractérisation du volume sous la nappe par indices de forme 3D*. Nous avons présenté des indices de formes spécifiques aux noyaux de cellules à analyser, notamment en transposant les données en volume sous la nappe pour avoir accès à des outils 3D. Intégrés à un classifieur, ces indices ont permis d'augmenter le taux de discrimination automatique des noyaux de cellules de manière notable.

Le chapitre 4 était consacré à la *détection de contours dans des images tomographiques en cohérence optique pour la reconstruction 3D de la cornée*. Nous avons proposé une approche visant à tracer les contours de la cornée depuis des images radiales qui s'appuie sur des informations locales et, pour améliorer sensiblement le processus, sur des *a priori* liés aux caractéristiques propres à la cornée. Les contours obtenus sont compatibles avec la construction ultérieure d'un modèle géométrique 3D de la cornée.

Le chapitre 5 a traité du problème de *détection de lignes caractéristiques dans les maillages*. Nous avons présenté deux approches d'extraction de lignes particulières sur des affleurements numériques. La première s'inscrit dans la continuité des algorithmes existants dans le domaine, en étudiant la variation de la courbure sur un maillage surfacique et en ne retenant que les extrema. Pour limiter la détection d'artefacts, un filtrage directionnel efficace est appliqué en fin de processus. La seconde méthode développée améliore les résultats de la première en ne procédant plus à des estimations différentielles du troisième ordre, trop instables, mais en marquant les sommets d'après un critère de courbure puis en appliquant un algorithme de squelettisation original et dédié aux maillages surfaciques. Cette combinaison de deux stratégies permet d'obtenir des lignes caractéristiques moins bruitées et surtout plus connectées, qui correspondent à des objets géologiques que l'on trouve sur les affleurements.

Le chapitre 6 portait sur la *reconstruction 3D du volume rénal en vue de la génération d'un modèle dynamique pour le suivi et la destruction de tumeurs*. Nous avons proposé une ébauche d'approche pour la détection de points caractérisant le rein et pour sa reconstruction. La frontière de l'organe est obtenue avec une méthode de type croissance de région, puis un maillage approximant est construit en utilisant un algorithme existant performant. Cette approche doit être poursuivie et améliorée pour, à terme, fournir un modèle dynamique du rein qui soit en phase avec la respiration d'un patient tout au long du processus de destruction d'une tumeur, sans aucune effraction cutanée et en transmettant un agent physique de type ondes de radiofréquence.

Le chapitre 7 avait pour objet la *génération automatique de maillages à partir d'information structurelle synthétique*. Nous avons présenté une approche originale qui permet de construire une

surface basique dont la topologie et l'allure globale sont définies par une esquisse squelettique dessinée interactivement. En premier lieu, un petit nombre de points est placé automatiquement autour du squelette, puis des règles de maillage spécifiques sont appliquées pour obtenir une forme englobante. Nous avons vu que cette dernière était adaptée à une utilisation dans un cadre de multi-résolution car elle peut être considérée comme un polyèdre de contrôle approprié au formalisme des surfaces de subdivision.

DEUXIÈME PARTIE

PROJET DE RECHERCHE

TRAVAUX EN COURS ET FUTURS

Ce chapitre est consacré à la description de mon projet de recherche. Il s'articule autour de deux sections : dans un premier temps, ce projet doit permettre de prolonger des actions présentées dans ce mémoire, notamment celles décrites dans les chapitres 2, 5 et 6 qui correspondent à des collaborations actives, dans un deuxième temps, à moyen et long termes, ce projet vise à s'étendre à l'extraction d'information dans des contextes plus généraux et liés à des thèmes en plein essor en modélisation géométrique.

9.1 Actions à court terme

Les travaux en cours se divisent en trois projets qui s'inscrivent dans la continuité des collaborations relatives à l'Université de Séville, au laboratoire de géologie GSRC et au laboratoire L2PTV de la Faculté de Médecine de la Timone.

9.1.1 Voxels et complexes

La collaboration avec l'équipe CATAM de Pedro Real à l'Université de Séville est très active et devrait donner lieu à des thèses en cotutelle pour matérialiser de manière plus forte les échanges entre les deux groupes. Les thématiques visées sont la construction de complexes simpliciaux en dimension 4 et plus, et l'élaboration d'une plateforme logicielle pour l'analyse topologique d'objets discrets.

9.1.1.1 Calcul des complexes cellulaires associés à des objets discrets en 4D

L'objectif de ces travaux menés principalement par Ana Pacheco, doctorante en cotutelle sous la direction de Pedro Real et de Pascal Lienhardt, est de construire des complexes cellulaires¹ associés à des volumes numériques binaires *dynamiques*, c'est-à-dire des objets discrets en 4D. Pour ce faire, plusieurs approches sont à l'étude. La première est un processus constructif arête par arête qui consiste à fabriquer un complexe pour chaque 16-configuration de l'objet, puis à « coudre » ensemble les configurations qui sont connectées. La deuxième approche qui est sur le point d'être développée se calque sur la méthode incrémentale décrite dans la section 2.4.2, constructive elle aussi, mais sans passer par une phase de *couture* pour assembler des blocs de voxels 4D (également appelés des *doxels* pour *dynamic voxels*). Une troisième approche à envisager et à comparer avec les deux premières repose sur une mise en correspondance de toutes les 16-configurations de l'objet 4D avec une table précalculée de complexes cellulaires.

