



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان
UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID -TLEMCE



Faculté des Sciences

Département d'INFORMATIQUE

Mémoire présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de
Master 2 académique

Spécialité : *Modèle Intelligence et de Décision « MID »*

THEME :

***DECOMPOSITION D'OBJETS 3D COMPOSES DE
MAILLES TRIANGULAIRES***

Réalisé par :

- YAHIAOUI FAIZA
- ZENNAKI NIHED
-

Présenté le 24/10/2024 devant le jury compose de MM.

- Benamar abdkarim
- Benziane Mohamed yaghmouracene
- Iles nawel

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2023-2024

Remerciements

On tient à la fin de ce travail à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là Malgré les circonstances difficiles auxquelles nous avons été confrontés.

En préambule à ce mémoire, on souhaitait adresser nos remerciements les plus sincères aux professeurs qui nous ont étudiés durant notre parcours académique et aux personnes qui nous ont apporté leurs aides et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

On tient à remercier sincèrement notre encadreur Mr YAGHMORASAN MOHAMED BENZIAN, d'avoir accepté de nous encadrer, proposer notre thème et nous avoir guidé tout au long de notre projet de master par ses précieuses directives, pour sa confiance et sa gentillesse, sa disponibilité ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer.

On exprime également nos gratitude à nos examinateurs, qui vont nous honorer en évaluant ce travail.

Par la même occasion, nous tenons à remercier les responsables administratifs pour nous avoir accueillies chaleureusement au sein de leur structure.

Faïza et nihad



Dédicaces

A mes très chers parents

*Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous avez
fait pour moi.*

*Je ferai de mon mieux pour rester un sujet de fierté à vos yeux avec
l'espoir de ne jamais vous décevoir.*

*Que ce modeste travail, soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et
de*

Vos prières quotidiennes.

A mes très chers Sœurs

A mon très cher frère

A mes très chère mohamed

En souvenir de nos éclats de rire, des bons moments et nuits blanches.

En souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble.

J'espère de tout mon cœur

*Que notre amitié durera
éternellement.*

faïza



Dédicaces

A mes très chers parents

*Je vous présente cette note en gage de ma profonde gratitude et de mon
amour pour le soutien et les efforts que vous avez déployés.*

Je ferai de mon mieux pour que vous soyez tous les deux fiers de moi.

Pour mes merveilleux frères et sœurs

Vous êtes la pierre angulaire de ma vie.

À mon meilleur ami

Merci pour les moments et les souvenirs que nous avons créés ensemble.

Nihed

Table des matières

Liste des Figures.....	I
Liste des Tables.....	II
Liste des Abréviations.....	III
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Modélisation d'objets 3D	4
1. Introduction	5
2. Définition de la modélisation 3D	5
2.1. Une histoire de la modélisation 3D	5
2.2. Définition	5
2.3. Avantages	7
2.4. Inconvénients	7
2.5. La modélisation 3D aujourd'hui	7
3. Différents modes de modélisation géométrique	9
3.1. La modélisation frontière	9
3.2. Les modélisations surfaciques	11
3.3. Les modélisations volumiques	14
4. Différents logiciel de modélisation 3D	18
4.1. Les principaux logiciels de modélisation 3D pour les jeux vidéo, le cinéma, la télévision et les effets visuels	18
4.2. Les principaux logiciels de modélisation 3D pour le design industriel et la conception de produits	20
4.3. Les principaux logiciels de modélisation 3D pour l'architecture et la construction	23
5. Conclusion	25
Chapitre 2 : Maillage Triangulaire	26
1. Introduction	27
2. Utilisation d'un maillage triangulaire	27
3. Définition et caractérisation d'un maillage triangulaire	27
3.1. Définition et caractéristiques d'un maillage	27
3.2. Définition d'un maillage triangulaire	28
4. Méthodes de génération des maillages de surfaces 3D	30
4.1. Méthode de Hoppe	30

4.2. Approche basée sur le diagramme de Voronoi	31
5. Adaptation de maillages	32
5.1. Raffinement	32
5.2. Déplacements de nœuds	32
5.3. Simplification de maillage	33
6. Format d'objets 3D	33
6.1. Les différents formats des objets 3D	34
7. Conclusion	36
Chapitre 3 : Segmentation d'objets 3D	37
1. Introduction	38
2. Définition de la segmentation	38
3. Méthodes de segmentation	39
3.1. Segmentation de maillages triangulaires et rectification directionnelle de frontières basées sur les tenseurs de courbure	39
3.2. Ligne de Partage des Eaux (LPE)	41
3.3. Croissance de régions	47
3.4. Système Multi-Agents	48
4. Conclusion	49
Chapitre 4 : L'implémentation Du Projet	50
1. Introduction	51
2. Choix techniques	51
2.1. Le langage de programmation	51
2.2. L'environnement de développement	51
2.3. Organigramme de la méthode de l'implémentation	53
3. Fonctionnement du logiciel	
4. Résultats expérimentaux	
5. Conclusion	
Conclusion générale.....	
Bibliographie & Webographie.....	

Résumé

Tout au long de notre projet de fin d'études sur la "DECOMPOSITION D'OBJETS 3D COMPOSES DE MAILLES TRIANGULAIRES", nous avons mis en pratique nos connaissances universitaires. Ce projet a permis d'explorer l'importance des objets 3D dans les applications modernes, visant à aider les machines à percevoir et à détecter, souvent pour remplacer l'homme. Nous avons acquis des compétences en langages anciens comme Java et découvert des bibliothèques comme VTK, ainsi que des compétences en segmentation. Parmi les améliorations envisagées, nous souhaitons développer un algorithme de croissance de régions et réduire le graphe d'adjacence. Cette expérience a enrichi nos connaissances et nous espérons que notre rapport sera utile pour les futurs étudiants. Pour l'avenir, nous souhaitons élargir notre projet en utilisant Android, Mac et Linux.

Mots clé : Décomposition d'objets 3D , Maillages triangulaires, Segmentation

ملخص

طوال فترة إعداد مشروع تخرجنا حول "تحليل الأجسام ثلاثية الأبعاد المكونة من شبكات مثلثية"، حاولنا تطبيق المعارف التي اكتسبناها خلال دراستنا الجامعية. سمح لنا هذا المشروع باستكشاف أهمية الأجسام ثلاثية الأبعاد في التطبيقات الحديثة، والتي تهدف إلى مساعدة الآلات على الرؤية والاكتشاف، وغالبًا لاستبدال الإنسان. اكتسبنا مهارات في لغات برمجة قديمة مثل جافا، وتعرفنا على مكتبات جديدة مثل VTK، بالإضافة إلى مهارات في التقسيم. من بين التحسينات المقترحة، نرغب في تطوير خوارزمية لنمو المناطق وتقليل رسم الجوار. كانت هذه التجربة مفيدة لنا، ونأمل أن يكون تقريرنا مفيدًا للطلاب القادمين. في المستقبل، نرغب في توسيع مشروعنا ليشمل استخدام أندرويد، وماك ولينكس.

الكلمات المفتاحية : تحليل الأجسام ثلاثية الأبعاد ، الشبكات المثلثية ، تقسيم

Abstract

Throughout our final project on "DECOMPOSITION OF 3D OBJECTS COMPOSED OF TRIANGULAR MESHES," we aimed to apply the knowledge gained during our studies. This project allowed us to explore the importance of 3D objects in modern applications, which aim to enable machines to see and detect, often to assist or replace humans. We developed skills in older programming languages like Java and learned new libraries such as VTK, as well as solid competencies in segmentation. Among the proposed improvements, we aim to implement a region growth algorithm and reduce the adjacency graph. This experience has been beneficial, enriching our knowledge, and we hope our report will be useful for future students. Looking ahead, we wish to expand our project to include Android, Mac, and Linux.

Key Words : Decomposition of 3D objects, Triangular meshes , Segmentation

Liste des figures

Chapitre 1 : Modélisation d'objets 3D

Figure 1.1 : Représentation fil de fer d'un même objet en plusieurs interprétations	10
Figure 1.2 : Ambiguïté de modèle en fil de fer	10
Figure 1.3 : Le modèle Brep	11
Figure 1.4 : Modélisation surfacique avec plusieurs points	12
Figure 1.5 : Modélisation surfacique avec peu de points	12
Figure 1.6 : Une courbe de Bézier cubique avec les points de contrôle P0, P3	12
Figure 1.7 : Courbe B-splin cubique	13
Figure 1.8 : Surface B-splin cubique	13
Figure 1.9 : Exemple de modélisation par énumération spatiale et arbre octal	15
Figure 1.10 : Exemple de construction d'un objet et de son arbre CSG associé	16
Figure 1.11 : Autodesk Maya	19
Figure 1.12 : Blender	19
Figure 1.13 : 3D Studio Max	20
Figure 1.14 : SolidWorks	21
Figure 1.15 : Inventor	22
Figure 1.16 : Fusion	22
Figure 1.17 : AutoCad	23
Figure 1.18 : SketchUp	24
Figure 1.19 : Rhinoceros	24

Chapitre 2 : Maillage Triangulaire

Figure 2.1 : La géométrie surfacique du David maillée par des triangles, des quadrangles et des polygones	28
Figure 2.2 : Un extrait de maillage et sa représentation numérique	30
Figure 2.3 : Exemple de reconstruction par la méthode de Hoppe	31
Figure 2.4 : Diagramme de Voronoi (en rouge) et sa triangulation de Delaunay (en noir) .	32
Figure 2.5 : Exemple d'images 3D en VRML	35
Figure 2.6 : Exemple d'image 3D en format VTK	36

Chapitre 3 : Segmentation d'objets 3D

Figure 3.1 : Les deux étapes de l'algorithme : la segmentation en régions et la rectification de frontières	40
---	----

Figure 3.2 : Un sommet et les triangles entourant ce dernier	40
Figure 3.3 : Minimum et plateaux	41
Figure 3.4 : Exemple de segmentation par ligne de partage des eaux d'une image 2D : (a) image originale ; (b) image correspondant à la segmentation par ligne de partage des eaux de l'image originale	42
Figure 3.5 : Stratégies de l'approche de la ligne de partage des eaux (a) Approche « ascendante », (b) Approche « descendante »	42
Figure 3.6 : Segmentation hiérarchique à partir de la ligne de partage des eaux. Modèle Cow avec 208 régions à gauche et 57 régions à droite	43
Figure 3.7 : Marqueurs et résultat de la LPE	43
Figure 3.8 : Structure de stockage (matrice de stockage) des voxels. Seuls les couples de voxels (entrée/sortie) sont référencés	45
Figure 3.9 : La représentation de la voxelisation	45
Figure 3.10 : Construction de courbe squelette par contraction de maillage	46
Figure 3.11 : La création du marquage	46
Figure 3.12 : Les différentes étapes de la LPE	47
Figure 3.13 : Etapes d'une segmentation du système Shuffler. De gauche à droite : l'enveloppe convexe de la région candidate (le modèle entier), une première face germe, son segment correspondant, les enveloppes convexes du segment et des régions candidates suivantes, de nouvelle face germes et la segmentation finale	48

Chapitre 4 : Implémentation Du Projet

Figure 4.1 : Organigramme de la méthode implémentée	53
---	----

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Modélisation d'objets 3D

Aucune Tableaux

Chapitre 2 : Maillage Triangulaire

Tableau 2.1 : Les deux composantes principales du maillage 29

Chapitre 3 : Segmentation d'objets 3D

Aucune Tableaux

Chapitre 4 : Implémentation Du Projet

Aucun Tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale

3D = Trois dimensions, tridimensionnel

WEB = WWW = 3W = World Wide Web

Chapitre 1 : Modélisation d'objets 3D

1.1. CGI = Common Gateway Interface

1.2. NURBS = Non-Uniform Rational B-splines

1.3. SLA = Service Level Agreement

1.4. 2D = Deux dimensions, bidimensionnel

1.5. CAO = Conception Assistée par Ordinateur

1.6. FAO = Fabrication Assistée par Ordinateur

1.7. TGA = Truevision Targa

1.8. Brep = Boundary Representation

1.9. BEZIER = Courbe de Bézier

1.10. B-SPLIN = Courbe B-spline

1.11. PEARY = Picture Element ARraY

1.12. CSG = Constructive Solid Geometry

1.13. MEL = Maya Embedded Language

1.14. MAO = Musique Assistée par Ordinateur

1.15. IAO = Ingénierie Assistée par Ordinateur

1.16. PC = Portable Computer

Chapitre 2 : Maillage Triangulaire

2.1. DXF = Drawing Exchange Format

2.2. DAO = Dessin Assisté par Ordinateur

2.3. VRML = Virtual Reality Markup Language

2.4. ISO = Organisation Internationale de Normalisation

2.5. CEI = Commission Electrotechnique Internationale

2.6. HTML = HyperText Markup Language

2.7. OBJ = Objet 3D

2.8. IGES = Initial Graphics Exchange Specification

2.9. VTK = Visualization ToolKit

Chapitre 3 : Segmentation d'objets 3D

3.1. LPE = Ligne de Partage des Eaux

3.2. SMA = Système Multi-Agents

Chapitre 4 : Implémentation Du Projet

4.1. IDE = Integrated Development Environment

4.2. Int = Integer

4.3. Tcl = Tool Command Language

4.4. Tk = Tool Kit

Introduction Générale

Le domaine de l'informatique est en constante évolution, et a connu des avancées technologiques importantes ces quinze dernières années.

Le matériel informatique et les données numériques ont évolués parallèlement, faisant apparaître de nouveaux besoins et de nouvelles applications.

Les données tridimensionnelles 3D, constituent actuellement un contenu multimédia émergeant.

La représentation tridimensionnelle d'objets est utilisée dans des applications de plus en plus nombreuses, notamment la médecine, la conception assistée par ordinateur, les jeux et le cinéma.

Les progrès des outils d'acquisition, de modélisation, et de visualisation d'objets 3D ont provoqué l'augmentation du nombre de modèles 3D disponibles sur le WEB ou dans des bases spécialisées. Le traitement efficace des objets géométriques exige comme dans tous les autres domaines de l'informatique la conception des structures de données appropriées.

Pour chaque problème spécifique dans le traitement de géométrie, nous pouvons identifier un ensemble d'opérations par lesquelles le calcul est dominé et par conséquent nous devons choisir une représentation appropriée qui soutient l'exécution efficace de ces opérateurs.

Nous traitons dans ce mémoire la décomposition de maillage triangulaire.

Afin de bien mener notre étude, notre manuscrit est organisé comme suit :

1. Une introduction générale définissant le contexte de notre travail. Ensuite, on a posé le problème et les contributions apportée, suivie de la description de structuration du mémoire.
2. Après nous découpons l'architecture conceptuelle de notre système en quatre chapitres majeurs :

Chapitre 1 : étude générale sur la modélisation d'objets et plus particulièrement la modélisation d'objets 3D, Définition, Différents modes de modélisation géométrique, et les différents logiciels de modélisation 3D.

Chapitre 2 : le but de ce chapitre est généralité sur le maillage triangulaire, l'utilisation, les caractéristiques et le format d'objet 3D.

Chapitre 3 : Ce chapitre est l'incarnation théorique de notre projet car il explique en détail la segmentation d'objet 3D de notre programme.

Chapitre 4 : Dans ce dernier chapitre, il explique comment mettre en œuvre le programme, les étapes de sa mise en place et les moyens, les logiciels, les langages utilisés et les résultats expérimentaux dans notre projet.

3. Le mémoire se termine par une conclusion. Nous indiquons aussi quelques perspectives possibles pour nos activités de recherche futures.

Chapitre 1

Modélisation d'Objet 3D

1. Introduction

Parmi les techniques infographiques¹ il y a la modélisation 3D qui vise à créer des objets en trois dimensions, à partir ou non d'objets réels.

La modélisation 3D est une partie récente de l'informatique et qui ne cesse de se développer grâce aux progrès scientifiques dont l'informatique bénéficie, elle repose essentiellement sur des lois mathématiques complexes, qui sont appliquées à des contextes précis de la physique (et en particulier à l'optique, qui est une partie de la physique prédominante dans la modélisation 3D).

Un modèle d'un objet est une représentation simplifiée d'un objet qui permet de l'observer plus facilement. La construction d'un modèle pour représenter la structure géométrique d'un objet est intéressante à plusieurs points de vue : certaines caractéristiques du modèle peuvent être étudiées plus facilement que celles de l'objet lui-même : l'objet peut ne pas exister ; il ne peut être observé directement ; comme il ne peut être observé sans engendrer des coûts déraisonnables ou sans contrôle de l'expérience.

2. Définition de la modélisation 3D

2.1. Une histoire de la modélisation 3D

La modélisation 3D est utilisée pour générer des modèles 3D pour des secteurs allant de l'ingénierie et de la fabrication à l'animation numérique pour les films et les jeux vidéo. Les premières utilisations de l'infographie ont eu lieu au début des années 1960 à des fins scientifiques et d'ingénierie, et l'expression artistique CGI a commencé à la fin des années 1960 [1].

Le premier programme de modélisation solide disponible dans le commerce nommé Syntha Vision est sorti en 1969. Ce n'est que 20 ans plus tard que NURBS et la modélisation paramétrique sont apparues sur la scène, cette dernière étant la naissance de Pro/ENGINEER. La modélisation 3D a gagné en popularité et en utilité, avec des applications de modélisation 3D allant des films et des jeux vidéo à tous les aspects de la conception et de la fabrication commerciales. La première technologie d'impression 3D, la stéréo lithographie (SLA), est apparue en 1986 et a donné son nom au désormais populaire fichier STL [1].

2.2. Définition

La modélisation tridimensionnelle est l'étape en infographie tridimensionnelle qui consiste à créer, dans un logiciel de modélisation tridimensionnelle, un objet en trois dimensions, par ajout, soustraction et modifications de ses constituants.

