

MA-004-410-1



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



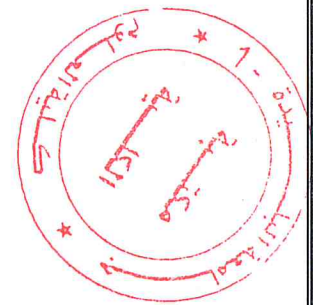
UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention

D'un Diplôme de Master en Informatique

Option : Systèmes Informatiques et Réseaux



### THÈME :

**Optimisation de la Finition des Surfaces  
Complexes sur des Fraiseuses 05-axes par  
Combinaison des Outils Hémisphériques,  
Cylindriques et Toriques**

#### Réalisé par :

M<sup>lle</sup>. GHEMOURI Lilia

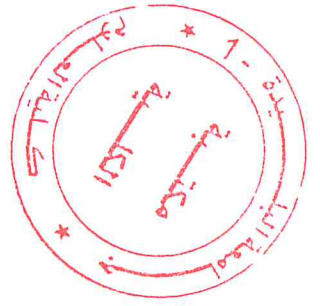
M<sup>lle</sup>. REZKELLAH Sabrina

#### Soutenu devant :

Mr. BEY Mohamed	CDTA,	Encadreur
Mr. BENDIFALLAH Hassène	CDTA,	Encadreur
Mr. KAMECHE Abdallah Hicham	USDB,	Promoteur
Mr. CHERIF Zahar Amine	USDB,	Président
Mme. DJEDDAR Afrah	USDB,	Examineur

2017/2018

MA-004-410-1





## **Résumé :**

Ce travail s'insère dans le cadre de développement d'un environnement de fabrication de surfaces gauches initié par l'équipe « CFAO » du Centre de Développement des Technologies Avancées « CDTA ».

L'objectif de ce travail est le développement d'un module logiciel générique, graphique et interactif pour la détermination de la combinaison optimale des trois formes d'outils « Cylindriques, Hémisphériques et Toriques », permettant l'évitement des interférences et des collisions, lors de la finition des surfaces gauches définies par leurs modèles STL sur des fraiseuses numériques à 05-axes.

**Mots Clés :** Combinaison, Finition, Surface Complexe, Interférence, Collision, Fraiseuse 05-axes, Forme Locale, Modèle STL.

## **ملخص :**

هذا العمل يندرج في إطار تطوير بيئة انتاج القطع ذات الأسطح المعقدة الذي بدأ على مستوى فريق CFAO التابع لمركز تطوير التكنولوجيات المتقدمة (CDTA).

الهدف من هذا العمل هو تطوير وحدة برمجية عامة وتفاعلية لتحديد التركيبة الأمثل لأشكال الأدوات الثلاثة "أسطواني، نصف كروي، حلقي" التي تسمح بتجنب التداخلات والتصادمات، عند الانتهاء من وضع اللمسات الأخيرة للأسطح ذات الأشكال المعقدة، على ماكينات 5 محاور.

**الكلمات المفتاحية** تركيبة الأشكال الثلاثة للأدوات، السطح المعقد، التداخل، التصادم، ماكينات 5 محاور، الأشكال المحلية، نموذج STL.

## **Abstract:**

This work is a part of the software developed by "CAD/CAM" team of the Center for the Development of Advanced Technologies "CDTA" dedicated to the machining of free form surfaces on CNC milling machines.

The objective of this work is the development of a generic, graphical and interactive software for the determination of optimal combination of three tools forms "Cylindrical, Hemispherical and Toroidal" cutters avoiding interferences and collisions for finishing free form surfaces defined by their STL models on 05-axis CNC milling machines.

**Keywords:** Combination, Optimization, Finishing, Free Form Surfaces, Interference, Collision, 05-axis Machining, Local Forms, STL model.

# Remerciement

\*\*\*\*\*

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier très chaleureusement nos encadreurs monsieur Bey Mohammed et monsieur Bendifallah Hassène pour leurs aides précieuses, pour leurs spontanéités et leurs compétences professionnelles incontestables, durant toute cette période d'encadrement. « Ils sont et ils seront pour nous un exemple de rigueur et de droiture dans l'exercice de la profession. » »*

*Nous remercions également notre promoteur monsieur KAMACHE Abdallah Hicham pour la confiance placée en nous et pour avoir accepté de diriger ce travail.*

*Aussi, nous remercions madame Tchantchane Zahida, Melles. Soumia et Imene, Melle. Ferhat Sahla et aussi toute l'équipe CFAO du CDTA pour leurs encouragements et leurs conseils tout au long de ce projet.*

*Nos vifs remerciements aux membres du jury pour l'intérêt accordé à notre travail en l'examinant minutieusement et avec attention.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu pour la réussite dans nos études.*

*A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

**Merci.**



## *Dédicaces :*

### **A MES CHERS PARENTS**

*Mon père, L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect, qui peut être fier et trouve ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi... ..*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçoit à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude... ..*

### **A MES CHERS ET ADORABLES FRERES ET SŒURS**

*ADEL, Malika, Kenza : en témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde pour moi.*

### **A LA MEMOIRE DE MES GRANDS PARENTS**

*J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.*

### **À MON BEAU\_FRERE ET MA CHERE PETITE NIECE "Lina" ET TOUS LES MEMBRES DE MA FAMILLE PETITS ET GRANDS.**

#### **UN SPECIALE DEDICACE A MON BINOME " Rezkellah Sabrina "**

*En témoignage de l'amitié qui nous a uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de santé, ainsi que son père pour sa patience et son accompagnement, Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon grand respect.*

#### **A MELLE SOUMIA, IMENE, RASHA**

*Je ne vous remercierai jamais assez pour votre précieux aide.*

#### **À TOUS MES AMIES**

*Nesrine, Ahmed, Mérième ,Sofia ,Houda, Hind, Ihsan et aux étudiants de l'équipe CAFO Asma, Chanez, Sidahmed, Chemsou, Islam, Fares, Diea et Abdelkader.*

#### **À tous les étudiants de la promotion 2017/2018 Option SIR**

*À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer .....*

**LiLiA**



## *Dédicaces :*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À mes chers parents. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour. Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.*

*À mes deux frères Amine, Mehdi et ma belle-sœur Houda ☺*

*À toute ma famille : mes grands-parents, mes tantes, mes oncles et mes cousins et cousines en particulier Leila, Yasmine, Nassim, Oufa.*

*À mon binôme Lilia, on a partagé tous ces moments de stress, de joie de panique de délire et surtout de guigne ensemble.*

*Sans oublier mes chères copines : Sarah, Zineb. Je n'arrive pas à croire que 4 années se sont écoulées. On a vécu beaucoup de moments ensemble et chacun de vous avait sa touche qui faisait de nous ce qu'on était et j'en garde que de bons souvenirs.*

*À tous les membres de l'équipe CFAO.*

*Mes amis : Zizou, Sofia, Houda, Sidahmed l'🤖bstacle, Chemsou, Fares, Islam, Diae, kader, Asma, Chanez.*

*À tous les étudiants de la promotion 2017/2018 SIR.*

*Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.*

*Sabrina*

## Table des matières

Liste des figures .....	1
Liste des tableaux .....	3
Introduction générale .....	4
<b>Chapitre I : Généralités sur le processus d'usinage de surfaces gauches</b>	
I. Introduction : .....	7
I.1. Représentation des surfaces .....	7
I.1.1. Forme non paramétrique .....	8
I.1.2. Forme paramétrique .....	8
I.2. Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur « CFAO » .....	12
I.2.1. Conception Assistée par Ordinateur « CAO » .....	12
I.2.2. Fabrication Assistée par Ordinateur « FAO » .....	12
I.3. Formats d'échange de données .....	12
I.3.1. STL (Standard Tessellation Language) .....	13
I.3.2. Propriétés géométriques d'un point dans le modèle STL .....	13
I.3.3. Structure d'un fichier STL .....	15
I.4. Processus d'usinage .....	16
I.5. Usinage des pièces complexes .....	17
I.5.1. Usinage 03-axes .....	17
I.5.2. Usinage 05-axes .....	18
I.5.3. Phases d'usinage .....	19
I.5.4. Stratégies d'usinage en finition .....	19
I.6. Machine-outil à commande numérique (MONC) .....	20
I. 6.1. Définition des axes pour une fraiseuse numérique à 05-axes .....	20
I.7. Outil de coupe en fraisage .....	21
I.7.1. Différentes parties de l'outil .....	21
I.7.2. Types d'outils de coupe .....	22
I.7.3. Positionnement et orientation de l'outil en 05-axes .....	22
I.7.4. Problèmes d'interférences .....	24
I.7.5. Evitement des interférences et des collisions .....	25
I. Conclusion .....	25

## Chapitre II : Etude conceptuelle

II. Introduction :	26
II.1. Démarche proposée :	26
II.1.1. Lecture du fichier STL et création du brut	27
II.1.2. Création des cellules	29
II.1.3. Affectation des points aux cellules	29
II.1.4. Détermination des paramètres des triangles	31
II.1.5. Détermination des paramètres des sommets	32
II.1.6. Détermination des formes locales:	32
II.1.6.1. Forme locale d'un sommet	32
II.1.6.2. Forme locale d'un triangle	33
II.1.6.3. Correction de la forme locale	34
II.1.7. Création des régions et des sous-régions	34
II.1.8. Identification des triangles et des segments frontières	35
II.1.9. Positionnement des outils	36
II.1.10. Détermination des zones d'interférences et de collisions	37
II.1.11. Tests d'interférences et de collisions	39
II.1.11.1. Collision avec le porte-outil	39
II.1.11.2. Interférence	40
II.1.12. Enrichissement du modèle STL	42
II.1.13. Correction des interférences et des collisions	43
II.1.14. Affectation des outils aux sommets	43
II.2. Modélisation UML	45
II.2.1 Diagramme de cas d'utilisation :	45
II.2.2 Diagramme de classes	47
II. Conclusion	52

## Chapitre III : Implémentation et validation

III. Introduction	53
III.1. Présentation des langages utilisés	53
III.1.1. Présentation du langage C++	53
III.1.2. Présentation d'OpenGL	54
III.1.3. Présentation d'Embarcadero C++ Builder 10 Seattle	54
III.2. Présentation de l'application	55
III.2.1. Lecture du fichier STL	55
III.2.2. Création des cellules	56



III.2.3. Paramètres des sommets et triangles .....	57
III.2.3.1. Onglet « paramètres sommets » .....	57
III.2.3.2. Onglet « paramètres triangles » .....	57
III.2.4. Détermination des formes locales .....	58
III.2.5. Création des régions .....	58
III.2.6. Création des sous-régions .....	60
III.2.7. Récupération des outils .....	60
III.2.8. Paramètres d'outil .....	62
III.2.9. Affectation d'outil .....	62
III.2.10. Combinaison d'outil .....	62
III.3. Test et validation .....	64
III.3.1. Premier modèle STL .....	64
III.3.2. Deuxième modèle STL .....	65
III. Conclusion : .....	74
Conclusion générale .....	75
Références bibliographiques .....	77

## Liste des figures

Figure. I.1 : Localisation d'un point sur une surface paramétrique.....	09
Figure. I.2 : Plan tangent d'une surface paramétrique.....	10
Figure. I.3 : Courbures principales d'une surface .....	10
Figure. I.4 : Différentes formes locales .....	11
Figure. I.5 : Modèle STL d'un modèle continu .....	13
Figure. I.6 : Normale en un point .....	14
Figure. I.7 : Forme locale d'un point.....	15
Figure. I.8: Formats de fichier STL.....	16
Figure. I.9 : Processus d'usinage.....	17
Figure. I.10 : Vitesse d'avance et vitesse de coupe.....	17
Figure. I.11 : Usinage 3 axes.....	18
Figure. I.12 : Usinage 5 axes.....	18
Figure. I.13 : Phases d'usinage .....	19
Figure. I.14 : Stratégies de finition.....	20
Figure. I.15 : Axes d'une fraiseuse à 05-axes .....	21
Figure. I.16 : Formes des fraises de finition .....	22
Figure. I.17 : Positionnement des différentes formes d'outils .....	23
Figure. I.18 : Orientation de l'outil .....	24
Figure. I.19 : Types d'interférences .....	25
Figure. II.1 : Organigramme général de la démarche proposée.....	27
Figure. II.2 : Lecture du fichier STL et création du brut .....	28
Figure. II.3 : Points limites et brut du modèle STL.....	28
Figure. II.4 : Création des cellules .....	29
Figure. II.5 : Affectation des points aux cellules .....	30
Figure. II.6 : Paramètres d'un triangle.....	31
Figure. II.7 : Angles d'un triangle .....	31
Figure. II.8 : Voisins d'un triangle .....	32
Figure. II.9 : Triangles communs et voisins du sommet .....	32
Figure. II.10 : Correction de la forme locale d'un triangle .....	34
Figure. II.11 : Création des régions et des sous-régions.....	35
Figure. II.12 : Identification des triangles et des segments frontières.....	36
Figure. II.13 : Zones d'interférences et de collisions .....	38

Figure. II.14 : Détermination des zones d'interférences et de collisions .....	38
Figure. II.15 : Collision avec le porte-outil .....	39
Figure. II.16 : Interférence outil cylindrique et outil hémisphérique .....	40
Figure. II.17 : Interférence outil torique .....	41
Figure. II.18 : Enrichissement du modèle STL .....	42
Figure. II.19 : Correction de l'interférence et de la collision.....	43
Figure. II.20 : Affectation des outils .....	44
Figure. II.21 : Cas d'utilisation générale. ....	45
Figure. II.22 : Cas d'utilisation « déterminer les paramètres des sommets et des triangles ». .46	
Figure. II.23 : Cas d'utilisation « Subdiviser le modèle ». ....	46
Figure. II.24 : Cas d'utilisation « Déterminer les paramètres d'outil».....	47
Figure. II.25 : Cas d'utilisation « Combiner les outils » .....	47
Figure. II.26 : Diagramme de classe générale.....	48
Figure. II.27 : Classe « MODELE_STL ».....	48
Figure. II.28 : Classe « CELLULE ».....	49
Figure. II.29 : Classe « SOMMET ». ....	49
Figure. II.30 : Classe « TRIANGLE_STL ».....	50
Figure. II.31 : Classe « REGION ». ....	51
Figure. II.32 : Classe « OUTIL_STL ».....	51
Figure III. 1 : Onglets de l'application développée.....	55
Figure III. 2 : Onglet « BRUT ».....	55
Figure III. 3 : Onglet « CELLULES ».....	56
Figure III. 4 : Onglet « PARAMETRES SOMMET ». ....	57
Figure III. 5 : Onglet « PARAMETRES TRIANGLE ». ....	58
Figure III. 6 : Onglet « FORME LOCALE».....	59
Figure III. 7 : Onglet « REGION ». ....	59
Figure III. 8 : Onglet « SOUS REGION».....	60
Figure III. 9 : Onglet « Cylindrique».....	61
Figure III. 10 : Onglet « Hémisphérique».....	61
Figure III. 11 : Onglet « Torique». ....	62
Figure III. 12 : Onglet « PARAMETRE OUTIL». ....	63
Figure III. 13 : Onglet « AFFECTATION».....	63
Figure III. 14 : Onglet «COMBINAISON ». ....	64
Figure III. 15 : Formes locales des surfaces du premier modèle STL.....	65

Figure III. 16 : Création des cellules de sommets. ....	66
Figure III. 17 : Paramètres visibles après l'affectation des sommets. ....	66
Figure III. 18 : Estimation des normales. ....	67
Figure III. 19 : Visualisation des paramètres d'un sommet. ....	68
Figure III. 20 : Visualisation des paramètres d'un triangle. ....	68
Figure III. 21 : Formes locales des sommets. ....	69
Figure III. 22 : Formes locales des triangles. ....	69
Figure III. 23 : Régions de la surface. ....	69
Figure III. 24 : Visualisation des paramètres de la région en selle de cheval. ....	70
Figure III. 25 : Visualisation des sous-régions de la région convexe. ....	71
Figure III. 26 : Visualisation des paramètres d'une sous-région. ....	71
Figure III. 27 : Visualisation du point de contact et des paramètres d'outil. ....	72
Figure III. 28 : Enveloppe de la partie active d'outil et cellules de chevauchement. ....	72
Figure III. 29 : Enveloppe de la partie corps d'outil et cellules de chevauchement. ....	73
Figure III. 30 : Point de contact avec interférences et collisions. ....	73
Figure III. 31 : Affectation de l'outil optimum au point de contact. ....	74

### Liste des tableaux

Tableau. II.1 : les limites d'une cellule. ....	29
Tableau .III.1: Comparaison des temps de calcul. ....	67

## INTRODUCTION GENERALE

### **Présentation du sujet :**

Ce troisième millénaire a connu d'énormes progrès en matière de développements technologiques dans tous les secteurs. Parmi ces secteurs, le secteur de production de pièces mécaniques qui a progressé de manière notable grâce à l'introduction de l'outil informatique suite à l'élaboration des logiciels allant de la conception jusqu'à la fabrication. Ceci mène les entreprises activant dans le domaine de l'industrie manufacturière à intégrer ces outils de plus en plus pour faire face à la compétitivité qui s'acharne de jour en jour.

Les entreprises de production de pièces mécaniques sont plus que jamais concernées par la réduction du cycle de développement de leurs produits. Cette réduction passe forcément par la réduction des délais de conception et de fabrication. Toutefois, l'amélioration permanente de la qualité des produits, de leurs coûts et de la gestion des connaissances de l'entreprise, restent aussi des impératifs pour une meilleure compétitivité. Cette réduction des délais de fabrication repose sur une exploitation efficace des méthodes modernes de production, à travers notamment l'automatisation de tâches et la formalisation des connaissances. Ces dernières décennies ont vu le développement poussé de logiciels informatiques pour la modélisation géométrique de produits (modeleurs CAO / CAD) et d'outils pour l'assistance à la fabrication (logiciels de FAO / CAM).

Dans la pratique industrielle, un compromis est toujours recherché entre la qualité des pièces usinées et les temps d'usinage pour réduire les coûts. Afin d'optimiser les temps d'usinage, plusieurs approches sont développées qui considèrent soit les conditions d'usinage soit les stratégies d'usinage soit la sélection des outils optimums. Dans cet ordre d'idées et dans le cadre du programme de recherche piloté par l'équipe « CFAO » « Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur » du « CDTA » « Centre de Développement des Technologies Avancés), il nous a été proposé de concevoir une application logicielle qui

prend en charge l'optimisation de l'usinage par la combinaison des trois formes d'outils « Cylindriques, Hémisphériques et Toriques » lors de la finition des surfaces de formes complexes, définies par leurs modèles STL, sur des fraiseuses numériques à 05-axes par la prise en compte des formes locales des surfaces et des temps d'usinages. Ce projet est le résultat d'une investigation dans plusieurs axes concourant à l'usinage de surfaces gauches en finition sur des fraiseuses à 05-axes notamment:

- Etude des surfaces dites de formes libres.
- Etude du format d'échange de données « STL ».
- Généralités sur le processus d'usinage des surfaces complexes sur des fraiseuses numériques à 05-axes.
- Généralités sur les outils de finition en 05-axes.
- Identification des problèmes d'interférences et de collisions.
- Combinaison des trois formes d'outils optimums en chaque point de contact outil-surface évitant les interférences et les collisions.
- Combinaison optimale des outils minimisant les temps d'usinage globaux.

### **Problématique :**

La production des pièces mécaniques complexes avec des surfaces fonctionnelles fait souvent appel à l'enlèvement de matière c'est-à-dire l'usinage. L'usinage de haute précision des surfaces gauches, est l'un des processus clés dans la fabrication moderne. Pour rester compétitifs, les fabricants cherchent constamment à augmenter la qualité, à réduire les coûts d'usinage et les délais de production.

L'opération de finition des surfaces gauches peut être réalisée par des outils cylindriques, hémisphériques et toriques. L'obtention d'un bon état de surface en un minimum de temps nécessite la détermination des outils adéquats en considérant les formes locales des surfaces. La géométrie complexe de ces surfaces rend cette tâche très difficile. Le but recherché est une méthodologie pour optimiser l'opération de finition des surfaces gauches à partir de leurs modèles « STL » sur des fraiseuses numériques à 05-axes par combinaison d'outils cylindriques, hémisphériques et toriques. Autrement dit, étant donné une surface gauche représentée par son modèle « STL », qu'elle est la combinaison d'outils optimale parmi les outils cylindriques, hémisphériques et toriques et quelles sont les angles d'orientation de ces outils qui assurent un usinage continu sans interférences et sans collisions.

### **Objectif :**

Ce travail s'insère dans le cadre de développement de modules logiciels pour la production des surfaces de formes complexes initié par l'équipe « Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur » « CFAO » de la Division Productique et Robotique du « Centre de Développement des Technologies Avancées » « CDTA ».

Dans ce projet, nous nous intéressons à la combinaison des trois formes d'outils « Cylindriques, Hémisphériques et Toriques » lors de la finition des surfaces complexes, définies par leurs modèles « STL », sur des fraiseuses numériques à 05-axes en considérant les formes locales des surfaces et les temps d'usinage. Il s'agit de concevoir, de développer et d'intégrer à l'environnement de production des surfaces complexes développé par l'équipe « CFAO » du « CDTA », un module logiciel générique, graphique et interactif pour la détermination de la combinaison optimale des trois formes d'outils permettant l'évitement des interférences et des collisions sous certaines contraintes géométriques et technologiques.

### **Structuration du mémoire :**

Le présent mémoire est composé des parties suivantes :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique de l'usinage des surfaces gauches en 05-axes.
- Le deuxième chapitre est réservé pour l'étude conceptuelle de notre application ainsi que la présentation des fonctions et des algorithmes utilisés pendant le développement informatique.
- Le dernier chapitre montre l'implémentation informatique, les tests réalisés pour valider les résultats.
- Ce mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

# CHAPITRE I

---

## GENERALITES SUR LE PROCESSUS D'USINAGE DES SURFACES GAUCHES EN 05-AXES

Introduction.

1. Représentation des surfaces.
2. Conception et fabrication assistées par ordinateur.
3. Formats d'échanges de données.
4. Processus d'usinage.
5. Usinage des pièces complexes.
6. Machine-outil à commande numérique.
7. Outils de coupe en fraisage.

Conclusion.



## **Introduction :**

Le monde de la conception et de la fabrication mécanique est très vaste, en commençant par la plus petite pièce utilisée par un chirurgien-dentiste à la plus grande pièce d'un navire ou d'une navette spatiale. Tout système mécanique est composé d'un ensemble de pièces liées entre elles où chaque pièce est composée de surfaces avec des caractéristiques géométriques et mécaniques spécifiques afin qu'elles répondent aux exigences techniques et aux conditions de fonctionnement.

La surface d'une pièce ou d'un objet solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant. Elle est prépondérante pour assurer des fonctions appropriées telles que l'aptitude aux frottements et résistance aux contraintes mécanique.

Parmi les surfaces les plus répandues dans le domaine de l'industrie manufacturière « les surfaces complexes » appelées communément « surfaces de formes libres » ou « surfaces gauches ». Ces surfaces sont d'une utilisation fréquente dans de nombreuses applications industrielles telles que les pièces d'automobiles, les coques de navires et les pièces en aérospace. Elles sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de régions de surfaces concaves, convexes ou à double courbure (selle de cheval).

Le processus de réalisation de ces surfaces est un processus industriel qui a subi de grandes évolutions ces dernières décennies par l'introduction de la CFAO « Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur » et de la commande numérique dans les machines de production. Ce processus est formé d'une suite d'activités plus ou moins importantes qui passe par plusieurs étapes successives et complémentaires à savoir la conception, la simulation, la production et le contrôle de la pièce réalisée.

La suite de ce chapitre est organisée en trois parties. Dans la première partie, une présentation des différentes méthodes de représentation des surfaces complexes ainsi que du format d'échange de données « STL ». La deuxième partie est consacrée à l'étude du processus d'usinage des surfaces complexes sur des fraiseuses numériques à 05-axes. La dernière partie est réservée à la présentation des machines-outils à commande numérique et aux outils d'usinage.

## **1. Représentation des surfaces :**

En informatique graphique, de nombreuses représentations d'objets réels sont utilisées telles que les données médicales issues de scanner, modèles CAO, jeux vidéo, ...etc. La façon

la plus courante de qualifier une forme, est de décrire son enveloppe extérieure, c'est la modélisation surfacique.

La CAO « Conception Assistée par Ordinateur » utilise souvent des modèles mathématiques pour représenter la réalité selon le besoin et le domaine auquel ils sont destinés. Ce modèle est très utilisé pour le design ou la conception en mécanique puisqu'il permet d'utiliser des propriétés mathématiques. En CAO, les surfaces sont classées en deux grandes catégories selon leurs représentations [1].

### 1.1. Forme non paramétrique [2] :

Ces surfaces peuvent être représentées sous deux différentes formes :

- **Forme explicite** : elle est définie par l'équation suivante :

$$Z = F(X, Y) \quad (1)$$

Cette forme ne permet pas de représenter des surfaces fermées dont l'utilisation en CAO est très fréquente. Donc, elle ne satisfait pas les conditions de diversités.

