



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAFDE M'SILA
Faculté des Mathématiques et de l'Informatique
Département d'Informatique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de **MASTER**

Domaine : Mathématiques et Informatique

Filière: Informatique

Option : **Informatique Décisionnelle et
Optimisation**

Par

-DRIDI Nacer -ZORIG Ammar

Sujet

**Optimisation du maillage engendré
par l'algorithme de Marching cubes**

Devant le jury :

Mr..... Univ de M'sila	Président
Mr MEHENNI Tahar	MC Univ de M'sila	Encadreur
Mr BELHADJ fodil	Dr. Univ BBA	Co-encadreur
MrUniv de M'sila	Examineur

Promotion : 2019 / 2020



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à nos deux Dr. **MEHRENI Tahar** et Dr. **BELHADJ Fodil** pour avoir d'abord proposée ce thème, pour accepter de nous suivre tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département d'Informatique qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

À nos parents

À nos très chers frères, à nos chères sœurs et à toutes nos familles

À tous nos amis que Nous ne pouvons pas les nommés tous ici.

À tous nos collègues sans exception et à toutes les promos 2020

surtout d'Informatique .

ملخص

الهدف من دراسة هذا المشروع هو اعادة تشكيل جسم أو عرض ثلاثي أبعاد قريب جدا من الشكل الأصلي عن طريق تركيب سلسلة من الصور ثنائية الأبعاد. هذه الأخيرة متحصل عليها من قطع عمودي من الجسم الأولي. حيث تم التطرق الى عرض مفهوم بناء وتشكيل ثلاثي الأبعاد والحاجة اليه خاصة في المجال الطبي وكذلك الى دورة معالجة الصورة في هذا النظام. وكخطوة تالية , نجد مختلف الخوارزميات الممكنة من أجل التشكيل ثلاثي الأبعاد و ما هي الأكثر فعالية لتحقيق مشروعنا وليكن Algorithm de Marching cube حيث تم شرح مختلف خصائصه وأهم ميزاته. ومن ثم مرحلة القولية والتصميم باستعمال لغة UML وعرض مختلف السيناريوهات الخاصة بالعرض ثلاثي الأبعاد وفي الأخير التطرق الى البرنامج وشرح مختلف الواجهات مع تقديم بعض الاختبارات الممكنة على البرنامج.

الكلمات المفتاحية: صورة ثنائية الأبعاد - صورة ثلاثية الأبعاد - خوارزمية MARCHING CUBES - إعادة التصميم

Abstract

The aim of this work is to reconstruct a 3D three-dimensional representation approached the maximum possible of the initial object from serial sections 2D. So we introduce the notion of 3D construction and the need to obtain a three-dimensional model specially in the medical field. As the next step, we present different algorithms for the 3D reconstruction and what are the most efficient for the realization of our project (defined in the Marching Cubes algorithm). Then we used the UML-like design and modeling language. Finally, the application development environment is defined (JBuilder and Jcreator) and the software is explained and tested.

Keywords : image 3D- image 2D -Algorithm marching cubes- reconstruction.

Résumé

Le but de ce travail consiste à reconstruire une représentation tridimensionnelle 3D approchée au maximum possible de l'objet initial à partir des coupes sériées 2D. Ces coupes sont obtenues par l'intersection de l'objet avec une série de plans verticaux à celui-ci. Pour cela, on introduit la notion de la construction 3D et la nécessité d'obtenir un model tridimensionnel notamment dans le domaine médical puis le cycle de vie d'une image sur le système de la reconstruction. Comme étape suivante, on présente les différents algorithmes possibles pour la reconstruction 3D et les plus performants pour la réalisation de notre projet (on définit l'algorithme de Marching Cubes). Ensuite, on a utilisée l' UML comme langage de conception et de modélisation et aussi pour définir les différents scénarios. Et enfin, pour l'application on a défini l'environnement de développement (JBuilder et Jcreator) puis on a expliqué la manière d'utilisation de notre logiciel et les tests possibles.

Mots clés: image 2D, image 3D, algorithme Marching Cubes, reconstruction,

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	01
<i>Chapitre I : Le Problème de la Reconstruction 3D à Partir de Coupes Sériées</i>	03
I.1.Introduction.....	03
I.2.Définitions.....	03
I.2.1.L'imagerie tridimensionnelle.....	04
I.2.2.La Modélisation Tridimensionnelle.....	04
I.2.3.La Reconstruction Tridimensionnelle à Partir de Coupes Sériées.....	04
I.2.3.1.Utilité et nécessité d'obtenir un modèle tridimensionnel.....	04
I.3.Position du problème.....	06
I.4.L'imagerie médicale &La Reconstruction 3D à partir de coupes sériées	07
I.4.1.Aperçu historique.....	07
I.4.2.Etat de l'art des méthodes de reconstruction 3D à partir de coupes 2D.....	09
I.4.2.1.Terminologies.....	09
I.4.2.2.Formulation Générale du Problème.....	10
I.5. Applications de la reconstruction 3D.....	11
I.5.1.Applications industrielles et scientifiques.....	11
I.5.2.Applications Médicales.....	12
I.6. Système Général de Reconstruction Tridimensionnelle à partir de Coupes Sériées.....	13
I.6.1.Etape d'acquisition	14
I.6.2.Etape de Prétraitements et Recalage.....	14
I.6.3.Etape de Segmentation	15
I.6.4.Etape de Modélisation	16
I.6.5.Etape de Visualisation	16
I.7.Conclusion.....	16
<i>Chapitre II – Méthodes & Algorithmes</i>	19
II.1.Introduction.....	19
II.2.Reconstruction surfacique	19
II.2.1.Méthodes optimales	19
II.2.2.Méthodes heuristiques	19
II.3.Reconstruction volumique	20
II.4.Un algorithme de reconstruction tridimensionnelle efficace ?.....	20
II.5.L'algorithme des Marching Cubes.....	21
II.5.1.Principe du Marching cubes.....	21
II.5.2.Définition de l'Iso-surface.....	21

II.5.3.Les étapes de fonctionnement du Marching cubes.....	22
II.5.4.Calcul des normales	28
II.5.5.L'algorithm complet de la reconstruction basée sur les Marching Cubes.....	30
II.5.6.L'orientation de la réflexion de la lumière sur la surface.	30
II.6.Conclusion.....	32
Chapitre III – Conception et modélisation.....	34
III.1.Introduction.....	34
III.2.Points forts d'UML.....	34
III.3. Le formalisme d'UML	34
III.3.1.Mise en œuvre d'une démarche à l'aide d'UML	34
III.3.2.Les diagrammes.....	35
III.3.2.1.Diagrammes structurels ou statiques	35
III.3.2.2.Diagrammes comportementaux	35
III.3.2.3.Diagrammes d'interaction ou dynamiques	36
III.3.3.Les modèles d'éléments.....	36
III.3.3.1.Les modèles d'éléments de type commun	36
III.3.3.2.Les modèles d'éléments de type relation	37
III.4.Standardisation et Certification UML	37
III.5.Spécification des besoins	38
III.5.1. Diagramme des cas d'utilisation	38
III.5.2.Description des cas d'utilisation (Diagrammes des séquences).....	39
III.5.3.Diagramme de classes	43
II.6.Conclusion.....	44
Chapitre IV – Implémentation et réalisation	46
IV.1.Introduction.....	46
IV.2.Java.....	46
IV.3.JCreator.....	47
IV.3.1.Caractéristiques de JAVA.....	47
IV.4.Les interfaces et les tests	47
IV.5.Description du Logiciel	51
IV.6.Conclusion.....	53
Conclusion générale.....	55
Références bibliographiques.....	57

Introduction général

INTRODUCTION GENERALE

L'être humain est plongé dans un monde tridimensionnel. Pour pouvoir y évoluer il doit être capable d'appréhender la forme des objets qui l'entourent, mais aussi de modéliser leur disposition les uns par rapport aux autres. Le principal outil lui permettant de décrire ces objets et de modéliser son environnement est la vision.

La vision utilise des informations qui permettent d'aider à la construction du modèle tridimensionnel de la scène. Cette construction est faite en association avec une sorte de base de connaissance de la vision, issue de l'expérience acquise, et régie par des processus d'apprentissage, qui permettent d'infirmer ou de confirmer les diverses sensations perçues.

Dans le domaine biomédical les objets étudiés (tissus, vaisseaux, noyaux, chromosomes,.....) ont des structures tridimensionnelles, malheureusement les systèmes microscopiques et macroscopiques ne permettent en général pas de rendre cet aspect tridimensionnel, c'est pour cela qu'il est nécessaire de développer des outils permettant de représenter, modéliser, décrire et manipuler ces structures. Les méthodes de reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées permettent d'obtenir une représentation en trois dimensions d'un objet ou d'une scène à partir d'un ensemble d'images prises sous différentes vues de l'objet ou de la scène.

Dans ce mémoire, nous proposons une approche d'un système de reconstruction tridimensionnel 3D à partir des coupes sériées organisée essentiellement en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons posé le problème de la reconstruction 3D et les différents domaines de recherche tel que le domaine médical.

Dans le deuxième chapitre nous avons décrit les différentes méthodes et algorithmes utilisés pour la reconstruction 3D.

Le troisième chapitre présente la modélisation de l'application par le modèle UML qui permet de réaliser la plate-forme du système de la reconstruction 3D à partir des coupes sériées et de décrire l'architecture interne avec ses composants et fonctionnalités que devra offrir l'application.

Le quatrième chapitre décrit l'environnement de développement utilisé pour la réalisation de cette application, ainsi qu'une présentation de notre produit final.

Finalement, une conclusion générale vient couronner ce travail, reprenant les points forts et ceux manquants.

CHAPITRE I

Le Problème de la Reconstruction 3D à Partir de Coupes Sériées

Le Problème de la Reconstruction 3D à Partir de Coupes Sériées

I.1 Introduction

L'évolution technologique des procédés d'imagerie a engendré de nouvelles problématiques de recherche. Contrairement aux outils classiques, les systèmes d'acquisition 3D actuels dépendent étroitement des outils informatiques très puissants pour la génération d'images 3D à partir des données brutes provenant des signaux sources des capteurs. L'information 3D présentée consiste simplement en un ensemble de coupes bidimensionnelles, plus ou moins espacées, échantillonnées généralement le long de la troisième dimension de l'objet d'étude.

En imagerie médicale, ces coupes reflètent une propriété physique de l'organe étudié, que ce soit le taux d'absorption des rayons-X dans le cas de la tomodensitométrie (CT), la densité des protons dans l'IRM ou la réponse à une certaine impulsion de fréquences particulières. C'est le moyen non destructif utilisé par l'imagerie médicale pour accéder à la structure interne des corps. Un autre moyen destructif largement utilisé, en fait, en microbiologie consistant en la découpe réelle de l'organe en un ensemble de tranches, en utilisant par exemple une ultra-microtomie, puis photographiées, après avoir éventuellement agrandies, par un microscope.

Dans les deux cas de figures, les images obtenues en tant que telles ne reflètent pas en réalité le vrai aspect tridimensionnel de l'objet, elles en donnent une vue restreinte et partielle. Bien qu'elles permettent une meilleure compréhension de la structure spatiale interne des objets, l'interprétation pratique des différentes images 2D est une tâche difficile et fastidieuse et doit tenir compte du biais lié au manque d'information engendré par la nature échantillonnée des coupes.

Donc l'imagerie médicale, en particulier 3D, est devant un problème très délicat : comment créer un modèle 3D d'un organe connaissant ses projections tomographiques 2D. Pour résoudre ce problème, et afin de pallier au manque d'informations, de nouvelles techniques de reconstruction tridimensionnelle ont été introduites pour obtenir un modèle volumique représentant l'information tridimensionnelle cachée dans les coupes. Ce modèle devrait permettre, en plus de l'extraction et la visualisation de l'organe d'intérêt, la possibilité d'y opérer des mesures quantitatives et qualitatives.

Ce chapitre entame le problème de la Reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées. Nous y essayons de définir le problème, présenter un état de l'art sur ses applications en particulier en imagerie médicale et introduire un système général de reconstruction tridimensionnelle comme outil méthodique pour l'entamer.

I.2 Définitions

Le problème de la reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées peut être vu comme étant un cas particulier d'un problème fondamental plus général étudié de longue date dans des domaines différents posant la problématique suivante : Comment représenter correctement un phénomène global simplement à partir d'observations partielles ?

Sous une formulation plus théorique, le problème évoqué précédemment est aussi un objet d'étude important pour les maths. Dans le cadre mathématique, il s'agit de reconstruire exactement, ou au moins d'approcher, un objet mathématique (par exemple une fonction) à partir d'un échantillon, provenant de cet objet. C'est la définition de l'interpolation [DONNEL.01].

La reconstruction tridimensionnelle est un problème commun à plusieurs applications. Outre le domaine médicale et microbiologique, elle est principalement posée en vision par ordinateur (robotique) pour la reconstruction de scènes à partir de plusieurs vues prises par des caméras, en CFAO où l'objet est construit à partir de plusieurs modèles numériques prédéfinis, en imagerie satellitaire où l'on a à construire des cartes 3D à partir d'un ensemble d'images 2D.

Une définition précise et détaillée du terme est un petit peu difficile parce qu'elle invoque la connaissance du domaine d'application et le but convoité de la reconstruction. Avant de rentrer dans les détails, il s'avère très utile de définir ce qu'on entend par l'imagerie et la modélisation 3D.

I.2.1 L'imagerie tridimensionnelle

L'imagerie 3D est le terme général donné au processus de traitement, de visualisation et d'analyse des images tridimensionnelles. Ces dernières sont souvent présentées sous forme de séquences d'images bidimensionnelles prises par une procédure d'échantillonnage ou de discrétisation de l'objet initial. De cet effet, ce processus consiste dans la plupart du temps en une séquence d'étapes 2D [ROBB.00].

Ces images 2D séparées ne fournissent pas une information 3D exacte de l'objet. Dans la pratique, le praticien est ramené à les rassembler et construire mentalement une allure tridimensionnelle approchée pour arriver à une appréhension de l'objet. Une telle reconstruction mentale est sans doute difficile, fastidieuse et erronée.

I.2.2 La modélisation tridimensionnelle

La modélisation 3D consiste à développer une représentation, généralement numérique, décrivant l'ensemble de propriétés (ou quelques unes) d'un objet ou d'un phénomène donné. Ces propriétés peuvent être structurelles concernant la forme ou fonctionnelles concernant le comportement de l'objet. Lorsqu'il s'agit d'une modélisation tridimensionnelle, c'est aux propriétés qui définissent l'objet dans l'espace 3D qu'on s'intéresse. L'équivalence entre un objet et son modèle dépend du degré de représentation de ce dernier des propriétés pertinentes exhibées par l'objet d'étude.

I.2.3 La reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées

A priori, le problème de la reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées peut être décrit comme étant le problème de rebâtir une information volumique inhérente à un objet connaissant ses fragments bidimensionnels.

Serr. et col. dans [SERRE.02] ont défini le terme comme étant un outil informatique effectuant l'empilement des contours d'un même organe permettant aux anatomistes une première et rapide visualisation pour procéder à des corrections offrant ainsi une première validation anatomique en 3D.

Une autre définition, donnée par le Médical Web Encyclopédie¹, déclare: la reconstruction volumique est le processus de visualisation 3D des images volumiques généralement présentée sous forme d'images bidimensionnelles contiguës.

A notre avis, ces deux définitions, et bien d'autres [BROWN.96, CODY.02] similaires, s'avèrent incomplètes dans la mesure où elles limitent la reconstruction à des fins de visualisation par des outils assez simples tels que l'empilement des contours.

I.2.3.1 Utilité et nécessité d'obtenir un modèle tridimensionnel

Si dans quelques applications seule une visualisation est entreprise, dans la plupart des autres une analyse et une description de l'objet sont nécessaires afin de mieux appréhender la structure tridimensionnelle de l'objet et donc mieux comprendre et maîtriser son comportement dans le milieu de son fonctionnement, dans

¹Site web : http://www.amershamhealth.com/medcyclopaedia/medical/volume/volumetric_reconstruction.asp

la mesure où cet objet constituera une donnée pour un processus de description, de modélisation ou d'analyse de phénomènes plus complexes (un organe dans le corps, une pièce dans une machine, ...).

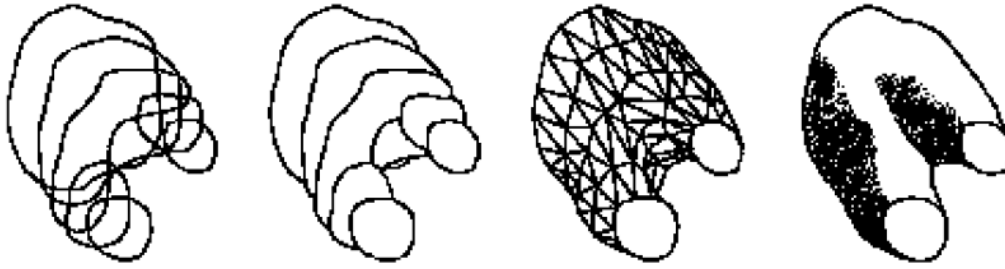


Figure I.1 : Différentes représentations d'une même séquence de coupes (Extrait de ROLLAND.91)

Par conséquent le problème doit être vu comme étant un problème de modélisation tridimensionnelle des objets connaissant leurs coupes bidimensionnelles avant qu'il soit un problème d'une simple visualisation.

Bien que la littérature concernant la reconstruction tridimensionnelle des images médicales tende presque vers la première vue [SERRE.02, BROWN.96, UDUPA.99, CODY.02], plusieurs d'autres travaux insistent sur l'utilité et la nécessité d'obtenir un modèle numérique 3D [ROLLAND.91, BARILLOT.99, BOISS.88, GEIGER.93, AYACHE.98, LEBRAS.04, ...]

Ainsi la reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées peut être définie comme étant une fonction de transfert Φ ayant en entrée un flux de données bidimensionnelles consistant en un ensemble de point $P_i(x,y)$ dans \mathbb{R}^3 structuré en un ensemble de plans 2D de coupes C_i^2 , et comme sortie une fonction numérique Ψ définissant le modèle décrivant les, ou quelques, propriétés de l'objet.

$$\Phi = \Psi(P_i(x, y)), \quad x, y \in I \quad i = 1..N$$

Mathématiquement parlé, Φ est un opérateur d'interpolation inverse à l'opérateur de discrétisation originalement appliqué par le capteur pour obtenir les coupes bidimensionnelles.

Il est à signaler aussi que certains auteurs, de tendance médicale, [CODY.02, BROWN.96] évitent l'utilisation du terme reconstruction pour désigner le processus qui vient d'être décrit. DiannaD.dans [CODY.02] déclare « Le terme reconstruction est souvent utilisé quoiqu'il soit inexact dans ce contexte. Le processus de reconstruction, principalement en tomodensitométrie CT, réfère à une procédure spécifique qui convertit les données brutes projetées (signal) en une coupe bidimensionnelle » l'auteur propose d'utiliser plutôt le terme 'reformatage' (reformatting) : « le reformatage procède tout simplement à la visualisation de l'image produite du processus de reconstruction original dans une manière inverse à celle dont elle est originalement acquise » [BROWN.96].

² - Nous nous limitons ici au cas des images médicales TDM ou IRM où l'ensemble des points est structuré en un ensemble de plans 2D, ce qui constitue un cas particulier du problème général où l'ensemble de points sont éparpillés aléatoirement dans l'espace.

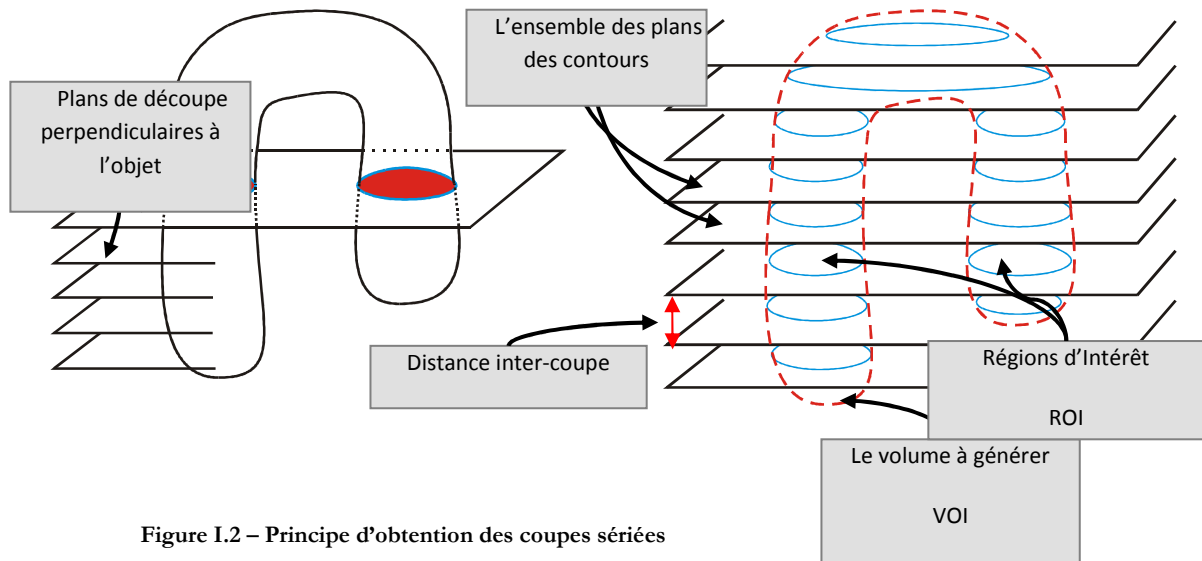


Figure I.2 – Principe d'obtention des coupes sériées

Dans ce mémoire, nous retenons le terme reconstruction pour désigner le processus que nous avons décrit ci-dessus.