La révolution consiste à faire tourner un profil 2D autour d'un axe 3D : on obtient ainsi un volume de révolution.

La modélisation 3D est l'utilisation d'un logiciel afin de créer le modèle tridimensionnel virtuel d'un objet physique.

On recourt à la modélisation 3D dans de nombreux secteurs, notamment celui de la réalité virtuelle, des jeux vidéo, de l'impression 3D, du marketing, des images pour la télévision et le cinéma, de l'imagerie scientifique et médicale, de la conception et de la fabrication assistée par ordinateur (CAO/FAO) [2].

Un logiciel de modélisation 3D génère un modèle à l'aide de différents outils et approches, notamment :

- Polygones simples
- Primitives 3D - des formes polygonales simples - pyramides, cubes, sphères, cylindres et cônes
- Courbes splines
- NURBS (B-splines rationnelles non uniformes) - formes douces définies par des lignes incurvées qui sont relativement complexes à traiter informatiquement

Les polygones géométriques 2D sont abondamment utilisés dans les effets spéciaux au cinéma et pour l'art 3D dans les jeux vidéo. Créer des formes approximatives faites de polygones est en effet beaucoup plus efficace qu'élaborer les graphiques pixélisés nécessaires au jeu 3D en temps réel [2].

Un modèle d'effets spéciaux pour le cinéma ou les jeux vidéo peut n'être au départ qu'une esquisse constituée de primitives polygonales ou NURBS. Il peut également s'agir d'une représentation composée de contours proches sur de multiples vues isométriques. Pour animer le modèle, il faut ensuite porter une attention particulière aux boucles de lignes continues qui doivent être maintenues dans les polygones du modèle autour des zones de déformation (les articulations, par exemple). Un modèle qui a une belle apparence de départ peut ne plus ressembler à rien au premier mouvement, si on ne s'est concentré durant la fabrication que sur l'apparence du modèle immobile.

Une fois que le modèle est correctement fabriqué, on peut demander à un artiste de s'occuper des coordonnées du modèle pour qu'il s'ajuste avec les textures 2D. Ce processus s'appelle la cartographie UV, il s'agit en quelque sorte de réaliser un vêtement sur mesure à l'aide d'une souris d'ordinateur. On attribuera plus d'espace sur la carte UV aux éléments qui requièrent davantage de détails ; cela peut être réalisé en utilisant des textures répétées : en échiquier, par remplissage ou à l'aide d'une texture préexistante.

L'étape suivante consiste généralement à créer la texture du modèle, appliquée manuellement ou à l'aide d'images 2D d'origine photographique, généralement des TGA (Targa bitmap). On définit [2] :

- La couleur grâce à une palette
- La réflectivité et la couleur reflétée avec une carte spéculaire
- La texture de surface, obtenue en jouant avec une carte normale ou en relief, ou bien avec une carte de déformation pour obtenir les détails géométriques complémentaires.

Pour les modèles animés, il faudra davantage de structure, comme s'il s'agissait de créer un squelette virtuel avec os et articulations, et les commandes pour le contrôler. Le degré d'influence de la texture des articulations sur la texture de surface quand elle se déforme est défini par le skinning.

Lors de cette phase, on détermine le poids de l'influence des articulations sur les textures directement sur les polygones modélisés. Un polygone peint avec plus d'insistance agira plus fortement sur le mouvement de l'ensemble d'articulations sélectionné. Ceci terminé, le modèle peut être confié à l'animateur.

2.3. Avantages

- La modélisation à partir d'exemples permet de créer des polyèdres donc les algorithmes de rendu pour ce type de données sont toujours adaptés.
- Le temps de création d'un modèle 3D est réduit, puisque le maillage final est obtenu par assemblage de maillages existants.
- Le processus de modélisation est aussi simplifié, ce qui permet à un plus grand nombre d'utilisateurs de créer des données 3D [3].

2.4. Inconvénients

- De manière analogue à l'échantillonnage en musique, la réutilisation de données existantes pose des questions en matière de propriété intellectuelle et de copyright.
- La qualité des maillages obtenus est directement dépendante du matériau de base, notamment en matière de résolution et de topologie [3].

2.5. La modélisation 3D aujourd'hui

Nous vous présentons ci-après des exemples courants de modélisation 3D. Ces modèles sont si réalistes qu'il est parfois difficile de se rendre compte au premier regard qu'il s'agit de rendus d'images [4].

- **Divertissement et médias** : la modélisation 3D est largement employée dans les effets spéciaux, les jeux vidéo, les films et les programmes télévisés. Certaines productions sont même entièrement créées à l'aide d'une application 3D.
- **Architecture et immobilier** : les architectes et les designers utilisent la modélisation 3D pour créer des représentations visuelles détaillées de bâtiments, de décorations d'intérieur et de paysages. Ces modèles permettent de communiquer efficacement la vision du designer aux personnes susceptibles d'investir, à la clientèle et au public.
- **Design de produits et fabrication** : la modélisation 3D offre un moyen efficace et respectueux de l'environnement de développer des prototypes, de visualiser des idées de produits et de simuler des fonctionnalités avant la production. Les designers peuvent peaufiner leurs idées et créer un nombre infini d'itérations avant la finalisation d'un produit.
- **Secteurs automobile et aéronautique** : la modélisation 3D est utilisée dans le design et le test des véhicules et de leurs composants, ainsi que pour la publicité et le marketing de ces derniers. De nombreuses publicités de voitures et de compagnies aériennes comportent des images 3D si réalistes qu'il est presque impossible de les discerner de véritables séquences filmées. La 3D permet d'effectuer des simulations réalistes pour tester une idée ou un véhicule avant sa construction.
- **Secteur médical et de la santé** : la modélisation 3D est utilisée dans l'imagerie médicale et pour la planification chirurgicale. La reproduction précise des organes, des os et des tissus permet de réaliser des diagnostics, de planifier des traitements et de faire avancer la recherche.
- **Réalité virtuelle et réalité augmentée** : la modélisation 3D est essentielle pour créer des expériences immersives. La réalité virtuelle et la réalité augmentée peuvent s'appliquer à de nombreux domaines et secteurs d'activité.
- **Enseignement et formation** : la modélisation 3D est utilisée dans un contexte éducatif pour enseigner des concepts sur une variété de sujets, comme la biologie, la géographie ou l'histoire. Elle permet au corps étudiant et aux personnes en formation d'interagir avec des modèles virtuels et des simulations dans des environnements contrôlés et sécurisés. C'est le cas, par exemple, des pilotes qui s'entraînent dans un simulateur de vol.

3. Différents modes de modélisation géométrique

La modélisation géométrique désigne l'ensemble des méthodes utilisées pour la définition et la représentation informatique de la géométrie des objets du point de vue de leurs formes et de leurs propriétés géométriques. Dans un contexte de modélisation numérique, la totalité des données requises pour représenter un objet ou un problème donné constitue le modèle objet, tandis que la partie purement géométrique de ces données définit le modèle géométrique.

La modélisation géométrique comprend également l'analyse et la synthèse des formes géométriques. Ce qui implique d'autres fonctions telles que le calcul d'intersection, de projection, ou de discrétisation, d'ordonnancement des faces etc. qui utilisent des informations contenues dans les modèles géométriques.

Les techniques de stockage et de traitement des données géométriques sont relativement indépendantes des applications particulières. De sorte que des méthodes génériques peuvent donc être utilisées pour construire des modèles d'objets les plus divers dans les champs d'applications les plus variés.

Le processus de génération de maillages dépend fortement sur la modélisation géométrique pour la définition et la représentation informatique de la géométrie des domaines de calcul. L'ensemble de ces informations servent à l'élaboration des structures de données pour l'implémentation des algorithmes de calcul.

Il existe trois types principaux de modélisation 3D : **frontière (filaire)**, **surfactive** et **volumique**. Ces modélisations permettent une représentation « réelle » des objets [5].

3.1. La modélisation frontière

3.1.1. La modélisation Fil de Fer

Les autres appellations de cette modélisation sont treillis ou fil de fer.

C'est le premier niveau de modélisation dans l'espace. Elle utilise les mêmes entités géométriques que le 2D, en y ajoutant la troisième dimension.

Elle est donc basée sur des points et des lignes. L'objet est décrit par ses sommets (points) et ses arêtes (lignes qui relient ces sommets).

Pour gérer la notion de pièce, on ne pourra utiliser que des points appartenant aux arêtes ; ce sont les seuls repérables.

La structure de données simple et compacte, visualisation très rapide. Permet à peu près d'avoir une représentation géométrique globale de l'objet [5].

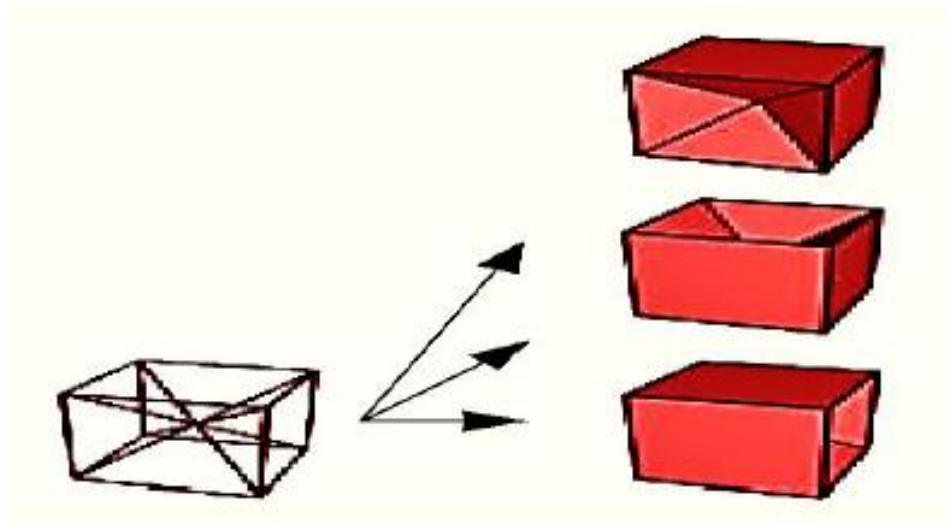


Figure I.1 : Représentation fil de fer d'un même objet en plusieurs interprétations.

Bien que toujours utilisé simples, il présente à des fins architecturales, pour des objets simples, il présente le problème poser des ambiguïtés en représentations 3D [5].

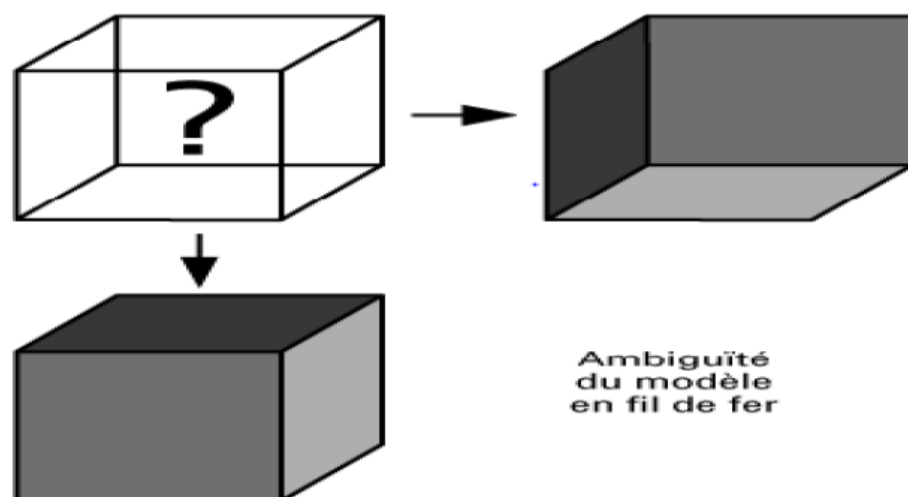


Figure I.2 : Ambiguïté de modèle en fil de fer.

3.1.2. Modèles à partir de surface frontières (Brep)

Ce modèle est une extension du modèle fil de fer, il a été introduit afin de régler les problèmes d'ambiguïté dans le modèle filaire en introduisant la notion de face. En infographie3, la B-Rep (*Boundary Representation* en anglais ou *Représentation Frontière* ou *Représentation par les Bords* en français) est une technique de modélisation 3D géométrique des solides par les surfaces.

Cette méthode consiste à représenter la peau des objets géométriques en « cousant » des carreaux géométriques restreints, portés par des surfaces canoniques (en général des surfaces B-splines, des Bézier, des NURBS) [5].

Les BRep décrivent les modèles en fonction des sommets, des arêtes et des surfaces la conception du solide sans oublier une grande quantité d'information à stocker.

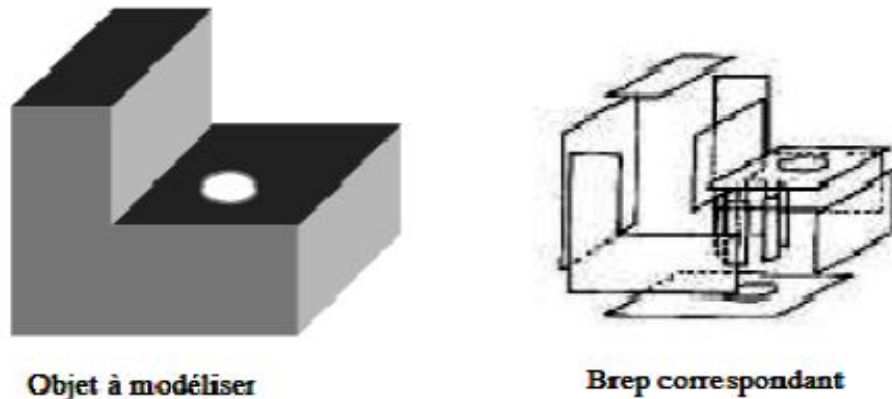


Figure I.3 : Le modèle Brep

3.1.3. Les avantages et les inconvénients

Parmi les avantages et les inconvénients de cette modélisation [5] :

A/ Avantages

Cette modélisation permet la représentation « réelle » d'un objet dans l'espace. Les erreurs d'interprétation sont diminuées (du fait des compléments d'informations apportés par la troisième dimension). Elle permet donc de traiter des géométries plus complexes que le 2D.

B/ Inconvénients

Cette modélisation ne comporte pas les notions de surface et de volume bien que la visualisation obtenue puisse en donner « l'idée ».

Il n'y a donc pas d'élimination automatique des arêtes cachées. Elle doit être faite manuellement par l'utilisateur.

Cela apporte aussi des ambiguïtés au niveau de la compréhension de la géométrie de la pièce.

3.2. Les modélisations surfaciques

Cette modélisation permet une définition précise de la surface de l'objet. Représentation par un ensemble de portion élémentaire de surface (carreau ou patch), définis par le type de la surface support et les équations quatre courbes frontières.

Parmi ses propriétés à un bon comportement aux dérivées premières (points de raccordement des carreaux), une modification aisée de l'ure des surfaces [6].

Chronologiquement, sont apparues les surfaces de BEZIER, B-SPLIN, NURBS.

- Construction du modèle surfacique ;
- Interpolation/ approximation de points Beaucoup ou Peu.



Figure I.4 : Modélisation surfacique avec plusieurs points.

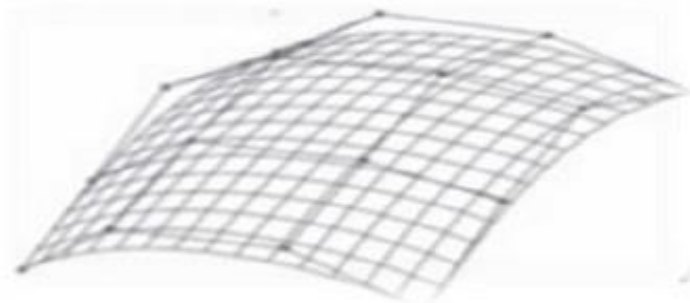


Figure I.5 : Modélisation surfacique avec peu de points.

3.2.1. Courbe de Béziérs

Du nom d'un ingénieur de Renault (Pierre Bézier) qui développa ce modèle de courbes pour la conception de carrosseries de voitures.

Une telle courbe commence par le premier, finit par le dernier point et ne passe pas obligatoirement par les autres points, elle n'est pas déformée par translation et rotation, mais par changement des paramètres de mise en perspective.

Quand on modifie la position d'un seul point de contrôle (sommet), la courbe est intégralement modifiée ce qui entraîne sa réévaluation intégrale. Il n'y a donc pas de contrôle local sur la forme de la courbe.

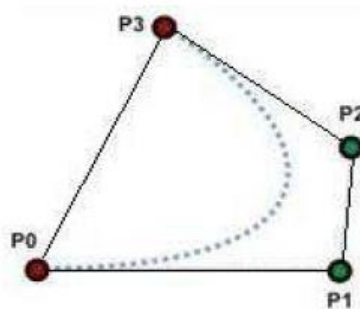


Figure I.6 : Une courbe de Bézier cubique avec les points de contrôle P0, P3.

3.2.2. Courbes et surfaces B-splines

Les courbes et les surfaces spline sont des modèles mathématiques qui permettent d'associer une représentation continue (courbe ou surface) à un ensemble discret de points d'un espace affine (habituellement $\mathbb{R}^3$). Les B-splines sont la généralisation des courbes de Bézier, elles peuvent être à leur tour généralisées par les NURBS [6].

- **Courbe B-splines** : Une courbe splines est une fonction polynomiale par morceaux définie sur un intervalle $[a,b]$ divisé en sous intervalles.

Le degré de la spline est défini comme celui du polynôme P_i de plus haut degré. Si tous les polynômes ont le même degré, on dit que la spline est **uniforme**. Dans le cas contraire, elle est **non uniforme**.