- **Forme implicite** : les surfaces implicites sont définies par une fonction de trois variables :

$$F(X, Y, Z) = 0 \quad (2)$$

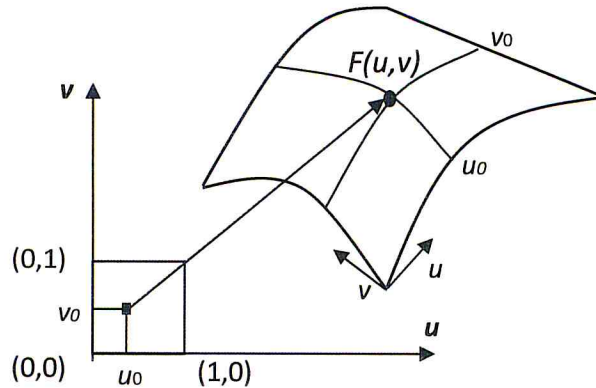
Cette forme ne permet pas de représenter toutes les surfaces, mais elle n'a pas la limitation de la représentation explicite.

### 1.2. Forme paramétrique [2] :

Les surfaces paramétriques sont très utilisées dans la modélisation de surface. Elles sont définies par un ensemble de trois fonctions réelles  $X(\ )$ ,  $Y(\ )$  et  $Z(\ )$ . Ces fonction dépendent de deux paramètres  $u$  et  $v$  qui n'ont aucune signification physique. Une surface paramétrique est donnée par la formulation suivante (Figure I.1) :

$$F(u, v) = (X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)) \quad (3)$$

Les paramètres  $u$  et  $v$  appartiennent à l'intervalle  $[0, 1]$ . Ainsi, chaque point  $F(u, v)$  de la surface paramétrique appartient à un carré dans le plan paramétrique défini par les sommets  $(0, 0)$ ,  $(0, 1)$ ,  $(1, 0)$  et  $(1, 1)$  (Figure I.1).



**Figure I.1.** Localisation d'un point sur une surface paramétrique.

En général, les surfaces paramétriques ne sont pas utilisées individuellement. Pratiquement, plusieurs morceaux de surfaces paramétriques sont raccordés entre eux avec des contraintes de continuité pour former une surface plus complexe.

➤ **Propriétés des surfaces paramétriques :**

Les surfaces paramétriques sont caractérisées par trois propriétés géométriques à savoir : le plan tangent, le vecteur normal et les courbures.

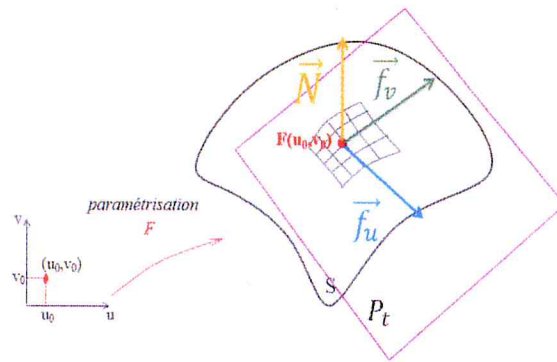
- **Plan tangent [3] :** c'est le plan défini par un point et deux vecteurs (Figure I.2). Le point est défini par le triplet  $F(u, v) = (X(u, v), Y(u, v), Z(u, v))$ . Le premier vecteur est le vecteur tangent dans la direction paramétrique  $u$ . Il est donné par :

$$T_u = F'_u(u, v) = \left( \frac{\delta}{\delta u} X(u, v), \frac{\delta}{\delta u} Y(u, v), \frac{\delta}{\delta u} Z(u, v) \right) \quad (4)$$

Le deuxième vecteur est le vecteur tangent dans la direction paramétrique  $v$ . Il est donné par :

$$T_v = F'_v(u, v) = \left( \frac{\delta}{\delta v} X(u, v), \frac{\delta}{\delta v} Y(u, v), \frac{\delta}{\delta v} Z(u, v) \right) \quad (5)$$

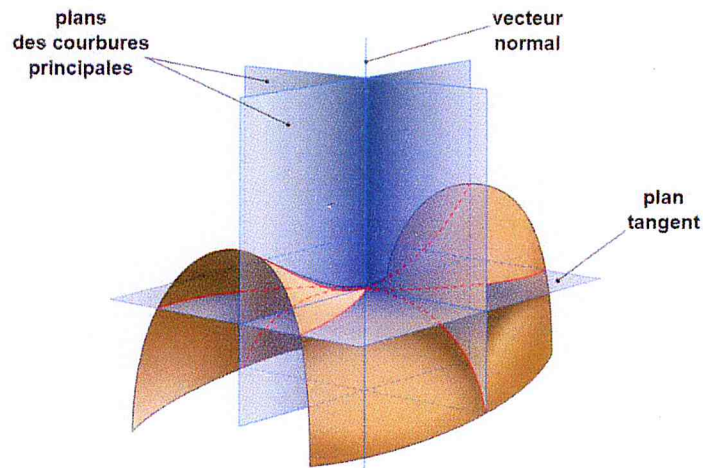
- **Vecteur normal [4] :** en mathématiques, et plus précisément en géométrie, la droite normale à une surface en un point est la droite orthogonale au plan tangent en ce point. Tout vecteur directeur de cette droite est appelé vecteur normal à la surface en ce point. Une convention fréquente pour les surfaces fermées est de particulariser un vecteur normal unitaire, vecteur de norme 1 et orienté vers l'extérieur.



**Figure I.2.** Plan tangent d'une surface paramétrique.

- **Courbures [5]** : la courbure mesure la manière dont une courbe ou un arc géométrique s'éloigne localement d'une ligne droite. Elle évalue le rapport entre la variation de la direction de la tangente à la courbe et un déplacement d'une longueur sur celle-ci. Plus le rapport est important, plus la courbure est importante. En n'importe quel point sur une surface paramétrique, il y a un nombre infini de courbes appartenant à cette surface et passant par ce point et dont chacune pourrait avoir une valeur différente de la courbure [6]. Trois (03) types de courbures peuvent être distingués :

1. Courbures principales : ce sont les courbures maximum et minimum des courbes notées  $k_1$  et  $k_2$  respectivement. Elles sont obtenues en coupant la surface par des plans perpendiculaires au plan tangent au point considéré (Figure I.3).



**Figure I.3.** Courbures principales d'une surface.

2. Courbure gaussienne : c'est le scalaire noté  $K$  calculé par le produit des deux courbures principales  $k_1$  et  $k_2$  au même point. Elle est donnée par :

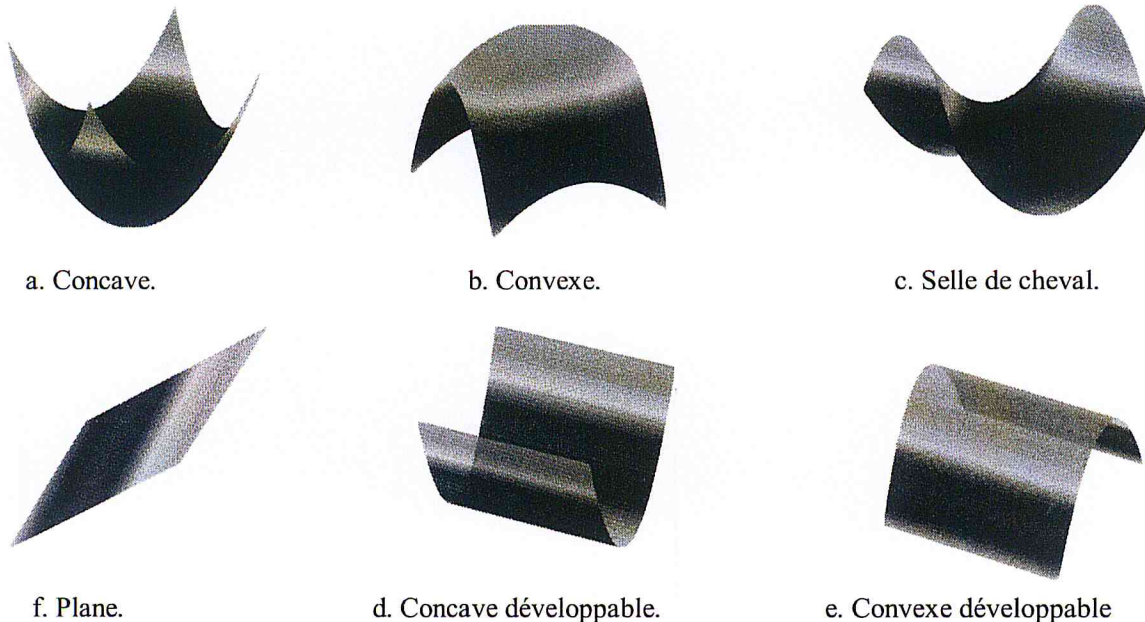
$$K = k_1 k_2 \quad (6)$$

3. Courbure moyenne : c'est le scalaire noté  $H$  calculé par la moyenne des deux courbures principales  $k_1$  et  $k_2$  au même point. Elle est donnée par :

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (7)$$

Ces courbures sont utilisées pour déterminer la forme locale de la surface dans le voisinage d'un point de coordonnées paramétriques  $u$  et  $v$ . De la géométrie différentielle, la forme locale au voisinage d'un point peut être une de six formes possibles en fonction des valeurs des courbures gaussienne et moyenne [7]:

1. Concave : si ses courbure gaussienne et moyenne sont positives ( $K > 0$  et  $H > 0$ ) (Figure I.4.a).
2. Convexe : si sa courbure gaussienne est positive ( $K > 0$ ) et la courbure moyenne est négative ( $H < 0$ ) (Figure I.4.b).
3. Selle de cheval : si sa courbure gaussienne est négative ( $K < 0$ ) (Figure I.4.c).
4. Plane : si ses courbure gaussienne et moyenne sont nulles ( $K = H = 0$ ) (Figure I.4.d).
5. Concave développable : si sa courbure gaussienne est nulle ( $K = 0$ ) et sa courbure moyenne est positive ( $H > 0$ ) (Figure I.4.e).
6. Convexe développable : si sa courbure gaussienne est nulle ( $K = 0$ ) et sa courbure moyenne est négative ( $H < 0$ ) (Figure I.4.f).



**Figure I.4.** Différentes formes locales.

## **2. Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur « CFAO » [8] :**

Le développement de produits a toujours impliqué deux processus : la conception et la fabrication. Pour faciliter la conception d'un produit et d'augmenter sa vitesse de production, la conception et la fabrication assistées par ordinateur « CFAO » est apparue. L'idée générale de ce procédé est d'utiliser les capacités de l'ordinateur pour concevoir la pièce en trois (03) dimensions et la fabriquer grâce à une machine connectée directement à l'ordinateur. Les objectifs de la CFAO sont l'atteinte d'une extrême précision, le gain de temps et la minimisation le plus possible de l'intervention humaine qui est une source d'erreurs.

### **2.1. Conception Assistée par Ordinateur « CAO » [9] :**

La conception assistée par ordinateur « CAO » rassemble des outils informatiques (logiciels et matériels) permettant de réaliser une modélisation géométrique d'un objet afin de pouvoir simuler des tests en vue d'une fabrication. Ses avantages sont :

- Augmenter la productivité et améliorer la qualité de la conception.
- Valider par simulation des solutions adoptées avant leurs réalisations.

### **2.2. Fabrication Assistée par Ordinateur « FAO » :**

La fabrication assistée par ordinateur « FAO » est l'ensemble des outils informatiques permettant de faciliter et d'automatiser les processus de fabrication. Le module « FAO » utilise le modèle « CAO » pour commander la machine-outil. Ses avantages sont :

- Dans la production à grande échelle, les résultats sont cohérents (toujours les mêmes).
- Assure un niveau de précision très élevé dans la production à grande échelle.

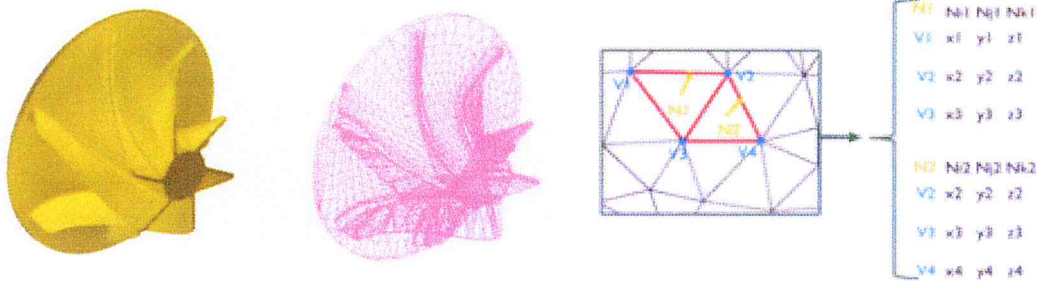
## **3. Formats d'échange de données [10] :**

Pour entamer la fabrication, la « FAO » nécessite certaines informations contenues dans le modèle conçu. Dans un système homogène où les modules de « CAO » et de « FAO » sont complètement intégrés dans un seul environnement, les informations circulent facilement et directement entre les deux modules. Dans le cas où ces deux modules ne sont pas intégrés, la circulation des données nécessite l'utilisation des translateurs (Format d'échange de données). C'est-à-dire la convention qui permet d'échanger des données entre divers programmes ou logiciels par l'intermédiaire d'un fichier neutre. Plusieurs formats d'échange sont utilisés tels

que IGES, STEP, STL, ...etc. Le choix d'un de ces formats dépend du besoin, des contraintes de l'application et du choix de l'utilisation.

### 3.1. STL (Standard Tessellation Language) [11] :

Le format STL lancé par 3D système en 1989 est largement utilisé pour l'impression 3D et la fabrication assistée par ordinateur. Le format de fichier STL ne décrit que la géométrie des surfaces d'un objet en 3D et ne comporte pas d'informations concernant la couleur, la texture ou les autres paramètres. La surface est décomposée en série de petits triangles (facettes) (Figure I.5.b). Chaque triangle est décrit par la normale au triangle et trois points représentant les sommets du triangle (Figure I.5.c). Ce qui le rend très simple à utiliser.



a. Modèle CAO.

b. Modèle STL.

c. Format de représentation STL.

Figure I.5. Modèle STL d'un modèle continu.

### 3.2. Propriétés géométriques d'un point dans le modèle STL :

Les principales propriétés géométriques en un point du modèle STL sont les suivantes :

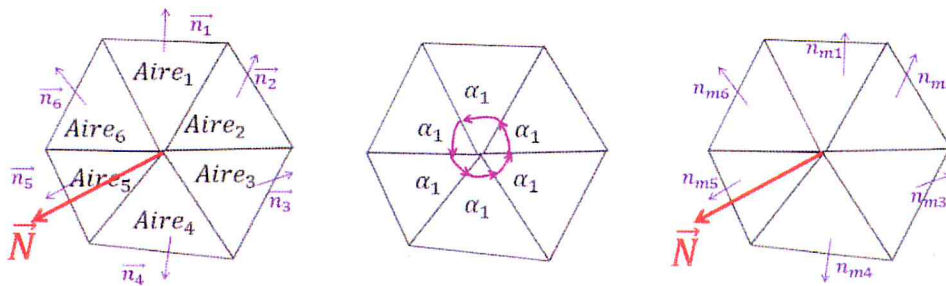
- **Vecteur normal [12]** : la normale au point P est définie comme étant le vecteur normé calculé en tant que moyenne pondérée des vecteurs normaux aux faces voisines à P. Elle est donnée par :

$$\vec{N} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \cdot \vec{n}_i}{\sum_{i=1}^k w_i}$$

Où  $n_i$  sont les vecteurs normaux des triangles partageant le même point et  $w_i$  sont les facteurs de pondération. Ces facteurs peuvent être de trois modes :

- Pondération par les aires des triangles. Dans ce cas,  $w_i$  représente l'aire du triangle (Figure I.6.a).
- Pondération par les angles des triangles. Dans ce cas,  $w_i$  représente l'angle au sommet du triangle (Figure I.6.b).

- $w_i$  est pris égal à 1. Dans ce cas, c'est la moyenne des vecteurs normaux des triangles partageant ce sommet (Figure I.6.c).



a. Pondération par les aires.      b. Pondération par les angles.      c. Moyenne des normales.

**Figure I.6.** Normale en un point.

- **Plan tangent [13]** : le plan tangent en un point est considéré comme étant le plan passant par ce point et orthogonal à la normale  $\vec{N}$ .

- **Formes locales d'un point [12]** : le modèle STL étant un modèle discret, la formulation mathématique propre au modèle continu de surfaces permettant de calculer les courbures ne peut être appliquée. Pour déterminer la forme locale d'un point, une approche basée sur des considérations purement géométriques est adoptée. L'approche est basée sur la position des points voisins du point considéré par rapport à son plan tangent. La forme locale d'un point est déterminée à partir des conditions géométriques suivantes (Figure I.7) :

1. Convexe : si tous ses voisins sont en dessous du plan tangent.
2. Concave : si tous ses voisins sont en dessus du plan tangent.
3. Plane : si ses voisins appartiennent au plan tangent.
4. Selle de cheval : si une partie de ses voisins sont en dessus du plan tangent et l'autre partie en dessous du plan tangent.
5. Convexe développable : si une partie de ses voisins sont en dessous du plan tangent et l'autre partie appartient au plan tangent.
6. Concave développable : si une partie de ses points voisins sont en dessus du plan tangent et l'autre partie appartient au plan tangent.



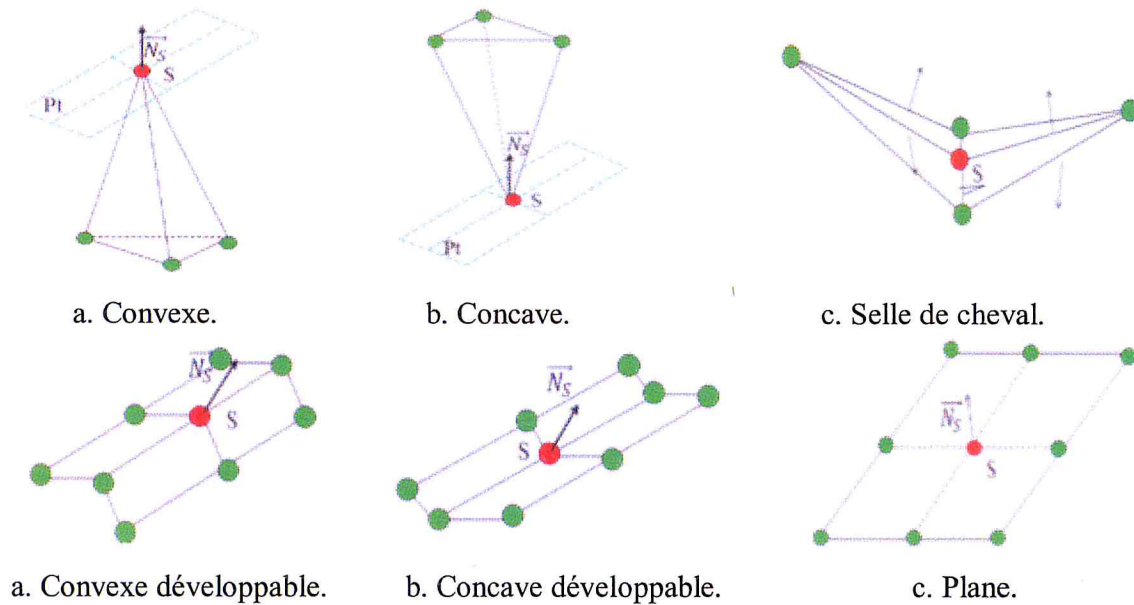


Figure I.7. Forme locale d'un point.

### 3.3. Structure d'un fichier STL [2] :

Le fichier STL existe sous deux formats à savoir un format ASCII et un format binaire.

- **Format ASCII** : il est spécifié comme un fichier ASCII (caractère imprimable). Il est plus descriptif et lisible mais gros de taille (Figure I.8.a). Le fichier ASCII commence par une ligne précédée par le mot réservé « **Solid** ». Par la suite, pour chaque triangle, sont définis le vecteur et les coordonnées des sommets du triangle. Il se termine par « **endsolid** ».

- **Format STL binaire** : il est spécifié comme un fichier binaire plus commun, moins de taille mais non lisible et trop condensé (Figure I.8.b). Son entête se compose de 84 octets, les premiers 80 octets sont utilisés pour obtenir des informations sur le fichier et les 4 derniers octets représentent le nombre de facettes triangulaires. 50 octets sont utilisés pour représenter les composantes x, y et z de la normale pour chaque facette. 4 octets sont utilisés pour chaque coordonnée x, y et z de chaque sommet du triangle (48 octets par facette). Les deux derniers octets ne sont pas utilisés.

**solid** *name*

```

facet normal  $n_i$   $n_j$   $n_k$ 
  outer loop
    vertex  $v_1$   $v_1$   $v_1$ 
    vertex  $v_2$   $v_2$   $v_2$ 
    vertex  $v_3$   $v_3$   $v_3$ 
  endloop
endfacet

```

**endsolid** *name*

a. Syntaxe d'un fichier STL ASCII

Bytes	Data type	Description
80	ASCII	Header. No data significance.
4	unsigned long integer	Number of facets in file
4	float	$i$ for normal
4	float	$j$
4	float	$k$
4	float	$x$ for vertex 1
4	float	$y$
4	float	$z$
4	float	$x$ for vertex 2
4	float	$y$
4	float	$z$
4	float	$x$ for vertex 3
4	float	$y$
4	float	$z$
2	unsigned integer	Attribute byte count.

b. Syntaxe d'un fichier STL binaire.

Figure I.8. Formats de fichier STL.

#### 4. Processus d'usinage [14] :

La conception et la fabrication constituent deux fonctions essentielles du processus de réalisation d'un produit qui est réalisé à l'aide de logiciels de CFAO. Ce processus doit permettre de garantir la fidélité entre la pièce produite et les spécifications fonctionnelles exprimant l'idée initiale de la conception. Avec des demandes de plus en plus exigeantes en termes de temps, de quantité et de qualité pour la réalisation d'un produit, les industriels sont en recherche permanente d'innovation en matière d'usinage. Le processus de production d'une pièce passe par trois étapes (Figure I.9) :

- **Conception du modèle de la pièce :** la pièce est conçue sur ordinateur grâce aux outils de CAO appropriés en fonction des besoins de l'utilisateur final.
- **Génération des trajectoires d'usinage :** selon les outils utilisés, un ensemble de trajectoires sur toute la pièce est défini. Ces trajectoires indiquent les chemins suivis par l'outil pour usiner la pièce.
- **Usinage de la pièce :** l'usinage de la pièce effectif est alors réalisé en traduisant les trajectoires générées en un ensemble d'instructions exécutables par la commande numérique de la machine-outil. Ces instructions appelées aussi « G-Code ». Elles définissent les positions et les orientations des outils susceptibles de balayer toute la surface à usiner sans endommager ni la machine, ni les outils ni la pièce elle-même.



Figure I.9. Processus d'usinage.

## 5. Usinage des pièces complexes [15,16] :

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces par enlèvement de matière (copeaux). Il consiste à enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions prescrites dans les dessins techniques à l'aide d'une machine-outil. Cette technique permet l'obtention de pièces d'une grande précision. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil à savoir : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance) (Figure I.10). Les procédés d'usinage les plus fréquents sont le tournage et le fraisage. Le premier procédé génère des pièces de révolution et le second génère des pièces prismatiques. Dans ce travail, le fraisage est pris en considération. Dans ce procédé, généralement, l'outil est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe) tandis que la pièce est animée d'un mouvement de translation (mouvement d'avance) (Figure I.10).

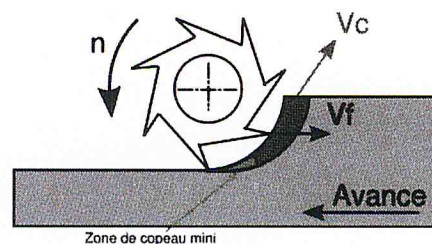


Figure I.10. Vitesse d'avance et vitesse de coupe.

Les pièces avec des surfaces de formes libres « surfaces gauches » sont usinées par fraisage en 03-axes, 04-axes et 05-axes en fonction de leurs complexités géométriques.

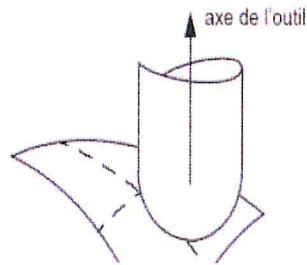
### 5.1. Usinage 03-axes :

L'usinage en 03-axes est employé dans la fabrication de pièces mécaniques. Dans cette technique, trois translations simultanées suivant les axes X, Y et Z de la machine sont possibles (Figure I.11.a). Lors de la finition en 03-axes, il existe une unique position de l'outil

tangente à la surface en une position donnée (Figure I.11.b). Cette technique est adaptée aux pièces sans parties en contre-dépouille.



a. Fraiseuse 03-axes.

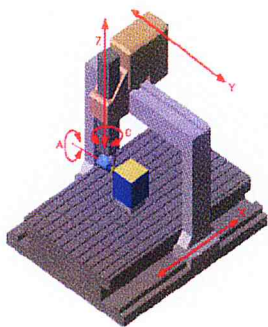


b. Orientation de l'outil en 03-axes.

**Figure I.11.** Usinage 03-axes.

## 5.2. Usinage 05-axes :

L'usinage en 05-axes fait appel à des machines-outils permettant à l'outil de se déplacer dans cinq différentes directions correspondant aux 03 axes linéaires de translation, auxquels s'ajoutent deux axes rotationnels (Figure I.12.a). Un tel parcours permet d'approcher la pièce dans toutes les directions et de la traiter sur cinq côtés en une seule opération (Figure I.12.b). Contrairement à l'usinage 03-axes, cette technique est parfaitement adaptée aux pièces complexes avec des parties en contre-dépouille et aux matériaux durs avec lesquels elle garantit un niveau de précision élevé grâce à l'utilisation d'outils d'usinage plus courts. La vitesse d'usinage est également plus grande, tandis que les vibrations d'outils sont réduites. L'usinage 03-axes autorise des opérations plus simples pour les dispositifs, alors que l'usinage 05-axes nécessite de plus longs préparatifs mais moins de manipulations de la matière.



a. Fraiseuse 05-axes.



b. Orientation de l'outil en 05-axes.