1. Il s'agit d'une classe d'objets plus grande que celle des complexes simpliciaux.

9.1.1.2 Vers une plateforme logicielle pour l'analyse topologique

Il existe peu de plateformes tournées vers les structures utilisées en géométrie discrète, et celles dédiées plus particulièrement à l'analyse topologique sont plus rares encore. Parmi les logiciels qui s'inscrivent dans cette lignée, on peut citer de manière non exhaustive :

- Moka², un modéleur géométrique 3D à base topologique développé initialement à l'Université de Poitiers,
- Voxel3D³, un modéleur orienté « voxels » destiné aux *designers* débutants,
- QVox⁴, un outil de visualisation et d'édition de volumes numériques développé par Sébastien Fourey au laboratoire GREYC,
- CHomP⁵ (pour *Computational Homology Project*), un logiciel et une librairie destinés au calcul de l'homologie de volumes numériques binaires,
- DGtal⁶, une librairie *open source* qui vise à agréger et à structurer les différents développements de la communauté de géométrie discrète,
- Volume Graphics Studio⁷, un logiciel commercial performant et dédié à la visualisation et à l'analyse de la géométrie de gros volumes numériques.

Pour pouvoir tester des algorithmes existants ou en développement, faire des comparaisons sur les performances d'une nouvelle approche vis-à-vis de l'existant, il peut être intéressant de développer une plateforme logicielle propre à l'analyse topologique dans un contexte discret. Dans le domaine du *mesh processing* (le traitement de maillages triangulés), un modèle à suivre serait le logiciel MeshLab⁸, qui est à présent devenu un standard.

Un premier logiciel, Voxelo, a été développé en 2007 par l'équipe CATAM à l'Université de Séville. Il s'agissait initialement d'un outil pédagogique pour manipuler les voxels comme des *Legos virtuels*, pour construire des objets discrets élémentaires et pour effectuer une analyse topologique reposant sur la 14-adjacence. Voxelo a été recodé sous ma supervision en intégrant la librairie Qt en 2010, pour en faire un logiciel multi-plateforme, et des efforts sont à présent à faire pour le rendre modulaire, de manière à avoir un noyau qui soit indépendant des *plugins* permettant d'implémenter différents algorithmes d'analyse topologique.

Ce projet qui est encore en phase de maturation s'appelle *Doxelo*, et il doit à terme pouvoir permettre de manipuler des voxels 3D, 4D, voire nD . Pour le mener à bien, il est envisagé qu'un post-doctorant encadré par des personnes de l'équipe CATAM et par moi-même soit recruté dans les mois à venir (avec un financement provenant de l'Université de Séville).

9.1.2 Construction et interprétation automatiques d'affleurements numériques

Un projet appelé GeOMesh (pour *Geological Outcrop Mesh Automated Construction and Interpretation*) est en cours de finalisation et se situe dans la continuité du projet VOGP décrit dans la section 5.1. Il repose de nouveau sur la collaboration avec Sophie Viseur du laboratoire GSRC. Il s'agit de poursuivre les travaux effectués depuis 36 mois dans le cadre de la thèse de Dimitri

2. <http://www.sic.sp2mi.univ-poitiers.fr/moka/>

3. <http://www.everygraph.com/>

4. <http://qvox.sourceforge.net/>

5. <http://chomp.rutgers.edu/>

6. <http://liris.cnrs.fr/dgtal/>

7. <http://www.volumegraphics.com/>

8. <http://meshlab.sourceforge.net/>

Kudelski et qui ont permis d'aboutir à une méthode robuste de détection de lignes caractéristiques, dans le but de mieux comprendre la géométrie des affleurements numériques. Ce premier effort est prometteur et il a vocation à être prolongé pour développer de nouveaux outils de modélisation géométrique pour l'étude d'affleurements géologiques numériques (ou DOMs pour *Digital Outcrop Models*) issus de données LIDAR. Ces derniers sont de plus en plus utilisés en géologie pour caractériser la géométrie haute résolution des formations géologiques. Cependant, ils produisent des données volumineuses sous la forme de nuages de points difficile à trianguler. Des solutions existent actuellement pour modéliser et visualiser des structures géologiques complexes, mais aucune n'est réellement dédiée aux problèmes propres aux acquisitions LIDAR.

Le projet GeOMesh s'articule autour des deux points suivants :

- l'amélioration des maillages 3D provenant d'acquisitions LIDAR,
- l'interprétation en développant des techniques spécifiques dédiées aux objets géologiques.

Concernant l'**amélioration des maillages issus d'acquisitions LIDAR**, il s'agit principalement de pouvoir gérer de manière pertinente la densité des points. Elle est très variable pour deux raisons : d'une part, certaines zones sont plus exposées aux rayons que d'autres (en fonction de l'inclinaison des zones acquises par rapport à la position du LIDAR) ; d'autre part le modèle est souvent constitué de plusieurs acquisitions qui se superposent (il existe des zones de recouvrement sur-échantillonnées où un décalage de quelques centimètres rend difficile la construction d'une surface maillée de qualité sans confondre le bruit et la redondance d'information).