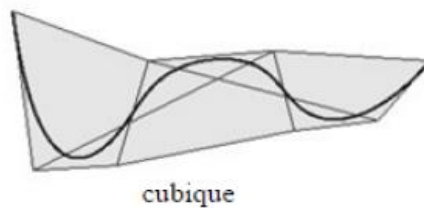


Figure I.7 : Courbe B-splin cubique

- **Surface B-splines** : Surfaces remédiant en grandes partie aux défauts des surfaces de Bézier.

Les propriétés des surfaces splines découlent des propriétés des courbes splines.

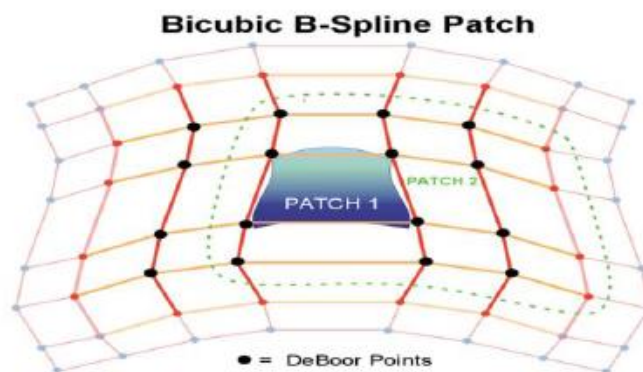


Figure I.8 : surface B-splin cubique

Parmi les avantages surfaces B-splines on cite :

- Control local la modification d'un point de contrôle ne change pas tout la courbe.
- "k" et "l" contrôlent l'ordre des B-spline, donc pour la même grille de points de contrôle, on peut obtenir une surface qui adhère plus ou moins à la grille en faisant varier "k" et "l".

Cependant lorsqu'on augmente "k" ou "l", on augmente aussi considérablement la complexité des calculs, k et l sont entiers et empêchent toute variation continue.

3.2.3. Courbe et surfaces NURBS

Les NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) sont utilisées pour représenter mathématiquement des objets géométriques. Elles généralisent la représentation par les B-splines des courbes et des surfaces en ajoutant un dénominateur.

Une B-spline ressemble à une représentation polynomiale par morceaux, alors qu'une NURBS est une représentation par fractions rationnelles par morceaux.

Elles présentent de nombreux avantages comme la facilité et précision pour évaluer une forme, la capacité pour approximer des formes complexes et la simplicité de construction et d'implémentation [6].

Notamment utilisées dans les logiciels d'édition 3D, plus précisément dans la compression d'images et dans le design assisté par ordinateur, afin de générer et représenter des formes douces et ergonomiques.

Cette méthode a l'origine été faite pour une représentation exacte des coniques, à chaque point de contrôle P_i on associe un point W_i .

3.2.4. Les avantages et les inconvénients

Parmi les avantages et les inconvénients de cette modélisation [6] :

A/ Avantages

Cette modélisation permet une définition précise de la surface de l'objet, ainsi que des intersections de surfaces. Elle procure une nette amélioration de la visualisation, principalement par la possibilité d'élimination automatique des arêtes cachées.

B/ Inconvénient

Cette modélisation n'est pas toujours bien adaptée à la conception d'éléments de machines.

3.3. Les modélisations volumiques

C'est la modélisation la plus complète car elle englobe les deux précédentes, Elle permet la représentation dans l'espace, avec la notion de matière.

Pour créer un objet, le 3D volumique il faut utiliser des primitives volumiques, les assembler par des opérateurs logiques (union, intersection, différence). Ils permettent de combiner les primitives pour créer des solides plus complexes, les manipuler par des opérateurs géométriques (translation, rotation, symétrie, homothétie ...) [6].

3.3.1. Enumération de l'occupation spatiale

Dans ce modèle, un objet spatial est représenté par un ensemble de cellules occupées par le volume de l'objet dans l'espace.

Celles-ci peuvent être des volumes quelconques mais l'usage des cubes de taille fixe est très fréquent. Ces cubes appelés "voxels" (volumes éléments) sont localisés le plus souvent par les coordonnées d'un point, par exemple le pied du cube, c'est à dire le sommet du cube le plus proche de l'origine du système d'axes.

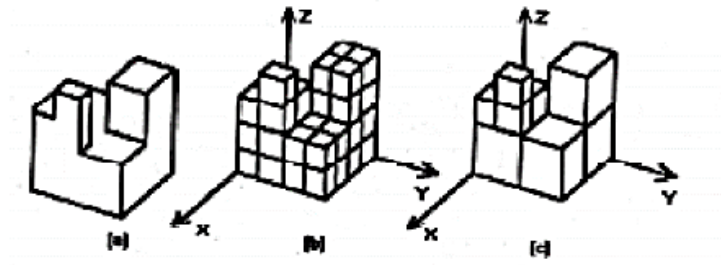


Figure I.9 : Exemple de modélisation par énumération spatiale et arbre octal

Un objet est représenté par un tableau de triplets (x, y, z) appelé tableau spatial, habituellement ordonné et dont l'ordre correspond à l'ordre de la construction de l'objet [5]. La représentation par énumération spatiale regroupe les représentations par tableau à trois dimensions de voxels, appelé PEARY (Picture Element ARraY), ou par arbre octal (octrees).

- **Représentation PEAR :** La représentation Peary la plus simple est la représentation Peary-binaire ; elle consacre un bit à chaque pixel et ne permet seulement de différencier le plein du vide. Le Peary permet de résoudre trivialement tout un ensemble de requêtes : Un point est-il à l'intérieur d'un solide ? quel est le volume d'un solide ? ou est son centre de gravité ? Les opérations booléennes sont effectuées voxel par voxel.
- **Arbre octal :** Dans une représentation Peary, les voxels voisins ont très souvent la même valeur, ce qui permet d'envisager une forte compression des données. Un objet est décrit par un arbre octal qui est basé sur une subdivision successive et récursive d'un cube en huit cubes homogènes plus petits jusqu'à l'obtention d'un cube minimal homogène, qui est représenté par un octant noir (pour un voxel allumé si le cube est à l'intérieur de l'objet) et blanc (pour un voxel éteint si le cube est à l'extérieur du volume de l'objet).

A/ Avantage

- Facilité de composition à l'aide d'opérateurs logiques de base ;
- Facilité de visualisation ;
- Facilité d'obtention à partir d'un autre modèle ;
- Facilité de calcul des propriétés géométriques et physiques d'un objet spatial.

B/ Inconvénients

- Représentation approximative des objets ;
- Difficulté d'effectuer des opérations géométriques, qui nécessitent la reconstruction de l'arbre octal.

3.3.2. Représentation par volumes élémentaires

Le domaine de ce type de représentation est limité à une famille d'objets, les objets étant indexés à l'intérieur d'une famille par un petit nombre de paramètres. Un objet est ainsi identifié par un n-uplet qui d'une part indique à quelle famille appartient l'objet et d'autre part donne la liste des paramètres permettant de le sélectionner. Par exemple ('cube',3) permet de désigner l'élément de taille trois unités dans la famille des cubes [5].

Par leur principe, ces schémas sont uniques, non-ambigus et triviaux à valider. L'absence de moyens de composition des familles d'objets pour former des objets plus complexes et l'inexistence d'algorithmes généraux de calcul des propriétés des objets représentés (car les familles d'objets doivent être traitées comme des cas particuliers) en sont les principaux inconvénients. Ce modèle ne se prête donc pas à la description et au traitement des objets complexes.

3.3.3. Géométrie Solide Constructive (CSG)

Dans ce modèle très utilisé en CAO, on dispose d'un ensemble de volumes élémentaires, tels que des parallélépipèdes, des sphères, des cônes, des tores, etc... On paramètre leurs dimensions, telles que largeur, longueur, hauteur, rayon, etc... On dispose de transformations géométriques (translations, rotations, etc.) et d'un ensemble d'opérateurs de composition (union, intersection et différence), qui permettent de combiner les objets de base afin de construire des objets spatiaux complexes [5].

La représentation de l'intérieur d'un objet généré selon ce modèle est un graphe acyclique binaire appelé souvent arbre de construction CSG, où chaque noeud non-terminal est un opérateur de composition et où les feuilles sont des objets élémentaires (Figure I.10).

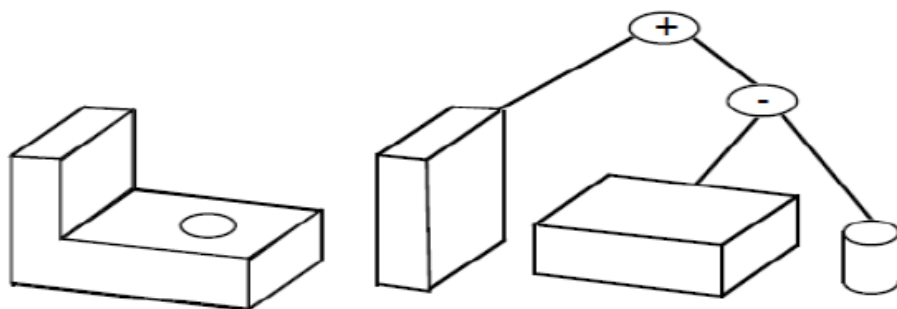


Figure I.10 : Exemple de construction d'un objet et de son arbre CSG associé

Il s'agit de manipuler des objets élémentaires bornés : polyèdre, cylindre, sphère, etc.

Pour ce qui est des primitives non élémentaires, l'utilisateur doit spécifier uniquement le système de référence de l'objet. On met à la disposition de l'utilisateur un nombre fini de primitives simples dont la grandeur, la forme, la position et l'orientation sont définies par ce dernier.

L'opération de modélisation est simplifiée ; l'animateur doit spécifier seulement l'arbre de construction. Aucune ambiguïté dans le modèle : cela donne lieu à des objets valides.

Cependant il est incomplet car il nécessite des algorithmes pour évaluer l'arbre de construction. Lorsque l'arbre CSG est mal balancé, les algorithmes proposés sont inefficaces. Il est difficile de construire un modèle CSG pour décrire des objets complexes n'intégrant aucune propriété géométrique, par exemple : la représentation d'un visage humain. L'évaluation de l'arbre de construction peut exiger des temps de calculs importants [6].

Le résultat d'une opération booléenne doit être un objet régulier typologiquement clos, l'intersection de deux objets ne devant pas donner d'arêtes ou de faces pendantes.

A/ Avantage

- Facilité de création ;
- Facilité de stockage ;
- Facilité de validation.

B/ Inconvénients

- Difficultés de calcul des propriétés géométriques et physiques d'un objet complexe ;
- Difficultés pour effectuer certaines conversions (arbre CSG vers le modèle de représentation par les frontières par exemple).

3.3.4. Représentation par balayage

Ces représentations sont basées sur le déplacement d'une région (génératrice) le long d'une courbe (directrice). On distingue trois principales représentations de ce type : les surfaces par balayage translationnel, les surfaces par balayage rotationnel et les surfaces par balayage conique.

Un balayage généralisé, un cylindre généralisé, ou un cône généralisé sont définis comme étant le volume décrit par le déplacement d'un ensemble de sections le long d'un axe suivant des règles de balayage. La particularité de la représentation par balayage est d'utiliser des règles de génération au lieu de paramètres numériques [5].

Un balayage généralisé est défini de la façon suivante : Soit une courbe spatiale appelée axe de la forme ; en chaque point de cet axe, suivant un certain angle, il y a une section plane ; sur chaque section plane, il y a une courbe Plane qui constitue la section de l'objet dans ce plan. Il reste alors à définir une règle de transformation qui spécifie la façon dont évolue la section le long de l'axe.

A/ Avantage

- Facilité de description (de l'objet en mouvement et de sa trajectoire) ;
- Facilité de stockage ;
- Facilité de transformation géométrique.

B/ Inconvénients

- Manque d'outils algorithmiques pour le calcul des propriétés géométriques ;
- Difficulté de mise en œuvre des opérateurs booléens ;
- Difficulté de visualisation.

4. Différents logiciel de modélisation 3D

Voici une liste de logiciels de modélisation 3D disponibles dans le commerce, les logiciels informatiques utilisés pour l'élaboration d'une représentation mathématique d'une surface en trois dimensions d'objets, aussi appelée modélisation 3D.

4.1. Les principaux logiciels de modélisation 3D pour les jeux vidéo, le cinéma, la télévision et les effets visuels

4.1.1. Maya

Autodesk Maya est une référence incontournable dans le monde professionnel de la 3D. Depuis sa sortie en 1998, Maya s'est imposé comme le logiciel de choix pour l'animation et les effets spéciaux dans l'industrie du cinéma et de la télévision. Il a été utilisé dans la production de nombreuses œuvres majeures, comme Avatar, Le Seigneur des Anneaux et Game of Thrones.

Maya offre une gamme complète d'outils pour la modélisation, l'animation, le rendu, la simulation et le compositing. Son système de nœuds avancé permet une personnalisation et une complexité rarement égalées. La puissance de Maya réside notamment dans ses outils d'animation de personnage et de simulation de dynamiques (fluides, tissus, cheveux, etc) [7].

Malgré sa courbe d'apprentissage relativement abrupte, Maya est apprécié pour sa polyvalence et sa robustesse. Son langage de script intégré, MEL (Maya Embedded Language), permet aux utilisateurs de personnaliser l'interface et d'automatiser des tâches complexes, renforçant ainsi le potentiel créatif de ce logiciel de pointe [7].



Figure I.11 : Autodesk Maya

4.1.2. Blender

Le monde de la modélisation 3D est souvent associé à des licences onéreuses, mais Blender vient briser ce cliché. Ce logiciel open source, développé par la Blender Foundation, a su se faire une place parmi les outils de modélisation 3D les plus respectés, en dépit de son statut gratuit. Blender offre une suite complète pour la création 3D, incluant la modélisation, l'animation, le rendu, la simulation de particules, la sculpture et même le montage vidéo.

Son interface intuitive et personnalisable a su séduire aussi bien les professionnels que les amateurs. L'immense communauté de Blender contribue activement à son développement, proposant régulièrement des mises à jour significatives. Grâce à cette dynamique, Blender est constamment à la pointe des dernières avancées technologiques.

Au-delà de la modélisation, Blender brille également dans le domaine de l'animation et des effets spéciaux. Le logiciel est suffisamment flexible pour répondre aux besoins de projets variés, allant du développement de jeux vidéo aux films d'animation en passant par la visualisation architecturale [7].



Figure I.12 : Blender

4.1.3. 3D Studio Max

Incontournable pour les professionnels qui recherchent une suite de modélisation 3D complète, 3D Studio Max bénéficie d'une renommée mondiale. Édité par Autodesk, ce logiciel de modélisation 3D offre des ressources haut de gamme pour développer des films ou des jeux vidéo.

Il est même utilisé dans l'industrie du cinéma pour réaliser des effets spéciaux... Autant dire que 3D Studio Max possède des fonctionnalités avancées pour réaliser des animations, ombrages, textures, coloris et effets dynamiques au plus proche de la réalité [8].

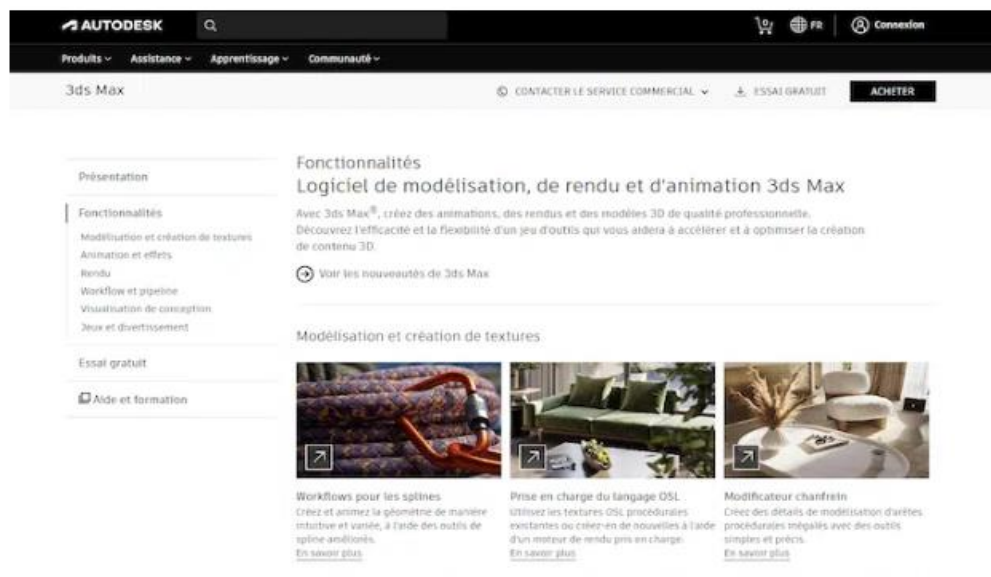


Figure I.13 : 3D Studio Max

4.2. Les principaux logiciels de modélisation 3D pour le design industriel et la conception de produits

4.2.1. SolidWorks

SolidWorks, est un logiciel 3D de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et un logiciel de Modélisation 3D Assistée par Ordinateur (MAO) fonctionnant avec Microsoft Windows. SolidWorks est développé et publié par Dassault Systèmes.

SolidWorks offre certains des meilleurs outils pour vous aider à conceptualiser et à transformer des idées innovantes en conceptions de produits de niveau industriel. Des modèles 3D aux croquis 2D de pièces complexes, ce logiciel de CAO offre tout ce qui est nécessaire pour créer des conceptions rapides et précises.

SolidWorks est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Contrairement à de nombreux autres logiciels qui imitent les courbes grâce à des structures plates légèrement inclinées, Solidworks utilise un système NURBS, offrant des courbures très détaillées.

SolidWorks est disponible en trois versions différentes. Outre la licence perpétuelle, que vous ne devrez payer qu'une seule fois, il existe également une licence annuelle, qui vous donne accès à toutes les mises à jour et au support client. Pour l'acheter, vous devrez demander un devis auprès d'un revendeur officiel [9].