**Figure I.12.** Usinage 05-axes.

### 5.3. Phases d'usinage [17] :

Afin de transformer une pièce brute de son état initial à son état final (pièce finie), il faut passer par trois phases qui sont (Figure I.13) :

- **Ébauchage** : pour l'enlèvement d'un maximum de matière en un minimum de temps.
- **Demi-finition** : pour supprimer les irrégularités de la surface laissées après la phase d'ébauche, avoir une surépaisseur uniforme et une forme plus de la forme désirée.
- **Finition** : pour enlever la fine couche de matière afin d'obtenir la forme finale de la pièce conforme aux spécifications techniques et géométriques exigées.

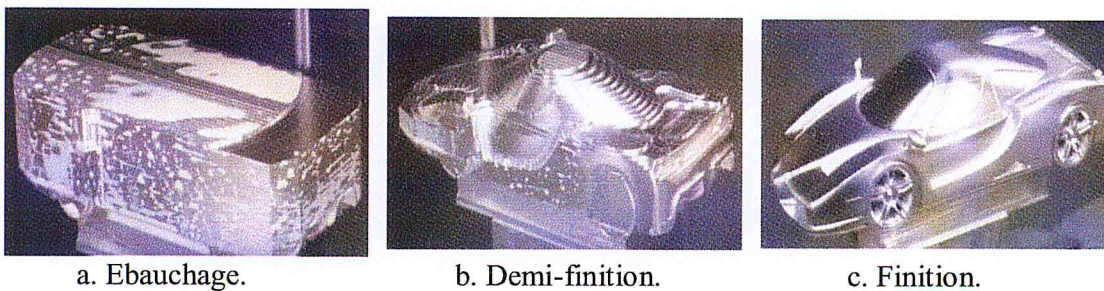


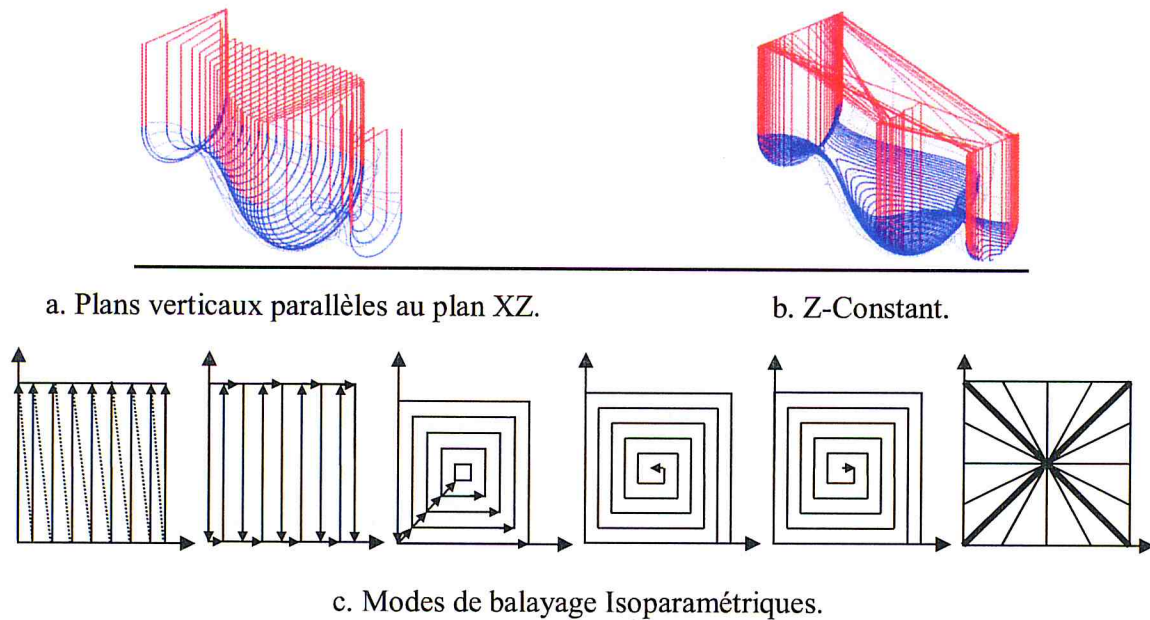
Figure I.13. Phases d'usinage.

### 5.4. Stratégies d'usinage en finition [18] :

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 permettent de calculer l'ensemble des trajectoires d'outils lors de l'usinage sur machine-outil à commande numérique. Comme il n'y a pas une forme d'outil permettant de générer des surfaces gauches directement, ces dernières sont usinées par balayage d'un outil selon une direction privilégiée caractérisant le mode de balayage. Le choix d'un mode est basé sur un critère d'optimisation du temps d'usinage ou de la qualité des surfaces à usiner. Les stratégies les plus utilisées pour la finition des surfaces gauches sont les suivantes :

- **Plans parallèles** : elle s'appuie sur des trajectoires d'outil résultantes de l'intersection entre la surface à usiner et un ensemble de plans verticaux parallèles (Figure I.14.a).
- **Z-Constant** : elle s'appuie sur des trajectoires d'outil résultantes de l'intersection entre la surface à usiner et un ensemble de plans horizontaux parallèles (Figure I.14.b).

- **Isoparamétrique** : elle s'appuie sur le plan paramétrique de la surface pour générer le trajet d'outil (Figure I.14.c) avec plusieurs modes.



**Figure I.14.** Stratégies de finition.

## 6. Machine-outil à commande numérique (MONC) [19] :

Une machine-outil est une machine destinée à exécuter un usinage avec une précision et une puissance adaptées. Elle maintient un outil fixe, mobile, ou tournant et lui imprime un mouvement afin d'usiner ou de déformer une pièce fixée sur une table fixe ou mobile. Une machine-outil à commande numérique « MOCN » désigne la famille des machines-outils dotées d'une commande numérique « CN ». La « CN » correspondant aux matériels et logiciels permettant de donner les instructions de mouvements à tous les organes d'une machine-outil. Dans le monde de l'usinage, deux grandes familles de machines-outils sont utilisées : machines de fraisage et machines de tournage. Ces « MOCN » sont, généralement, équipées de magasins d'outils où le changement d'outils est automatique.

### 6.1. Définition des axes pour une fraiseuse numérique à 05-axes [20] :

Une fraiseuse à commande numérique à 05-axes possède trois axes de translation et deux axes de rotation. Les axes de translation sont perpendiculaires aux directions X, Y et Z du système de coordonnées de la machine et les axes de rotation sont perpendiculaires entre eux. Suivant les indications de la Figure I.15 et par convention, l'axe de rotation autour de l'axe des abscisses est appelé axe A, autour de l'axe des ordonnées est appelé axe B et autour de

l'axe Z est appelé axe C. Les fraiseuses 05-axes peuvent être classifiées dans des groupes basés sur les éléments de rotation : la table ou bien le porte outil.

Une fraiseuse 05-axes comporte toujours trois (03) axes linéaires (X, Y et Z) et deux (02) axes rotatifs à choisir parmi les axes (A, B et C). Les machines se différencient alors par la position des axes rotatifs. Les trois configurations possibles sont :

- Axes sur la tête : c'est la tête qui comporte les axes B et C. Les axes X, Y et Z étant sur la table ou sur la tête.
- Axes sur table.
- Axes répartis sur tête et sur table.

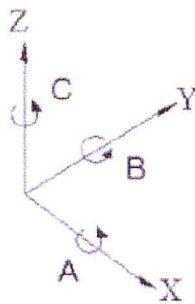


Figure I.15. Axes d'une fraiseuse à 05-axes.

## 7. Outil de coupe en fraisage [21] :

L'outil de coupe (fraise) est un organe monté sur la tête de la machine-outil dont l'action se produit lors du contact avec la pièce pour enlever la matière (copeaux) pour produire une surface conforme aux exigences. Il est défini par des critères géométriques et technologiques. Le premier critère caractérise la forme et les dimensions de l'outil tandis que le second définit les conditions de coupe ainsi que les modes d'attachement.

### 7.1. Différentes parties de l'outil :

Les parties principales d'un outil de coupe sont :

- **Corps** : Il assure la liaison de l'outil avec le porte-outil. Sa forme peut être prismatique ou cylindrique.
- **Queue** : pour les fraises, la « queue » est l'élément qui permet la liaison de l'outil avec le porte-outil. Sa forme peut être cylindrique ou conique.
- **Partie active** : c'est la partie qui agit directement sur la pièce pour provoquer un enlèvement de métal. Elle est caractérisée par sa forme.

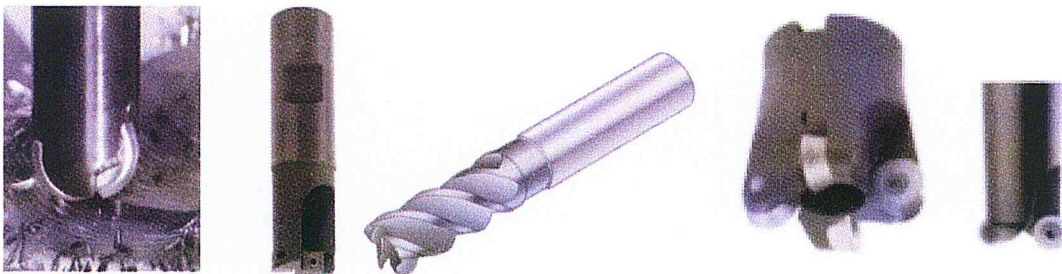
## 7.2. Types d'outils de coupe [22] :

Les outils de coupe en fraisage sont définis par une enveloppe de types cylindrique, hémisphérique ou torique choisies en fonction du processus d'usinage de l'entité.

➤ **Fraise hémisphérique** : l'outil hémisphérique est l'outil le plus utilisé vu sa simplicité et sa géométrie qui le rendent plus facile à positionner pour l'usinage (Figure I.16.a). Les fraises hémisphériques conviennent pour la finition de toutes les matières. Elles permettent ainsi de prendre des profondeurs de passes plus importantes car leur forme hémisphérique permet de transmettre à la broche un pourcentage plus important de l'effort de coupe.

➤ **Fraise cylindrique** : les fraises cylindriques sont utilisées pour plusieurs usages. Avec leurs faces planes, elles conviennent aux travaux d'ébauche et de demi-finition (Figure I.16.b). Leur avantage majeur réside dans leurs parties actives, le cylindre situé sur un rayon éloigné de l'axe de l'outil dont la vitesse est non nulle.

➤ **Fraise torique** : les fraises toriques constituent un bon compromis entre les fraises cylindriques et les fraises hémisphériques (Figure I.16.c). Elles sont largement utilisées pour les travaux de finition surtout des surfaces gauches. L'avantage majeur de cette fraise est sa partie active, le tore, situé sur un rayon éloigné de l'axe de l'outil dont la vitesse est non nulle.



a. Fraise hémisphérique.

b. Fraise cylindrique.

c. Fraise torique.

**Figure I.16.** Formes des fraises de finition.

## 7.3. Positionnement et orientation de l'outil en 05-axes [23] :

Lors de la finition des surfaces gauches, l'outil utilisé, quelles que soient sa forme et ses dimensions, doit être constamment tangent à la surface à usiner en chaque point de contact. Le positionnement d'un outil en finition par rapport à la surface en un point de contact donné dépend du vecteur normal unitaire au point de contact, de l'orientation de l'axe de l'outil et de la forme et des dimensions de l'outil.

Les différentes positions d'un outil hémisphérique sont données par (Figure I.17.a) :



$$\begin{cases} \vec{OC}_E = \vec{OC}_C + r\vec{n} \\ \vec{OC}_L = \vec{OC}_E - r\vec{u} = \vec{OC}_C + r\vec{n} - r\vec{u} \end{cases}$$

Les différentes positions d'un outil cylindrique sont données par (Figure I.17.b) :

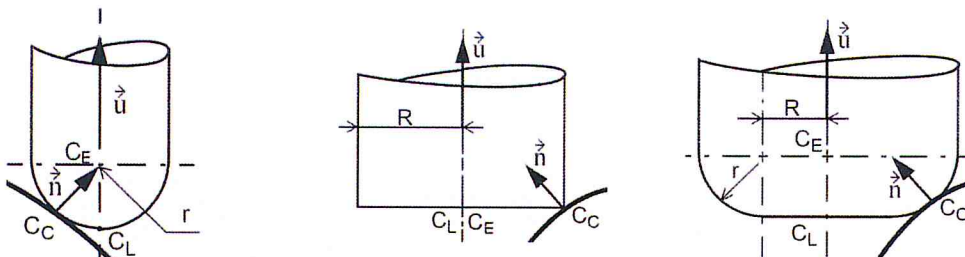
$$\begin{cases} \vec{OC}_E = \vec{OC}_C + R \cdot \frac{\vec{k} \wedge \vec{u}}{\|\vec{k} \wedge \vec{u}\|} \\ \vec{OC}_L = \vec{OC}_E - R \cdot \frac{\vec{k} \wedge \vec{u}}{\|\vec{k} \wedge \vec{u}\|} \end{cases} \quad \text{avec :} \quad \vec{k} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{n}}{\|\vec{u} \wedge \vec{n}\|}$$

Les différentes positions d'un outil torique sont données par (Figure I.17.c) :

$$\begin{cases} \vec{OC}_E = \vec{OC}_C + r\vec{n} + R \cdot \frac{\vec{k} \wedge \vec{u}}{\|\vec{k} \wedge \vec{u}\|} \\ \vec{OC}_L = \vec{OC}_E - r\vec{u} = \vec{OC}_C + r\vec{n} - r\vec{u} + R \cdot \frac{\vec{k} \wedge \vec{u}}{\|\vec{k} \wedge \vec{u}\|} \end{cases} \quad \text{avec :} \quad \vec{k} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{n}}{\|\vec{u} \wedge \vec{n}\|}$$

Avec  $C_C$  le point de contact entre l'outil et la surface,  $C_E$  le point centre de l'outil,  $C_L$  le point extrémité de l'outil,  $\vec{n}$  le vecteur normal unitaire à la surface au point de contact,  $\vec{u}$  orientation de l'axe de l'outil,  $r$  le rayon de l'outil hémisphérique et le petit rayon de l'outil torique,  $R$  le grand rayon de l'outil torique et le rayon de l'outil cylindrique.

Les équations précédentes permettent de calculer soit les coordonnées du centre de l'outil à partir du point de contact, soit le point de contact à partir des coordonnées du centre.



a. Outil hémisphérique.

b. Outil cylindrique.

c. Outil torique.

**Figure I.17.** Positionnement des différentes formes d'outils.

Une fois la position de l'extrémité de l'outil déterminée, il reste à définir l'orientation de son axe. A chaque position de l'outil est associé un repère local dont l'origine est le point de contact et les deux directions principales sont la normale à la surface et la direction d'avance  $f$ . Dans un premier temps, l'outil est orienté, pour que son axe soit vertical. Par la suite, deux rotations sont appliquées pour orienter l'axe dans la direction appropriée. Les rotations peuvent être différentes. Aucune règle n'est imposée et il est possible de proposer d'autres modes d'orientation de l'axe de l'outil. Parmi ces modes :

- **Premier mode :** les deux rotations sont vers le segment et autour du vecteur normal à la surface au point de contact (Figure I.18).
- **Deuxième mode :** les deux rotations sont vers le segment et autour du segment. Généralement, c'est ce mode qui est le plus utilisé en raison de sa simplicité.

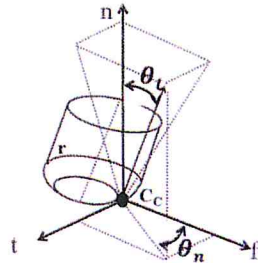


Figure I.18. Orientation de l'outil.

#### 7.4. Problèmes d'interférences [2] :

L'usinage en 05-axes est puissant et peut résoudre de nombreux problèmes rencontrés en usinage 03-axes. Malgré cet avantage, ses deux rotations supplémentaires génèrent un grand risque de problèmes d'interférences et de collisions. Ces problèmes peuvent apparaître au niveau des positionnements d'outils calculés, lors de l'interpolation de la trajectoire ou encore lors des mouvements hors matière. L'orientation efficace de l'axe de l'outil pour un point de contact outil pièce donné, représente le problème majeur le plus rencontré en usinage 05-axes. Le positionnement et le parcours de l'outil sur la surface ne peuvent pas être dissociés ; ils font l'objet d'une optimisation qui consiste le plus souvent à maximiser la largeur coupée avec comme contrainte la non interférence. Les interférences sont en général classées selon trois types : interférences locales, interférences vers l'arrière et interférences globales ou collisions.

- **Interférences locales :** elles traduisent un enlèvement de matière excessif par la partie active de l'outil sur la surface à usiner (Figure I.19.a).
- **Interférences vers l'arrière :** elles sont des pénétrations intempestives de l'arrière de l'outil dans la surface à usiner (Figure I.19.b).
- **Collisions :** elles représentent de manière générale des collisions entre l'ensemble {corps d'outil, porte outil, broche} et l'ensemble {pièce, porte pièce, éléments de structure...} (Figure I.19.c).

Ces trois types d'interférences ont un impact différent sur la pièce usinée. Ils peuvent être source de génération de défauts géométriques.

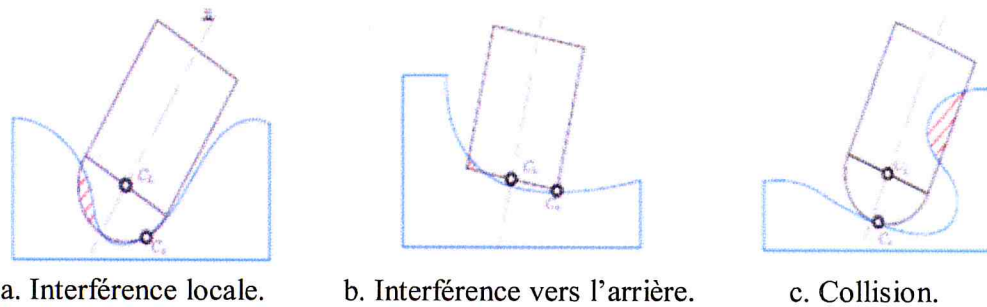


Figure I.19 : Types d'interférences.

### 7.5. Evitement des interférences et des collisions :

Pour un point de contact  $C_C$  le long du trajet d'outil, les paramètres d'orientation de l'outil choisis ne garantissent pas un usinage sans interférences et sans collisions. La gestion des interférences est un problème difficile à résoudre en usinage à 05-axes. Parmi les méthodes de détection des interférences existantes, il y a celles qui sont basées sur les caractéristiques locales de la surface à usiner telles que la courbure, et celles qui optent pour une représentation approchée par des points ou des modèles polyédriques. De plus, la plupart de ces méthodes tentent d'optimiser la position de l'outil hors interférences en termes de temps d'usinage. L'objectif consiste alors à positionner l'outil hors interférence afin d'obtenir un enlèvement de matière maximum. Pour corriger les interférences et les collisions, deux solutions sont utilisées :

- Changement d'outil ou bien l'orientation de l'outil.
- Pour corriger les collisions, il suffit juste de réorienter l'outil, quelle que soit sa géométrie.

La maîtrise des interférences et des collisions lors de la génération de trajectoires d'outils est une condition nécessaire pour garantir la conformité de la pièce en termes de géométrie.

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les différentes méthodes de modélisation des surfaces gauches en mettant en avant le modèle discret plus particulièrement le modèle STL support de notre étude. Une présentation du processus d'usinage des surfaces gauches sur des fraiseuses numériques à 05-axes et les différentes stratégies d'usinages. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des machines-outils à commande numérique et les différents outils d'usinages. La présentation de la conception de notre application fera l'objet du prochain chapitre.

# CHAPITRE II

---

## ETUDE CONCEPTUELLE

Introduction.

1. Démarche proposée.

2. Modélisation de l'application avec UML.

Conclusion.

## Introduction :

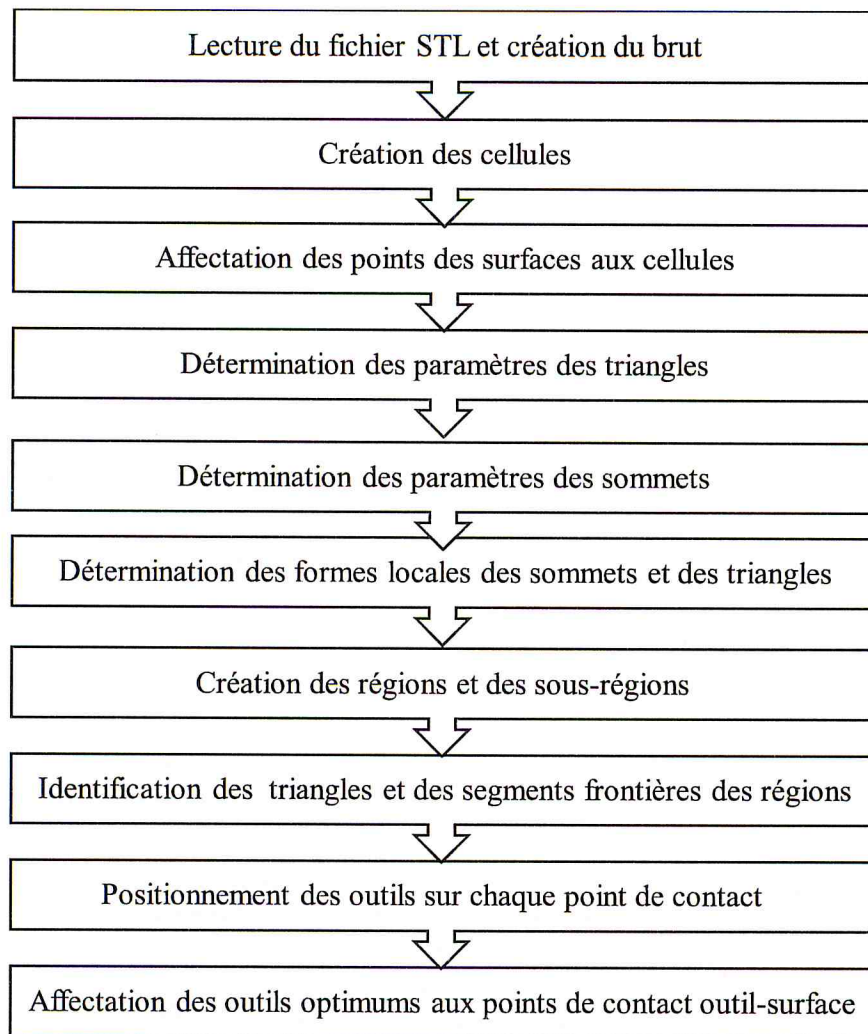
L'usinage par enlèvement de matière est encore à ce jour le procédé de production le plus répandu dans l'industrie mécanique de fabrication des surfaces gauches (moules, automobile, aéronautique, ...etc.). Ces formes géométriques complexes sont usinées sur des fraiseuses à commande numérique de 03-axes à 05-axes. Dans la pratique industrielle, un compromis est toujours recherché entre la qualité des pièces usinées et les temps d'usinage pour réduire les coûts. Afin de minimiser les temps d'usinage, nombreuses approches sont développées parmi lesquelles la sélection des outils optimums. Dans cette démarche, ce travail propose une approche pour la combinaison des trois formes d'outils à savoir cylindriques, hémisphériques et toriques pour la finition des surfaces gauches sur des fraiseuses numériques à 05-axes. Cet objectif est réalisé en deux étapes :

➤ **Première étape :** repose sur des concepts géométriques pour la subdivision de la surface en différentes régions (concave, convexe, selle de cheval, concave développable, convexe développable et plane).

➤ **Deuxième étape :** repose sur la recherche des outils optimums (formes et dimensions) permettant l'évitement des interférences et des collisions. Par la suite, déterminer la combinaison optimale des trois formes d'outils (cylindriques, toriques et hémisphériques) pour chaque sous-région tout en évitant les interférences et les collisions.

### 1. Démarche proposée :

La démarche proposée pour la détermination de la combinaison optimale des trois formes d'outils « cylindriques, hémisphériques et toriques » lors de la finition des surfaces gauches définies par leurs modèles STL sur des fraiseuses numériques à 05-axes est donnée par l'organigramme général suivant.