A propos de la problématique d'**interprétation automatique**, la pratique actuelle consiste à interpréter manuellement les objets géologiques. Il y a clairement un enjeu à automatiser ce processus car l'interprétation manuelle est titanesque : les structures géologiques sont souvent de plusieurs échelles (du mètre au kilomètre), hiérarchisées et imbriquées. Sur la base des travaux effectués jusqu'à présent, et pour mener à bien ces perspectives, il s'agira d'injecter davantage de connaissance dans le modèle. L'interprétation automatique reposerait en partie sur des critères géométriques, texturaux et géologiques. L'agencement topologique des objets géologiques détectés devra aussi être obtenu car il renseigne sur leurs processus de formation et leur chronologie.

De plus, nous nous proposons d'élaborer une suite logicielle (appelée OpenGeOML) composée d'une bibliothèque et d'une interface graphique. Cette dernière aura pour but de fournir une solution aux géologues utilisable immédiatement, pour la visualisation, la manipulation et l'interprétation de données LIDAR d'affleurements numériques. L'interface sera construite en sur-couche de la bibliothèque, cette dernière rassemblant les algorithmes proposés (implémentés de manière modulaire pour pouvoir être utilisés dans d'autres interfaces indépendantes du projet GeOMesh). Les fonctionnalités logicielles attendues comprennent entre autres : la multi-résolution intelligente dirigée par la connaissance géologique, la gestion des recouvrements (problème traditionnel des acquisitions LIDAR), le contrôle du bruit intrinsèque sans perturber la rugosité naturelle des roches, la capacité de manipuler des bases de données géométriques massives.

Pour faire vivre ce projet multidisciplinaire GeOMesh, deux sources de financement sont envisagées : une demande JCJC (Jeunes Chercheuses/Jeunes Chercheurs) auprès de l'ANR pour financer deux post-doctorants pour une durée de 18 mois chacun, et un renouvellement de contrat avec l'entreprise pétrolière ENI-AGIP pour financer une nouvelle thèse à compter de début 2012.

9.1.3 Modélisation dynamique et suivi du rein

Cette action en cours, matérialisée par les travaux de thèse de Valentin Léonardi, fait le pont entre les deux blocs vus dans ce mémoire : les problématiques rencontrées se situent à la frontière

entre le discret et le semi-continu, et traitent à la fois des représentations par voxels et de celles par maillages. En effet, l'information est extraite dans un premier temps d'un ensemble de voxels initial, puis dans un second temps, du maillage obtenu, que l'on manipule ensuite pour pouvoir mieux comprendre l'organe et son déplacement au cours du temps.

9.1.3.1 Amélioration de la phase d'extraction du nuage de points

Pour augmenter la profondeur de l'octree et ainsi gagner en précision (sans aller au delà d'une précision limite à déterminer et de l'ordre de quelques millimètres, qu'il est de toute manière inutile de dépasser car elle est liée d'une part à la précision des machines délivrant les agents physiques de destruction tumorale, et d'autre part à une marge sphérique de sécurité à respecter autour des tumeurs à traiter), il est nécessaire d'améliorer la phase d'extraction du nuage de points.

Pour ce faire, les travaux actuels portent sur la mise en place d'un *a priori* fort sur le rein, en forçant chaque contour 2D à respecter une forme circulaire. Un simple *snake* (ou *contour actif*) ne parviendrait pas à se plaquer sur les contours du rein, car les contrastes sont trop peu marqués entre les organes. Nous envisageons donc de définir une *frange de recherche de contour* manuellement pour la première coupe, puis de manière automatique pour les autres coupes. Cette zone de recherche contiendrait à coup sûr les contours du rein, car elle prendrait également en compte des paramètres de taille propres à cet organe pour ajouter de la connaissance. Pour détecter le contour du rein au sein de chaque coupe, un double contour actif (extérieur *rentrant* et intérieur *sortant*) devra être implémenté pour converger au mieux l'un vers l'autre. Etant donné que certaines zones ne permettront pas aux deux contours de converger en se rejoignant, le contour final sera le contour moyen des contours intérieur et extérieur.

9.1.3.2 Validation du modèle

Une fois que le modèle dynamique sera opérationnel et robuste, une phase de validation sera nécessaire. En effet, les mouvements du rein et de la tumeur devront être conformes aux déplacements réels, tout au long de plusieurs phases respiratoires, avec des corrections géométriques s'il y a lieu. La vérification de la position de l'organe et de la cible tumorale devra se faire sous contrôle scanner, avec une mesure précise de l'erreur et en définissant au mieux des inévitables marges de sécurité. Les deux étapes majeures à franchir avant d'en arriver à une mise en place d'un tel prototype sont :

- une étape de simulation de destruction de tumeur sur une période de 30 minutes, avec contrôle de l'erreur durant le suivi. Une étude similaire a été menée par Villard⁹ dans ses travaux sur les poumons, en simulant un scanner 4D avec le modèle géométrique obtenu, pour mesurer le degré de radiation que va recevoir un patient en pré-opératoire et pour ainsi préparer à l'intervention.
- une étape de validation *in vivo* sur des porcs, en collaboration avec des chercheurs du laboratoire L2PTV. Leurs travaux récents portent sur la greffe de tumeur sur de gros animaux et les premiers résultats sont prometteurs.

9. Pierre-Frédéric Villard. *Simulation du mouvement pulmonaire pour un traitement oncologique*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard (Lyon 1), septembre 2006.