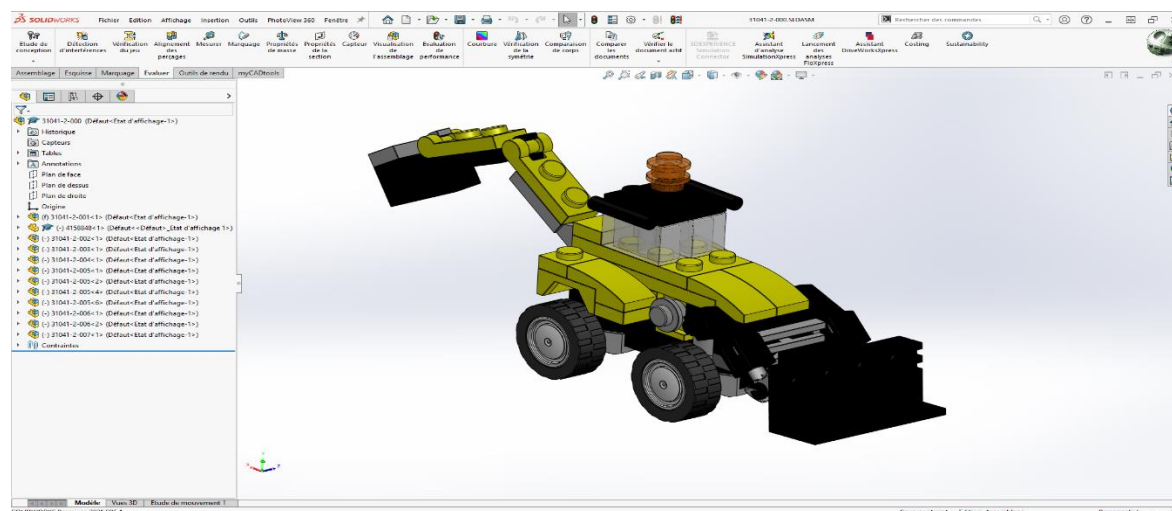


Figure 1.14 : SolidWorks

4.2.2. Inventor

Inventor est un logiciel de CAO et modélisation 3D développé par Autodesk pour Windows. Il est utilisé pour le design mécanique 3D, le design de communication, la création d'outils et la simulation de produit.

Inventor utilise ShapeManager, le noyau de modélisation géométrique propriétaire d'Autodesk. Ce logiciel est en concurrence directe avec SolidWorks, Solid Edge et Creo.

Il utilise des techniques de modélisation solide paramétrique permettant de modifier et d'adapter rapidement les caractéristiques géométriques de la conception du produit grâce à un flux de travail très intuitif.

Le logiciel INVENTOR propose une palette d'outils très simples à utiliser pour la conception mécanique et la simulation en 3D.

Avec cette solution professionnelle, vous disposez d'outils intégrés pour la conception de tôles, de cadres, de tubes, de câbles et de harnais, la mise en page, le rendu, la simulation, la conception de machines et bien plus encore.

Il est largement utilisé dans l'industrie automobile, ainsi que dans le secteur industriel et du bâtiment pour la création de pièces mécaniques (horlogerie, électricité, etc.).

Avec le logiciel Inventor, les ingénieurs peuvent intégrer des données 2D et 3D dans un environnement de conception unique, en créant une représentation virtuelle du produit final qui leur permet de valider la forme, la taille et la fonction du produit avant qu'il ne soit construit [10].

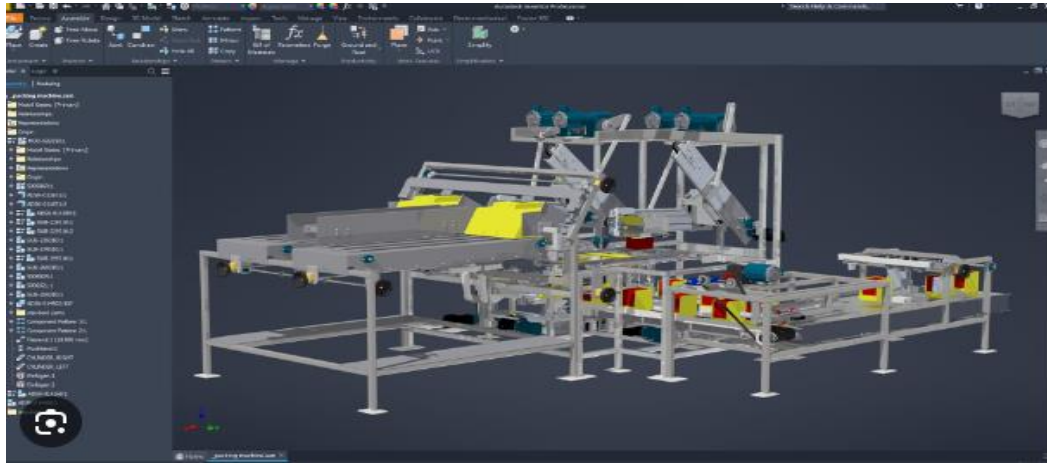


Figure I.15 : Inventor

4.2.3. Fusion

Autodesk Fusion 360 est une plateforme tout-en-un de CAO, IAO et FAO basée sur le cloud pour la modélisation 3D et la fabrication de produits. Elle vous permet d'explorer la créativité et la conception sans effort tout en créant de multiples itérations de conception.

Il dispose d'outils paramétriques puissants et d'outils de maillage analytiques adaptés à la plupart des défis du design industriel.

Grâce aux outils de conception générative et de simulation de Fusion 360, vous pouvez réduire l'impact de la conception et de l'ingénierie pour garantir la fabricabilité. Par conséquent, il est possible de concevoir et de fabriquer des produits qui offrent forme, ajustement, fonction et esthétique.

Fusion 360 n'est lié à aucun système d'exploitation en particulier, il peut aussi bien fonctionner sous Windows, Mac ou dans votre navigateur web [11].

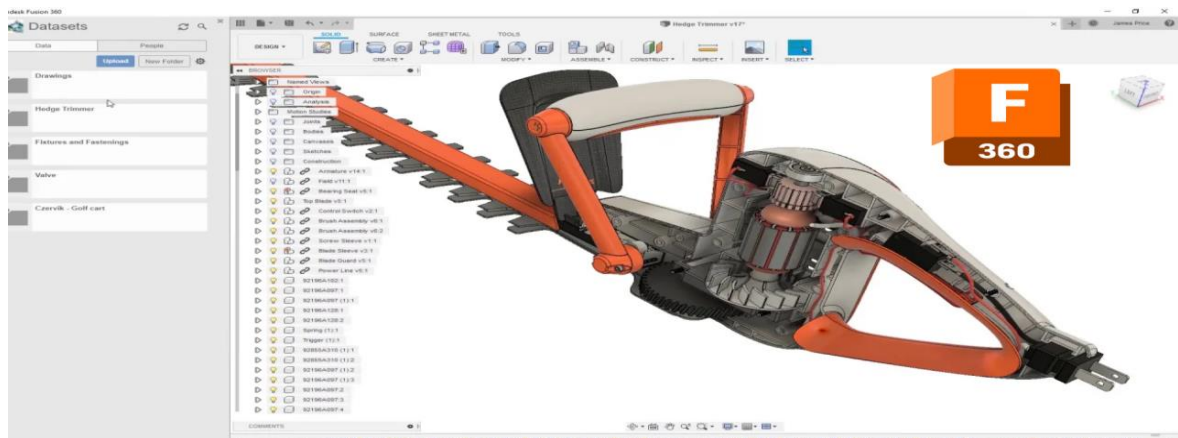


Figure I.16 : Fusion

4.3. Les principaux logiciels de modélisation 3D pour l'architecture et la construction

4.3.1. AutoCad

AutoCAD est l'outil de millions de dessinateurs CAO dans le monde entier et aide les dessinateurs débutants et expérimentés à créer des dessins CAO professionnels.

Il est disponible depuis 1982 comme application de bureau (windows et mac) et depuis 2010 comme application mobile, accessible sur le Web et fonctionnement avec un système de Cloud. Il servait au début aux ingénieurs en mécanique. Au fil du temps, il est utilisé par plusieurs corps de métiers.

Ce logiciel de dessin technique pluridisciplinaire est très répandu dans le monde. On s'en sert dans les domaines tels que l'industrie, l'électronique, l'électrotechnique, le système d'information géographique, la cartographie, l'architecture, la topographie, la mécanique et l'urbanisme.

AutoCAD est le leader du marché des logiciels de conception CAO 2D et vous pouvez facilement ouvrir tous les fichiers DWG et partager vos propres dessins.

AutoCAD peut produire des résultats satisfaisants pour les débutants. Toutefois, une formation approfondie est nécessaire pour vraiment libérer son véritable potentiel [9].

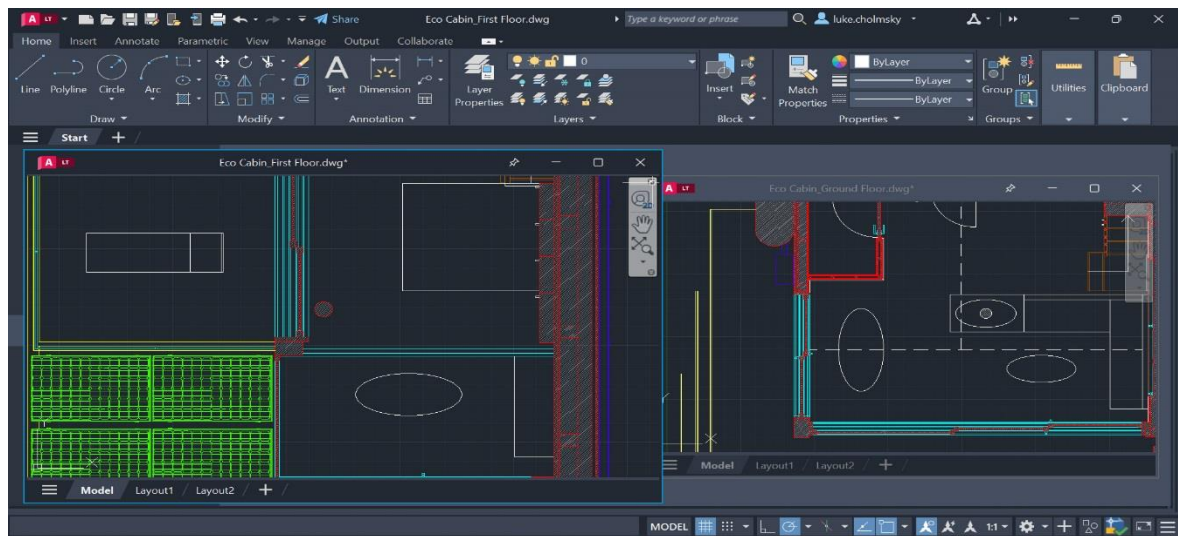


Figure I.17 : AutoCad

4.3.2. SketchUp

Sketchup est un logiciel de CAO de modélisation 3D, principalement utilisé dans l'architecture, la décoration d'intérieur, l'architecture de paysage, mais aussi dans l'industrie de l'ingénierie et des jeux vidéo.

Dédié à la conception architecturale, SketchUp existe depuis les années 2000 ! Autant dire que cet outil a connu de nombreuses évolutions et optimisations pour offrir,

aujourd'hui, une expérience utilisateur optimale pour modéliser des maisons, meubles ou bâtiments.

Les fabricants, concepteurs et architectes profiteront largement des nombreuses fonctionnalités proposées par SketchUp. Tout s'effectue à partir d'un navigateur web, vous permettant de retrouver vos créations depuis n'importe quel PC ou terminal connecté à internet. Vous pouvez même rendre vos projets collaboratifs, si besoin [7].

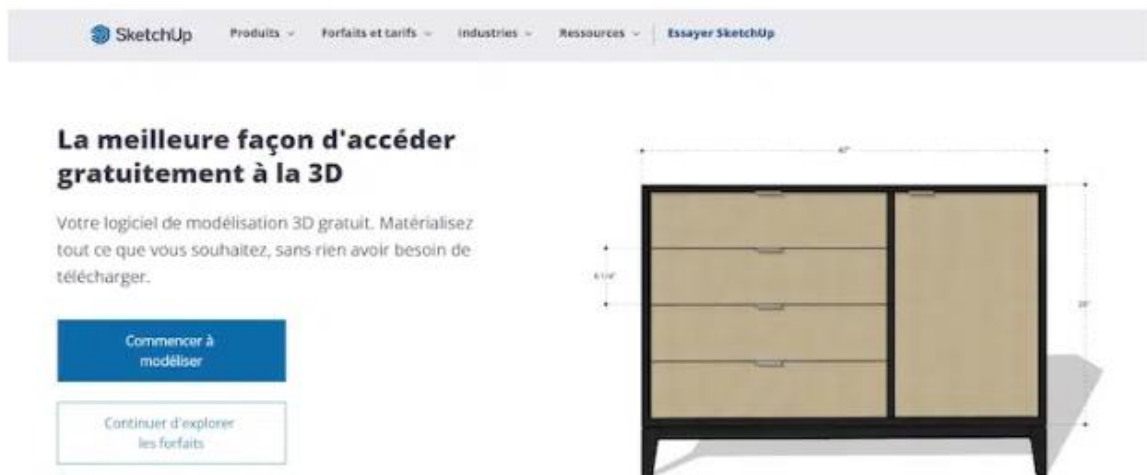


Figure I.18 : SketchUp

4.3.3. Rhinoceros

Rhinoceros, autrement connu sous le nom de Rhino 3D, est un logiciel de CAO 3D utilisé par exemple dans le milieu du design industriel ou de l'architecture, développé par Robert McNeel & Associates.

Il sert essentiellement à concevoir des formes complexes comme celles de navires, de véhicules terrestres ou d'objets divers (mobilier, produits électroniques, objet de design, bijoux).

Son moteur NURBS permet de créer n'importe quelle forme à partir de courbes ou bien de formules mathématiques complexes. Il permet d'ailleurs la création de courbes NURBS ou de type Bezier (Spline) de degré différent.

Les contraintes de types position, tangentes, continuité ou courbures sont exploitées dans Rhinoceros 3D. Rhino permet d'inscrire son modèle dans la précision bien en deçà du micron si nécessaire.

Ce logiciel peut aussi vous fournir des analyses poussées et des options de visualisation pertinentes. Il est également possible de générer des rendus réalistes, de faire de l'animation ou des illustrations.

Même sur un ordinateur portable ordinaire, Rhino est rapide. Aucun matériel spécial n'est nécessaire. De plus, Rhino est compatible avec de nombreux logiciels de CAO, tels que BricsCAD, SketchUp Pro, Keyshot, Artlantis et SharkCAD Pro.

Rhino est disponible aussi bien pour Windows que Mac. La licence d'utilisation du logiciel est payante. Une version d'essai gratuite de Rhino vous permettra de disposer du logiciel complet pendant 90 jours [9].

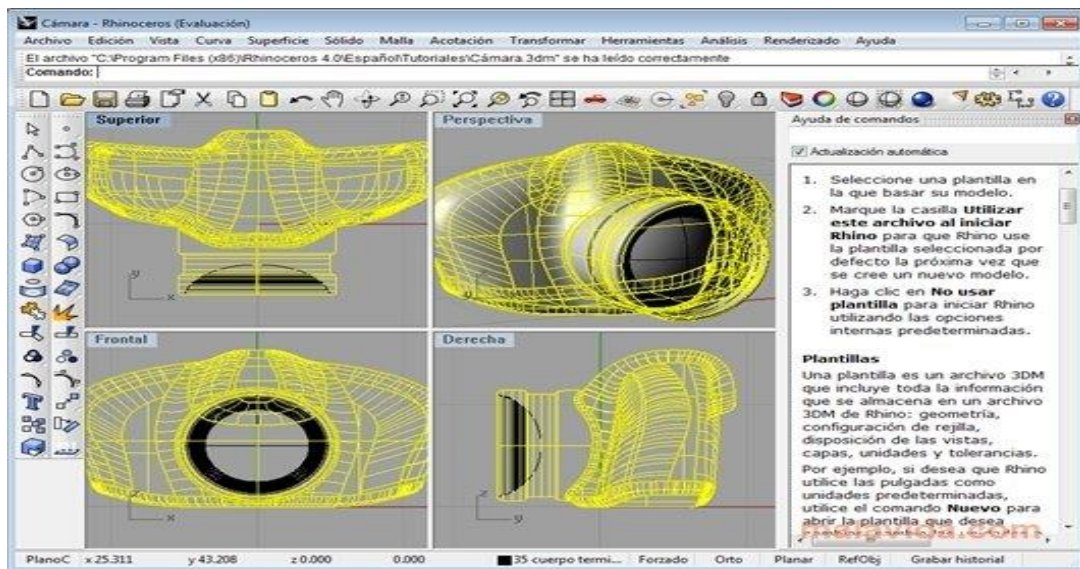


Figure I.19 : Rhinoceros

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu généralité sur la modélisation 3D, les différentes techniques de modélisation des objets 3D, la modélisation filaire qui permet une description simple de la forme, et la modélisation surfacique qui offre une représentation plus ou moins complexe d'un objet et qui est très adaptée la conception de formes, et la modélisation volumique qui représente un objet comme un volume avec des informations sur l'intérieur de la forme et enfin, nous présentons les meilleures logiciel de modélisation 3D.

Chapitre 02

Maillage Triangulaire

1. Introduction

Les maillages 3D sont composés d'un ensemble de faces comprenant des sommets (vertex) ainsi que des arêtes. Le type de face est variable et les maillages triangulaires, quadrangulaires ou simplexes sont assez courants. Les maillages triangulaires sont cependant les plus répandus car ils représentent une solution privilégiée pour l'industrie de par leur simplicité et leur flexibilité.

Nous allons étudier dans ce chapitre l'utilisation d'un maillage triangulaire, sa définition et les caractéristiques, puis on expliquera le format d'objet 3D.