**Figure II.1.** Organigramme général de la démarche proposée.

### 1.1. Lecture du fichier STL et création du brut :

La lecture d'un fichier STL a pour but de récupérer les informations issues du modèle STL des surfaces à usiner. Cette lecture requiert impérativement la vérification de l'extension et de la syntaxe du fichier (Figure II.2). Une fois que le fichier est validé, le brut minimum doit être calculé. La création du brut permet d'englober tous les points du modèle STL 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 limites du modèle STL (Figure II.3). Par la suite, les dimensions minimales du brut sont calculées à partir des équations suivantes :

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

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

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

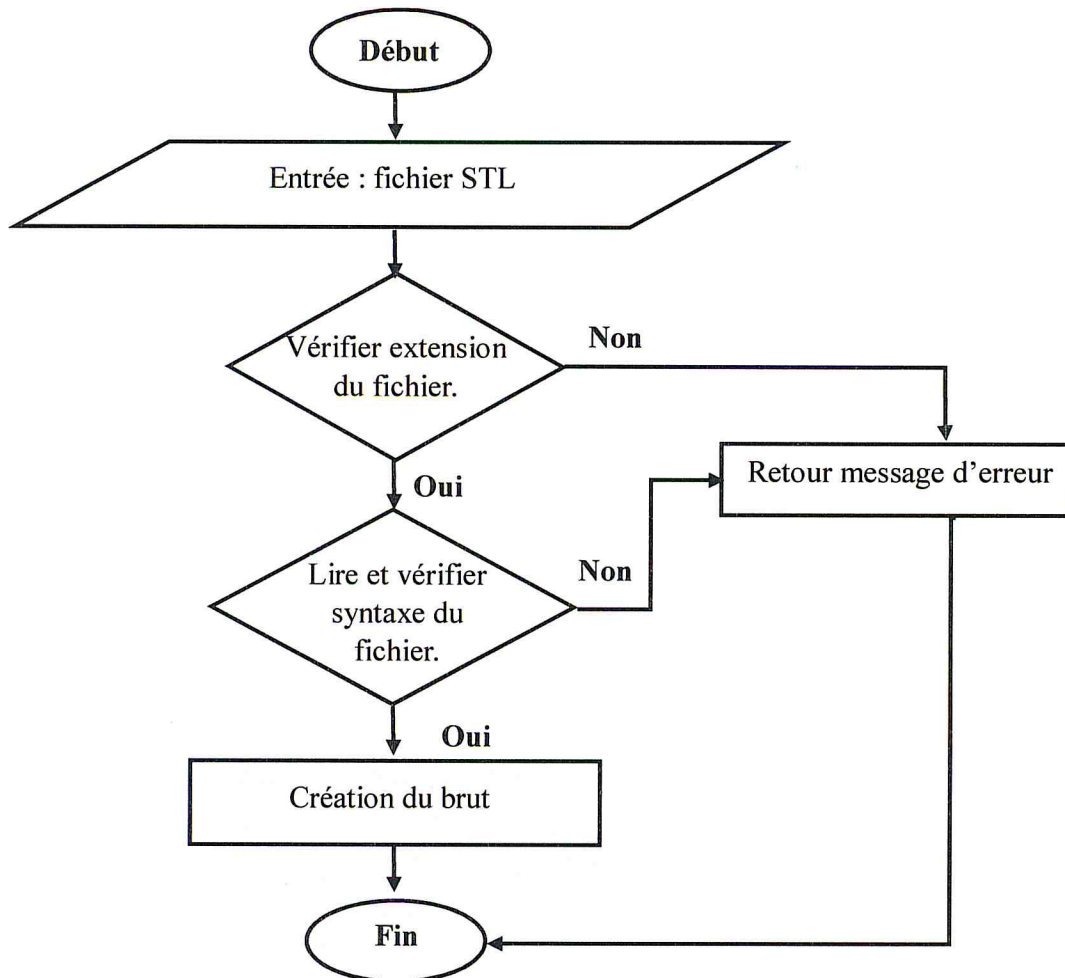


Figure II.2. Lecture du fichier STL et création du brut.

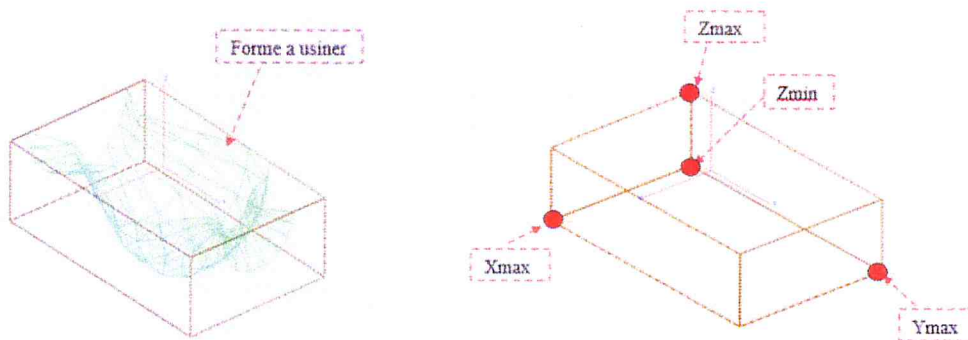


Figure II.3. Points limites et brut du modèle STL.

Après la création du brut, le fichier est restructuré afin d'accélérer la localisation des points et la vérification de leurs redondances dans le but de minimiser les temps de calcul. Pour atteindre cet objectif, une solution en deux étapes est proposée :

- **Première étape** : création des cellules.
- **Deuxième étape** : affectation des points aux cellules.

## 1.2. Création des cellules :

La création des cellules consiste à subdiviser le brut en des blocs parallélépipédiques de même taille (Figure II.4). Cette subdivision nécessite la spécification du nombre de cellules  $N_x$ ,  $N_y$  et  $N_z$  suivant les trois axes X, Y et Z. A partir de ces données, les pas et les limites de chaque cellule sont calculés.

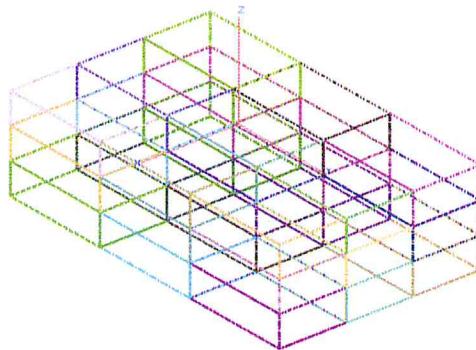
- Calcul des pas suivant les axes X, Y et Z : ils sont donnés par :

$$\text{Pas}_x = \text{longueur du brut} / N_x$$

$$\text{Pas}_y = \text{largeur du brut} / N_y$$

$$\text{Pas}_z = \text{hauteur du brut} / N_z$$

- Calcul des limites de chaque cellule : les calculs sont résumés dans le Tableau 1.



**Figure II.4.** Création des cellules.

**Tableau 1.** Limites d'une cellule.

	<b>Extrémités minimales</b>	<b>Extrémités maximales</b>
Pour i de 0 à $N_x$	$X_{\min} = \text{Brut\_}X_{\min} + i * \text{Pas}_x$	$X_{\max} = X_{\min} + \text{Pas}_x$
Pour j de 0 à $N_y$	$Y_{\min} = \text{Brut\_}Y_{\min} + j * \text{Pas}_y$	$Y_{\max} = Y_{\min} + \text{Pas}_y$
Pour k de 0 à $N_z$	$Z_{\min} = \text{Brut\_}Z_{\min} + k * \text{Pas}_z$	$Z_{\max} = Z_{\min} + \text{Pas}_z$

## 1.3. Affectation des points aux cellules :

Après la création des cellules, chaque sommet des triangles du modèle STL est affecté à la cellule correspondante. L'affectation des sommets aux cellules consiste à déterminer les indices de la cellule correspondante (Figure II.5). Ceux-ci sont calculés en se basant sur les coordonnées (x, y, z) du point considéré et les coordonnées minimales du brut. Les indices de cette cellule sont calculés par :

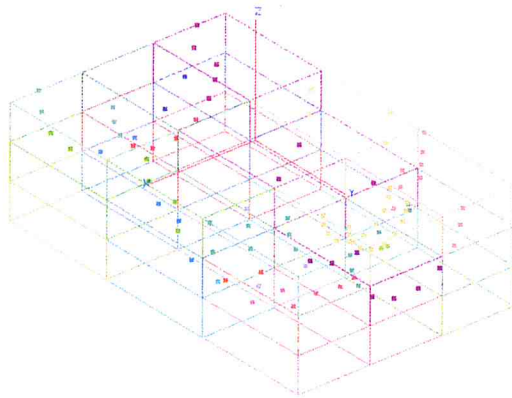


$$I = \frac{x - X_{\min\_brut}}{\text{Pas}_x}$$

$$J = \frac{y - Y_{\min\_brut}}{\text{Pas}_y}$$

$$K = \frac{z - Z_{\min\_brut}}{\text{Pas}_z}$$

Pour éviter la duplication des sommets dans la même cellule, une opération de vérification est lancée avant l'affectation des points dans la cellule. Par la suite, les sommets et les triangles seront stockés dans deux vecteurs différents.



**Figure II.5.** Affectation des points aux cellules.

#### 1.4. Détermination des paramètres des triangles :

Afin de déterminer la normale de chaque sommet et la forme locale du triangle, les différents paramètres des triangles doivent être calculés.

➤ **Aire d'un triangle :** le premier paramètre à calculer c'est l'aire du triangle. Soit un triangle T défini par ses trois sommets  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $S_2(x_2, y_2, z_2)$  et  $S_3(x_3, y_3, z_3)$  et les longueurs de ses côtés. Les longueurs A, B, C des segments  $S_1S_2$ ,  $S_2S_3$  et  $S_3S_1$  respectivement et le demi-périmètre sont calculés par (Figure II.6) :

$$A = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

$$B = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}$$

$$C = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2}$$

$$P = \frac{A + B + C}{2}$$

A partir de ces paramètres, l'aire du triangle est donnée par la formule d'Héron :

$$\text{aire} = \sqrt{P \cdot (P - A) \cdot (P - B) \cdot (P - C)}$$

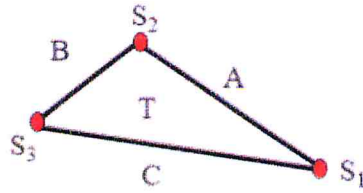


Figure II.6. Paramètres d'un triangle.

➤ **Angles aux sommets d'un triangle** : le deuxième paramètre ce sont les angles aux sommets du triangle (Figure II.7). Pour les calculer, la loi des sinus est utilisée:

$$\frac{A}{\sin(\widehat{S}_3)} = \frac{B}{\sin(\widehat{S}_1)} = \frac{C}{\sin(\widehat{S}_2)}$$

En même temps, application du théorème d'Al-Kashi (loi des cosinus) :

$$C^2 = A^2 + B^2 - 2 \cdot A \cdot B \cos(\widehat{S}_2)$$

A partir de ces deux lois, les angles aux sommets des triangles sont calculés par :

❖ **Angle  $\widehat{S}_2$**  : est calculée comme suit :

$$\cos(\widehat{S}_2) = \frac{C^2 - A^2 - B^2}{(-2) \cdot A \cdot B} \quad \widehat{S}_2 = \arccos(\widehat{S}_2)$$

❖ **Angle  $\widehat{S}_1$**  : connaissant l'angle de  $S_2$ , l'angle  $S_1$  est déterminé par :

$$\sin(\widehat{S}_1) = \frac{B \cdot \sin(\widehat{S}_2)}{C} \quad \widehat{S}_1 = \arcsin(\widehat{S}_1)$$

❖ **Angle  $\widehat{S}_3$**  : de la même façon, l'angle  $S_3$  est déterminé par :

$$\sin(\widehat{S}_3) = \frac{A \cdot \sin(\widehat{S}_2)}{C} \quad \widehat{S}_3 = \arcsin(\widehat{S}_3)$$

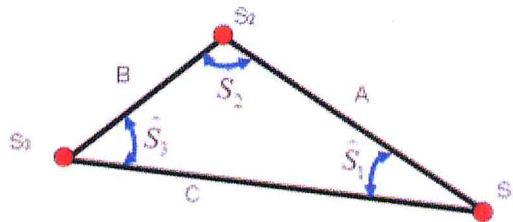


Figure II.7. Angles d'un triangle.

➤ **Voisins d'un triangle** : le dernier paramètre concerne les voisins d'un triangle. Pour un triangle défini par ses trois sommets  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$ , les triangles qui partagent au moins deux sommets avec ce triangle cible représentent ces voisins. Pour déterminer les triangles voisins, la convention suivante est utilisée (Figure II.8) :

- Si les sommets  $S_1$  et  $S_2$  (côté A) du triangle  $T_1$  sont communs avec deux autres sommets du triangle  $T_i$ , le triangle  $T_i$  est le premier voisin noté  $V_1$ .

- Si les sommets  $S_2$  et  $S_3$  (côté B) du triangle  $T_1$  sont communs avec deux autres sommets du triangle  $T_i$ , le triangle  $T_i$  est le deuxième voisin noté  $V_2$ .
- Si les sommets  $S_1$  et  $S_3$  (côté C) du triangle  $T_1$  sont communs avec deux autres sommets du triangle  $T_i$ , le triangle  $T_i$  est le troisième voisin noté  $V_3$ .

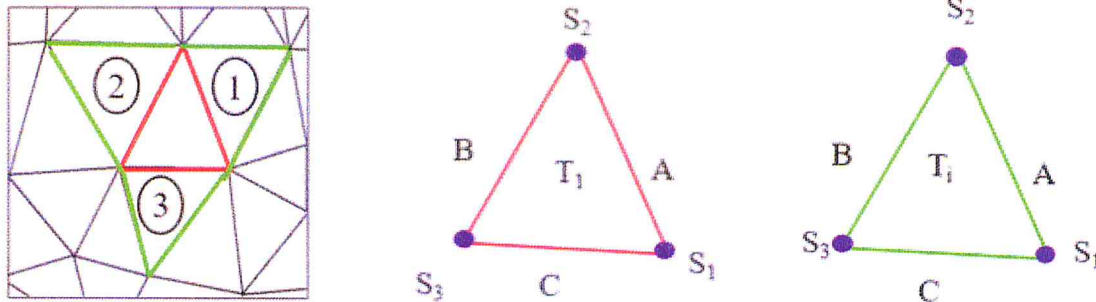


Figure II.8. Voisins d'un triangle.

### 1.5. Détermination des paramètres des sommets :

Afin de déterminer la forme locale d'un sommet, les différents paramètres suivants doivent être calculés (Figure II.9) :

- **Triangles communs** : représentent les triangles partageant ce sommet.
- **Voisins d'un sommet** : représentent les sommets qui l'entourent, c'est-à-dire les sommets des triangles qui partagent ce sommet.

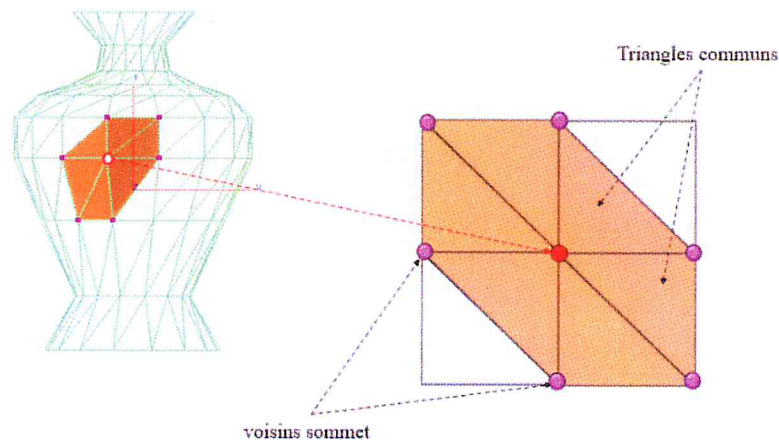


Figure II.9. Triangles communs et voisins du sommet.

### 1.6. Détermination des formes locales :

#### 1.6.1. Forme locale d'un sommet :

La forme locale d'un sommet est déterminée à partir de considérations géométriques en se basant sur ses points voisins et sur le plan tangent. Pour se faire, l'équation du plan tangent doit être calculée. Celle-ci est donnée par :

$$A.X + B.Y + C.Z + D = 0$$

Pour un sommet de coordonnées  $X_0$ ,  $Y_0$  et  $Z_0$ , et de composantes du vecteur normal  $N_x$ ,  $N_y$  et  $N_z$ , les constantes du plan tangent sont :

$$\begin{cases} A = N_x \\ B = N_y \\ C = N_z \\ D = -(A.X_0 + B.Y_0 + C.Z_0) \end{cases}$$

La détermination de la position des sommets voisins par rapport au plan tangent en un sommet donné est basée sur l'extrémité du vecteur normal en ce point qui est prise comme point de référence. Le calcul suit les étapes suivantes :

- Calculer les coordonnées de l'extrémité du vecteur normal ( $X_0+N_x$ ;  $Y_0+N_y$ ,  $Z_0+N_z$ ).
- Remplacer ces coordonnées dans l'équation du plan tangent et récupérer le signe.
- Pour chaque point voisin :
  - Remplacer ces coordonnées dans l'équation du plan tangent et récupérer le signe.
  - Si les deux signes sont identiques, le point est au-dessus du plan tangent, sinon le point est au-dessous du plan tangent.

Une fois la position des sommets voisins est déterminée, la forme locale du sommet peut être définie : concave, convexe, selle de cheval, concave développable, convexe développable et plane.

### 1.6.2. Forme locale d'un triangle :

La forme locale d'un triangle est déterminée à partir de la forme locale de ses sommets selon les cas suivants :

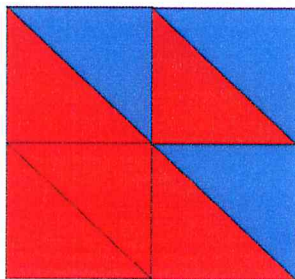
- La forme locale d'un triangle est concave, si au moins deux de ses sommets sont concaves.
- La forme locale d'un triangle est convexe, si au moins deux de ses sommets sont convexes.
- La forme locale d'un triangle est en selle de cheval, si au moins deux de ses sommets sont en selle de cheval.

- La forme locale d'un triangle est concave développable, si au moins deux de ses sommets sont concaves développables.
- La forme locale d'un triangle est convexe développable, si au moins deux de ses sommets sont convexes développables.
- La forme locale d'un triangle est plane, si au moins deux de ses sommets sont planes.

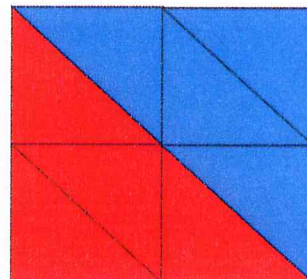
### 1.6.3. Correction de la forme locale :

Le vecteur normal étant estimé et sa précision dépend de la densité des triangles et par conséquent des points. Pour avoir une meilleure estimation de la forme locale, deux types de correction des formes locales sont effectuées (Figure II.10):

- **Premier mode de correction** : le premier mode consiste à corriger la forme locale d'un sommet en considérant les formes locales de ses sommets voisins.
- **Deuxième mode de correction** : le deuxième mode consiste à corriger la forme locale d'un triangle en considérant les formes locales de ses triangles voisins. la correction est établie par les étapes suivantes :
  - Identifier la nature de ses triangles voisins.
  - Calculer le nombre de triangles ayant la même forme locale.
  - Prendre la valeur maximale qui correspond au plus grand nombre de triangles ayant la même forme locale.



a. Triangle avant correction.



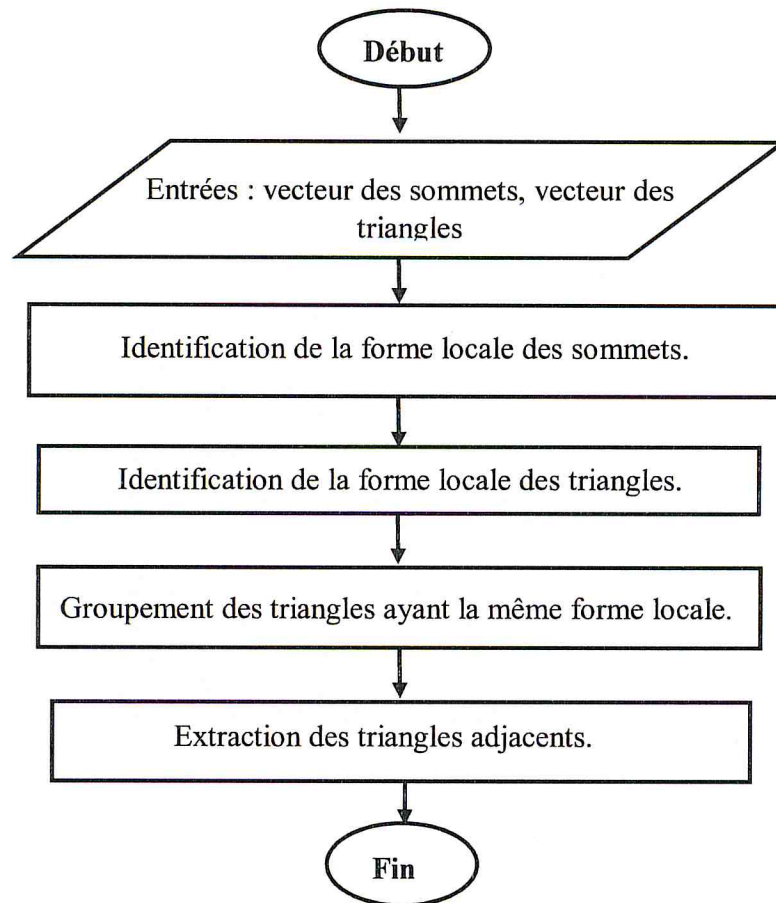
b. Triangle après correction.

**Figure II.10.** Correction de la forme locale d'un triangle.

### 1.7. Création des régions et des sous-régions :

Pour déterminer la combinaison optimale des outils permettant d'usiner la totalité de la surface et de minimiser le temps d'usinage, il est important de décomposer la surface en des zones de formes locales différentes (Figure II.11). Ces zones sont appelées régions. Chaque région est définie par l'ensemble des triangles ayant la même forme locale. Ces régions sont

créées en se basant sur les formes locales des triangles. Au maximum six différentes régions peuvent être obtenues. Une fois les régions sont créées, les informations relatives à chaque région (forme de la région, aire totale de la région, nombre de triangles et sommets composants chaque région et limites de brut) sont calculées. Par la suite, chaque région est subdivisée en différentes sous-régions en se basant sur l'adjacence des triangles. C'est-à-dire le groupement les triangles adjacents ayant la même forme locale.



**Figure II.11.** Création des régions et des sous-régions.

### 1.8. Identification des triangles et des segments frontières :

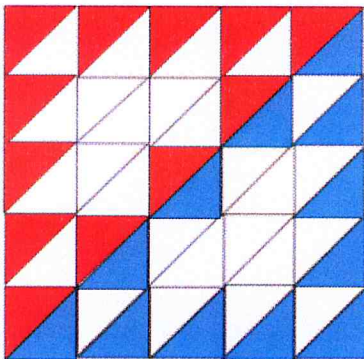
Afin d'identifier les limites de chaque sous-région, les triangles et les segments frontières doivent être déterminés (Figure II.12). Pour identifier les triangles frontières, il faut parcourir tous les triangles et identifier la nature des triangles voisins. Deux cas peuvent se présenter :

- Si le nombre de voisins est inférieur à trois, le triangle cible est un triangle frontière.
- Si le nombre de triangles voisins est égal à trois et la forme locale d'un des triangles voisins est différente de la forme locale du triangle cible, alors le triangle cible est un triangle frontière.

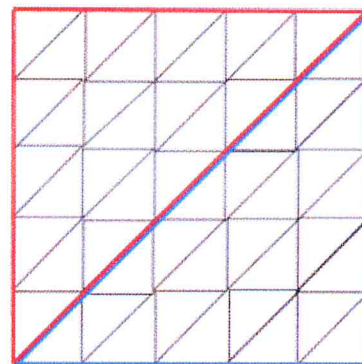
Pour identifier les segments frontières, il faut parcourir la liste des triangles frontières.

Pour un triangle donné :

- Si le voisin  $V_1$  n'existe pas ou sa forme locale est différente de la forme locale du triangle cible, alors le segment défini par les sommets  $S_1$  et  $S_2$  du triangle cible est un segment frontière.
- Si le voisin  $V_2$  n'existe pas ou sa forme locale est différente de la forme locale du triangle cible, alors le segment défini par les sommets  $S_2$  et  $S_3$  du triangle cible est un segment frontière.
- Si le voisin  $V_3$  n'existe pas ou sa forme locale est différente de la forme locale du triangle cible, alors le segment défini par les sommets  $S_1$  et  $S_3$  du triangle cible est un segment frontière.



a. Triangles frontières.



b. Segments frontières.

**Figure II.12.** Identification des triangles et des segments frontières.

### 1.9. Positionnement des outils :

Le calcul de la position (point centre et extrémité) de l'outil par rapport à la surface à usiner repose sur l'ensemble de paramètres suivant :

- La forme géométrique de l'outil (partie active).
- Le point de contact outil-surface (ses coordonnées et sa normale).
- Rayon d'outil et rayon de coupe respectivement  $R$  et  $r$ , et l'axe d'orientation d'outil  $u$ .

Les coordonnées du point centre outil et extrémité pour les trois formes sont données par la formule suivante :

$$OC_E = OC_C + r \cdot \vec{u} + (R - r) \cdot \vec{v}$$

$$OC_L = OC_E - r \cdot \vec{u}$$

Une fois le point extrémité est calculé, l'extrémité maximale d'outil, de la partie active et de porte outil sont calculées comme suit :

$$OC_{LM} = OC_L + L \cdot \vec{u}$$

$$OC_{LA} = OC_L + L_A \cdot \vec{u}$$

$$OC_{LP} = OC_{LM} + L_P \cdot \vec{u}$$

Avec :

$$\vec{v} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{n}}{\|\vec{u} \wedge \vec{n}\|} \wedge \vec{u}$$

L : longueur du corps d'outil.

$L_A$  : longueur de la partie active d'outil.

Par la suite les enveloppes qui englobent les trois parties de l'outil sont déterminées :

- **Enveloppe de la partie corps** : les extrémités minimales et maximales de l'enveloppe de la partie corps sont :

$$\begin{cases} L_{\min} = \min(C_{LM} - R, C_{LA} - R) \\ L_{\max} = \max(C_{LM} + R, C_{LA} + R) \end{cases}$$

- **Enveloppe de la partie active** : les extrémités minimales et maximales de l'enveloppe de la partie active sont :

$$\begin{cases} L_{\min} = \min(C_{LA} - R, C_L - R) \\ L_{\max} = \max(C_{LA} + R, C_L + R) \end{cases}$$

- **Enveloppe partie porte outil** : les limites de l'enveloppe de la partie porte-outil sont données par :

$$\begin{cases} L_{\min} = \min(C_{LP} - D, C_{LM} - D) \\ L_{\max} = \max(C_{LP} + D, C_{LM} + D) \end{cases}$$

Où D représente le diamètre du porte-outil.

