

MA-004-485-1

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE



CDTA

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention

D'un Diplôme de Master en Informatique

Option : Système Informatique et Réseaux

### THÈME :

**Prédiction de la topographie 3D  
des surfaces gauches lors de l'opération  
de finition en 05-axes**

**Réalisé par:**

Mr. ZEMMORI Mohamed Islem  
Mr. KERKAR Fares

Soutenu le : 30-06-2018 à 13h, devant :

Mr. Kameche Abdallah Hicham

Mme. Bouhadja Khadija

Mr. Bey Mohamed

Mr. HAMMOUDA

Mlle. BELKACEMI Nour ElHouda

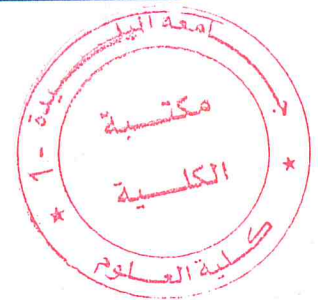
Promoteur

Encadreur

Encadreur

Président

Examineur



MA-004-485-1

Année Universitaire 2017/2018

## *Remerciements*

*On tient à remercier avant tout Allah le tout puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail, El Hamdou Li Allah.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Madame BOUHADJA Khadija et Monsieur BEY Mohamed qui ont bien voulu nous accueillir au sien de leur équipe CFAO. Nous les remercions pour la documentation mise à notre disposition, leurs aides précieuses et leurs conseils tout au long de ce projet.*

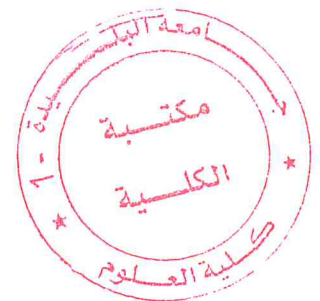
*Nous tenons également à remercier notre promoteur Monsieur Kameche Abdellah Hicham pour la confiance qu'il nous a fait en acceptant de diriger ce travail pour son assistance ininterrompue et ses conseils judicieux qui nous ont aidés à mener à bout ce travail.*

*Nous remercions également Mademoiselle Belkacemi Nour ElHouda qui nous a orienté pour avoir ce thème de ce mémoire, et pour ses conseils du début à la fin de ce travail.*

*Nos remerciements vont particulièrement à Messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer et de juger notre modeste travail.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants et à tous ceux qui nous ont accompagnés tout au long des deux années de Master.*

*Nous ne pouvons terminer sans remercier nos familles pour leur soutien indéfectible, nos amis et camarades de promotion pour leur présence et conseils ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail.*



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents, Zemmori Mohamed et Zemmori Linda,*

*Sans oublié ma grand-mère Draa Mizzan Aïcha*

*Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs  
prières tout au long de mes études,*

*A mes chers frères, Abd El Momen « Allah Yarhmo », Abd El Qahar, pour leur  
appui et leur encouragement,*

*A mes chers amis Mehdi, Djalol, Zaki, Ayoub, Hani,*

*Sidahmed, Chemss eddine, Diae eddine, Abd el kader,*

*Sabrina, Lilia, Houda, Sofia,*

*A mon frère et binôme Fares et toute la famille Kerkar.*

*A Mademoiselle Belkacemi Nour Elhouda.*

*A toute la famille Dehri*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de  
votre soutien infailible,*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Zemmori Mohamed Islem .*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes chers parents*

*Kerkar Ali et Kerkar Nacira,*

*En reconnaissance à leurs sacrifices,*

*Leurs soutiens et leurs prières quotidiennes.*

*A mes frères Mohamed et Aymene et Mes sœurs qui ne m'ont pas oublié*

*Pendant la réalisation de ce travail.*

*A mes chères amis Zakky, Ishak, Ayoub, Lotfi, Mohssin, Sidahmmed,*

*Chemss eddine, islem , Diae eddine, Abd el kader*

*A Maroua et toute la famille Zebiche.*

*A Mademoiselle Belkacemi Nour Elhouda.*

*A tous les membres de famille Kerkar et Zemmori.*

*Kerkar Fares.*

## ملخص

تستخدم الأجزاء الميكانيكية ذات الأشكال المعقدة على نطاق واسع في العديد من الصناعات مثل القوالب، والسيارات، والملاحة الجوية... إلخ. فنظرا لأشكالها الهندسية المعقدة للغاية، فإنها يتم تشكيلها على آلات قطع رقمية متعددة المحاور من 3 محاور إلى 5 محاور. هاته الأجزاء يجب أن تلبى المتطلبات الوظيفية و / أو النمطية، التي تحتاج إلى اهتمام خاص في مرحلة الإنتاج. تتكون دراستنا في تصميم تطبيق قياس ظاهري يسمح بتحليل الحالة السطحية في الأبعاد الثلاثية وفقاً لمعيار (إيزو 25178-2) لعام 2012 ، وتحسين وقت الحساب عن طريق استخدام تقنيات المحاكاة في عملية نزع المادة باستخدام النماذج الحجمية (الدكسل الثلاثي) ، وطريقة الخلية.

الكلمات المفتاحية : الدكسل الثلاثي، الحفر ذات خمس محاور، المحاكاة، إيزو، الحالة السطحية.

## Résumé :

Les pièces mécaniques de formes complexes utilisées dans diverses industries telles que moules, automobile, aéronautique... etc. sont usinées sur des fraiseuses numériques multiaxes de 03-axes à 05-axes. Ces pièces doivent satisfaire aux exigences fonctionnelles et / ou de style, ce qui impose une attention particulière dans leur phase de production. Notre étude consiste à modéliser et à concevoir une application de mesure virtuelle permettant l'analyse de l'état de surface en 3D selon la norme ISO 25178-2 de 2012 et à optimiser le temps de calcul par l'utilisation des techniques de simulation d'enlèvement de matière lors de la finition des surfaces complexes avec le modèle Triple Dixel et la méthode des cellules .

**Mots-clés :** Triple-Dixel, Usinage 5-axes, Simulation, Norme ISO, Etat de surface.

## Abstract:

Mechanical parts with complex shapes are widely used in various industries such as molds, automobile, aeronautics ... etc. They are machined on multi-axis CNC milling machines from 03-axis to 05-axis. These parts must meet functional and / or style requirements, which require special attention in their production. Our study consists in modeling and designing a virtual measuring application allowing the analysis of the surface state in 3D according to the ISO 25178-2 norm of 2012 and to optimize the processing time by using material removal simulation techniques while finishing complex surfaces with the Triple-Dixel model and cells method.

**Keywords:** Triple-Dixel, 05-axis Machining, Simulation, ISO standard, Surface condition.

# Table des matières

Introduction générale .....	2
-----------------------------	---

## Chapitre 1 : généralité sur le processus de fabrication de formes complexes

Introduction .....	5
1. Usinage des pièces complexes .....	5
1.1 Forme complexe .....	5
1.2 Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur « CFAO » .....	6
1.2.1 Conception Assistée par Ordinateur « CAO » .....	6
1.2.2 Fabrication Assistée par Ordinateur « FAO » .....	6
1.2.3 Processus de CFAO .....	6
1.3 Machine-outil .....	7
1.3.1 Machine-outil à commande numérique (MOCN) .....	7
1.3.2 Orientation et les axes de déplacements .....	8
1.3.3 Classification des fraiseuses .....	9
2. Topographie des surfaces .....	10
2.1 Techniques de prédiction de la topographie .....	10
2.1.1 Simulation d'enlèvement de matière .....	10
2.1.2 Synthèse .....	11
3. Technique de simulation d'enlèvement de matière .....	12
3.1 Modélisation de la pièce a usiné .....	12
3.1.1 Voxel .....	12
3.1.2 Dixel .....	12
3.1.3 Triple-Dixels .....	13
3.2 Modélisation du trajet d'outil .....	13
3.2.1 Stratégies d'usinage .....	13
3.2.2 Type d'interpolation .....	15
3.2.3 Source d'erreur dans la FAO .....	15
3.3 Modélisation d'outil .....	16
3.3.1 Formes d'outils .....	17

4. Paramètres d'état de surface .....	18
4.1 Définition d'une surface .....	18
4.2 Différents écarts géométriques de l'état de surface .....	18
4.2.1 Paramètres de rugosité 2D .....	19
4.3 Normes ISO .....	21
4.3.1 Normes ISO 25178 .....	21
4.3.2 Partie de la structure de la norme .....	22
4.3.3 Paramètres de la norme ISO 3D .....	22
Conclusion .....	25

## Chapitre 2 : Etude conceptuelle

Introduction .....	26
1. Architecture générale de l'application .....	26
1.1 Cycle de vie d'un segment .....	26
1.2 Lecture de la pièce en Triple-Dexels .....	27
1.3 Ajout d'une Surépaisseur aux segments .....	31
1.4 Création du brut .....	31
1.5 Création des cellules .....	32
1.6 Subdivision des segments .....	33
1.7 Affectation des segments aux cellules .....	35
1.8 Lecture de la trajectoire de l'outil .....	36
1.9 Simulation de l'usinage .....	38
1.9.1 Récupérer les informations des contours .....	38
1.9.2 Récupérer les informations de l'outil utilisé .....	38
1.9.3 Calculer du chevauchement sphère cellule .....	39
1.9.4 Calculer les points d'intersection .....	42
1.10 Calculer les paramètres d'état de la surface .....	45
1.10.1 Calcul des écarts .....	45
2. Modélisation de l'application avec UML .....	48
2.1 Diagrammes des cas d'utilisation .....	48
2.1.1 Diagramme de cas d'utilisation globale .....	49
2.2 Diagramme de classe .....	50
2.2.1 Représentation des classes .....	50

Conclusion .....	56
------------------	----

## Chapitre 3 : Implémentation et résultats

Introduction .....	58
1. Présentation des outils utilisés .....	58
1.1 Présentation du langage C++ .....	58
1.1.1 Motivation de l'utilisation du langage C++ .....	58
1.2 Présentation d'OpenGL .....	58
1.3 Présentation de C++ Builder .....	59
2. Présentation de l'application et les captures écran .....	59
2.1 Fenêtre principale .....	60
2.2 Onglet « Pièce » .....	60
2.3 Onglet « Surépaisseur » .....	60
2.4 Onglet « Optimisation » .....	63
2.5 Onglet « Simulation » .....	66
2.6 Onglet « Etat de surface » .....	69
3. Résultats .....	70
3.1 Comparaison de temps d'exécution de la simulation .....	70
3.2 Comparaison de temps d'exécution entre l'optimisation par « cellules » et par « k-means » .....	72
3.3 Comparaison de temps d'exécution entre la simulation par « cellules » et par « k-means » .....	73
3.4 Calcul des paramètres d'état de surface .....	74
3.4.1 Calcul les paramètres d'état de surface partiel .....	74
3.4.2 Calcul des paramètres d'état de surface globale .....	76
4. Conclusion .....	77
Conclusion générale .....	79



# Table des Figures

## CHAPITRE 1

Figure I.1. Processus de fabrication d'une pièce mécanique [BEA, 13] .....	7
Figure I.2. Parties d'une MOCN [SYS] .....	8
Figure I.3. Axes d'une machine-outil à commande numérique [BLK, 15].....	8
Figure I.4. Orientations des Axes de machine-outil [BLK, 15] .....	9
Figure I.5. Fraiseuse 3-Axes [MAN, 04].....	9
Figure I.6. Fraiseuse 5-Axes [MAN, 04].....	10
Figure I.7. Problèmes lié à la topographie de surface usiné sur machine 5axes. ....	11
Figure I.8. Représentation de volume par des voxels [ABA, 09].....	12
Figure I.9. Représentation de solide par des dexels .....	13
Figure I.10. Représentation en Dixel et en Triple-Dexels [ZER] .....	13
Figure I.11. Mode de balayage par plan parallèles .....	14
Figure I.12. Mode de balayage par Z constant .....	14
Figure I.13. Mode de balayage par gradient .....	15
Figure I.14. Erreur de flèche .....	16
Figure I.15. Erreur de crête .....	16
Figure I.16. Outil hémisphérique [FAF, 16] [CLE, 08] .....	17
Figure I.17. Outil cylindrique [FAF, 16] [CLE, 08] .....	17
Figure I.18. Outil torique [FAF, 16] [CLE, 08].....	18
Figure I.19. Écart de l'état de surface [SAR, 10] .....	19
Figure I.20. Rugosité moyenne du profil Ra [SAR, 10].....	20
Figure I.21. Hauteur maximum de profil Rz [SAR, 10].....	20
Figure I.22. Hauteur total de profil Rt [SAR, 10] .....	21

Figure I.23. Partie de la norme ISO 25178 [FRB, 06] .....	22
Figure I.24. Rugosité moyenne 3D [TAL, 12] .....	23
Figure I.25. Rugosité moyenne quadratique [TAL, 12] .....	23
Figure I.26. Hauteur maximale 3D [TAL, 12] .....	24
Figure I.27. Hauteur minimale 3D [TAL, 12] .....	24
Figure I.28. Hauteur de dix points de la surface [TAL, 12] .....	25

## CHAPITRE 2

Figure II.1. Architecture générale de l'application .....	27
Figure II.2. Cycle de vie d'un segment .....	27
Figure II.3. Génération du modèle Triple-Dexel .....	28
Figure II.4. Brut de la pièce.....	32
Figure II.5. Matrice des cellules de la pièce .....	33
Figure II.6. Affectation des segments aux cellules .....	35
Figure II.7. Processus d'affectation des segments aux cellules .....	36
Figure II.8. Récupération de la trajectoire d'outil .....	36
Figure II.9. Structure de fichier « CE » .....	37
Figure II.10. Architecture de la simulation .....	38
Figure II.11. Contours d'usinage .....	39
Figure II.12. Outil hémisphérique .....	39
Figure II.13. Différents cas de chevauchement sphère-cellule .....	40
Figure II.14. Chevauchement enveloppe outil cellules .....	42
Figure II.15. Segments des cellules .....	42
Figure II.16. Etapes de calcul de Sa .....	47
Figure II.17. Diagramme cas d'utilisation générale .....	49
Figure II.18. Diagramme de classe .....	50

Figure II.19. Class Point .....	50
Figure II.20. Class Couleur objet .....	51
Figure II.21. Class Sub .....	51
Figure II.22. Class CBrute .....	52
Figure II.23. Class Cellule .....	52
Figure II.24. Classe TDexel surépaisseur .....	52
Figure II.25. Class Segment .....	53
Figure II.26. Classe Contour .....	53
Figure II.27. Classe TDexele .....	54
Figure II.28. Classe Point Centre Outil .....	55
Figure II.29. Classe Trajet Outil .....	56

### CHAPITRE 3

Figure III.1. Fonctionnalités de l'onglet pièce .....	61
Figure III.2. Visualisation de la pièce .....	61
Figure III.3. Fonctionnalités de l'onglet surépaisseur .....	62
Figure III.4. Dexels de la surépaisseur d'usinage de chaque plan .....	63
Figure III.5. Visualisation de la pièce avec surépaisseur(en rouge) .....	63
Figure III.6. Fonctionnalités de l'onglet Optimisation .....	64
Figure III.7. Visualisation des cellules .....	65
Figure III.8. Segments classés .....	65
Figure III.9. Visualisation des Dexels après la classification .....	65
Figure III.10. Visualisation des cellules pleines et vides .....	66
Figure III.11. Visualisations par cellules .....	66
Figure III.12. Fonctionnalités de l'onglet Simulation .....	67
Figure III.13. Visualisation du trajet d'outil .....	68

Figure III.14. Visualisation des segments et des cellules en chevauchement .....	68
Figure III.15. Pièce finale après la simulation .....	69
Figure III.16. Fonctionnalités de l'onglet Etat de surface .....	70
Figure III.17. Visualisation volumique des dexel après la simulation d'usinage .....	71
Figure III.18. Visualisation volumique des dexel où le rayon de l'outil change .....	71
Figure III.19. Visualisation après l'optimisation par cellules\clusters .....	73
Figure III.20. Variation d'état de surface selon Sq (partition de la surface en 3 zones) ...	75
Figure III.21. Variation d'état de surface selon Sa (partition de la surface en 16 zones) ..	75

## Liste des tableaux

Tableau 1. Influence de la profondeur de passe et le rayon d'outil sur le temps d'exécution .....	71
Tableau 2. Différence entre le temps d'exécution d'optimisation par clusters et par cellules .....	72
Tableau 3. Différence entre le temps d'exécution de simulation par clusters et par cellules .....	73
Tableau 4. Influence de la surépaisseur sur la qualité de surface .....	74
Tableau 5. Influence Profondeur de passe et Rayon d'outil sur la qualité de surface .....	76
Tableau 6. Influence de la surépaisseur sur la qualité de surface globale .....	76
Tableau 7. Influence de la Profondeur de passe et du rayon d'outil sur la qualité de surface globale .....	77

## Liste des algorithmes

Algorithme 1. Ecriture du fichier Triple-Dexel .....	29
Algorithme 2. Lecture du fichier Triple-Dexel .....	30
Algorithme 3. Ajout d'une surépaisseur .....	31
Algorithme 4. Subdivision des segments .....	34

Algorithme 5. Affectation des segments aux cellules .....	35
Algorithme 6. Lecture du fichier de trajectoire .....	37
Algorithme 7. Chevauchement sphère cellule .....	41

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE :**

### 1. Contexte

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du programme de recherche de l'équipe CFAO 2018- 2020 «Production Automatisée des Pièces Complexes sur des Fraiseuses Multiaxes» au niveau du Centre de développement des technologies avancés « CDTA ». Il nous a été demandé de proposer et de concevoir une méthodologie pour la prédiction de la topographie 3D des surfaces gauches lors de l'opération de finition en fraisage multiaxes.

### 2. Problématique

Les pièces mécaniques de formes complexes sont largement utilisées dans diverses industries (emballage, moules, automobile, aéronautique, ...etc.). Ces pièces sont usinées sur des fraiseuses numériques multiaxes en raison de leurs formes géométriques très complexes. Ces pièces doivent répondre à des exigences fonctionnelles et/ou de style, ce qui impose une attention particulière dans leur mise en production.

La forme finale de la pièce est obtenue en trois opérations : ébauche, semi-finition et finition, et éventuellement, superfinition. Ces opérations sont liées à des paramètres tels que la stratégie d'usinage, l'outil, la vitesse d'avance, etc. Dans la pratique, les pièces ne peuvent pas être fabriquées aux dimensions idéales exigées par le concepteur étant donné les imprécisions inhérentes aux procédés de fabrication. Ces imperfections sont reconnues comme des défauts de fabrication. Les activités de recherche pour prévoir ces défauts sont divisées en deux principaux thèmes : la simulation et l'expérimentation.

Dans ce travail, l'intérêt est porté à la prédiction de l'état de surface par le calcul des paramètres de rugosité 3D selon la norme ISO 25178-2 de 2012 par la simulation d'enlèvement de matière en utilisant le modèle Triple-Dexel pour la représentation volumique de la pièce.

Ce sujet est une continuité à un sujet traité par Kheris Lilia et Hedroug Wassyla de l'USDB dans le cadre des PFE proposés et encadrés par l'équipe de recherche CFAO du CDTA. Dans ce travail, il a été proposé une conception d'une application de simulation d'enlèvement de matière lors de la finition des surfaces complexes sur des fraiseuses 05-axes.

### 3. Objectif

- ✓ Etude de l'influence des paramètres cités dans la problématique sur la qualité des surfaces (rugosité) et la sélection des paramètres appropriés conduisant à obtenir un meilleur état de surface pour éviter l'opération de super finition afin de réduire les coûts de fabrication.
- ✓ Développement d'un module logiciel graphique et interactif sous Windows de mesure virtuelle permettant l'analyse de l'état de surface en 3D selon la norme ISO 25178-2 de 2012 par l'utilisation des techniques de simulation d'enlèvement de matière lors de la finition des surfaces complexes sur des fraiseuses multi axes tout en minimisant le temps de traitement et assurant une bonne précision.

### 4. Structuration du mémoire

Le présent mémoire est composé des chapitres suivants :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art du processus de conception et d'usinage des surfaces gauches. Une étude bibliographique des méthodes de prédiction de la topographie des surfaces et les paramètres de rugosité 2D et 3D est également présentée dans ce chapitre.
- L'étude conceptuelle et les algorithmes utilisés sont présentés dans le deuxième chapitre.
- Dans le dernier chapitre, les tests et la validation des résultats sont présentés.



# **Chapitre 1 :**

---

**Généralité sur le  
processus de fabrication  
des formes complexes**

**Introduction :**

Dans divers domaines d'activités tels que l'aéronautique, l'automobile ou les biens d'équipements, la concurrence conduit à l'élaboration de produits au design toujours plus complexes et de meilleures qualités. Ces produits allient à la fois esthétique et fonctionnalité. Les produits de ce genre englobent à titre d'exemples les pièces complexes des structures d'avions, des carrosseries d'automobiles ou encore les coques des appareils électroménagers. Ces surfaces complexes, appelées aussi surfaces gauches, sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de surfaces concaves, convexes ou à double courbure. La fabrication de ces surfaces se fait par le procédé d'enlèvement de matière. Outre la complexité de l'opération d'usinage classique, se basant souvent sur des réalisations existantes servant de modèles de départ, s'ajoute la difficulté de considérer l'ensemble des formes complexes et du design. Les concepteurs sont confrontés à un double challenge, réaliser des surfaces à topologie complexe avec une qualité élevée en un minimum de temps.

Ce chapitre est organisé en quatre parties. Dans la première partie, définition des formes complexes et de la CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur) et les machines d'usinage multi-axes (03-axes et 05-axes). La deuxième partie est consacrée à la présentation de la topographie des surfaces et des techniques de prédictions de la topographie. La troisième partie présente les techniques de simulation d'enlèvement de matière. Dans la dernière partie, étude des paramètres d'état de surface 2D et 3D.

**1. Usinage des pièces complexes :**

L'usinage des pièces mécaniques englobe de manière générale de nombreux types de formes. Parmi ces formes, les pièces de formes complexes.

**1.1 Forme Complexe :**

Les surfaces complexes dites surfaces gauches, sont caractérisées par une topologie complexe composée de régions de propriétés géométriques différentes. Elles sont produites par enlèvement de matière. Outre la complexité de l'opération d'usinage, s'ajoute la difficulté de considérer l'ensemble des formes complexes et du design. Les concepteurs sont confrontés à un double défi, produire des surfaces complexes de qualité élevée en un minimum de temps.

## 1.2 Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur « CFAO » :

La CFAO est la combinaison de la CAO « Conception Assistée par Ordinateur » et de la FAO « Fabrication assistée par Ordinateur ». C'est un processus qui permet de concevoir et de produire des pièces qui seront ensuite assemblées pour en faire un produit. L'idée générale de ce processus réside dans l'utilisation des capacités de l'ordinateur afin de concevoir la pièce en deux dimensions « 2D », ou mieux encore, en 3 dimensions « 3D » pour ensuite la fabriquer grâce à une machine connectée directement à un ordinateur pour avoir une pièce conforme aux exigences exprimées par le designer [HER,16].

### 1.2.1 Conception Assistée par Ordinateur « CAO » :

La conception assistée par ordinateur « CAO » comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

### 1.2.2 Fabrication Assistée par Ordinateur « FAO » :

Le but de la fabrication assistée par ordinateur « FAO » est de générer le fichier contenant le programme de pilotage d'une machine-outil à commande numérique. Ce fichier va décrire exactement les mouvements que doit exécuter la machine-outil pour réaliser la pièce demandée. Ce type de fichiers est appelé « G-Code ».

### 1.2.3 Processus de CFAO :

De la conception à la production, le procédé de CFAO est constitué d'une suite d'activités importantes pour la réalisation d'une forme gauche (Figure I.1). Ces activités sont [BEA ,13] :

- Construction géométrique du modèle « CAO ».
- Génération des trajectoires d'outils « FAO ».

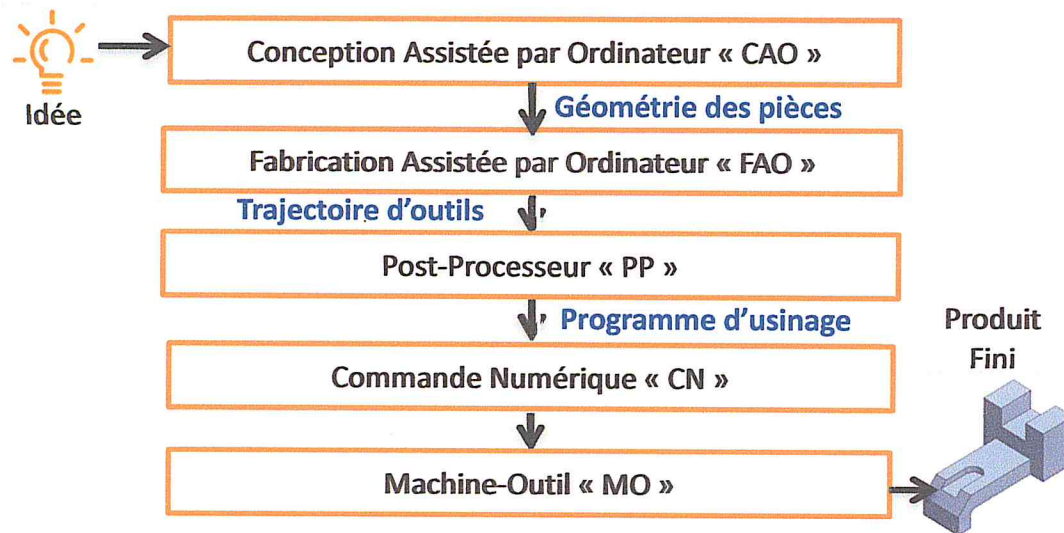


Figure I.1. Processus de fabrication d'une pièce mécanique [BEA ,13].

### 1.3 Machine-outil :

Une machine-outil est un équipement mécanique destiné à exécuter un usinage ou une autre tâche répétitive avec une précision et une puissance adaptées. C'est un moyen de production destiné à maintenir un outil fixe, mobile, ou tournant, et à lui imprimer un mouvement afin d'usiner ou de déformer une pièce ou un ensemble fixé sur une table fixe ou mobile. Une machine-outil a pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une surface par enlèvement de matière. Elle réalise le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce. De plus, elle doit permettre l'obtention de pièces respectant les spécifications fonctionnelles [SYS].

#### 1.3.1 Machine à commande numérique (MOCN)

Une machine-outil à commande numérique est une machine d'usinage à cycle automatique programmable. Elle est composée de deux parties complémentaires (Figure I.2) [Sys] :

- **Partie opérative** : c'est la machine-outil. Elle agit directement sur le produit à réaliser.
- **Partie commande** : c'est la commande numérique. Elle permet d'élaborer des ordres en fonction des consignes et des comptes rendus.

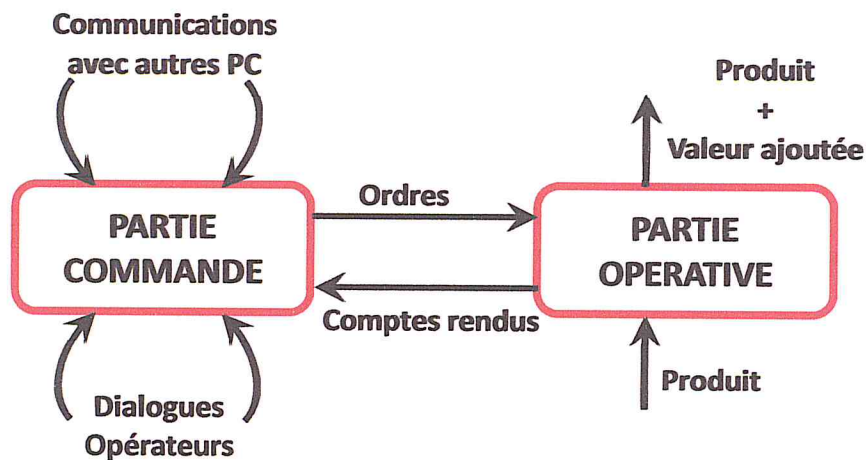


Figure I.2. Parties d'une MOCN [SYS].

### 1.3.2 Orientations et les axes de déplacements

C'est la direction suivant laquelle le mouvement est commandé numériquement en continu en position et en vitesse. L'axe Z est parallèle à l'axe de la broche principale. L'axe X est associé au mouvement qui définit le plus grand déplacement après avoir situé l'axe Z. L'axe Y forme avec les axes X et Z un trièdre de sens direct.

Les constructeurs de MOCN ont conçu des fraiseuses 05-axes comportant toujours les trois (03) axes linéaires X, Y et Z et deux (02) axes rotatifs à choisir parmi les axes A, B et C (Figure I.3). Les machines vont se différencier par la position des axes rotatifs [BLK, 15].

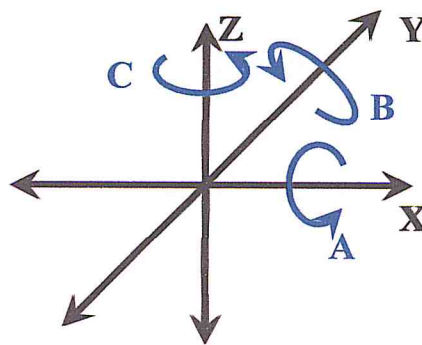


Figure I.3. Axes d'une machine-outil à commande numérique [BLK, 15].