2. Utilisation d'un maillage triangulaire

Un calcul nécessite avant d'être lancé sur un maillage :

- La vérification des paramètres à respecter du modèle éléments finis.
- La pose de conditions aux limites.

Et permet alors d'approcher et simuler des comportements, éventuellement sur sollicitation, du système, d'où le nom méthode approchée.

3. Définition et caractérisation d'un maillage triangulaire

3.1. Définition et caractéristiques d'un maillage

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis [5].

Un maillage est défini par :

- Son repère ;
- Les points le constituant, caractérisés par leurs coordonnées ;
- Les cellules, constituant des polytopes (Un **polytope** est un objet mathématique) reliant n de ces points ; et peut être caractérisé notamment par : sa dimension : typiquement 2D ou 3D ; son volume (dimension totale couverte) ; sa finesse : surface ou volume moyen des cellules composant le maillage ;
- La géométrie des cellules : triangle, quadrilatères (parallélogrammes, rectangles, polygones, en 2D ; tétraèdres, prismes, hexaèdres (parallélépipèdes, cubes), ..., polyèdres en 3D ; (le degré de l'élément : c'est le degré du polynôme servant à décrire les côtés ou arêtes des éléments).

La représentation la plus simple d'une forme est de décrire les points caractérisant cette forme. Une représentation plus complète consiste à représenter les formes par maillage.

Un maillage est un ensemble d'éléments ou mailles dont la dimension dépend du domaine à mailler et de l'espace dans lequel se trouve ce domaine [6] :

- Linéique lorsque le domaine est une courbe ou une droite il peut être plongé dans un espace de dimension un, deux ou trois. Les mailles sont des segments ;
- Plan lorsque le domaine et l'espace sont en dimension deux : les mailles sont des polygones ;
- Surfactive lorsque le domaine est en dimension deux et l'espace en dimension trois les mailles sont des "polygones" non forcément planaires (par exemple les quadrangles) ;
- Volumique lorsque le domaine et l'espace sont en dimension trois les mailles sont des polygones, très souvent des tétraèdres (un polyèdre composé de quatre triangles) ou des hexaèdres (un polyèdre à six faces).

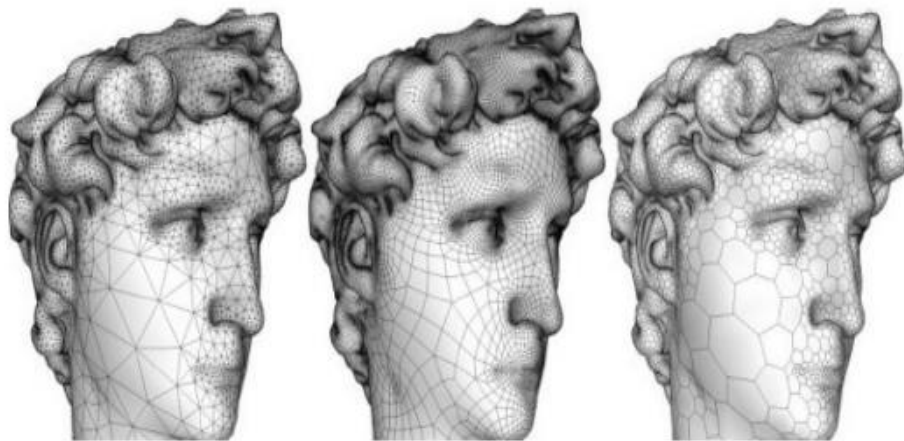


Figure II.1 : La géométrie surfacique du David maillée par des triangles, des quadrangles et des polygones

3.2. Définition d'un maillage triangulaire

Un maillage triangulaire est constitué d'un ensemble de triangles qui contient [12] :

- **Les sommets** : sont représentés par des points de l'espace.
- **Les arêtes** : sont des connexions entre deux sommets, et sont situés sur la frontière d'une face.
- **Les faces** : sont des triangles dont les sommets et les arêtes maillent.

Voici un exemple démonstratif d'un maillage triangulaire qui contient les informations sur les deux composantes principales du maillage : sa géométrie et sa connectivité.

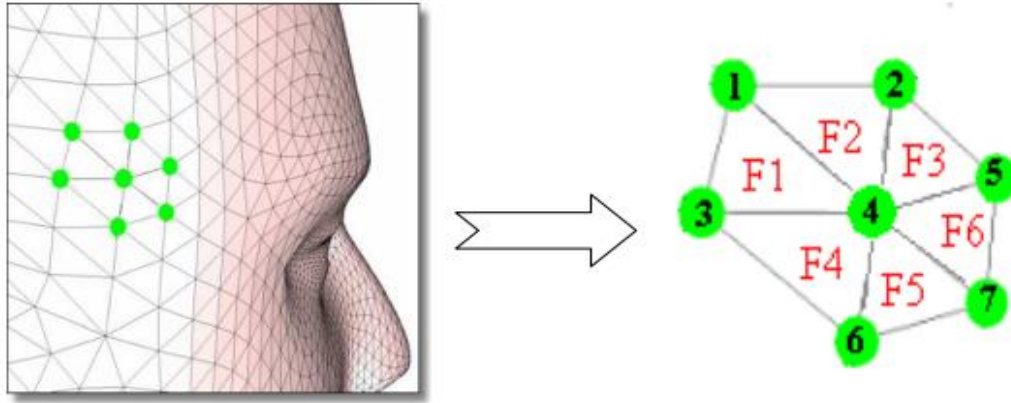


Figure II.2 : Un extrait de maillage et sa représentation numérique

La géométrie correspond à une liste de points, les sommets et des triangles. Cette liste décrit les coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) des points.

La connectivité correspond à une liste de faces (i.e. : les connexions entre les sommets) [12].

Sommets (géométrie)	Faces (connectivité)
1 (x1 ; y1 ; z1)	F1 (1 ; 3 ; 4)
2 (x2 ; y2 ; z2)	F2 (1 ; 2 ; 4)
3 (x3 ; y3 ; z3)	F3 (2 ; 4 ; 5)
4 (x4 ; y4 ; z4)	F4 (3 ; 4 ; 6)
5 (x5 ; y5 ; z5)	F5 (4 ; 6 ; 7)
6 (x6 ; y6 ; z6)	F6 (4 ; 7 ; 5)
7 (x7 ; y7 ; z7)	

Tableau II.1 : Les deux composantes principales du maillage

Dans le tableau ci-dessus, la première colonne correspond aux coordonnées des sommets (i.e. la géométrie), et la deuxième correspond aux sommets qui composent chaque face (la connectivité).

Définition mathématique

On dit qu'un ensemble de triangles constitue une triangulation **M** de la surface **D** qu'ils représentent si les conditions suivantes sont vérifiées [12] :

a. La surface **D** est l'union de **N** triangles :

$$D = \bigcup_{mi \in N} mi \text{ (} mi \text{ étant un triangle quelconque)}$$

b. Quel que soit les triangles mi appartenant à la Triangulation **M**, différent de l'ensemble vide :

$$\forall mi \in M, mi \neq \emptyset$$

c. L'intersection de deux triangles (mi , mj) appartenant à une triangulation M donne soit : ensemble vide, un point ou un côté :

$$\forall mi \in M, mj \in M, mi \cap mj \equiv \begin{cases} \emptyset \\ 1 \text{ point } (mi \neq mj) \\ 1 \text{ côté commun} \end{cases}$$

4. Méthodes de génération des maillages de surfaces 3D

Les surfaces d'objets tridimensionnels ont un rôle très important dans les applications graphiques actuelles. Elles sont représentées par un maillage polyédrique.

La représentation de ces surfaces par des maillages permet de faire la compression, la visualisation et le transfert des objets 3D efficacement, pour aboutir à un tel maillage triangulaire plusieurs méthodes peuvent être utilisées

4.1. Méthode de Hoppe

A travers une série de trois articles, Hoppe et Al, développèrent la première méthode de reconstruction de surface arbitraire à partir d'un nuage de points non structuré.

Cette approche se résume en trois phases [14] :

- **Reconstruction** : Cette phase de reconstruction de maillage primaire à partir d'un nuage de points se découpe en deux étapes :
 - Création d'une iso-surface approximant le nuage de points : pour cela un plan tangent est estimé pour chaque point selon son voisinage, et l'iso valeur calculée en tout point de l'espace est la distance signée au plan tangent du point du nuage le plus proche.
 - Génération d'un maillage à partir de cette surface via une variante de l'algorithme de générations des maillages.
- **Optimisation du maillage** : Cette phase consiste à réduire le nombre de triangles issus de la première phase ; en équilibrant le rapport entre une représentation minimale et une bonne approximation du nuage de points en se basant sur les techniques de compression.
- **Génération d'une surface de subdivision** : Cette dernière phase consiste à générer une surface de subdivision, minimisant l'énergie avec le maillage issu de la deuxième phase, une modification du schéma de subdivision est proposée, permettant de diminuer localement l'ordre de continuité de la surface, et de représenter les arêtes vives. Si l'angle entre deux faces adjacentes est inférieur à un seuil prédéfini, l'arête commune est marquée comme vive, et un masque spécial de subdivision sera appliqué [14].

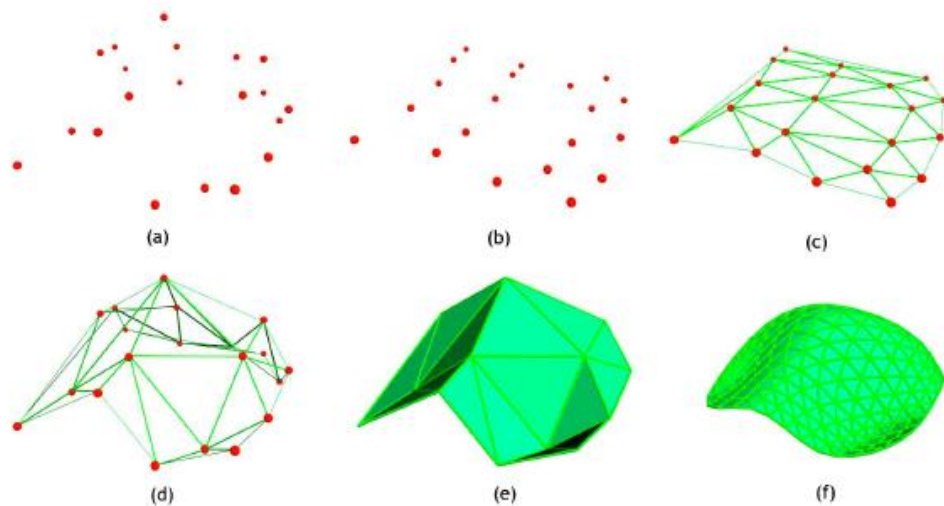


Figure II.3 : Exemple de reconstruction par la méthode de Hoppe

4.2. Approche basée sur le diagramme de Voronoï

Il représente une décomposition d'un espace métrique en cellules (régions adjacentes), déterminée par les distances à un ensemble discret d'objets de l'espace, en général un ensemble discret de points. Dans le plan les cellules sont appelées polygones de Voronoï ou polygones de Thiessen, et dans l'espace polyèdres de Voronoï [15].

De manière plus générale, il existe toute une famille d'algorithmes générant des surfaces explicites (le plus souvent une collection de polygones structurée) à partir de nuages de points.

Afin de générer le maillage, la plupart de ces approches commencent par estimer la topologie de l'ensemble de points à l'aide de son diagramme de Voronoï.

Le diagramme de Voronoï est un partitionnement de l'espace en cellules. Soit p un point de l'ensemble P . La cellule associée à p représente l'ensemble des points de l'espace qui sont plus proches de p que de tout autre point de P .

Le diagramme de Voronoï est habituellement utilisé en deux ou trois dimensions. Il est la structure topologique d'un nuage de points, et notamment fournit la notion de voisinage d'un point : p est voisin d'un point q de P si et seulement si leurs cellules de Voronoï sont adjacentes [15].

Une fois le diagramme de Voronoï établie, on peut construire son dual géométrique. Is Triangulation de Delaunay, comme montré sur la figure II.2. Il s'agit d'un ensemble de triangles en 2D. ou de tétraèdre en 3D.

Le noyau de Delaunay est une méthode permettant d'insérer un point dans une triangulation en modifiant localement la topologie de la triangulation existante tout en

maintenant le critère de Delaunay. C'est pourquoi les méthodes utilisant le noyau de Delaunay sont qualifiées d'incrémentales.

Une triangulation de Delaunay a les propriétés suivantes [15] :

- Le maillage de Delaunay interpole l'ensemble de points de P ;
- Une arête entre deux points de P existe si et seulement si leurs cellules de Voronoï sont adjacentes ;
- Elle maximise l'angle minimal entre deux arêtes ayant un sommet en commun (bon équilibre du maillage) ;
- Le cercle circonscrit d'un triangle de Delaunay ne contient aucun autre point de P.

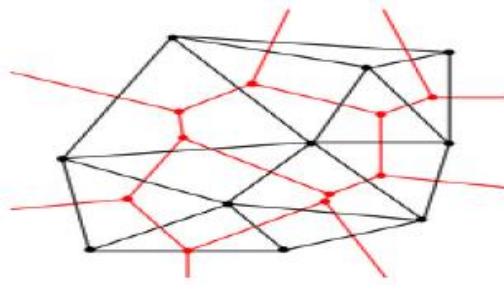


Figure II.4 : Diagramme de Voronoï (en rouge) et sa triangulation de Delaunay (en noir)

5. Adaptation de maillages

Il arrive qu'on ne sache pas construire un maillage avec les propriétés optimales ou qu'on souhaite réutiliser un maillage dans un autre contexte que celui prévu au départ.

Dans ces cas, une adaptation est appliquée au maillage existant de manière à améliorer ses propriétés.

Il peut s'agir d'affiner le maillage là où une concentration de nœuds donnée, de le simplifier, ou de modifier la position des nœuds pour améliorer la forme des éléments.

5.1. Raffinement

La procédure de raffinement est appelée plusieurs fois pendant un calcul, pour conserver un maillage adapté, en permanence, elle est basée sur l'ajout de nœuds dans le maillage de manière à rendre le traitement sur le maillage plus précis [16].

Pour les maillages triangulaires, les méthodes de raffinement les plus connues et les plus utilisées dans le domaine de la simulation exploitent le noyau de Delaunay.

5.2. Déplacements de nœuds

La construction et le raffinement d'un maillage nécessitent la plupart du temps un post traitement car les algorithmes produisent malgré tous des défauts que les méthodes d'optimisation réduisent considérablement en peu de temps.

Ces défauts proviennent le plus souvent de la difficulté à construire de nouveaux points de manière à satisfaire au mieux des propriétés parfois contradictoires sur le maillage. Pour améliorer le maillage, un déplacement des nœuds est alors appliqué de manière à rendre plus régulières la répartition des nœuds et, par suite, la forme des éléments [16].

La méthode la plus simple pour rendre la forme des éléments plus régulière, est de chercher à placer chaque sommet au barycentre de ses voisins. Chaque sommet est traité une fois, puis le processus recommence jusqu'à ce que le déplacement de chaque sommet soit inférieur à un seuil donné ou qu'un nombre d'itérations fixé à l'avance soit atteint. Le plus souvent, les points ne sont déplacés que d'une fraction de la distance entre la position actuelle et le barycentre.

Cette méthode dite du Laplacien, possède des inconvénients, dont celui de produire des éléments de mauvaise qualité voire des éléments inversés dans les régions concaves.

5.3. Simplification de maillage

La simplification de maillage consiste à produire, à partir d'un maillage "High-poly" avec un grand nombre de primitives, un maillage "low-poly" qui approche le premier avec un nombre plus réduit de primitives, en vue d'accélérer différentes tâches (typiquement le rendu graphique d'une image à partir du maillage).

Pour afficher rapidement le maillage est simplifié par réduction du nombre de triangles. Il existe différents algorithmes utilisés pour simplifier un maillage constitué de facettes triangulaires en cherchant à minimiser une énergie donnée. La seule opération de simplification autorisée est la suppression d'une arête.

Ces méthodes d'adaptation de maillage ont pour vocation de modifier un maillage existant pour qu'il satisfasse mieux un certain nombre de contraintes [16].

6. Format d'objets 3D

Pour représenter un objet 3D il faut au minimum une description [17] :

- La topologie de l'objet, sa forme, sa taille et sa complexité.
- Des attributs de représentation : couleurs, textures (nature et position), qualité photométrique de sa surface, transparence.
- Des attributs dynamiques s'il est animé : capacité de collision avec d'autres objets, articulations et contraintes, etc ...

Les premiers formats standard de fait ont été des formats adaptés à la CAO : l'objet est défini à l'aide de facettes ou de surfaces analytiques. Il suffit de définir son origine puis les coordonnées caractéristiques des éléments dans l'espace à trois dimensions [17].

Actuellement, dans le monde professionnel, il n'y a pas de format unique mais plutôt des formats plus ou moins utilisés selon le type d'application.

6.1. Les différents formats des objets 3D

La plupart des modeleurs 3D savent plus ou moins bien lire (Import) et créer (Export) plusieurs formats : c'est un critère de choix important. On va citer dans ce qui suit les formats les plus répandus.

6.1.1. DXF (Format d'échange de dessins)

DXF, sigle de Drawing eXchange Format, est un format de fichier créé par la société Autodesk servant à échanger des fichiers DAO ou CAO entre systèmes CAO n'utilisant pas le même format de fichier natif. Il a été conçu à l'origine pour représenter les modèles 3D créés avec AutoCAD [18].

Les fichiers DXF peuvent être de format ASCII (DXF) ou binaire (DXB).

DXF est un format de fichier utilisé pour le transfert de données du type vecteur. Il contient de l'information pour la visualisation des données graphiques et est supporté par presque tous les logiciels graphiques. Il y a beaucoup de méthodes pour enregistrer les données des attributs des objets graphiques par le format DXF et aussi pour lier des objets DXF à des attributs externes [18].