I.3 Position du problème

La représentation des objets par un ensemble de coupes sériées 2D est de plus en plus utilisée dans de nombreux domaines et en particulier dans le domaine médical auquel nous nous sommes intéressés le long de ce travail. Les images médicales 3D consistent en une suite discrète de coupes bidimensionnelles résultant d'un échantillonnage de l'organe d'étude 3D.

Les coupes sont obtenues par l'intersection de l'objet avec une série de plans perpendiculaires à celui-ci. Dans le cas où ces plans sont parallèles on parlera de coupes (sections) sériées ou parallèles (serial cross sections) (Figure I.2 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Connaissant ces coupes parallèles, le travail demandé est de reconstruire une représentation tridimensionnelle approchée au maximum possible de l'objet initial.

Dans la plupart des applications on ne s'intéresse pas à reconstruire l'objet dans son intégralité mais uniquement à une partie ou un sous volume bien spécifique appelé Volume d'Intérêt (volume of interest VOI). Ce volume d'intérêt est réparti sur l'ensemble de coupes suivant un ensemble de région 2D appelées Régions d'intérêt(ROI).

Le problème peut être posé d'une autre manière plus simple. Etant donné que le VOI est défini intégralement par deux ingrédients :

1. Les contours qui délimitent le VOI dans l'espace.
2. La texture qui le définit dans un champ de vision.

Ainsi on peut reformuler le problème en se basant uniquement sur les contours exprimés en terme d'images binaires perdant ainsi toute information d'atténuation liée au tissu et ne conservant que celle de forme de l'objet. Le deuxième ingrédient est vu comme étant un problème de plaquage de textures à un volume de données défini par des contours.

En fait, cette manière de poser le problème de la Reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées est duale à la première dans la mesure où l'on peut se baser facilement entre les deux concepts régions-contours (Figure I.2).

La quasi-totalité de la littérature que nous avons consultée adopte la deuxième formule du problème [BOISS.88, GEIGER.93, JAILLET.99, ROLLAND.91, ...] qui présente d'ailleurs plusieurs avantages :

3. Elle ne rien présume sur le procédé d'acquisition, qui diffèrent d'une application à une autre, en dissociant l'étape de numérisation des objets de l'étape de reconstruction.
4. Elle sépare le problème de localisation du VOI, qui est un problème de segmentation, du problème de représentation du volume qui est un problème de modélisation 3D. La visualisation étant un problème postérieur aux deux.
5. Elle permet de diminuer considérablement la zone de travail lors de traitements ultérieurs et donc de réduire le volume des données à traiter. D'autre part, travaillant sur une région d'intérêt définie par des contours, les traitements sont plus performants car plus ciblés et moins perturbés par des informations pouvant être considérées comme du bruit.

Nous allons principalement mener notre travail dans cette deuxième démarche, en construisant un modèle fondé sur une version segmentée des images initiales qui permet d'assimiler, le modèle, assez d'informations topologiques et structurelles de l'objet.

I.4 L'imagerie médicale & La Reconstruction 3D à partir de coupes sériées

I.4.1 Aperçu historique

En médecine, la reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées n'est pas un problème récent posé par les nouvelles modalités d'acquisition 3D, ses origines reviennent à des siècles avant. En effet, avant la découverte des rayons X en 1895, le seul moyen permettant d'acquérir la structure géométrique interne d'un objet était de procéder à découper celui-ci en plusieurs tranches³ plus ou moins espacées puis examiner chacune à part. Des techniques de reconstruction 3D fantastiques, malgré qu'elles soient manuelles, avaient eu lieu permettant deux modes différents de reconstruction : graphique et rigide [CHINGA.97] [LOZA.98]

- ☒ **Reconstruction graphique** : C'est en quelque sorte une reconstruction de contours 3D basée sur un traçage sérié. On procède à tracer les contours des tissus dans une tranche donnée sur un papier transparent (ou une plaque de plastique) en superposant ce dernier sur la tranche. Une fois toutes les tranches sont reportées sur des feuilles transparentes, on empile ces dernières pour avoir une allure tridimensionnelle de l'objet.
- ☒ **Reconstruction rigide** : Ce mode de reconstruction était utilisé pour obtenir en quelque sorte un modèle 3D de l'objet. On utilise dans cette technique des plaquettes de la cire, de bois ou de plastique dont l'épaisseur est identique à celle des coupes. Pour chaque coupe, on procède à un traçage des contours sur une plaquette, ensuite on dessine le détail des structures à l'intérieur de ces contours. Une fois terminée, les plaquettes seront découpées le long des contours, déjà tracés, puis empilées les unes sur les autres pour avoir une représentation 3D.

La Figure I-3 illustre un modèle volumique d'un fœtus obtenu par une reconstruction 3D rigide, l'image -a- en donne une vue surfacique et l'image -b- en donne une vue exploratrice de la structure interne du fœtus.

³ - Nous utilisons ici le terme tranche pour désigner une coupe sériée réelle obtenue à partir d'une dissection réelle de l'objet

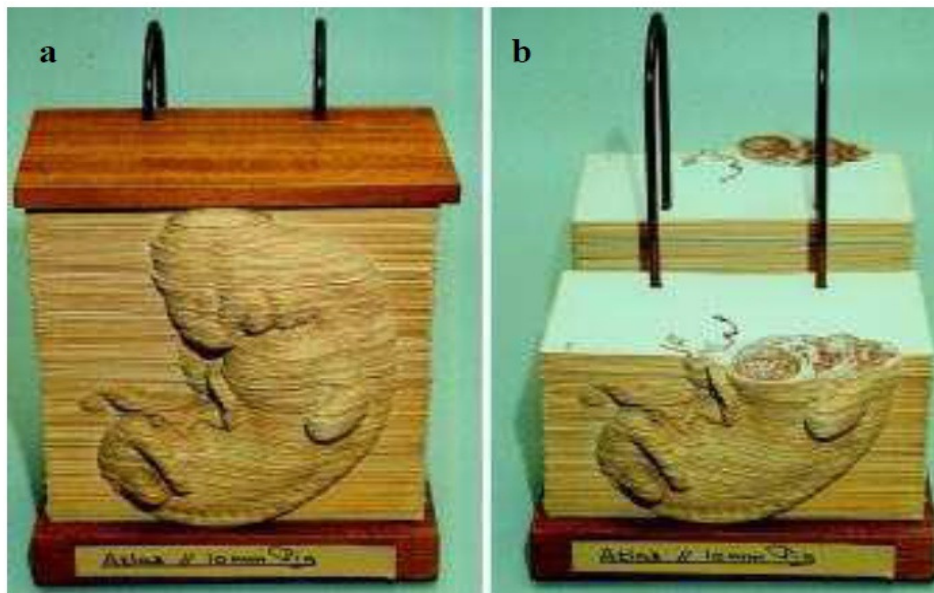


Figure I.3 – Reconstruction 3D rigide d'un modèle volumique pour un fœtus
 a) le modèle en mode surfacique b) le modèle en mode exploration [VERB.99]

Malgré l'intérêt qu'elles apportent, ces techniques sont d'utilisation courante difficile car elles sont longues, onéreuses et fastidieuses et nécessitent beaucoup de minutie. Elles présentent souvent des défauts d'exactitude par rapport au modèle original. La visualisation de nouvelles incidences nécessite de nouvelles coupes et de nouvelles reconstructions.

De plus, procéder à faire des coupes dans l'objet n'est pas une tâche toujours possible surtout lorsqu'il s'agit du corps humain. Cet inconvénient a suscité l'investigation de nouvelles techniques permettant de voir au travers des corps sans être obligé de le détruire.

Après la découverte des rayons-X, l'imagerie médicale s'appuyait pleinement sur la radiologie conventionnelle. Des tentatives d'extraction de mesures 3D à partir de plusieurs projections 2D ont été envisagées, la technique de stéréoscopie en était le principe de base [BROWN.96]. L'inconvénient majeur que présente la radiologie conventionnelle était un grand obstacle pour obtenir une représentation 3D acceptable des organes [TIGG.02]. A cet effet les travaux de recherche ont été orientés beaucoup plus vers le développement de nouvelles techniques d'imagerie permettant de produire des images 3D des organes humains⁴. La 3^{ème} dimension a été effectivement obtenue au début des années 70 donnant naissance à l'imagerie tridimensionnelle. La nature des données 3D acquises à partir de la plupart des modalités, que ce soit la tomodensitométrie CT, la résonance magnétique l'IRM, l'échographie ou l'ultrason US, la microscopie confocale ou le processus de dissection réelle, consistant en une séquence d'images 2D a invoqué un processus supplémentaire de reconstruction faisant appel à des techniques informatiques matérielles et logicielles avancées pour extraire l'information volumique encapsulée dans les données bidimensionnelles (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

Cette reconstruction est motivée par le besoin d'une meilleure appréhension de la géométrie interne des organes et aussi une meilleure compréhension de leur fonctionnement. Ceci permet d'apporter des

⁴ On peut consulter [BROWN.96] pour un historique du passage de l'imagerie conventionnelle à l'ère des images 3D

améliorations considérables au processus de diagnostic clinique des images médicales qui, à nos jours et particulièrement au niveau de nos hôpitaux, connaît plusieurs limitations.

I.4.2 Etat de l'art des méthodes de reconstruction 3D à partir de coupes 2D

I.4.2.1 Terminologies

Après la phase de segmentation, un contour est souvent représenté par une ligne brisée qui est une approximation linéaire par morceaux du contour réel continu. Plusieurs contours peuvent avoir existence au niveau d'une même coupe pouvant appartenir à un ou à différents objets. Par la suite, nous retenons les terminologies suivantes :

- **Topologie simple**: Pour désigner le cas où les données sont disposées en sections successives ne comportant qu'un seul contour. Par exemple, les deux premiers plans (du bas ou de haut) de la Figure I-2 sont des sections de topologie simple.

- **Topologie complexe**: on parlera d'une topologie complexe dès qu'une des sections, au moins, comporte plus d'un contour. Les plans restants de la Figure I-2 sont des sections de topologie complexe. Mais l'objet tout entier envisagé dans cette figure forme une topologie complexe.

Cette distinction est basée en fait sur le degré de complexité du problème de reconstruction qui s'élève dans le cas de topologie complexe.

- **Coupes significatives** : les coupes, doivent être significatives de l'objet à reconstruire. En effet, il

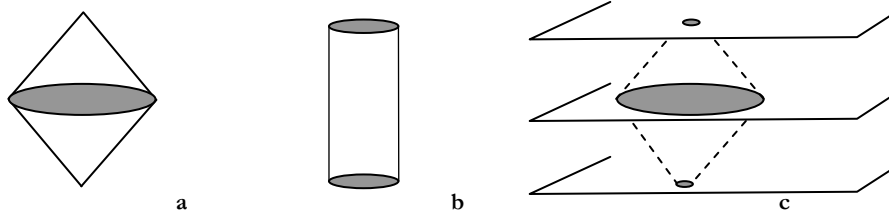


Figure I.4:(a) Objet 3D initial (b) coupes non significatives (c) coupes significatives

faut que l'évolution de la forme dans l'inter coupe soit directement conditionnée par les deux coupes données (une certaine continuité doit exister entre deux coupes successives) (Figure I-4).

- **Coupes similaires** : Les coupes doivent être assez similaires les unes des autres, pour permettre de savoir facilement quel est l'objet à reconstruire et pour qu'il ne subsiste que le moins d'ambiguïtés possibles. Les différentes coupes doivent permettre de deviner le volume qu'elles représentent tant au niveau du volume manquant qu'au niveau des associations entre les objets de deux coupes successives (problème de mise en correspondance des contours). La Figure I-5 représente différentes topologies possibles à partir du même jeu simple de contours et illustre toute la difficulté du problème. Si les sections sont suffisamment denses, les coupes sont alors pratiquement similaires ; sinon, il est assez difficile de lever les ambiguïtés.

Dans de tels cas, une intervention humaine ou une information à priori sont de grande utilité.

Les données du problème sont donc des images binaires représentant l'ensemble des contours éparpillés sur un ensemble de coupes parallèles (section ou slices) significatives et recalées de l'objet à reconstruire et sont, au maximum possible, similaires.

I.4.2.2 Formulation Générale du Problème

Loin du problème de segmentation, le problème de reconstruction tridimensionnelle dans son cadre général, peut être formulé comme suit : Un ou plusieurs objets 3D sont coupés par un nombre fini de plans parallèles. Toute notre information concernant les objets consiste en leurs résultats d'intersection (Figure I-2). C'est à dire que nous connaissons uniquement la forme de l'objet au niveau de chaque plan. Chaque intersection peut être représentée par un nombre fini de contours orientés et fermés généralement approximatés par des polygones fermés.

Le but est de connecter ces coupes de contours d'une manière à obtenir un modèle tridimensionnel approximatif de l'objet initial, le meilleur qu'il soit. Ce modèle doit contenir assez d'informations topologiques et structurelles pour définir précisément la forme 3D. Cette opération est classiquement décomposée en trois sous problèmes plus ou moins liés selon la méthode employée :

Problème de Mise en correspondance des contours : Ce problème apparaît dès qu'une section contient plusieurs contours. Étant donné un contour dans une section donnée, à quel contour doit on le lier (faire correspondre) dans la section adjacente. (Figure I-6 : a). Ce problème est appelé par [GEIGER.93] problème de connexion globale.

Problème de Prise en compte des embranchements : que doit-on faire lorsque les sections à mettre en correspondance comportent un nombre différent de contours ? Lorsque un contour contient un trou ou une concavité que le contour correspondant n'a pas ? (Figure I-6 : b)

Problème de maillage entre les contours : étant donnée une paire de contours à connecter, quels sont les sommets et les arêtes qu'on doit lier pour générer des triangles ?(Figure I-6 : c)

Les deux derniers problèmes sont appelés par [GEIGER.93] problème de connexion locale. Certaines méthodes prennent en considération les trois sous problèmes, alors qu'il y en a d'autres qui traitent partiellement le problème en se limitant à un ou deux sous problèmes. Pour un détail assez complet sur les trois sous problèmes, on peut consulter [JAILLET.99, DANCE.97, NULLA.98].

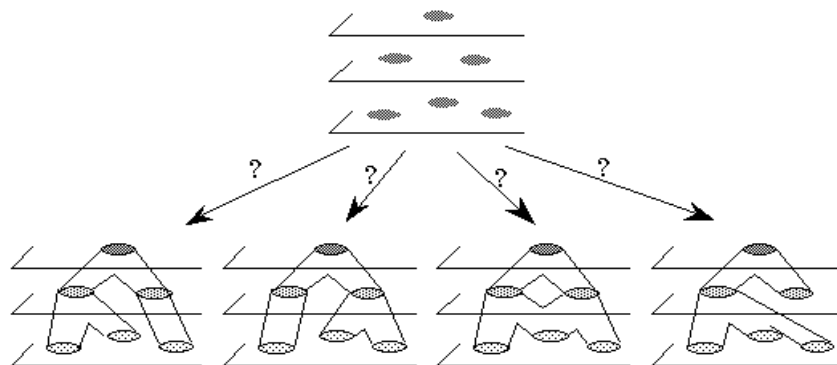


Figure I.5 : Dans certains cas des ambiguïtés sont possibles (Extrait de [ROLLAND.91])

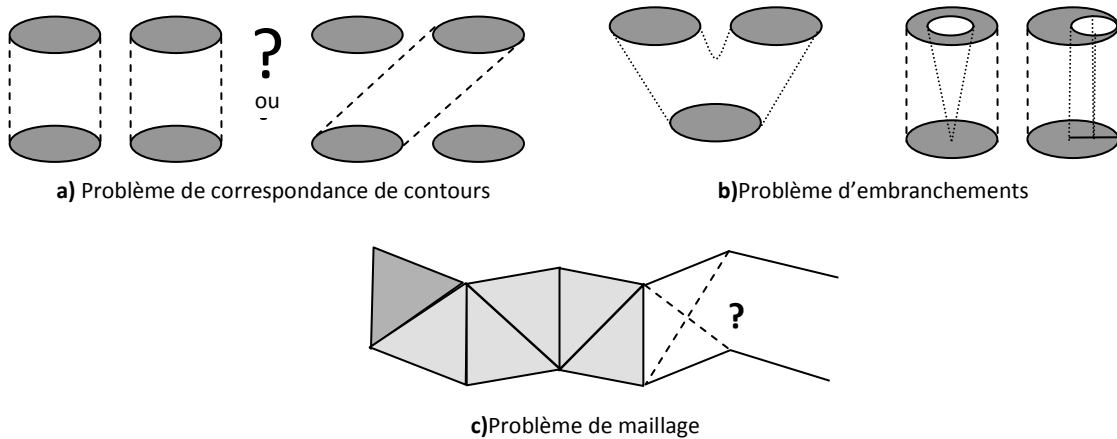


Figure I.6 : Les différents problèmes posés par la reconstruction tridimensionnelle

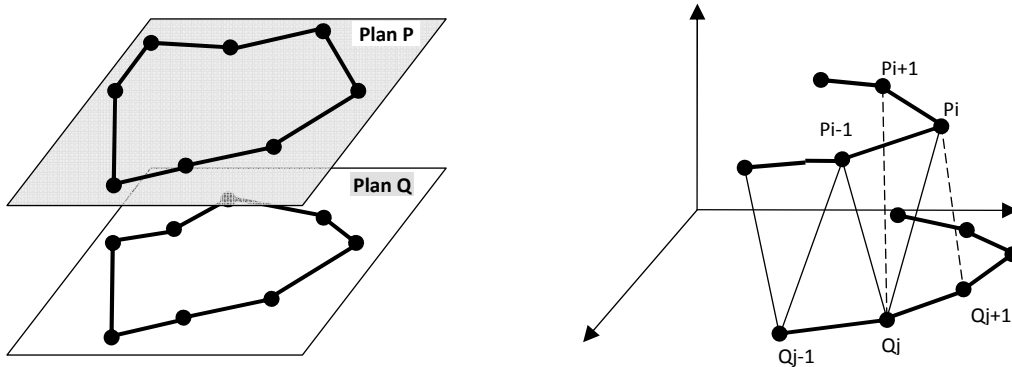


Figure I.7 : Triangulation des contours (extrait de ROLLAND,91)

I.5 Applications de la reconstruction 3D

Le champ des applications possibles au problème de la reconstruction est vaste. Dans ce qui suit nous allons en faire un tour rapide et non exhaustif, simplement pour mettre en relief la pression actuelle exercée sur la recherche pour besoin de développer de solutions pratiques et performantes à des problèmes réels posés par les industriels, les militaires et les scientifiques. On peut distinguer deux grands domaines d'applications portant le même intérêt grandissant vis à vis de la modélisation d'objets réels à partir de données numérisées.

D'une part, on peut identifier certaines applications dont les besoins sont de l'ordre de la visualisation d'objets réels, tel le cinéma et plus particulièrement les effets spéciaux, mais aussi l'industrie, en pleine expansion, les jeux vidéos ou encore les applications de réalité virtuelle.

D'autre part, on peut regrouper des applications plus scientifiques dont les besoins sont plus précis et pour lesquelles il est nécessaire d'apporter des garanties sur les modèles reconstruits.

I.5.1 Applications industrielles et scientifiques

Dans de telles applications, on peut évoquer les multiples besoins de l'industrie ayant trait à la conception d'objets, des applications CAO jusqu'au reverse-engineering. On peut aussi songer aux nombreux domaines

concernés par la simulation numérique, utilisant le calcul scientifique afin de modéliser les interactions des objets et de leur milieu : l'industrie aéronautique, automobile, géologique ou encore l'océanographie [VARADY.01, NULLA.98].

De même, l'archéologie où l'on envisage le problème de l'étude des objets extrêmement fragiles, telles les crânes et les squelettes préhistoriques ou encore les momies, la reconstruction 3D de ces objets permet de contourner ce problème [BULL.99, ARCH.97].

On peut songer encore à l'identification des individus à partir de leurs crânes, problématique largement posée en médecine légale⁵ [BULL.99]. Sans oublier bien sur les différentes applications médicales (cf. § I.5.2), évoquées à des fins d'aide au diagnostic, de simulation ou de préparation d'interventions chirurgicales.

Évidemment, la diversité de ces domaines d'application a pour conséquence une variété toute aussi grande pour la provenance des données que l'on aura à considérer. De plus, cette variété d'applications a permis d'envisager plusieurs solutions logicielles, la Table I.1 récapitule l'ensemble des caractéristiques principales de quelques logiciels classés parmi les meilleurs dans le domaine permettant la reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées [FIALA.05].

I.5.2 Applications Médicales

À l'aide de l'imagerie médicale, il est possible aujourd'hui, de visualiser l'anatomie interne du patient sans pour autant avoir recours à la chirurgie. Les images obtenues sont des séries de coupes 2D sur lesquelles il n'est pas toujours facile d'interpréter les différents problèmes auxquels sont confrontés les médecins. L'imagerie 3D intervient pour palier à ces problèmes. Elle permet aux médecins, de visualiser son patient en 3D virtuelle. Cela apportera une meilleure représentation de l'anatomie interne dans le but d'optimiser les chances de bons diagnostics.