9.2 Actions à moyen et long termes

A plus long terme, mon projet de recherche vise à s'élargir vers l'extraction d'information dans des contextes plus généraux et liés à des problématiques de plus en plus actuelles en modélisation géométrique. Le premier prolongement concerne l'étude des propriétés structurelles d'un objet discret dans un cadre *dynamique* et *multi-résolution*. Le deuxième volet traite de l'extraction d'information pour des représentations non structurées telles que les *modèles à base de points*. Les deux derniers thèmes portent sur la modélisation dynamique d'organes et la génération interactive et rapide d'objets.

9.2.1 Etude structurelle multi-résolution d'objets discrets dynamiques

Un thème actif depuis quelques années concerne la *multi-résolution* et son application aux modes de représentation usuels : maillages, images ou volumes numériques et surfaces de forme libre. Une voie de recherche intéressante peut consister à se focaliser sur les objets discrets en 3 voire en 4 dimensions et d'extraire des informations topologiques en fonction du niveau de détails considéré. Cette étude des propriétés structurelles d'un objet dans un cadre à la fois *discret*, *temporel* et *multi-résolution* trouve une application naturelle dans un contexte médical lorsque les données sont trop détaillées pour pouvoir être traitées rapidement ou efficacement, ou, par ailleurs, lorsqu'il est nécessaire de considérer un modèle en sous-résolution, mais que la topologie de l'objet est prépondérante et ne doit pas être dégradée (par exemple un cœur en mouvement, une tumeur qui se déplace dans un organe en fonction de la respiration ou l'évolution du nombre de micro-cavités osseuses sur une période déterminée).

9.2.2 Extraction d'information dans les modèles à base de points

La *modélisation à base de points* fait également partie des thèmes en plein essor qui, à la différence des volumes numériques ou des maillages, ne renferment pas d'information topologique car aucune relation d'adjacence n'est définie de manière intrinsèque. L'intérêt de travailler sur ces représentations moins structurées est grand car de nombreux dispositifs d'acquisition (tels que les LIDAR par exemple) fournissent nativement des nuages de points. Ne pas passer systématiquement par une phase de triangulation peut être une option avantageuse dans certains cas, dans la mesure où les données ne sont pas modifiées par des opérations qui peuvent dénaturer la géométrie initiale.

9.2.3 Généricité pour la modélisation dynamique d'organes

La modélisation d'organes est une problématique d'actualité qui ne possède pas de réponse générique car les formalismes à mettre en jeu sont fortement dépendant de l'organe considéré, de son comportement, de sa détectabilité au sein des données, de l'utilisation qui sera faite du modèle ultérieurement, etc. Que l'objectif soit lié au diagnostic d'une pathologie, à la quantification d'un phénomène anatomique ou à la simulation d'un traitement, la *compréhension du mouvement* d'un organe est une étape fondamentale. Il serait intéressant d'en étudier les aspects récurrents et fédérateurs d'un point de vue géométrique, en tenant compte de la variabilité que peuvent générer les spécificités propres à chaque organe.

9.2.4 Génération interactive et rapide d'objets

Un des intérêts de la modélisation d'objets par esquisse relève de sa capacité à pouvoir générer *rapidement* une forme basique, de manière ergonomique. Un prolongement possible pour la construction automatique de formes serait de s'abstraire de toute esquisse dessinée, et de considérer le squelette comme le support sémantique dans le cadre de la *modélisation déclarative*, pour la génération d'un polyèdre englobant multi-résolution. Les outils de haut niveau relatifs à cette branche de la modélisation géométrique sont traditionnellement destinés à concevoir des scènes ou des objets. Sous ce nouvel angle, l'intérêt résiderait en la détermination déclarative du *squelette* lui-même dans le but de simplifier la description d'une forme par sa structure interne, puis de propager l'information sur la surface englobante. Des règles simples traitant de la topologie et de la morphologie de la forme à générer doivent pouvoir donner un ensemble de squelettes solutions, et ainsi une collection de premières approximations surfaciques.

TROISIÈME PARTIE

CURRICULUM VITÆ

PUBLICATIONS

11.1 Revues internationales

- [1] Dimitri KUDELSKI, Sophie VISEUR, Giovanni SCROFANI et **Jean-Luc MARI**. “Feature Line Extraction on Meshes through Vertex Marking and 2D Topological Operators”. In : *International Journal of Image and Graphics (IJIG)* (2011). World Scientific Publishing. (A paraître).
- [2] Cédric CLOUCHOUX, Dimitri KUDELSKI, Ali GHOLIPOUR, Simon K. WARFIELD, Sophie VISEUR, Marine BOUYSSI-KOBAR, **Jean-Luc MARI**, Alan C. EVANS, Adre J. Du PLESSIS et Catherine LIMPEROPOULOS. “Quantitative in-vivo MRI measurement of cortical development in the fetus”. In : *Brain Structure and Function* (2011). (A paraître).
- [3] **Jean-Luc MARI**. “Automatic Surface Generation with a Voxel-Based Skeleton Defining Topological Constraints”. In : *International Journal of Shape Modeling (IJSM)* 16.1-2 (déc. 2010). World Scientific Publishing, pp. 173–194.
- [4] Cédric CLOUCHOUX, Dimitri KUDELSKI, Marine BOUYSSI-KOBAR, Sophie VISEUR, Adre Du PLESSIS, Alan C. EVANS, **Jean-Luc MARI** et Catherine LIMPEROPOULOS. “Cortical Pattern Detection for the Developing Brain : a 3D Vertex Labeling and Skeletonization Approach”. In : *Journal of Medical Informatics & Technologies* 16 (ISSN 1642-6037) (oct. 2010), pp. 161–166.
- [5] **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Simplicialization of Digital Volumes in 26-adjacency : Application to Topological Analysis”. In : *International Journal "Pattern Recognition and Image Analysis, Advances in Mathematical Theory and Applications" (PRIA)* 19.2 (juin 2009). MAIK Nauka/Interperiodica, Pleiades Publishing Ltd., pp. 231–238.
- [6] **Jean-Luc MARI**. “Approaches dedicated to the modeling of complex shapes - Application to medical data”. In : *Journal of Medical Informatics & Technologies* 7 (ISSN 1642-6037) (oct. 2004), pp. 3–15.
- [7] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Closed Free-Form Surface Geometrical Modeling – A New Approach with Global and Local Characterization”. In : *International Journal of Image and Graphics (IJIG)* 4.2 (avr. 2004). World Scientific Publishing, pp. 241–262.
- [8] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Reconstruction by implicit surfaces using discrete and continuous skeletons”. In : *International Journal of CAD/CAM and Computer Graphics* 16.2 (Tridimensional reconstruction) (2001). Hermes, pp. 203–212.