### 1.10. Détermination des zones d'interférences et de collisions :

En raison des formes géométriques très complexes des surfaces gauches, des problèmes d'interférences et de collisions peuvent surgir lors du positionnement de l'outil. Le choix des outils optimums pour chaque sous-région passe par le positionnement de l'outil initial en chaque point de contact sans interférences et sans collisions.



La détermination des zones d'interférences et de collisions consiste à identifier, pour chaque point de contact, les points des cellules qui se chevauchent avec l'enveloppe de l'outil. Cette façon permet d'éviter le test avec l'ensemble des points des surfaces. Les Figure II.s 13 et 14 illustrent le processus d'identification des zones d'interférences et de collisions.

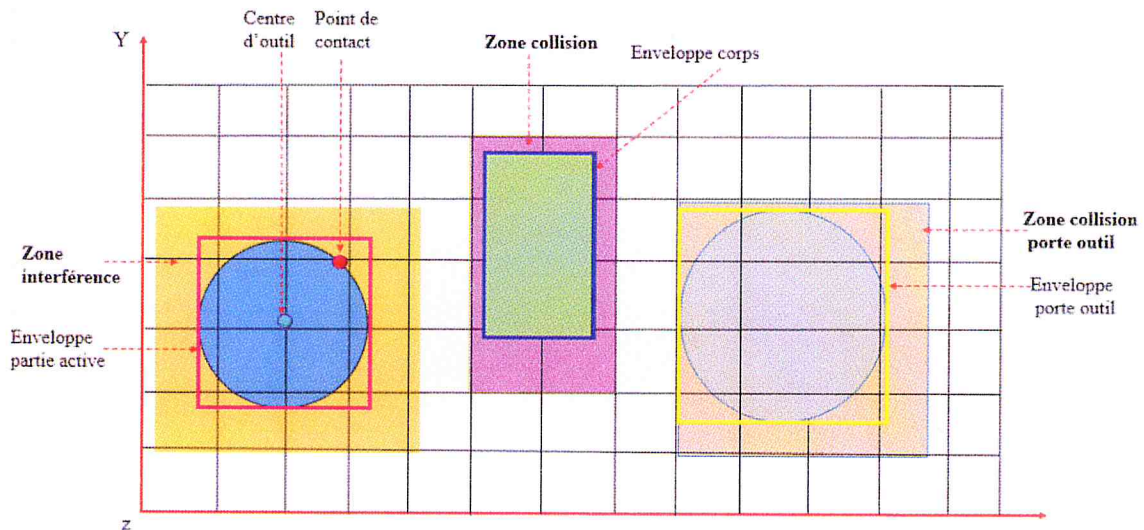


Figure II.13. Zones d'interférences et de collisions.

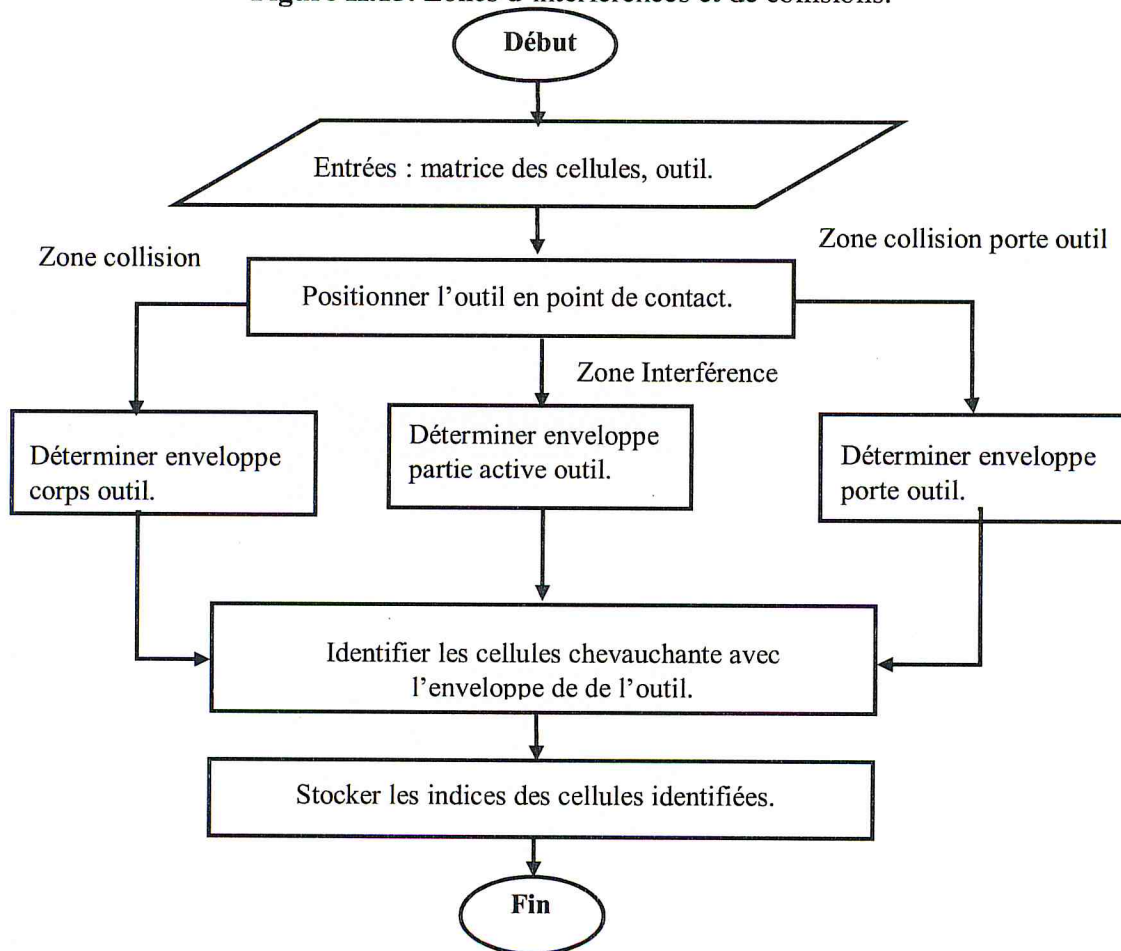


Figure II.14. Détermination des zones d'interférences et de collisions.

### 1.11. Tests d'interférences et de collisions :

Une fois les zones d'interférences et de collision sont déterminées, les points appartenant à ces dernières zones sont utilisés afin de tester l'existence du problème d'interférences et de collisions pour chaque point de contact.

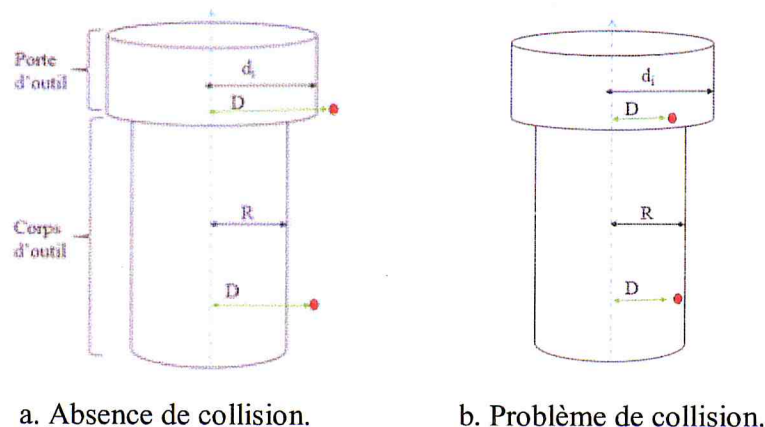
#### 1.11.1. Collision avec le porte-outil :

La collision se produit lorsque des points de la surface à usiner appartiennent au corps de l'outil (partie cylindrique). La collision avec le porte-outil comme son nom l'indique se produit lorsque des points appartiennent au porte-outil (un cylindre défini par un diamètre  $d_i$  et situé au-dessus de la partie corps). Comme les types d'outils (cylindrique, hémisphérique et torique) ont la même forme de la partie « corps-outil » et la partie « porte-outil », alors le traitement de test doit être le même pour les trois outils (Figure II.15). Ce traitement se fait comme suit :

- Pour chaque point P de coordonnées X, Y et Z des zones identifiées :
- Calculer la distance D entre le point et l'axe de l'outil en utilisant l'équation vectorielle suivante :

$$D = \frac{\|\overrightarrow{C_E P} \wedge \vec{u}\|}{\|\vec{u}\|}$$

- Si  $D > R$ , respectivement  $D > d_i$ , alors le point ne crée pas problème de collision.
- Si  $D < R$ , respectivement  $D < d_i$ , alors une possibilité de collision :
  - Vérifier l'appartenance du point au corps et au porte-outil:
    - S'il n'appartient pas, alors il y a une absence de collision.
    - S'il appartient, alors un problème de collision est détecté.

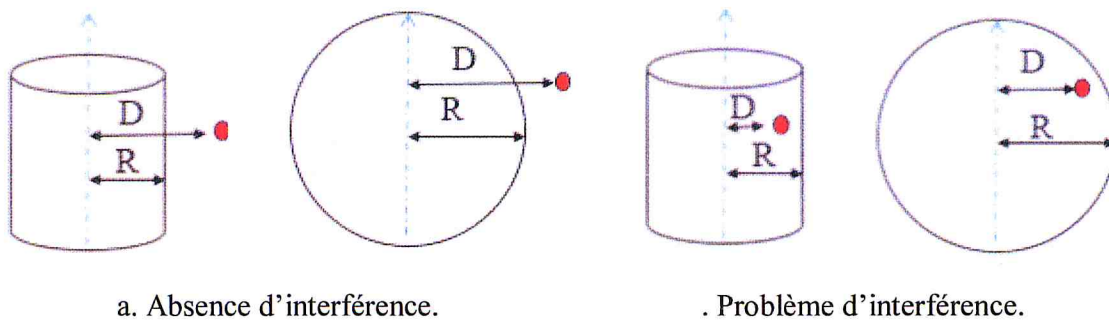


**Figure II.15.** Collision avec le porte-outil.

### 1.11.2. Interférence :

L'interférence se produit lorsque des points de la surface appartiennent à la partie active de l'outil.

➤ **Outil cylindrique et hémisphérique** : le test d'interférence pour l'outil cylindrique et l'outil hémisphérique consiste aussi à calculer la distance entre le point identifié et l'axe d'outil puis la comparer avec le rayon et vérifier l'appartenance à la partie active (Figure II.16).



**Figure II.16.** Interférence outil cylindrique et outil hémisphérique.

➤ **Outil torique** : le tore, est composé de deux parties; une partie cylindre de rayon  $R$  et une de forme en demi tore de rayon  $r$ . L'interférence se produit si le point appartient à la partie cylindrique ou au tore. Pour vérifier cette condition, la distance entre le point et l'axe d'outil  $D$  est calculée :

- Si  $D < R$ , une interférence est détectée (interférence au niveau du cylindre).
- Si  $D > R$  un risque d'interférence, un changement de repère s'impose.

Ce changement de repère consiste à déterminer les coordonnées du point de test dans un repère local lié à l'outil dont l'origine est le point extrémité minimale de l'outil  $C_L$ . Son premier vecteur unitaire  $T_1$  est perpendiculaire au vecteur directeur de l'axe de l'outil  $U$ . Son deuxième vecteur unitaire  $T_2$  est perpendiculaire au plan formé par les vecteurs  $U$  et  $T_1$ . Son troisième vecteur unitaire est le vecteur directeur de l'axe d'outil  $U$ . Donc, les coordonnées des points seront exprimées dans le repère  $(T_1, T_2, U)$ . Le changement de repère se fait donc du repère global (repère de conception) vers le repère local (repère de vérification lié à l'outil) (Figure II.17).

Soit un  $P$  de coordonnées  $(X_1, Y_1, Z_1)$  exprimées dans un repère global  $R_1$ , les coordonnées du point  $P$  de coordonnées  $(X_2, Y_2, Z_2)$  exprimées dans le repère local  $R_2$  sont données par :

$$P_{/R1} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad P_{/R2} = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}$$

Le passage du repère R<sub>2</sub> vers le repère R<sub>1</sub> est donné par :

$$P_{/R1} = M * P_{/R2}$$

Avec :

$$M = \begin{bmatrix} T_{1x} & T_{1y} & T_{1z} & X_0 \\ T_{2x} & T_{2y} & T_{2z} & Y_0 \\ U_x & U_y & U_z & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le passage du repère R<sub>1</sub> vers le repère R<sub>2</sub> est donné par :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} * M^{-1}$$

Avec :

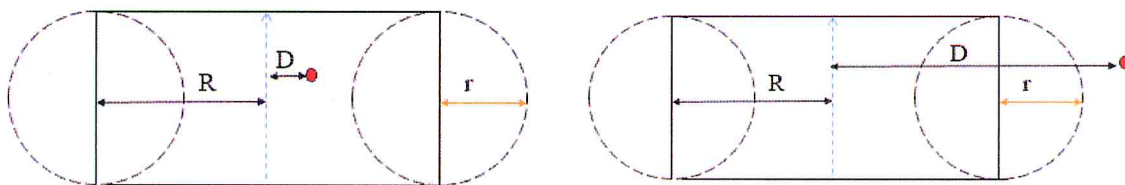
M<sup>-1</sup> : matrice inverse de la matrice M.

X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub> : coordonnées de l'origine du repère R<sub>2</sub> exprimées dans le repère R<sub>1</sub>.

Une fois le changement est effectué, r(z) le nouveau rayon de coupe est donné par :

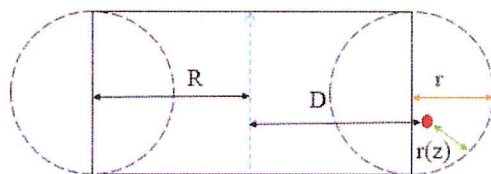
$$r(z) = R + \sqrt{r^2 - (r^2 - z)^2}$$

- Si D > r (z), absence d'interférence.
- Si D < r (z), problème d'interférence est détecté.



a. Problème d'interférence (tore).

b. Absence d'interférence.



c. Problème d'interférence (tore).

**Figure II.17.** Interférence outil torique.

**1.12. Enrichissement du modèle STL :**

Lorsque le modèle STL est grossier, il induit des erreurs lors de la détection des interférences et des collisions. Ceci est dû au fait que la densité des points n'est pas importante et l'outil peut pénétrer dans la surface sans être détecté. Afin de remédier à ce problème, la densité des points est augmentée. L'approche utilisée consiste à ajouter de nouveaux points dans les triangles en se basant sur les coordonnées barycentriques. Le nombre de points à ajouter pour chaque triangle est déterminé selon l'aire de triangle et le nombre spécifié par l'utilisateur. Pour chaque triangle du modèle,  $(S_1, S_2, S_3)$  est un repère barycentrique. Alors P, un point quelconque du plan du triangle, a pour coordonnées :

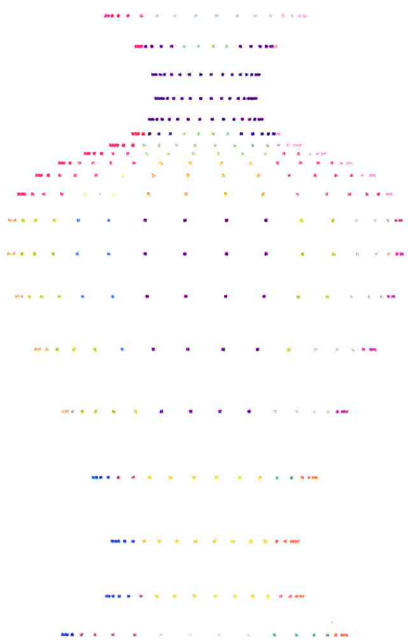
$$\overrightarrow{OP} = \alpha * \overrightarrow{OS_1} + \beta * \overrightarrow{OS_2} + \gamma * \overrightarrow{OS_3}$$

Avec:

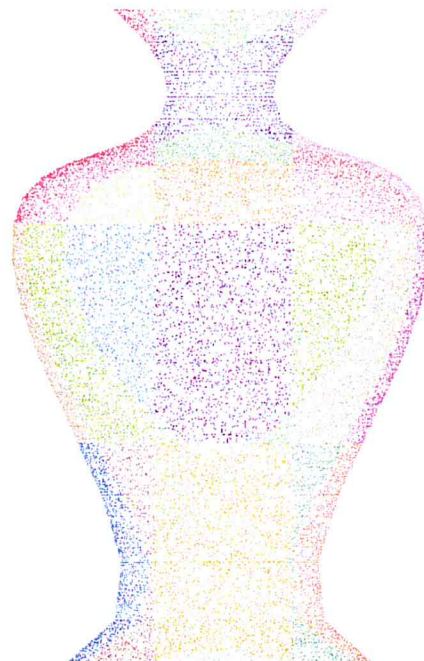
$$0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 1$$

Une fois le traitement fini, chaque point ajouté doit être affecté à la cellule qui lui correspond (Figure II.18).



a. Avant enrichissement.



b. Après enrichissement.

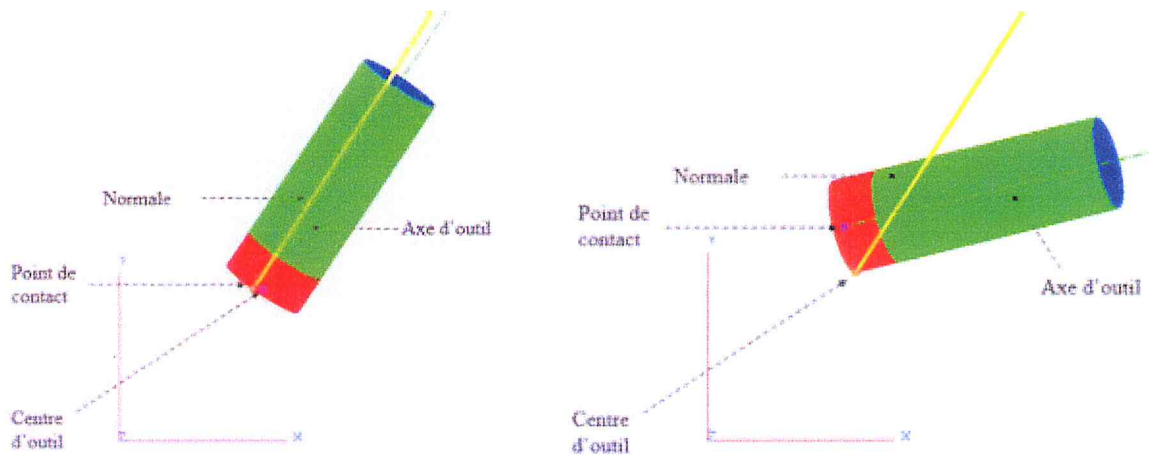
**Figure II.18.** Enrichissement du modèle STL.

### 1.13. Correction des interférences et des collisions :

La correction de l'interférence et de la collision consiste à déterminer l'orientation de l'axe de l'outil optimale, c'est-à-dire l'orientation qui ne provoque ni interférences ni collisions. Deux modes d'orientation de l'axe de l'outil sont proposés (Figure II.19) :

- **Premier mode** : rotation de l'outil autour de la normale.
- **Deuxième mode** : inclinaison de l'outil vers l'axe T1 perpendiculaire à la normale.

Pour les deux modes et pour chaque point de contact, l'outil est, initialement, positionné parallèlement à la normale et en cas de collisions ou d'interférences, l'outil est orienté jusqu'à la détermination d'un angle qui positionne l'outil hors collisions et hors interférences.



a. Rotation autour de la normale.

b. Inclinaison.

**Figure II.19.** Correction de l'interférence et de la collision.

### 1.14. Affectation des outils aux sommets :

L'objectif de ce travail consiste à optimiser l'opération de finition des surfaces gauches par la sélection des outils adéquats de trois formes d'outils à savoir cylindriques, toriques et hémisphériques en chaque point de la région permettant l'évitement des interférences et des collisions. La Figure II.20 montre les différentes étapes d'affectation des outils.

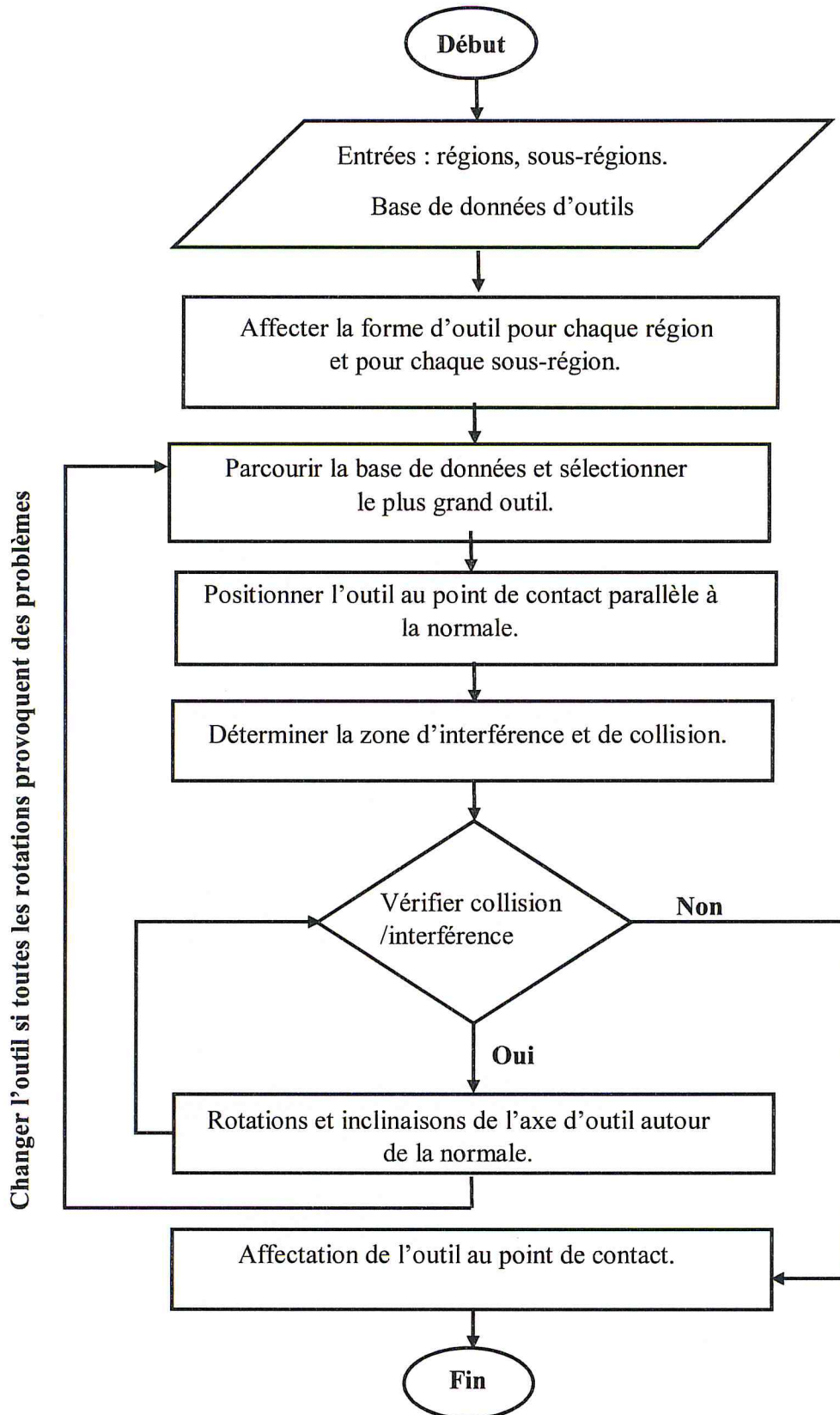


Figure II.20. Affectation des outils.

## 2. Modélisation UML :

Le langage « UML » est né de la fusion des trois méthodes qui ont influencé la modélisation objet au milieu des années 90 « OMT, Booch et OOSE ». C'est un compromis qui a été trouvé par une équipe d'experts formée par Grady Booch, James Rumbaugh et Ivar Jacobson. C'est un « langage visuel » constitué d'un ensemble de « diagrammes ». Chacun donne une vision différente du logiciel à développer pour présenter son fonctionnement, sa mise en route, les actions susceptibles d'être effectuées, ...etc. L'UML permet de :

- Donner une structuration cohérente des fonctionnalités et des données.
- Penser objet dès le départ.
- Faciliter l'analyse, la compréhension et la réduction de la complexité d'un système.

Dans ce projet, deux diagrammes sont utilisés : diagramme de cas d'utilisation et diagramme de class.

### 2.1 Diagramme de cas d'utilisation :

Les cas d'utilisation (use case) permettent de représenter le fonctionnement du système vis-à-vis de l'utilisateur. C'est donc une vue du système dans son environnement extérieur. Dans ce qui suit nous allons présenter les différentes fonctionnalités de notre système. Nous commençons par le diagramme de cas d'utilisation générale qui donne une vue globale de fonctionnement du système.

 **Diagramme de cas d'utilisation général** : le système est divisé en quatre grandes phases comme illustré par la Figure II.21.