Plusieurs projets de recherche ont été menés dans ce contexte, on en cite :

1. The Visible Human Project lancé par The National Library of Medicine (http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html) grâce auquel on dispose d'une numérisation complète du corps d'un homme et une autre d'une femme.
2. The Voxel Man : (<http://www.users.ox.ac.uk/~uzdl0037/voxman.html>),
3. The Digital Anatomist : (<http://www.biostr.washington.edu/slideshows/quickview/title.html>),
4. The Human Brain Mapping: (<http://www.journals.wiley.com/wilcat-bin/ops/ID1/1065-9471/prod>).
5. The Anatomy Browser : (<http://www.spl.harvard.edu>)

La reconstruction 3D est un apport pour toutes les spécialités médicales. Voyons alors, dans quels cas, cette reconstruction apparaît utile.

Tout d'abord, la reconstruction 3D peut être utilisée pour visualiser en trois dimensions les différents organes du corps humain. En effet, au niveau hépatique par exemple, il est possible de reconstruire le foie en 3D [MONT.99]. Grâce au couplage de la reconstruction et de logiciels informatiques, il est possible de repérer des tumeurs ne mesurant que 3mm (1 cm pour l'analyse classique). Ceci va permettre notamment, un diagnostic plus rapide des tumeurs et donc un traitement qui commencera plus rapidement. Mais aussi, la reconstruction 3D donnera la possibilité d'évaluer plus précisément l'efficacité thérapeutique avec le calcul des volumes tumoraux. Par conséquent, l'imagerie 3D est devenue un outil incontournable dans la lutte contre le Cancer.

Il est possible de reconstruire également, à partir d'images TDM (ou CT), des os, la hanche [LEBRAS.04], la peau, ainsi que la trachée, les voies aériennes et les poumons [FETITA.00].

D'autre part, la reconstruction 3D est largement utilisée pour la chirurgie. En effet, l'image virtuelle sera utilisée avant l'opération afin d'avoir une anatomie interne équivalente à celle du patient et non plus

⁵ - là encore on peut citer le projet d'identification et reconstruction de la célèbre momie Nivertiti.

Logiciel	Lien	Recalage	Montage	Trace des contours	Mesures	Rendu 3D
3D Doctor	www.ablesw.com	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Amira	www.amiraviz.com	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Bioquant	www.bioquant.com	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Neurolucida	www.neurolucida.com	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Reconstruct	www.synapses.bu.edu	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Table I.1– Quelques principaux logiciels permettant la reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées

une anatomie théorique et peu précise. Grâce à l'imagerie et la reconstruction 3D, le chirurgien pourra même simuler son opération avec une résection virtuelle, dans le but de limiter au minimum les risques lors des interventions chirurgicales [DELING.05].

De plus, l'imagerie tridimensionnelle a des applications en chirurgie orthopédique. En effet, outre l'exploration de l'appareil locomoteur à des fins diagnostiques, la reconstruction 3D va permettre d'élaborer des techniques chirurgicales plus sûres. Elle est également utilisée dans l'aide à la chirurgie maxillo-faciale en simulant les actes chirurgicaux et en mettant en évidence les résultats [ALTAN.03].

La reconstruction 3D est également utilisée dans l'imagerie de l'os fœtal. En effet, l'imagerie 2D est insuffisante pour évaluer certaines malformations osseuses (Explorations fines des extrémités osseuses, métaphyses ...) et par conséquent imprécise sur le diagnostic. Outre l'échographie 3D, La tomodensitométrie 3D permet d'obtenir d'excellentes images de l'ensemble des marqueurs osseux. Seul point négatif, l'irradiation. Mais celle-ci apparaît acceptable au vue des résultats [VERB.99].

Pour finir, la reconstruction 3D peut être utilisée pour effectuer une endoscopie virtuelle comme par exemple dans l'étude du colon [MISTRY.98] ou les vois aériennes. En effet, cette technique de reconstruction permet de déceler au préalable d'éventuelles lésions. Deux cas peuvent alors se présenter. Premièrement l'examen est négatif et il n'y a pas de suite donnée. Par contre, si l'examen s'avère positif, une endoscopie « réelle » sera réalisée pour localiser la lésion et une biopsie pourra être réalisée. La reconstruction 3D permet alors d'éviter une endoscopie « réelle » lorsqu'aucune lésion n'est détectée. Ces deux techniques sont donc complémentaires.

La reconstruction 3D est donc très utile dans diverses applications médicales notamment en donnant la possibilité de simuler certains actes chirurgicaux. Ces applications vont se diversifier de plus en plus avec l'exploitation au maximum des diversités des images médicales et la continuité du développement des méthodes et outils informatiques du point de vue puissance et robustesse.

I.6 Système Général de Reconstruction Tridimensionnelle à partir de Coupes Sériées

La reconstruction tridimensionnelle est classiquement décomposée en plusieurs étapes constituant un pipeline de sous problèmes. Un système de Reconstruction Tridimensionnelle définit le cycle de vie de l'image. En d'autres termes, il décrit l'ensemble des étapes par lesquelles la séquence des coupes médicales passe depuis son acquisition jusqu'à l'obtention de l'information volumique décrivant l'objet d'étude (Figure I.10).

Un tel système doit être capable de faire une acquisition automatique des coupes 2D. Il doit pouvoir ensuite effectuer une segmentation automatique, au maximum possible, du volume d'intérêt. La phase de reconstruction tridimensionnelle de l'objet à partir de l'ensemble de données segmentées doit être aussi assurée de manière totalement automatique. Enfin, il doit permettre une visualisation, au sens large du mot, de l'objet reconstruit.

Le système que nous proposons consiste principalement en six étapes : l'acquisition, les prétraitements, le recalage, la segmentation, la génération du modèle et enfin la visualisation. La deuxième et la troisième étape constituent en quelque sorte des étapes préparatoires pour le processus de reconstruction global, c'est pour cette raison que nous les avons regroupées ensemble pour constituer une seule étape.

I.6.1 Etape d'acquisition

La première étape dans le processus de reconstruction est l'étape d'acquisition des données de base se représentant en un ensemble d'images bidimensionnelles. Cette étape est généralement achevée par le système physique d'acquisition.

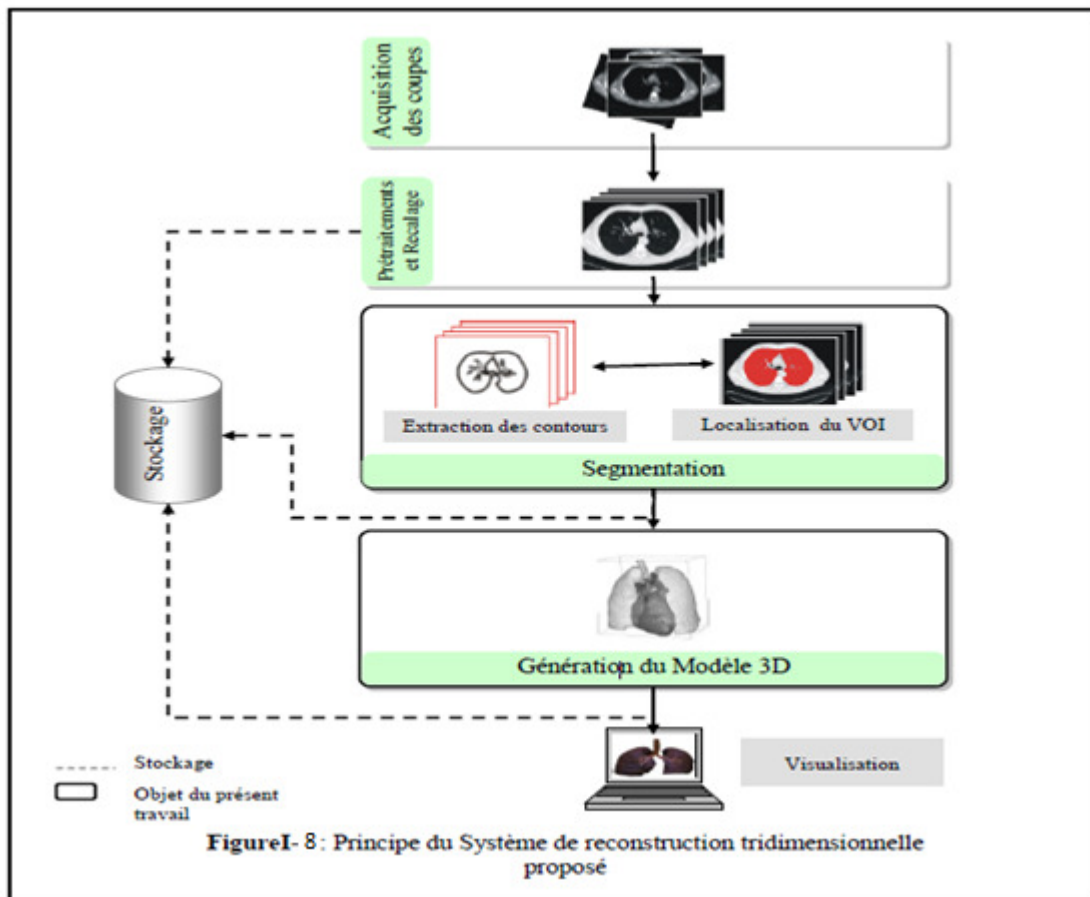
Dans le cas où les données représentent des coupes réelles, il s'agit de découper l'objet en tranches afin d'obtenir les coupes. Cette méthode n'est évidemment pas utilisable dans tous les cas. De plus, elle occasionne parfois des distorsions et des perturbations sur la structure même de l'objet ce qui provoque des erreurs lors de la reconstruction. Dans le cas où, par exemple, les coupes sont obtenues par ultra-microtomie, elles ne sont distantes que de quelques dizaines de nanomètres, ainsi le processus mécanique de la découpe provoque nécessairement une déformation de certaines structures de l'objet.

S'il s'agit de coupes virtuelles, l'information captée par le dispositif physique (un scanner CT, IRM ou US) représente une mesure de certaines propriétés physiques du corps.

Le résultat de cette étape est une séquence de d'images 2D, généralement en niveau de gris, constituant les coupes. Signalons ici que les étapes en aval de cette étape dépendent largement de la technique d'acquisition envisagée.

I.6.2 Etape de Prétraitements et Recalage

Lors de l'acquisition, des conditions extérieures peuvent intervenir pour nuire à la bonne qualité de l'image acquise. Les conditions d'éclairage, le taux des signaux parasites, la nature de l'atmosphère (poussière, humidité, ...), la résolution d'échantillonnage du scanner, le calibrage des caméras, ... tout ces phénomènes interviennent pour ajouter à l'information utile d'autres informations futiles constituant ce qu'on appelle en traitement d'images : le bruit.



Dans une première phase, le rôle confié à cette étape est d'éliminer d'abord le bruit, idéalement sans toucher à l'information utile, puis procéder à améliorer la qualité de l'image pour faciliter le travail des étapes postérieures. La littérature propose une large gamme de techniques de prétraitements, la modalité d'acquisition et la nature des tissus à analyser déterminent la technique la plus adéquate.

Dans une seconde phase, une étape de recalage des coupes pourrait avoir lieu dont le rôle est de réaligner les coupes dans l'espace de telle sorte qu'elles aient une forme similaire à l'objet initial obéissant à un même repère. En effet, cette opération est nécessaire dans le cas où les conditions d'obtention de la séquence diffèrent d'une coupe à une autre, permettant à quelques unes de subir une rotation ou une déformation quelconque. Ce cas de figure est fréquent dans le cas où les coupes sont acquises après une dissection réelle de l'objet. Dans l'autre cas où la séquence consiste en des coupes IRM, CT ou US elles sont, en principe, alignées et par conséquent cette étape est omise.

I.6.3 Etape de Segmentation

C'est l'étape la plus délicate dans le processus de reconstruction. Les performances globales du système en dépendent largement. La segmentation est un processus visant à décomposer la séquence d'images en un ensemble de régions - ou classes - homogènes au sens d'un ou plusieurs critères. Son rôle dans le processus de reconstruction est de localiser le volume d'intérêt (VOI) au sein de l'ensemble des coupes (les poumons par exemple dans la Figure I.9, ou une tumeur dans une image cérébrale). Autrement dit, l'ensemble des pixels représentant le même type de tissu, dans une coupe donnée, seront regroupés pour constituer une seule région; ce qui apporte un intérêt majeur au praticien.

Une deuxième tâche confiée à cette étape est l'identification ou l'étiquetage des différents VOI segmentés. En effet, les régions segmentées appartenant à un même type de tissus doivent être ensuite classifiées selon leurs natures anatomiques. Par exemple, on isole le ventricule gauche de celui de droite, ou bien les veines des différentes artères.

Le résultat est une séquence d'images binaires où la valeur binaire de chaque pixel indique son appartenance ou non au VOI. La nature binaire des images obtenues réduit énormément le volume des données à traiter.

Une autre tâche confiée à cette étape est d'extraire, à partir du volume d'intérêt obtenu, l'ensemble des contours qui le délimite le long de la séquence d'images binaires. Là aussi une réduction du volume des données pourra être envisagée. Le résultat final de cette étape est une séquence de plans de contours fermés.

I.6.4 Etape de Modélisation

Cette étape constitue le noyau du processus de reconstruction dans la mesure où elle permet de bâtir l'information tridimensionnelle. Le but de la reconstruction est de fournir une description géométrique de l'objet numérisé en se basant principalement sur le calcul d'un modèle volumique ou surfacique qui sera une approximation de l'ensemble des données. Cette opération est classiquement décomposée en trois étapes [GEIGER.93, JAILLET.98] plus ou moins liées selon la méthode employée :

1. Mise en correspondance des contours
2. Reconstruction de maillage entre les contours
3. Prise en compte des embranchements

Le résultat final de cette étape est un modèle 3D, consistant en un maillage, approximant l'objet initial.

I.6.5 Etape de Visualisation

C'est la dernière étape du processus. La visualisation est le processus de projection du modèle 3D obtenu sur un plan 2D consistant en l'écran par exemple. Cette projection devrait présenter le maximum possible d'informations contenues dans le modèle. Elle doit aussi permettre une navigation ou une exploration de l'information volumique présentée par ce modèle. En sus, elle doit permettre une interaction utilisateur-machine intuitive et souple.

Le processus d'acquisition et de prétraitement des données, la reconstruction proprement dite, et la visualisation doivent, pour le système de reconstruction 3D idéal, réduire les interventions de l'utilisateur au strict minimum.

Signalons que, dans ce travail, nous nous sommes intéressés beaucoup plus par la troisième étape (la segmentation) et la quatrième étape (la génération du modèle 3D). Par conséquent, dans le volet pratique, les coupes constituant les entrées de notre système sont supposées être recalées et prêtes à être segmentées.

I.7 Conclusion

La reconstruction tridimensionnelle d'objets à partir de coupes sériées permet de passer du modèle physique réel préalablement numérisé à un modèle 3D mathématique reflétant, au maximum possible, les propriétés principales de l'objet. Motivée principalement par l'incapacité de l'imagerie 2D de fournir une compréhension suffisante de la complexité des objets étudiés et le besoin intense de disposer d'une représentation informatique 3D de nombreux objets réels et encore facilitée par le progrès enregistré dans le domaine des procédés d'acquisition 3D. Les applications de la reconstruction 3D se diversifient de plus en plus allant des applications scientifiques aux applications médicales en passant par celles industrielles et militaires.

Dans un contexte médical, il est très important, et bénéfique, de poser le problème de la reconstruction tridimensionnelle comme étant un problème de modélisation 3D; ceci permet d'aller au-delà du simple besoin de visualisation à des applications de planification et simulation chirurgicales. Pour ce faire, nous avons proposé un système général de reconstruction tridimensionnelle automatique se présentant

principalement en cinq étapes dont la segmentation et la génération du modèle 3D en constituent les principaux maillons.

Il semble, pour l'instant, que le système est assez difficile à mettre en œuvre. En effet, vu l'état critique du domaine médical et les responsabilités à assumer, l'intervention humaine s'avère encore souvent nécessaire lors des phases de prétraitement des données et la segmentation. Les systèmes d'aide au diagnostic médical d'aujourd'hui sont presque, tous, des systèmes semi-automatiques guidés par l'expertise de l'utilisateur. Malgré cela, Des recherches intenses visant à exploiter l'évolution des architectures des ordinateurs (diminution des temps de traitement, parallélisme, ...) et des techniques de l'intelligence artificielle au niveau des phases de traitement d'images (association des objets des coupes, segmentation, ...) pour intégrer cette expertise d'une manière implicite ou explicite pour permettre à de tels systèmes de passer progressivement à un état purement automatique.

La reconstruction 3D nous permet :

1. de visualiser en 3D et d'étudier la morphologie des organes.
2. de mesurer avec une précision ses dimensions.
3. de mieux préciser les rapports avec les autres organes.
4. de stocker et conserver les images virtuelles obtenues pour des études ultérieures.
5. De construire un organe virtuel entier constituant un outil interactif utilisable pour différents usages, dont notamment l'apprentissage de l'anatomie.

CHAPITRE II

Méthodes & Algorithmes

II.1.Introduction

Le besoin intense de trouver des solutions automatiques au problème de reconstruction tridimensionnelle à partir de coupes sériées a permis d'envisager plusieurs méthodes, elles peuvent être regroupées en deux grandes approches : reconstruction surfacique et reconstruction volumique.

II.2.Reconstruction surfacique

Historiquement, les méthodes de reconstruction surfacique étaient les premières à avoir apparence [BG.92]. Le problème de la reconstruction tridimensionnelle consiste alors à bâtir un maillage surfacique entre les contours de deux coupes adjacentes puis les concaténer en série pour arriver au modèle final de l'objet 3D. Ceci est achevé par la connexion des segments des contours dans une coupe donnée par les sommets des contours dans la coupe opposée. Les premières méthodes évitent le cas de topologies complexes et s'intéresse à des topologies simples [ARCHIP.02]. Ainsi, tout l'effort des méthodes est concentré sur le troisième sous problème : la génération d'une surface définie par un ensemble de maillage triangulaire. Deux catégories de méthodes sont à distinguer :

II.2.1.Méthodes optimales

Ces méthodes essayent de former une triangulation optimale en fonction de critères métriques qu'elles définissent.

En effet dans de telles méthodes, le problème de maillage surfacique est basé sur un maillon triangulaire dont deux sommets forment deux point consécutifs d'un même contour et le troisième est un point dans le contour opposé. La construction de tel maillage est équivalente à chercher un chemin dans un graphe orienté. Si l'on associe un poids à l'ensemble des arcs de ce graphe, l'algorithme classique du plus court chemin produira le maillage optimal.

A ce stade, plusieurs types de poids sont envisageables tel que l'aire du triangle généré, le volume englobé ou la taille de l'arête générée [JAILLET.99, DANCE.97].

II.2.2.Méthodes heuristiques

A cause du coût des méthodes d'optimisation des algorithmes qui cherchent un maillage optimale, des heuristiques simples à mettre en œuvre ont été proposés ces algorithmes ont un coût linéaire mais produisent, la plupart du temps, des résultats assez décevants.

Par exemple, le critère le plus simple est celui de la longueur de l'arête générée. Il est utilisé pour choisir à chaque étape entre les deux arêtes possibles. Pour obtenir de meilleurs résultats, les distances peuvent être normalisées. Cependant la méthode échoue dans des cas courants. Une amélioration a été proposée consistant à modifier l'orientation de l'arête commune entre deux triangles lors d'une phase d'optimisation locale (Figure II-1) [JAILLET.99, BG.92, ROLLAND.91, DANCE.97].

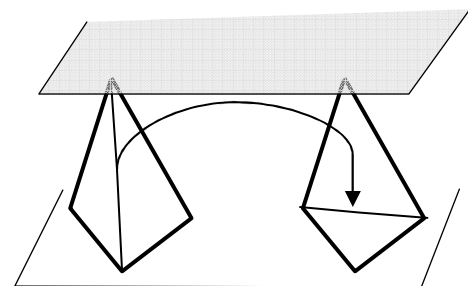


Figure II.1 : changement local d'orientation d'une arête

Avantages & inconvénients des méthodes surfaciques

Les méthodes surfaciques présentent les avantages suivants :

- ☺ Ces méthodes sont souvent rapides
- ☺ Réduction de données envisageable suite à l'utilisation de données bidimensionnelles
- ☺ La représentation 2D générée, suite au maillage triangulaire utilisé, permet une visualisation rapide et un rendu 3d de qualité de l'objet.
- ☺ Les contours peuvent être traités (réduction de sommets, interpolation, ...)

- ☺ La fonction du coût permettant plusieurs critères différents rend ces méthodes applicables sur une large gamme de problèmes.
- ☺ Pas de traitements additionnels pour adapter la surface une fois générée.

Cependant, elles présentent les inconvénients suivants :

- ☹ Plusieurs méthodes sont limitées aux cas de topologies simples. Il n'y a pas de prise en compte du problème d'embranchements.
- ☹ La plupart de ces méthodes considèrent la triangulation comme étant le résultat final
- ☹ Les scènes réelles présentent une topologie assez complexe, multiples branchements, multiples trous, ... de telles méthodes s'appuyant sur un maillage basé sur les lignes de contours, bien évidemment, ne pourront pas s'adapter à de telles complexes scènes.
- ☹ Le maillage n'est pas adéquat dans le cas où deux contours diffèrent largement de formes ou de positions

Dernièrement, de nouvelles méthodes ont apparaître faisant appel aux modèles déformables et les surfaces paramétriques [JAILLET.99, ARCHIP.02], leur inconvénient majeur est qu'elles sont lentes pour qu'elles soient incorporées dans des applications (cliniques) en temps réel.