11.2 Revues nationales

- [9] Guillaume THIBAUT, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Indices de Formes et de Textures - Application au Classement de Noyaux de Cellules”. In : *Revue des Sciences et Technologies de l'Information (RSTI), Série "Ingénierie des Systèmes d'Information" (ISI)* 15.2/2010 (Traitement de Données Complexes) (mar. 2010). Hermes Science Publication, Lavoisier Editions, pp. 73–96.

11.3 Revues électroniques

- [10] Dimitri KUDELSKI, Sophie VISEUR et **Jean-Luc MARI**. “Détection de lignes caractéristiques sur maillages triangulés d'acquisition LIDAR - Application à la géologie”. In : *REFIG, Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique (ISSN 1954-3190)* 3.3 (déc. 2009), pp. 1–9. URL : <http://www.irit.fr/REFIG/>.

11.4 Invitations à des conférences internationales

- [11] **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Voxelo : a project for computing and visualizing geometric-topological features for nD digital images”. In : *CATIMAG'08, International Workshop on Computational Algebraic Topology within Image Context*. Conférence invitée. Séville, Espagne, nov. 2008.
- [12] **Jean-Luc MARI**. “Approaches dedicated to the modeling of complex shapes - Application to medical data”. In : *9th International Conference "Medical Informatics & Technologies", MIT 2004*. Conférence invitée. Miedzybrodzie Zywieckie, Pologne, oct. 2004, pp. 3–15.

11.5 Conférences internationales avec comité de lecture et actes

- [13] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Extraction of feature lines with connectivity preservation”. In : *Computer Graphics International, CGI 2011* (electronic proceedings). Ottawa, Canada, juin 2011.
- [14] Ana PACHECO, **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Determining bricks of 3-dimensional cell complexes”. In : *14th International Workshop in Combinatorial Image Analysis, IWCIA 2011*. Advances in Image Analysis and Applications (chapitre 4). Madrid, Espagne : ISBN 978-981-08-7923-5 Research Publishing Services, Reneta Barneva, Valentin E. Brimkov, Kostadin Koroutcheva et Elka Korutcheva (Eds.), mai 2011, pp. 37–48.

- [15] Valentin LÉONARDI, **Jean-Luc MARI**, Vincent VIDAL et Marc DANIEL. “3D Reconstruction from CT-Scan Volume Dataset - Application to Kidney Modeling”. In : *SCCG 2011, 27th Spring conference on Computer Graphics*. Viničné, Slovaquie : ACM Press Publisher, avr. 2011, pp. 141–148.
- [16] Ana PACHECO, **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Obtaining cell complexes associated to four dimensional digital objects”. In : *3rd International Workshop on Computational Topology in Image Context, CTIC 2010*. Chipiona, Espagne, nov. 2010, pp. 57–64.
- [17] Cédric CLOUCHOUX, Dimitri KUDELSKI, Marine BOUYSSI-KOBAR, Sophie VISEUR, Adre Du PLESSIS, Alan C. EVANS, **Jean-Luc MARI** et Catherine LIMPEROPOULOS. “Cortical Pattern Detection for the Developing Brain : a 3D Vertex Labeling and Skeletonization Approach”. In : *15th International Conference "Medical Informatics & Technologies", MIT 2010*. Zakopane, Pologne, oct. 2010, pp. 161–166.
- [18] Javier CARNERO, Daniel DÍAZ-PERNIL, **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. “Doxel : Towards a Software for Processing and Visualizing Topology Computations in Doxel-based 3D+t Images”. In : *16th International Conference on Applications of Computer Algebra, ACA'10*. Vlora, Albanie, juin 2010.
- [19] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “3D Feature Line Detection based on Vertex Labeling and 2D Skeletonization”. In : *Shape Modeling International Conference, SMI 2010*. Aix-en-Provence, France : IEEE Computer Society Publisher, juin 2010, pp. 246–250.
- [20] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Feature Line Detection on Triangulated Meshes - A Geological Application”. In : *18th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2010*. Plzen, République Tchèque, fév. 2010, pp. 39–46.
- [21] **Jean-Luc MARI**. “Surface sketching with a voxel-based skeleton”. In : *15th IAPR International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2009*. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 5810. Montréal, Canada : Springer-Verlag, S. Brlek, C. Reutenauer et X. Provençal (Eds.), sept. 2009, pp. 325–336.
- [22] Guillaume THIBAUT, Bernard FERTIL, Claire NAVARRO, Sandrine PEREIRA, Pierre CAU, Nicolas LÉVY, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Texture indexes and gray level size zone matrix - Application to cell nuclei classification”. In : *10th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing, PRIP 2009*. Minsk, Biélorussie, mai 2009, pp. 140–145.
- [23] Helena MOLINA-ABRIL, Pedro REAL, **Jean-Luc MARI** et Nicolas JESSON. “Algebraic Topological Models for Octrees”. In : *Algebraic Topological Methods in Computer Science 2008, ATMCS III (a satellite conference to the 5th European Congress of Mathematics)*. Paris, France, juil. 2008.
- [24] **Jean-Luc MARI**, Nicolas JESSON, Helena MOLINA-ABRIL et Pedro REAL. “Simplicialization of Octrees”. In : *International Workshop on Computational Topology in Image Context, CTIC 2008*. Poitiers, France, juin 2008.
- [25] Guillaume THIBAUT, Caroline DEVIC, Jean-François HORN, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Classification of cell nuclei using shape and texture indexes”. In : *16th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2008*. Plzen, République Tchèque, fév. 2008, pp. 25–28.