Dans ce format, un objet est une suite d'entités nommées et constituées de liste de points X, Y, Z. Par indexation, on constitue des facettes triangles ou des lignes qui s'appuient sur ces points.

6.1.2. Open Inventor

Si le format DXF était suffisant pour du dessin technique il était totalement inadapté à la réalité virtuelle. Dans les années 1990, la société Silicon Graphics (constructrice de station graphique 3D) publia le format Inventor qui comportait la majorité des éléments nécessaires.

C'est une bibliothèque logicielle développée à l'origine par la société Silicon Graphics (IRIS Inventor) pour permettre de gérer des graphes de scènes en trois dimensions. Cette bibliothèque, orientée objet et écrite en C++, est capable de gérer son propre format natif de description des scènes le format Inventor considéré comme étant l'ancêtre de VRML (leurs syntaxes respectives sont d'ailleurs similaires) [19].

Ce format évolua vers le format VRML qui a été normalisé.

6.1.3. Le Virtual Reality Modeling Language (VRML)

Le Virtual Reality Modeling Language ou "Virtual Reality Markup Language" est un langage de description d'univers virtuels en trois dimensions mis au point en 1994. Ce langage interprété est une norme internationale de l'ISO et le CEI (ISO/CEI 14772-2) depuis 1995. Les fichiers VRML ont habituellement pour extension ".wrl" [20].

En fait, c'est à proprement parler un langage de présentation et non de programmation, puisque comme pour le langage HTML par exemple, un fichier VRML ne contient généralement pas une suite d'instructions mais plutôt les informations permettant au visionneur d'afficher ensuite les éléments (formes, senseurs, lumières, etc.)

Présenté lors de la World Wide Web Conférence de 1994. VRML n'est pas l'œuvre d'un unique programmeur, mais plutôt le résultat de la collaboration de plusieurs professionnels de la 3D, dont entre autres Mark Pesce, Tony Parisi, Gavin Bell (Silicon Graphics) et Paul Strauss (Silicon Graphics) [20].

Les programmes VRML peuvent décrire des formes simples (points, lignes, polygones) ou complexes (sphères, cubes, cônes, cylindres ...), du texte, des images, des animations, des éclairages, des sons, des hyperliens, ainsi que leur agencement dans l'espace, leur texture, leur couleur, leur matériau ...

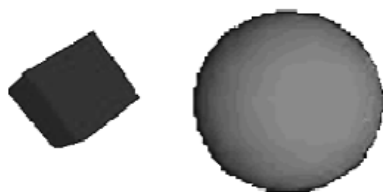


Figure II.5 : Exemple d'images 3D en VRML

6.1.4. OBJ

Est un format de fichier contenant la description d'une géométrie 3D. Il a été défini par la société Wavefront Technologies dans le cadre du développement de son logiciel d'animation « Advanced Visualizer ». Ce format de fichier est ouvert et a été adopté par d'autres logiciels 3D pour des traitements d'import / export de données.

Les formes géométriques peuvent être définies par des polygones ou des surfaces lisses telles que des surfaces rationnelles et non rationnelles [21].

6.1.5. Spécification d'échange graphique initiale (IGES)

C'est un format d'exportation de données graphiques, IGES est directement importable dans les logiciels de CAO. Ce type de format d'export présente une universalité assez forte dans le domaine des CAO 3D orientées surfacique et filaire. L'export porte ici sur la définition mathématique de la surface qui conserve ainsi toutes ses propriétés initiales.

6.1.6. VTK

Ce sont des types de fichiers utilisés dans la librairie VTK (The Visualization Toolkit) c'est une librairie graphique gratuite, portable, orientée objet pour développer des logiciels d'infographie, de visualisation ou de traitement d'images.

Elle fournit une grande variété de structures de données codant des ensembles utiles en visualisation comme les ensembles de points.

De plus elle apporte une grande quantité de procédures de lecture écriture en de très nombreux formats pour permettre l'importation et l'exportation des formats de codages usuels (PLOT3D, VRML...) Afin de traiter efficacement ces données, des filtres sont disponibles agissant sur la géométrie ou les données numériques des maillages Cette partie de la librairie est particulièrement bien fournie apportant un choix considérable et surtout efficace de méthodes [22].



Figure II.6 : Exemple d'image 3D en format VTK

Actuellement VTK est distribuée comme une surcouche d'OpenGL pour se plier au standard et assurer une grande portabilité.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux méthodes qui permettent la reconstruction d'un maillage à partir d'un nuage de points dispersés, et les méthodes d'adaptation d'un maillage.

Ensuite nous avons fait un tour sur les différents formats d'objets tridimensionnels. Il existe une palette impressionnante des types de fichier concernés par la 3D, cependant nous avons vu juste une partie.

Dans le prochain chapitre, nous passerons à la segmentation d'objets 3D qui utilisée dans le projet.

Chapitre 03

Segmentation d'objet 3D

1. Introduction

La segmentation de maillage 3D est apparue comme une problématique importante du fait de sa complexité de mise en œuvre et de la multitude d'applications qui en sont dépendantes.

Un maillage, et plus généralement une forme, peut être considérée d'un point de vue purement géométrique ou bien d'une manière plus orientée sémantique.

La façon d'interpréter un maillage est liée à l'application visée et amène à une segmentation en patches surfaciques ou bien en parties significatives. Dans le premier cas, le maillage est découpé en patches caractéristiques qui peuvent respecter des contraintes de courbures aux frontières, de planéité, de convexité, etc.

Les algorithmes se basent sur l'information géométrique de bas niveau, telle que la courbure pour définir des segments c'est-à-dire des régions qui sont géométriquement homogènes.

Dans le deuxième cas, l'objectif est de détecter des parties significatives de l'objet. Les algorithmes dits sémantiques visent à distinguer les régions d'un point de vue perceptuel, en suivant des notions de haut niveau définies dans la théorie de la perception humaine.

Ce type d'approche est particulièrement utile pour les applications de déformation, et d'animation d'objets où la décomposition doit être significative.

La segmentation de maillage consiste à subdiviser une surface polygonale en différentes parties présentant des caractéristiques identiques. Cette opération est devenue un outil de prétraitement nécessaire à de nombreuses applications telles que la reconnaissance de forme, compression, etc.

Il existe dans la littérature un grand nombre d'algorithmes de segmentation permettant le traitement des modèles 3D.

Nous parler deux parties principales de la segmentation d'objet 3D. La première correspond à une généralité sur la segmentation, et la deuxième sur les méthodes utilisées dans la segmentation d'objet 3D.

2. Définition de la segmentation

La segmentation d'image est une opération de traitement d'images consistant à détecter et rassembler les pixels suivant des critères, notamment d'intensité ou spatiaux, l'image apparaissant ainsi formée de régions uniformes [23].

Classiquement, on peut définir la segmentation comme étant une partition de l'image

(I) en un nombre (**K**) de sous-ensembles (**R_i**), appelés régions.

La détermination automatique du nombre de régions **K** est une vraie problématique.

Une segmentation est paramétrée par un prédicat d'homogénéité $P: R \rightarrow \{\text{vrai}, \text{faux}\}$ indiquant si une région est homogène d'après le critère testé. Afin que le prédicat soit consistant, il est nécessaire que chaque sous-ensemble d'une région homogène soit homogène. Un algorithme de segmentation est donc paramétré par un prédicat **P** et une image. Il retourne une partition de l'image en régions homogènes.

Donc La segmentation est un traitement de bas niveau qui consiste à créer une partition de l'image **A** en sous-ensembles **R_i**, appelés régions tels qu'aucune région ne soit vide, l'intersection entre deux régions soit vide et l'ensemble des régions recouvre toute l'image. Une région est un ensemble de pixels connexes ayant des propriétés communes qui les différencient des pixels des régions voisines [23].

3. Méthodes de segmentation

Comme cité précédemment la segmentation de maillage 3D est apparue comme une problématique importante du fait de sa complexité de mise en œuvre et de la multitude d'applications qui en sont dépendantes.

Pour chaque catégorie de segmentation, de nombreuses méthodes ont été développées, nous discutons dans ce qui suit des méthodes apparues récemment et qui bénéficient d'un rayonnement important dans la communauté.

3.1. Segmentation de maillages triangulaires et rectification directionnelle de frontières basées sur les tenseurs de courbure

Cette méthode proposée par « G. L'avoué, F. Dupont, A. Basket » utilise tout ce que peut contenir une maille triangulaire, en occurrence, les vertex et les triangles. Ceci permet d'avoir une source d'information assez fiable et assez complète pour pouvoir atteindre une segmentation que soit correcte de l'objet 3D [24].

Algorithme générale

Décomposition de maillages triangulaire en patches surfacique de courbure quasi-constante et connue délimitée par des frontières propres et régulière. L'algorithme est particulièrement adapté aux pièces issues de la CAO.

Notre approche se décompose en deux étapes (voir Figure III.1) :

- **La segmentation en régions surfaciques, basée sur la courbure** : Une étape de prétraitement identifie les arêtes et les sommets aigus. Cette information est nécessaire pour la suite de l'algorithme, en particulier dans le cas des maillages CAO

triangulés de façon optimale. Les sommets sont classifiés en clusters selon leurs valeurs de courbure principale $K_{\min}$ et $K_{\max}$. Un algorithme de croissance de régions est ensuite effectué réunissant les triangles en régions connexes à partir des clusters de courbure des sommets. Un graphe d'adjacence des régions est alors construit et réduit afin de fusionner les régions semblables selon plusieurs critères (similitude de courbure, taille et périmètre commun).

- **La rectification de frontières :** La méthode de rectification se compose de deux principales étapes : premièrement, les arêtes frontières sont extraites et pour chacune d'entre elles, un score de justesse est calcul. Puis, à partir des arêtes frontières estimées correctes, les frontières finales des patches sont extraites par un mécanisme de suivi de contours.

A partir de ce score, les arêtes estimées correctes sont marquées et servent de base pour un algorithme de suivi de contour qui extrait les frontières correctes finales de l'objet [14].

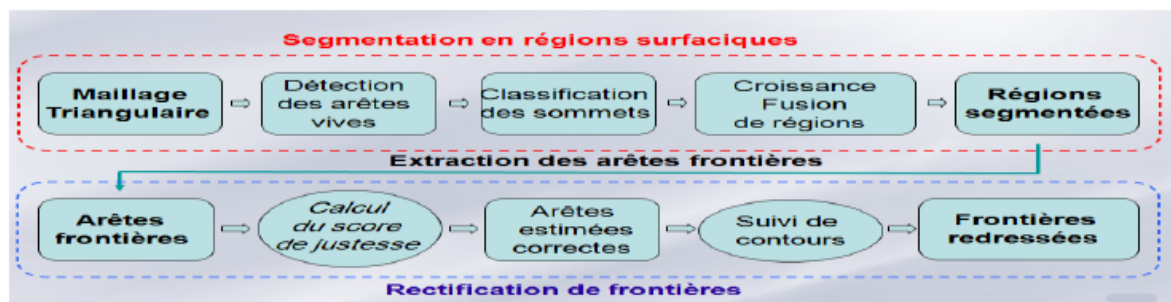


Figure III.1 : Les deux étapes de l'algorithme : la segmentation en régions et la rectification de frontières.

C'est une méthode simple et efficace de classification, détecte les transitions de courbure et ne découpe pas seulement l'objet le long de ses arêtes vives ou de forte courbure.

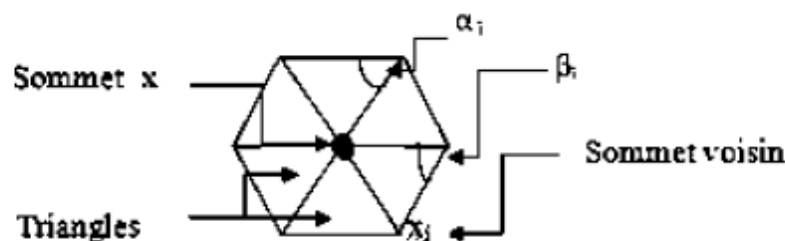


Figure III.2 : Un sommet et les triangles entourant ce dernier

Les valeurs de courbures discrètes d'un sommet sont calculées comme suit :

La courbure discrète moyenne d'un sommet X est définie par :

$$K(X) = \frac{1}{2A} \sum_{j=1}^f (\cot(\alpha_j) + \cot(\beta_j))(X_j - X)$$

Le mécanisme de croissance de régions extrait des régions de triangles homogènes en termes de courbure de manière très efficace, même pour les objets CAO, que peu de méthodes existantes sont capable de traiter.

La méthode de rectification de frontières basée sur l'orientation des tenseurs de courbure, permet de supprimer les artefacts généralement produits par les algorithmes de segmentation.

La méthode de rectification est indépendante de la segmentation en région et peut être employée comme post-processus à n'importe quel algorithme de décomposition ou détection de contours [24].

3.2. Ligne de Partage des Eaux (LPE)

En traitement d'images, la segmentation par ligne de partage des eaux désigne une famille de méthodes de segmentation d'image issues de la morphologie mathématique qui considèrent une image à niveaux de gris comme un relief topographique, dont on simule l'inondation [25].

Est une technique de segmentation par croissance de régions inspirée des bassins versants pour les rivières. L'algorithme travaille sur l'image de gradient représentant l'image. L'image de gradient associe à chaque élément de l'image une valeur numérique exprimant le gradient entre les valeurs des pixels de l'image. Les graines sont sélectionnées de manière automatique comme étant des minimums locaux de l'image de gradient (c'est-à-dire que tous les voisins d'une graine ont une valeur de gradient supérieure ou égale).

Donc, la ligne de partage des eaux est une méthode de segmentation largement utilisée sur les images 2D.

Elle se place dans un contexte où le graphe à partitionner est considéré comme un relief et les sommets sont positionnés à une certaine hauteur.

Ce relief est plongé progressivement dans de l'eau et des inondations sont simulées, à partir des minima (vertex ou plateaux n'ayant pas de voisin de niveau inférieur, voir figure III.1) Des bassins d'eau se forment et lorsque deux bassins se rencontrent, une LPE est créée.

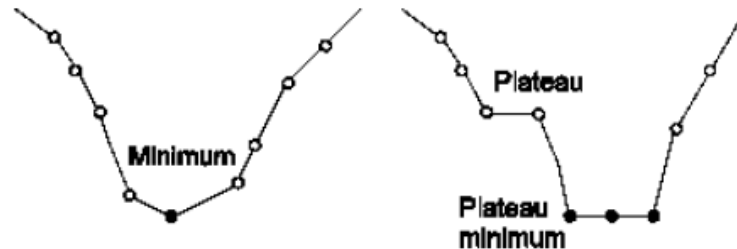


Figure III.3 : Minimum et plateaux

Chaque graine détermine un nouveau bassin. Les éléments de l'image sont ensuite attribués à la graine de manière à remplir les bassins. Les frontières entre deux bassins sont appelées crêtes. Ce type de segmentation produit généralement une sur segmentation de l'image, c'est-à-dire qu'il y a beaucoup de régions et qu'il faut en fusionner afin d'obtenir des objets ayant un sens. La Figure III.4 présente un exemple de segmentation par ligne de partage des eaux d'une image 2D [25].



Figure III.4 : Exemple de segmentation par ligne de partage des eaux d'une image 2D : (a) image originale ; (b) image correspondant à la segmentation par ligne de partage des eaux de l'image originale.

3.2.1. Adaptation à la 3D

Deux approches sont alors possibles pour segmenter la surface en des bassins versants :

- La première est une approche "ascendante" (voir la figure III.5a) où les germes correspondent aux minima locaux de la fonction hauteur. Il s'agit d'inonder progressivement ces minima locaux jusqu'à atteindre les crêtes où se rencontrent les bassins voisins.

- La deuxième est une approche "descendante" (voir la figure III.5b) où une goutte d'eau coule dans la direction de la moindre résistance pour atteindre un minimum. Le chemin parcouru par cette goutte sera marqué par la même étiquette que le minimum atteint

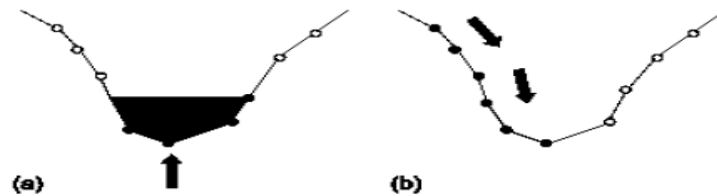


Figure III.5 : Stratégies de l'approche de la ligne de partage des eaux.

(a) Approche « ascendante », (b) Approche « descendante ».

Le résultat de la LPE souffre généralement de sur-segmentation. Il est possible de contrôler ce phénomène à l'aide de marqueurs, d'un seuillage des régions ou encore de la segmentation hiérarchique.

3.2.2. Sur-segmentation

L'utilisation de la ligne de partage des eaux seule ne permet pas réellement une bonne segmentation car beaucoup trop de régions sont détectées. Il existe deux principales méthodes pour limiter cette sur-segmentation : la segmentation hiérarchique et l'utilisation de marqueurs [14].

- **Segmentation hiérarchique** : L'approche hiérarchique peut consister à générer un arbre de régions à partir du résultat de la LPE. Les régions et les lignes de partages des eaux sont d'abord indexées, puis le processus de segmentation hiérarchique fait fusionner les régions dont les frontières communes sont les plus faibles. Il en résulte un arbre dans lequel il est possible d'explorer les différents niveaux de fusion des régions. La figure III.3 propose deux segmentations avec des niveaux de fusions différents. Le modèle de gauche contient 208 régions et celui de droite 57 régions.



Figure III.6 : Segmentation hiérarchique à partir de la ligne de partage des eaux. Modèle

Cow avec 208 régions à gauche et 57 régions à droite.