II.3.Reconstruction volumique

L'approche volumique est plus ou moins récente, elle considère l'ensemble des contours comme étant une image 3D répartie sur une grille cubique dont le maillon élémentaire est le voxel. Un voxel est l'extension spatiale d'un pixel. Le principe est de créer une surface consistant en un maillage de parallélépipèdes le long du VOI puis la sculpter pour qu'elle s'adapte à la topologie des données.

D'autres méthodes, telles que les éléments finis [CHOW.98], les α -shape, les a-shape sont encore envisageables dans ce contexte. Pour un état de l'art assez complet on peut consulter [DA.02, NULLA.98]

Avantages & inconvénients des méthodes volumiques

Les méthodes volumiques présentent les avantages suivants :

- ☺ La simplicité du critère d'optimalité (heuristique) consistant en la condition « le plus proche voisin » au sens géométrique (geometric closeness).

Cependant, elles présentent les inconvénients suivants :

- ☹ Le grand volume de données à manipuler ;
- ☹ Les surfaces générées ne sont pas assez simples pour le rendu ;
- ☹ La nature anisotrope des données implique une étape d'interpolation pour éviter des formes déformées.

II.4.Un algorithme de reconstruction tridimensionnelle efficace ?

Une condition assez intuitive qu'un algorithme de reconstruction tridimensionnelle doit satisfaire est que si l'on coupe l'objet reconstruit suivant les plans de coupes originaux on obtiendra les contours originaux (qu'on a appelés les ROI).

Dance dans [ARCHIP.02] a indiqué quelques autres conditions qu'un bon algorithme de reconstruction tridimensionnelle devrait satisfaire :

- Un algorithme doit être invariant vis-à-vis la rotation et la mise à l'échelle des données ;
- Il doit préserver la convexité : si les régions sont convexes au niveau des différentes sections alors le résultat de reconstruction doit être aussi convexe ;

- Il doit être auto-consistant (self-consistent) : une reconstruction faite à partir de coupes interpolées doit être identique à celle obtenue à partir des coupes initiales ;
- Il doit être impartial (fair) : la reconstruction doit être la même si la subdivision des sections en un ensemble de régions internes et externes par rapport à l'objet est remplacée par son complément.

Ces critères sont dans de nombreux cas exclusifs, dans d'autres cas ils peuvent avoir difficilement existence surtout lorsqu'il s'agit d'un maillage triangulaire.

Suite à un problème donné, Quelle méthode doit on adopter ? Pour répondre à cette question, plusieurs d'autres ingrédients du problème doivent être déterminés tels que :

- La taille de l'objet et L'espace entre les différentes sections
- Le type de tissus
- L'objectif attendu de la reconstruction (simple visualisation, simulation, ...)
- Autres informations dépendant de la nature du problème...etc.

II.5. L'algorithme des Marching Cubes:

L'algorithme des Marching Cubes est une méthode permettant de générer un objet polygonal à partir d'un maillage structuré et uniforme (coupes parallèles sériées). Le champs scalaire est divisé en cubes de taille identique et est parcouru, cubes par cubes, pour déterminer les éventuelles intersections de chaque cube avec la surface. Différentes configurations sont possibles et dépendent de la répartition des intersections de la surface avec les arêtes des cubes.

II.6. Principe du Marching cubes

L'algorithme du Marching Cubes a été inventé par Bill LORENSEN et Harvey CLINE [WIL 87]. Il s'agit d'une méthode surfacique permettant d'extraire une surface équipotentielle (iso-surface) d'un maillage structuré et uniforme 3D.

II.7. Définition de l'Iso-surface

On peut considérer une iso-surface [BUR 00] comme l'analogie en 3D d'une courbe de niveaux.

C'est en fait le lieu des points de l'espace pour lesquels une fonction est constante. En écriture mathématique, une iso-surface est définie par:

$$\{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3, f(x, y, z) = c\}$$

Le choix de c permet à l'utilisateur de sélectionner un objet particulier dans le volume sans utiliser tous les voxels de l'ensemble volumique. On représente les iso-surfaces à l'aide des images; elles sont très utilisées comme méthode de représentation visuelle des données.

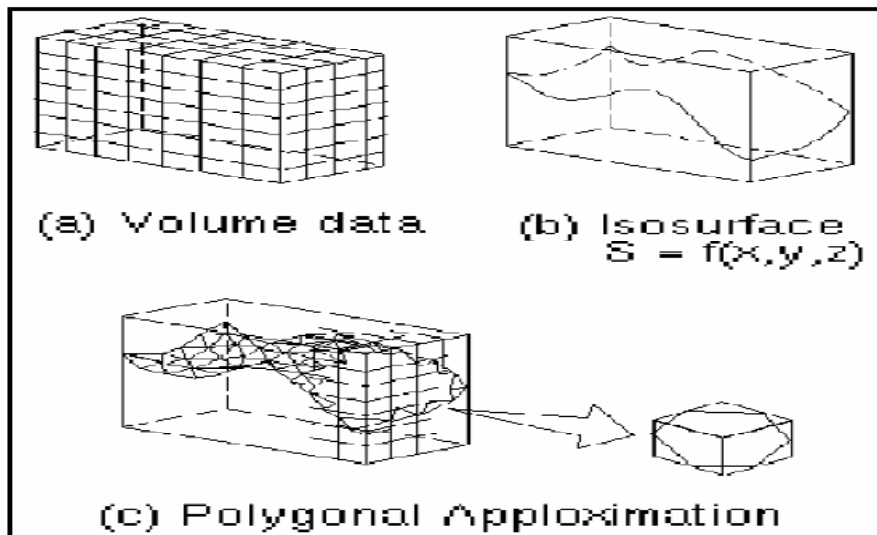


Figure II.2: Des coupes vers volumes: iso-surfaces

En imagerie médicale, les iso-surfaces peuvent représenter des régions de densité donnée sur des tomodensitométries tridimensionnelle, permettant donc de visualiser de manière réaliste les organes internes, les os, ou d'autres structures corporelles. Il nous fallait choisir l'algorithme de génération de cette iso-surface. Pour une génération efficace, il y a l'algorithme du Marching cube.

II.8. Les étapes de fonctionnement du Marching cubes

L'objectif de l'algorithme des Marching Cubes est de créer le modèle 3D de la structure anatomique d'intérêt. Afin de représenter un volume, il faut avoir les coupes 2D sériées et segmentées. Ensuite on fixe un seuil de densité et on l'associe à la structure d'intérêt et on divise l'espace en une série de petits cubes élémentaires (appelées voxels).

On distingue donc dans cet algorithme les étapes suivantes:

- Création d'un cube
- Classement des sommets du cube
- Création d'un index pour le cube
- Recherche la configuration correspondante des 15 cas préétablis
- Positionnement du point d'intersection de la surface avec le cube à travers une interpolation linéaire
- Calcul de la normale pour chaque vertex Interpolation d'une normale pour chaque sommet du triangle
- Refaire les étapes pour les autres cubes.

Le groupement des surfaces obtenues permet d'obtenir l'approximation du volume recherché

a. Numération des sommets du cube

Deux images 2D adjacentes fournissent les 8 pixels formant un cube (Figure II.5). Pour localiser la surface dans ce cube logique, on applique l'algorithme de Marching cubes qui permet de déterminer l'intersection de la surface avec ce cube puis passer au cube suivant.

Soit un cube défini par 8 sommets, est l'intersection de deux tranches adjacentes, 4 de la tranche k et les Autres de la tranches $K+1$.

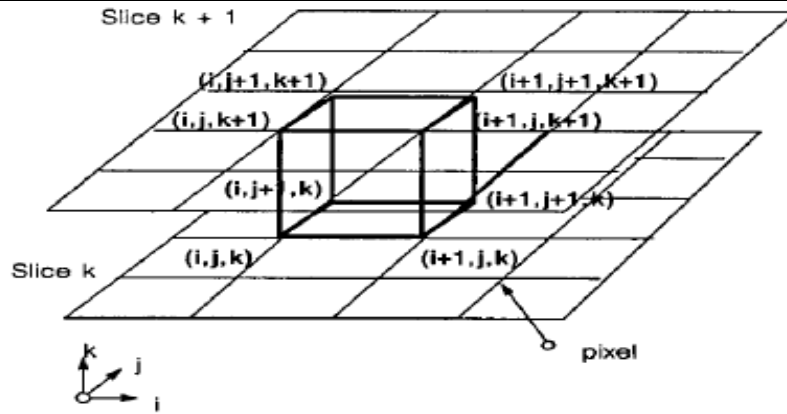


Figure II.3: Formation d'un cube par les deux tranches K et K+1

Pour la numérotation des sommets et des arêtes d'un cube on suit la convention Paul Bourke [BOU94].

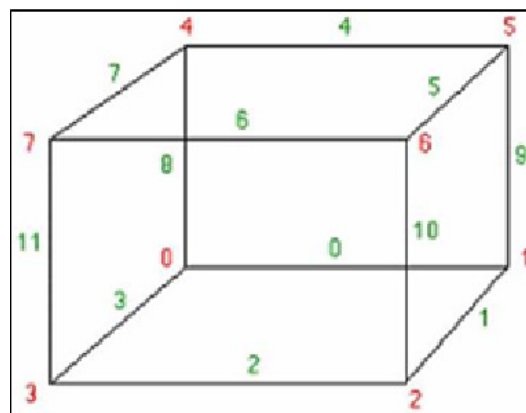


Figure II.4: Numérotation d'un cube

b. Détermination de l'index

Pour la création d'un index on doit classifier des sommets des cubes par :

- 1 s'il est à l'intérieur de la surface.
- 0 s'il est dehors.

La surface coupe alors les arêtes du cube lorsque les 2 vertex formant l'arête sont de signes contraires.

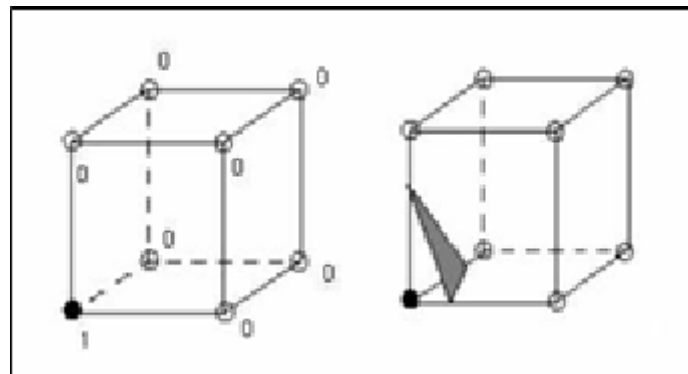


Figure II.5: Classification des sommets

Par la suite on doit créer une topologie de la surface dans le cube, et puisqu'il ya 8 sommet dans le cube et chaque sommet est représentée par deux états binaires 0 et 1, on a alors 256 cas des surfaces qui peut se croiser dans un seul cube ou 256 configurations possibles de répartition des sommets, mais grâce à des symétries de rotation et d'inversion des points internes/externes, on peut se ramener à 15 configurations seulement qui donnent 15 topologies différentes de triangles, représentées dans la figure suivante :

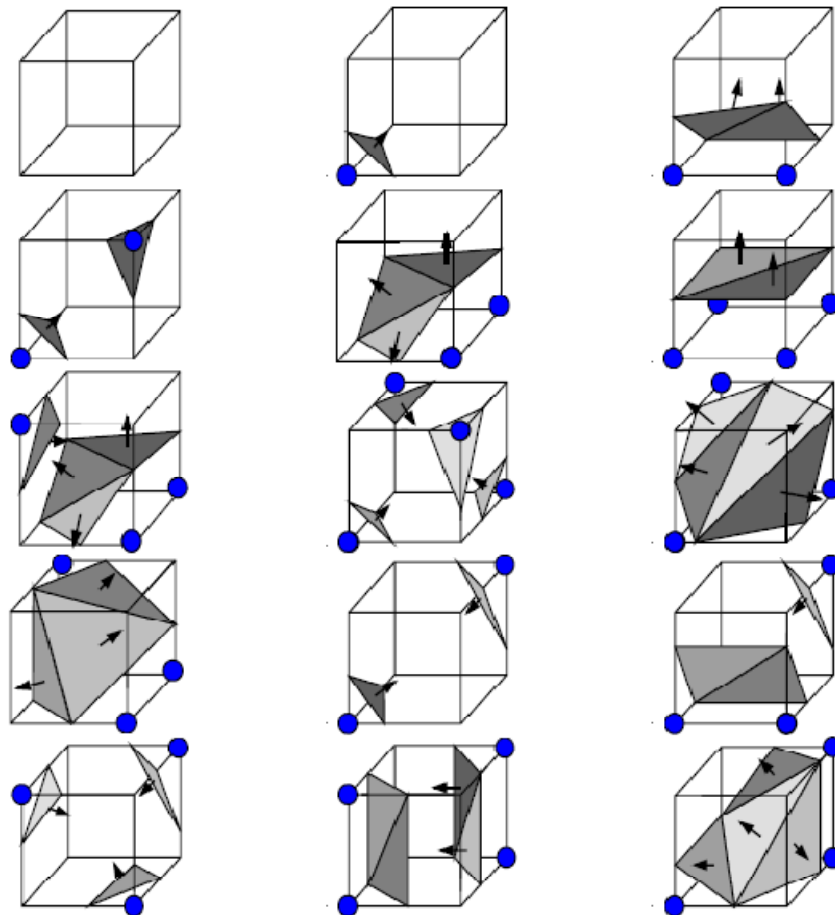


Figure II.6 : Les 15 topologies de triangles

c. Configurations ambiguës :

Le problème est plus complexe qu'en 2D : le choix d'une config dans une cellule n'est pas indépendant des autres cellules. Donc un mauvais choix peut générer des trous dans la surface. (Figure II.7). Et pour éviter ce problème on remplace un des deux configurations qui font l'ambiguïté par la topologie complémentaire de celle-ci (dans l'exemple de la figure II.6 on remplace la configuration 6 par la configuration 6 complémentaire).

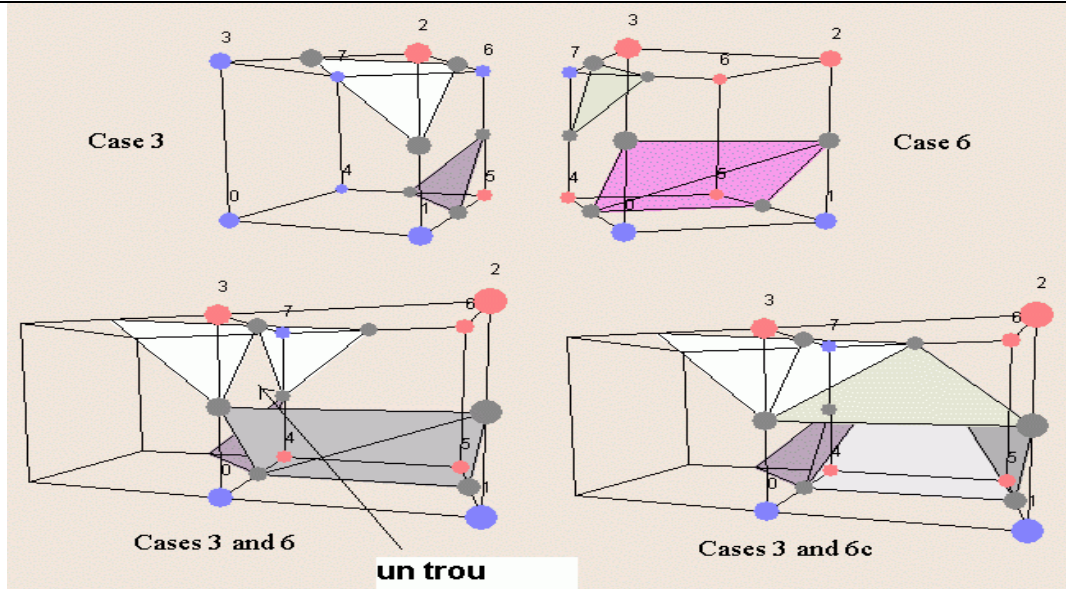


Figure II.7 : problèmes d'ambiguïté

Pour tout les cas d'ambiguïté six configurations (Figure II.8) complémentaires sont ajoutées par Nielson et Hamann suite à sa publication[NH91] pour résoudre les cas problématiques.

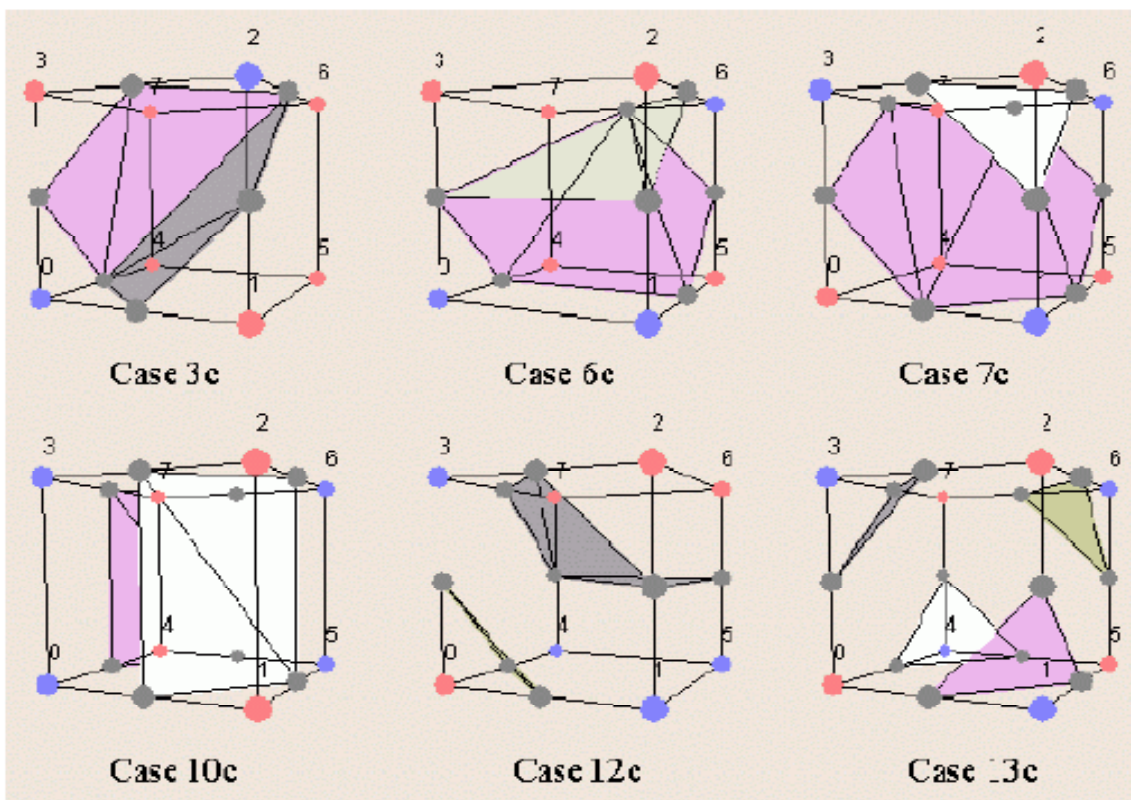


Figure II.8 : les 6 cas complémentaires pour résoudre les cas d'ambiguïté

Alors on a 33 cas par la suite (Figure II.9).

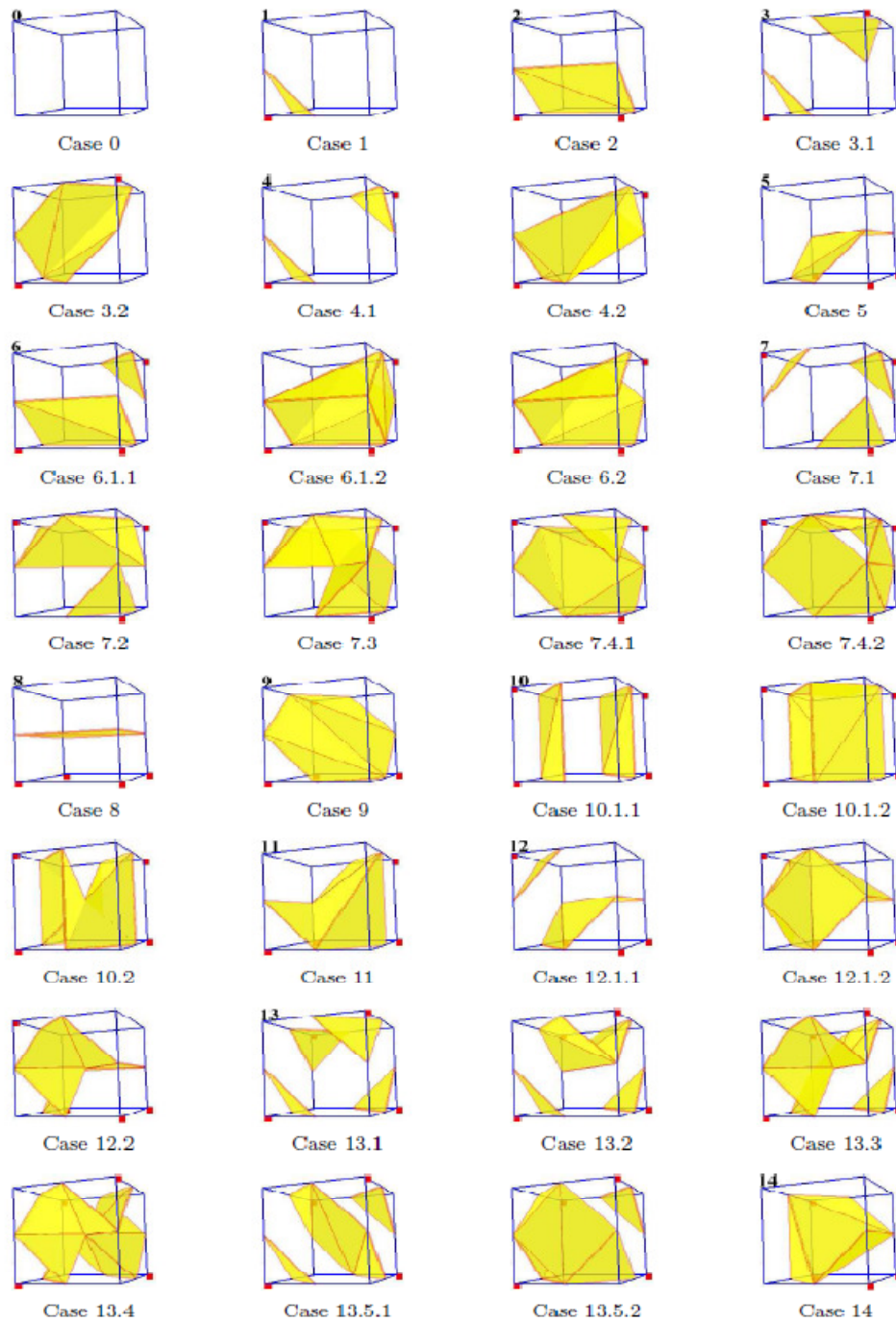


Figure II.9 : les 33 topologies de [CH95].