Trois types d'orientations existent :

- **Orientation pour la table** : pour ce type, les deux axes rotatifs se trouvent sur la table. l'axe B incline la pièce et l'axe C fait tourner la pièce (Figure I.4.a).
- **Orientation pour l'outil** : pour ce type, la table tourne selon l'axe C, mais la rotation se fait par la tête portant l'outil suivant l'axe B (Figure I.4.b).

➤ **Orientation pour la tête :** dans le dernier type, les deux axes (rotation et inclinaison) se trouvent au niveau de la tête (Figure I.4.c).

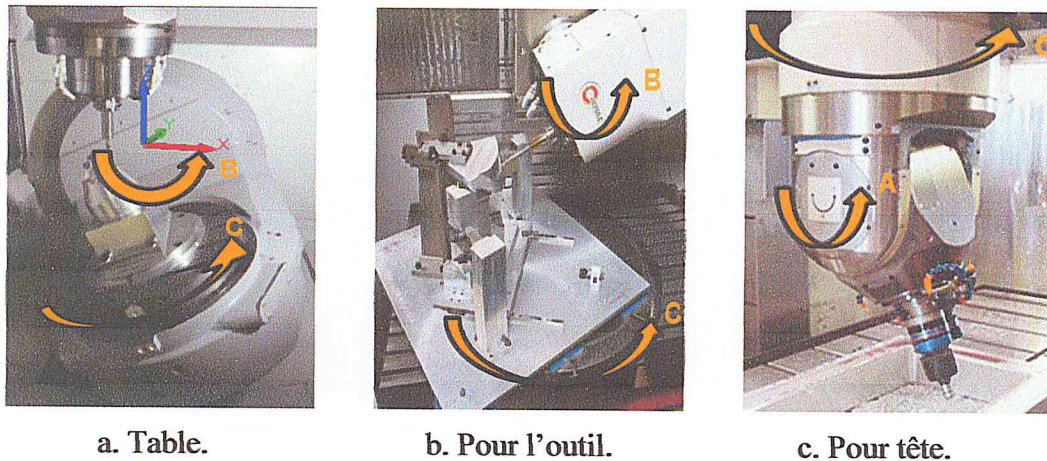


Figure I.4. Orientations des axes de machine-outil [BLK, 15].

### 1.3.3 Classification des fraiseuses :

L'usinage des surfaces gauches est réalisé dans sa grande majorité par fraisage sur des fraiseuses numériques 03-axes, 04-axes et 05-axes [MAN, 04].

➤ **Fraiseuses à 03-axes :** l'usinage en 03-axes est une technique de fraisage pour produire des pièces suite aux trois déplacements linéaires de l'outil suivant les axes X, Y et Z (Figure I.5). Il est capable de créer les mêmes produits que les machines 04-axes et 05-axes, mais les machines 03-axes ne peuvent pas offrir le même niveau de détail ou d'efficacité que ses prédécesseurs.

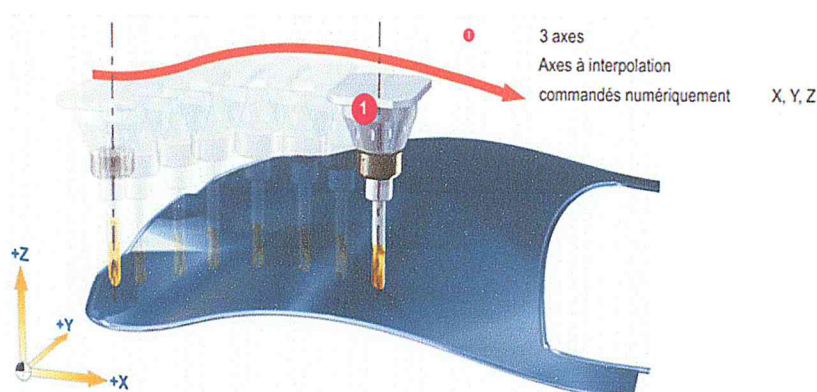


Figure I.5. Fraiseuse 3-Axes [MAN, 04].

➤ **Fraiseuses à 05-axes :** pour ces fraiseuses, plusieurs topologies de conception sont disponibles. Une fraiseuse à 05-axes comporte toujours trois axes linaires (X, Y et Z) et deux axes rotatifs choisis parmi les rotations A, B et C (Figure I.6). Les machines à 05-axes peuvent offrir un niveau de détail beaucoup plus élevé que les machines à 03-axes.

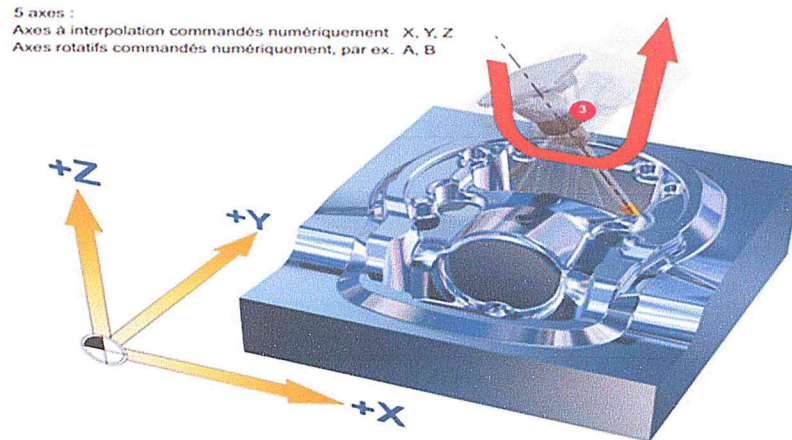


Figure I.6. Fraiseuse 5-Axes [MAN, 04].

## 2. Topographie des surfaces :

La topographie de surface est la déviation locale d'une surface à partir d'un plan parfaitement plat. Elle est connue pour affecter sensiblement les propriétés de masse d'un matériau. Malgré la nature souvent nanométrique des irrégularités de surface, leur influence peut être observée par des mesures macroscopiques. La caractérisation de la topographie de surface est devenue de plus en plus importante dans de nombreux domaines tels que les matériaux, la tribologie, la surveillance de l'état des machines, etc. [COR, 05]. La topographie de surface est également connue sous le nom de texture superficielle, finition de surface ou profil de surface.

### 2.1 Techniques de prédiction de la topographie des surfaces :

Différentes classifications sont présentées dans la littérature. La classification des différentes méthodologies de prédiction de la géométrie est basée sur la théorie d'usinage, l'étude expérimentale, le dispositif expérimental et l'intelligence artificielle (AI) [BEN, 03] [CLU, 08]. Les approches de prédiction sont distinguées en empirique, analytique/numérique et simulation d'enlèvement de matière. Dans cette étude, la prédiction de la topographie est traitée par la simulation d'enlèvement de matière [DEN, 15].

#### 2.1.1 Simulation d'enlèvement de matière :

Les objectifs de la simulation d'usinage sont multiples tels que vérification du trajet d'outil, détection des collisions, prédiction des efforts de coupe et état de la surface finie,...etc. Selon ces objectifs, la simulation d'usinage est distinguée en simulation du trajet d'outils et en simulation d'enlèvement de matière. La dernière traite le problème de prédiction de la topographie de surface où la quantification de la matière enlevée est indispensable. Pour

cela, les modèles de représentation géométrique à prendre en considération sont le modèle de la pièce, le modèle de l'outil et le modèle du volume balayé par l'outil. Ces modèles peuvent être continus ou discrets. Ces derniers peuvent aller du plus simple, une série de points, au plus complexe, description facetisée de la surface ou volumique, représentation à base espace image de type Z-buffer, Dixel, Voxels et plus avancé le modèle Triple-Dexels [SIM, 14].

2.1.2 Synthèse :

Notre étude se focalise sur la prédiction de la topographie des surfaces gauches, usinées sur des fraiseuses numériques à 05-axes, afin de quantifier les écarts de FAO dus aux défauts d'usinage par la simulation d'enlèvement de matière (Figure I.7).

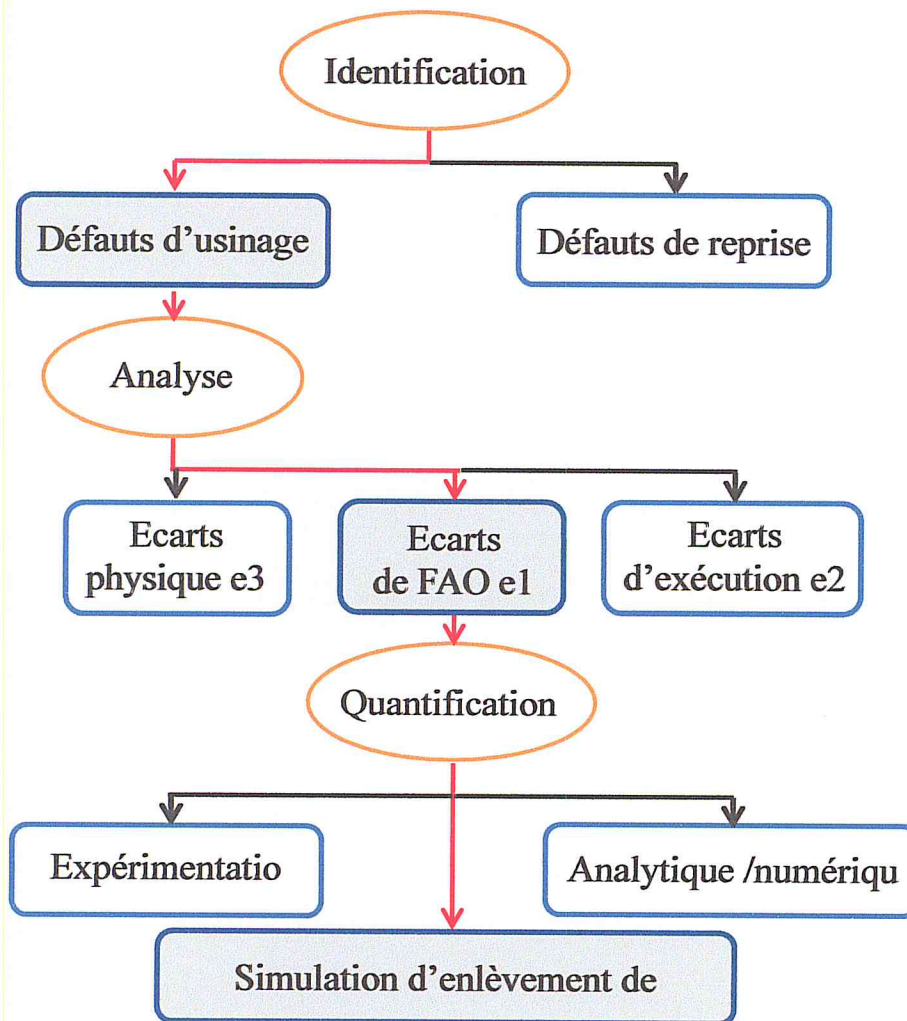


Figure I.7. Problèmes lié à la topographie de surface usinée sur machine 05-axes [KHB, 13].



### 3. Technique de simulation d'enlèvement de matière :

Dans la simulation d'enlèvement de matière, les données sont trois modèles : modèle de la pièce à usiner, modèle de l'outil et modèle de trajectoire de l'outil.

#### 3.1 Modélisation de la pièce à usiner :

Afin d'introduire la notion de matière, les pièces sont modélisées par des volumes élémentaires par des méthodes de discrétisation tels que Dexels, Voxels et Triple-Dexels.

##### 3.1.1 Voxel :

Le Voxel (contraction de « volume » et « élément ») est un pixel en 3D (Figure I.8). Il consiste à stocker une information colorimétrique avec ses coordonnées spatiales, voire temporelles, de positionnement ainsi que, facultativement, une taille relative à l'unité utilisée ou d'autres informations telles qu'une matière [KAL, 10].

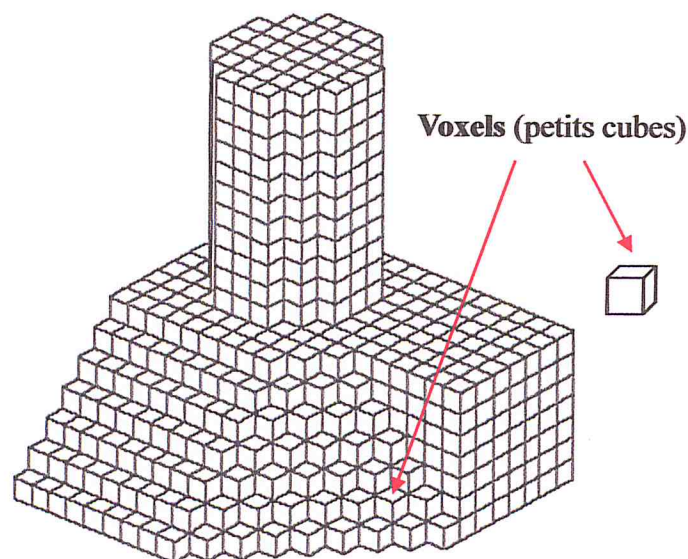


Figure I.8. Représentation de volume par des Voxels [ABA, 09].

##### 3.1.2 Dexel

Un Dexel est un parallélépipède caractérisé par sa section représentée par la forme de la cellule, sa hauteur représentée par la longueur du segment de type « matière » (Figure I.9). Ces derniers forment les Dexels de la pièce dans la direction de la droite de la cellule. A partir de la section et de la longueur d'un Dexel, le volume du Dexel est calculé. Le volume total de l'objet est la somme des volumes de tous les Dexels. Le modèle de l'objet en Triple-Dexels est obtenu en combinant les Dexels créés dans les trois directions [BOB, 16].

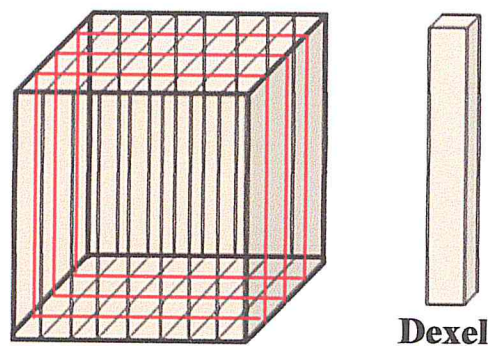


Figure I.9. Représentation de solide par des Dexels.

### 3.1.3 Tripe-Dexels :

Le Triple-Doxel est une extension de la modélisation simple Doxel. Ce modèle est construit par des rayons orientés suivant les trois directions orthogonales X, Y et Z pour discrétiser le modèle (Figure I.10). Donc, le modèle Triple-Doxel est plus précis que la surface reconstruite à partir des données simple Dexels [WEI, 09].

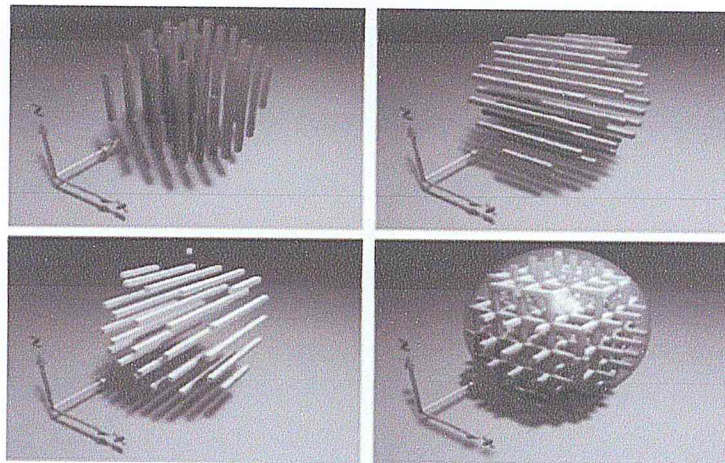


Figure I.10. Représentation en Doxel et en Triple-Dexels [ZER].

## 3.2 Modélisation du trajet d'outil :

### 3.2.1 Stratégies d'usinage

Une stratégie d'usinage est une méthodologie utilisée pour générer une série d'opérations pour réaliser une forme donnée. Elle permet d'associer un processus d'usinage à une entité d'usinage. C'est-à-dire, un ensemble d'opérations comprenant la définition des outils, des conditions de coupe et des trajectoires d'usinage. Les stratégies d'usinage les plus utilisées sont les suivantes :

➤ **Plans parallèles** : la stratégie par plans parallèles est la stratégie la plus utilisée et maîtrisée en industrie. Elle s'appuie sur des trajectoires d'outil résultantes des intersections

entre la surface à usiner et un ensemble de plans parallèles (Figure I.11). Ces plans sont caractérisés par une normale commune dans une direction donnée. Sur chaque point d'interpolation de la courbe d'intersection, l'outil est positionné d'une manière à être tangent à la surface [DJE, 14].

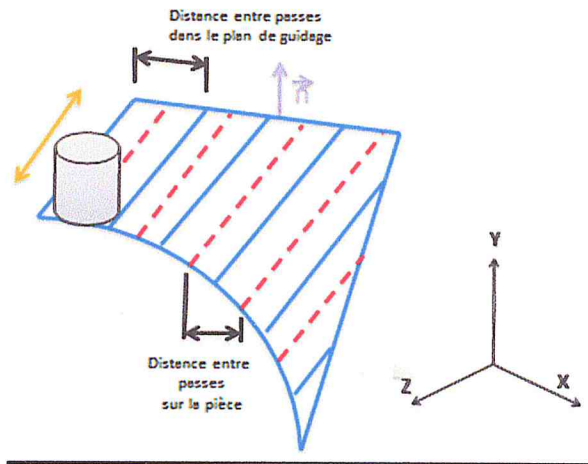


Figure I.11. Mode de balayage par plan parallèles.

➤ **Z-Constant** : la stratégie Z-Constant est utilisée pour l'usinage des cavités profondes afin d'éviter les longues descentes et remontées d'outil. Elle est réalisée par le découpage de la surface par des plans parallèles perpendiculaires à l'axe Z (Figure I.12). L'intersection de ces plans avec la surface théorique produit ce qu'on appelle les contours [CHY, 04].

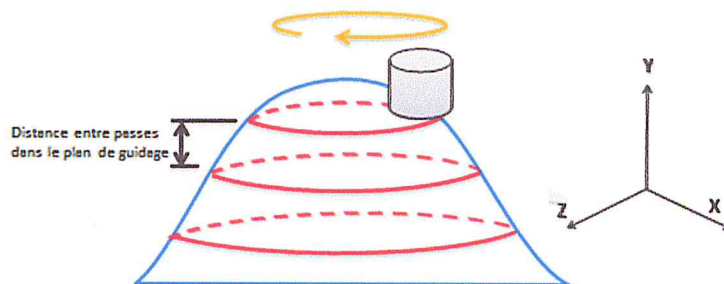


Figure I.12. Mode de balayage par Z-Constant.

➤ **Stratégie du Gradient** : pour une surface gauche, il existe une seule direction tangente de plus grande pente pour chaque point de la surface. La trajectoire de l'outil lors de l'usinage en montant en utilisant la direction tangente de plus grande pente est une liste de points de contact appelés «  $C_C$  » du bas au sommet de la surface (Figure I.13). L'utilisation de cette stratégie impose l'identification des points stationnaires (points où la normale est parallèle à l'axe de l'outil). Un point stationnaire peut être un point convexe, un point concave ou un

point en selle de cheval [QIA, 07]. De ce fait, chaque trajectoire de l'outil est représentée par un ensemble de points  $C_C$  placés séquentiellement sur des contours de la surface.

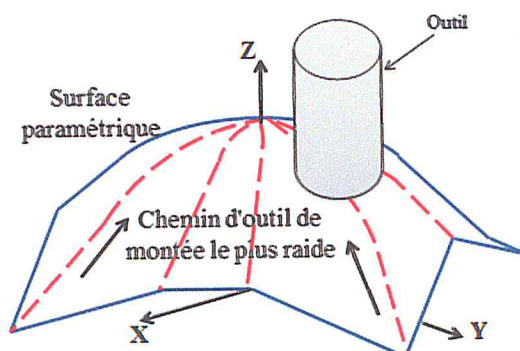


Figure I.13. Mode de balayage par gradient.

### 3.2.2 Types d'interpolation :

La trajectoire d'outil est calculée par interpolation d'un ensemble de positions d'outils. Elle doit être transformée pour être interprétable par le directeur de commande numérique (DCN). Cette transformation dépend du type de format de description géré par le DCN. Les trajectoires sont programmables en interpolation linéaire, circulaire ou polynômiale.

### 3.2.3 Sources d'erreurs dans la FAO :

Les dimensions finales des pièces usinées sur machines-outils doivent répondre aux critères de conformité exigés par la conception. D'un côté, l'évolution technologique de la conception nécessite de plus en plus des tolérances assez serrées pour des raisons de montage et de rôle des pièces durant leurs cycles de vie. D'un autre côté, la modernisation des machines-outils, pour répondre aux exigences du produit fini, reste insuffisante. Pour ces raisons, de multiples recherches sont menées pour étudier les erreurs affectant la précision d'usinage et les méthodes d'élimination de leurs effets. La précision des pièces fabriquées sur machines-outils exigent le respect de deux tolérances [BRW, 09].

➤ **Erreur de flèche :** l'outil usine une ligne brisée. Le pas longitudinal d'usinage est calculé en général par le respect de la tolérance d'usinage qui est la valeur maximale de l'erreur de flèche entre la courbe et les segments de la ligne brisée (Figure I.14) [PEC, 06].

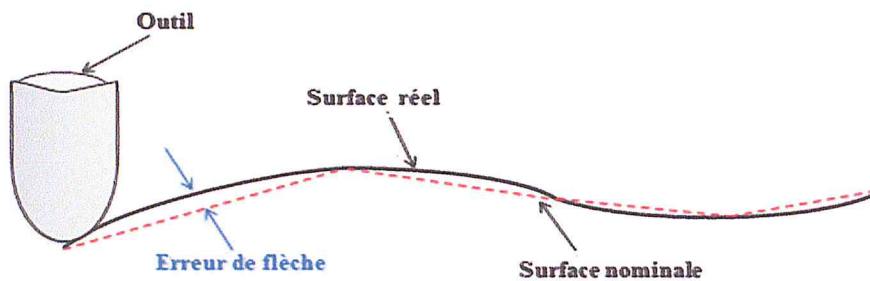


Figure I.14. Erreur de flèche.

➤ **Erreur de crête** : pour usiner totalement une surface, les passes d'usinage sont juxtaposés avec une erreur donnée (erreur de crête) (Figure I.15). Le pas d'usinage transversal peut être calculé en respectant soit un critère de distance maximale entre deux passes, soit un critère de hauteur de crête [BOU, 13].

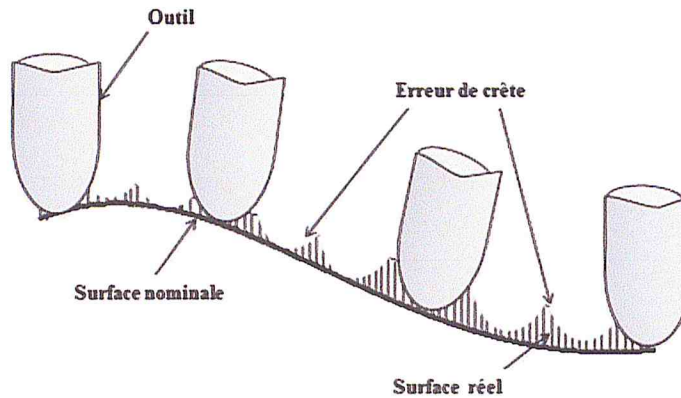


Figure I.15. Erreur de crête.

### 3.3 Modélisation d'outil :

Les outils utilisés pour la finition des surfaces gauches sont les outils cylindriques, hémisphériques et toriques. Ils sont choisis en fonction du processus d'usinage de l'entité à usiner. Ils sont sélectionnés selon leurs rigidités et leurs capacités à réaliser le travail eu égard du temps d'usinage. En phase d'ébauche, il est préférable d'utiliser les outils cylindriques et toriques du fait qu'ils supportent des charges relativement importantes générés par les profondeurs de passe très importantes. En phase de demi-finition et finition, les outils toriques et les outils hémisphériques sont largement utilisés surtout pour les travaux de finition des surfaces gauches [POT, 08] [FAF, 16] [CLE, 08].

### 3.3.1 Formes d'outils :

Contrairement aux autres types d'usinages rencontrés en mécanique générale, il n'existe pas de forme d'outil permettant d'obtenir d'une forme gauche exactement en un seul mouvement élémentaire. Le choix de l'outil est donc le résultat d'un compromis entre rigidité de l'outil, cinématique de la machine et forme de la pièce à usiner. Les surfaces gauches sont usinées en finition par les trois types de fraises suivantes :

➤ **Outil hémisphérique** : il convient pour la finition de n'importe quelle matière quelle qu'en soit sa dureté (Figure I.16). Il peut travailler à des vitesses de coupe bien plus élevées que les autres et permet ainsi de prendre des profondeurs de passes plus importantes car sa forme hémisphérique permet de transmettre à la broche un pourcentage plus important de l'effort de coupe [FAF, 16] [CLE, 08].

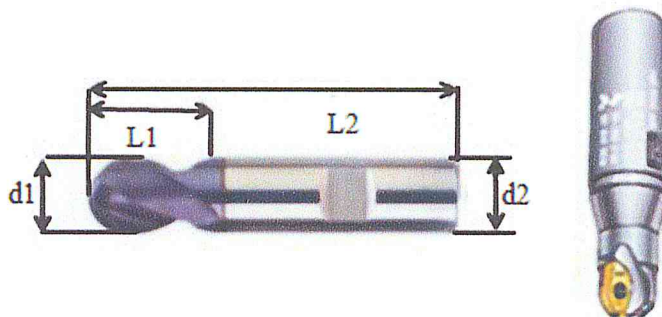


Figure I.16. Outil hémisphérique [FAF, 16] [CLE, 08].

➤ **Outil cylindrique** : il est utilisé pour plusieurs usages avec sa face plane. Sa fonction principale réside dans l'usinage d'épaulements (Figure I.17). Il peut avoir une « coupe au centre » c'est-à-dire que les dents se rejoignent au centre de la fraise ce qui permet de faire un évidement. Son avantage majeur est leur partie active, le cylindre située sur un rayon éloigné de l'axe de l'outil dont la vitesse est non nulle [FAF, 16] [CLE, 08].

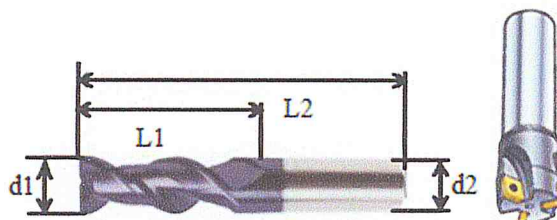


Figure I.17. Outil cylindrique.

➤ **Outil torique** : est un outil intermédiaire entre l'outil hémisphérique et l'outil cylindrique (Figure I.18). Cet outil est de plus en plus utilisé dans l'industrie. Son avantage

majeur est sa partie active, le tore, située sur un rayon éloigné de l'axe de l'outil dont la vitesse est non nulle [FAF, 16] [CLE, 08].

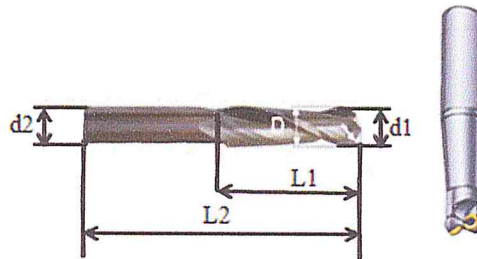


Figure I.18. Outil torique.

#### 4. Paramètres d'état de surface :

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées [ISO, 06].

##### 4.1 Définition d'une surface :

La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant. Elle assure plusieurs fonctions telles que :

- Aptitude aux frottements.
- Résistance à l'usure ou à la corrosion.
- Conduction thermique ou électrique.
- Résistance aux contraintes mécaniques.
- Etanchéité statiques ou dynamiques...etc.

La surface d'un solide constitue une recherche spécifique et un problème de conception. Le concept de la surface est perceptible et compréhensible par intuition. Il est cependant très difficile à définir et à comprendre de façon précise. En effet, ce concept a été défini de plusieurs manières selon la discipline de la science ou de la technologie de l'objet à étudier. La surface d'un solide est habituellement caractérisée par une structure et des propriétés qui diffèrent de l'intérieur du matériau [WHI, 02].

##### 4.2 Différents écarts géométriques de l'état de surface :

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par des irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elles varient essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération (Figure I.19) [SAR, 10].