- [26] Pedro REAL, Helena MOLINA-ABRIL et **Jean-Luc MARI**. “Simplicialization of Digital Volumes”. In : *First International Workshop on Image Mining, Theory and Applications (IMTA 2008) in conjunction with the 3rd International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2008)*. Funchal, Madeira, Portugal, jan. 2008.
- [27] Florian GRAGLIA, **Jean-Luc MARI**, Georges BAÏKOFF et Jean SEQUEIRA. “Contour Detection of the Cornea from OCT Radial Images”. In : *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2007*. Lyon, France, août 2007, pp. 5612–5615.
- [28] **Jean-Luc MARI**. “Automatic Mesh Generation from 3D Internal Sketch and Topological Constraints”. In : *17th International Conference on Computer Graphics and Vision, GraphiCon’2007*. Moscou, Russie, juin 2007, pp. 9–16.
- [29] John L. BARRON, Marc DANIEL et **Jean-Luc MARI**. “Using 3D Spline Differentiation to Compute Quantitative Optical Flow”. In : *Third Canadian Conference on Computer and Robot Vision, CRV 2006*. Quebec City, Canada, juin 2006.
- [30] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Expression of a set of points’ structure within a specific geometrical model”. In : *Computer Graphics and Geometrical Modeling 2004, CGGM’2004*. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 3039, Computational Science – ICCS 2004, 4th International Conference. Cracovie, Pologne : Springer-Verlag, M. Bubak et al. (Eds.), juin 2004, pp. 156–163.
- [31] **Jean-Luc MARI**, Laurent ASTART et Jean SEQUEIRA. “Geometrical modeling of the heart and its main vessels”. In : *First International Workshop on Functional Imaging and Modeling of the Heart, FIMH’2001*. Lecture Notes in Computer Sciences, LNCS 2230. Helsinki, Finlande : Springer-Verlag, T. Katila et al. (Eds.), nov. 2001, pp. 1–9.
- [32] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Towards a multi-level modeling approach for reconstruction – Application to medical data”. In : *23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2001*. Istanbul, Turquie, oct. 2001.
- [33] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “A new modeling approach by global and local characterization”. In : *11th International Conference on Computer Graphics, GraphiCon’2001*. Nizhny Novgorod, Russie, sept. 2001, pp. 126–131.
- [34] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Using implicit surfaces to characterize shapes within digital volumes”. In : *RECPAD 2000 Proceedings*. Porto, Portugal, mai 2000, pp. 285–289.

11.6 Conférences internationales sur abstract avec comité de lecture et présentation orale

- [35] Cédric CLOUCHOUX, Dimitri KUDELSKI, Ali GHOLIPOUR, Simon K. WARFIELD, Sophie VISEUR, **Jean-Luc MARI**, Alan C. EVANS, Adre J. Du PLESSIS et Catherine LIMPEROPOULOS. “In-vivo fetal cortical development”. In : *ISMRM 2011, the 19th Annual Meeting and Exhibition of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. Montréal, Canada, mai 2011.