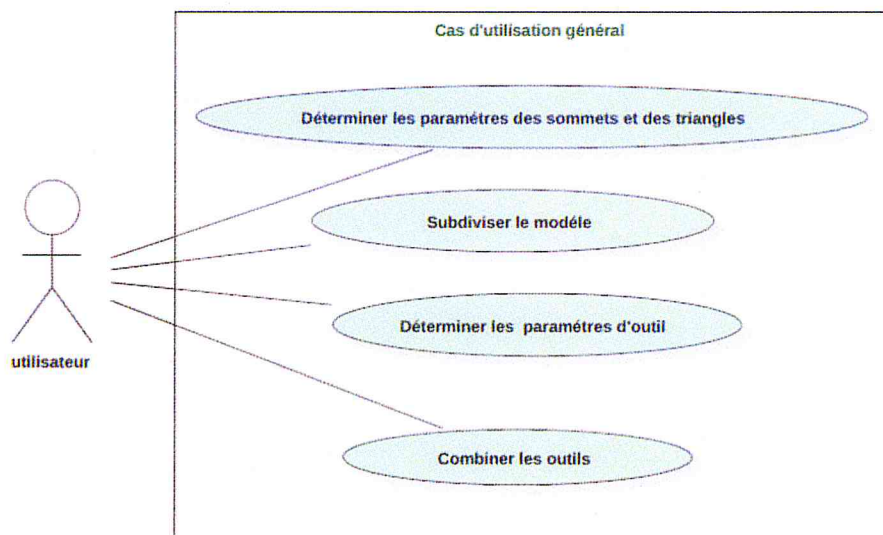
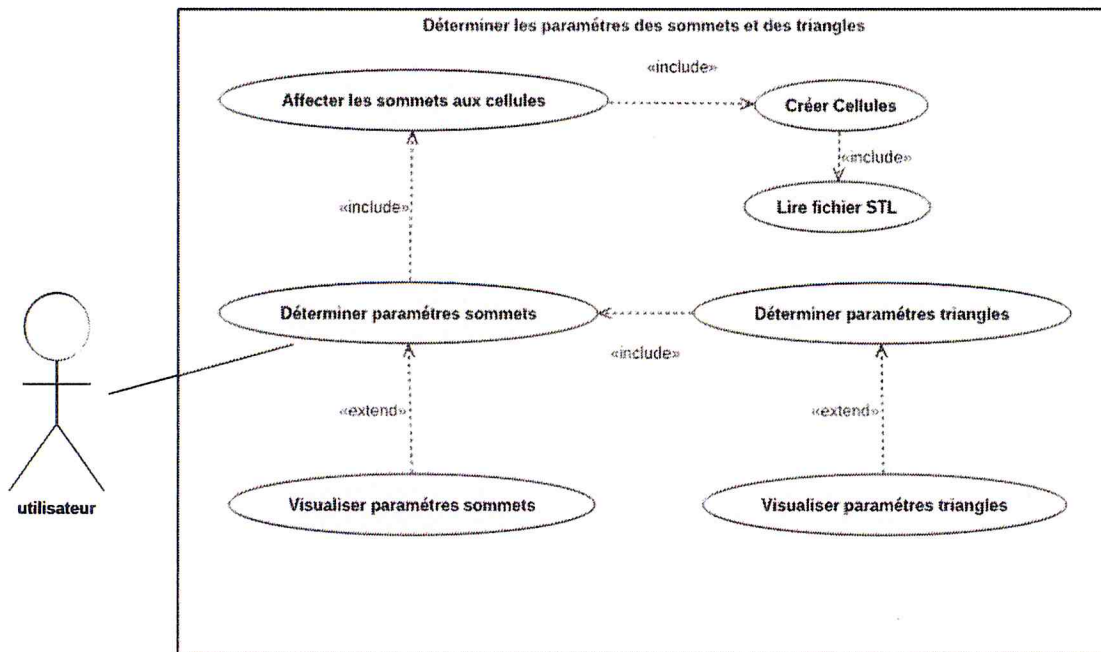


Figure II.21. Cas d'utilisation générale.

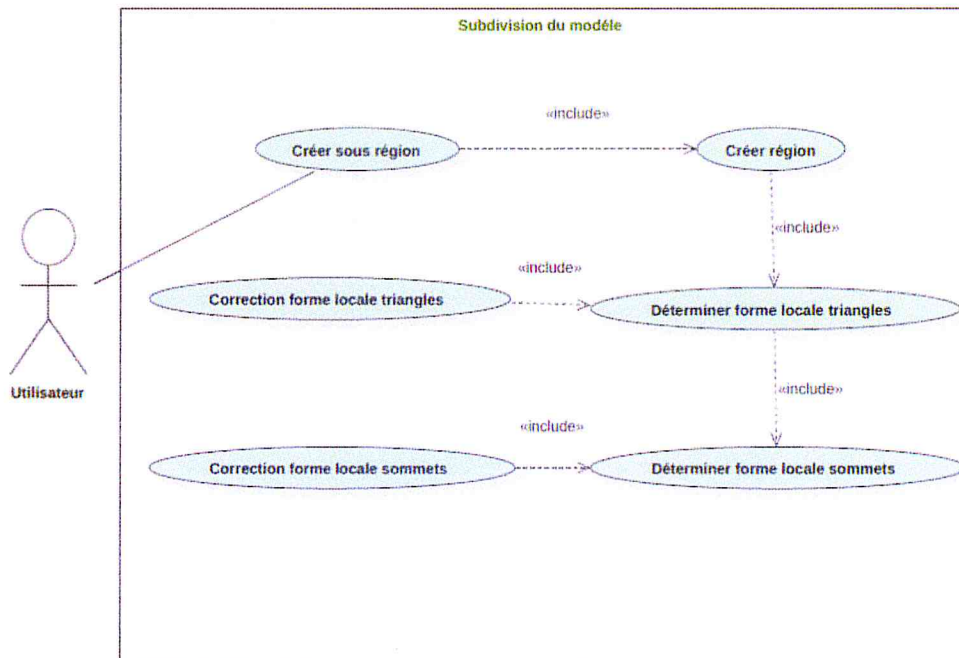


**Diagramme de cas d'utilisation « déterminer les paramètres des sommets et des triangles » :**



**Figure II.22.** Cas d'utilisation « déterminer les paramètres des sommets et des triangles ».

**Diagramme de cas d'utilisation « Subdiviser le modèle » :**



**Figure II.23.** Cas d'utilisation « Subdiviser le modèle ».

**Diagramme de cas d'utilisation « Déterminer les paramètres d'outil » :**

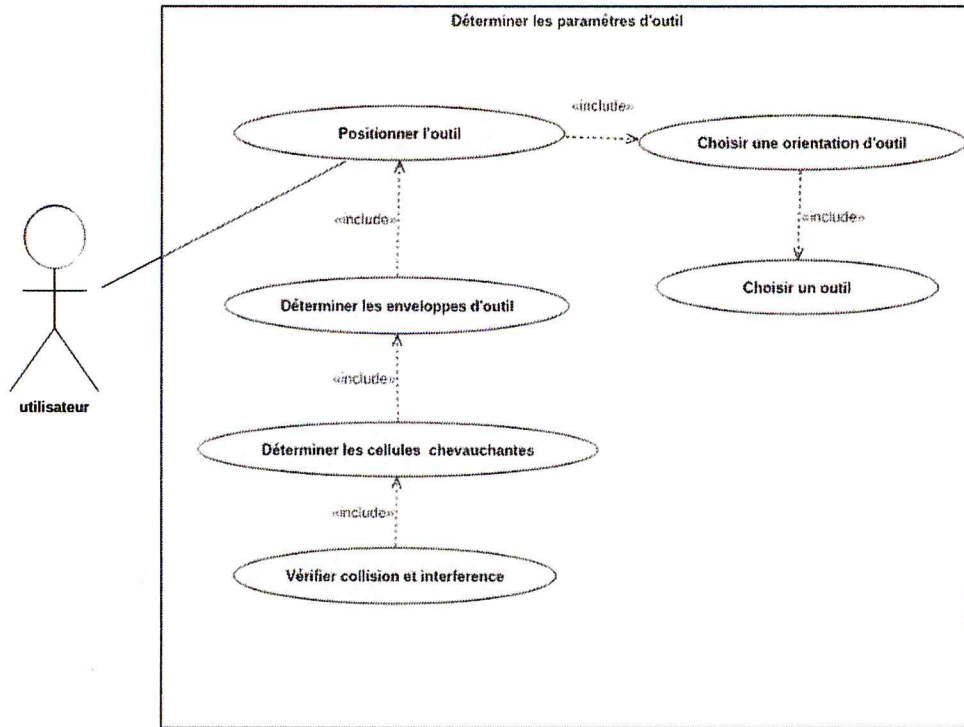


Figure. II.24. Cas d'utilisation « Déterminer les paramètres d'outil ».

**Diagramme de cas d'utilisation « Combiner les outils » :**

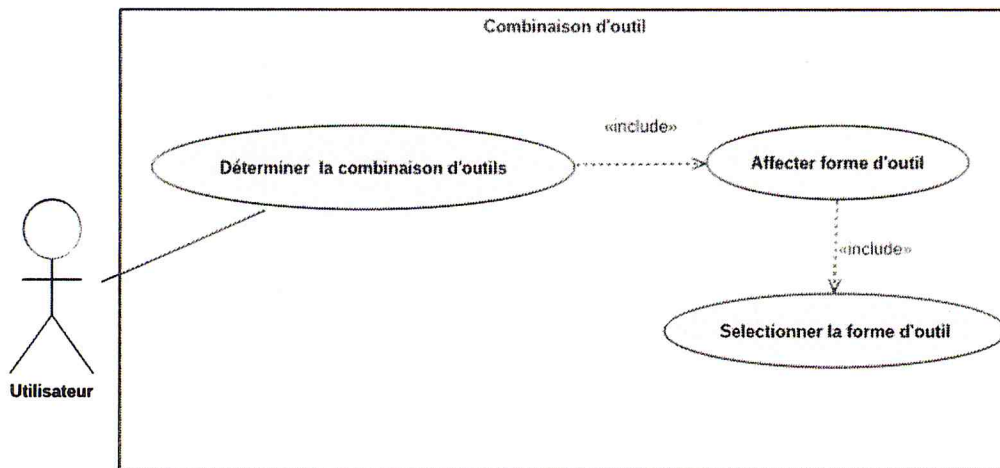


Figure II.25. Cas d'utilisation « Combiner les outils ».

**2.2 Diagramme de classes :**

Le diagramme de classes exprime la structure statique du système en termes de classes et de relations entre ces classes. L'intérêt du diagramme de classe est de modéliser les entités du

système et l'ensemble des informations finalisées qui sont gérées par le domaine. Dans ce qui suit, nous allons présenter notre digramme de class globale en tenant compte des relations entre les classes. Ensuite, nous allons détailler les principales classes utilisées. Le diagramme de classes qui représente notre système est montré dans la Figure II.26.

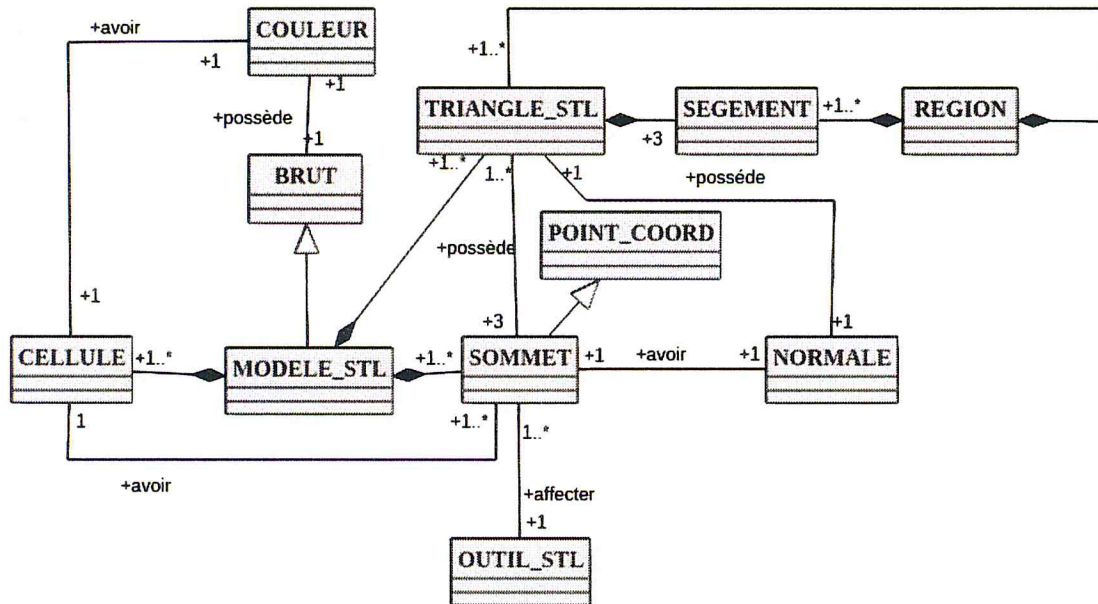


Figure II.26. Diagramme de classe générale.

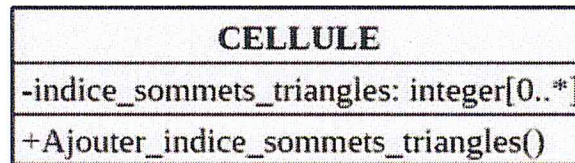
Les principales classes qui définissent notre système sont détaillées comme suit :

➤ **Classe « MODELE\_STL »** : c'est la classe principale qui regroupe tous les sommets et triangles du fichier STL ainsi que les cellules créées. Les méthodes de cette classe nous permettent de récupérer les principales informations du fichier STL (Figure II.27).

<b>MODELE_STL</b>
-pas_x: double -pas_y: double -pas_z: double -tab_sommets_triangles: SOMMET[0..*] -tab_triangles: TRIANGLE_STL[0..*] -tab_cellules: CELLULE[0..*] -nbr_cellule_x: integer -nbr_cellule_y: integer -nbr_cellule_z: integer
+Verfier_extensin_fichier_stl(fichier: String): bool +Calculer_limites_brut_verifier_syntaxe(fichier: String, valide: bool) +Creer_cellule() +Affecter_indices_sommets_triangles(fichier: String)

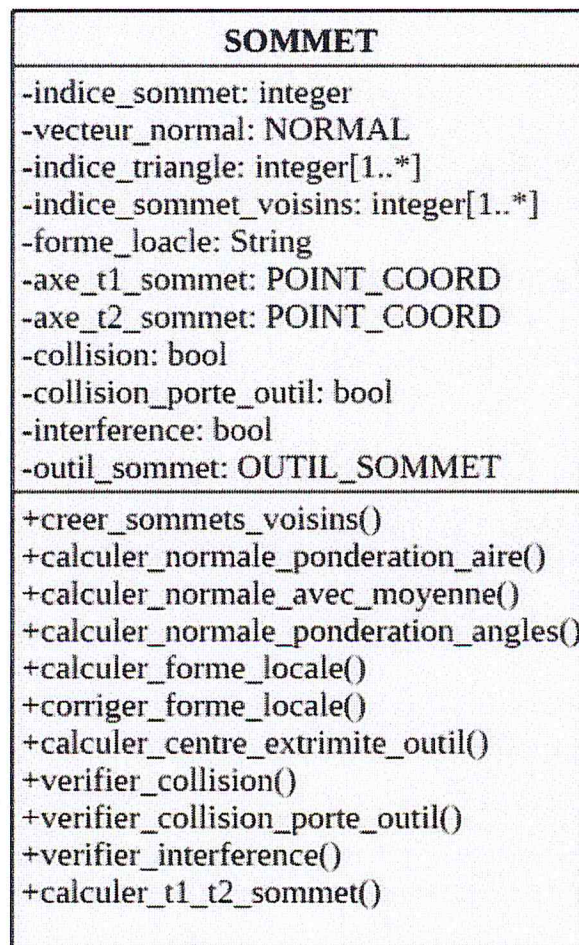
Figure II.27. Classe « MODELE\_STL ».

➤ **Classe « CELLULE »** : classe qui définit une cellule par un vecteur d'indice de sommets (Figure II.28). Sa fonction est donnée afin d'ajouter les indices des sommets à la cellule.



**Figure II.28.** Classe « CELLULE ».

➤ **Classe « SOMMET »** : c'est la classe qui définit un sommet par ses différentes caractéristiques (Figure II.29). Les méthodes de cette classe permettent de déterminer les différents paramètres du sommet.



**Figure II.29.** Classe « SOMMET ».

➤ **Classe « TRIANGLE\_STL »** : C'est une classe qui englobe les différentes caractéristiques des triangles (Figure II.30). Ses fonctions sont données pour calculer tous les paramètres d'un triangle.

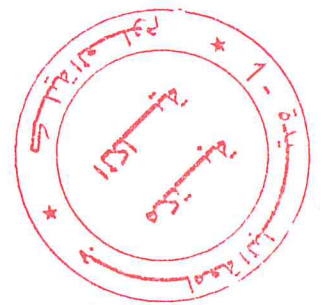
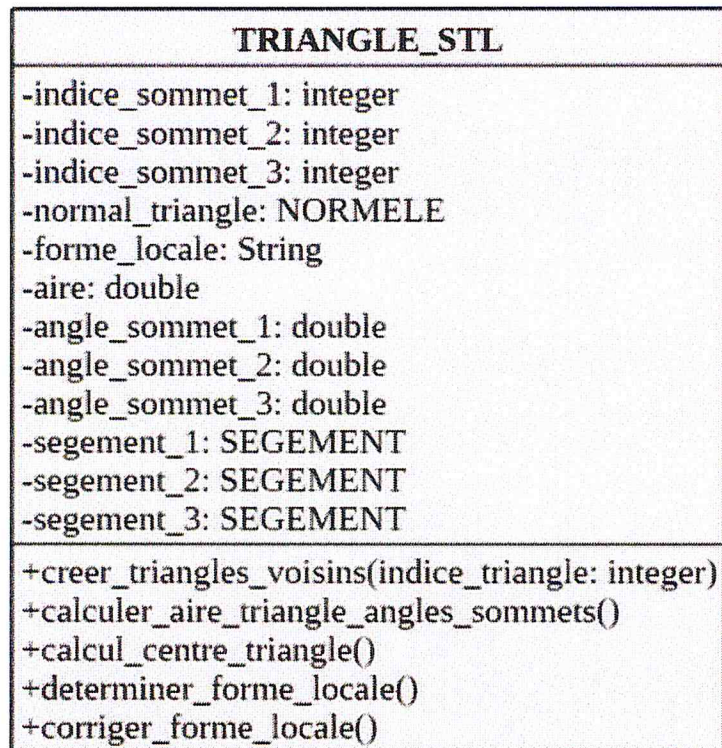


Figure II.30. Classe « TRIANGLE\_STL ».

- **Classe « REGION »** : elle représente les différentes informations d'une région. Ses attributs et fonctions sont donnés par la Figure II.31.
- **Classe « OUTIL\_STL »** : elle représente un outil récupéré depuis une base de données (Figure II.32). Les fonctions de cette classe sont implémentées afin de déterminer les différentes caractéristiques de l'outil.

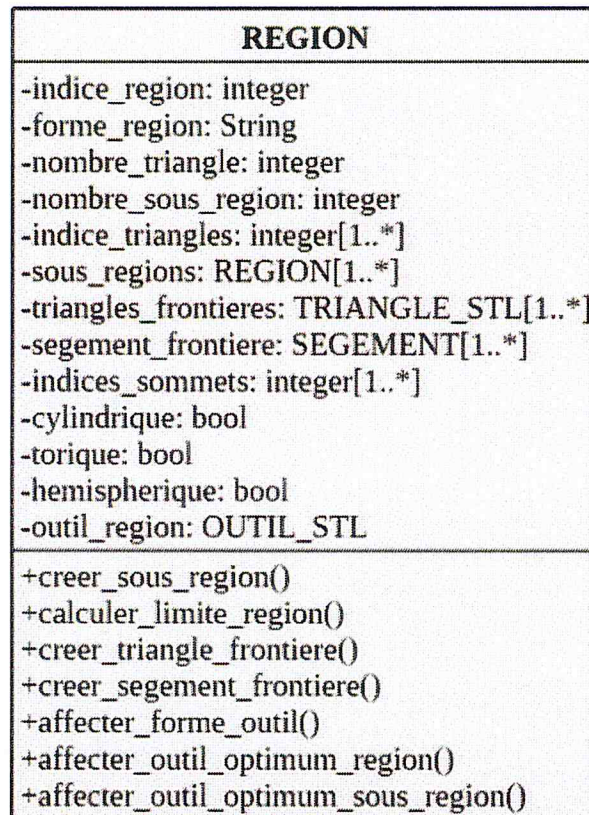


Figure II.31. Classe « REGION ».

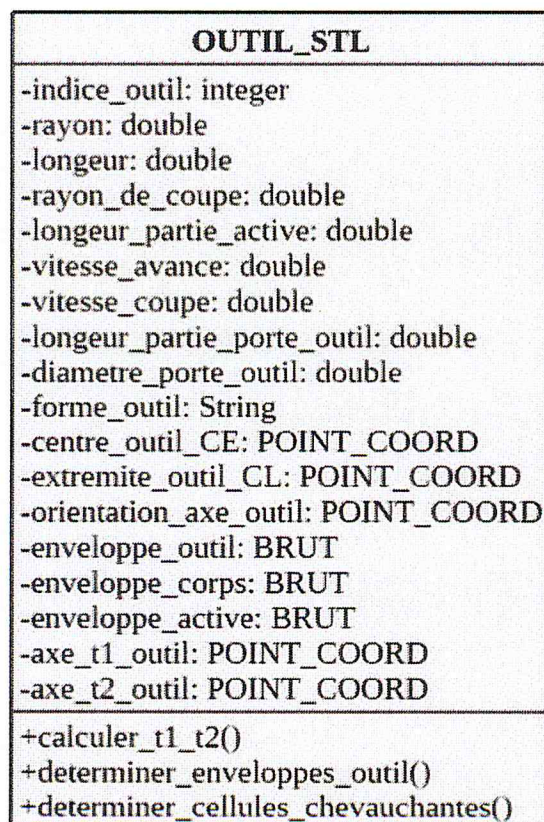


Figure II.32. Classe « OUTIL\_STL ».

**CONCLUSION :**

Nous avons présenté, dans ce chapitre, la conception de notre système qui prend en charge la restructuration du model STL. Ensuite, la détermination des paramètres géométriques pour la subdivision des surfaces. Par ailleurs, nous avons présenté une approche pour la sélection des outils optimums hors interférences et collisions tout en délimitant le champ de recherche par la création des zones de test. Les problèmes d'interférences et de collisions ont été bien détaillés ainsi que la solution proposée. Par la suite nous avons présenté la modélisation de la structure statique et dynamique de notre système en utilisant un sous ensemble des diagrammes d'UML. Dans le chapitre suivant, l'implémentation et la mise en œuvre de notre application seront traitées à travers un exemple de validation.

# CHAPITRE III

---

## IMPLEMENTATION ET VALIDATION

Introduction.

1. Présentation des langages utilisés.

2. Présentation de l'application.

3. Test et validation.

Conclusion.



## Introduction :

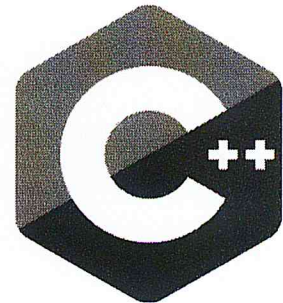
Après avoir présenté la conception de notre système dans le chapitre précédent, l'objectif de ce chapitre est l'illustration des différentes tâches que notre système peut effectuer. Nous commençons par définir les outils de développement de notre application ainsi qu'une vue générale détaillée en utilisant des captures d'écrans. Par la suite, une validation est réalisée par un ensemble de tests qui ont été préparés pour chaque fonctionnalité de l'application.

### 1. Présentation des langages utilisés :

Comme notre système est dédié à être intégré dans l'environnement de production des surfaces complexes développé par l'équipe « CFAO » du « CDTA », les outils de développement utilisés lors de la mise en œuvre de notre application (C++, OpenGL) sont les mêmes qu'utilisés par l'équipe « CFAO » pour se conformer à la tendance qui veut que la majorité des systèmes de « CFAO » sont développés par C++ et OpenGL.

#### 1.1. Présentation du langage C++ [24] :

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 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, la surcharge des opérateurs et les Templates, ...etc. Enfin, une rétrocompatibilité a été gardée où les programmes en C sont compilés sans difficulté avec un compilateur C++.

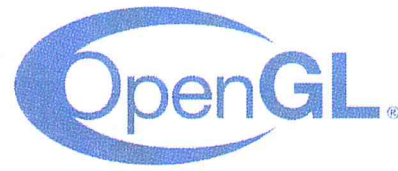


Comme tout langage, C++ dispose d'une bibliothèque standard, c'est-à-dire de fonctions et de classes prédéfinies. Elle comporte notamment de nombreux patrons de classes et de fonctions permettant de mettre en œuvre les structures de données les plus importantes (vecteurs dynamiques, listes chaînées, chaînes, ...etc.) et les algorithmes les plus usuels.

Parmi les environnements de développement AnjutaDevStudio, C++ Builder, Code::Blocks (open-source), Dev-C++, Eclipse (open-source), Microsoft Visual C++ , ...etc.

## 1.2. Présentation d'OpenGL [25] :

OpenGL (Open Graphics Library) est un ensemble normalisé de fonctions de calcul d'images 2D ou 3D lancé par Silicon Graphics en 1992. Cette interface de programmation est disponible sur de nombreuses plateformes. Elle est utilisée pour des applications allant du jeu vidéo jusqu'à la CAO en passant par la modélisation.