- **Marqueurs** : Ils vont définir les sources depuis lesquelles l'algorithme de la LPE va simuler la montée des eaux. Afin d'éviter la création de bassins au niveau des minima locaux, il est nécessaire d'effectuer une modification de l'homotopie de la structure d'entrée qui consiste à mettre les zones marquées au niveau le plus bas de la structure.

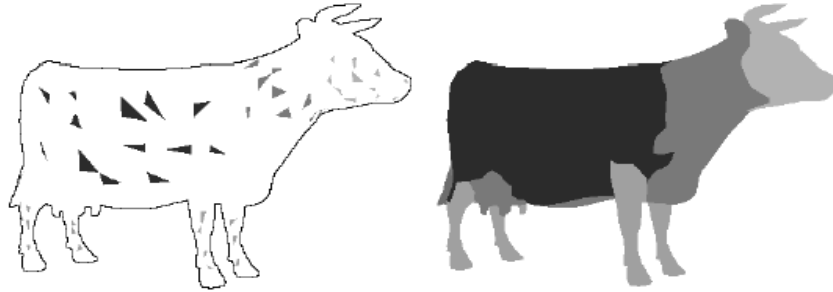


Figure III.7 : Marqueurs et résultat de la LPE.

Cette technique fournit des caractéristiques très intéressantes en termes de qualité de segmentation, de robustesse et de temps de calcul, aussi bien sur des objets industriels que naturels.

3.2.3. Critère de courbure

Plusieurs approches ont été explorées pour obtenir une estimation de la courbure : Meyer et al, ont proposé une étude intéressante sur les opérateurs discrets pour estimer la courbure et Mangan et Whitaker ont mis en avant l'efficacité de la norme de la matrice de covariance. Cette dernière méthode s'avère la plus adaptée pour caractériser la courbure des vertex qui correspond au critère de hauteur pour la ligne de partage des eaux [6].

- **La matrice de covariance** : Le calcul de la courbure par la matrice de covariance repose sur un concept statistique qui consiste à évaluer les variances et covariances des coordonnées des différents vertex appartenant au voisinage. Pour un vertex donné, la courbure C'est défini par la nomme de la matrice de covariance :

$$C = \|M\| \text{ avec } M = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{uu}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (u_i + \bar{u})^2$$

$$\sigma_{uv}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (u_i + \bar{u})(v_i + \bar{v})$$

Où σ_{uu} représente l'écart type des coordonnées en u du voisinage du vertex, et σ_{uv} représente la racine carrée de la covariance entre les composantes en u et les composantes en v. N correspond au nombre de triangles associés au vertex et $[x_t \ y_t \ z_t]^T$ est le vecteur de la normale du triangle t.

3.2.4. Génération des marqueurs

Le marquage des régions qui vont servir de source d'inondation pour la LPE est réalisé à partir du squelette du modèle. La génération du squelette fait intervenir plusieurs procédés tels que la transformation du maillage en contour fermé de voxels, le remplissage du volume (voxelisation) et enfin la squelettisation du modèle [6].

- **La voxelisation** : Brunner et Brunnet ont proposé une méthode efficace pour stocker les voxels et réaliser la voxelisation sur un maillage fermé. La structure qui contient les voxels ne correspond pas à une image 3D mais à un plan ou tableau en deux dimensions qui, pour chaque case, intègre des couples de voxels. Ces voxels peuvent être associés aux entrées et sorties du rayon qui traverserait l'objet suivant une direction perpendiculaire au plan.

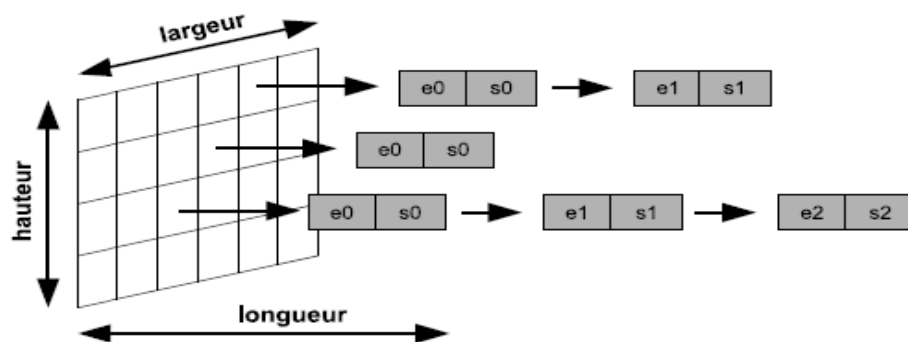


Figure III.8 : Structure de stockage (matrice de stockage) des voxels. Seuls les couples de voxels (entrée/sortie) sont référencés

La voxelisation revient ici à déterminer l'intersection du rayon avec les faces du maillage. Le rayon entre dans l'objet puis en ressort, il peut y entrer à nouveau et en ressortir.

Karabassi et al 1999, ont proposé un algorithme très rapide de voxelisation mais les parties cachées ne sont pas détectées, il est adapté aux modèles 3D communément utilisés en segmentation de maillages et il fait la Structure de données adaptée à notre algorithme de squelettisation.

La figure III.9 ci-dessous montre la représentation de la voxelisation :

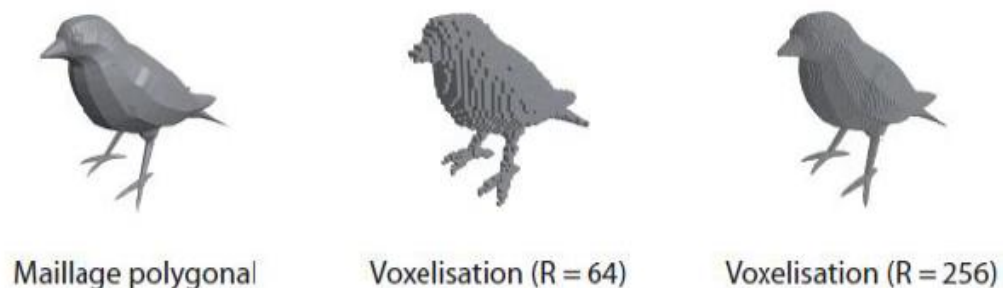


Figure III.9 : La représentation de la voxelisation

- **La squelettisation** : Pour extraire le squelette de voxels, l'algorithme de squelettisation de "Palágyi" est utilisé qui présente des avantages de rapidité et d'efficacité en terme d'érosion des différentes couches du volume.

Cet algorithme supprime successivement les voxels dans l'image 3D selon certaines contraintes géométriques. Pour réaliser une érosion symétrique, six érosions sont successivement appliquées sur les voxels de surface dans les directions Haut, Bas, Nord, Sud, Est et Ouest.

A chaque érosion, seul les voxels directement visibles à partir de la direction donnée sont testés si ceux-ci peuvent être enlevés sans que leur suppression ne modifie la topologie de l'objet, alors ils sont rangés dans une liste sans être encore retirés et sont considérés comme points simples.

Cette liste est ensuite consultée et ces voxels peuvent être supprimés si leur simplicité n'a pas été affectée par la suppression des autres points simples. Un Voxel p de l'objet est appelé point simple si sa suppression ne modifie pas la topologie de l'objet.

L'algorithme de squelettisation fait intervenir une fonction qui réalise la suppression successive des points simples, suivant l'ordre Haut, Bas, Nord, Sud, Est et Ouest jusqu'à l'obtention du squelette. A chaque itération, seuls les voxels de surface par rapport à les directions données sont traités.



Figure III.10 : Construction de courbe squelette par contraction de maillage

- **Création du marquage** : En considérant le squelette du modèle comme un graphe, il apparaît deux principaux types d'éléments : les arcs et les sommets. Les arcs contiennent tous les voxels étant connectés à un ou deux autres voxels et les sommets correspondent aux voxels de jonction qui sont connectés à au moins trois autres voxels.

Le marquage peut commencer par l'attribution d'un label différent à chaque arc. Lors de la création du contour fermé de voxels, les voxels de surface deviennent liés aux faces du maillage qui leur correspondent [5].

Le squelette du modèle contiendra alors des voxels liés aux faces du maillage et les labels des voxels du squelette pourront être directement transmis aux faces. Les faces qui sont liés à des voxels ambigus ne seront pas labellisées à cette étape mais le seront après la segmentation par ligne de partage des eaux. (voir figure III.11)

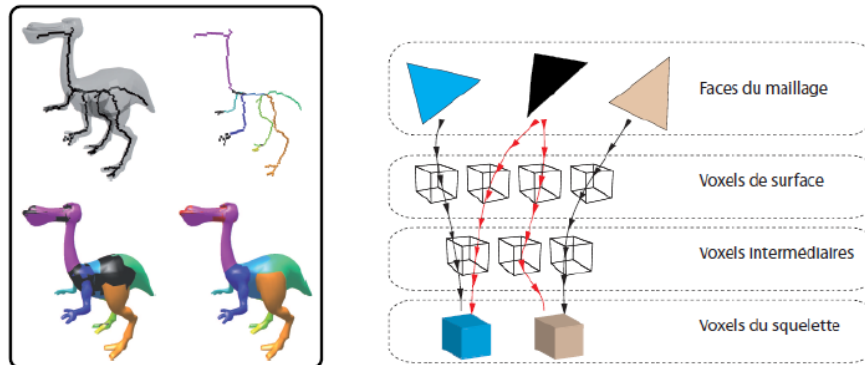


Figure III.11 : La création du marquage

On conclusion, on peut la schématiser cette méthode par la figure ci-dessous [14] :

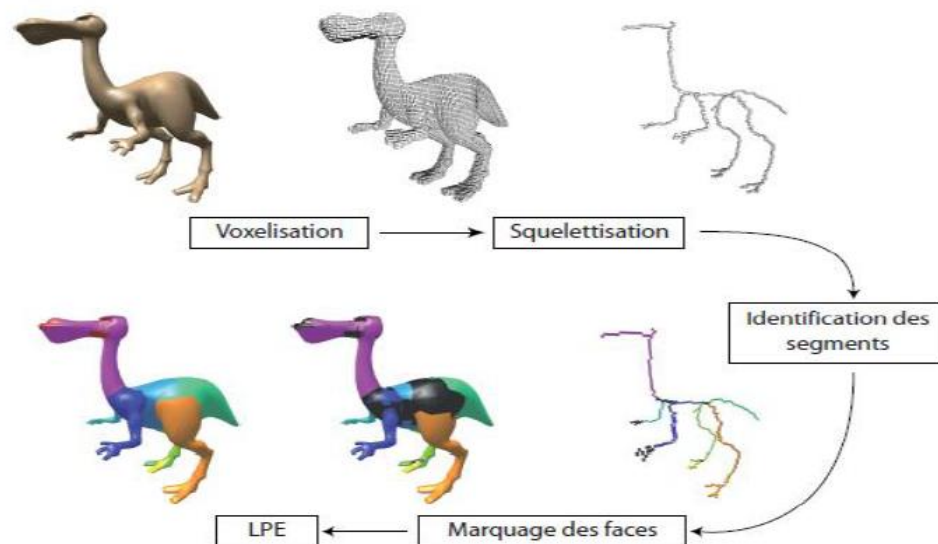


Figure III.12 : Les différentes étapes de la LPE

3.3. Croissance de régions

La croissance de régions représente une des méthodes les plus intuitives pour segmenter un maillage.

Cette technique consiste à faire progressivement grossir les régions autour de leur point de départ.

L'algorithme se compose de deux étapes [26] :

1. Trouver les points de départ des régions.
2. Faire grossir les régions par agglomération des pixels voisins.

3.3.1. Points de départ (seeds)

Le choix des points de départ est la partie critique de l'algorithme. En effet, l'étape de croissance va utiliser une mesure de similarité pour choisir les pixels à agglomérer.

Si le point de départ est situé dans une zone non homogène, la mesure de similarité va produire de fortes variations et la croissance va s'arrêter très tôt.

Par conséquent, il convient de choisir les points de départs dans des zones les plus homogènes possibles [26].

3.3.2. Croissance (croissance)

Cette étape a pour objectif de faire grossir une région en agglomérant des pixels voisins. Les pixels sont choisis afin de maintenir l'homogénéité de la région. Pour cela, nous devons définir un indicateur d'homogénéité. Les pixels voisins sont ajoutés à la région si l'indicateur d'homogénéité reste vrai.

La croissance s'arrête lorsqu'on ne peut plus ajouter de pixels sans briser l'homogénéité [26].



Figure III.13 : Etapes d'une segmentation du système Shuffler. De gauche à droite : l'enveloppe convexe de la région candidate (le modèle entier), une première face germe, son segment correspondant, les enveloppes convexes du segment et des régions candidates suivantes, de nouvelle face germes et la segmentation finale.

3.4. Système Multi-Agents

En informatique, un système multi-agent (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents (un processus, un robot, un être humain, une fourmi, etc.) actifs dans un certain environnement et interagissant selon certaines règles. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome, ce qui exclut un pilotage centralisé du système global [27].

Le système multi-agents (SMA) a pour objet de réaliser le processus d'extraction par la fusion de comportements de coopération et de compétition associés à des agents spécifiques, ces agents étant liés à différents objets de la scène. Par comparaison aux autres systèmes existants en segmentation d'image, l'originalité de l'approche proposée porte sur la détection simultanée de plusieurs objets et dans des temps de calcul rapides face à de grands volumes de données à traiter. Cette approche est caractérisée par un couplage de

processus de croissance de régions 3D avec un apprentissage supervisé au sein d'un système multi-agents.

Le système multi-agents produit une segmentation d'images 3D basée sur une étape initiale de sélection, durant laquelle l'utilisateur pointe interactivement un ou plusieurs points germes à l'intérieur de chacun des objets d'intérêt.

Le SMA est composé [28] :

- D'un ensemble d'agents purement situés appelés agents "Workers", qui coopèrent et entrent en compétition de manière à, par croissance de région, maximiser leur "territoire image" (selon la vérification d'un critère de texture et d'intensité).
- D'un agent purement communicant (appelé agent "Contrôleur") qui coordonne les comportements de tous les agents "Workers".
- L'architecture adoptée correspond à une organisation micro-sociale puisque la société est seulement composée de quelques agents. L'environnement est défini par le volume de voxels (l'image 3D) à segmenter et les comportements des différents agents introduits sont complètement déterministes.

La segmentation par SMA est une nouvelle méthode de segmentation 3D multi-objets basée sur un schéma multi-agents combiné avec une approche de classification supervisée et un procédé de croissance de région.

L'approche multi-objets autorise un contexte multi-agents et une implémentation compétitive qui conduisent à une amélioration qualitative et quantitative des résultats, en particulier dans les situations ambiguës [28].

4. Conclusion

La segmentation d'images est l'une des opérations les plus importantes dans le domaine de l'analyse d'images. L'objectif de cette opération est de diviser l'image en zones homogènes (régions).

La segmentation d'une image cause encore aujourd'hui beaucoup de problèmes, aucune méthode ne fonctionne pour toutes les images, il n'y a pas de garantie, pas de recette miracle !

Dans ce chapitre, nous avons cerné les objectifs de notre projet. Cette phase nous a permis de bien élaborer les patterns de segmentation utilisés pour concevoir notre système. Par la suite, nous avons passé à une description générale sur la segmentation d'objet 3D et les méthodes utilisées.

Dans le prochain chapitre, nous passerons à une description de la réalisation du projet.

Chapitre 04

Implémentation Du Projet

1. Introduction

Ce chapitre constitue la dernière étape conduisant à la réalisation de notre projet savoir l'étape d'implémentation. Celle-ci consiste à traduire le résultat obtenu lors de l'étape de segmentation en un programme exécuté sur une machine en utilisant les outils de programmation adaptés au problème à traiter.

Dans ce qui suit, nous allons décrire les composants de l'environnement de travail, ainsi que les outils d'implémentation et on donnera quelques exemples d'interfaces de notre projet puis les résultats fondamentaux.

2. Choix techniques

2.1. Le langage de programmation

Le langage utilisé dans ce code est Python.

Le projet fait appel à plusieurs bibliothèques populaires :

- **PyQt5** : pour créer l'interface graphique (fenêtres, boutons, menus, etc.).
- **VTK (Visualization Toolkit)** : pour la manipulation et la visualisation des objets 3D.
- **OS** et **SYS** : pour la gestion des fichiers et des répertoires dans le système.

Python est utilisé ici pour développer une application de traitement et d'affichage d'objets 3D avec une interface graphique.

2.2. L'environnement de développement

Il existe une multitude d'environnements de développement (IDE) qui prennent en charge les langages Java et C++, Parmi eux, seul un nombre plus restreint permet une utilisation plus rapide et efficace. Eclipse et Visual Studio offrent tous deux des outils de qualité professionnelle.

Cependant. Eclipse a l'avantage d'offrir des fonctionnalités telles que la vérification de la syntaxe en cours de frappe, ainsi que le "refactoring". Et en plus de sa portabilité c'est un logiciel gratuit contrairement à Visual Studio, donc on a écarté ce dernier comme outil de développement.

2.2.1. Présentation de l'environnement python

Python est un langage de programmation interprété et polyvalent, connu pour sa simplicité et sa lisibilité. Créé par Guido van Rossum et publié pour la première fois en 1991, il est

utilisé dans divers domaines tels que le développement web, l'analyse de données, l'intelligence artificielle, et la science des données.

Points clés :

- **Syntaxe claire et lisible** : Python utilise une syntaxe simple, ce qui le rend facile à apprendre et à lire.
- **Langage interprété** : Le code est exécuté ligne par ligne, ce qui facilite le débogage.
- **Bibliothèques riches** : Python dispose d'un grand nombre de bibliothèques et de frameworks pour divers usages (Django pour le web, NumPy pour les mathématiques, Pandas pour l'analyse de données, etc.).
- **Multiplateforme** : Python fonctionne sur différents systèmes d'exploitation, comme Windows, macOS et Linux.
- **Support communautaire** : Une grande communauté active fournit de nombreux outils, modules et ressources.