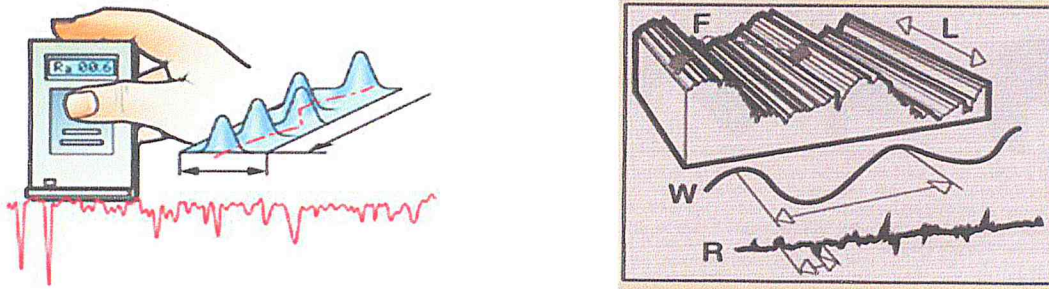


Figure I.19. Écart de l'état de surface [SAR, 10].

Cette structure est définie par les critères suivants :

- **Rugosité  $R$**  : exprime les plus petites irrégularités, c'est-à-dire le fin réseau d'écarts micro-géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage.
- **Ondulation  $W$**  : est constituée d'irrégularités de plus grandes dimensions au niveau suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- **Direction des traces d'usinage  $L$**  : elle définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage.

#### 4.2.1. Paramètres de rugosité 2D :

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité. Certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres. Parmi ces paramètres :

- **Rugosité moyenne du profil  $Ra$**  : c'est la valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite dans la longueur d'évaluation indifféremment de la direction verticale (Figure I.20) [SAR, 10]. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| * d(x)$$

Pour cette rugosité :

- Il est impossible de savoir si les écarts sont des creux ou des bosses.
- Pas d'altérations, pas d'écarts isolés. Donc, risque de manquer un sommet important.
- Valeur de  $Ra$  typiques entre  $0.02\mu\text{m}$  et  $3.5\mu\text{m}$ .



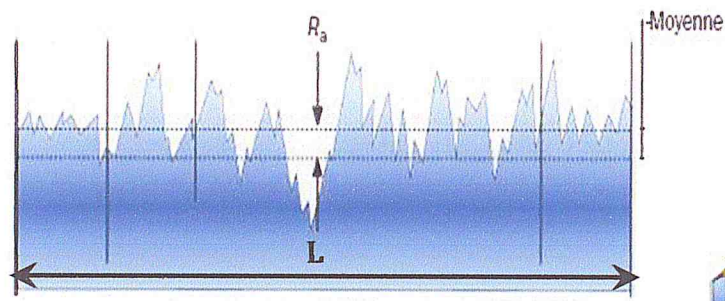


Figure I.20. Rugosité moyenne du profil Ra [SAR, 10].

➤ **Hauteur maximum de profil Rz** : c'est la moyenne des différentes hauteurs de profil entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur des longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation (Figure I.21) [SAR, 10]. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$Rz = \frac{\sum_{i=0}^4 Rz_i}{5}$$

Pour cette rugosité :

- Il y a couramment cinq (05) longueurs de référence.
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence est égale à Rmax ou à Rzmax.

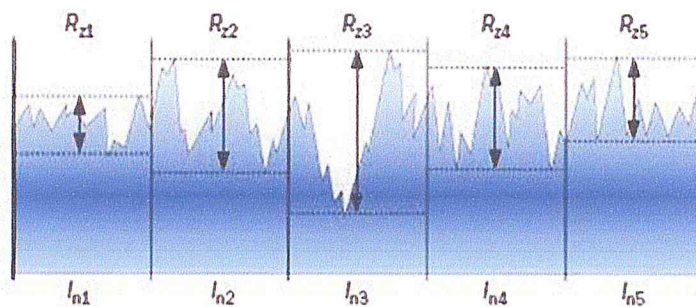


Figure I.21. Hauteur maximum de profil Rz [SAR, 10].

➤ **Hauteur totale du profil Rt** : c'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation (Figure I.22) [SAR, 10]. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$Rt = |\max(z(x))| + |\min(z(x))|$$

Pour cette rugosité, une seule valeur Rt, non combiné à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes du profil R.

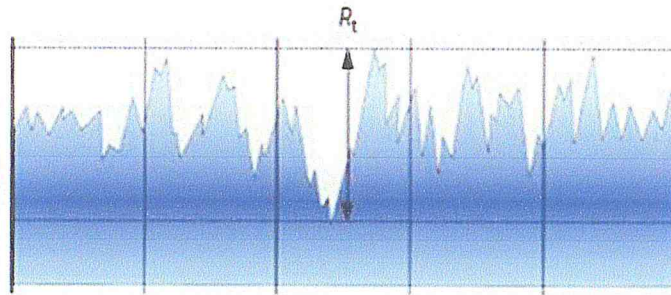


Figure I.22. Hauteur totale du profil  $R_t$  [SAR, 10].

### 4.3 Normes ISO :

La spécification géométrique des produits consiste à définir à travers un dessin de définition, la forme, les dimensions et les caractéristiques des surfaces d'une pièce. Le concept GPS (Geometrical Products Specification) couvre plusieurs types de normes [ISO, 14] :

- Norme de base.
- Globales.
- Générales et complémentaires.

L'état de surface était l'un des premiers sujets traité par le concept GPS en se basant sur la matrice GPS qui comporte les normes ISO concernant les états de surfaces. Il existe aujourd'hui une série de normes ISO reconnue par le CEM (Concept Européen Mécanique). Parmi ces normes [ISO, 14]:

- ISO XXXX pour la normalisation internationale (XXXX: un numéro).
- NF EN ISO XXXX en France.
- DIN EN ISO XXXX en Allemagne.

Dans ce projet, c'est la norme ISO XXXX qui utilisée.

#### 4.3.1 Norme ISO 25178 :

La norme ISO 25178 désigne un ensemble de normes internationales définissant l'analyse des états de surface 3D. Il s'agit de la première norme au monde prenant en compte la spécification et la mesure des états de surface tridimensionnels. La norme définit notamment les paramètres surfaciques d'état de surface et les opérateurs de spécification associés. Elle décrit également les technologies de mesure applicables, les méthodes pour les étalonner ainsi que les étalons matérialisés ou les étalons logiciels nécessaires [FRB, 06].

### 4.3.2 Partie de la structure de la norme :

La partie 2 de la norme ISO 25178 qui spécifie les termes, définitions et paramètres applicables à la détermination de l'état de surface au moyen de méthodes surfaciques, est la partie qui contient les paramètres d'état de surface 3D (Figure I.23).

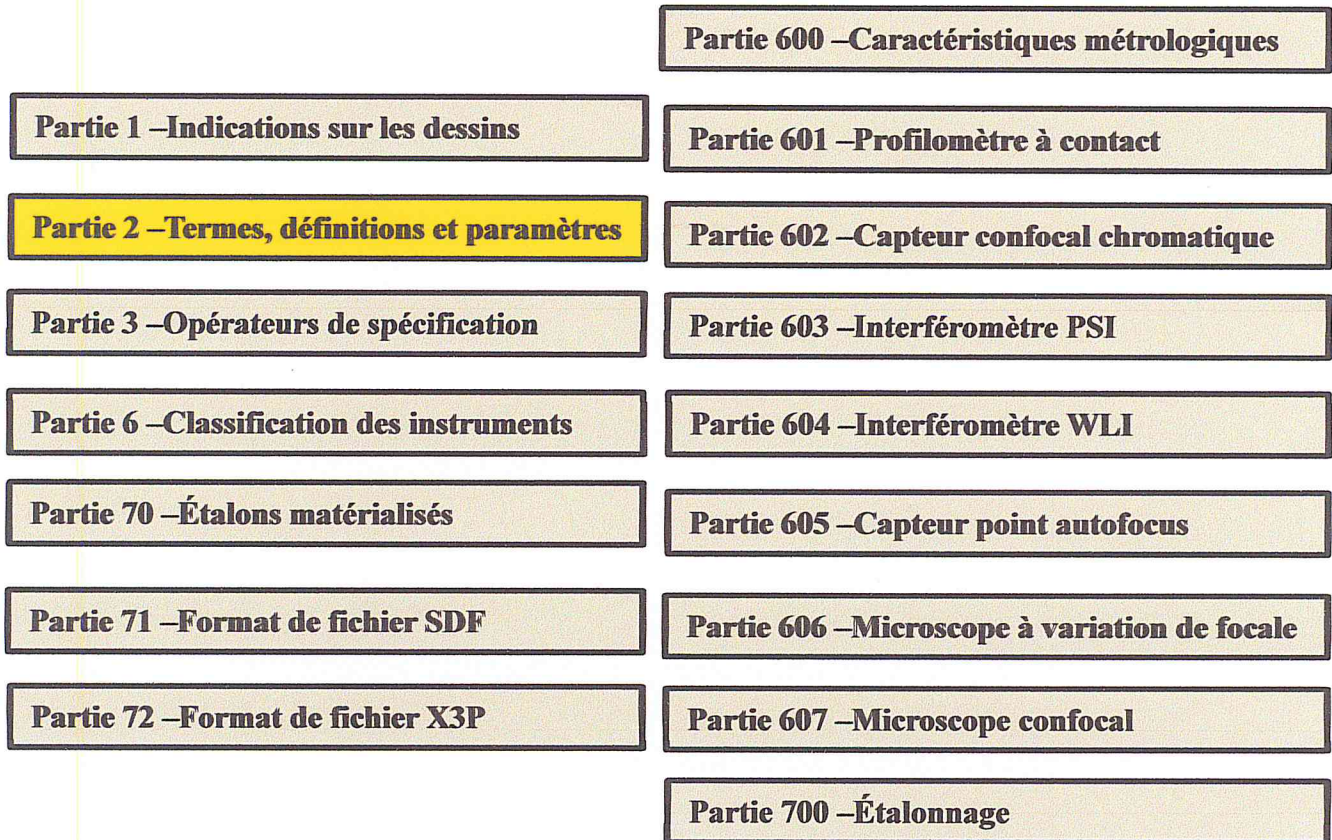


Figure I.23. Parties de la norme ISO 25178 [FRB, 06].

### 4.3.3 Paramètres de la norme ISO 3D :

Selon la norme ISO 25178 [TAL, 12] :

➤ Amplitude moyenne de la surface (rugosité moyenne)  $S_a$  : c'est la moyenne arithmétique de la valeur absolue de l'ordonnée à l'intérieur d'une zone de définition (A) (Figure I.24). Elle est donnée par :

$$S_a = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |z(x_i, y_j)|$$

Mais la fonction  $z(x, y)$  n'est pas connu, alors l'équation devient :

$$S_a = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |z(x_i, y_j)|$$

Avec (m et n) nombre de points suivant x et y respectivement.

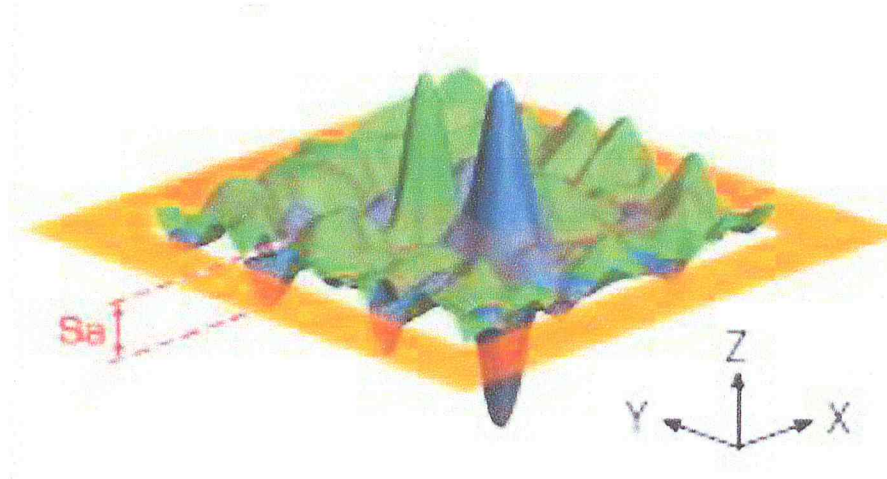


Figure I.24. Rugosité moyenne 3D [TAL, 12].

➤ **Rugosité moyenne quadratique de la surface  $Sq$**  : c'est la moyenne quadratique des valeurs des ordonnées à l'intérieur d'une zone de définition (Figure I.25) (A). Elle est donnée par :

$$Sq = \sqrt{\left(\frac{1}{A}\right) \int \int z^2(x, y) dx dy}$$

Mais la fonction  $z(x, y)$  n'est pas connu, alors l'équation devient :

$$Sq = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sqrt{|z^2(x_i, y_j)|}$$

Avec (m et n) nombre de points suivant x et y respectivement.

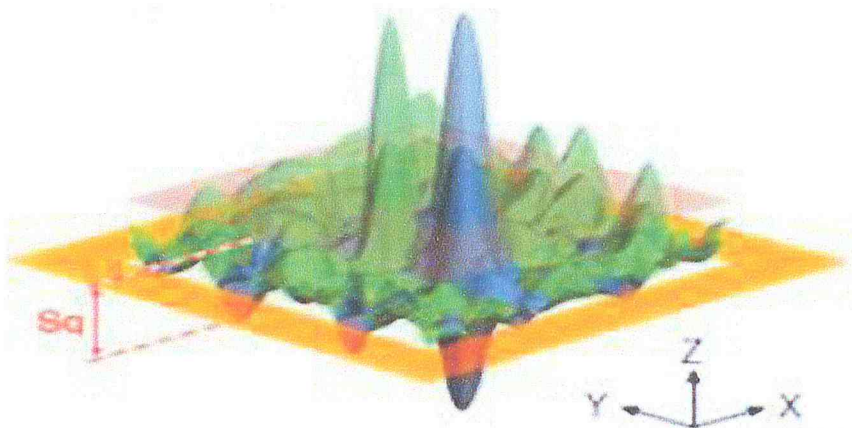


Figure I.25. Rugosité moyenne quadratique [TAL, 12].

➤ **Hauteur maximale  $Sp$**  : c'est la plus grande valeur de hauteur de pic à l'intérieur d'une zone de définition (Figure I.26). Elle est donnée par :

$$S_p = \max(Z(x, y))$$



Figure I.26. Hauteur maximale 3D [TAL, 12].

➤ **Hauteur minimale  $S_v$**  : c'est la plus petite valeur de hauteur de fosse à l'intérieur d'une zone de définition (Figure I.27). Elle est donnée par :

$$S_v = \min(Z(x, y))$$

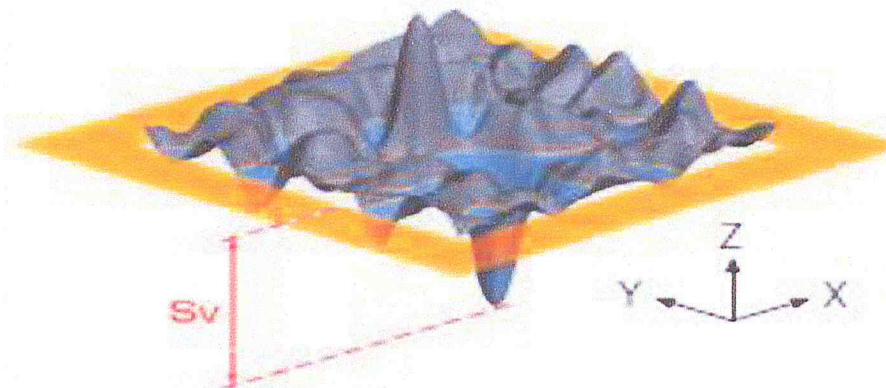


Figure I.27. Hauteur minimale 3D [TAL, 12].

➤ **Hauteur de dix points de la surface  $S_z$**  : elle représente la moyenne des hauteurs de 10 points de la surface, 5 points les plus hauts et 5 points les plus bas à l'intérieur d'une zone de définition (Figure I.28). Elle est donnée par :

$$S_z = \frac{\sum_{i=0}^4 Z_{pi} + \sum_{j=0}^4 |Z_{vj}|}{5}$$

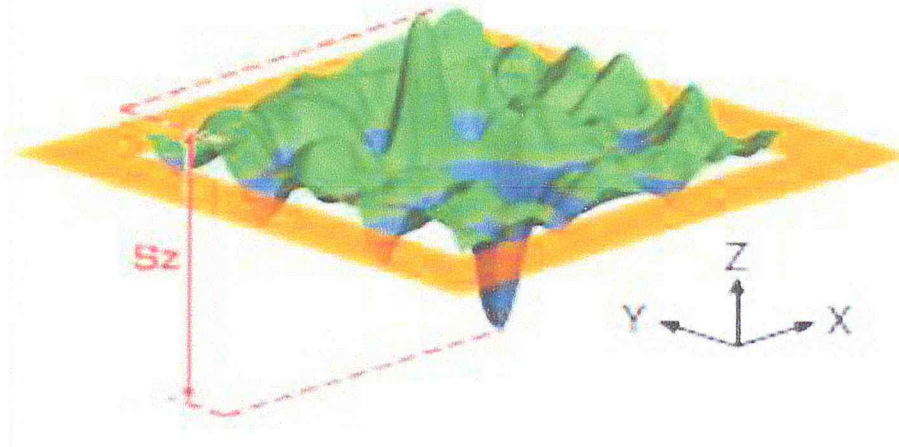


Figure I.28. Hauteur de dix points de la surface [TAL ,12].

### Conclusion :

L'usinage des surfaces gauches est un problème complexe nécessitant la prise en compte de plusieurs paramètres tels que la stratégie d'usinage, le type d'outils, la cinématique de la machine, la direction d'usinage et la qualité de la surface résultante. Les mauvaises conditions de coupe vont engendrées une surface usinée d'une qualité médiocre. Afin de remédier à ces problèmes, il est primordial de développer des approches pour identifier les zones de l'intersection.

Nous proposons dans cette étude une approche pour optimiser le temps de calcul et pour déterminer la qualité de surface résultante de chaque zone créée en utilisant les « Triple-Dexels » et les « cellules ». Cette approche peut être utilisée pour n'importe quelle surface gauche et pour n'importe quelle stratégie d'usinage. Cette approche sera détaillée dans le chapitre suivant.

# **Chapitre 2 :**

---

## **Etude conceptuelle**

## Introduction :

Après avoir présenté dans le chapitre précédent un état de l'art et des généralités indispensables pour la compréhension de notre travail et pour donner une vue générale de notre application. Le présent chapitre sera consacré à cerner les étapes entreprises pour réaliser ce travail. Ces étapes sont, en premier lieu, présentées dans l'architecture générale de l'application. Par la suite, elles seront détaillées chacune dans un diagramme à part.

### 1. Architecture générale de l'application :

L'architecture générale de l'application logicielle à développer se compose de cinq parties essentielles (Figure II.1) :

- Lecture du modèle de la pièce en Triple-Dexels.
- Ajout d'une surépaisseur d'usinage aux segments.
- Optimisation par cellule.
- Simulation de l'usinage.
- Calcul des paramètres d'état de surface.

L'application à développer utilise comme entrées les données issues des modèles Triple-Dexels, modèles de trajectoire d'outil et modèles d'outil. Les données des modèles Triple-Dexels sont utilisées dans la création des cellules, la subdivision et l'affectation des segments. Cependant, les données de trajectoire d'outil et d'outil sont utilisées pour la simulation d'enlèvement de matière (usinage).

#### 1.1. Cycle de vie d'un segment :

Les segments passent par différents événements qui changent leurs états. Avec le cycle de vie d'un segment (Figure II.2), il est montré le changement d'état d'un segment en réponse à des événements.



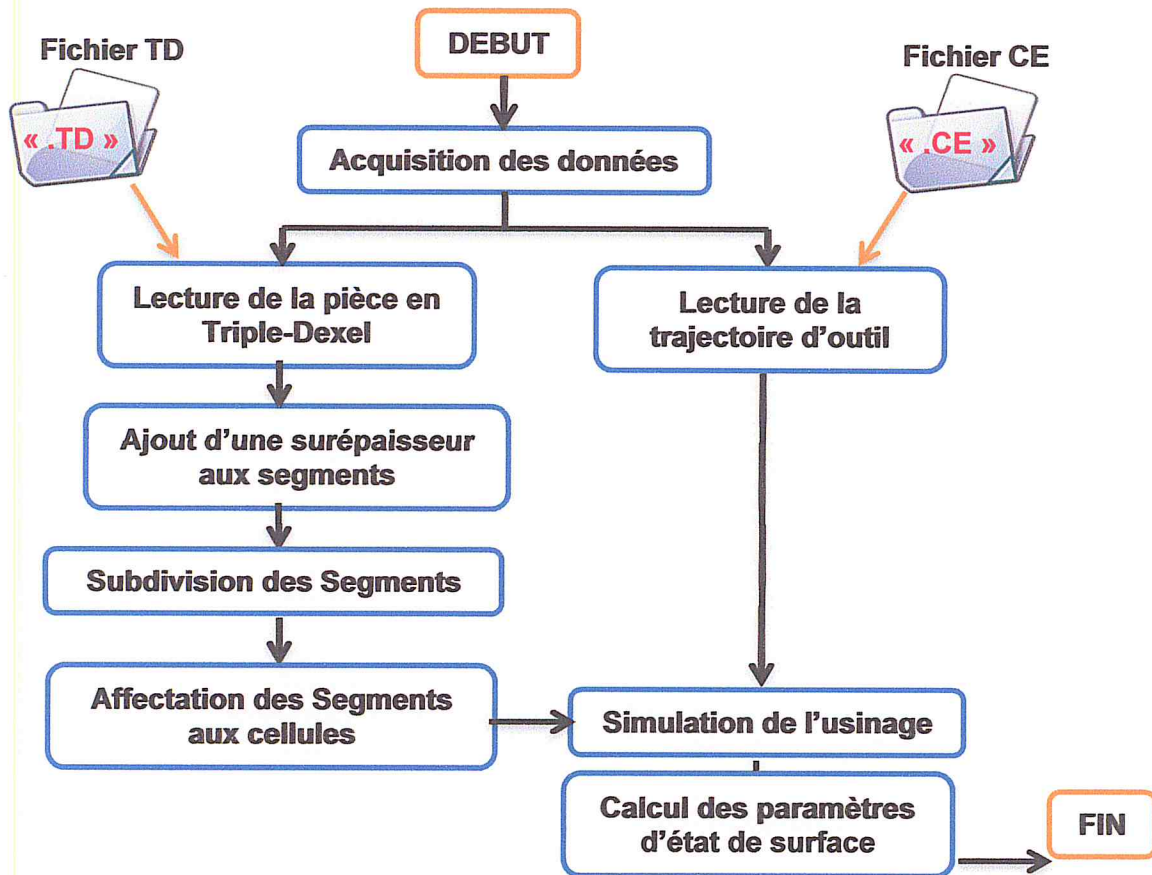


Figure II.1. Architecture générale de l'application.

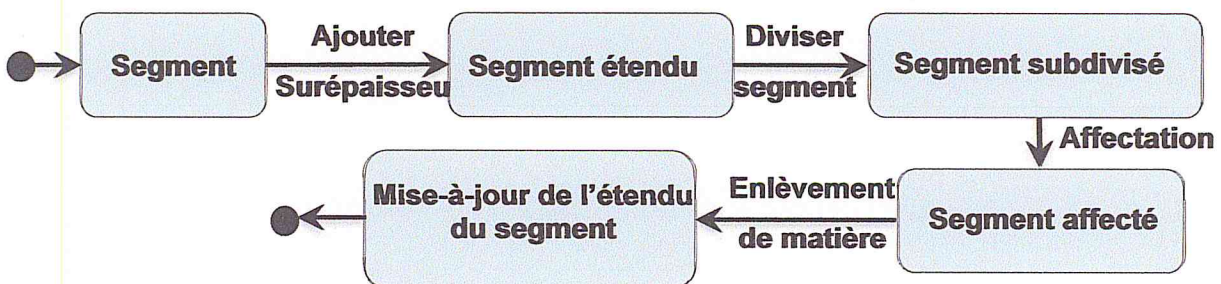


Figure II.2. Cycle de vie d'un segment.

### 1.2. Lecture du modèle de la pièce en Triple-Dexels :

Dans un premier temps, si le fichier Triple-Dexel de la pièce désirée par l'ingénieur n'existe pas, il est nécessaire de passer par l'application Triple-Dexel pour lire un fichier STL et créer le fichier Triple-Dexels associé au modèle STL de la pièce (Figure II.3). Une fois cette étape est terminée, il est possible de passer à l'étape suivante qui est la lecture du fichier Triple-Dexels.

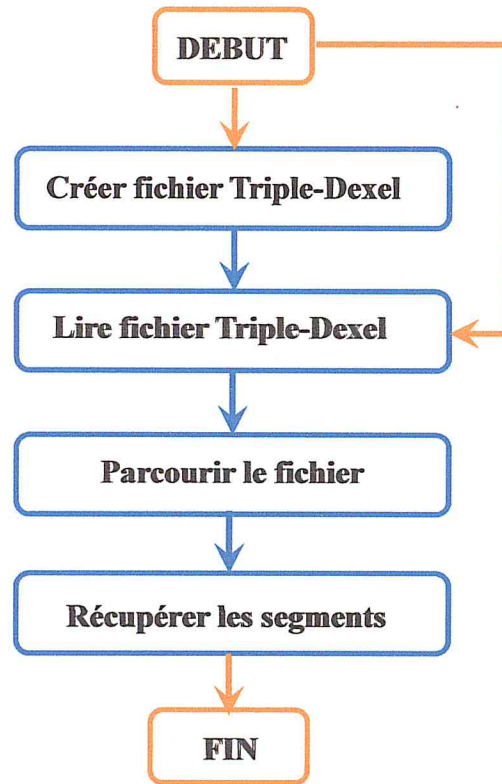


Figure II.3. Génération du modèle Triple-Dexel.

L'algorithme 1 illustre la génération d'un fichier Triple-Dexel tandis que l'algorithme 2 montre la lecture d'un fichier Triple-Dexel.

**Nombre segment:** nombre de segments dans la colonne j de la ligne i.

**Point début de segment :** (x1, y1, z1).

**Point fin de segment:** (x2, y2, z2).

**Mat :** La valeur de la matière du segment, True : segment matière,

False : segment non matière.

## DEBUT

Lancer l'exécution de l'application « Triple Dixel »

Créer un fichier Triple dixel « .TD »

Ouvrir le fichier Triple dixel « .TD » en mode écriture

Si le fichier est créé correctement alors

### Début

Ajouter les pas de grille choisis de dixel selon x, y et z

Lecture de la liste des dixel dans un plan « xy, yz ou xz »

Pour i vari de 0 à nombre de lignes faire

Pour j vari de 0 à nombre de colonnes faire

Lire: Nombre segment

Si Nombre segment != 0 alors

Écrire Nombre segment.

Pour k vari de 0 à Nombre segment faire

Lire : mat

Si mat = True alors

Écrire (x1, y1, z1), (x2, y2, z2), 1

Sinon

Écrire (x1, y1, z1), (x2, y2, z2), 0

Fin si.

Fin pour.

Fin si.

Fin pour.

Fin pour.

Écrire 0 à la fin du plan pour le séparer du prochain plan

Fin

Fin si.

FIN.

Algorithme 1. Ecriture du fichier Triple-Dixel.

**Pas dexel** : la largeur des cases de grilles XY, YZ, XZ.

**Nombre segment** : représente le nombre de segments dans un dexel.

**Coordonnées d'un segment** : point début, point fin, matière.

**Centre** : le centre de chaque segment.

## DEBUT

Entier : num  $\leftarrow$  0

Ouvrir le fichier triple dexel sélectionné.

**Tant que** ce n'est pas la fin du fichier **alors**

    Lire les pas dexel selon x y et z

    Lire le nombre segment

**Tant que** nombre segment  $\neq$  0 **alors**

**Pour** j vari de 0 à nombre segment **faire**

            Lire les coordonnées du segment j.

**Si** segment j est un segment matière **alors**

**Début**

                    Calculer son centre

                    SetNumSegment(num)

                    Num ++

                    Ajouter le segment j dans un vecteur de segments

**Fin**

**Fin si.**

**Fin pour.**

**Fin tant que.**

        Lire nombre segment.

**Fin tant que.**

        Ajouter le vecteur des segments au vecteur plan.

FIN.

**Algorithme 2.** Lecture du fichier Triple-Dexel.

### 1.3. Ajout d'une surépaisseur aux segments :

Après avoir exécuté la première étape et récupéré le fichier Triple-Dexel de la pièce désirée par l'ingénieur, il est possible de passer à l'étape suivante qui est l'estimation de l'état de la pièce avant la finition. Les Triple-Dexels lus du fichier « .TD » représentent le modèle de la pièce finale. Pour arriver à l'étape avant la finition, il est nécessaire d'ajouter une surépaisseur d'usinage à chaque Triple-Dexel suivant les trois directions X, Y et Z. L'algorithme 3 décrit cette étape.

**DEBUT**

    Lire la surépaisseur

**Pour** i varie de 0 à nombre de dexels **faire**

**Pour** j varie de 0 à nombre de segments dans chaque dexel **faire**

            Calculer la longueur du segment j

**Si** la longueur de segment ne dépasse pas le brut de la pièce **alors**

                Longueur (segment j)  $\leftarrow$  longueur (segment j) + surépaisseur

**Sinon**

                Longueur (segment j)  $\leftarrow$  longueur brut.