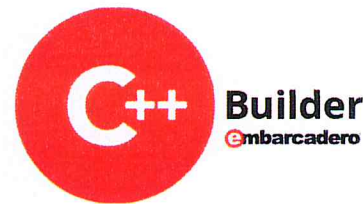


OpenGL permet à un programme de déclarer la géométrie d'objets sous forme de points, de vecteurs, de polygones et de textures. OpenGL effectue ensuite des calculs de projection en vue de déterminer l'image à l'écran, en tenant compte de la distance, de l'orientation, des ombres, de la transparence et du cadrage. L'interface regroupe environ 250 fonctions différentes qui peuvent être utilisées pour afficher des scènes tridimensionnelles complexes à partir de simples primitives géométriques. Du fait de son ouverture, de sa souplesse d'utilisation et de sa disponibilité sur toutes les plates-formes, elle est utilisée par la majorité des applications scientifiques, industrielles ou artistiques 3D et certaines applications 2D vectorielles. Cette bibliothèque est également utilisée dans l'industrie du jeu vidéo où elle est souvent en rivalité avec la bibliothèque de Microsoft Direct3D.

## 1.3. Présentation d'Embarcadero C++ Builder 10 Seattle [26,27] :

C++ Builder est un logiciel de développement rapide d'applications « RAD » conçu par Borland qui reprend les mêmes concepts, la même interface et la même bibliothèque que Delphi en utilisant le langage C++. Il permet de créer rapidement des applications Win32 et Win64 ainsi qu'une interface graphique avec son éditeur de ressources. Il est compatible avec la version de norme ISO C++ de 2011.

Embarcadero C++ Builder 10 Seattle est le moyen le plus rapide de créer et de mettre à jour des applications riches en données, hyper connectées et visuellement engageantes pour Windows 10, Mac, Mobile, IoT et plus encore en utilisant le standard C++. Mettez à jour rapidement et facilement les applications VCL et FMX vers Windows.



## 2. Présentation de l'application :

L'application développée est composée de plusieurs fonctionnalités complémentaires. Elle englobe 12 onglets (Figure III.1).

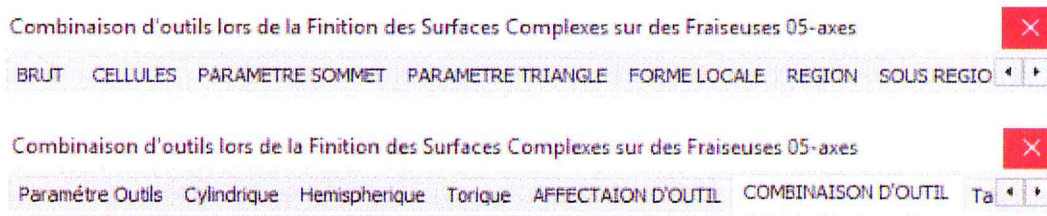


Figure III.1. Onglets de l'application développée.

La représentation détaillée de chaque onglet est décrite dans les paragraphes suivants.

### 2.1. Lecture du fichier STL :

Le premier onglet « BRUT » permet la lecture du fichier STL contenant l'ensemble des sommets et des triangles de la surface pour créer le brut. Par un simple clic sur le bouton « Lire fichier STL » et sélection du fichier à ouvrir, le brut minimum est calculé (Figure III.2).

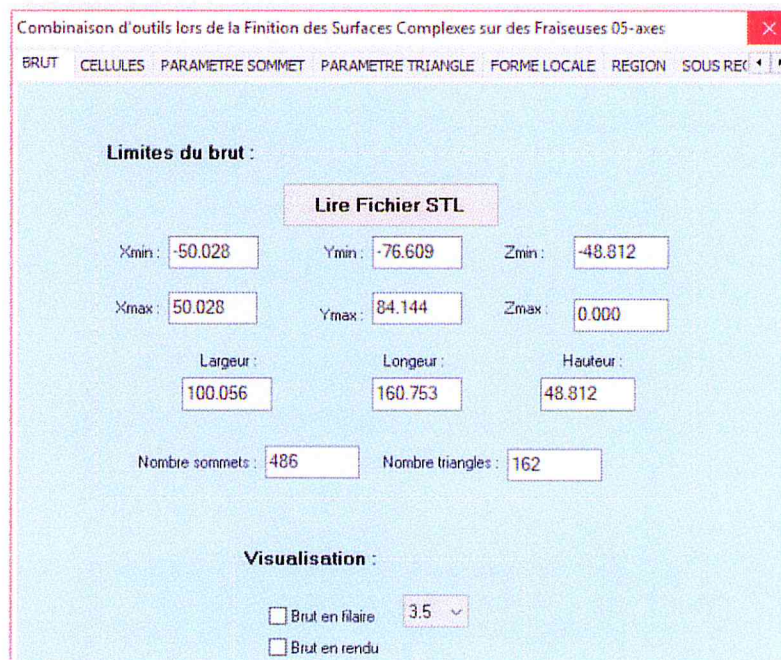


Figure III.2. Onglet « BRUT ».

Une fois le fichier est lu, les informations suivantes peuvent être récupérées :

- Dimensions minimales du brut.
- Nombre total de sommets et de triangles

En plus de ces informations, il est possible de visualiser le brut du modèle en deux modes filaire et rendu.

## 2.2. Création des cellules :

Afin de restructurer le modèle STL, l'utilisateur doit effectuer trois étapes importantes (Figure III.3). La première étape consiste à créer les cellules par la spécification du nombre de cellules suivant les trois axes X, Y et Z et un clic sur le bouton «Créer cellules ». Une fois les cellules sont créées, l'affectation des sommets aux cellules est réalisée par un simple clic sur le bouton « Affecter sommets ». La dernière étape consiste à enrichir le modèle STL par l'ajout d'un ensemble de points pour chaque triangle. Pour cela, l'utilisateur fixe le nombre de points à ajouter et clic sur « Enrichir modèle ».

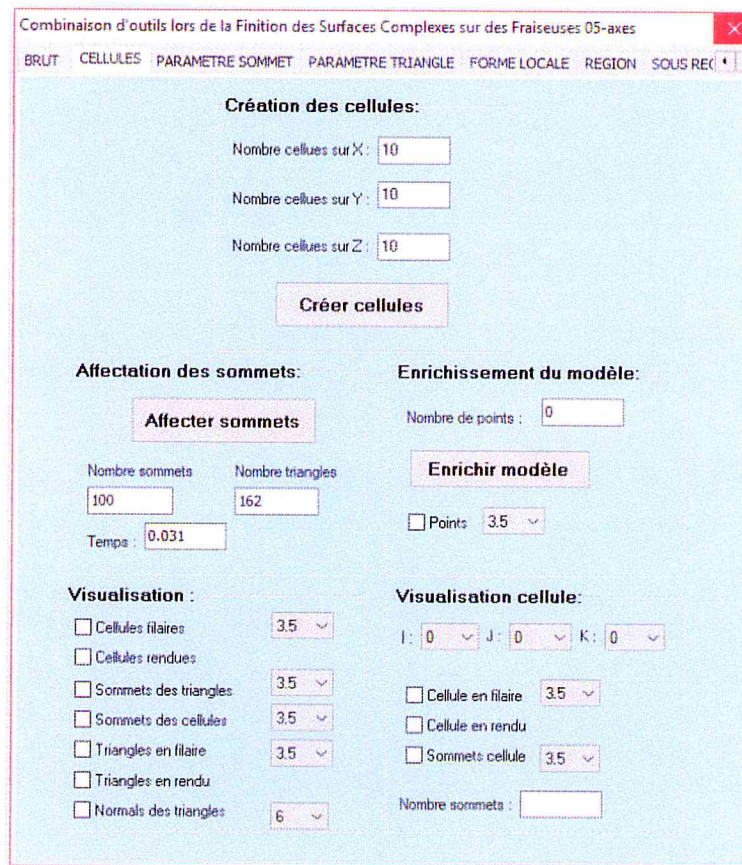


Figure III.3. Onglet « CELLULES ».

Après la réalisation des étapes de cet onglet, nous pouvons :

- Récupérer le nombre de sommets après l'élimination de redondance.
- Visualiser les cellules en deux modes filaire et rendu.
- Visualiser les sommets de triangles et de cellules.
- Visualiser les triangles en deux modes filaire et rendu.
- Visualiser les normales des triangles
- Visualiser le paramètre d'une cellule sélectionnée.

## 2.3. Paramètres des sommets et triangles :

### 2.3.1. Onglet « paramètres sommets » :

Dans cet onglet, les paramètres des sommets sont calculés (Figure III.4). Débutant par l'estimation des normales, l'utilisateur choisit un mode de calcul parmi trois proposés :

- Pondération par les aires des triangles.
- Moyenne des vecteurs normaux.
- Pondération par les angles des triangles

Une fois les normales sont estimées, le plan tangent est déterminé. Par la suite, pour chaque sommet, ses voisins sont identifiés. A ce niveau, nous pouvons :

- Visualiser les normales des sommets des triangles.
- Visualiser les différents paramètres d'un sommet sélectionné.

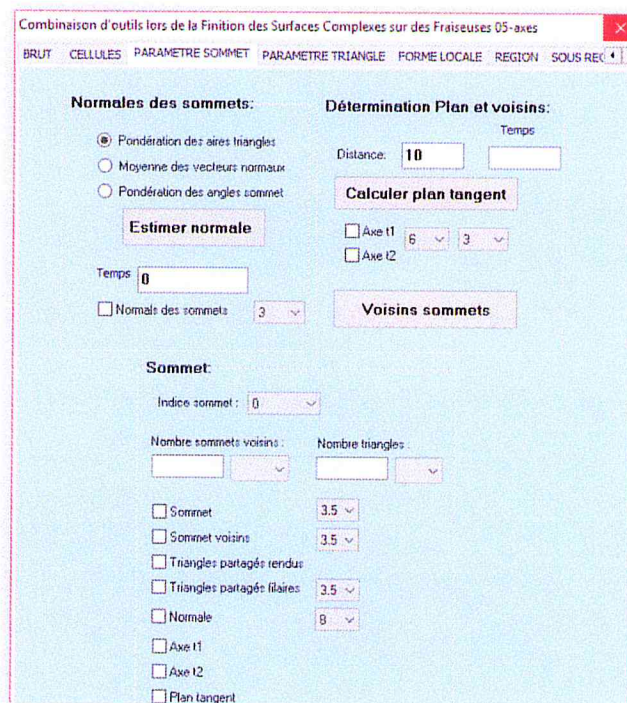


Figure III.4. Onglet « PARAMETRES SOMMET ».

### 2.3.2. Onglet « paramètres triangles » :

Dans cet onglet, les voisins de chaque triangle sont calculés à partir de ses sommets (Figure III.5). A ce stade, les paramètres d'un triangle sélectionné peuvent être affichés :

- Voisins d'un triangle en deux modes filaire et rendu.
- Aire et les trois angles de triangle.

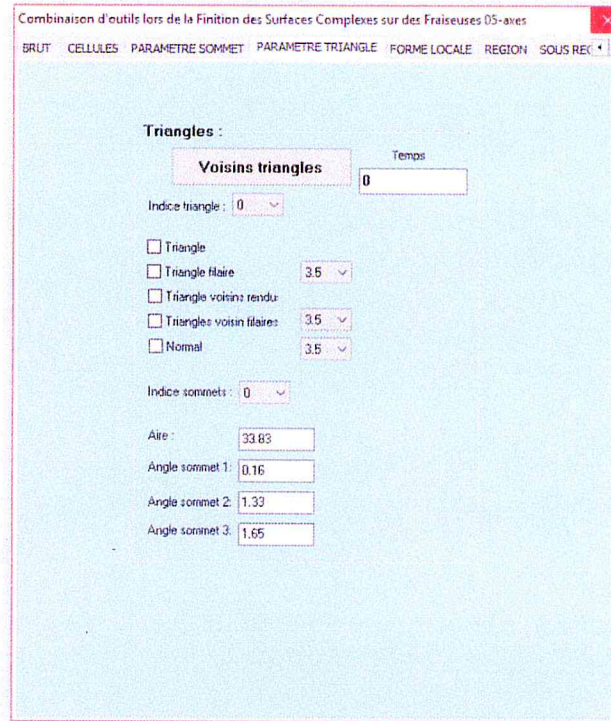


Figure III.5. Onglet « PARAMETRES TRIANGLE ».

#### 2.4. Détermination des formes locales :

Cet onglet est divisé en deux parties (Figure III.6). La première étape consiste à définir la forme locale de chaque sommet puis une correction de sa forme est effectuée. La deuxième étape est dédiée à la détermination et à la correction de la forme locale de chaque triangle du modèle. A ce niveau, les formes locales des sommets et des triangles peuvent être visualisées.

#### 2.5. Création des régions :

Cet onglet est dédié à la subdivision de la surface en différentes régions (Figure III.7). Le premier bouton « Créer régions » sert à créer les différentes régions de la surface. Une fois les régions sont créées, les limites et les triangles et les segments frontières de chaque région sont calculés par un clic sur les boutons « Calculer limite » et « Créer triangles frontières ». A la fin de ce processus, l'utilisateur peut pour chaque région :

- Récupérer l'aire, le nombre de triangles et de sommets.
- Récupérer les limites.
- Visualiser la région en rendu.
- Visualiser le brut de la région.
- Visualiser les triangles et les segments frontières.

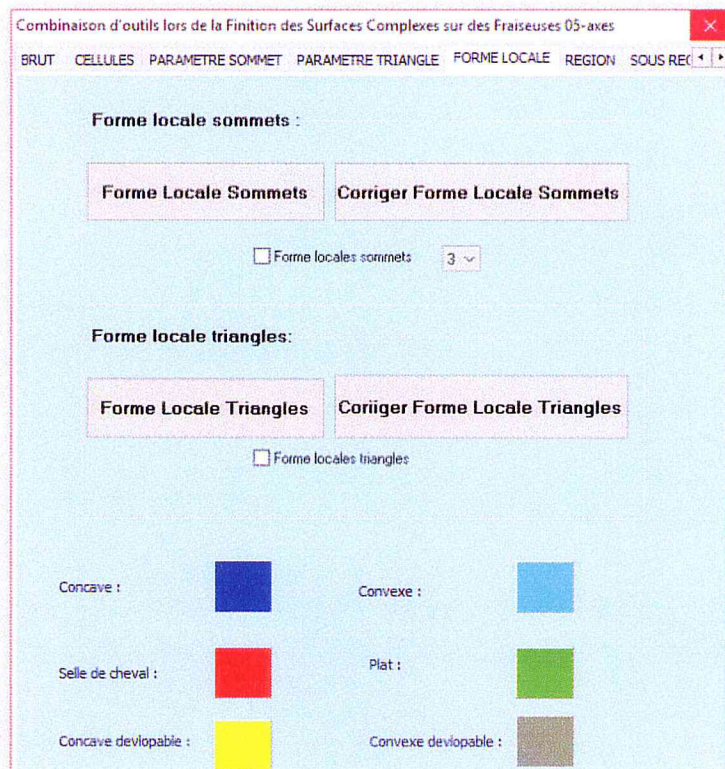


Figure III.6. Onglet « FORME LOCALE ».

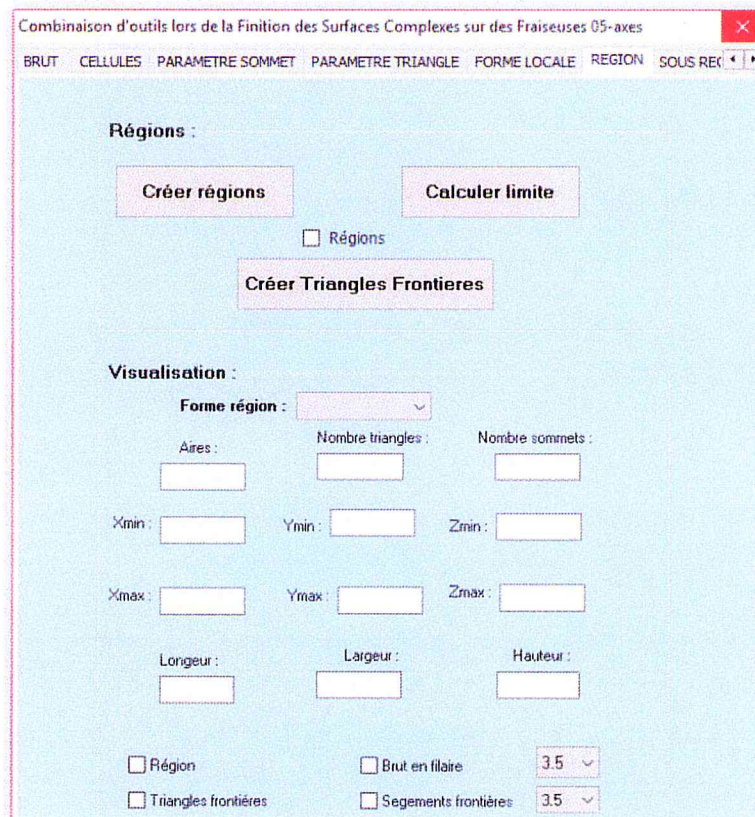
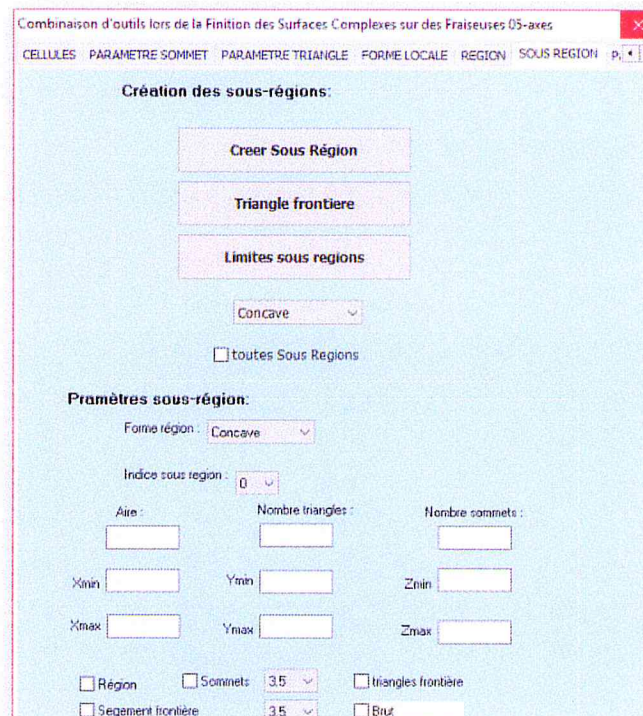


Figure III.7. Onglet « REGION ».

## 2.6. Création des sous-régions :

Cet onglet sert à subdiviser chaque région de la surface en différentes sous-régions et à calculer l'ensemble des paramètres pour chaque sous-région (Figure III.8). Une fois ce traitement est terminé, l'utilisateur peut pour une région sélectionnée visualiser ses différentes sous-régions en rendu. De même, pour une sous-région sélectionnée, l'utilisateur peut :

- Récupérer l'aire, le nombre de triangles et de sommets.
- Récupérer les limites.
- Visualiser la sous-région en rendu.
- Visualiser l'ensemble des sommets.
- Visualiser le brut de la région.
- Visualiser les triangles et les segments frontières.



**Figure III.8.** Onglet « SOUS REGION »

## 2.7. Récupération des outils :

L'intérêt principal de ces trois onglets est la connexion et la manipulation d'une base de données d'outils afin de récupérer l'ensemble des outils pour les utiliser dans les prochaines étapes (Figure III.9, Figure III.10 et Figure III.11).

La base de données est composée de trois tables où chacune correspond à une forme d'outil (cylindrique, hémisphérique et torique). Une fois la connexion est établie, chaque table est



affichée. Avec un simple clic sur le bouton « Charger BD », les outils sont récupérés. La manipulation de la base de données des outils s'effectue par un clic sur les boutons suivants :

- « Ajouter outil » : sert à ajouter un outil à la base de données.
- « Supprimer outil » : permet de supprimer un outil de la base de données.
- « Chercher » : vérifier l'existence d'un outil dans la base de données.

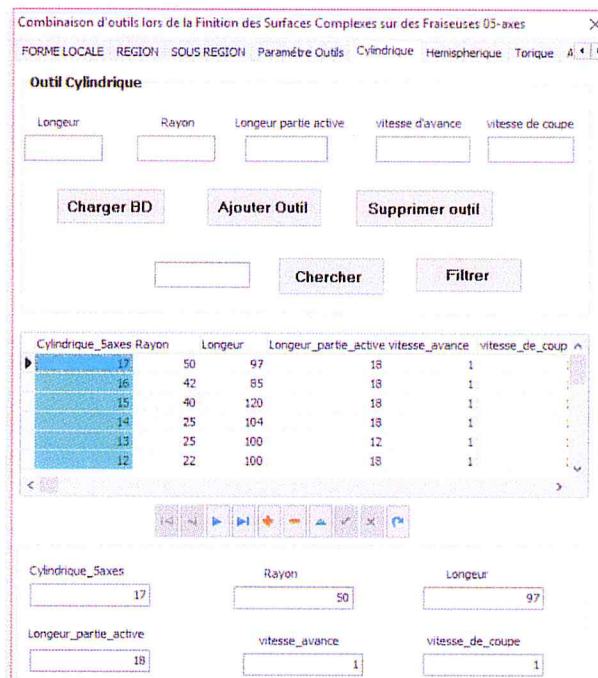


Figure III.9. Onglet « Cylindrique».

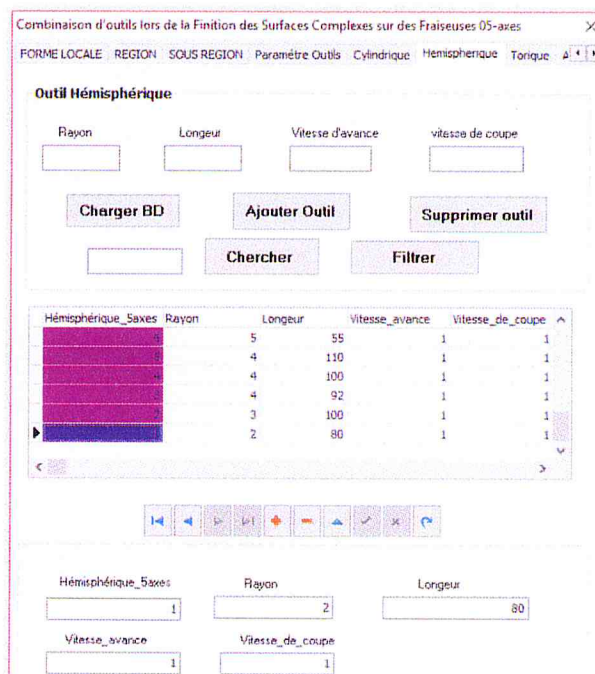


Figure III.10. Onglet « Hémisphérique».

Combinaison d'outils lors de la Finition des Surfaces Complexes sur des Fraiseuses 05-axes

FORME LOCALE REGION SOUS REGION Paramètre Outils Cylindrique Hemispherique Torique

**Outil Torique**

Longueur Rayon Rayon de coupe vitesse avance vitesse de coupe

Charger BD Ajouter Outil Supprimer outil

Chercher Filtrer

Torique_Saxes	Rayon	Rayon_de_coupe	Longueur	Vitesse_avance	Vitesse_de_coupe
7	10	1.5	30	1	1
6	8	1.5	25	1	1
5	8	1.2	200	1	1
4	8	1.2	106	1	1
3	7.5	1.5	200	1	1
2	6	1	109	1	1
1	6	1	25	1	1

Torique\_Saxes Rayon Rayon\_de\_coupe

Longueur Vitesse\_avance Vitesse\_de\_coupe

1 6 1

25 1 1

Figure III.11. Onglet « Torique ».

## 2.8. Paramètres d'outil :

Cet onglet sert à positionner une forme d'outil pour chaque point de contact de la sous-région en fonction du choix de l'utilisateur (Figure III.12). Une fois le positionnement est effectué, il est possible de visualiser :

- Paramètres d'outil.
- Enveloppes d'outil.
- Cellules chevauchantes avec les enveloppes d'outil.
- Points en collisions et en interférences avec l'outil.

## 2.9. Affectation d'outil :

Cet onglet permet de déterminer pour un point de contact sélectionné, l'outil optimum sans interférences et sans collisions (Figure III.13). Une fois est identifié, les angles de rotation et d'inclinaison seront affichés.

## 2.10. Combinaison d'outil :

Cet onglet a comme but d'affecter pour chaque point de contact des sous-régions un outil optimum afin de déterminer la combinaison d'outils optimale pour chaque sous-région (Figure III.14).

Combinaison d'outils lors de la Finition des Surfaces Complexes sur des Fraiseuses 05-axes

PARAMETRE TRIANGLE FORME LOCALE REGION SOUS REGION Paramètre Outils Cylindrique Hémisphérique

Indices sommet: 21  
 Forme d'outil: cylindrique  
 Indice outil: 0

Orientation Outil  
 parallèle normale  
 non parallèle normale

Selon X: 0 Selon Y: 0 Selon Z: 1

Longueur porte outil: 30  
 Diamètre: 50  
 Angle d'inclinaison: 20  
 Angle de rotation: 0

**Positionner outil**

**Visulisation :**

Outil  Outil filaire 6  
 porte outil  porte outil filaire 6  
 Axe outil 6  
 Axe T1  Axe T2 2 6  
 Centre outil  Point extrémité 2  
 Point contacte 2  
 Normale CC 6  
 AxeT1 CC  Axe-T2 CC 2 6

**Enveloppes outil :**

Enveloppe outil 6  
 Enveloppe partie corps  
 enveloppe partie active  
 Enveloppe outil XYZ 6  
 enveloppe porte outil XYZ  
 enveloppe corps XYZ  
 enveloppe active XYZ

**chevauchement :**

Cellules partie active 2  Points cellules active 2  points interference 2  
 Cellules partie corps 2  Points cellules corps 2  points collision 2  
 Cellules partie porte outil 2  Points cellules porte 2  points collision porte outil 2

Figure III.12. Onglet « PARAMETRE OUTIL».