On peut représenter les 256 cas par un index de 8 bits (nombre de sommets) **Figure II.10**, on numérote les sommets de v_1 à v_8 , et les arêtes de e_1 à e_{12} , l'index prend sa valeur par les états des sommets ($v_i=1$ si v_i est intérieur sinon 0 ou le contraire).les poids binaires de chaque sommets représentant en bleu.

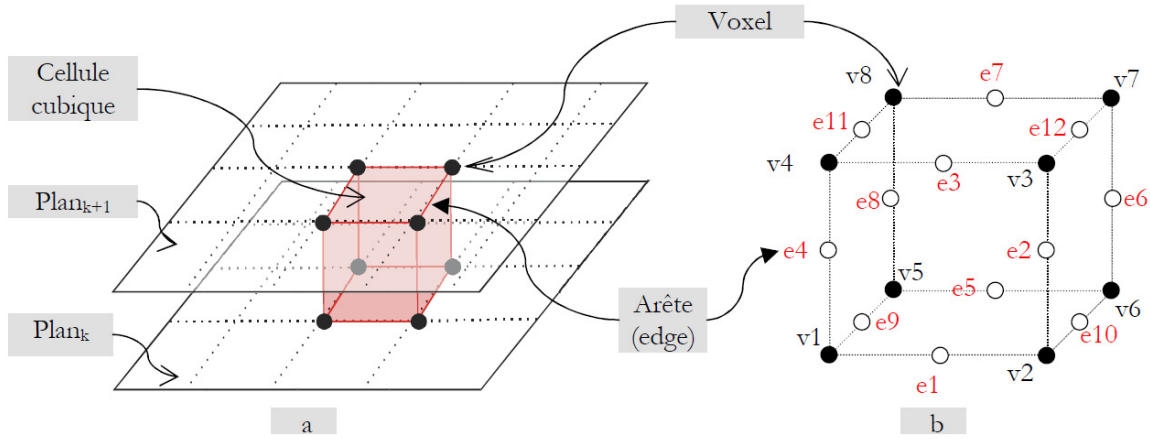


Figure II.10: le principe d'indexation

(a) la décomposition en un ensemble de cellule cubique (b) Indexation des voxels et des arêtes

Index= $V_8, V_7, V_6, V_5, V_4, V_3, V_2, V_1$

Par exemple si on prend la topologie 7(Figure II.11) l'index= $0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0 = 2+8+64 = 74$

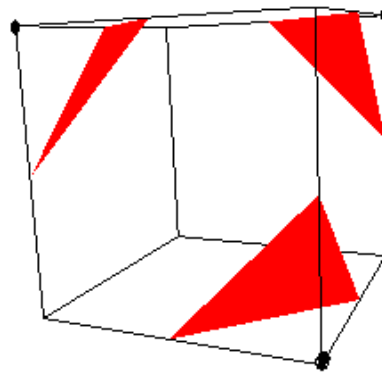


Figure II.11 : la topologie 7

L'ensemble de ces configurations a été répertorié par les concepteurs de l'algorithme en deux tableaux. L'index généré, suite à une configuration donnée, sert comme entrée dans l'un des deux tableaux.

Le premier tableau, intitulé « EdgeArray » (table des arrêtes) permet de déterminer quels côtés la surface traverse, il contient 256 valeurs tel que les valeurs sont en hexadécimale on a 12 arrêtes ($e_{12}, e_{11}, e_{10}, e_9, e_8, e_7, e_6, e_5, e_4, e_3, e_2, e_1$ il faut respecté cette ordre) alors chaque valeur représenté par trois caractères hexadécimaux, Par exemple si on prend la 75ème valeur (qui représente la septième topologie Figure II.11) qui est $0xe6f=111001101111$ qui signifie que les arrêtes : $e_1, e_2, e_3, e_4, e_6, e_7, e_{10}, e_{11}, e_{12}$ sont intersectés par l'objet.

EdgeArray:

0x000, 0x109, 0x203, 0x30a, 0x406, 0x50f, 0x605, 0x70c,
 0x80c, 0x905, 0xa0f, 0xb06, 0xc0a, 0xd03, 0xe09, 0xf00,
 x190, 0x99, 0x393, 0x29a, 0x596, 0x49f, 0x795, 0x69c,
 0x99c, 0x895, 0xb9f, 0xa96, 0xd9a, 0xc93, 0xf99, 0xe90,
 0x230, 0x339, 0x33, 0x13a, 0x636, 0x73f, 0x435, 0x53c,

....

Le second tableau, intitulé « FaceArray » (table des triangles) permet de déterminer quels points faut-il relier pour tracer le bon polygone. Il contient aussi 256 lignes chaque ligne contient 16 valeurs 15 représentant les sommets des triangles (5 triangles dans un seul cube au maximum $5*3(\text{sommets})=15$) et la 16ème valeur toujours -1 pour indiqué la fin de chaque ligne. Si on prend l'exemple précédent la ligne sélectionnée est :

{0, 1, 9, 2, 3, 11, 5, 10, 6, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1} alors on a trois triangles les sommets de ces triangles sont situés dans les arrêtes numéro: 0, 1,9 _ 2, 3,11 _ 5, 10,6.

FaceArray :

```
{-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},
{0, 8, 3, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},
{0, 1, 9, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},
{1, 8, 3, 9, 8, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},
{1, 2, 10, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},
....}
```

Chaque valeur de l'index est une entrée de EdgeArray qui permet de déterminer toutes les arrêtes impliquées dans l'intersection. Cette valeur constitue également une entrée dans la table FaceArray permettant de déterminer quels triangles tracer, cette entrée donne une liste de points, se situant sur les arrêtes (points en blanc dans la Figure II.10) qui doivent être groupés trois par trois, pour constituer de tels triangles.

On prend la topologie 7 les trois sommets v2,v4 et v7 sont situés à l'intérieur de l'objet et tous les autres sommets sont à l'extérieur alors on créera trois facettes qui coupent le cube en 9 arrêtes : e₁, e₂, e₃, e₄, e₆, e₇, e₁₀, e₁₁, e₁₂. Les points d'intersection formant les sommets des triangles générés dépendent de la relation entre la valeur du seuil et celles associées aux sommets par une méthode d'interpolation linéaire.

L'interpolation linéaire, de manière générale, est le calcul approximatif d'une valeur inconnu en fonction de valeurs connus qui l'entourent dans un espace donné.

Dans le cadre de l'Algorithme de Marching Cubes l'interpolation intervient sur les arrêtes .en d'autre terme, la position d'un point de l'iso valeur sur une arrête est déterminer en interpolant entre les deux valeurs scalaires des extrémités des arrêtes .sur la Figure II.12 l'iso valeur est 10, avant l'interpolation le point A se trouve au milieu de l'arrête, Après l'interpolation le point A se trouve deux fois plus près de 9 que de 12.

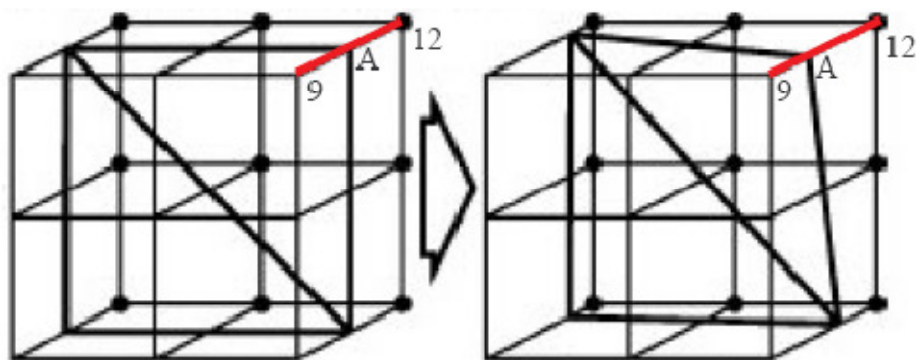


Figure II.12 : l'interpolation sur une arrête

II.9. Calcule des normales :

La valeur à chaque point du champ scalaire est aussi utilisée pour calculer le vecteur normal de l'iso-surface passant en ce point. Ce calcul est basé sur le gradient du champ. Il est donc possible d'interpoler ces valeurs le long de chaque arrête de chaque cube de façon à obtenir la normale des points sur la surface. L'interpolation permet

d'éviter un calcul analytique du gradient pour une position quelconque. Le calcul des normales permet l'ombrage de l'objet par la suite.

Pour ce faire nous allons calculer le vecteur gradient qui est orthogonale à la surface dans le point en considération.

$$\overrightarrow{grad}(F)(x, y, z) = \left(\frac{\partial F}{\partial x}(x, y, z), \frac{\partial F}{\partial y}(x, y, z), \frac{\partial F}{\partial z}(x, y, z) \right)$$

Ces dérivées partielles sont approximées au niveau de chaque sommet du cube par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x}(x, y, z) &= \frac{F(x+1, y, z) - F(x-1, y, z)}{2} \\ \frac{\partial F}{\partial y}(x, y, z) &= \frac{F(x, y+1, z) - F(x, y-1, z)}{2} \\ \frac{\partial F}{\partial z}(x, y, z) &= \frac{F(x, y, z+1) - F(x, y, z-1)}{2} \end{aligned}$$

Tel que $F(x, y, z)$ est la densité dans le point (x, y, z) .

II.10. L'algorithme complet de la reconstruction basée sur les Marching Cubes

L'algorithme des Marching cubes peut être décrit comme suit : [BELHADJ05]

Algorithme: Marching Cubes

- o **Entrées:** une séquence de **K coupes** bidimensionnelles éventuellement binaires
- o **Sorties :** un tableau contenant l'ensemble des sommets des triangles constituant le maillage triangulaire du volume reconstruit.

- Définir la taille du cube : TailleCube (**tCubeX**, **tCubeY**, **tCubeZ**)
- Déterminer le nombre de cubes dans la direction X d'une coupe : **nbCubesX**
- Déterminer le nombre de cubes dans la direction Y d'une coupe : **nbCubesY**
- Déterminer le nombre de cubes dans la direction Z de la séquence : **nbCubesZ**
- Définir la valeur iso-surface : **Seuil**
- Définir les tables **EdgeArray** et **FaceArray**
- **Mesh []**: tableau qui va contenir les sommets des triangles constituant le maillage
- **Pour** $k= 1$ à **nbCubesZ**
 - ◊ **Pour** $j= 1$ à **nbCubesY**
 - **Pour** $i= 1$ à **nbCubesX**
 - **Index** = Calculer l'index correspondant au huit sommet du Cube (i,j,k).
 - **ListeArrêtes** = Extraire la liste des arrêtes correspondantes à Index depuis la table **EdgeArray**.
 - **Pour** chaque arrête dans **ListeArrêtes**
 - Déterminer le point d'intersection de l'arrête avec la surface en calculant ces coordonnées par une méthode d'interpolation adéquate
 - En utilisant l'index comme entrée dans la table **FaceArray**, grouper ces points d'intersection pour générer les triangles.
 - Insérer ces points formant les triangles dans la table **Mesh**, suivant le sens des aiguilles de la montre par exemple.
 - Calculer les normales correspondant à chaque point d'intersection.
 - **FinPour_i**
 - ◊ **FinPour_j**
- **FinPour_k**

Pour une bonne visibilité des détails de la surface, une notion importante doit être prise en compte :

II.11. L'orientation de la réflexion de la lumière sur la surface.

L'aspect d'une facette est régi par le produit scalaire du vecteur d'éclairage et du vecteur normal. C'est ce produit qui va caractériser la façon dont la facette réfléchit la lumière et la façon dont on voit la facette.

En effet, deux triangles adjacents de la surface peuvent avoir des vecteurs normaux de directions très différentes. Dans ce cas, le rendu de la surface à cet endroit serait hors de toute continuité avec le reste (**Figures II.11 et II.12**).

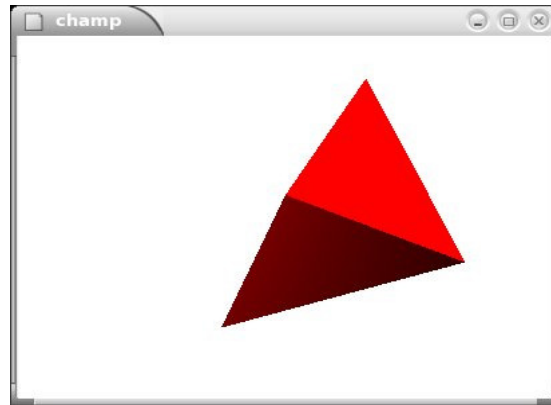


Figure II.13: sans normalisation [HG05]

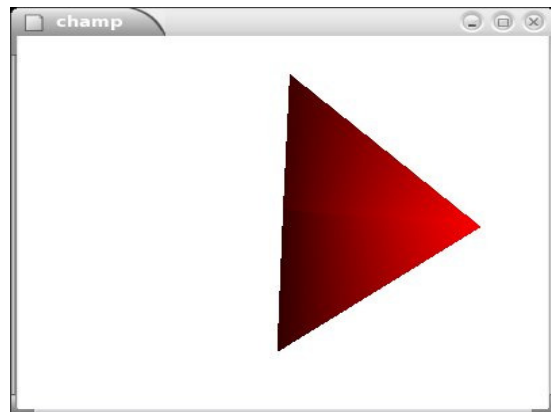


Figure II.14: avec normalisation [HG05]

C'est pourquoi il va falloir pour chaque triangle de la surface redéfinir la direction de réflexion de la lumière en fonction de celle des triangles voisins.

On choisit, pour un triangle, de faire la moyenne des directions des différents voisins. Ainsi, on obtient une surface avec un aspect plus uniforme.

- Exemple de représentation sans normalisation de la réflexion lumière :

Le fait que la lumière ne soit pas correctement réfléchi sur la surface implique qu'on ne peut absolument pas distinguer les détails de la surface de la sphère.

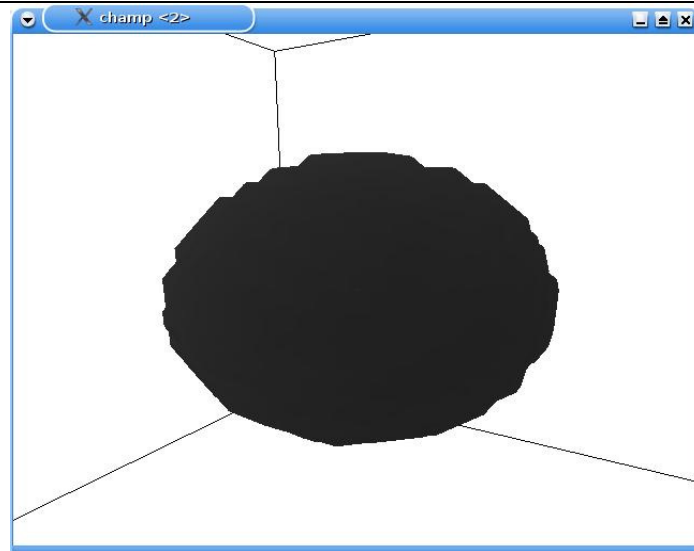


Figure II.15 : Exemple de représentation sans normaliser la réflexion de la lumière [HG05]

Exemple de représentation avec normalisation de la réflexion lumière :

Quand la lumière est correctement réfléchi, on aperçoit distinctement les détails de la surface, ainsi que l'intérieur de la sphère.

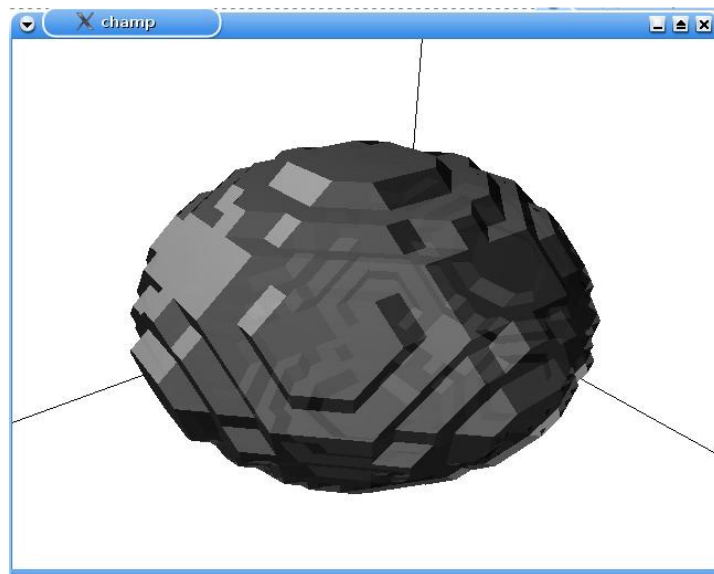


Figure II.16 : Exemple de représentation en normalisant la réflexion de la lumière [HG05]

II.12. Conclusion :

L'Algorithme de Marching cubes nous permis de reconstruire les objets 3D a pour bute de visualiser et modéliser l'objet à reconstruire. Dont le principe de l'algorithme est de subdiviser la grille 3D en un ensemble de cellules cubiques et essayer de résoudre les trois sous problèmes évoqués précédemment (chapitre I) dans un contexte local au cube.

CHAPITRE .III

Conception & Modélisation

III.1.Introduction

En informatique **UML** (de l'anglais Unified Modeling Language), ou Langage de modélisation unifié, est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes. Il est utilisé en développement logiciel, et en conception orientée objet. UML est couramment utilisé dans les projets logiciels.

UML est l'accomplissement de la fusion de précédents langages de modélisation objet : Booch, OMT, OOSE. Principalement issu des travaux de GradyBooch, James Rumbaugh et Ivar Jacobson, UML est à présent un standard défini par l'Object Management Group (OMG). La dernière version diffusée par l'OMG est UML 2.5 bêta 2 depuis septembre 2013.

III.2.. Points forts d'UML

- Sa notation graphique permet d'exprimer visuellement une solution objet, ce qui facilite la comparaison et l'évaluation de solutions.
- L'aspect formel de sa notation, limite les ambiguïtés et les incompréhensions.
- Son indépendance par rapport aux langages de programmation, aux domaines d'application et aux processus, en font un langage universel

III.3.Le formalisme d'UML

UML 2 propose 13 types de diagrammes (9 en UML 1.3). UML n'étant pas une méthode, leur utilisation est laissée à l'appréciation de chacun, même si le diagramme de classes est généralement considéré comme l'élément central d'UML ; des méthodologies, telles que l'Unified Process, axent elles l'analyse en tout premier lieu sur les diagrammes de cas d'utilisation (Use Case). De même, on peut se contenter de modéliser seulement partiellement un système, par exemple certaines parties critiques.

- UML se décompose en plusieurs sous-ensembles :
 - Les **vues** : Les vues sont les observables du système. Elles décrivent le système d'un point de vue donné, qui peut être organisationnel, dynamique, temporel, architectural, géographique, logique, etc. En combinant toutes ces vues il est possible de définir (ou retrouver) le système complet.
 - Les **diagrammes** : Les diagrammes sont des éléments graphiques. Ceux-ci décrivent le contenu des vues, qui sont des notions abstraites. Les diagrammes peuvent faire partie de plusieurs vues.
 - Les **modèles d'élément** : Les modèles d'élément sont les briques des diagrammes UML, ces modèles sont utilisés dans plusieurs types de diagramme. Exemple d'élément : cas d'utilisation (CU ou cadut'), classe, association, etc.

III.3.1.Mise en œuvre d'une démarche à l'aide d'UML : les vues

- Une façon de mettre en œuvre UML est de considérer différentes vu qui peuvent se superposer pour collaborer à la définition du système.

- Vue des **cas d'utilisation** : c'est la description du modèle "vue" par les acteurs du système. Elle correspond aux besoins attendus par chaque acteur (c'est le QUOI et le QUI).
- Vue **logique** : c'est la définition du système vu de l'intérieur. Elle explique comment peuvent être satisfaits les besoins des acteurs (c'est le COMMENT).
- Vue **d'implémentation** : cette vue définit les dépendances entre les modules.
- Vue des **processus** : c'est la vue temporelle et technique, qui met en œuvre les notions de tâches concurrentes, stimuli, contrôle, synchronisation, etc.
- Vue de **déploiement** : cette vue décrit la position géographique et l'architecture physique de chaque élément du système (c'est le OÙ).