**Fin si.**

**Fin pour.**

**Fin pour.**

**FIN.**

**Algorithme 3.** Ajout d'une surépaisseur.

### 1.4. Création du brut :

La création du brut a pour but d'englober tous les segments du modèle de la pièce dans une enveloppe parallélépipédique parallèle aux axes X, Y et Z. Il s'agit de trouver les coordonnées  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{min}$  et  $Z_{max}$  des points extrêmes du modèle Triple-Dexel (Figure II.4). Par la suite, la longueur, la largeur et la hauteur du brut sont calculées par :

$$\text{Longueur} = Y_{max} - Y_{min}$$

$$\text{Largeur} = X_{max} - X_{min}$$

$$\text{Hauteur} = Z_{max} - Z_{min}$$

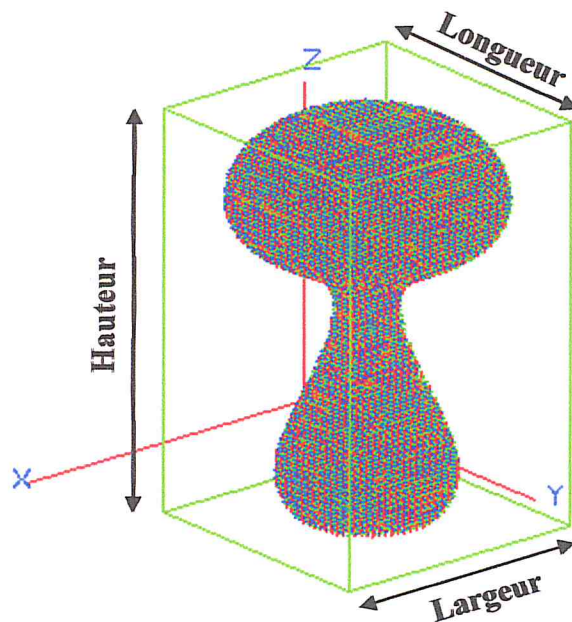


Figure II.4. Brut de la pièce.

### 1.5. Création des cellules :

Comme le modèle Triple-Dexel des surfaces gauches est défini par un nombre très important de segments, la simulation d'usinage nécessite un temps de calcul très grand. Pour contourner ce problème et pour minimiser le temps de calcul, les segments, de la surface, sont groupés dans des blocs parallélépipédiques appelés « cellules » (Figure II.5). Ces cellules sont créées à partir du brut et du nombre de cellules suivant les axes X, Y et Z. Chaque cellule est définie par ses dimensions (longueur «  $Dy$  », largeur «  $Dx$  » et hauteur «  $Dz$  ») et les coordonnées de ses points extrêmes  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{min}$  et  $Z_{max}$ . Cette façon de faire permet de limiter les zones d'intersection et de récupérer les cellules qui sont en chevauchement avec l'enveloppe de l'outil. Après avoir récupéré les cellules en chevauchant avec l'enveloppe de l'outil, les segments appartenant à ces cellules sont récupérés. Les cellules créées forment une matrice tridimensionnelle où chaque cellule contient les segments appartenant à son enveloppe.

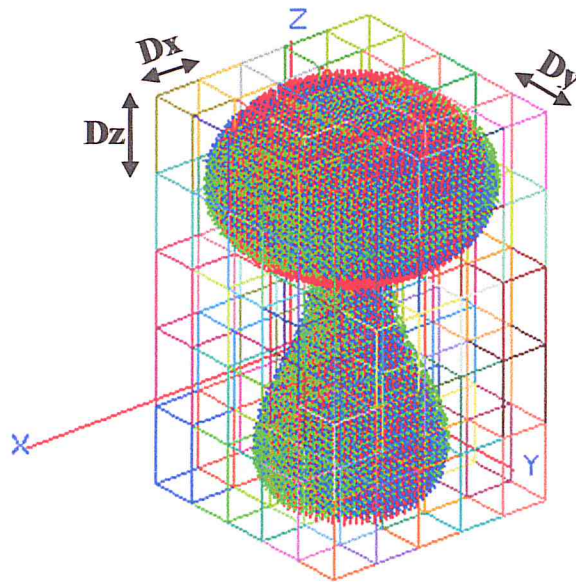


Figure II.5. Matrice des cellules de la pièce.

#### 1.6. Subdivision des segments :

Après la création de la matrice des cellules, nous passons à l'étape de subdivision. Cette étape se fait par la comparaison des coordonnées de chaque point début et fin de chaque segment de la surface et les limites maximale et minimale de chaque cellule. Pour un segment  $S$  de coordonnées point début  $X$ , point fin  $X$ , point début  $Y$ , point fin  $Y$ , point début  $Z$ , point fin  $Z$  et un brut avec ses limites  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{min}$  et  $Z_{max}$ , l'étape de subdivision se traduit par l'algorithme 4.

L'algorithme 4 de subdivision il sera appliqué sur les trois (03) plans  $XY$ ,  $YZ$  et  $XZ$  où chaque plan est défini par ses paramètres. Alors pour que l'algorithme 4 fonctionne correctement sur les trois (03) plans, il est nécessaire de changer les deux premières boucles et choisir à chaque fois un nouveau plan et changer la condition (1).

**Nombre d'axes** : représente le nombre de segments dans un plan (xy, yz ou xz).

**Pas x, y, z cellules** : la longueur, largeur, hauteur des cases des cellules.

**Point début, fin original** : les points limite original de chaque segment.

**Max, Min cellule** : les limites de chaque cellule selon x, y et z.

## DEBUT

Pour m varie de 0 à nombre d'axes faire

Pour n varie de 0 à nombre d'axes [m] faire

Début

$i = (\text{point début}X - X_{\min}) / \text{pas } x \text{ cellules}$

$j = (\text{point début}Y - Y_{\min}) / \text{pas } y \text{ cellules}$

$k = (\text{point début}Z - Z_{\min}) / \text{pas } z \text{ cellules}$

$a = (\text{point fin}X - X_{\min}) / \text{pas } x \text{ cellules}$

$b = (\text{point fin}Y - Y_{\min}) / \text{pas } y \text{ cellules}$

$c = (\text{point fin}Z - Z_{\min}) / \text{pas } z \text{ cellules}$

Si (i, j, k, a, b, et c égale nombre cellule x, y, z respectivement) alors

$i = i - 1; j = j - 1; k = k - 1; a = a - 1; b = b - 1; c = c - 1;$

Fin si

Si  $k=c$  alors  $\longrightarrow$  (condition 1)

Le segment est à l'intérieur de cellule;

Ajouter le segment au vecteur de sous segment;

Sinon

Point début = Point début original;

Point Fin = max de cellule[i] [j] [k];

Ajouter le segment au vecteur de sous segment;

Pour p varie de k+1 à c-1 faire

! Point début = min de cellule[i] [j] [p];

! Point fin = max de cellule[i] [j] [p];

! Ajouter le segment au vecteur de sous segment;

Fin pour

Point début = min de cellule[i] [j] [c];

Point fin = Point fin original;

Ajouter le segment au vecteur de sous segment;

Fin si

Fin

Fin pour

Fin pour

FIN

Algorithme 4. Subdivision des segments.



### 1.7. Affectation des segments aux cellules :

Après la nouvelle représentation des segments et pour minimiser le temps de calcul dans l'étape de simulation d'usinage, nous affectons les segments subdivisés aux cellules correspondantes (Figure II.5). L'algorithme 5 montre cette étape (Figure II.6).

**Centre X, Y, Z :** les coordonnées de point centre de chaque segment.

**Nombre sous segment :** représente le nombre de sous segments dans un plan (xy, yz ou xz) après la subdivision.

**DEBUT**

Pour m varie de 0 à nombre sous segment faire

Centre X = (point débutX + point finX)/2

Centre Y = (point débutY + point finY)/2

Centre Z = (point débutZ + point finZ)/2

i = Centre X - Xmin / pas x cellules

j = Centre Y - Ymin / pas y cellules

k = Centre Z - Zmin / pas z cellules

Si (i, j et k égale le nombre cellule x, y, et z respectivement) alors

i = i - 1; j = j - 1; k = k - 1;

Fin si

Affecter le segment aux cellules [i] [j] [k]

Fin pour

**FIN**

#### Algorithme 5. Affectation des segments aux cellules.

La même procédure sera entreprise pour l'étape de l'affectation. Pour que l'algorithme 5 fonctionne correctement sur les trois (03) plans, il est nécessaire de changer la première boucle et choisir à chaque fois le vecteur du sous segment correspondant au plan choisi.

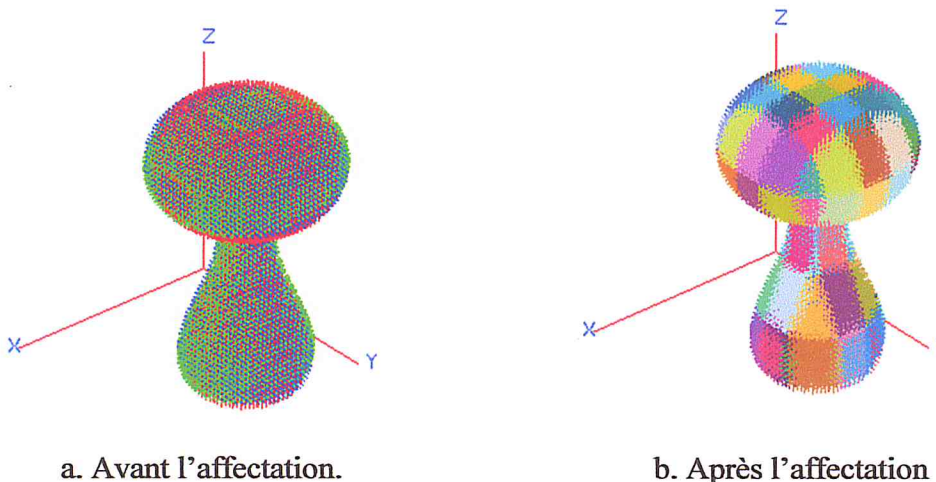


Figure II.6. Affectation des segments aux cellules.

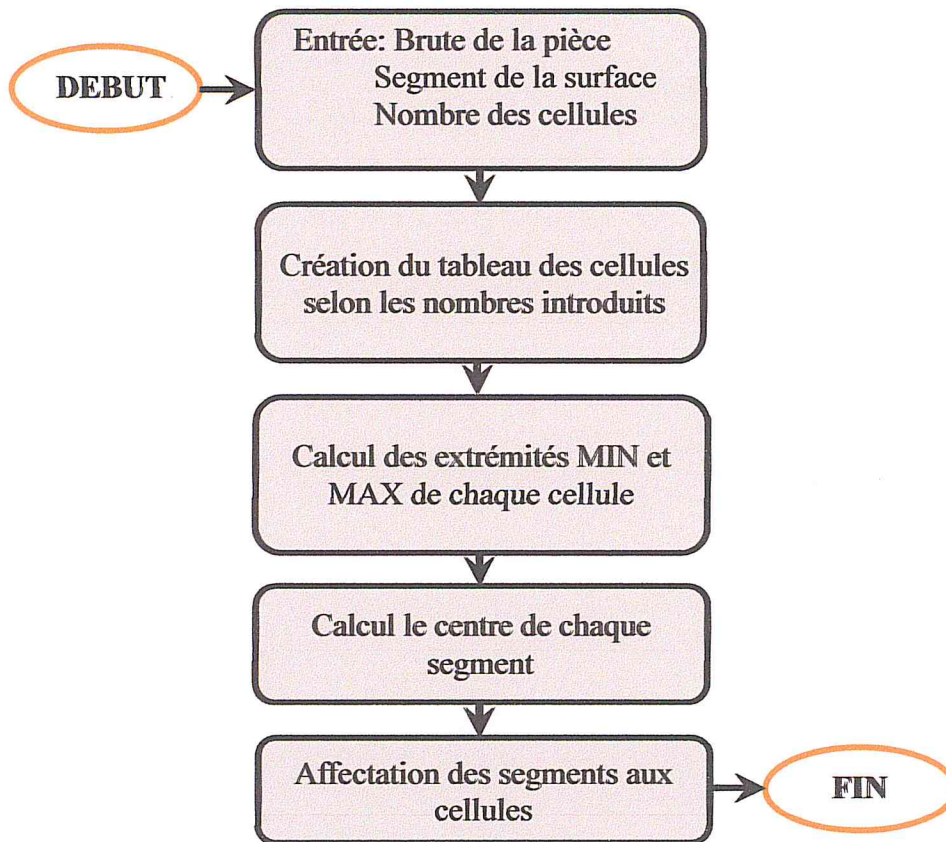


Figure II.7. Processus d'affectation des segments aux cellules.

### 1.8. Lecture de la trajectoire d'outil :

Après l'étape de l'optimisation par cellules, nous passons à l'étape « lecture du trajet d'outil ». Nous récupérons le trajet d'outil correspondant à la pièce utilisée à partir du fichier « .CE » (Figure II.7 et Figure II.8). La lecture du fichier CE est donnée par l'algorithme 6.

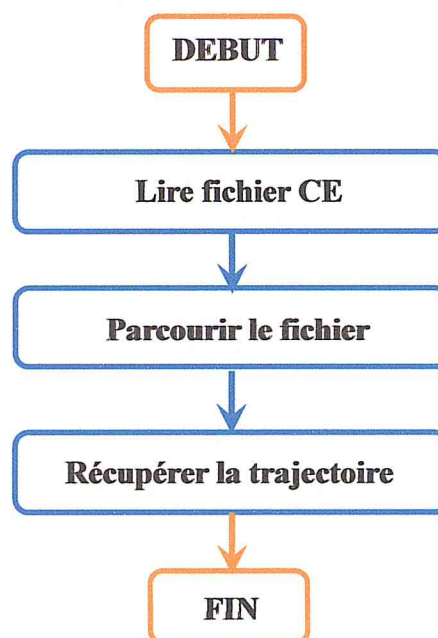


Figure II.8. Récupération de la trajectoire d'outil.

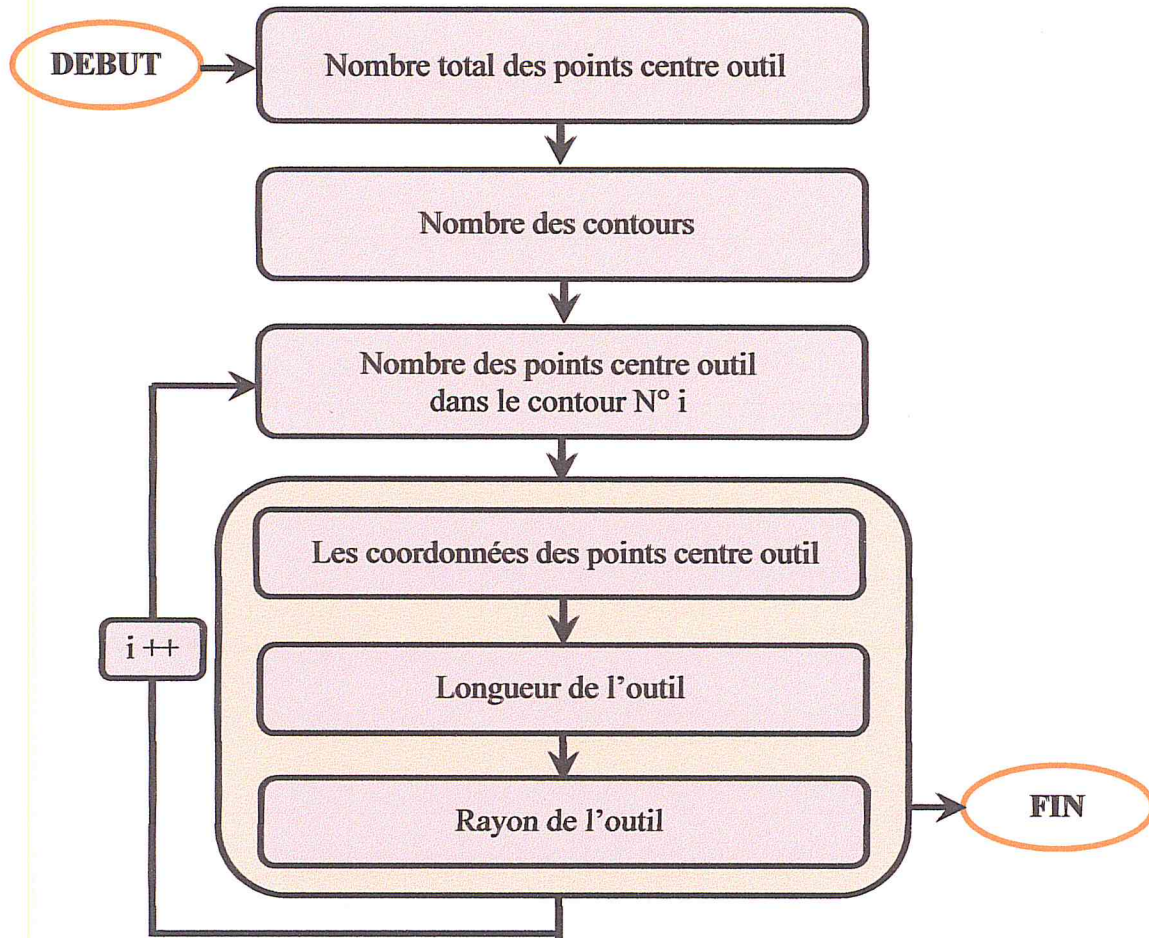


Figure II.9. Structure de fichier « CE ».

**Nombre centre outil :** représente le nombre total des centres outil.

**Centre :** représente le centre de l'outil.

**DEBUT**

Ouverture du fichier sélectionné en mode lecture.

Lire le nombre centre outil.

**Tant que** ce n'est pas la fin du fichier **alors**

Lire le nombre centre outil dans le contour.

**Pour** i vari de 0 à nombre centre outil **faire**

Lire les coordonnées du centre i.

Ajouter le centre à un vecteur de centre d'outil.

**Fin pour.**

**Fin tant que.**

**FIN.**

**Algorithme 6.** Lecture du fichier de trajectoire.

### 1.9. Simulation d'usinage :

La simulation d'usinage est réalisée suite au calcul des intersections entre les segments et la sphère pour obtenir les nouvelles dimensions des segments. Sachant que la pièce est divisée en cellules, chaque cellule regroupe un nombre  $N$  de segments, donc à chaque point de la trajectoire, nous calculons l'intersection avec les segments appartenant aux cellules qui chevauchent avec la sphère au niveau de ce point. La Figure II.9 montre toutes les étapes suivies dans notre simulation.

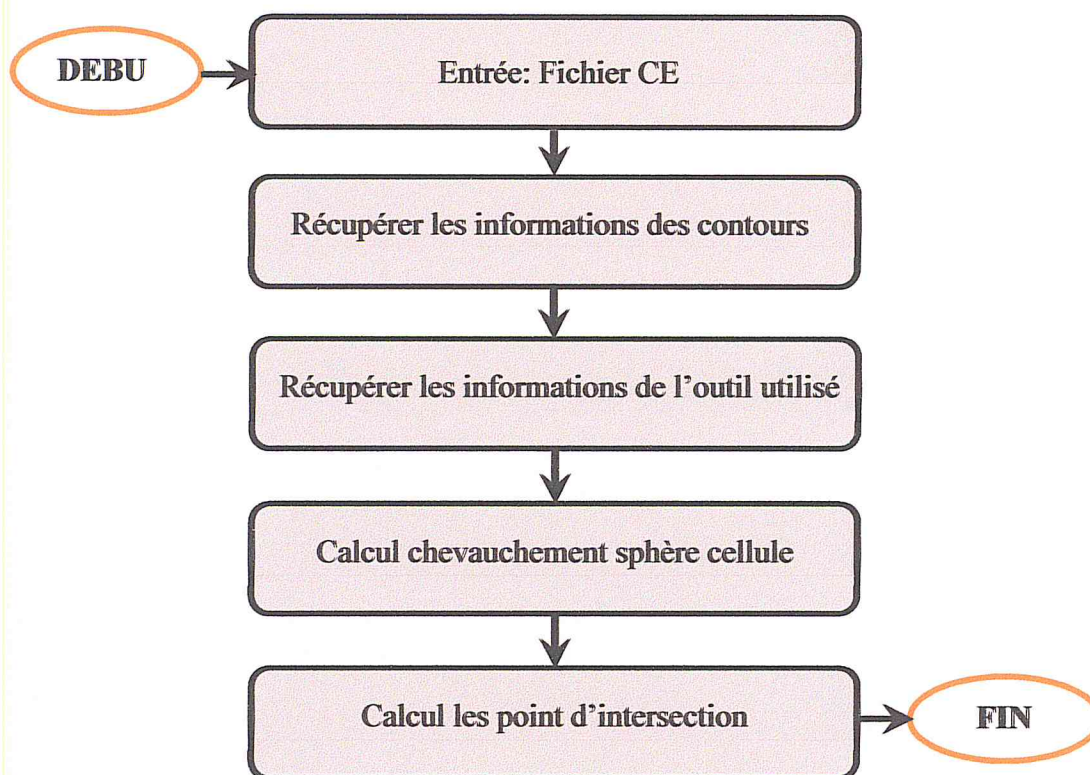


Figure II.10. Architecture de la simulation.

#### 1.9.1. Récupération des informations des contours:

La stratégie de finition utilisée est « Z-Constant » qui consiste à générer les contours d'usinage (Figure II.10). Ce trajet est obtenu par l'intersection des segments des triangles avec des plans parallèles horizontaux. Le nombre de plans dépend de la profondeur de passe choisie.

#### 1.9.2. Récupération des informations de l'outil utilisé :

A l'aide du fichier de trajectoire « .CE » choisi, nous pouvons récupérer les informations de l'outil utilisé. Dans ce fichier, nous trouvons plusieurs informations parmi lesquelles nous avons la longueur de la partie corps de l'outil et le rayon de l'outil (Figure II.11).

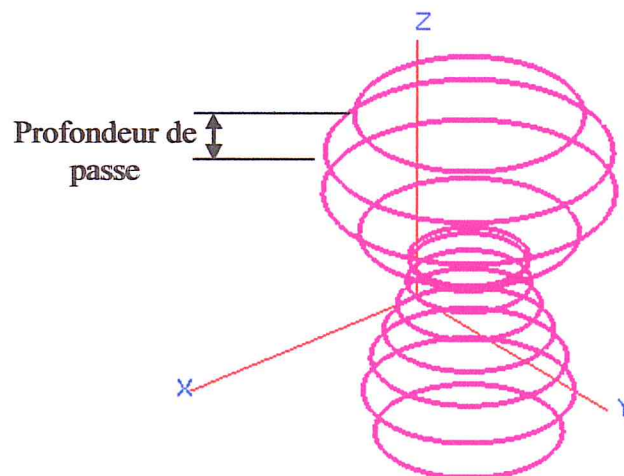


Figure II.11. Contours d'usinage.

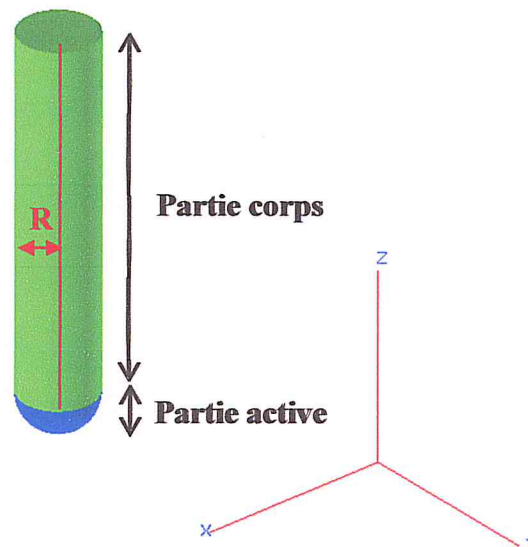


Figure II.12. Outil hémisphérique.

### 1.9.3. Calcul du chevauchement sphère cellule :

La figure suivante montre tous les différents cas du chevauchement entre une sphère et les cellules (Figure II.12). Les cellules chevauchant avec la sphère doivent vérifier les conditions suivantes :

$$X_{\min\_outil} \geq X_{\min} ; X_{\max\_outil} \geq X_{\max} ;$$

$$Y_{\min\_outil} \geq Y_{\min} ; Y_{\max\_outil} \geq Y_{\max} ;$$

$$Z_{\min\_outil} \geq Z_{\min} ; Z_{\max\_outil} \geq Z_{\max} ;$$

Avec :

$X_{\min\_outil}$ ,  $Y_{\min\_outil}$ ,  $Z_{\min\_outil}$  : les limites minimums de l'enveloppe du centre de la sphère.

$X_{max\_outil}$ ,  $Y_{max\_outil}$ ,  $Z_{max\_outil}$  : les limites maximums de l'enveloppe du centre de la sphère.

$X_{min}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Z_{min}$  : les limites minimums de l'enveloppe de la cellule.

$X_{max}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{max}$  : les limites maximums de l'enveloppe de la cellule.

Les conditions sont appliquées sur les trois (03) plans. Dans la figure suivante nous montrons uniquement le plan XY.

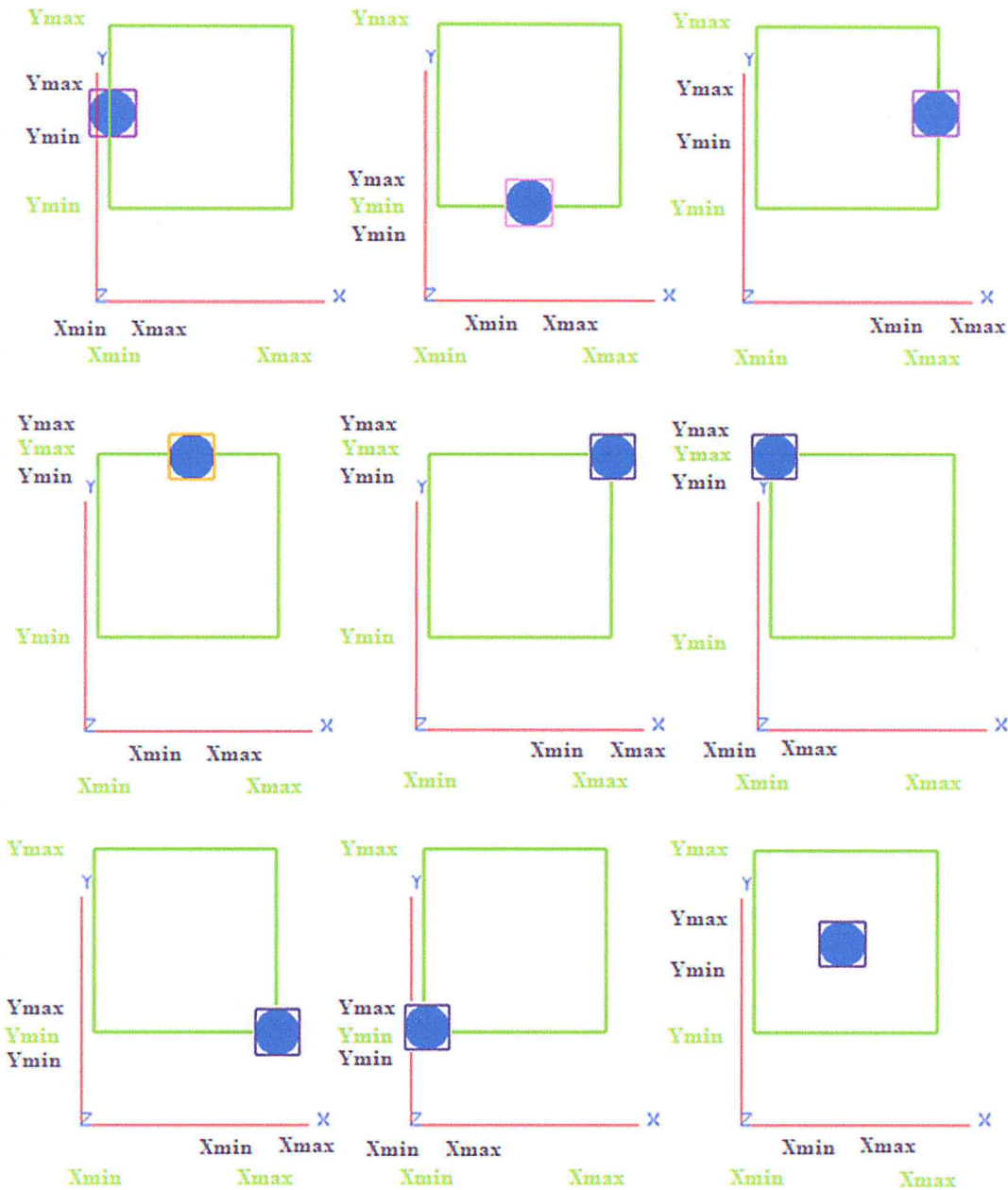


Figure II.13. Différents cas de chevauchement sphère-cellule.