11.7 Conférences nationales avec actes

- [36] Valentin LÉONARDI, **Jean-Luc MARI**, Vincent VIDAL et Marc DANIEL. “Reconstruction 3D du Volume Rénal à partir d’Acquisitions Scanner Volumiques”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2011*. Grenoble, France, mar. 2011, pp. 83–92.
- [37] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Détection de lignes caractéristiques par labellisation de sommets et squelettisation”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2010*. Dijon, France, mar. 2010, pp. 97–104.
- [38] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. “Extraction et amélioration de lignes caractéristiques sur données géologiques”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2009*. Toulouse, France, mar. 2009, pp. 5–14.
- [39] Dimitri KUDELSKI, Sophie VISEUR et **Jean-Luc MARI**. “Détection de lignes caractéristiques sur maillages triangulés d’acquisition LIDAR - Application à la géologie”. In : *21èmes journées de l’AFIG, AFIG’08*. Toulouse, France, nov. 2008, pp. 171–179.
- [40] Guillaume THIBAUT, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Indices de textures : application au classement de noyaux de cellules”. In : *MajecSTIC 2008 (Manifestation des Jeunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication)*. Marseille, France, nov. 2008.
- [41] Guillaume THIBAUT, Caroline DEVIC, Bernard FERTIL, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. “Indices de formes : de la 2D vers la 3D - Application au classement de noyaux de cellules”. In : *20èmes journées de l’AFIG, AFIG’07*. Marne-la-Vallée, France, nov. 2007, pp. 17–24.
- [42] John L. BARRON, **Jean-Luc MARI** et Marc DANIEL. “Towards parameterising gated MRI cardiac sequences to compute accurate spatio-temporal derivatives for 3D optical flow”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2004*. Lyon, France, mar. 2004, pp. 47–57.
- [43] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Modélisation géométrique de surfaces fermées – Une nouvelle approche par caractérisation globale et locale”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2002*. Nantes, France, mar. 2002, pp. 66–77.
- [44] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Visualisation scientifique pour la reconstruction par surfaces implicites”. In : *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, GTMG 2001*. Dijon, France, mar. 2001.
- [45] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Reconstruction par surfaces implicites à partir de squelettes discrets et continus”. In : *13èmes journées de l’AFIG, AFIG’00*. Grenoble, France, nov. 2000, pp. 263–270.
- [46] **Jean-Luc MARI**, Jean SEQUEIRA et Cédric GUIARD. “Caractérisation de volumes numériques binaires par surfaces implicites”. In : *12èmes journées de l’AFIG, AFIG’99*. Reims, France, nov. 1999, pp. 49–58.

11.8 Conférences sans actes

- [47] Guillaume THIBAUT, **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Indices de Formes : de la 2D à la 3D”. In : *Journées du Laboratoire des Sciences de l’Information et des Systèmes*. Giens, France, juin 2007.
- [48] **Jean-Luc MARI**. “Geometric modeling of the heart using its structural features”. In : *Jornadas de Imágen Médica*. Séville, Espagne, mai 2006.
- [49] **Jean-Luc MARI** et Jean SEQUEIRA. “Une nouvelle approche de modélisation par caractérisation globale et locale”. In : *Journées Modélisation Géométrique et Approximation (Congrès AFA-SMAI)*. Marseille, France, nov. 2001.

11.9 Thèse soutenue et thèses encadrées

- [50] Dimitri KUDELSKI. “Détection automatique d’objets géologiques à partir de données numériques d’affleurements 3D”. Thèse de doctorat. Marseille, France : Université de Provence (Aix-Marseille 1), déc. 2011.
- [51] Guillaume THIBAUT. “Indices de formes et de textures : de la 2D vers la 3D - Application au classement de noyaux de cellules”. Thèse de doctorat. Marseille, France : Université de la Méditerranée (Aix-Marseille 2), juin 2009.
- [52] **Jean-Luc MARI**. “Modélisation de formes complexes intégrant leurs caractéristiques globales et leurs spécificités locales”. Thèse de doctorat. Marseille, France : Université de la Méditerranée (Aix-Marseille 2), déc. 2002.

11.10 Rapports

- [53] **Jean-Luc MARI** et Pedro REAL. *Simplicialization of Digital Volumes in 26-adjacency : Application to Topological Analysis*. Rapport de recherche n° LSIS.RR.2007.007. Marseille, France : Laboratoire LSIS, juin 2007.
- [54] **Jean-Luc MARI**. *Modélisation de volumes numériques binaires par surfaces implicites*. Rapport de DEA. Marseille, France : Université de la Méditerranée (Aix-Marseille 2), juin 1999.

11.11 Articles soumis

- [55] Dimitri KUDELSKI, Sophie VISEUR et **Jean-Luc MARI**. “Skeleton extraction of vertex sets lying on arbitrary triangulated 3D meshes”. In : *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)* (2011). Elsevier.

- [56] Dimitri KUDELSKI, **Jean-Luc MARI** et Sophie VISEUR. "3D mesh feature line detection using topological thinning". In : *Graphical Models (GMOD)* (2011). Elsevier.
- [57] Ana PACHECO, **Jean-Luc MARI**, Régis MEYSSONNIER et Pedro REAL. "Extracting information of four dimensional objects". In : *Pattern Recognition Letters* (2011). Elsevier.
- [58] Guillaume THIBAUT, Bernard FERTIL, Claire NAVARRO, Sandrine PEREIRA, Pierre CAU, Nicolas LEVY, Jean SEQUEIRA et **Jean-Luc MARI**. "Shape and texture indexes - Application to cell nuclei classification". In : *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence (IJPRAI)* (2011). World Scientific Publishing.