III.3.2.Les diagrammes

Les **13** diagrammes UML sont dépendants hiérarchiquement et se complètent, de façon à permettre la modélisation d'un projet tout au long de son cycle de vie.

III.3.2.1.Diagrammes structurels ou statiques

Les diagrammes structurels ou statiques (Structure Diagram) rassemblent :

- Diagramme de classes: il représente les classes intervenant dans le système.
- Diagramme d'objets: il sert à représenter les instances de classes (objets) utilisées dans le système.
- Diagramme de composants: il permet de montrer les composants du système d'un point de vue physique, tels qu'ils sont mis en œuvre (fichiers, bibliothèques, bases de données...)
- Diagramme de déploiement: il sert à représenter les éléments matériels (ordinateurs, périphériques, réseaux, systèmes de stockage...) et la manière dont les composants du système sont répartis sur ces éléments matériels et interagissent avec eux.
- Diagramme des paquetages: un paquetage étant un conteneur logique permettant de regrouper et d'organiser les éléments dans le modèle UML, le Diagramme de paquetage sert à représenter les dépendances entre paquetages, c'est-à-dire les dépendances entre ensembles de définitions.
- Diagramme de structure composite (depuis UML 2.x.): permet de décrire sous forme de boîte blanche les relations entre composants d'une classe.

III.3.2.2.Diagrammes comportementaux

Les diagrammes comportementaux (BehaviorDiagram) rassemblent :

- Diagramme des cas d'utilisation (use-cases): il permet d'identifier les possibilités d'interaction entre le système et les acteurs (intervenants extérieurs au système), c'est-à-dire toutes les fonctionnalités que doit fournir le système.
- Diagramme états-transitions: permet de décrire sous forme de machine à états finis le comportement du système ou de ses composants.
- Diagramme d'activité: permet de décrire sous forme de flux ou d'enchaînement d'activités le comportement du système ou de ses composants.

III.3.2.3. Diagrammes d'interaction ou dynamiques

Les diagrammes d'interaction ou dynamiques rassemblent (Interaction Diagram) rassemblent :

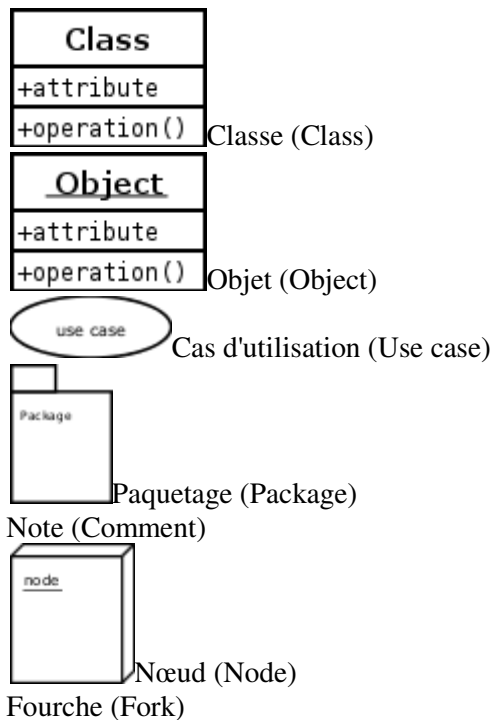
- Diagramme de séquence: représentation séquentielle du déroulement des traitements et des interactions entre les éléments du système et/ou de ses acteurs.
- Diagramme de communication (depuis UML 2.x) : représentation simplifiée d'un diagramme de séquence se concentrant sur les échanges de messages entre les objets.
- Diagramme global d'interaction (depuis UML 2.x) : permet de décrire les enchaînements possibles entre les scénarios préalablement identifiés sous forme de diagrammes de séquences (variante du diagramme d'activité).
- Diagramme de temps (depuis UML 2.x) : permet de décrire les variations d'une donnée au cours du temps.

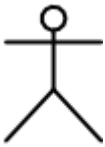
III.3.3. Les modèles d'éléments

- Le Stéréotype est une marque de généralisation notée par des guillemets, cela montre que l'objet est une variété d'un modèle.
- Le classeur est une annotation qui permet de regrouper des unités ayant le même comportement ou structure. Un classeur se représente par un rectangle conteneur, en traits pleins.
- Un paquetage regroupe des diagrammes ou des unités.
- Chaque classe ou objet se définit précisément avec le signe ":", ainsi l'identification d'une Classe X en dehors de son package ou de son classeur sera définie par "Package A::Classeur B::Classe X".



III.3.3.1. Les modèles d'éléments de type commun

Symbolique des modèles d'éléments:

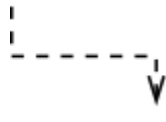




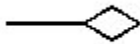
Actor Acteur (Actor)

-  État (State)
-  Activité (Activity)
- État initial (Initial state)
- État terminal (Final state)
- Interface
 - O<----- sens du flux de l'interface
 - O)----- est un raccourci pour la superposition de →O et O←

III.3.3.2. Les modèles d'éléments de type relation



- Dépendance (Dependency)
- Généralisation (Generalization)
- Association (Association)



- Agrégation (Agregation)



- Composition (Composition)
- Réalisation
- Utilisation

III.4. Standardisation et Certification UML

UML n'est pas un standard de fait mais un standard « industriel » de l'OMG au même titre que CORBA par exemple. Ceci étant, vu le succès initial de ce langage, il aurait pu tout aussi bien être simplement « standard de fait ». Depuis juillet 2005, la première version 2.* de UML est validée par l'OMG.

Par ailleurs, depuis 2003, l'OMG a mis en place un programme de certification à la pratique et la connaissance d'UML : OCUP (OMG Certified UML Professional), qui recouvre trois niveaux successifs de maîtrise.

Diagramme	étape du cycle en V
1. Diagramme de cas d'utilisation	Spécification, cahier des charges
2. Diagramme de séquence	

3. Diagramme d'activité (processus métiers)	
Conception Architecturale	4. Diagramme d'activité (cinématique et/ou processus applicatifs)
	5. Diagramme de classe
	6. Diagramme d'objet
	7. Diagramme de communication
	8. Diagramme de déploiement
	9. Diagramme de composant

Tableau III.1 : Exemple de séquence de création des diagrammes

III.5.Spécification des besoins :

Afin d’aboutir aux résultats appréciables du système de Reconstruction 3D à partir des coupes sériées, ce système doit répondre aux besoins suivants:

- La qualité de l’image reconstruite doit être bonne.
- Le temps de reconstruction doit être minimale
- L’utilisateur du système de reconstruction 3D doit avoir la possibilité de contrôler la qualité d’image et le temps de reconstruction.

III.5.1.Diagramme des cas d'utilisation :

Les diagrammes des cas d'utilisation identifient les fonctionnalités fournies par le système (cas d'utilisation), les utilisateurs qui interagissent avec le système (acteurs), et les interactions entre ces derniers.

Il représente les fonctions du système du point de vue de l'utilisateur. C'est l'un des premiers diagrammes qu'on utilise en analyse, car la simplicité de sa notation en fait un support de choix pour travailler avec l'utilisateur final .

L'unique acteur dans notre système est l'utilisateur (celui qui utilise le logiciel).il est défini comme suite :

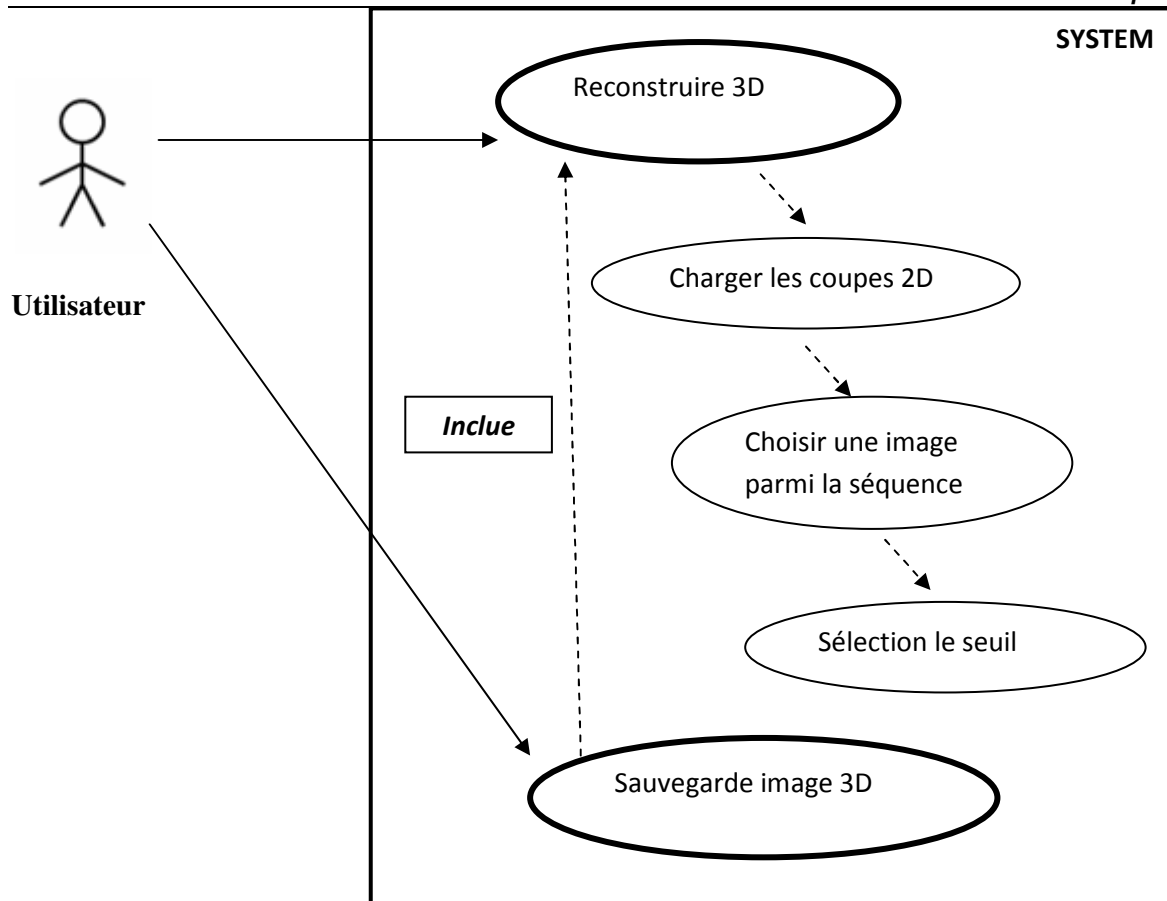


Figure III.2. Diagramme de cas d'utilisation

III.5.2. Description des cas d'utilisation (diagrammes des séquences) :

Nous avons décrit et élaborer les différents cas d'utilisations en même temps que les diagrammes des séquences.

- Reconstruire 3d
 - Charger les coupes 2D
 - Choisir une image parmi la séquence
 - Sélection le seuil
- ❖ Chargement les coupes 2d comporte les actions suivantes :
- L'utilisateur demande l'ouverture d'une séquence des coupes 2d.
 - Le système affiche une boîte de dialogue.
 - L'utilisateur choisit des images.
 - L'utilisateur valide son choix.
 - Le système ouvre les images.

La figure suivante (Figure 3.2) est une description du diagramme de séquence concernant ce cas d'utilisation :

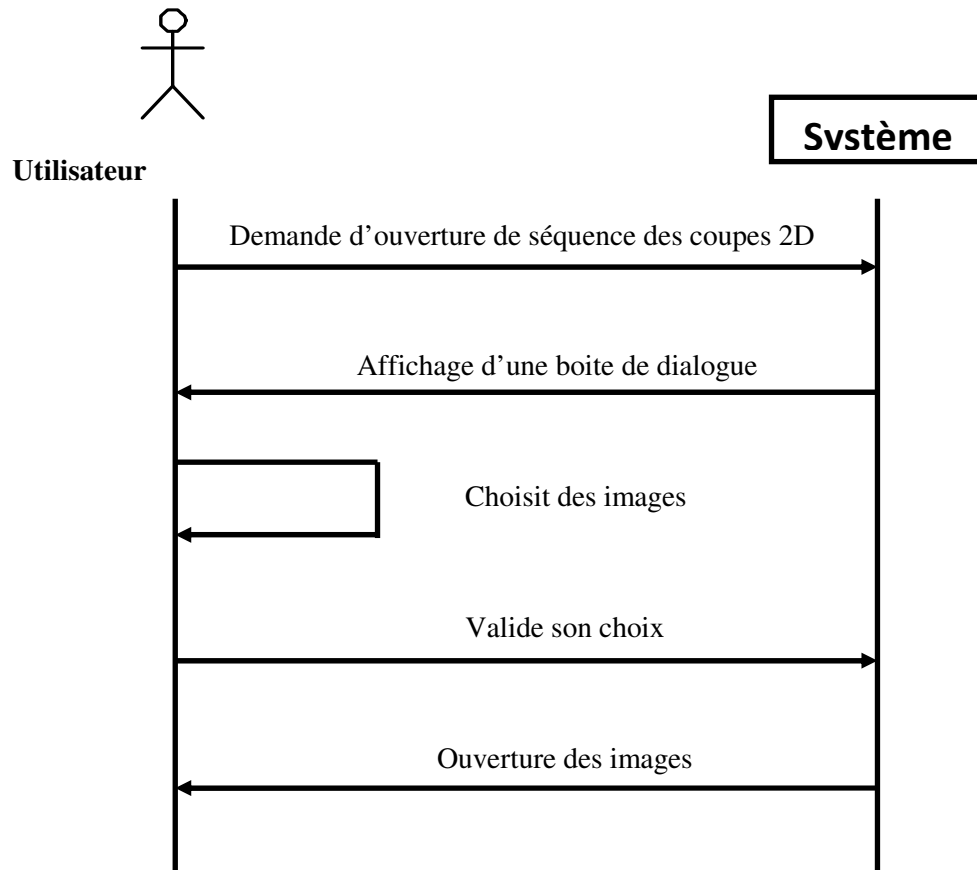


Figure III.3 : Diagramme de séquence « charger les coupes 2D ».

- ❖ Choisir une image parmi la séquence comporte les actions suivantes :
 - L'utilisateur fait la sélection d'une séquence 2D.
 - L'utilisateur sélectionne une image à partir des images chargées.
 - Le système affiche l'image sélectionnée.

La figure suivante (Figure 3.3) est une description du diagramme de séquence concernant ce cas d'utilisation :

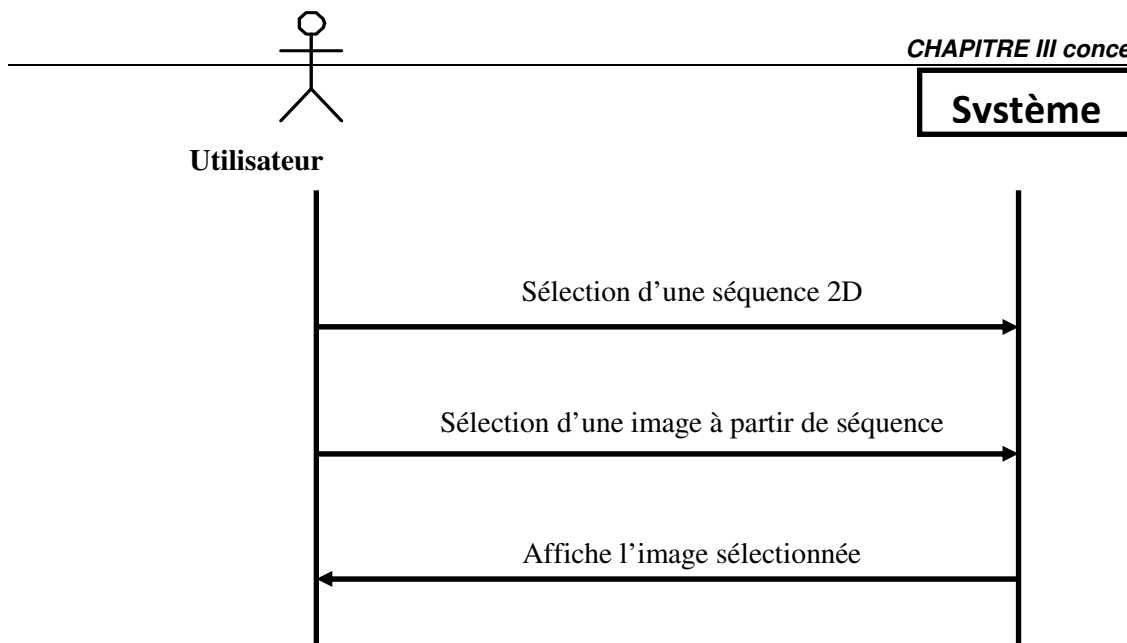


Figure III.4 : Diagramme de séquence « Choisir une image parmi la séquence ».

- ❖ La sélection d'un seuil comporte les actions suivantes :
 - L'utilisateur fait la sélection d'une image à partir d'une séquence.
 - L'utilisateur sélectionne un seuil à partir d'image sélectionnée.
 - Le système affiche la valeur de seuil sélectionnée.

La figure suivante (**Figure 3.4**) est une description du diagramme de séquence concernant ce cas d'utilisation :

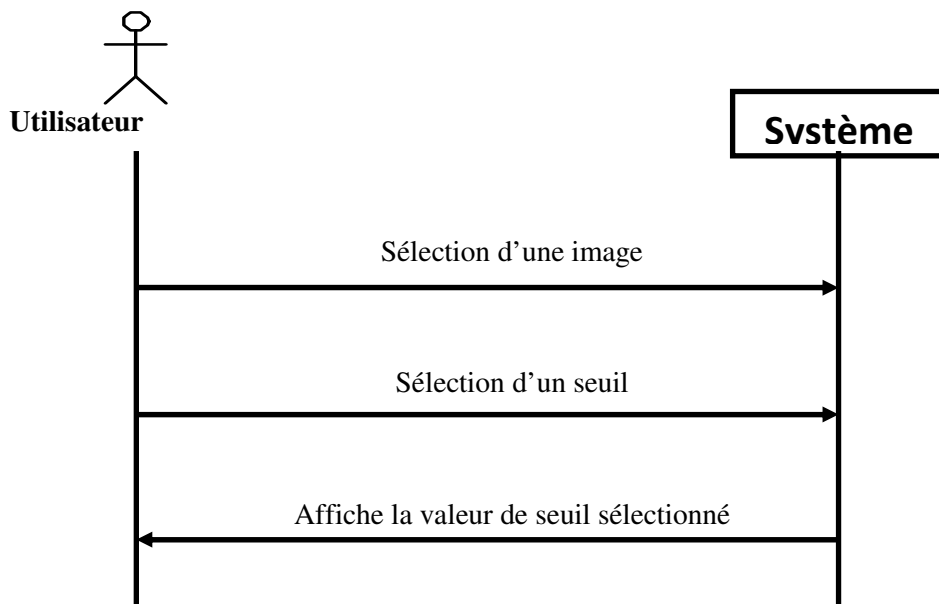


Figure III.5 : Diagramme de séquence « Sélection d'un seuil ».

- ❖ Reconstruire comporte les actions suivantes :
 - L'utilisateur fait la sélection d'un seuil.
 - L'utilisateur demande la reconstruction.
 - Le système fait la reconstruction.
 - Le système affiche l'image 3D reconstruite.

La figure suivante (**Figure 3.5**) est une description du diagramme de séquence concernant ce cas d'utilisation :

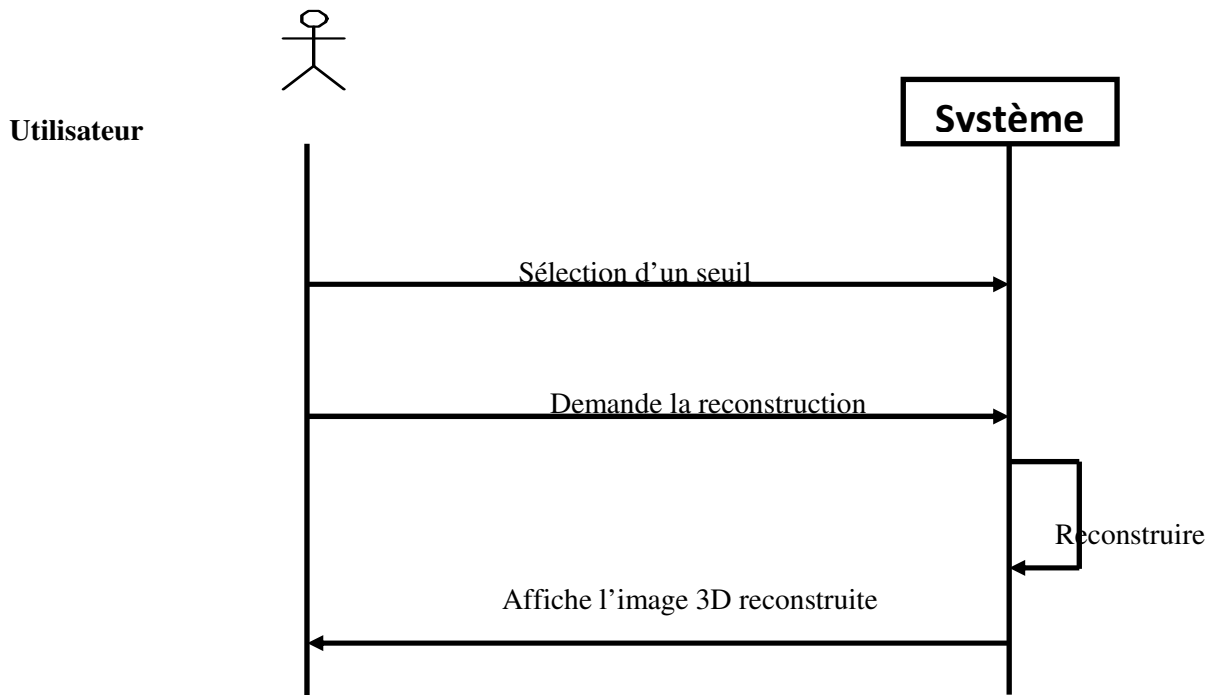


Figure III.6 : Diagramme de séquence « Reconstruire ».