L'algorithme de chevauchement enveloppe outil cellules expliqué dans le paragraphe suivant. Nous commençons par le premier point enregistré dans le vecteur point centre. Ensuite, nous récupérons les coordonnées min et max de l'enveloppe de l'outil sur ce point. Les cellules qui chevauchent avec l'enveloppe sont enregistrées par leurs coordonnées min et max. Une fois les cellules sont tous vérifiées, nous terminons par une boucle qui fait le tour des coordonnées enregistrées pour déterminer toutes les cellules en chevauchement. L'algorithme est répété pour chaque point choisi du vecteur point centre. L'algorithme 7 résume ces étapes :

**i\_min, j\_min, k\_min:** les coordonnées min de cellule au chevauchement.  
**i\_max, j\_max, k\_max:** les coordonnées max de cellule au chevauchement.

### DEBUT

```

Si Xmin_outil >= Xmin alors i_min = (Xmin_outil - Xmin)/ pas x cellules
  Sinon i_min = 0
Fin si
Si Ymin_outil >= Ymin alors j_min = (Ymin_outil - Ymin)/ pas y cellules
  Sinon j_min = 0
Fin si
Si Zmin_outil >= Zmin alors k_min = (Zmin_outil - Zmin)/ pas z cellules
  Sinon k_min = 0
Fin si
Si Xmax_outil >= Xmax alors i_max = (Xmax_outil - Xmax)/ pas x cellules
  Sinon i_max=0
Fin si
Si Ymax_outil >= Ymax alors j_max = (Ymax_outil - Ymax)/ pas y cellules
  Sinon j_max=0
Fin si
Si Zmax_outil >= Zmax alors k_max = (Zmax_outil - Zmax)/ pas z cellules
  Sinon k_max=0
Fin si
Pour i varie de i_min à i_max faire
  Pour j varie de j_min à j_max faire
    Pour k varie de k_min à k_max faire
      Récupérer les tous les cellules aux chevauchements
    Fin pour
  Fin pour
Fin pour

```

FIN

Algorithme 7. Chevauchement sphère cellule.

La Figure II.13 montre un exemple de chevauchement enveloppe outil cellules.

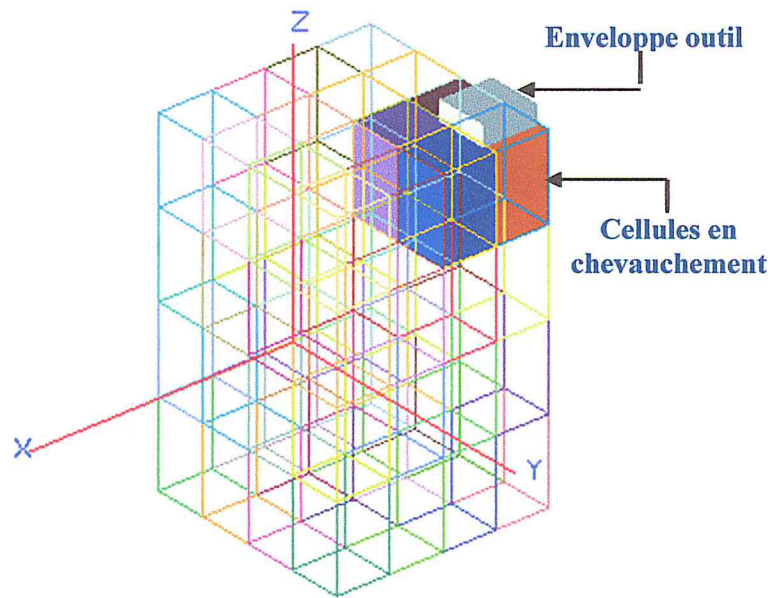


Figure II.14. Chevauchement enveloppe outil cellules.

#### 1.9.4. Calcul des points d'intersection :

L'intersection entre une sphère et un segment est calculée génériquement, c'est-à-dire est menée indépendamment de la direction du segment. En premier lieu et avant de commencer l'intersection, les segments sont récupérés à l'aide des cellules qui sont en chevauchement avec la sphère (Figure II.14).

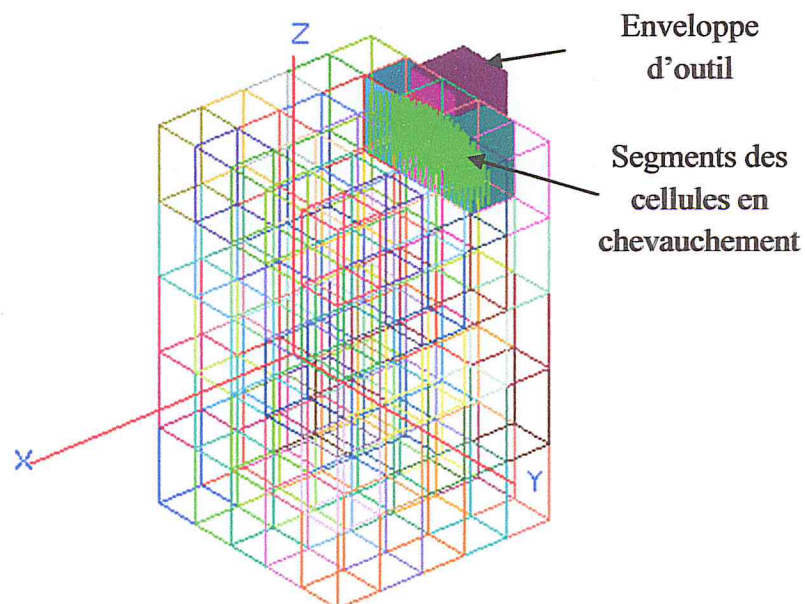


Figure II.15. Segments des cellules.



La sphère, quant à elle, est définie par un centre avec ses coordonnées  $(p_x, p_y, p_z)$ , les coordonnées  $x, y, z$  sont les points qui vérifient l'équation de la sphère de rayon  $R$  donnée par [SHE, 12].

$$(x - p_x)^2 + (y - p_y)^2 + (z - p_z)^2 = R^2$$

Comme le segment est une droite, il est défini par l'équation paramétrique suivant :

$$S(t) = o + d * \alpha$$

avec  $\alpha > 0$

Avec :  $o$  : point début du segment.

$d$  : vecteur directeur du segment.

$\alpha$  : Paramètre de calcul générique.

Pour trouver les points d'intersection, il faut d'abord remplacer l'équation du segment dans celle de la sphère.

$$((\text{Point débutX} + (\text{Point finX} - \text{Point débutX}) * \alpha) - p_x)^2 + ((\text{Point débutY} + (\text{Point finY} - \text{Point débutY}) * \alpha) - p_y)^2 + ((\text{Point débutZ} + (\text{Point finZ} - \text{Point débutZ}) * \alpha) - p_z)^2 = R^2$$

Ensuite, il faut résoudre cette équation pour  $\alpha$  afin de trouver les points d'intersections.

Nous pouvons alléger la notation en posant [SHE, 12]:

$$V = \text{Point finX} - \text{Point débutX}$$

$$V1 = \text{Point finY} - \text{Point débutY}$$

$$V2 = \text{Point finZ} - \text{Point débutZ}$$

$$H = \text{Point débutX} - p_x$$

$$H1 = \text{Point débutY} - p_y$$

$$H2 = \text{Point débutZ} - p_z$$

$$A = V^2 + V1^2 + V2^2$$

$$B = 2 * (V * H + V1 * H1 + V2 * H2)$$

$$C = H^2 + H1^2 + H2^2 - R^2$$

L'équation de départ se simplifie alors à :

$$A * \alpha * \alpha + B * \alpha + C = 0$$

L'équation précédente est une équation quadratique dont les solutions sont déterminées à partir de :

$$\Delta = B^2 - 4 * A * C$$

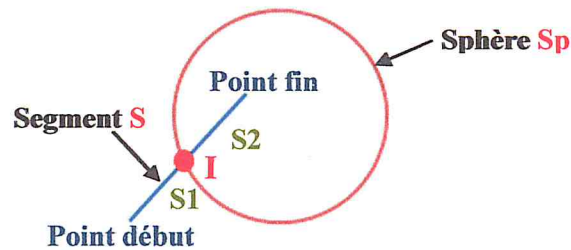
- Si  $\Delta < 0$ , alors l'équation n'a pas de solutions (pas d'intersection).
- Si  $\Delta = 0$ , alors il y a une solution (le segment est tangent avec la sphère).
- Si  $\Delta > 0$ , alors il y a deux solutions (deux points d'intersection).

$$\alpha_1 = (-B - \sqrt{\Delta}) \div 2 * A$$

$$\alpha_2 = (-B + \sqrt{\Delta}) \div 2 * A$$

Dans les cas suivants, nous avons montré les différents cas d'intersection entre une sphère et un segment :

- **Cas 1** : Si  $(\alpha_1 \geq 0 \text{ et } \alpha_1 \leq 1) \text{ et } (\alpha_2 > 1)$

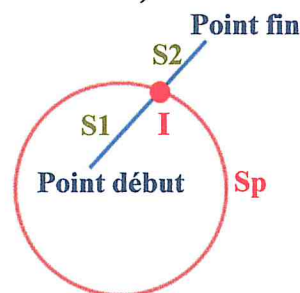


Le segment S se divise en deux (02) segments S1 et S2 tel que :

Les coordonnées du segment S1 : [point début S, point fin I]

Le reste du segment S ça veut dire S2 va être supprimé.

- **Cas 2** : Si  $(\alpha_1 < 0) \text{ et } (\alpha_2 \geq 0 \text{ et } \alpha_2 \leq 1)$

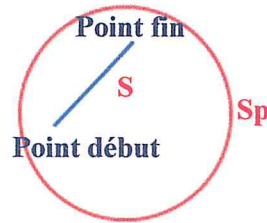


Le segment S se divise en deux (02) segments S1 et S2 tel que :

Les coordonnées du segment S2 : [point début I, point fin S]

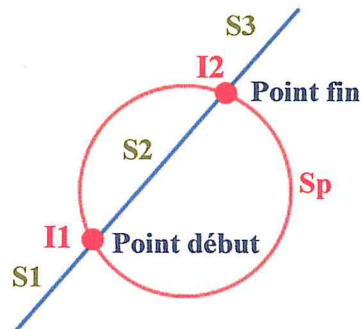
Le reste du segment S ça veut dire S1 va être supprimé.

- Cas 3 : Si  $(\alpha_1 < 0)$  et  $(\alpha_2 > 1)$



Le segment S à l'intérieur de la sphère Sp, alors le segment S va être supprimé.

- Cas 4 : Si  $(\alpha_1 \geq 0 \text{ et } \alpha_1 \leq 1)$  et  $(\alpha_2 > 0 \text{ et } \alpha_2 \leq 1)$



Le segment S se divise en trois (03) segments S1, S2 et S3 tel que :

Les coordonnées du segment S1 : [point début S, point fin I1]

Les coordonnées du segment S3 : [point début I2, point fin S]

Le reste du segment S ça veut dire S2 va être supprimé.

#### 1.10. Calculer les paramètres d'état de surface :

Parmi les cinq (05) paramètres que nous avons défini dans le chapitre 1, nous nous intéressons juste aux deux premiers paramètres le Sa (amplitude moyenne) et le Sq (Rugosité moyenne quadratique).

##### 1.10.1. Calcul des écarts :

Après avoir simulé l'usinage, nous sommes passés au calcul des erreurs résultantes de la simulation. Ces erreurs sont calculées à l'aide de la comparaison entre les points début et les point fin de chaque segment de la pièce usinée et les points début et fin des segments de la pièce idéale :

$$Ecart1 = point\_debut\_original - point\_debut$$

$$Ecart2 = point\_fin\_original - point\_fin$$

Avec :

Point\_debut\_original, Point\_fin\_original : les points extrémités des segments de la pièce idéale.

Point\_debut, Point\_fin : les points extrémités des segments de la pièce usinée.

➤ **Calcul de Sa** : pour calculer l'amplitude moyenne de surface, nous passons par deux étapes :

- **1<sup>ère</sup> étape** : elle commence par le calcul du point topographie. Ce point est la somme des trois (03) points voisins divisés par 3. Les trois (03) points voisins sont récupérés à l'aide de la comparaison entre le point début ou fin du plan XY avec les deux (02) autres plans. La plus petite distance entre le point du plan XY avec les points des plans YZ et XZ sont les points visions du point dans plan XY.

- **2<sup>ème</sup> étape** : après avoir déterminé le point topographie, nous calculons l'écart de ce point. Le calcul de l'écart est montré dans l'équation suivante :

$$Ecart = \sqrt{(ecart\ point\ XY)^2 + (ecart\ point\ YZ)^2 + (ecart\ point\ XZ)^2}$$

Après avoir calculé l'écart de point topographie, nous passons au calcul de la surface (A) :

$$A = (nbr_{S(XY)}) + (nbr_{S(YZ)}) + (nbr_{S(XZ)})$$

Avec :

$nbr_{S(XY)}$ ,  $nbr_{S(YZ)}$  et  $nbr_{S(XZ)}$  : représente le nombre des segments dans les plans (XY), (YZ) et (XZ) respectivement.

Maintenant que nous avons toutes les informations nécessaires pour calculer le Sa, nous pouvons calculer le Sa globalement ou localement. La même équation s'applique pour les deux cas sauf que le seul changement est la zone de calcul.

$$Sa = \sqrt{(1 \div A) * \sum_{i=1}^n Ecart}$$

Avec :

A : zone de définition.

Ecart : représente l'écart du point topographie.

n : nombre des écarts des points topographie.

La Figure II.15 illustre toutes ses étapes :

➤ **Calcul de Sq** : les mêmes étapes sont appliquées sur le Sq. Le changement est montré dans l'équation suivante :

$$Sq = \sqrt{(1 \div A) * \sum_{i=1}^n \text{Ecart}^2}$$

Avec :

A : la zone de définition.

Ecart : représente l'écart du point topographie.

n : le nombre des écarts des points topographie.

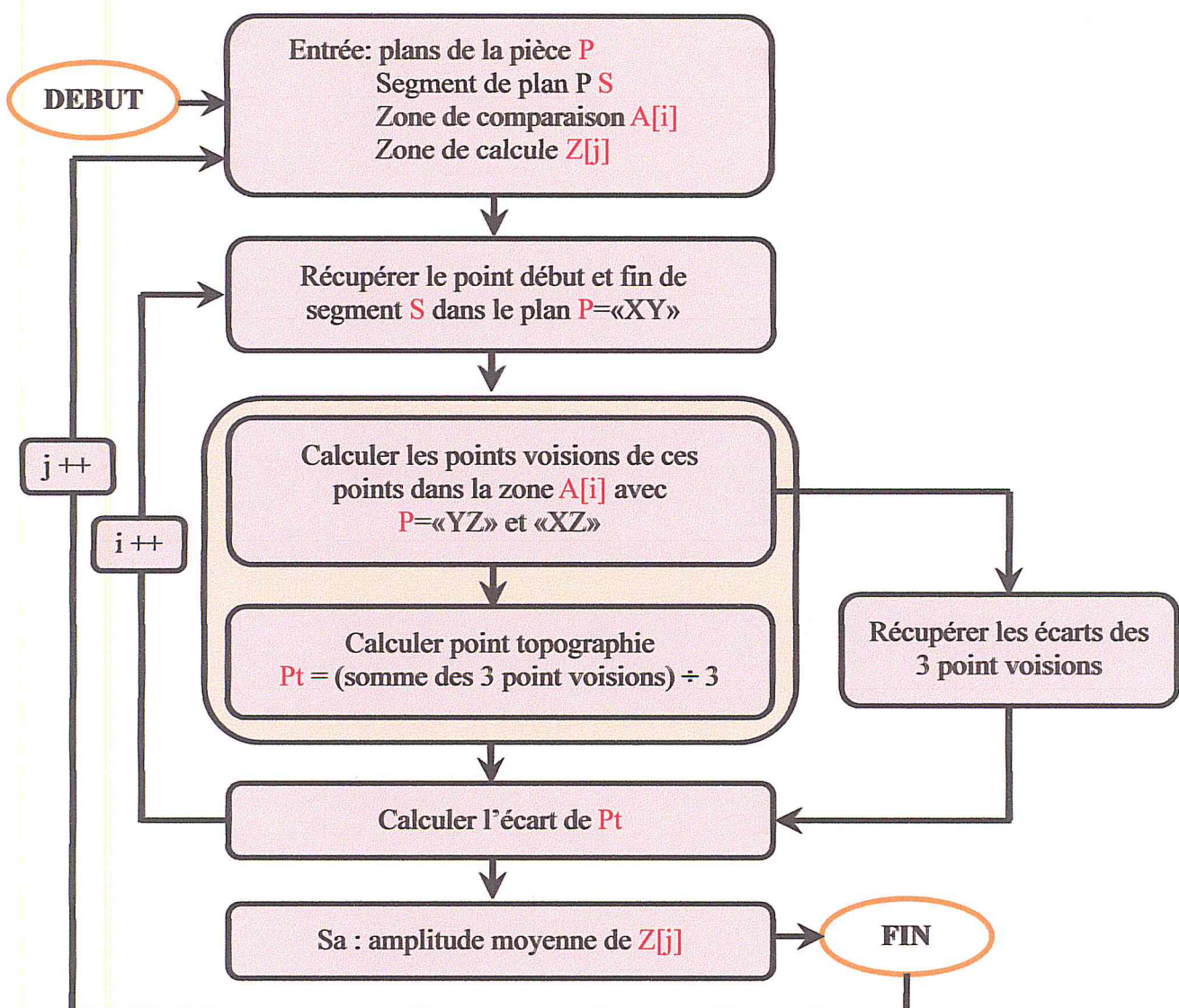


Figure II.16. Etapes de calcul de Sa.

## 2. Modélisation UML de l'application :

Pour présenter les différentes fonctionnalités de notre application, nous avons opté pour les diagrammes du langage UML. La modélisation UML permet de :

- Faciliter l'analyse, la compréhension et la réduction de la complexité du système.
- Simuler le système et reproduire ses comportements.
- Penser objet dès le départ.

Dans notre projet, nous avons utilisé les diagrammes suivants :

- Diagramme de cas d'utilisation.
- Diagramme de classe.

### 2.1. Diagramme de cas d'utilisation :

Les cas d'utilisations permettent de recueillir, d'analyser, d'organiser les besoins et de recenser les grandes fonctionnalités du système. Nous commençons par le diagramme de cas d'utilisation générale qui donne une vue globale du fonctionnement du système.

2.1.1. Diagramme de cas d'utilisation générale :

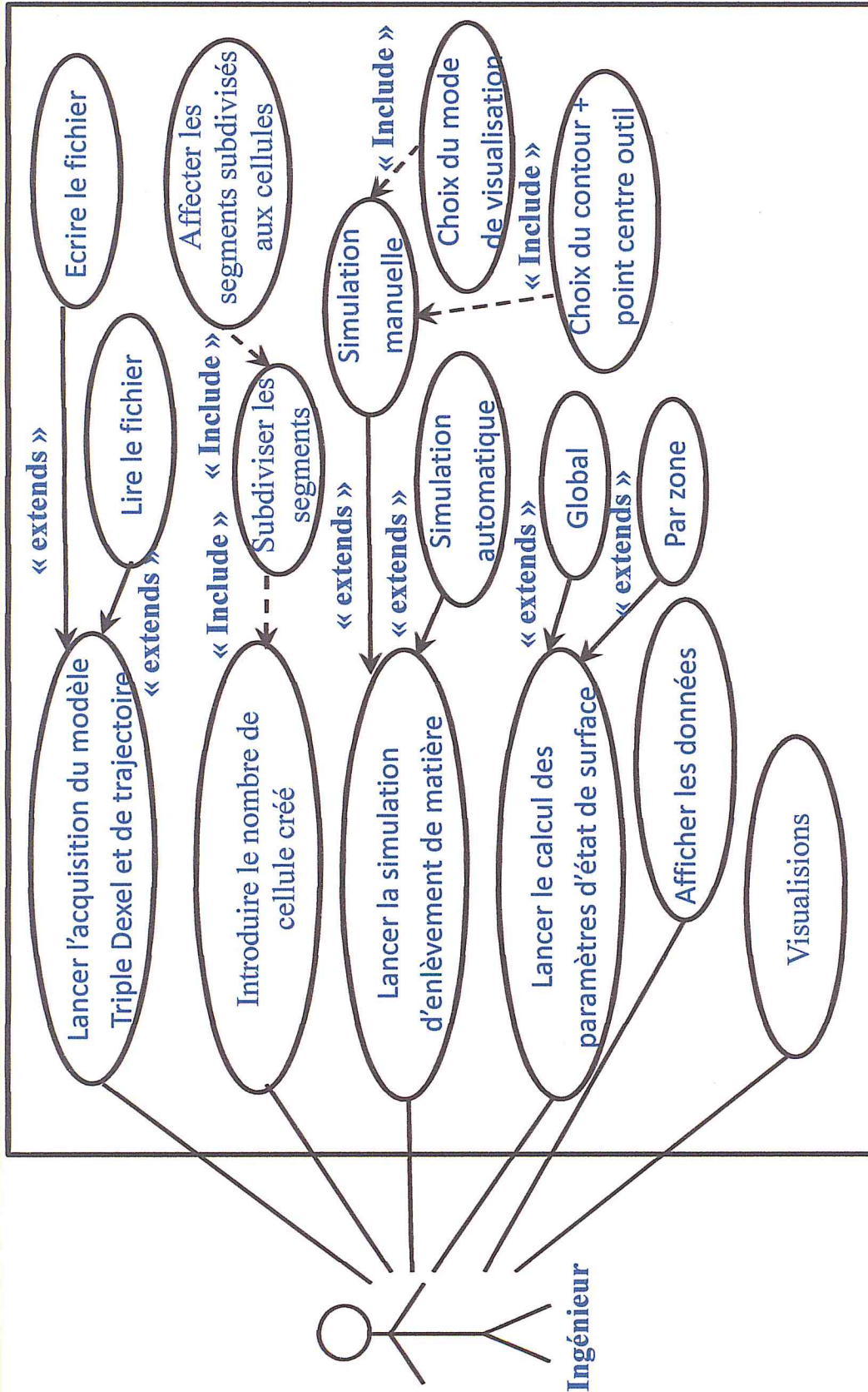


Figure II.17. Diagramme cas d'utilisation générale.

2.2. Diagramme de classe :

Le diagramme de classe est une représentation statique des éléments qui composent un système et de leurs relations, permet de spécifier QUI intervient à l'intérieur du système.

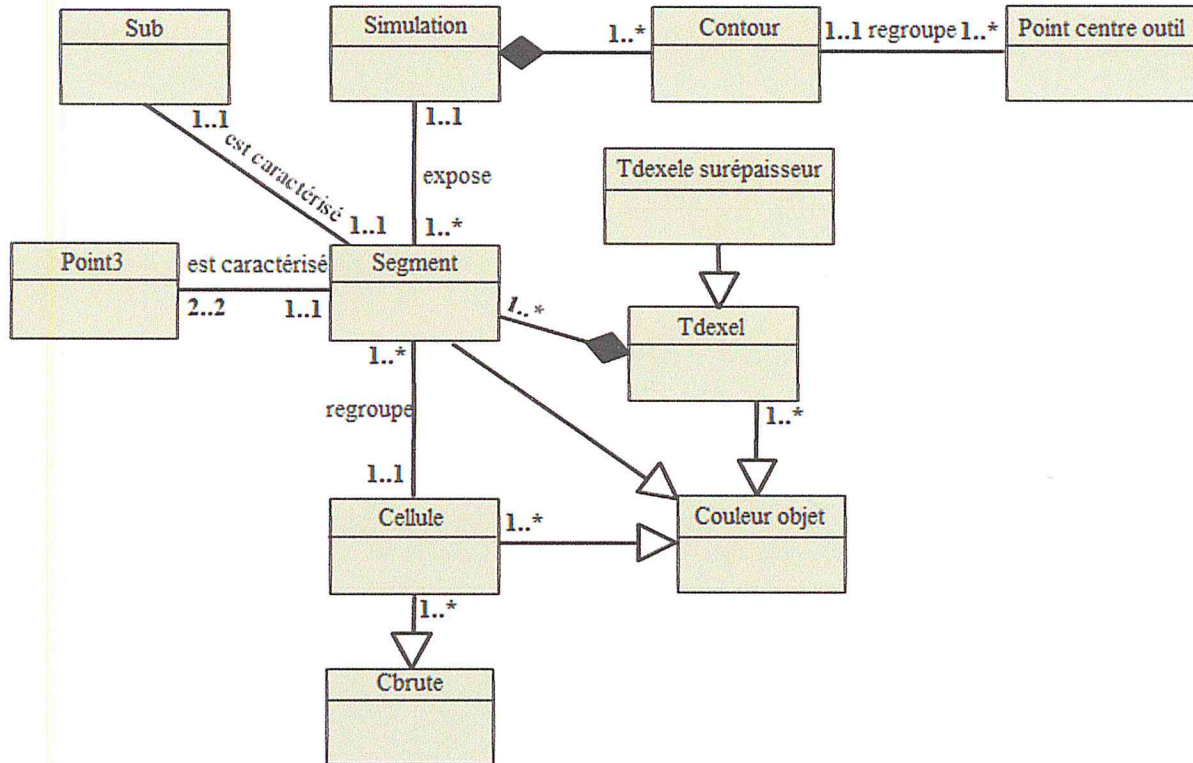


Figure II.18. Diagramme de classe.

2.2.1. Représentation des classes :

➤ Classe « Point3 » : représente les coordonnées d'un point.

Point3
-x : double -y : double -z : double
+getX () : double +getY () : double +getZ () : double +setX (double) : void +setY (double) : void +setZ (double) : void

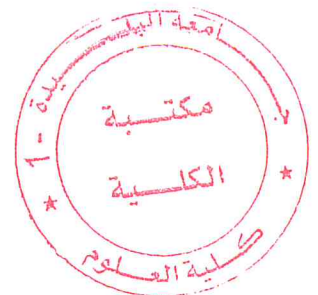


Figure II.19. Class Point.



- Classe « Couleur objet » : représente les couleurs des différents objets créés.

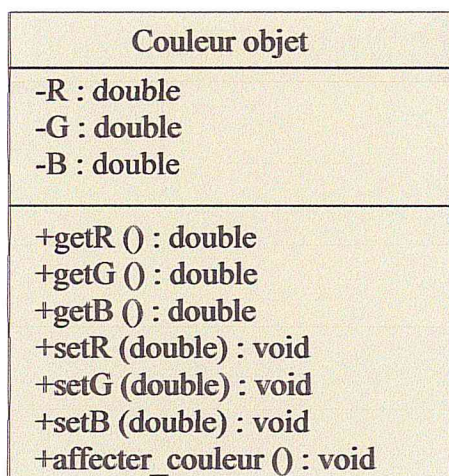


Figure II.20. Class Couleur objet.

- Classe « Sub » : représente la position, numéro du segment d'un vecteur.

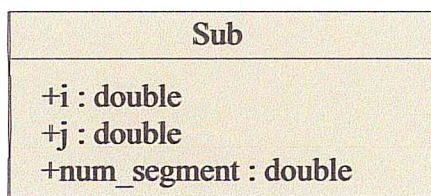


Figure II.21. Class Sub.

- Classe « CBrute » : représente l'enveloppe des différents objets créés.

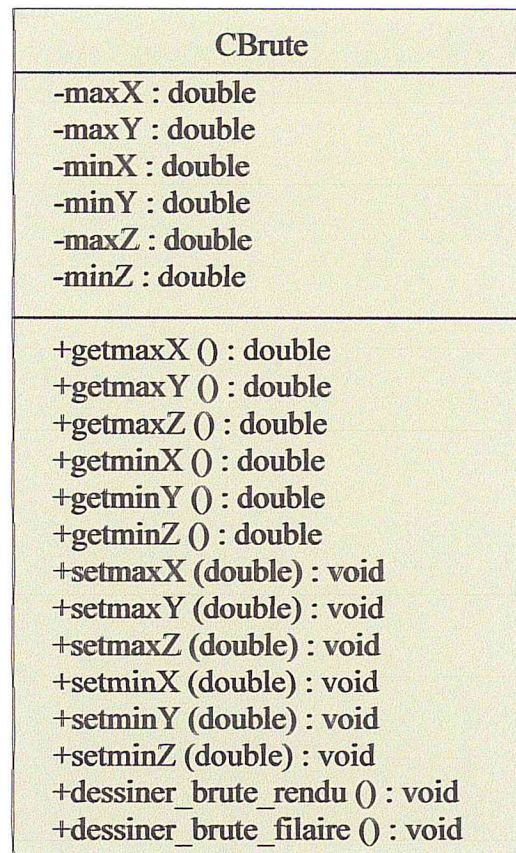


Figure II.22. Class CBrute.

- Classe « Cellule » :

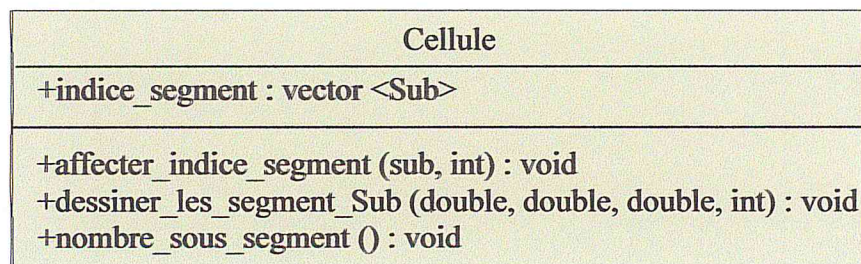


Figure II.23. Class Cellule.