11.12 Communications orales, séminaires

- Juin 2011** Présentation en réunion de l'équipe *G-Mod* sur le thème "*Extraction d'information dans les images et les volumes numériques – Modèles géométriques 3D sous-jacents*"
- Octobre 2007** Séminaire à l'*Université de Séville* en Espagne au *Département de Mathématiques Appliquées* sur le thème "*Automatic mesh generation from a 3D sketch*"
- Octobre 2007** Présentation en réunion de l'équipe *Image & Modèles* sur le thème "*Génération automatique de maillages à partir d'esquisse 3D et de contraintes topologiques*"
- Avril 2007** Séminaire à l'*IRSA (Institute of Remote Sensing Applications)* à Beijing (Pékin) en Chine sur le thème "*Geometrical modeling of complex shapes with global features and local specificities*"
- Mai 2006** Séminaire à *Ho Hai University* à Nanjing (Nankin) en Chine sur le thème "*Approaches dedicated to the modeling of complex shapes*"
- Novembre 2005** Séminaire à l'*Université de Séville* en Espagne au *Département de Mathématiques Appliquées* sur le thème "*Complex shapes modeling*"
- Juillet 2005** Séminaire à l'*Université de London, Canada* (University of Western Ontario, UWO) sur le thème "*Approaches dedicated to the modeling of complex shapes – Application to medical data*"
- Décembre 2004** Deux séminaires à l'*Université de Séville* en Espagne au *Département de Mathématiques Appliquées* sur les thèmes "*Images, models and mathematics*" et "*The LXAO Research Group*"
- Février 2003** Séminaire à l'*Université de Montréal (UdeM)* (Canada) au *Laboratoire de Traitement d'Images* sur le thème "*Modélisation de surfaces fermées d'un point de vue global et local*"
- Octobre 2001** Communication lors d'une réunion de l'équipe *LXAO* sur le thème "*Une nouvelle approche de modélisation par caractérisation globale et locale*"
- Juin 2001** Communication dans le cadre des *Journées du Laboratoire LSIS* à Giens sur le thème "*Modélisation de formes complexes par surfaces implicites*"
- Mai 2000** Communication à l'*Université Claude Bernard Lyon 1* dans le cadre de l'action nationale incitative CNRS inter GdR-PRC "*Coeur Battant*" sur le thème

"Reconstruction par surfaces implicites à partir de squelettes discrets et continus"

Mai 1999

Communication à l'*Université Claude Bernard Lyon 1* dans le cadre de l'action nationale incitative CNRS inter GdR-PRC "*Coeur Battant*" sur le thème "*Modélisation du coeur par surfaces implicites*"

Ce mémoire d'habilitation porte sur l'*extraction d'information* pour deux modes de représentation courants en modélisation géométrique : les *objets discrets* et les *maillages*. Selon le format, les modalités d'acquisition des données ou le domaine applicatif, l'un ou l'autre de ces formalismes peut devoir être manipulé : les objets voxelisés sont par exemple très présents dans le contexte médical, et les surfaces polyédriques sont répandues en géologie numérique s'appuyant sur des acquisitions LIDAR. Il est souvent nécessaire d'extraire des caractéristiques de ces modèles : automatisation d'une expertise, enrichissement de la connaissance sur un type donné d'objets, diagnostic assisté par ordinateur, reconstruction 3D, meilleure compréhension de la forme, etc. Dans cette optique, il faut alors pouvoir manipuler à la fois des maillages et des volumes numériques, et développer des algorithmes spécifiques pour en extraire des caractéristiques pertinentes.

Ces travaux s'articulent autour de deux parties liées aux modes de représentation discrets et semi-continus. La première traite principalement d'*extraction d'informations géométriques et topologiques dans les volumes numériques binaires* et présente des algorithmes originaux sur le passage d'une représentation discrète vers un complexe simplicial, en préservant la topologie induite par la 26-adjacence. D'autres travaux portant sur la *caractérisation du volume sous la nappe par indices de forme 3D* et sur la *détection des contours de la cornée* sont également exposés. La seconde partie concerne essentiellement la *détection de lignes caractéristiques dans les maillages* dans le contexte géologique. Parmi les approches développées, un algorithme particulièrement efficace et prenant le contre-pied des techniques existantes est proposé. Il combine une étude de la courbure avec une méthode de squelettisation originale sur les maillages surfaciques. Des travaux relatifs à *reconstruction 3D du volume rénal* et à la *génération automatique de maillages à partir d'information structurelle synthétique* sont également présentés. Ce mémoire s'achève par la description de mon projet de recherche. Il s'inscrit d'une part dans le prolongement d'actions en cours qui correspondent à des collaborations actives, et d'autre part dans l'extension de la problématique d'extraction d'information dans des contextes plus généraux et de plus en plus actuels en modélisation géométrique, notamment l'étude structurelle multi-résolution d'objets discrets dynamiques et les modèles à base de points.

Mots-clés : modélisation géométrique, volumes numériques, maillages, polyèdres, complexes simpliciaux, lignes caractéristiques, squelettes, reconstruction, génération de surfaces, contrôle topologique.

FEATURE EXTRACTION WITHIN MESH REPRESENTATIONS AND DIGITAL VOLUMES

This dissertation deals with *feature extraction* in the frame of two types of representation in geometric modeling: *discrete objets* and *meshes*. According to the format of acquisition or the applicative field, both formalisms may have to be manipulated. For instance, voxel-based objects are commonly used in medical imaging, and polyhedral surfaces are frequently employed in numerical geology. It is often necessary to get features from these models: expertise automatization, computer-aided diagnosis, 3D reconstruction, shape understanding, etc. Thus, one must be able to handle both meshes and digital volumes, in order to implement specific algorithms and to extract relevant features.

This thesis is composed of two parts related to discrete and semi-continuous types of representation. The first part mainly deals with *geometric and topological features extraction within binary digital volumes* and presents new algorithms aiming at converting voxel sets into simplicial complexes. In the second part, the focus is on the *detection of feature lines within meshes* in a geological context. Among the proposed approaches, one is particularly efficient as it combines curvature computation with an original skeletonization technique dedicated to surface meshes.

Keywords : geometric modeling, digital volumes, meshes, polyhedral representations, simplicial complexes, feature lines, skeletons, reconstruction, surface generation, topological control.