❖ Sauvegarde d'une image 3D :

Ce cas d'utilisation comporte les actions suivantes :

- L'utilisateur fait la reconstruction.
- L'utilisateur demande la sauvegarde d'image 3D reconstruite.
- Le système affiche une boîte de dialogue.
- L'utilisateur choisit le chemin et le nom d'image.
- L'utilisateur valide son choix.
- Le système enregistre l'image.

La figure suivante (**Figure 3.6**) est une description du diagramme de séquence concernant ce cas d'utilisation :

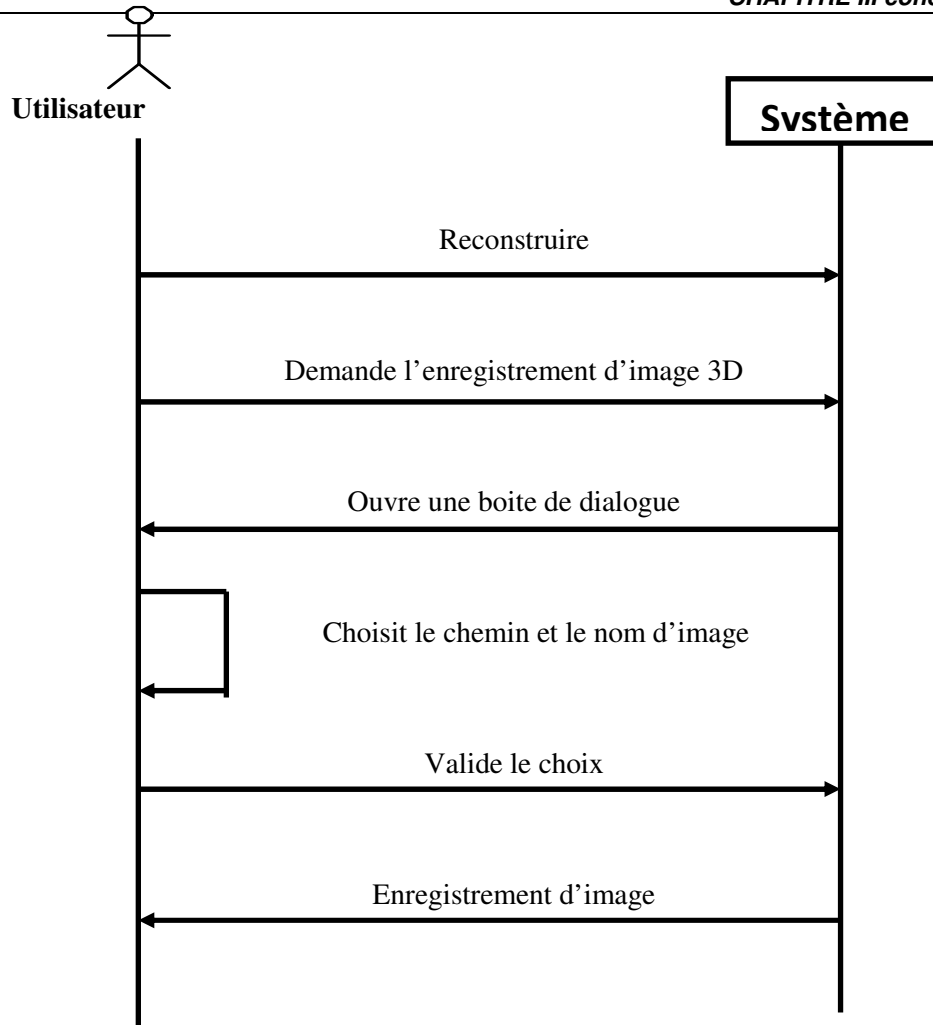


Figure III.7 : Diagramme de séquence « Sauvegarde d'image 3D».

III.5.3 Diagramme de classes :

le diagramme de classes et les relations entre elles sont définies comme suite :

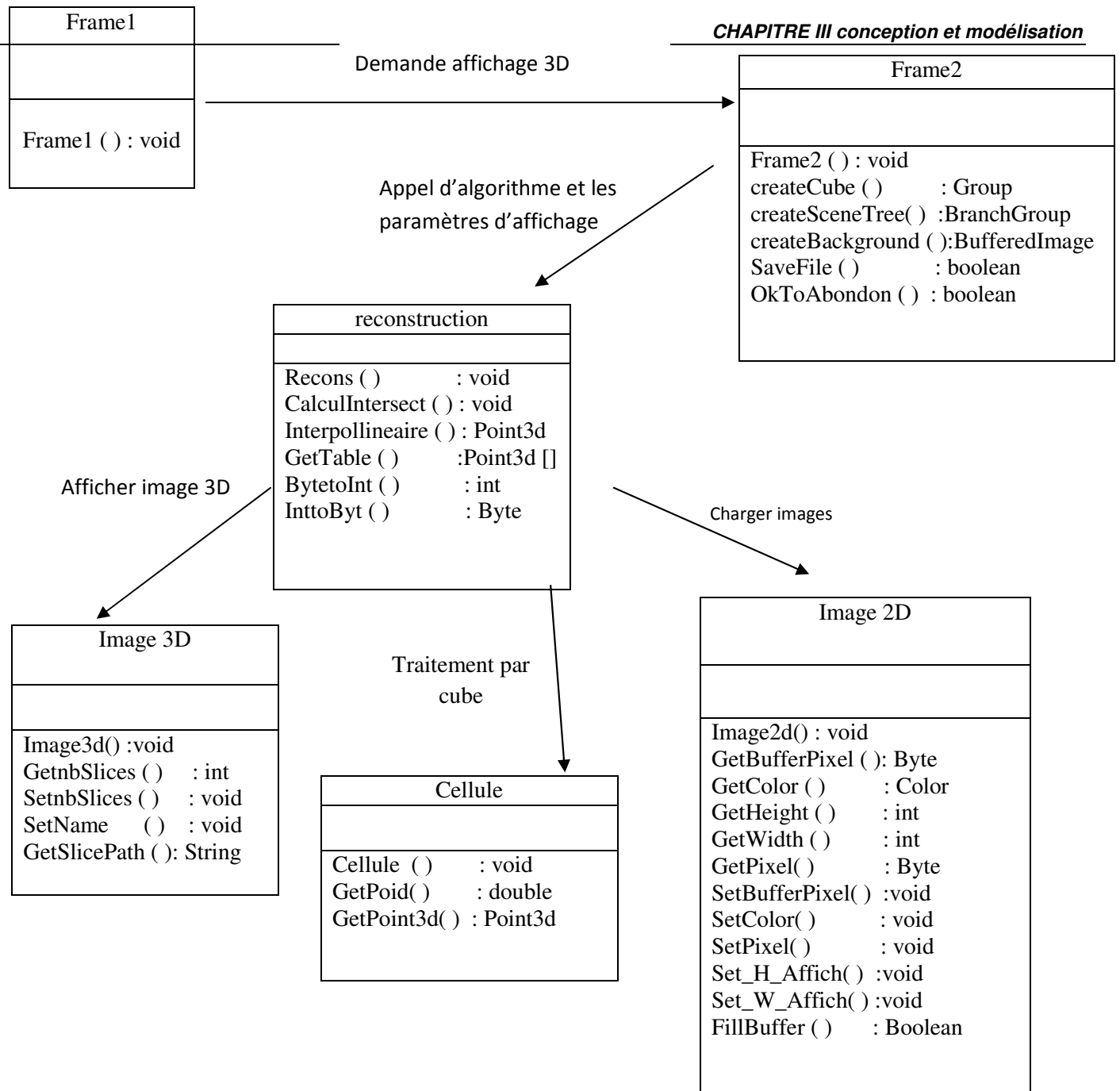


Figure III.8 : Diagramme de classes

III.9.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré la phase de conception et de modélisation à l'aide des diagrammes du langage UML. Ce dernier nous a aidé de bien comprendre les actions de la construction à l'aide de diagramme de cas d'utilisation , et de donner une vue sur l'interaction des données avec les diagrammes de séquence en tenant en compte le facteur de temps, et en fin nous avons présenté le diagramme de classe, et les interactions entre eux.

Dans ce qui suit, il sera présenté la concrétisation de cette solution avec son environnement de développement et les différents tests possibles sur l'application.

CHAPITRE IV

Implémentation et réalisation

Implémentation et réalisation

IV.1. Introduction

En fin nous y sommes arrivées, dans ce chapitre nous essayons de présenter dans la première partie l'environnement de développement sur lequel se repose notre système de la reconstruction 3D à partir des coupes séries 2D, et d'expliquer quelques techniques utilisées comme le Java. Puis on passe à la deuxième partie, dont on essaye de donner une vue générale sur les interfaces utilisateurs et les tests qu'on a réalisé pour notre plate-forme.

IV.2. Java

Le langage Java a été créé dans les années 90, par la firme Sun Microsystems, pour être fonctionnel au sein d'une architecture réseau de machines et de systèmes d'exploitation hétérogènes, car son implémentation se base sur le déploiement d'une machine virtuelle qui reste indépendante du support physique.

Java est un langage de programmation orienté objet d'utilisation simple très proche de C++ (la syntaxe représente une version améliorée de C++).

Il possède certaines caractéristiques qui nous ont amené à développer notre système, ces caractéristiques sont :

- **Portable** : Le compilateur Java génère le byte-code. Celui-ci constitue les instructions pour la machine virtuelle JVM, qui permet l'exécution du système d'édition collaboratif sur différents systèmes d'exploitation, et sur différentes machines.
- **Fiabilité et facilité**: les applications Java peuvent accéder au réseau avec la même facilité qu'elles accèdent au fichier local sur le système.
- **Simple** : Le code source en Java est simple. car les éléments tels que les pointeurs, l'héritage multiple ou la surcharge d'opérateurs sont autant de points complexes du langage C++ qui sont soit inexistants, Par ailleurs, la libération de mémoire est transparente pour l'utilisateur en Java et une meilleure gestion des erreurs a été implémentée.

- Java est multithread: l'utilisation d'un système de transmission des données sécurisé nécessite l'emploi d'un langage permettant la concurrence et le parallélisme. Ce langage doit aussi posséder un système de gestion de synchronisation (prêt à reprendre aux requêtes de l'utilisateur ou aux changements de son environnement); l'utilisation d'un langage multithreads s'avère nécessaire.

IV.3. JCreator

JCreator est un environnement de développement intégré (IDE) spécifique pour la programmation en Java, qui englobe sur la même application : éditeur, débogueur et compilateur. Il s'agit d'un des logiciels les plus puissants et efficaces qui existent, même comparé à JDeveloper, JBuilder, Eclipse ou Netbeans, car il est écrit uniquement en C++ et consomme moins de ressources.

IV.3.1. Caractéristiques de JAVA

- Gestion de projets et de gabarits.
- Auto-complétion de code.
- Éditeur en couleur pour les commandes.
- Débogueur.
- Interface personnalisable.
- Association de l'application avec les fichiers de l'espace de travail (.jcw), avec les fichiers de projet (.jcp), ou d'extension .java, .jsp ou .xml.

La possibilité de choisir le chemin d'accès de l'installation de Java Développement Kit (JDK) est un autre avantage de JCreator pour éviter de configurer à la main le path pour faire fonctionner l'application. L'application permet aussi d'indiquer la route de JDK Java Docs, pour permettre la consultation de toute la documentation officielle de Java.

pour mettre en œuvre notre application tout en s'aidant de java3D pour manipuler la 3D de notre application de reconstruction, les tests ont été faits en utilisant un ordinateur ayant un système d'exploitation Windows 7 32 bits avec CPU de vitesse de type i3(3110M) 2.4 GHz et un espace mémoire de 4GO.

IV.4. Les interfaces et les tests :

Les tests suivants mettent en œuvre uniquement la reconstruction 3D directe en utilisant l'Algorithme de Marching Cubes (sans faire une segmentation préalable).

La stratégie de test adoptée pour la reconstruction 3D porte sur les deux paramètres critiques de l'Algorithme de Marching Cubes : le seuil d'iso-surface et la taille du cube de parcours.

Les figures suivantes présentent les résultats d'application de l'Algorithme de Marching Cubes en mode segmentation-reconstruction sur quelques images médicales (jpg).

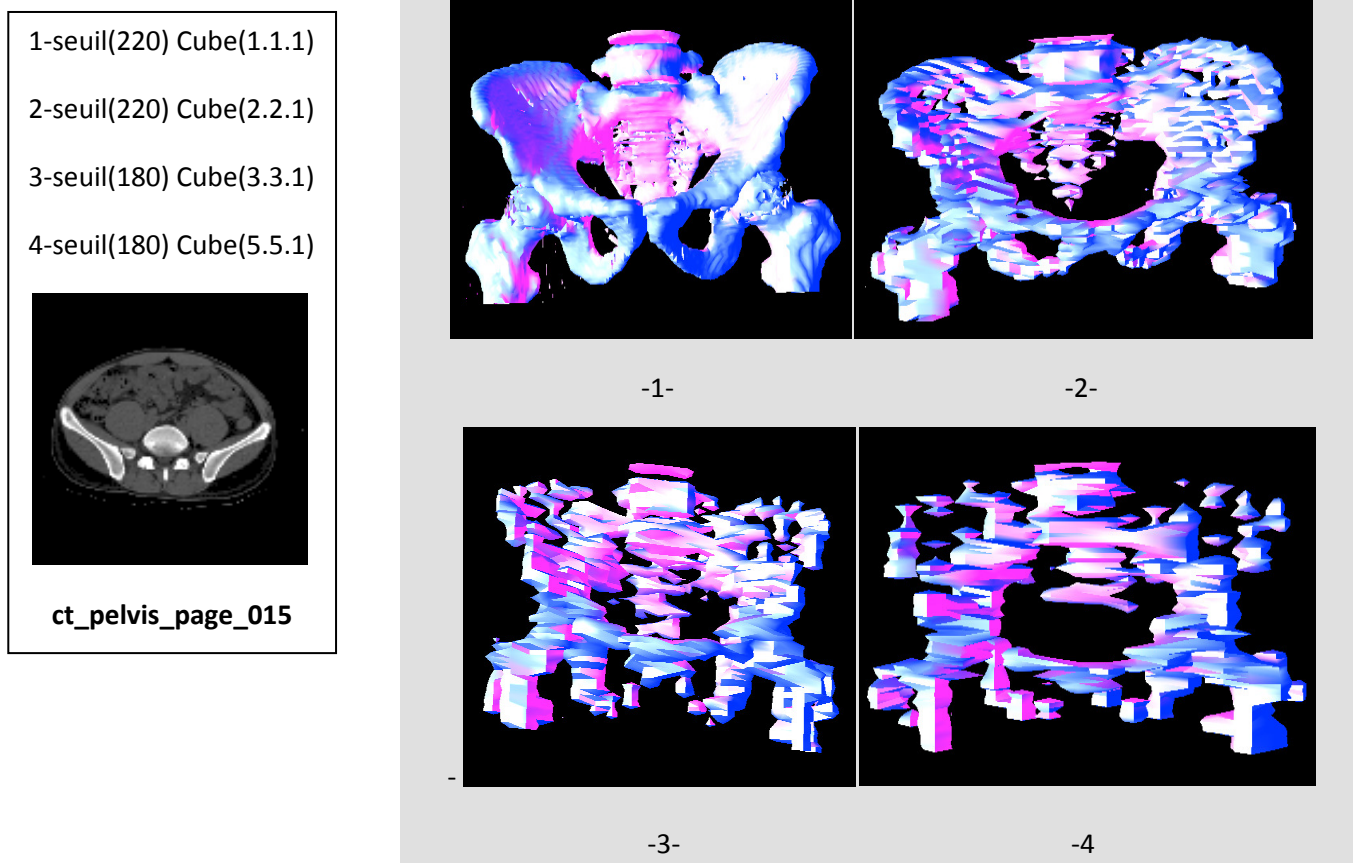


Figure IV.1. résultat de l'application pour différentes valeur de seuil et de taille du cube sur pelvis .

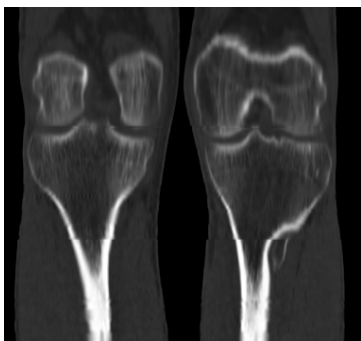
la figure suivante représente les testes sur le genou avec des valeur du seuil differentes

(5) seuil = 90, Cube = (1, 1,1)

(6) seuil = 90, Cube = (3, 3,1)

(7) seuil = 130, Cube = (1, 1,1)

(8) seuil = 130, Cube = (3, 3,1)



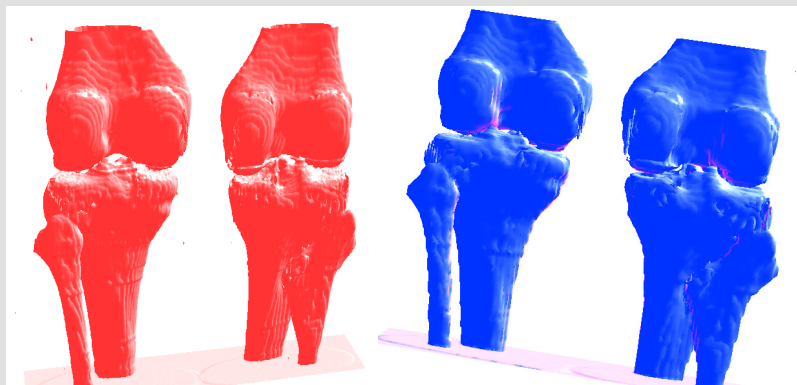
CT Knee



-5-



-6-



Une étude comparative en terme de l'influence de la taille du cube de parcours sur le nombre des triangles générés et aussi sur le temps total d'exécution de l'algorithme est portée sur les figures suivantes.