- Classe « TDexele surépaisseur » : elle définit les Dexels après ajout de la surépaisseur.

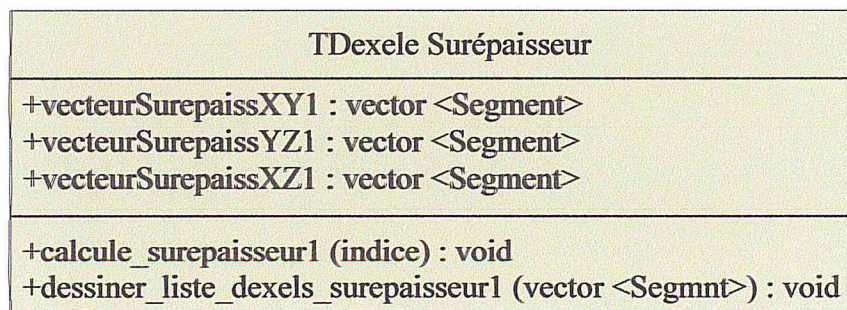
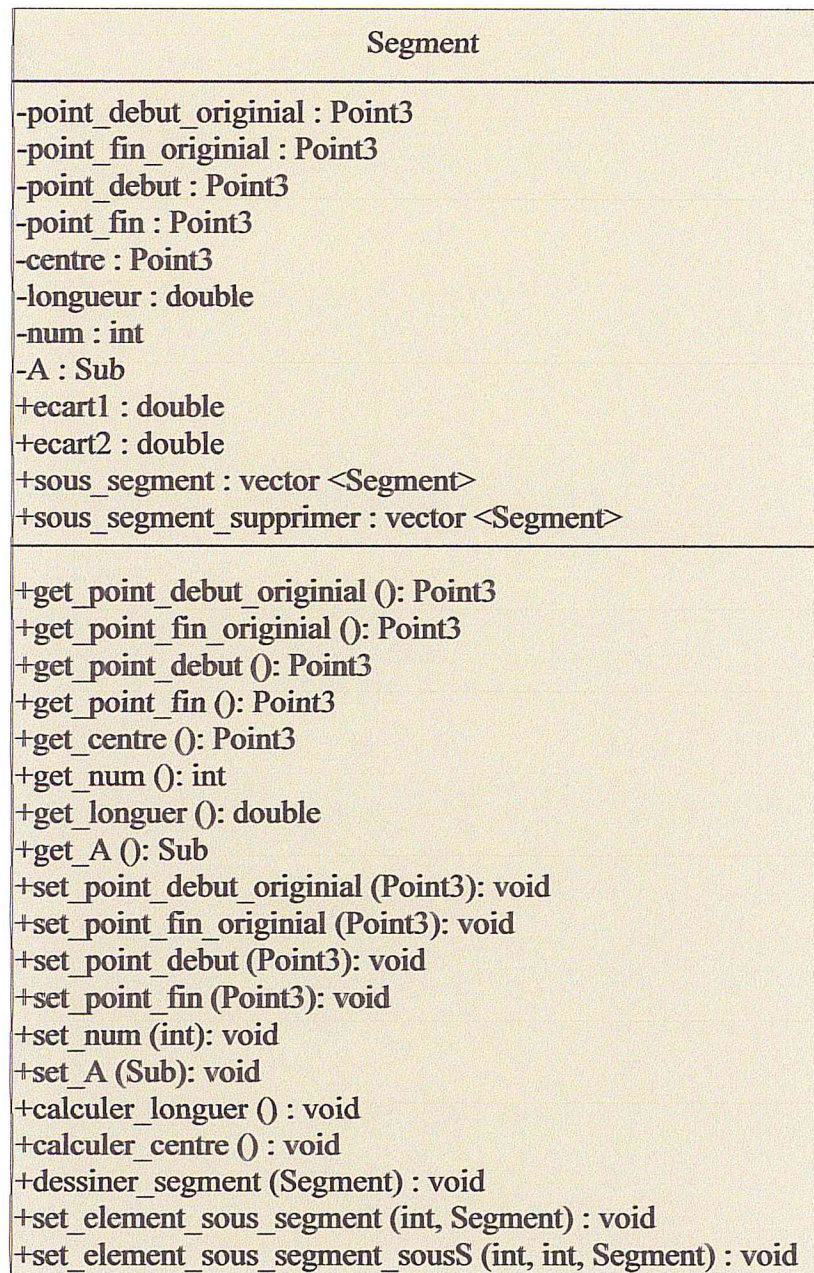


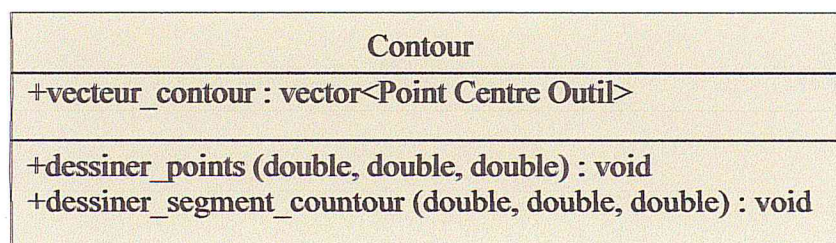
Figure II.24. Classe TDexel surépaisseur.

- **Classe « Segment »** : Caractérise le segment, ses attributs et fonctions sont donnés par la Figure II.20.



**Figure II.25.** Class Segment.

- **Classe « Contour »** :



**Figure II.26.** Classe Contour.

- **Class « TDexele »** : elle définit les Dexels et leurs attributs.

TDexele
-nre_cellule_x : double -nre_cellule_y : double -nre_cellule_z : double -pasx : double -pasy : double -pasz : double -pasxdexel : double -pasydexel : double -paszdexel : double -hauteur : double -longueur : double -largeur : double +dexelXY : vector <Segment> +dexelYZ : vector <Segment> +dexelXZ : vector <Segment>
+lirele_fichier_triple_dexel(String) : void +créer_le_fichier_triple_dexel(String) : void +dessiner_le_dexel (pont3, pont3, int, int, int, int) : void +dessiner_la_liste_dexel (vector <vector<Segmnt>>) : void +dessiner_la_lisete_pnts (int) : void +dessiner_les_point (Segment) : void +dessiner_le_volume_dexel (double, double, double, double, double, double) : void +dessiner_volume_dexel (vector <vector<Segmnt>>, int) : void +créer_cellule () : void +dessiner_cellule () : void +get_element_tab_cellules (int, int, int) : Cellule +nombre_segment () : void +affecter_les_segment_au_cellule (int) : void +dessiner_tout_les_segments_sub (int) : void +copie_vector (int) : void +dessiner_volume_restant (vector <vector<Segmnt>>) : void +dessiner_volume_supprimer (vector <vector<Segmnt>>) : void +dessiner_tout_les_segments_supp (vector <vector<Segmnt>>) : void

Figure II.27. Classe TDexele.

➤ Classe « Point centre outil » :

Point Centre Outil
-x : double -y : double -z : double -rayon : double -longueur : double -imin : int -imax : int -jmin : int -jmax : int -kmin : int -kmax : int
+get_x () : double +get_y () : double +get_z () : double +get_rayon () : double +get_longueur () : double +set_x (int) : void +set_y (int) : void +set_z (int) : void +set_rayon (int) : void +set_longueur (int) : void +setEnveloppe () : void +dessiner_outil () : void +dessiner_enveloppe_outil_cellules_chevauchement () : void +dessiner_indices_cellules_chevauchement () : void +chevauchement_sphere_cellule () : void +intersection_sphere_segment () : void +dessiner_segment_outil_intersection () : void +inter (vector<sub>, vector<vector<Segmnt>>) : vector<vector<Segmnt>> +dessiner_point_intersection (vector<Segmnt>) : void +segment_intersection : vector <Segment>

Figure II.28. Classe Point Centre Outil.

## ➤ Classe « Trajet outil » :

Trajet Outil
-nbre_total_centre : int +vecteur_trajectoire : vector<Contour>
+getNbre_total_centre () : int +setNbre_total_centre (int) : void +créer_fichier_CE () : void +lire_fichier_CE(String) : void +dessiner_liste_point_contour () : void +dessiner_liste_segment () : void

Figure II.29. Classe Trajet Outil

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'architecture générale de notre application d'un point de vue conceptuel, où nous avons recensé nos besoins en spécifiant toutes les étapes suivies et toutes les solutions proposées.

Dans le chapitre suivant, l'implémentation et la mise en œuvre de notre application seront présentées et la validation de l'application sera prouvée à travers un exemple.

# **Chapitre 3:**

---

## **Implémentation et résultats**

## Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter l'implémentation et les résultats du travail réalisé. Nous commençons par une présentation des outils utilisés suivi par une présentation de l'application ainsi que des captures d'écrans. Nous terminons par les résultats obtenus.

### 1. Présentation des outils utilisés :

#### 1.1. Présentation du langage c++ :

Le langage C++ inventé par Bjarne Stroustrup vers 1983, est une évolution orientée objets du langage C de Brian Kernighan et Denis Ritchie. Il s'est enrichi au cours de la décennie 1980 parallèlement à la stabilisation et à la normalisation de C. Ce langage repose sur les mêmes mécanismes d'écriture et de génération. Il apporte notamment la gestion des exceptions, la gestion des références (remplaçant partiellement l'usage quelque peu délicat des pointeurs), la surcharge des opérateurs et les Templates, ...etc. Enfin, une rétrocompatibilité a été gardée où les programmes en C se compilent sans difficulté avec un compilateur C++. Comme tout langage, C++ dispose d'une bibliothèque standard, c'est-à-dire de fonctions et de classes prédéfinies. Il comporte notamment de nombreux patrons de classes et de fonctions permettant de mettre en œuvre les structures de données les plus importantes (vecteurs dynamiques, listes chaînées, chaînes...) et les algorithmes les plus usuels. Parmi les environnements de développements : Anjuta DevStudio, C++ Builder , Code:: Blocks (open-source) , Dev-C++, Eclipse (open-source) , Microsoft Visual C++ , etc.



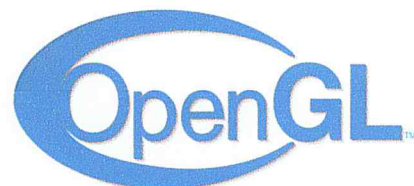
##### 1.1.1. Motivation de l'utilisation du langage C++ :

Les motivations de l'utilisation du C++ lors de la mise en œuvre de notre application résident dans le fait que ce travail sera intégré à un environnement de CFAO déjà existant au niveau du CDTA où ses modules sont développés en C++ d'un côté. D'un autre côté, pour se conformer à la tendance qui veut que tous les logiciels de CFAO sont développés en C++.

#### 1.2. Présentation d'OpenGL :

Open Graphic Library ou OpenGL est une API graphique multiplateforme open-source, de bas niveau, dédiée pour les applications générant des images 2D ou 3D.

OpenGL est introduite en 1992 par Silicon Graphics Inc (SGI) et elle est actuellement gérée par la société Khronos Group. OpenGL est conçue pour développer des applications





graphiques portables. Elle favorise l'innovation et la simplicité d'utilisation en offrant aux développeurs de nombreuses fonctionnalités de visualisation. Etant libre, ouvert et portable, la bibliothèque graphique a pu se vendre dans le milieu scientifique et industrielle, et être utilisée dans de nombreuses applications artistiques ou de traitement d'images. Du fait de ses performances, l'API OpenGL est aussi présent dans différents domaines jeux-vidéo ludiques, les applications web, les systèmes embarqués et les téléphones portables. C'est une API très performante et simple d'utilisation. Elle permet de réaliser des rendus et des scènes complexes selon les besoins. Cette technologie est ouverte et implémentée par de nombreuses bibliothèques, sous des langages de programmations différentes (Python, Ruby, ...etc.). Par ailleurs, OpenGL est portable et multiplateformes. En théorie, un même code OpenGL fonctionne sur tous les systèmes d'exploitation (Windows, Linux, et Mac) et sur toutes les plateformes.

### 1.3. Présentation de C++ Builder :

Le Builder C++ possède toute la puissance du Langage C++ orienté objet. Il offre la possibilité de développer rapidement des applications sous Windows grâce à ses différentes bibliothèques. Il permet la création instantanée des interfaces utilisateurs car il offre une gestion de l'interface. Le compilateur C++

qui est inclus ; Borland C++ Compiler, est un compilateur et un optimiseur de code, de haut rendement et multithread, qui agit en second plan. Sans arrêter le travail, les applications se compileront et s'exécuteront plus rapidement.



## 2. Présentation de l'application :

Dans cette phase, nous présentons les différentes tâches implémentées dans le cadre de notre projet.

### 2.1. Fenêtre principale :

La fenêtre principale de notre application logicielle développée est composée de cinq (05) onglets :

- **Premier onglet :** « Triple-Dexels », permet la manipulation des fichiers Triple-Dexels.
- **Deuxième onglet :** « Surépaisseur », pour ajouter une surépaisseur aux Triple-Dexels.

- **Troisième onglet** : « Optimisation », permet de classer les segments en appliquant la méthode de « cellules ».
- **Quatrième onglet** : « Simulation », permet de voir la simulation de l'enlèvement de matière en usinage 05-axes.
- **Cinquième onglet** : « Etat de Surface », permet de calculer les paramètres d'états de surface et de visualiser les résultats.

Les figures qui suivent montrent les différentes fonctionnalités de ces onglets.

## 2.2. Onglet « Pièce » :

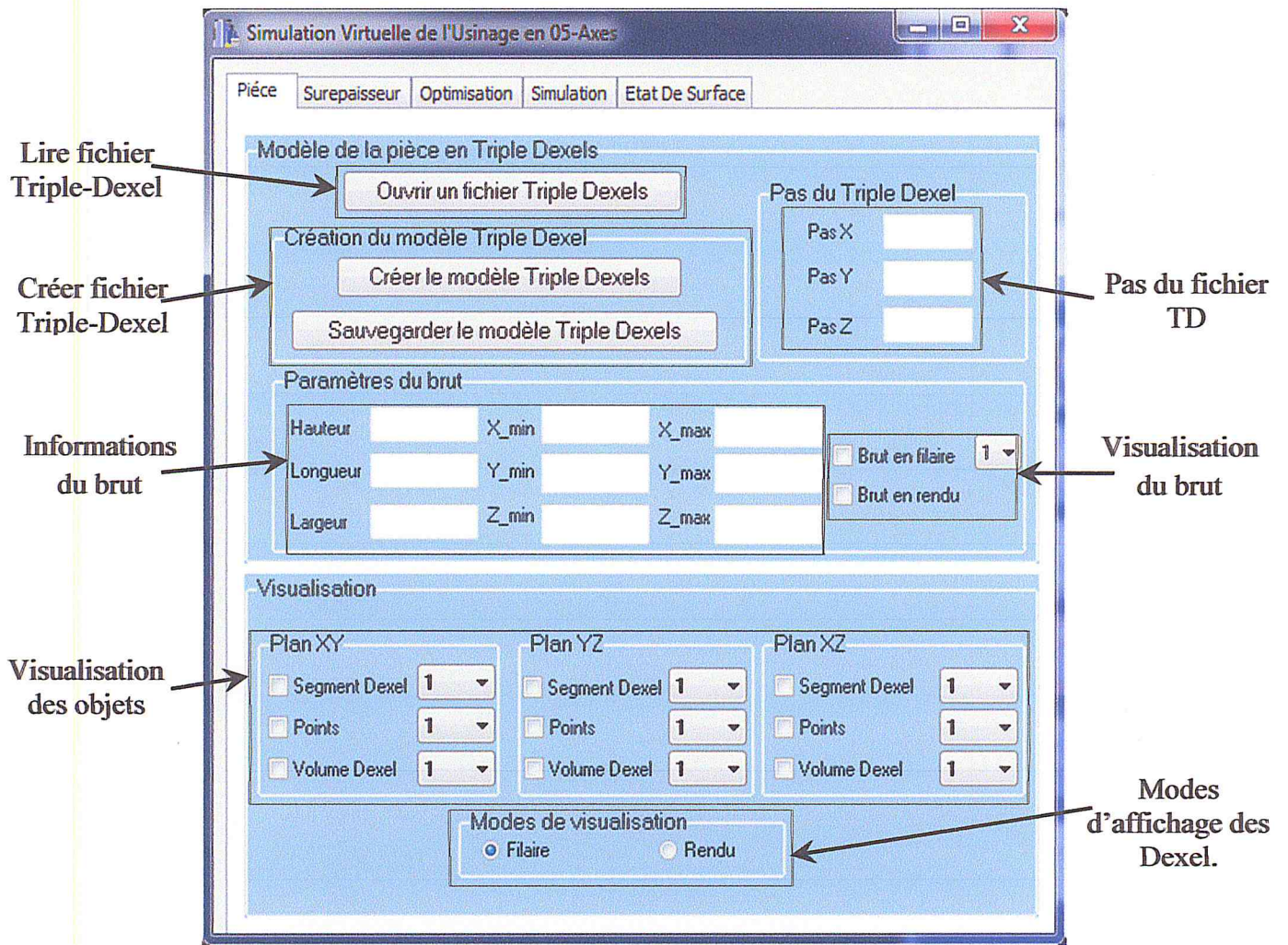
L'onglet « pièce » (Figure III.1) permet de faire les tâches suivantes :

- Ouvrir l'application Triple Dixel pour l'exécuter et récupérer les données.
- Créer le fichier Triple-Dexels avec l'extension « .TD ».
- Lire le fichier Triple-Dixel.
- Visualiser la pièce en Dexels (Figure III.2.a).
- Visualiser les points début et points fin des segments de la pièce (Figure III.2.b).
- Visualiser le volume des Dexels de la pièce.
- Visualiser le brut de la pièce en rendu et en filaire.

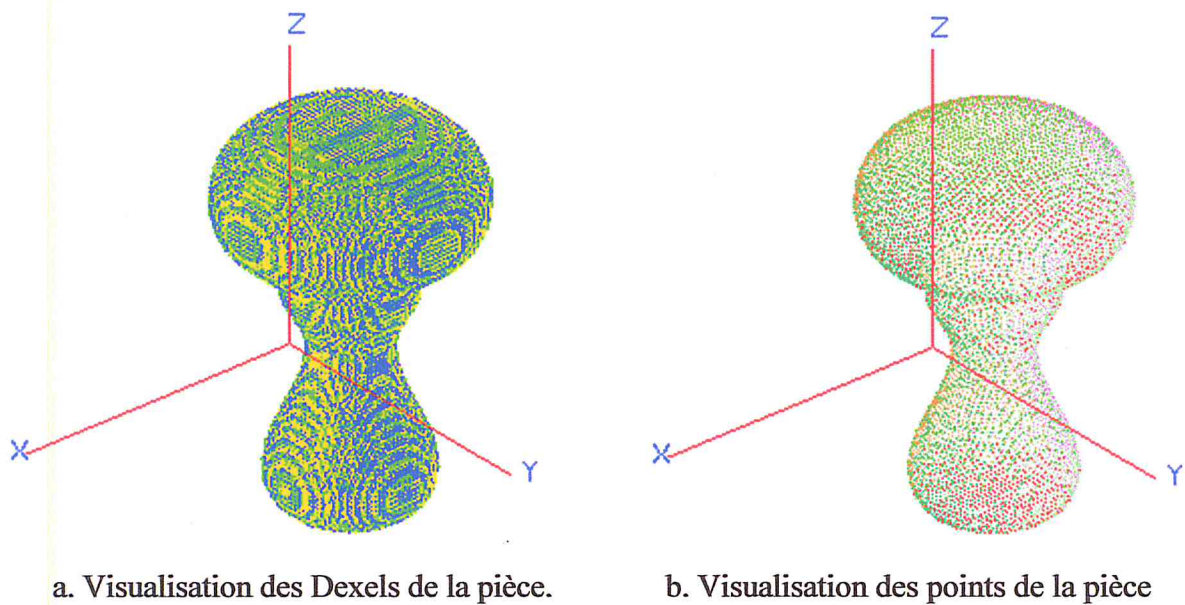
## 2.3. Onglet « Surépaisseur » :

Après la spécification de la surépaisseur, l'onglet « surépaisseur » (Figure III.3) permet de réaliser les tâches suivantes :

- Visualiser la pièce en Dexels (Figure III.5.b).
- Visualiser la surépaisseur en volume Dexels pour chaque plan (Figure III.4).
- Visualiser la surépaisseur de la pièce en représentation volumique des Dexels en rouge (Figure III.5.b).
- Visualiser la pièce en segments (Figure III.5.a).
- Visualiser la surépaisseur de la pièce en segments en rouge (Figure III.5.a).



**Figure III.1.** Fonctionnalités de l'onglet pièce.



**Figure III.2.** Visualisation de la pièce.

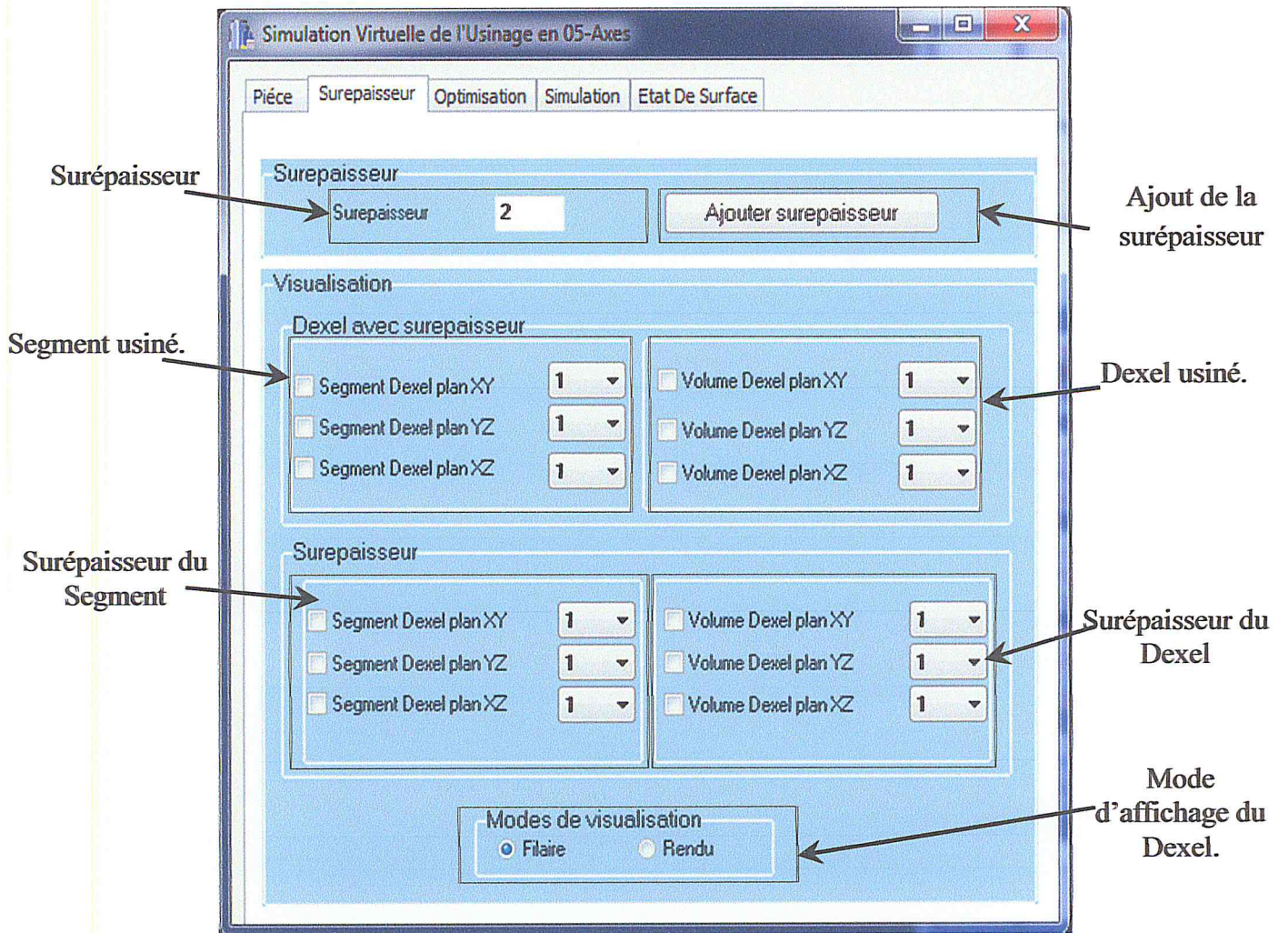
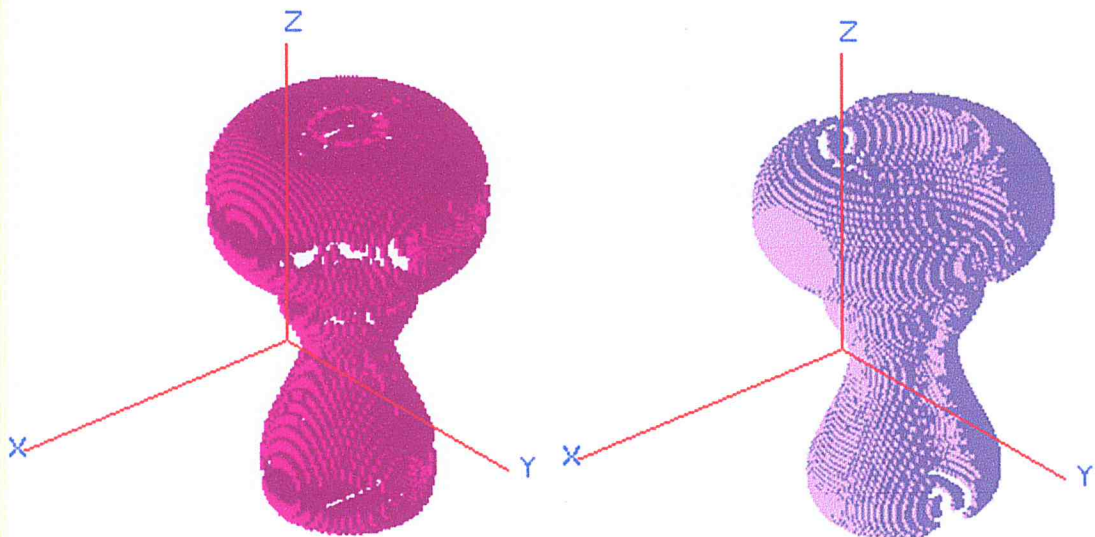
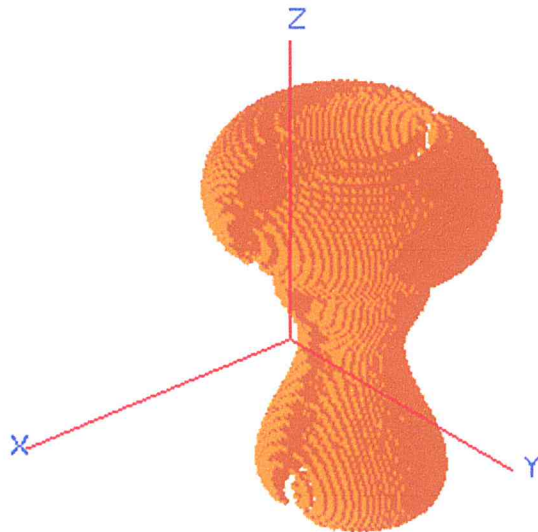


Figure III.3. Fonctionnalités de l'onglet surepasseur.



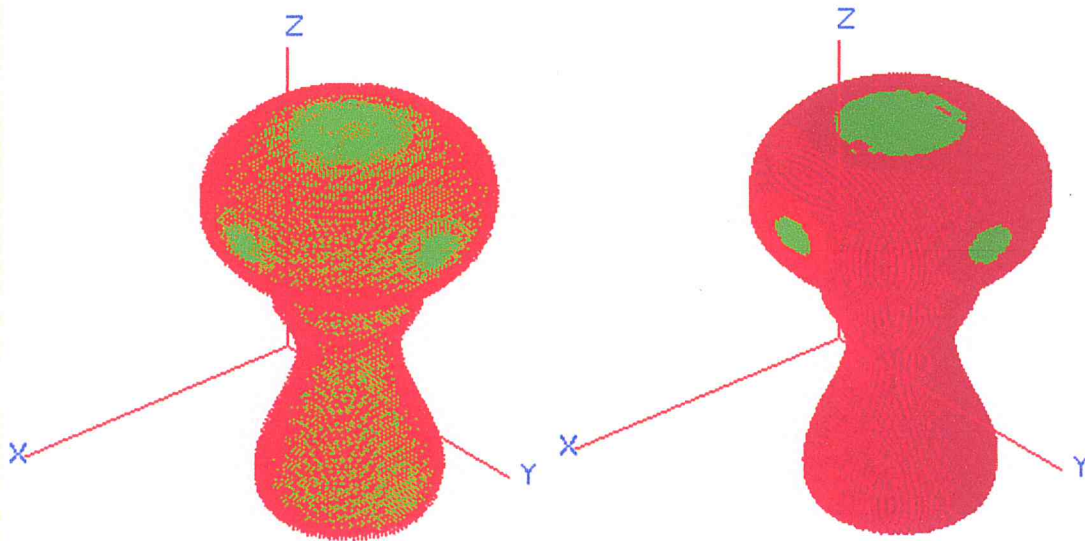
a. Dexels de la surépasseur du plan XY.

b. Dexels de la surépasseur du plan YZ.



c. Dexels de la surépaisseur du plan XZ.