Python est largement utilisé dans l'éducation, le développement logiciel et la recherche en raison de sa facilité d'utilisation et de sa flexibilité.

2.2.2. Présentation de VTK, bibliothèque de visualisation graphique

VTK (*Visualization ToolKit* en anglais) est une puissante bibliothèque graphique permettant de visualiser de gros volumes de données 2D ou 3D.

Son grand avantage est son large spectre d'applications (du traitement de l'image à la visualisation de données volumiques) [30].

VTK a aussi un système de picking et d'interaction avec les objets 3D très avancé et utilisant divers algorithmes (sélection par frustum, pick color, etc.). Vous pouvez sélectionner des objets entiers ou des primitives graphiques (triangles, points, lignes, etc.).

Son principal défaut est que les performances de VTK s'effondrent s'il contient plus de 1000 objets 3D [30].

Notre choix s'est porté sur les fichiers de type VTK à cause de la simplicité de la structure des points 3D et des faces qui constituent l'objet tridimensionnel facilement avec les langages Tcl-Tk, Python et Java. La bibliothèque comprend plus de 1 100 classes C++. Elle a été développée à partir de 1993 au Centre de Recherche du groupe General et utilisée en premier dans le domaine médical. Par la suite ses développeurs (Will Schroeder et Ken).

2.3. Organigramme de la méthode de l'implémentation

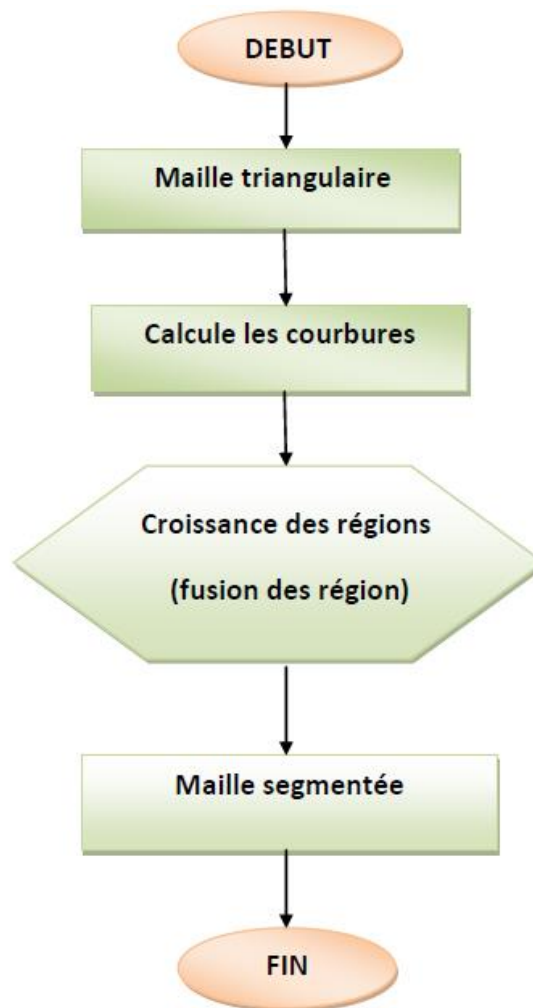


Figure IV.1 : Organigramme de la méthode implémentée

3. Fonctionnement du logiciel

Le code fourni est une application de traitement et de visualisation d'objets 3D utilisant Python avec PyQt5 pour l'interface graphique et VTK pour la gestion des objets 3D. Voici un résumé de son fonctionnement :

1. Importations et Configuration

- **Bibliothèques Importées :** Le code utilise PyQt5 pour l'interface graphique et VTK pour le traitement et la visualisation des objets 3D.

2. Classe MainWindow

- **Initialisation (__init__):** Configure la fenêtre principale, définit les dossiers pour les images 3D et ajoute des éléments à l'interface utilisateur comme le titre, la taille de la fenêtre, et les boutons de menu pour ouvrir de nouveaux fichiers ou une liste d'images.

3. Fonctions Principales

- **verify_directory(directory):** Vérifie si un répertoire existe.
- **register_image(image_path):** Déplace une image sélectionnée dans le dossier de la base de données.
- **get_saved_images():** Récupère les fichiers d'images enregistrés dans le dossier de la base de données.
- **open_new_image():** Ouvre une boîte de dialogue pour sélectionner un nouveau fichier 3D et l'affiche.
- **open_image_list():** Ouvre une boîte de dialogue pour sélectionner une image depuis le dossier local et l'affiche.
- **load_image(image_path):** Charge une image 3D pour affichage.
- **display_3d_image(file_name):** Configure une fenêtre VTK pour afficher l'image 3D lue à partir du fichier.

4. Traitement et Visualisation

- **show_triangular_filter_page():** Applique un filtre triangulaire sur le modèle 3D et affiche le résultat dans une nouvelle fenêtre.
- **corbures_calculations(triangle_filter):** Calcule les courbures du modèle 3D après application du filtre triangulaire.
- **open_classification_page(triangle_filter):** Affiche une interface pour classer les régions du modèle 3D en utilisant différentes méthodes de filtrage.
- **perform_classification(curvatures):** Effectue la classification des régions du modèle 3D en fonction de l'algorithme sélectionné.

5. Finalisation

- **close_application():** Ferme l'application lorsqu'on clique sur le bouton "Exit".

En Résumé

L'application permet à l'utilisateur de :

1. Charger et afficher des fichiers 3D (OBJ, STL, PLY).
2. Appliquer des filtres de traitement sur les objets 3D, comme le filtrage triangulaire.
3. Classer les régions du modèle 3D en utilisant différents algorithmes.
4. Gérer les images 3D locales en les enregistrant et en les récupérant depuis un dossier.

L'interface graphique est créée avec PyQt5 et la visualisation des objets 3D est réalisée avec VTK

Détails des algorithmes

1. Chargement et affichage des fichiers 3D :

- ✓ L'utilisateur peut choisir un fichier 3D (OBJ, STL, PLY) via une boîte de dialogue.
- ✓ Une fois chargé, le fichier est lu par le lecteur VTK approprié (vtkOBJReader, vtkSTLReader, vtkPLYReader), et l'objet est affiché à l'aide d'un vtkPolyDataMapper et d'un vtkActor.
- ✓ L'objet 3D est rendu dans une fenêtre avec un arrière-plan blanc.

2. Filtre de triangulation :

- ✓ Après avoir chargé l'objet, un bouton permet d'appliquer un filtre de triangulation (vtkTriangleFilter). Ce filtre convertit toutes les faces de l'objet en triangles, garantissant une structure uniforme.
- ✓ Un nouveau rendu de l'objet triangulé est affiché dans une autre fenêtre.

3. Calcul des courbures :

- ✓ Le calcul des courbures se fait à l'aide du filtre vtkCurvatures. Ce filtre peut calculer différentes formes de courbure (Gaussienne dans ce cas) pour chaque point de l'objet 3D. Cela est utile pour analyser la surface et classifier différentes régions de l'objet.

4. Classification des régions :

- ✓ Une fois la courbure calculée, un filtre de connectivité (vtkConnectivityFilter) est utilisé pour segmenter l'objet en différentes régions en fonction de leurs propriétés géométriques.
- ✓ Différents modes de classification sont disponibles : extraction de la plus grande région connectée, extraction de régions spécifiques, segmentation par régions connectées, etc.

5. Affichage des résultats :

- ✓ Les résultats de la classification sont affichés sous forme de régions colorées, chaque région ayant une couleur différente.
- ✓ Des informations sur les régions, les sommets et les faces de l'objet sont calculées et affichées sous forme de tables dans la console.

Explication des principales méthodes

- **display_3d_image(file_name)** : Charge et affiche l'objet 3D dans une fenêtre VTK.
- **show_triangular_filter_page()** : Applique un filtre de triangulation à l'objet et

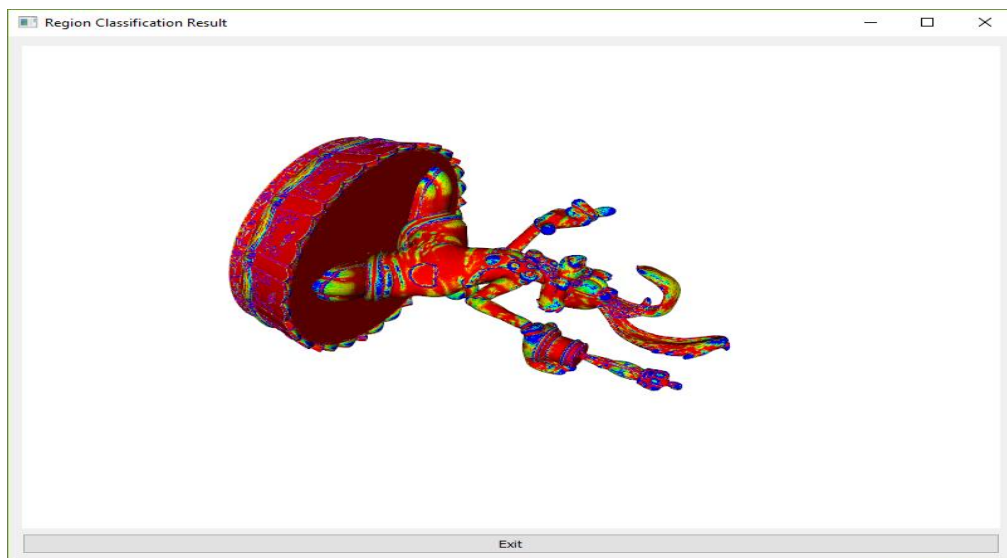
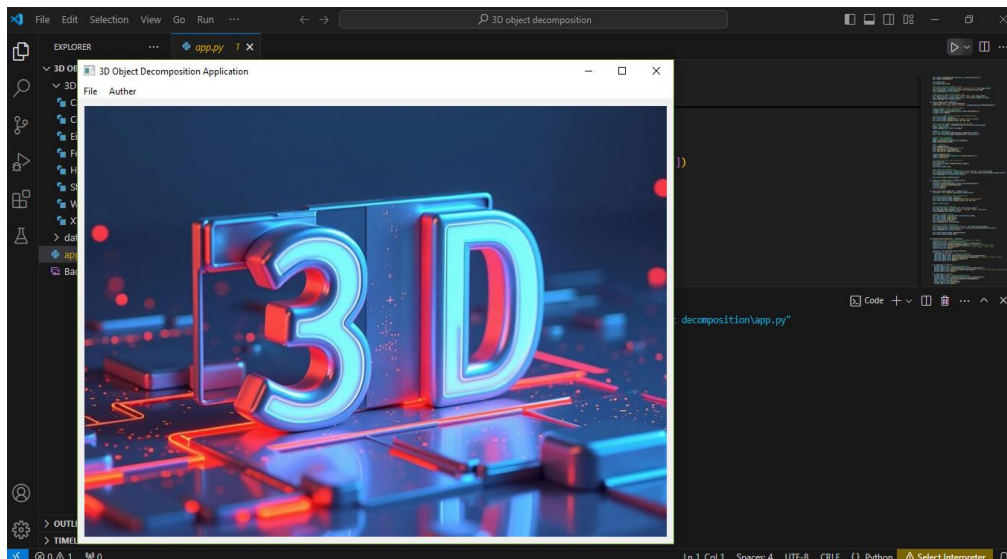
l'affiche dans une nouvelle fenêtre.

- **corbures_claculation(triangle_filter)** : Calcule la courbure gaussienne de l'objet filtré.
- **perform_classification()** : Utilise un filtre de connectivité pour segmenter l'objet en régions, en fonction du choix de l'utilisateur (algorithme sélectionné dans la combo box).
- **generate_tables()** : Génère et stocke des informations sur les faces, les sommets et les régions après classification.

Exemple d'utilisation

- L'utilisateur peut charger un fichier 3D (OBJ/STL/PLY), l'afficher, appliquer un filtre de triangulation pour uniformiser les faces, puis calculer la courbure et classifiez les régions de l'objet selon plusieurs algorithmes.

5. Résultats expérimentaux



5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons essayé de présenter les notions essentielles relatives à l'implémentation de notre projet.

Pour faciliter la compréhension du processus de réalisation de notre projet, nous avons présenté également les outils, plateformes, et les langages utilisés pour le développement de ce projet.

De plus, nous avons présenté quelques portions de codes ainsi que quelques d'interfaces du application et les résultats fondamentaux ...

cette application constitue un outil puissant et polyvalent pour les professionnels et chercheurs travaillant avec des modèles 3D, offrant à la fois des capacités de traitement sophistiquées et une interface graphique accessible.

Conclusion générale

Tout au long de la préparation de notre projet de fin d'études, nous avons essayé de mettre en pratique les connaissances acquises durant nos études universitaires et cela dans le but de réaliser un projet de thème "DECOMPOSITION D'OBJETS 3D COMPOSES DE MAILLES TRIANGULAIRES".

Dans ce PFE, nous avons également eu l'occasion de travailler avec les objets 3D, et de mesurer leurs importances dans les applications actuelles, qui visent à donner aux machines la capacité de voir et de détecter afin de pouvoir aider, ou même remplacer l'être humain dans de nombreuses applications.

Ce projet nous a permis d'enrichir nos acquis en conception ainsi qu'en développement. En fait, nous avons acquis une bonne maîtrise des anciens langages comme java ; Encore nous avons appris à connaître des nouvelles bibliothèques comme VTK, ainsi qu'une solide compétence dans la segmentation.

Notre travail s'inscrit dans un bon nombre d'améliorations sont à envisager :

- Effectuer un algorithme de croissance de régions réunissant les triangles en régions connexes à partir des clusters de courbure des sommets.
- Construction et réduction du graphe d'adjacence des régions afin de fusionner les régions semblables.

En effet cette petite expérience nous a été bénéfique et très utile, car elle nous a permis de nous familiariser avec de nouvelles notions d'une part, et d'enrichir nos connaissances avec les outils de programmations d'autre part.

Enfin, nous espérons avoir contribué à faciliter les traitements liés au suivi de notre logiciel et que notre rapport sera une documentation utile pour ceux qui nous succéderont.

Comme perspective, nous souhaitons pour les prochains projets de fin d'étude d'élargir notre travail sur la décomposition d'objet 3D composé de mailles triangulaires en utilisant le mobile Android ou Mac et Linux.

Bibliographies & Webographies

Bibliographies & Webographies

- [1] <https://www.sculpteo.com/fr/glossaire/modelisation-3d-definition/>
- [2] <https://www.lemagit.fr/definition/modelisation-3D>
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_tridimensionnelle
- [4] https://www.adobe.com/lu_fr/products/substance3d/discover/what-is-3d-modeling.html
- [5] Kambouche Fatima Zohra, Décomposition (Segmentation) d'un objet en 3D composé de mailles triangulaires, Mémoire Master en Informatique : Modèle Intelligence et de Décision (M.I.D), Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2015/2016.
- [6] Abderrahim Leila, Décomposition d'objets 3D composé de mailles triangulaires par la courbure discrète, Mémoire Master en Informatique : Système d'information avancé, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2010/2011.
- [7] <https://graphiste.com/blog/logiciels-modelisation-3d/>
- [8] <https://www.autodesk.com/ca-fr/solutions/3d-modeling-software>
- [9] <https://www.xp-pen.fr/forum-6123.html>
- [10] <https://www.autodesk.com/ca-fr/products/inventor/overview>
- [11] <https://www.autodesk.com/ca-fr/products/fusion-360/>
- [12] Mesbah Touatia, Brahimi Soumia, Simplification du maillage triangulaire, Mémoire Master en Informatique : Systèmes d'information géographiques, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2012/2013.
- [13] <https://www.cadinterop.com/fr/les-formats/maillage.html>
- [14] Tamy Boubekour, Patrick Reuter, Christophe Schlick, Reconstruction locale et visualisation de nuages de points par surfaces de subdivision, LaBRI INRIA Futurs, Université de Bordeaux, du site : <https://inria.hal.science/inria-00260936/document>
- [15] https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Vorono%C3%AF
- [16] J. Wackers, M. Visonneau, Raffinement automatique de maillage pour la simulation des écoulements à surface libre, Laboratoire de Mécanique des Fluides, Ecole Centrale de Nantes, France, 2009.
- [17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Format_de_donn%C3%A9es
- [18] https://fr.wikipedia.org/wiki/Drawing_eXchange_Format
- [19] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Inventor_\(biblioth%C3%A8que_logicielle\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Inventor_(biblioth%C3%A8que_logicielle))
- [20] https://fr.wikipedia.org/wiki/Virtual_Reality_Markup_Language
- [21] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Objet_3D_\(format_de_fichier\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Objet_3D_(format_de_fichier))
- [22] <https://linuxfr.org/news/vtk-la-visualisation-scientifique-et-au-delà>

- [23] Naima Merzougui, Un algorithme évolutionnaire pour la segmentation d'images basé sur le diagramme de Voronoï, Mémoire Magister en Technologie d'information et de communication, Université Kasdi Merbah -Ouargla, 2012.
- [24] Lavoué Guillaume, Dupont Florent, Baskurt Atila, Segmentation De Maillages Triangulaires Basée Sur Les Tenseurs De Courbure Et Rectification Directionnelle De Frontières, ORESA'04, 25-26 mai 2004, Lille, France.
- [25] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_de_partage_des_eaux_\(segmentation\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_de_partage_des_eaux_(segmentation))
- [26] https://xphilipp.developpez.com/articles/segmentation/regions/?page=page_4
- [27] https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_multi-agents
- [28] Arsène Sabas, Systèmes Multi-Agents : Une Analyse Comparative Des Méthodologies De Développement, Mémoire en Informatique, Université du Québec à Trois-Rivière, 2001.
- [29] <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-java-485/>
- [30] <https://julian-ibarz.developpez.com/tutoriels/jeux/introduction-VTK/>