Les commentaires suivants peuvent être décelés :

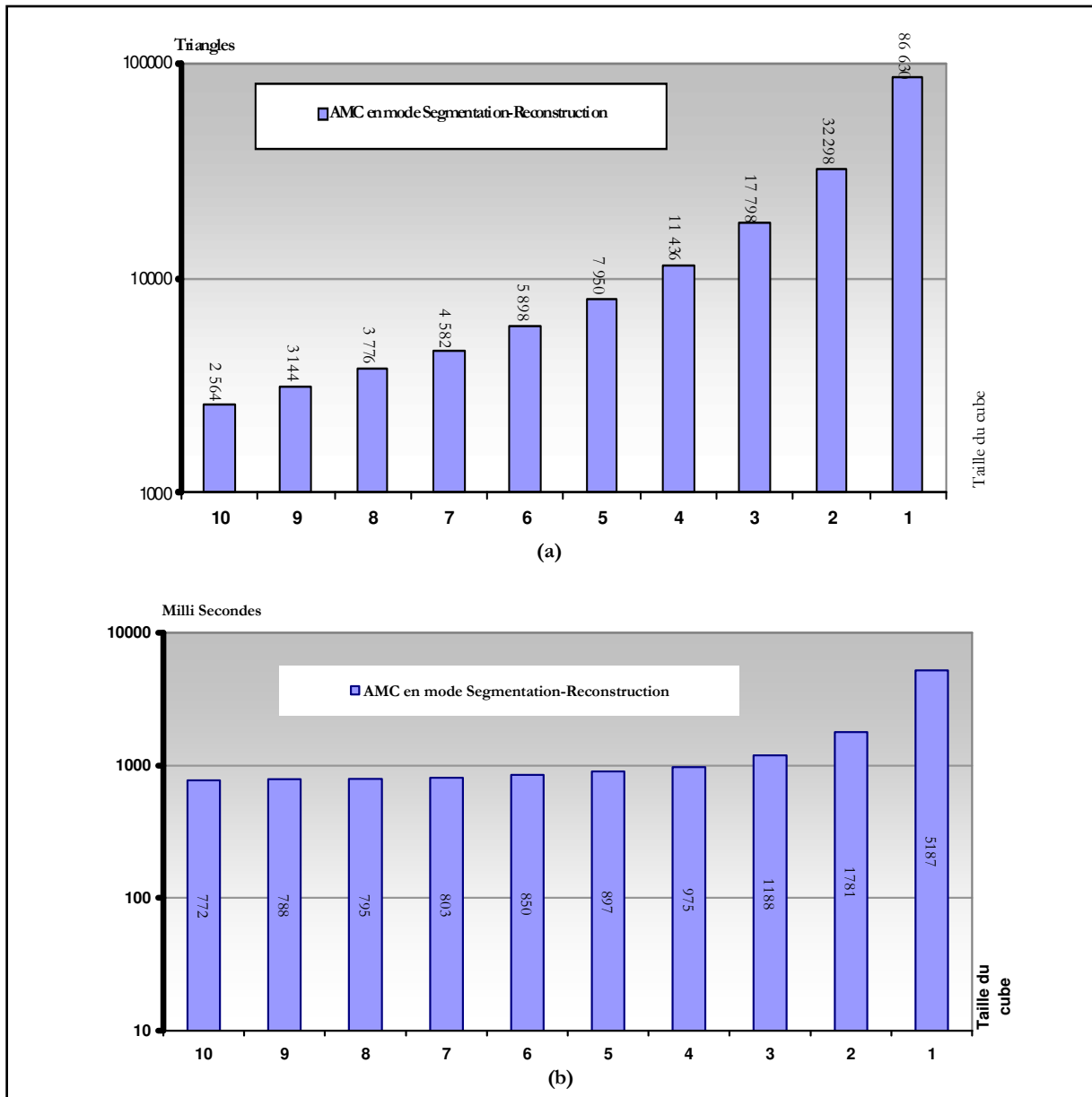


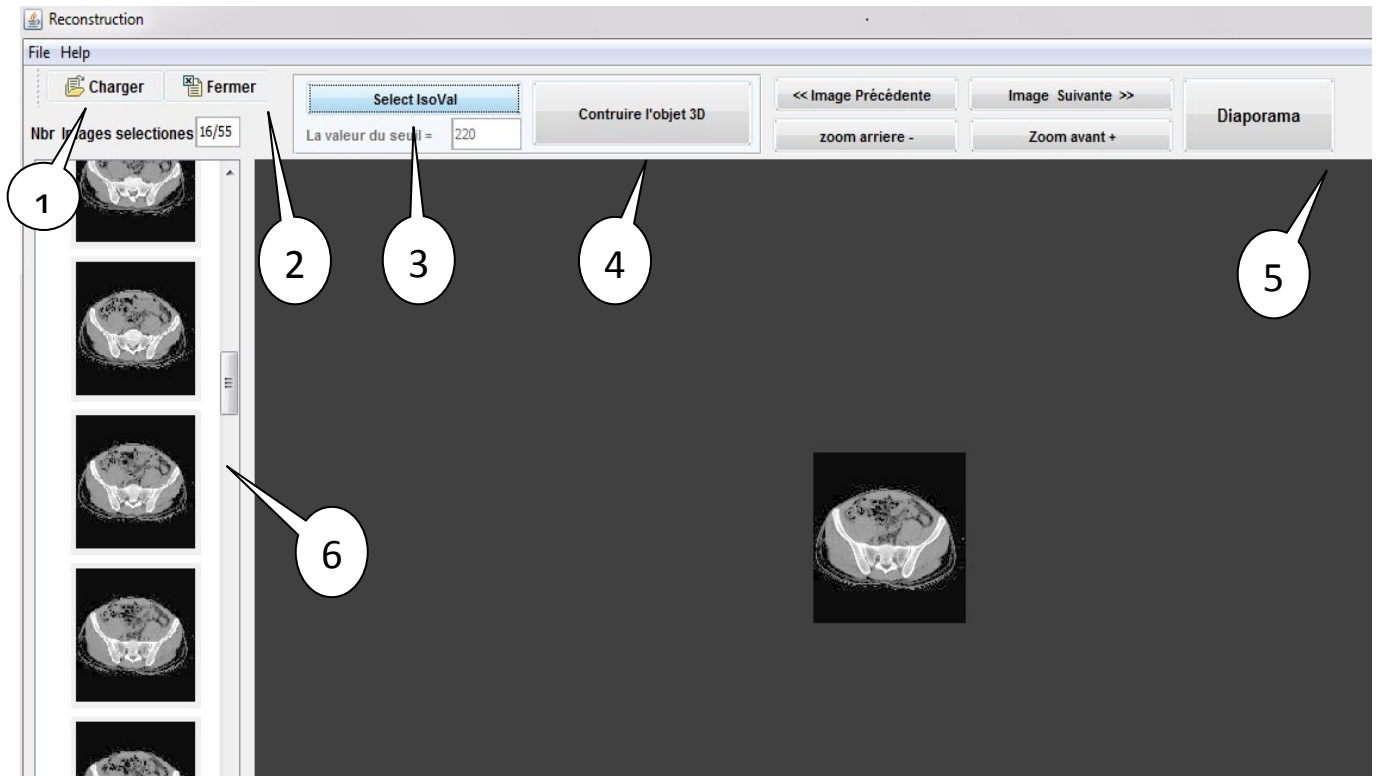
Figure IV.3 : l'influence de la taille du cube de parcours sur les deux paramètres critiques de reconstruction

- (a) Le développement du nombre de triangles générés en fonction de la taille du cube de parcours
- (b) Le temps de calcul consommé en fonction de la taille du cube de parcours

- 1- Le nombre de triangles générés suite à une reconstruction avec l'algorithme de Marching cubes est relativement inversif par rapport à la taille du cube.
- 2- Le temps d'exécution générés suite à une reconstruction avec l'algorithme de Marching cubes est relativement inversif par rapport à la taille du cube.

IV.5.Description De Logiciel

Lors de l'exécution du programme une interface principale s'affiche comme suite :



I **Figure IV.4.**Interface principale du system

- 1- **Charger** : permet de sélectionner l'ensemble de la séquence 2D.
- 2- **Fermer** : permet de fermer l'application.
- 3- **Selectisoval** : permet de donner la main pour sélectionner la valeur du seuil.
- 4- **Construire l'objet 3D** : permet d'afficher la deuxième interface pour la construction 3D.
- 5- **Diaporama** : permet d'afficher en mode séquence des coupes 2D.
- 6- Espace d'affichage des coupes 2D sélectionnées.

La deuxième interface qui s'affiche pour la construction 3D est définie comme suite :

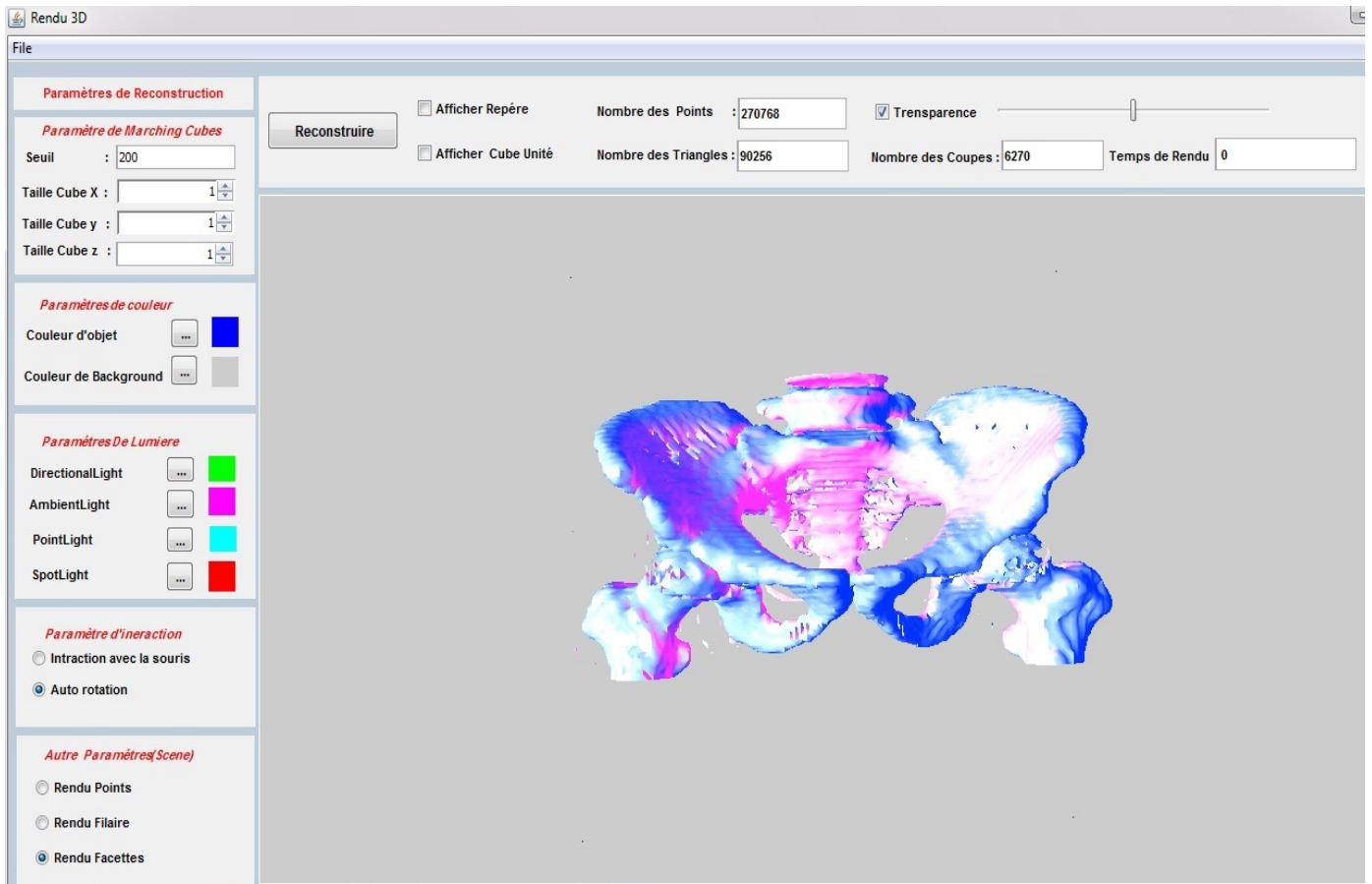
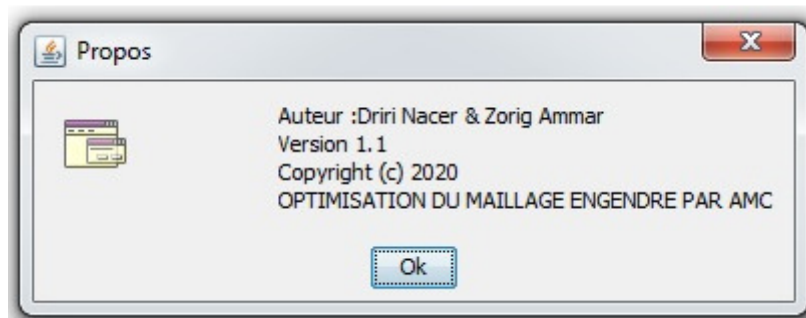


Figure IV.5.Interface pour la reconstruction 3D

Cette deuxième interface comporte tous les paramètres possible pour gérer l'objet 3D tel que : taille du cube(x.y.z) ,paramètres de couleur du l'objet ,les interaction du souris , le nombre du triangles gérée par l'algorithme et la transparence du objet 3D.

Une autre interface de propos s'affiche comme suite :



IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons implémenté une plate-forme pour la reconstruction 3D. Dans la réalisation de cette application nous avons essayé d'utiliser le maximum possible des nouvelles technologies, et avons essayé de les combiner pour aboutir à un produit plus performant.

Et enfin, nous ne pouvons couvrir tous les points de ce sujet. Ce travail donne la main à des jeunes intéressés pour le développer, ou plutôt pour faire des améliorations.

Conclusion général

CONCLUSION GENERALE

Les progrès technologiques récents en matière d'acquisition des images 3D ont permis d'envisager la mise au point de nouvelles techniques non destructives de diagnostic de l'état interne des corps.

Cependant, l'information 3D présentée consiste simplement en une séquence de coupes bidimensionnelles ne reflétant pas en réalité le vrai aspect tridimensionnel de l'objet, elles en donnent une vue restreinte et partielle. Bien qu'elles permettent une meilleure compréhension de la structure spatiale interne des objets, l'interprétation pratique des différentes images 2D est une tâche difficile et fastidieuse et doit tenir compte du biais liée au manque d'information engendré par la nature échantillonnée des coupes.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés par la problématique de reproduction de l'information 3D à partir de ces données bidimensionnelles pour construire un modèle 3D se rapprochant de l'objet initial dans ses propriétés et comportements. Problème, largement évoqué dans des applications militaires, industrielles, scientifiques et surtout médicales, connu sous la nomination de reconstruction 3D à partir de coupes sériées.

Nous avons proposé un système général de reconstruction 3D à partir de coupes sériées dont les principaux maillons sont la génération du modèle 3D et la visualisation.

Nous avons essayé de prendre en charge dans le cadre de ce travail les aspects conception et réalisation d'une première maquette.

La réalisation de ce travail nous a permis d'enrichir nos connaissances en informatique, notamment dans les domaines suivants :

- ✓ La programmation JAVA.
- ✓ La modélisation en UML.
- ✓ La construction des applications sur le domaine de traitement d'image 3D

Nous restons satisfaits du sujet traité, c'est une expérience réelle par laquelle nous avons acquis beaucoup de connaissances dans le domaine 3D.

Cependant, il est évident que plusieurs améliorations restent à faire pour aboutir à une plate-forme du système de construction 3D parfaite. Notre plate-forme est peut être contaminée par des erreurs, et nous souhaitons qu'il y aura d'autre personne pour finir ce que nous avons débuté.

Références bibliographiques et webographie

Bibliographie

- [DONNEL.01]** LAUREN O'DONNELL. Semi-Automatic Medical Image Segmentation, master thesis ,Massachusetts Institute Of Technology - October 2001
- [ROBB.00]** RICHARD A. ROBB. Three-Dimensional Visualization In Medicine And Biology. Book Chapter in Handbook of Medical Imaging: Processing and Analysis, Chapter 42, pp. 685-712, 2000.
- [SERRE.02]** T. SERRE, C. BRUNET, S. BIDAL, M. BEHR, S.-E. GHANNOUCHI, L. CHABERT, F. DURAND, C.CAVALLERO ET J. BONNOIT. L'homme Assis : Acquisition Géométrique et Reconstruction3D. Journal of Clinical Anatomy - Volume 24, Numéro 6, 2002
- [BROWN.96]** IAIN M. BROWN - MALCOLM J. HERBER T, KNOWLEDGE BASED GEOLOGICAL VISUALISATION USING AVS PROCEEDINGS OF GIG CONFERENCE ON GEOLOGICAL VISUALISATION - THE INTELLIGENT PICTURE. BRITISH GEOLOGICAL SURVEY- OCTOBER 1996
- [CODY.02]** DIANNA D. CODY. AAPM/RSNA Physics Tutorial For Residents:Topics In CT Image Processing In CT1 ; radiographics 2002 ; 22 : 1255-1268
- [ROLLAND.91]** FRANCK ROLLAND, REPRESENTATION TRIDIMENSIONNELLE ET RECONSTRUCTION 3D A PARTIR DE COUPES 2D. THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER GRENOBLE I – SEPTEMBRE 1991
- [UDUPA.99]** JAYARAM K. UDUPA THREE DIMENSIONAL VISUALIZATION AND ANALYSIS METHODOLOGIES : A CURRENT PERSPECTIVE; RADIOGRAPHICS 1999 ; 19 : 783-806
- [BARILLOT.99]** CHRISTIAN BARILLOT. FUSION DE DONNEES ET IMAGERIE 3D EN MEDECINE. THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE RENNES 1- 1999.
- [BOISS.88]** J. D. BOISSONNAT, SHAPE RECONSTRUCTION FROM PLANAR CROSS SECTIONS COMPUTER VISION, GRAPHICS, AND IMAGE PROCESSING, VOL. 44, PP. 1-29, 1988.
- [GEIGER.93]** B. GEIGER, THREE DIMENSION A MODELLING OF HUMAN ORGANS AND ITS APPLICATION TO DIAGNOSIS AND SURGICAL PLANNING. INRIA RAPPORTS DE RECHERCHE, NO. 2105, 1993. DISPONIBLE SUR :[HTTP://WWW.INRIA.FR/RRRT/PUBLICATIONS-ENG.HTML](http://www.inria.fr/RRRT/PUBLICATIONS-ENG.HTML).
- [AYACHE.98]** NICHOLAS AYACHE. L'ANALYSE AUTOMATIQUE DES IMAGES MEDICALES :ETAT DE L'ART ET PERSPECTIVES. RAPPORT DE RECHERCHE N° 3364- PROJET EPIDAURE – INRIA – FEVRIER 1998.
- [LEBRAS.04]** ANTHONY LE BRAS, EXPLORATION DES POTENTIALITES DU SYSTEME EOS POUR LA CARACTERISATION MECANIQUE DES STRUCTURES OSSEUSES : APPLICATION A L'EXTREME SUPERIEURE DU FEMUR. THESE DE DOCTORAT DE L'ECOLENATIONALE SUPERIEURE D'ARTS ET METIERS – 2004.
- [JAILLET.99]** FABRICE JAILLET, CONTRIBUTION A LA RECONSTRUCTION ET A L'ANIMATION D'OBJETS DEFORMABLES DEFINIS A PARTIR DE DONNEES STRUCTUREES EN SECTIONS. THÈSE DE DOCTORAT UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1 – 1999
- [TIGG.02]** R. VAN TIGGELEN, Historical Article In Search For The Third Dimension: From Radiostereoscopy To Three-Dimensional Imaging. JBR–BTR, 2002, 85: 266-270.
- [DANCE.97]** C.R. DANCE AND R. W. PRAGER. DELAUNAY RECONSTRUCTION FROM MULTIAXIAL PLANAR CROSS-SECTIONS. RESEARCH REPORT N° CUED/F-INFENEG /TR 273 - 1997
- [NULLA.98]** STEPHANE NULLANS, Reconstruction Géométrique De Formes : Application A La Géologie. Thèse de doctorat , Université de Nice-Sophia Antipolis – 1998.
- [BG.92]** JEAN DANIEL BOISSONNAT AND BERNHARD GEIGER. Three Dimensional Reconstruction Of Complex Shapes Based On The Delaunay Triangulation. Research report N° 1697, INRIA Sophia Antipolis – 1992.
- [ARCHIP.02]** NECULAI ARCHIP AND ROBERT ROHLING, 3D Volumetric Reconstruction Of Organs. Technical report N° UBC-ECE-TR 001 – University of British Columbia – November 2002
- [LORENS.87]** WILIAM E. LORENSEN AND HARVEY E. CLINE. Marching Cubes: A High Resolution 3dSurface Reconstruction Algorithm. Computer Graphics, 21(4), 163-167; July 1987.

- [BULL.99]** DAVID WILLIAM BULLOCK, COMPUTER ASSISTED 3D CRANIOFACIAL RECONSTRUCTION. MASTER THESIS ,UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA – OCTOBER 1999
- [ARCH.97]** KATRINA MARIE ARCHER, Craniofacial Reconstruction Using Hierarchical B-Spline Interpolation, Master thesis ,University of British Columbia – October 1997
- [FIALA.05]** J. C. FIALA, Reconstruct : A Free Editor For Serial Section Microscopy. Journal of Microscopy, Vol. 218, Pt 1 April 2005, pp. 52–61.
- [LEBRAS.04]** Anthony LE BRAS, Exploration Des Potentialités Du Système EOS Pour La Caractérisation Mécanique Des Structures Osseuses : Application A L'extrémité Supérieure du Fémur. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – 2004.
- [FETITA.00]** CATALIN IULIAN FETITA, Analyse Morpho-fonctionnelle Des Voies Aériennes En TDM Spiralee Volumique. Thèse de doctorat, Université RENE DESCARTES - PARIS V - 2000
- [DELING.05]** HERVE DELINGETTE AND NICHOLAS AYACHE. Hepatic Surgical Simulation. Communications of the ACM, February 2005/Vol. 48, No. 2 ;31-36.
- [ALTAN.03]** ALTAN O. AND DOGAN S., 3D Modeling Of Human Face And Brain By Using CT, MR And Digital Images For Finding Abnormalities. Optical 3D Measurement Techniques VI, Zurich, Switzerland, Vol. I, pp. 148-155. – 2003.
- [VERB.99]** FONS J. VERBEEK, KIRSTIE A. LAWSON AND JONATHAN B.L. BARD. Development al bio-informatics : linking genetic data to virtual embryos. Int. J. Dev. Biol. 43 : 761-771 -1999
- [MISTRY.98]** CYRUS J. MISTRY, Two Dimensional Assembly Of Images And Three Dimensional Reconstruction Of Prostate Structure To Examine Disease Progression. Master thesis; Johns Hopkins University, Baltimore 1998
- [CHOW.98]** SEELING CHOW. Finite Element Decomposition Of The Human Neocortex. Master Thesis -Office of Graduate Studies of Texas A&M University– 1998
- [DA.02]** TRAN KAI FRANK DA. L'Interpolation De Formes. Thèse de doctorat, Université de Nice – Sophia Antipolis - 2002
- [BUR.00]** J. BURGUET et Remy MALGOUYRES. Strongthinning and polyhedrization of the surface of a voxel object. Springer Verlag, editeur, DGCI'00, volume 1953 de Lect. Notes. of Comp. Sci., pages 222–234, Decembre 2000
- [BOU.94]** Paul BOURKE, "Polygonising a Scalar Field".1994.
- [BEL05]** FOUJIL BELHADJ. Reconstruction Tridimensionnelle A Partir De Coupes Sériées Application Aux Images Médicales.2005

Références Web

- CCM** : <http://www.CommentCaMarche.net>
- Code source** : <http://www.codes-sources.com>
- Cours UML**: <http://www.UML.fr>
- Developpez** : <http://www.developpez.com>
- Java web site** : <http://www.javasoft.com>
- Jbuilder** : <http://www.borland.com>
- Wikipedia** : <http://fr.wikipedia.org>