**Figure III.4.** Dexels de la surépaisseur d'usinage de chaque plan.



a. Segments de la surépaisseur.

b. Volume Dexels de la surépaisseur.

**Figure III.5.** Visualisation de la pièce avec surépaisseur (en rouge).

#### 2.4. Onglet « Optimisation » :

L'onglet « optimisation » (Figure III.6) permet de lancer les actions suivantes :

- Créer les cellules.
- Classifier les segments dans les cellules.
- Visualiser les cellules en filaire (Figure III.7.a) ou en rendu (Figure III.7.b).
- Visualiser les segments après la classification (Figure III.8).

- Visualiser les Dixel après la classification en filaire (Figure III.9.a) ou en rendu (Figure III.9.b).
- Afficher le nombre de segments avant et après la classification.
- Visualiser les cellules contenant les segments (Figure III.10.a) et les cellules vides (Figure III.10.b).
- Afficher les limites et le nombre de segments de chaque cellule.
- Visualisation par cellule (Figure III.11).

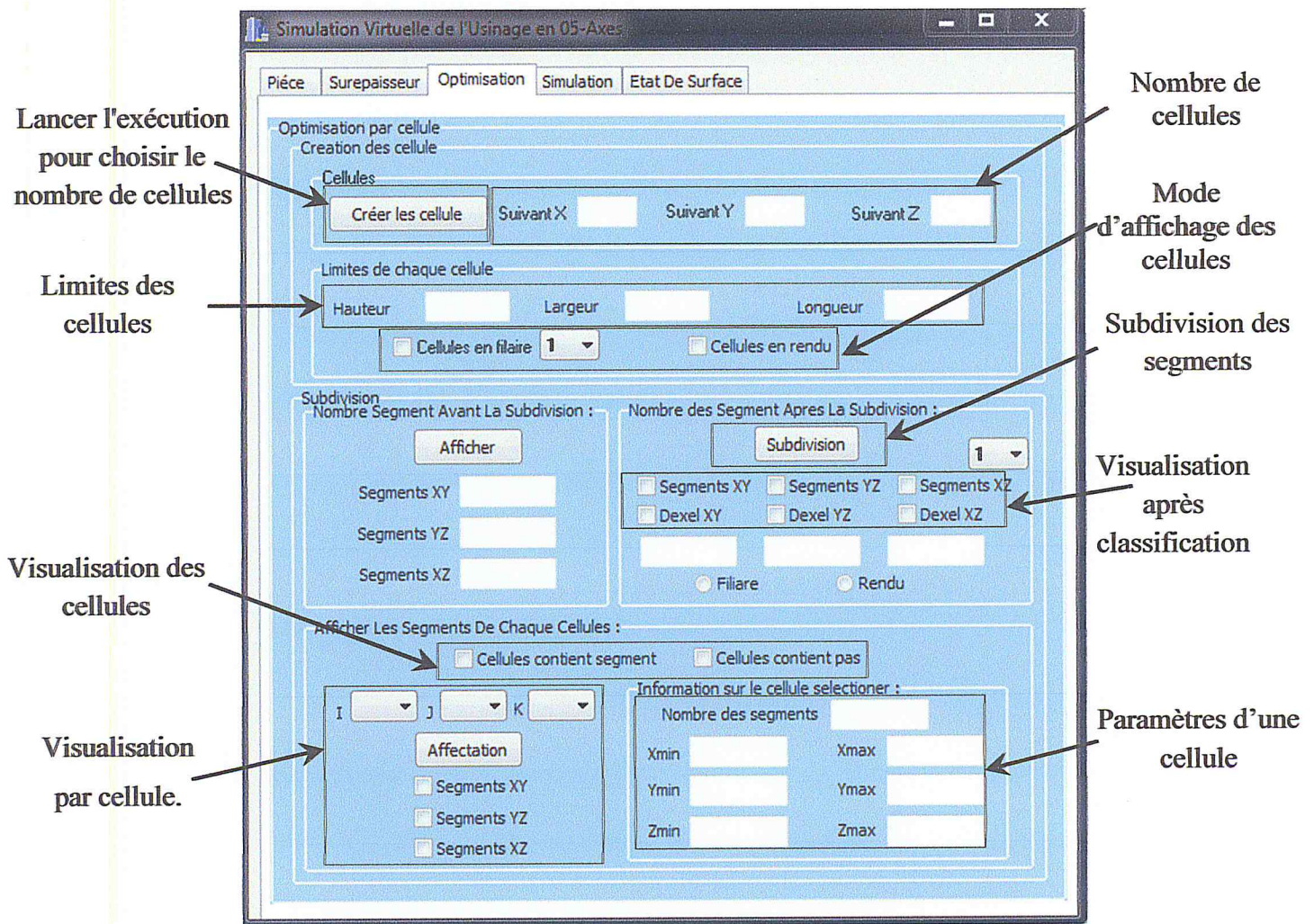
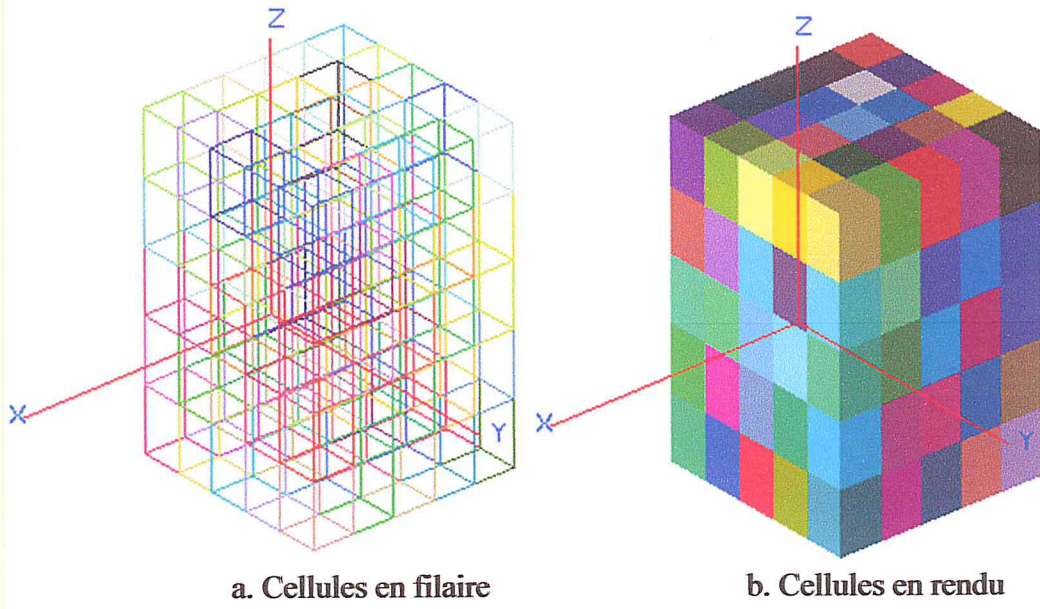
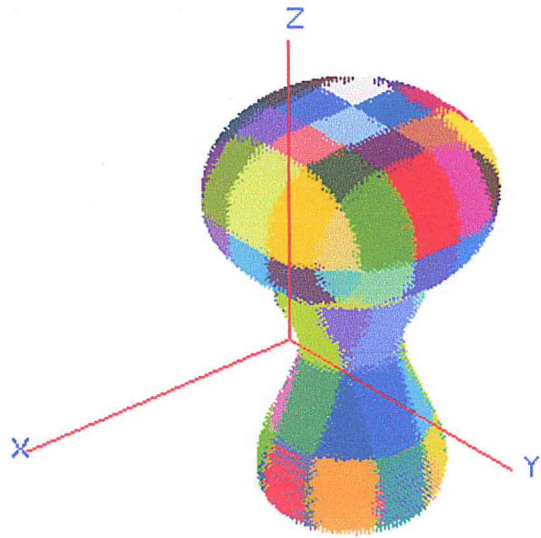


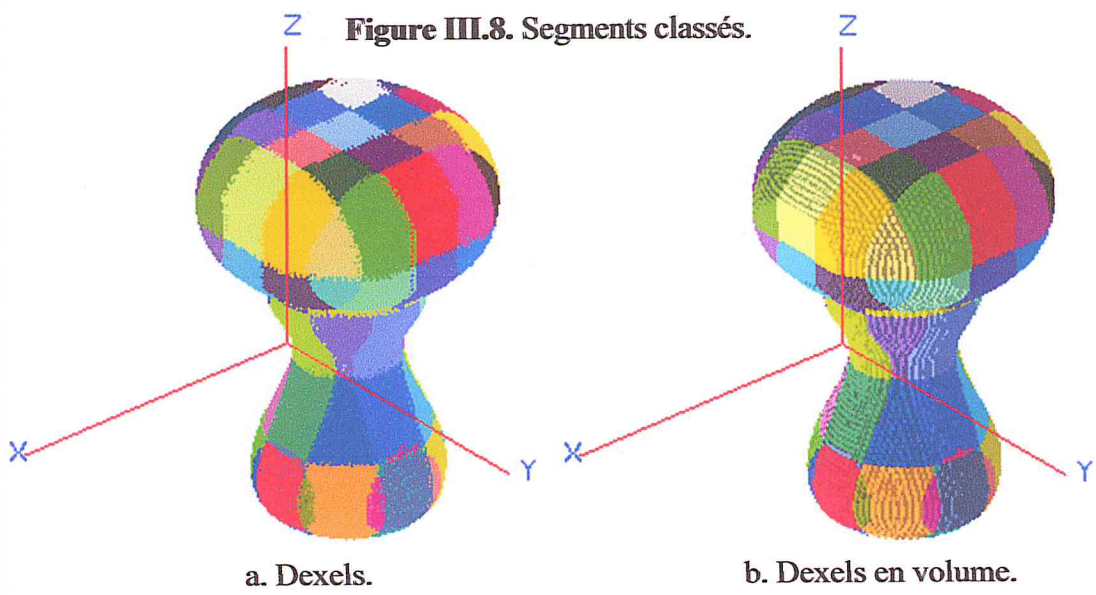
Figure III.6. Fonctionnalités de l'onglet Optimisation.



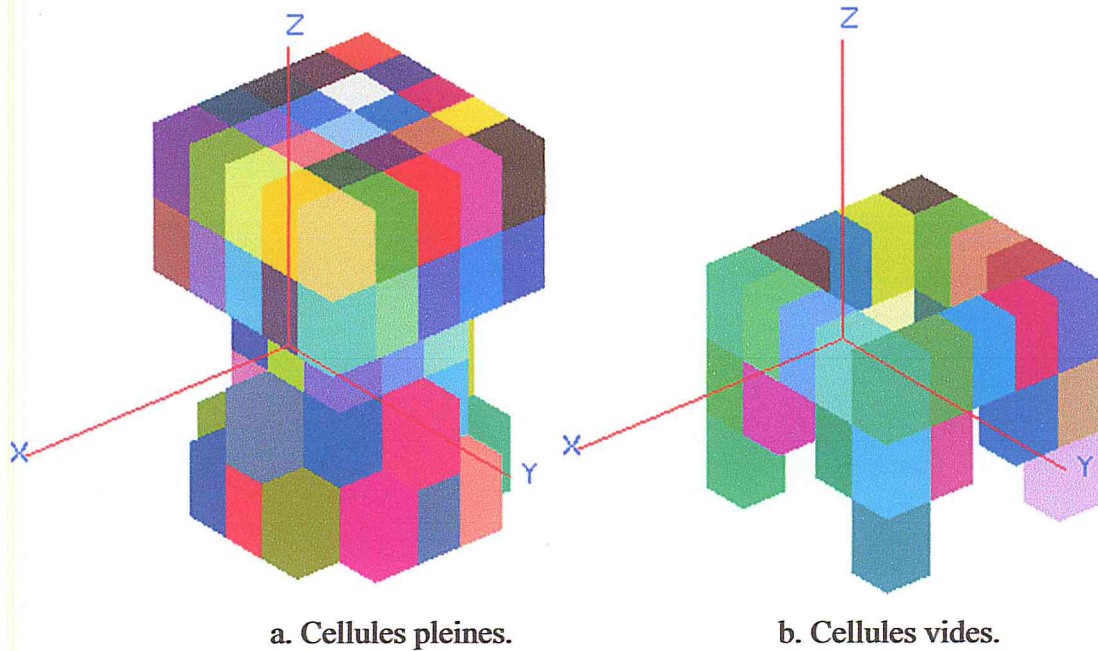
**Figure III.7. Visualisation des cellules.**



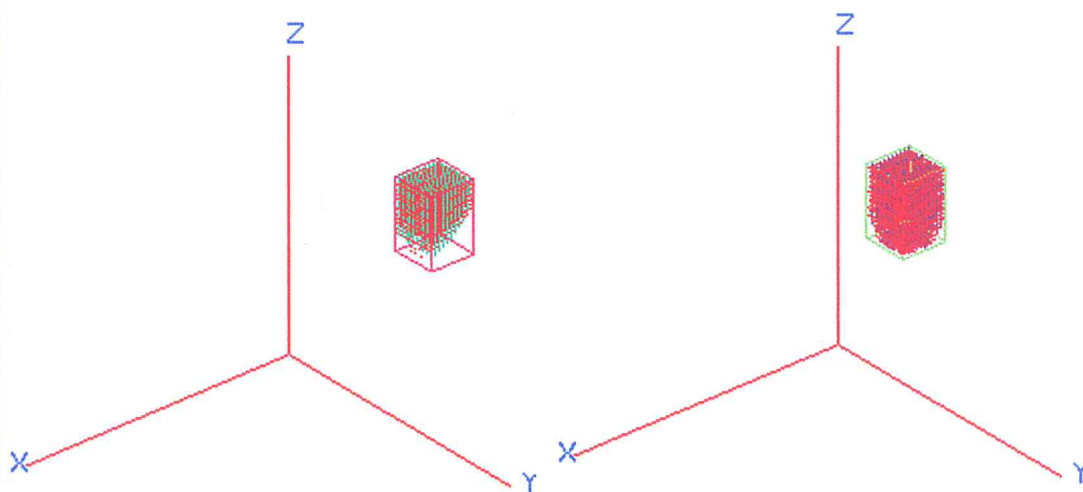
**Figure III.8. Segments classés.**



**Figure III.9. Visualisation des DEXELS après la classification.**



**Figure III.10.** Visualisation des cellules pleines et vides.



**Figure III.11.** Visualisations par cellule.

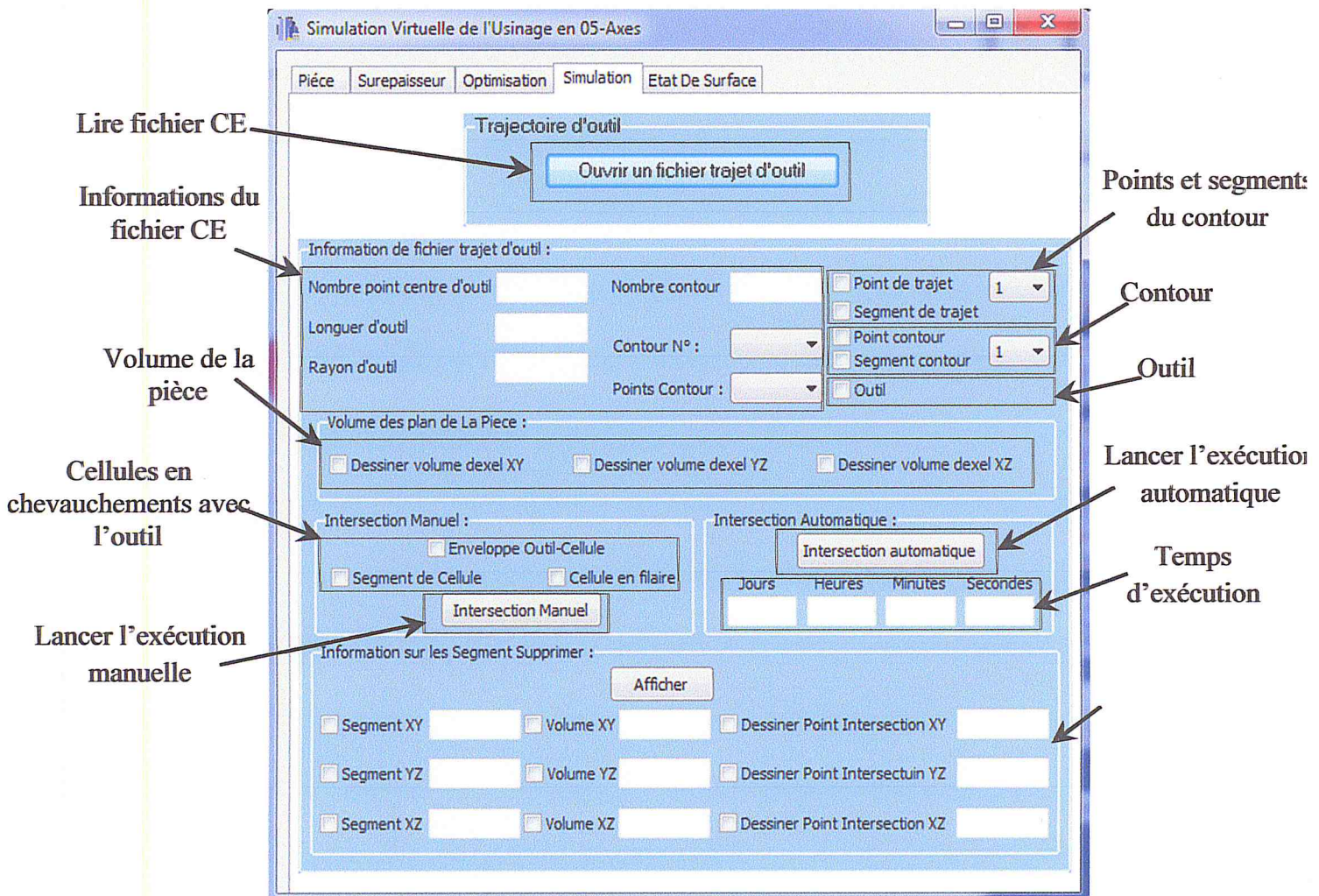
## 2.5. Onglet « Simulation » :

L'onglet « simulation » (Figure III.12) permet de :

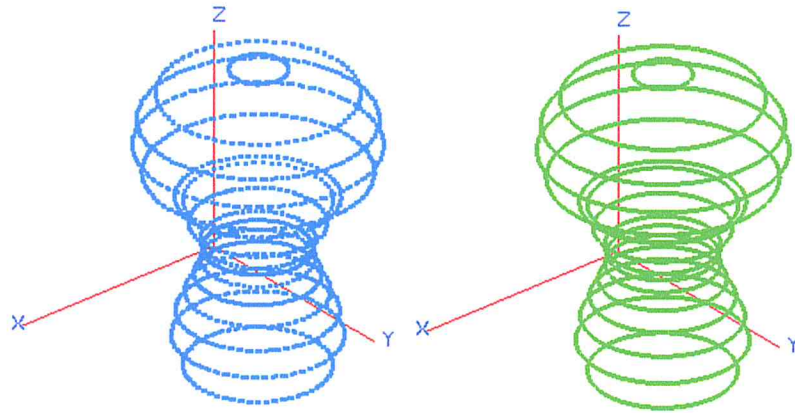
- Lire les fichiers CE.
- Afficher les informations enregistrées dans le fichier CE.
- Visualiser les points (Figure III.13.a) et les segments (Figure III.13.b) de chaque contour.
- Visualiser les points et les segments par contour.
- Visualiser la partie active de l'outil.



- Le CheckBox « dessiner volume d'axe XY, YZ, XZ » permet de visualiser le volume de la pièce (Figure III.15.a) au cours de la simulation de l'usinage. Le CheckBox « outil » permet de visualiser l'outil au cours de la simulation de l'usinage.
- Visualiser les cellules (Figure III.14.a) et les segments (Figure III.14.b) en chevauchement avec l'outil.
- Choisir le mode de simulation « manuel » ou « automatique ».
- Afficher le nombre de segments et le volume supprimé et même le nombre des points d'intersection.
- Visualiser les segments supprimés (Figure III.15.b), le volume supprimé (Figure III.15.c) et les points d'intersection (Figure III.15.d).



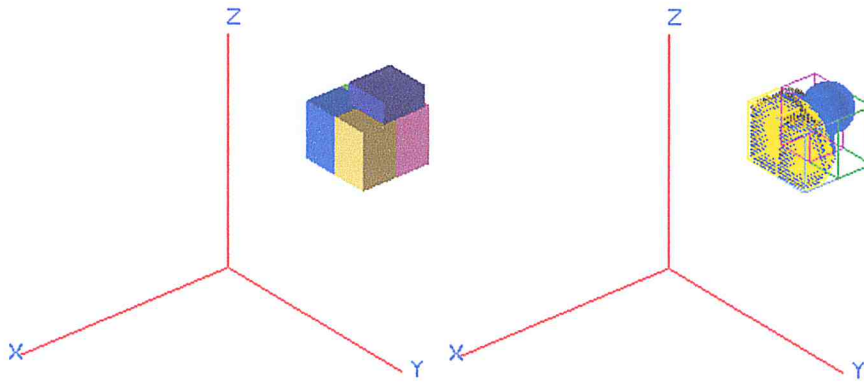
**Figure III.12. Fonctionnalités de l'onglet Simulation.**



a. Visualisation des points.

b. Visualisation des contours.

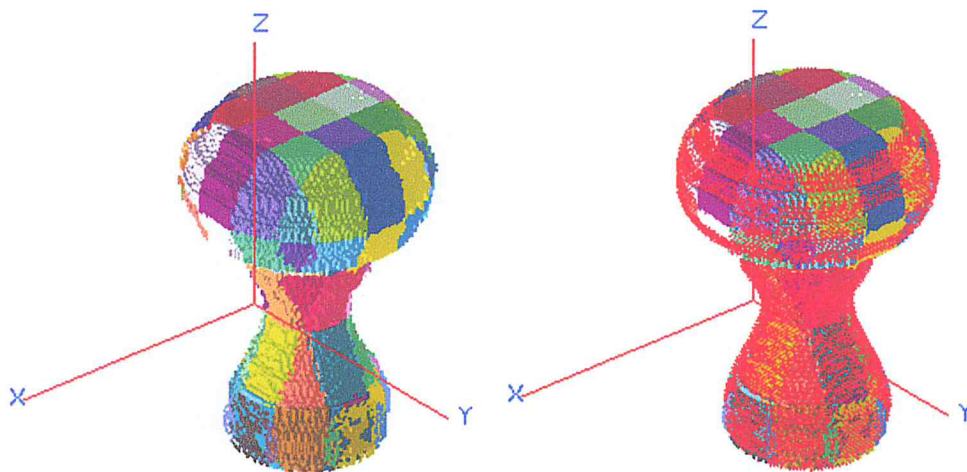
**Figure III.13. Visualisation du trajet d'outil.**



a. Chevauchement enveloppe outil cellules.

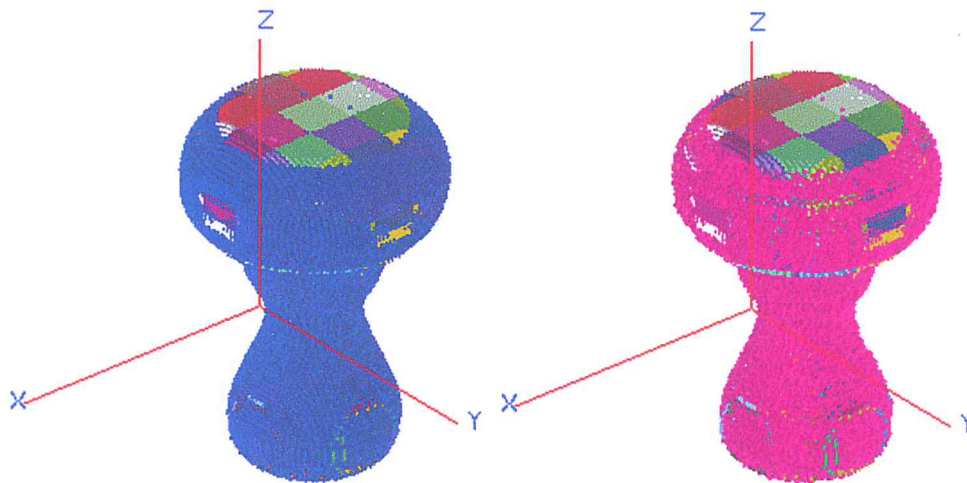
b. Segments des cellules en chevauchement.

**Figure III.14. Visualisation des segments et des cellules en chevauchement.**



a. Pièce finale.

b. Segments supprimés (en rouge).



c. Volume des Dexel supprimé (en bleu). d. Points d'intersections (en rose).

**Figure III.15. Pièce finale après la simulation**

## 2.6. Onglet « Etat de surface » :

Cet onglet (Figure III.16) permet de :

- Calculer les écarts résultants de la simulation d'enlèvement de matière suivant les trois directions.
- Calculer et visualiser les points voisins des extrémités des Dexels (points topographie) afin d'englober les trois plans de la pièce usinée (plan XY, plan YZ et plan XZ).
- Calculer les paramètres d'état de surface dans des zones de la pièce et visualiser les résultats avec des spectres.
- Calculer les paramètres globale, Sa et Sq).

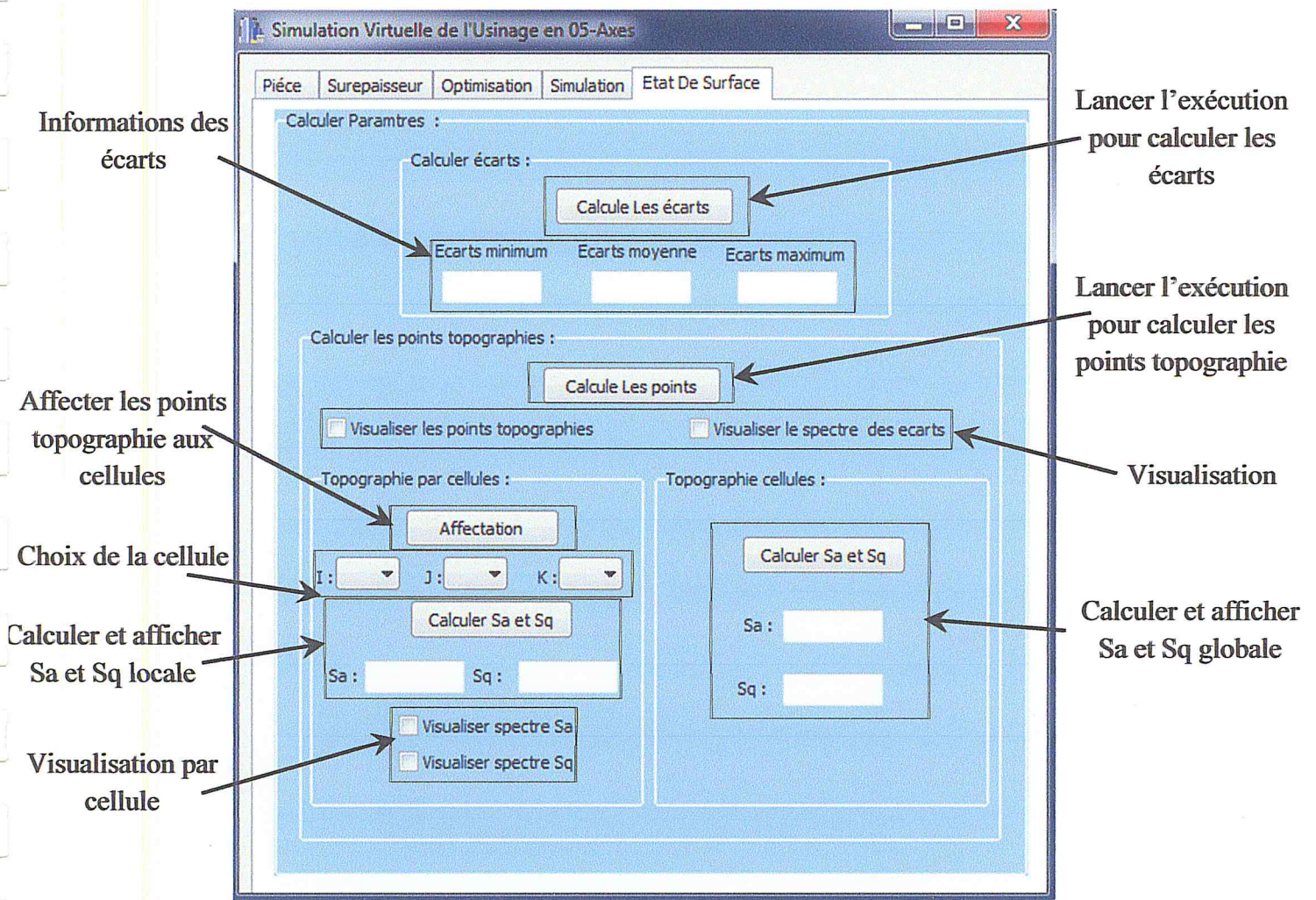


Figure III.16. Fonctionnalités de l'onglet Etat de surface.

### 3. Résultats :

#### 3.1. Comparaison du temps d'exécution de la simulation :

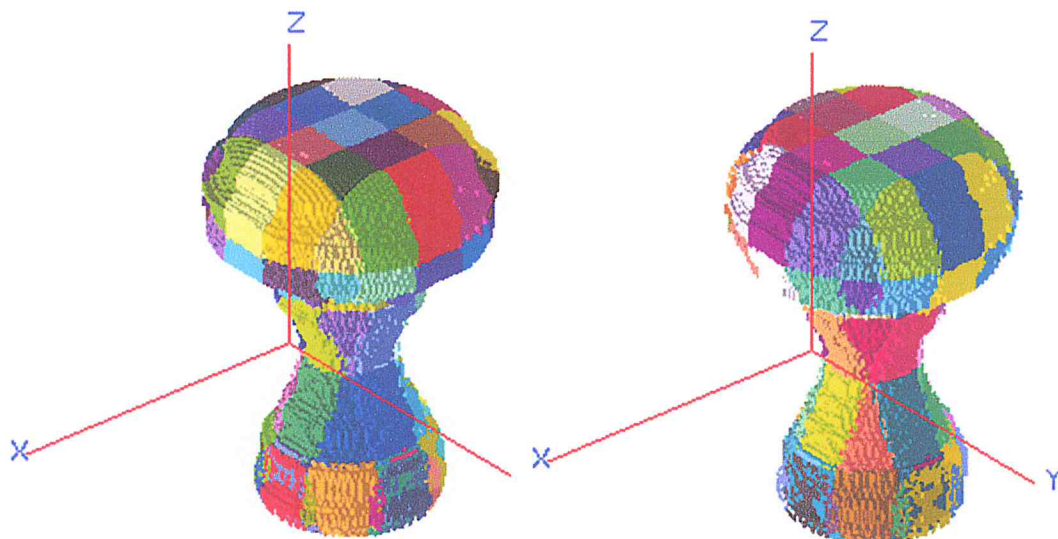
Dans cette comparaison, nous avons introduit deux paramètres :

- La profondeur de passe de l'outil.
- Le rayon de l'outil.

Le Tableau 1 montre que le changement du temps d'exécution de la pièce « poignée » en variant le paramètre profondeur de passe de l'outil et en fixant le rayon. Pour la deuxième comparaison, nous varions le rayon et nous fixons la profondeur de passe avec « Pas dexel = 0.8 » et « surépaisseur = 2 ».

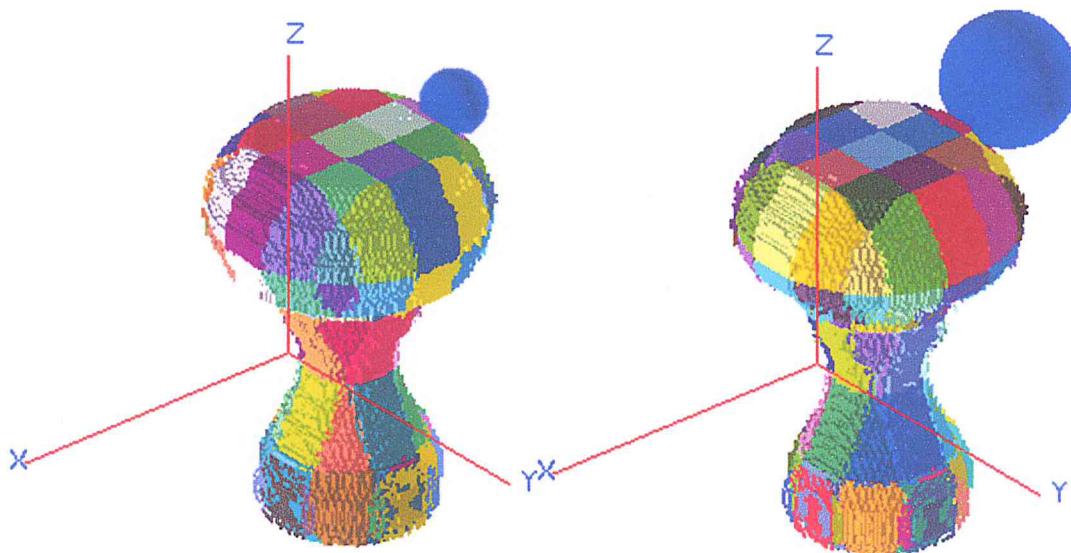
Tableau 1. Influence de la profondeur de passe et le rayon d'outil sur le temps d'exécution.

Pièce	Profondeur de passe	Rayon de l'outil	Temps d'exécution	Nombre des segments	Nombre des points d'intersection
Poignée	4mm	5mm	51m 37s	24359	176827
	6mm		14m 9s	24359	101938
	4mm	5mm	51m 37s	24359	176827
		10mm	1h 8m 29s	24359	242711



a. Simulation avec profondeur = 6.      b. Simulation avec profondeur = 4.

Figure III.17. Visualisation volumique des Dixel après la simulation d'usure.



a. Simulation avec rayon = 5.      b. Simulation avec rayon = 10.

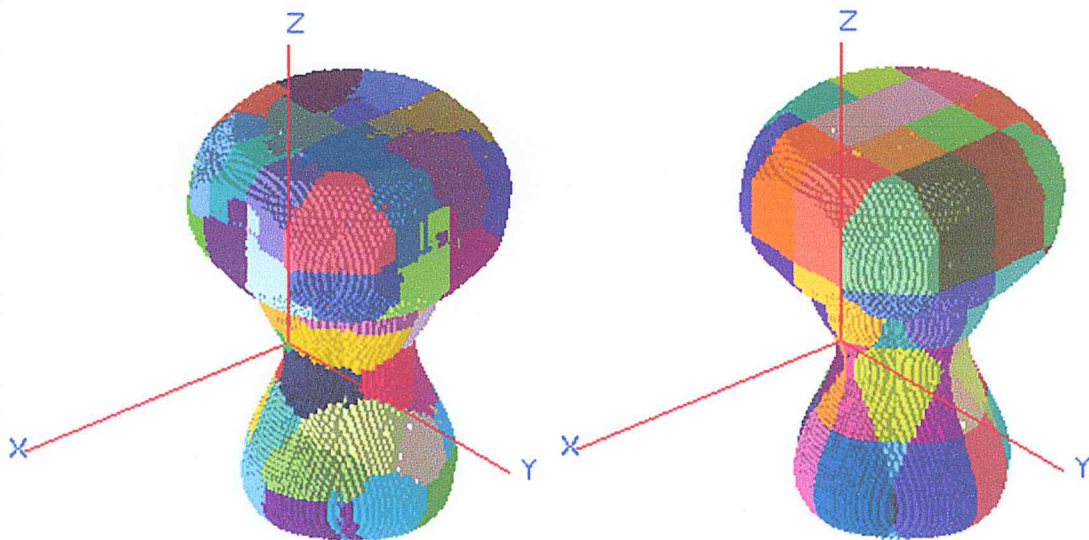
Figure III.18. Visualisation volumique des Dixel où le rayon de l'outil change.

**3.2. Comparaison du temps d'exécution entre l'optimisation par « cellules » et par « k-means » :**

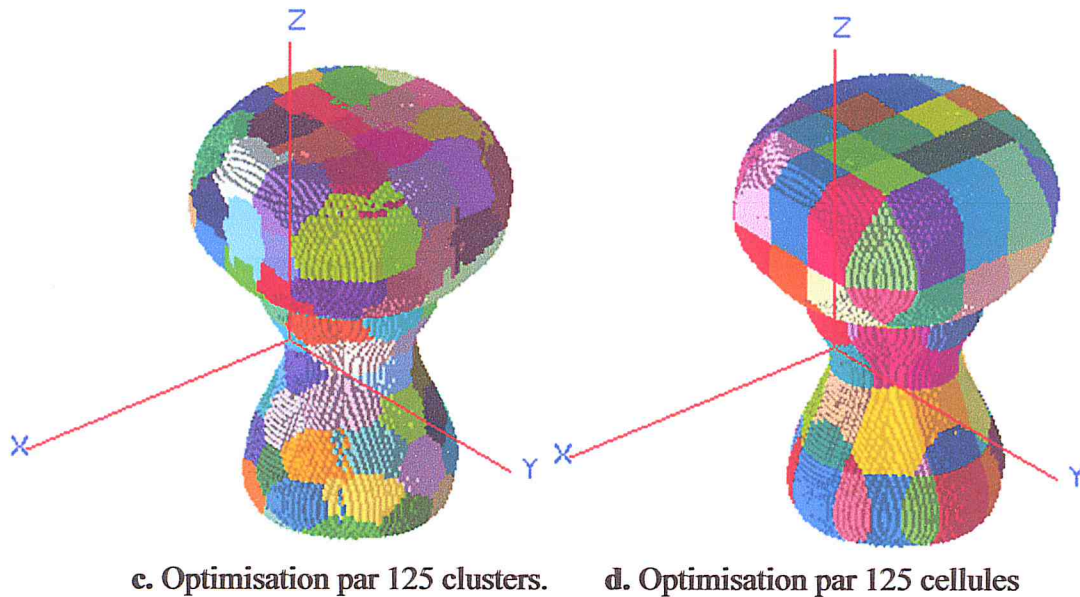
Dans cette comparaison, nous avons comparé le temps d'exécution de l'optimisation par cellules avec le temps d'exécution de l'optimisation par k-means. Le Tableau 2 montre le changement du temps d'exécution en variant le pas du Triple-Dexel, le nombre de cellules et Cluster et en fixant la surépaisseur.

**Tableau 2.** Différence entre le temps d'exécution d'optimisation par clusters et par cellules.

Pièce	Méthodes	Pas dexel	Surépaisseurs	Nombre cellules/cluster	Temps d'exécution
Poignée	Cellules	0.8mm	4mm	64	0.063s
				125	0.11s
		2mm		64	0.016s
				125	0.03s
	K-means	0.8mm	4mm	64	3m 1.508s
				125	6m 26.431s
		2mm		64	7.176s
				125	13.151s



a. Optimisation par 64 clusters.      b. Optimisation par 64 cellules.



**Figure III.19.** Visualisation après l'optimisation par cellules/clusters.

### 3.3. Comparaison du temps d'exécution entre la simulation par « cellules » et par « k-means » :

Dans cette comparaison, nous avons comparé le temps d'exécution de la simulation par la méthode de « cellules » et la méthode de « k-means ». Le Tableau 3 montre le changement du temps d'exécution de la pièce « poignée » en variant le paramètre pas de discrétisation du Triple-Dexel et en fixant les autres paramètres avec « rayon d'outil = 5 » et « profondeur de passe = 4 ».

**Tableau 3.** Différence entre le temps d'exécution de simulation par clusters et par cellules.

Pièce	Méthodes	Pas dexel	Surépaisseur	Nombres des cluster/cellules	Temps d'exécution
Poignée	Cellules	3mm	0.5mm	8	39s
		2mm			48s
	K-means	3mm			58s
		2mm			1m 3s

Selon les temps d'exécution obtenus dans les deux méthodes cellules et cluster, nous remarquons que les cellules sont plus rapides que les clusters. Cette rapidité est le résultat de la méthode choisie dans la simulation. Dans le travail réalisé par « Kheris lilia et Hedroug wassyla » ont appliqué la méthode de simulation plan par plan. Cette méthode prend plus de

temps que la méthode de la simulation générique. Nous avons choisi cette méthode car elle fonctionne pour n'importe quel plan et pour n'importe quelle direction du segment.

### 3.4. Calcul des paramètres d'état de surface :

Dans ce qui suit, nous allons montrer le changement d'état de surface de la pièce simulée par la variation des paramètres de coupe, que ce soit pour la surface globale ou bien dans des zones différentes de la pièce.

#### 3.4.1. Calcul des paramètres d'état de surface partiels :

Dans cette partie, nous avons partitionnée la pièce simulée en zones et nous avons calculé les paramètres d'état de surface ( $S_a$  et  $S_q$ ) dans ces zones. La Figure III.20 et la Figure III.21 représentent des spectres de couleurs qui montrent l'état de surface en fonction des résultats obtenus par le calcul de l'amplitude moyenne de la surface «  $S_a$  » et de la rugosité moyenne de la surface «  $S_q$  » respectivement. Sachant que la dégradation des couleurs explique l'état de chaque zone traitée dans notre pièce.

Les paramètres choisis pour la simulation :

- Rayon d'outil = 5 mm
- Surépaisseur d'usinage = 1 mm
- Profondeur de passe = 4 mm

Le Tableau 4 montre le changement des valeurs de  $S_a$  et de  $S_q$  de notre pièce. Nous varions les valeurs de la surépaisseur et nous fixons les autres paramètres (Rayon d'outil Hémisphérique = 5mm, profondeur de passe = 4mm). Après la partition de la surface en trois zones, nous avons obtenus les résultats suivants :

**Tableau 4. Influence de la surépaisseur sur la qualité de surface**

Pièce	Surépaisseur	Paramètres (mm)	Zone N°1	Zone N°2	Zone N°3
Poignée	0.3mm	Sa	0.1721	0.1523	0.1734
		Sq	0.0048	0.0035	0.0049
	1mm	Sa	0.2165	0.1860	0.2175
		Sq	0.0088	0.0063	0.0088



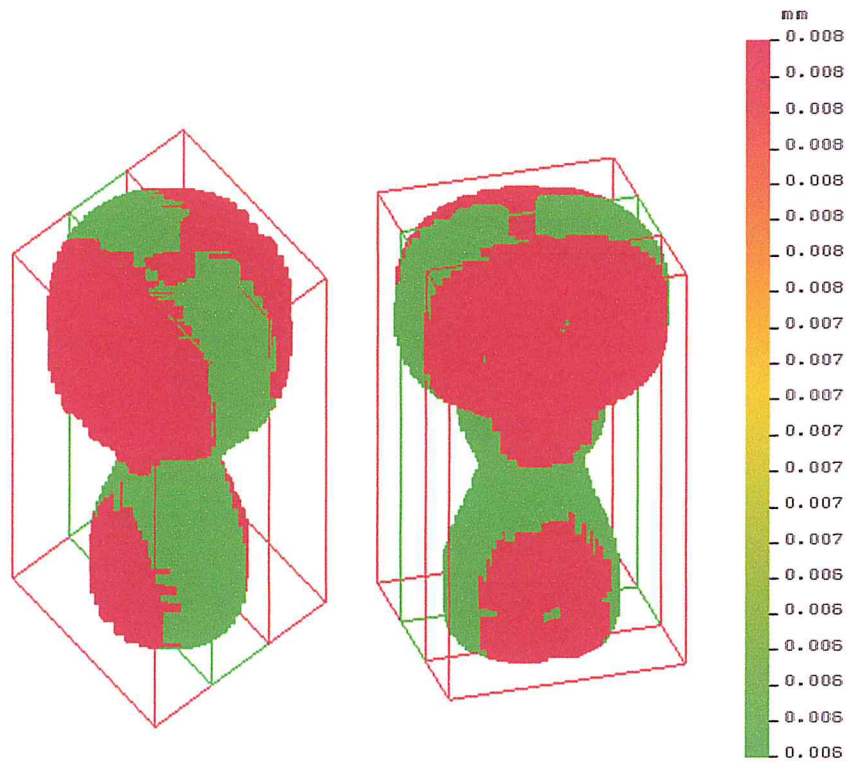


Figure III.20. Variation d'état de surface selon  $S_q$  (partition de la surface en 3 zones).

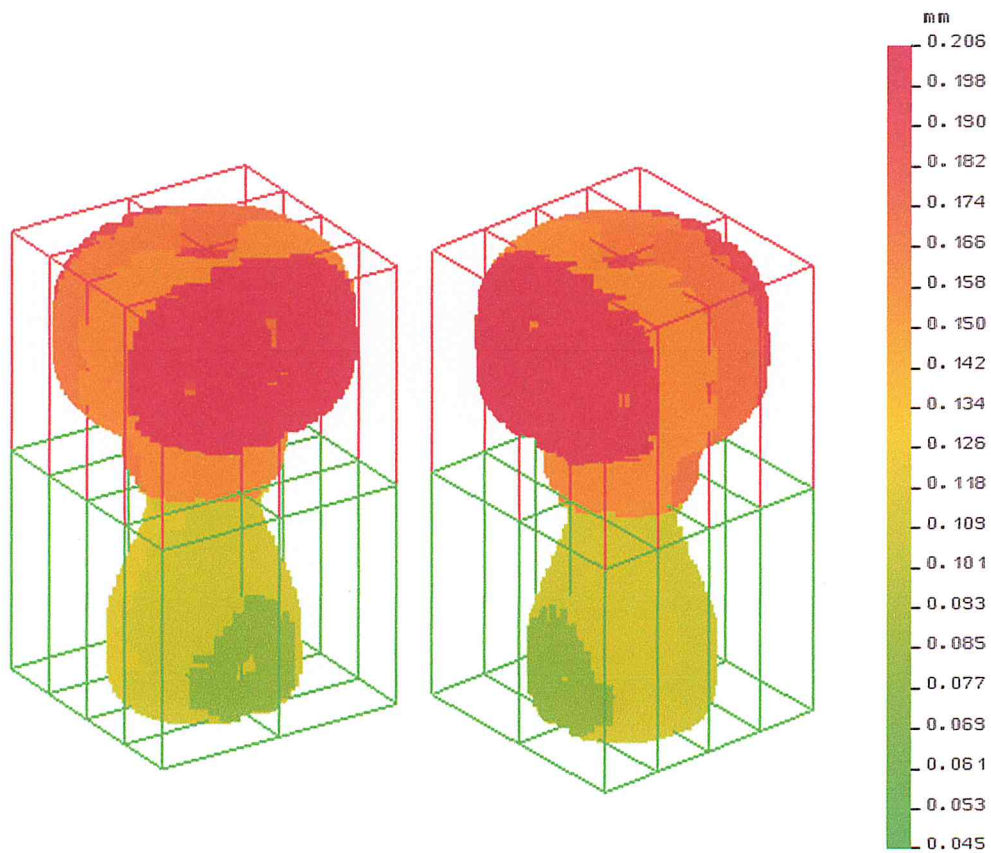


Figure III.21. Variation d'état de surface selon  $S_a$  (partition de la surface en 16 zones).

Le Tableau 5 montre le changement d'état de surface de la même pièce. Nous varions cette fois-ci la profondeur de passe et le rayon d'outil hémisphérique et nous fixons la valeur de la surépaisseur à 1mm.

**Tableau 5.** Influence de la profondeur de passe et rayon d'outil sur la qualité de surface.

Pièce	Rayon d'outil	Profondeur de passe	Paramètres (mm)	Zone N°1	Zone N°2	Zone N°3
Poignée	8mm	6mm	Sa	0.3721	0.1425	0.2487
			Sq	0.0318	0.0062	0.0263
	10mm	4mm	Sa	0.5116	0.2136	0.3734
			Sq	0.0424	0.0139	0.0361
	5mm		Sa	0.2165	0.1860	0.2175
			Sq	0.0088	0.0063	0.0088

### 3.4.2. Calcul des paramètres d'état de surface globale :

Le Tableau 6 montre le changement des valeurs de Sa et de Sq de la surface globale. Nous varions la valeur de la surépaisseur et nous fixons les autres paramètres.

**Tableau 6.** Influence de la surépaisseur sur la qualité de surface globale.

Pièce	Surépaisseur	Profondeur de passe	Paramètres (mm)	Zone global
Poignée	0.3mm	4mm	Sa	0.1344
			Sq	0.0028
	1mm		Sa	0.3422
			Sq	0.0075

Le Tableau 7 montre le changement des valeurs de Sa et de Sq de la surface globale. Nous varions cette fois-ci la profondeur de passe et le rayon d'outil hémisphérique et nous fixons la valeur de la surépaisseur à 1mm.

**Tableau 7. Influence de la profondeur de passe et du rayon d'outil sur la qualité de la surface globale.**

Pièce	Rayon d'outil	Profondeur de passe	Paramètres (mm)	Zone global
Poignée	8mm	6mm	Sa	0.3721
			Sq	0.0193
	10mm	4mm	Sa	0.5591
			Sq	0.0273

Selon les résultats illustrés sur les tableaux, nous constatons que Sa et Sq varie selon les paramètres de coupe suivants :

- Surépaisseur d'usinage.
- Profondeur de passe.
- Rayon d'outil.

A chaque fois que nous diminuons ces paramètres, l'état de surface s'améliore.

### **Conclusion :**

Ce dernier chapitre été réservé aux tests de notre application en mettant en évidence le déroulement des différentes étapes qui mènent à la simulation d'enlèvement de matière en mode 05-axes. Pour la détermination des valeurs des paramètres d'état de surface, nous avons testé notre application sur des pièces mécaniques de formes gauches usinées sur des fraiseuses 05-axes (poignée 1 et poignée 2). Pour différents paramètres d'usinage liés à la trajectoire d'outil (profondeur de passe, dimensions d'outil), au modèle volumique de la pièce (pas de discrétisation en Triple-Dixel) et à la surépaisseur. Selon les résultats présentés, nous remarquons l'importante de l'influence de ces paramètres sur la qualité de la pièce usinée. L'intérêt de cette simulation est d'aider l'opérateur à sélectionner les paramètres adéquats. Pour comparer les temps d'exécution d'optimisation et de la simulation entre les clusters et les cellules, nous avons testé les formes gauches (poignée 1 et poignée 2). Pour différents paramètres d'usinage (surépaisseur, pas Dixel, rayon d'outil, profondeur de passe). Selon le temps d'exécution obtenus, nous remarquons que les cellules sont meilleures que les clusters.

# **CONCLUSION**

---

---

## **GENERALE :**

---

---

Dans notre projet de fin d'étude proposé par l'équipe de recherche CFAO du CDTA, nous avons répondu à la problématique posée en introduction par la proposition et l'implémentation d'une approche de mesure virtuelle d'état de surfaces complexes usinées sur des fraiseuses 05-axes. Cette mesure nous a permis de déterminer les paramètres nécessaires à la prédiction de la topographie des surfaces selon la norme ISO 25178-2 de 2012.

Nous avons présenté la démarche de notre approche tout au long de notre thème pour réaliser une application qui prend en charge les tâches suivantes :

- ✓ Récupération de l'existant à savoir le modèle de la pièce en Triple-Dexels et le trajet d'outil.
- ✓ Optimisation du temps de calcul par un partitionnement de l'espace de la pièce à usiner en utilisant la méthode des cellules comparée à la méthode de k-means utilisée dans les travaux antérieurs de l'équipe.
- ✓ Calcul des points d'intersection entre les Triple-Dexels et l'enveloppe de l'outil.
- ✓ Simulation d'enlèvement de matière.
- ✓ Analyse de l'état de surface 3D.
- ✓ Analyse spectrale de la topographie 3D.

De part ce qui précède et suite aux résultats obtenus, nous avons pu voir l'influence des paramètres de coupe tels que le rayon de l'outil, la profondeur de passe, etc. sur la qualité des surfaces (rugosité) et la sélection des paramètres appropriés conduisant à obtenir un meilleur état de surface.

En perspective, nous recommandons le traitement des points suivants :

- ✓ Étendre l'approche pour les outils cylindriques et toriques.
- ✓ Introduire d'autres paramètres influençant l'état de surface tels que la vitesse d'avance, stratégies d'usinage, etc.
- ✓ Appliquer d'autres techniques de partitionnement de l'espace de la pièce.
- ✓ Intégrer le calcul parallèle pour accélérer le processus de calcul de l'approche proposé.

Le long de notre stage de fin d'étude au CDTA, nous avons pu mettre en pratique les connaissances acquises durant notre cursus à l'USDB et d'autre part, de préparer notre intégration à la vie professionnelle.

# **REFERENCES**

# **BIBLIOGRAPHIQUES :**

## **BIBLIOGRAPHIE :**

[HER, 16] K.Lilia ,H.Wassyla , Conception et Développement d'une Application de Simulation d'Enlèvement de Matière Lors de la Finition des Surfaces Complexes sur Fraiseuses 05-axes, page 5 (2016).

[BEA, 13] J. Beaudic.<http://www.imetaux.net/cfao/comprendre/definition.php> (2013).

[MAN, 04] Manuel SINUMERIK 840D, Fabrication de pièces complexes en fraisage (SIEMENS)-04,2004.

[SYS] « Sys856 Techniques avancées en EAO ».

[BLK, 15] B. Nour Elhouda, Conception et développement d'une application logicielle pour la combinaison des outils hémisphériques lors de la finition des surfaces complexes sur des fraiseuses 05-axes, page 19,20 (2015).

[COR, 05] Corrosionpedia article.<https://www.corrosionpedia.com/definition/1058/surface-topography.php>.

[BEN, 03] P.G. Benardos, G.C. Vosniakos, « Predictiong surface roughness in machining: a review », International Journal of machine Tools & Manufacture, 43(8):833-844, 2003.

[CLU, 08] C.Lu,“Study on prediction of surface quality in machining process” journal of materials processing technology 205: 439–450, (2008).

[DEN, 15] B. Denkena, V. Böß, D. Nesper, P. Gilge, S. Hohenstein, J. Seume, “Prediction of the 3D Surface Topography after Ball End Milling and its Influence on Aerodynamics”, Procedia CIRP 31: 221–227, 2015.

[SIM, 14] K.Bouhadja, M. Bey, “Survey on Simulation Methods in Multi-Axis Machining”, Chapitre 25 in Transactions on Engineering Technologies: World Congress on Engineering 2014 published by Springer.

[KAL, 10] F.Kalay, Simulation numérique de l'usinage-Application à l'aluminium AU4G (A2024-T351), Technique De L'ingénieur, l'expertise technique de référence, (2010).

[ABA, 09] S.Abainia, Usinage Techniques de Simulation d'Usinages, rapport de recherche 2009.

[BOB, 16] K. Bouhadja, M.Bey, Modélisation Volumique des Pièces de Formes complexes par Triple-Dexels, 10èmes Journées de Mécanique de l'EMP (JM'10–EMP) (2016).

[ZER] Z.Abada, Modélisation Volumique des Pièces de Formes gauches par Triple-Doxel, Page 19.

[CHY, 04] C.M. Chuang, H.T. Yuma, new approach to z-level contour machining of triangulated surface models using fillet endmills (2004).

[DJE, 14] D. Sonia, Optimisation Globale du Processus d'Usinage des Surfaces Gauches, page 19 (2014).

[QIA, 07] ZC. Chen, Fu. Qiang, « A Practical Approach to Generating Steepest Ascent Tool-Paths for Three-Axis Finish Milling of Compound NURBS Surfaces ». Computer-Aided Design 39: 964-974, 2007.

[BRW, 09] Brecher C., M. Esser, and S. Witt, "Interaction of manufacturing process and machine tool," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 58, pp. 588-607, 2009.

[PEC, 06] P.Y. PECHARD, Usinage de pièces de formes complexes: méthode de choix de stratégie d'usinage U.G.V., (2006).

[BOU, 13] K. Bouhadja, Fabrication des surfaces de forme gauche. Rapport de recherche (2013).

[POT, 08] « Positionnement d'outil torique pour l'usinage des surfaces gauches en fraisage 5 axes avec équilibrage de l'effort de coupe transversal » octobre 2008.

[FAF, 16] « Five axis flank milling of impellers: optimal geometry of a conical tool considering stiffness and geometric constraints » 2016.

[CLE, 08] Cedric Castagnetti, « Amélioration du comportement cinématique des machines par l'optimisation des trajets d'usinage 5 axes. Génie mécanique [physics.class -ph]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand I I, 2008. Français » 2008.

[ISO, 06] la norme ISO 25178 va tout changer dans la revue Mesures, numéro 787 de septembre (2006).

[WHI, 02] Whitehouse, David. Surfaces and their measurement. London: Hermes Penton science, 2002.

[SAR, 10] Antoine SARAZIN. Les solutions Sandvik Coromant aux problématiques d'états de surface (2010).

[ISO, 14] la norme ISO/TR 14638 Spécification géométrique des produits (GPS), (2014).

[FRB, 06] François Blateyron, États de surface : la norme ISO 25178 qui va tout changer in Mesures, no 787, septembre 2006, p. 44-47.

[TAL, 12] T.said, A. ROUINA, Analyse de l'état de surface 3D selon la norme ISO 25178-2 de (2012).

[SHE, 12] Université de Sherbrookepage, Chapitre 2 - Calcul d'intersections, page 23 (6 septembre 2012).

[KHB, 13] K. Bouhadja, Contribution à l'étude de la topographie 3D des surfaces gauches usinées sur des machines 5 axes, page 8, (décembre 2013).