Combinaison d'outils lors de la Finition des Surfaces Complexes sur des Fraiseuses 05-axes

Paramètre Outils Cylindrique Hémisphérique Torique AFFECTATION D'OUTIL COMBINAISON D'OUTIL

Forme région: Concave  
 Indice sous région: 0  
 Indices sommet: 0

**Affecter outil sommet**

**Visualisation :**

Forme d'outil:   
 Indice outil:   
 Rayon d'outil:   
 Rayon de coupe:   
 Longueur d'outil:

Angle d'inclinaison:  Angle de rotation:

Outil optimum 5

Cylindrique Torique Hémisphérique

Figure III.13. Onglet « AFFECTATION».

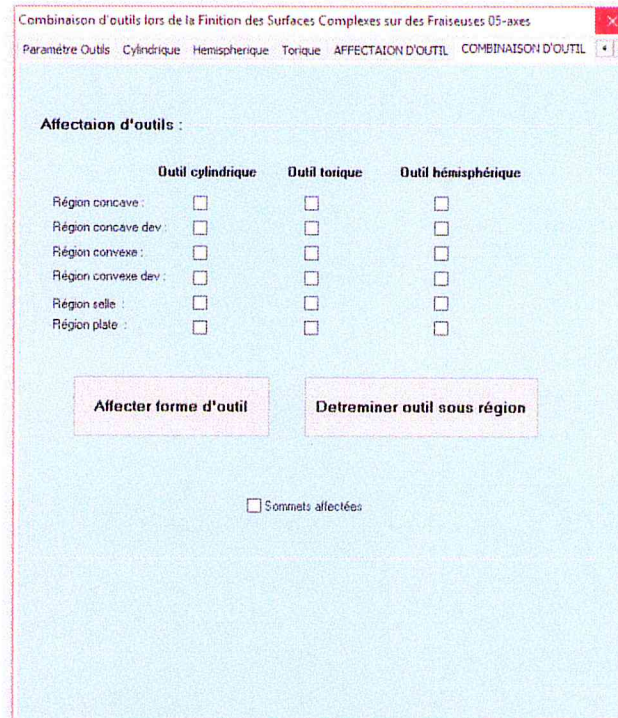


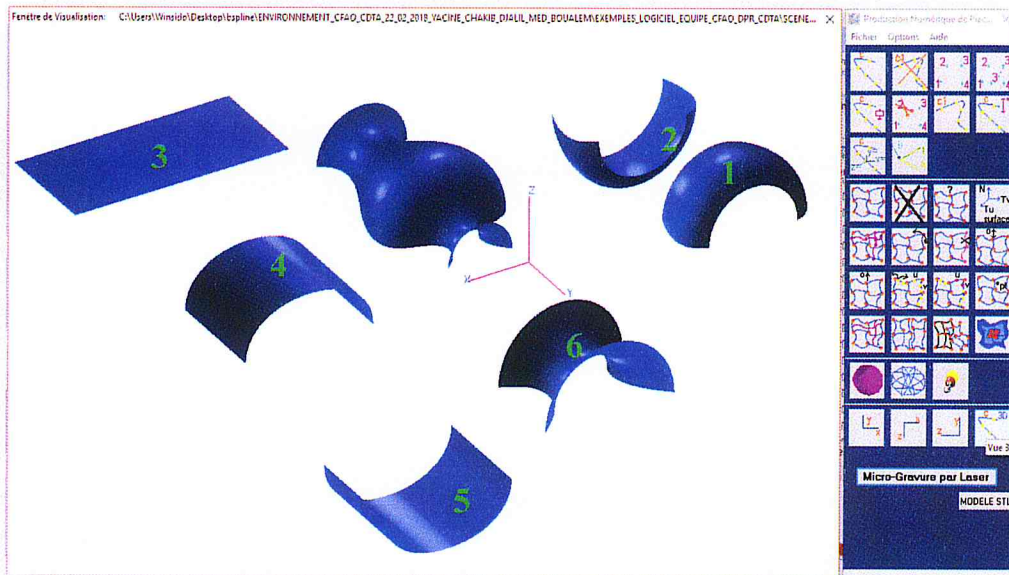
Figure III.14. Onglet «COMBINAISON».

### 3. Test et validation :

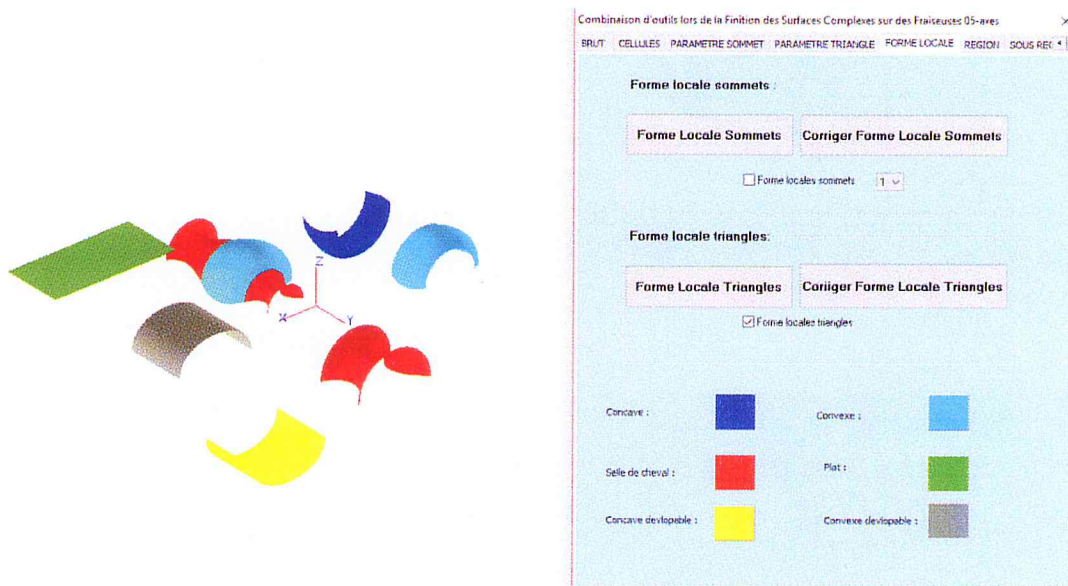
La validation de notre travail est menée sur deux modèles STL générés à partir de leurs modèles CAO. Le premier modèle est composé d'un ensemble de surfaces complexes pour montrer les différentes formes locales que peut comprendre une surface complexe. Le deuxième exemple sert à montrer les différentes étapes de validation de notre approche.

#### 3.1. Premier modèle STL :

Afin de valider la phase de détermination de la forme locale d'une surface complexe par notre application, l'exemple considéré est représenté par la (Figure III.15.a). La lecture du fichier STL associé à ce premier modèle montre qu'il est composé de 411642 sommets et de 137214 triangles. Avant la phase d'affectation des sommets, les cellules sont créées en fixant le nombre de subdivisions suivant les trois axes X, Y et Z égal à 50. L'élimination des sommets redondants permet de réduire le nombre de sommets de 411642 sommets à 70000 sommets. Par la suite, les paramètres des sommets et des triangles sont déterminés. Après cette phase, les formes locales composant ce modèle sont identifiées. Il ressort d'après les résultats que les formes locales des surfaces sont identifiées correctement. Ces formes locales sont de six surfaces (Figure III.15.b) : surface 1 : convexe, surface 2 : concave, surface 3 : plane, surface 4 : convexe développable, surface 5 : concave développable et surface 6 : selle de cheval.



b. Surfaces du premier modèle.



a. Formes locales des différentes surfaces.

**Figure III.15.** Formes locales des surfaces du premier modèle STL.

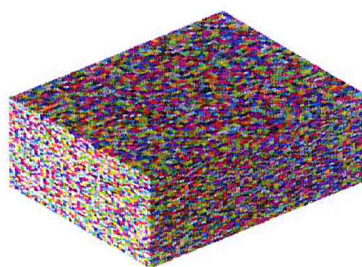
### 3.2. Deuxième modèle STL :

Les résultats des différentes étapes présentés dans les paragraphes suivants sont relatifs au deuxième modèle STL.

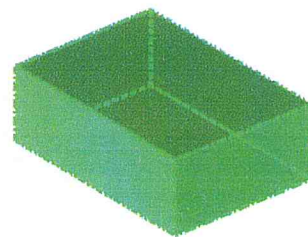
**Étape 1 :** lecture du fichier STL et calcul des limites du brut. Les résultats sont :

$X_{min} = -45.596 \text{ mm}$        $Y_{min} = -56.752 \text{ mm}$        $Z_{min} = 0.000 \text{ mm}$   
 $X_{max} = 45.596 \text{ mm}$        $Y_{max} = 71.771 \text{ mm}$        $Z_{max} = 45.594 \text{ mm}$   
 Longueur = 91.192mm      Largeur = 128.523mm      Hauteur = 45.594mm  
 Nombre total des sommets = 237606      Nombre total des triangles = 79202

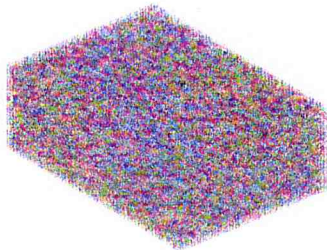
**Étape 2 :** division du brut en cellules avec un nombre de 50 cellules suivant les trois axes X, Y et Z (Figure III.16). Après l'affectation des sommets aux cellules et aux triangles, les résultats obtenus sont les suivants :



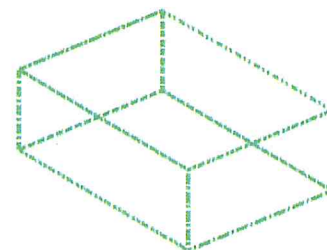
a. Cellules en rendu.



b. Une cellule en rendu.



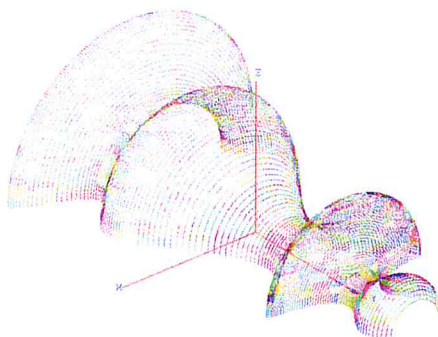
c. Cellules en filaire.



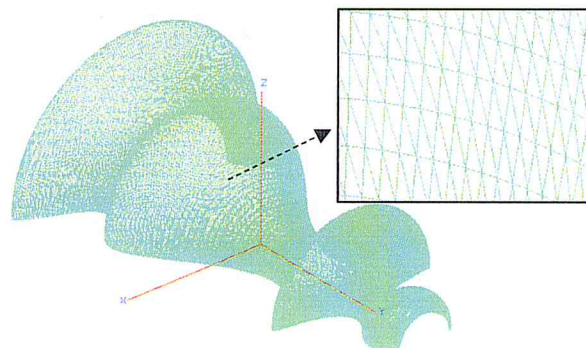
d. Une cellule en filaire.

**Figure III.16.** Création des cellules de sommets.

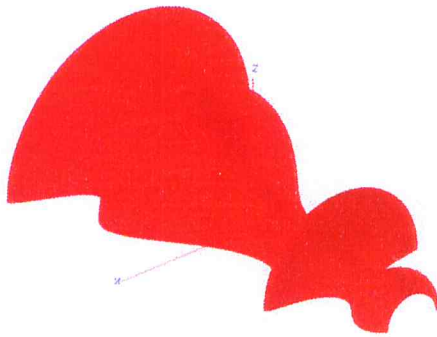
Les autres paramètres qui sont visualisés sont donnés par la Figure III.17.



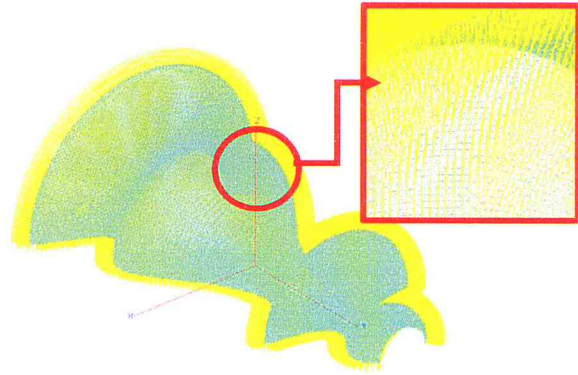
a. Sommets des cellules.



b. Triangles en filaires.



c. Triangles en rendu



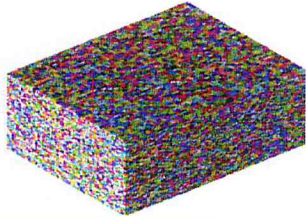


d. Normales des triangles.

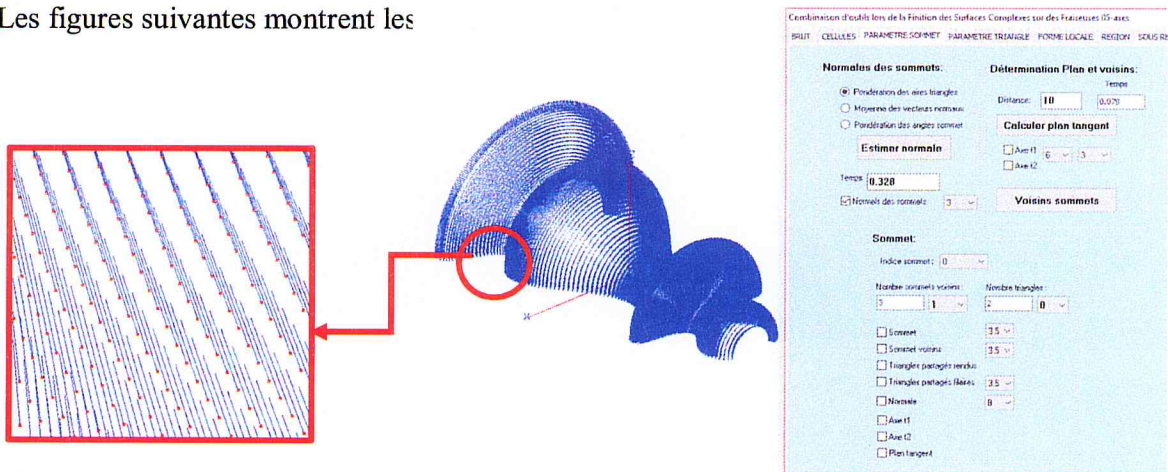
**Figure III.17.** Paramètres visibles après l'affectation des sommets.

Le tableau suivant montre la minimisation du temps de calcul par la création des cellules.

**Tableau III.1 :** Comparaison des temps de calcul.

Nombre de cellules	10 cellules suivant chaque axe	20 cellules suivant chaque axe	50 cellules suivant chaque axe
Visualisation			
Temps d'exécution	5 min et 5 s	48 s	9 s

**Etape 3 :** en chaque sommet, la normale est estimée par le choix du mode de calcul « pondération des aires des triangles ». Ensuite, le plan tangent et les voisins sont déterminés. Les figures suivantes montrent les



**Figure III.18.** Estimation des normales.

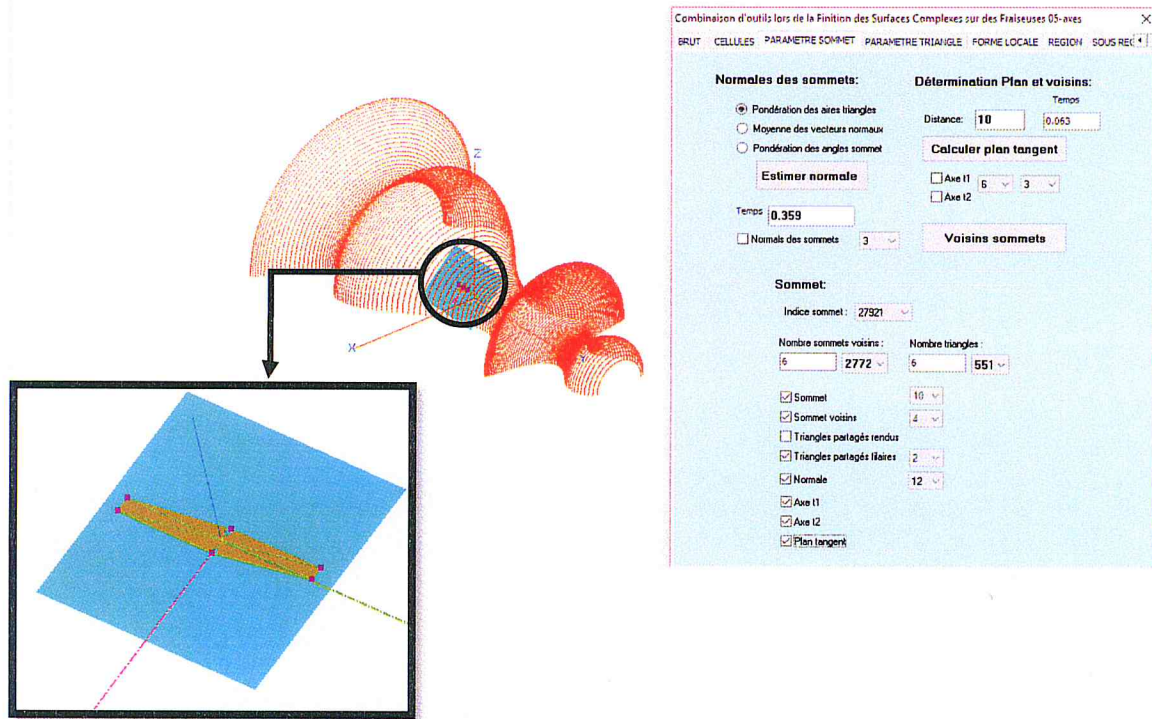


Figure III.19. Visualisation des paramètres d'un sommet.

🔧 **Etape 4** : détermination des voisins des triangles ainsi que visualisation des différents paramètres (Figure III.20).

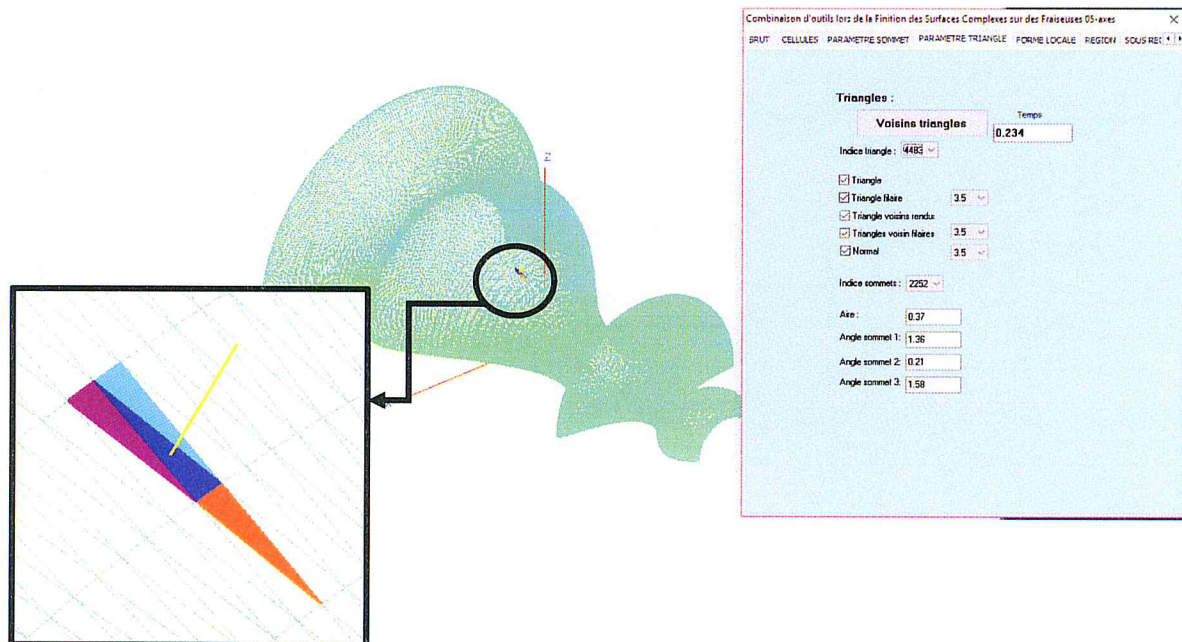
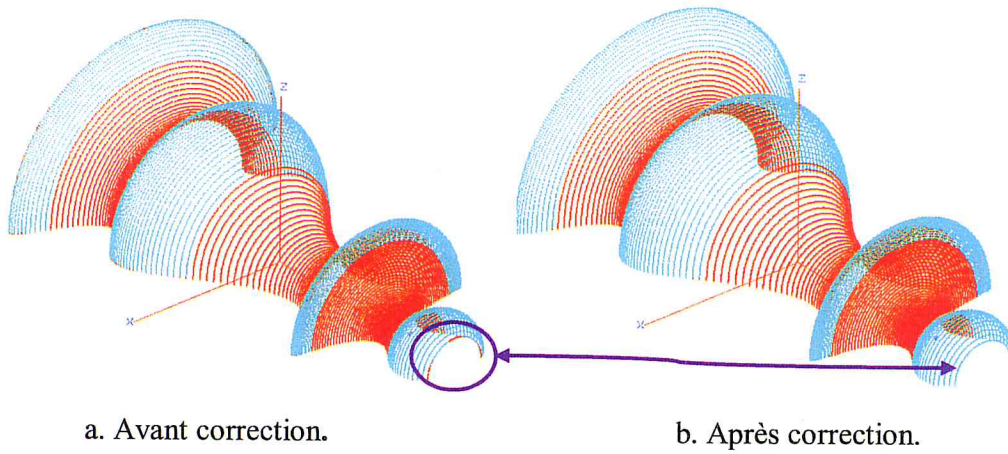


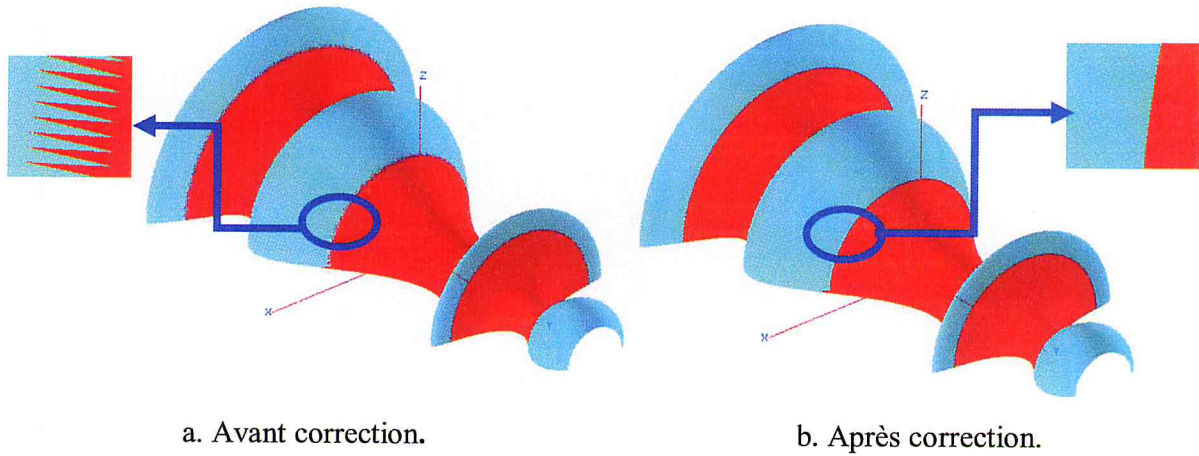
Figure III.20. Visualisation des paramètres d'un triangle.



✚ **Étape 5 :** détermination formes locales des sommets avec correction (Figure III.21).  
 Par la suite, détermination des formes locales des triangles avec correction (Figure III.22).

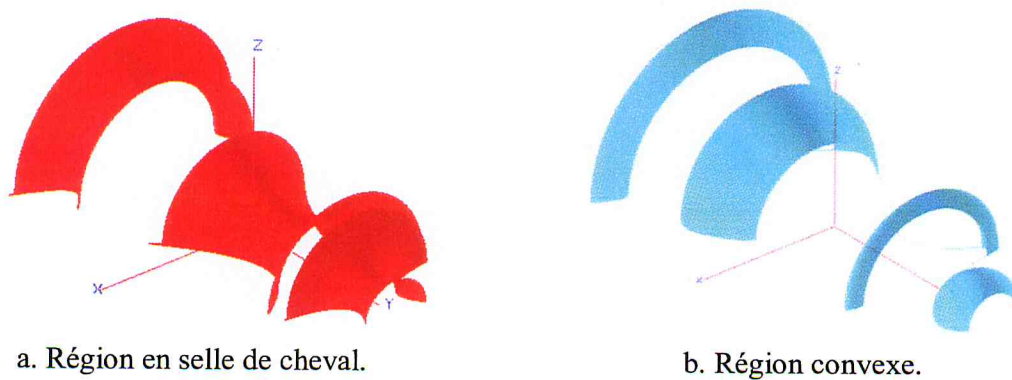


**Figure III.21.** Formes locales des sommets.



**Figure III.22.** Formes locales des triangles.

✚ **Étape 6 :** création des régions (Figure III.23). Les résultats obtenus montrent que la surface est composée de deux régions : convexe et selle de cheval.



**Figure III.23.** Régions de la surface.

Une fois les régions sont créées, les différents paramètres sont calculés. A titre d'exemple, le détail des résultats sont donnés pour la région en selle de cheval (Figure III.24).

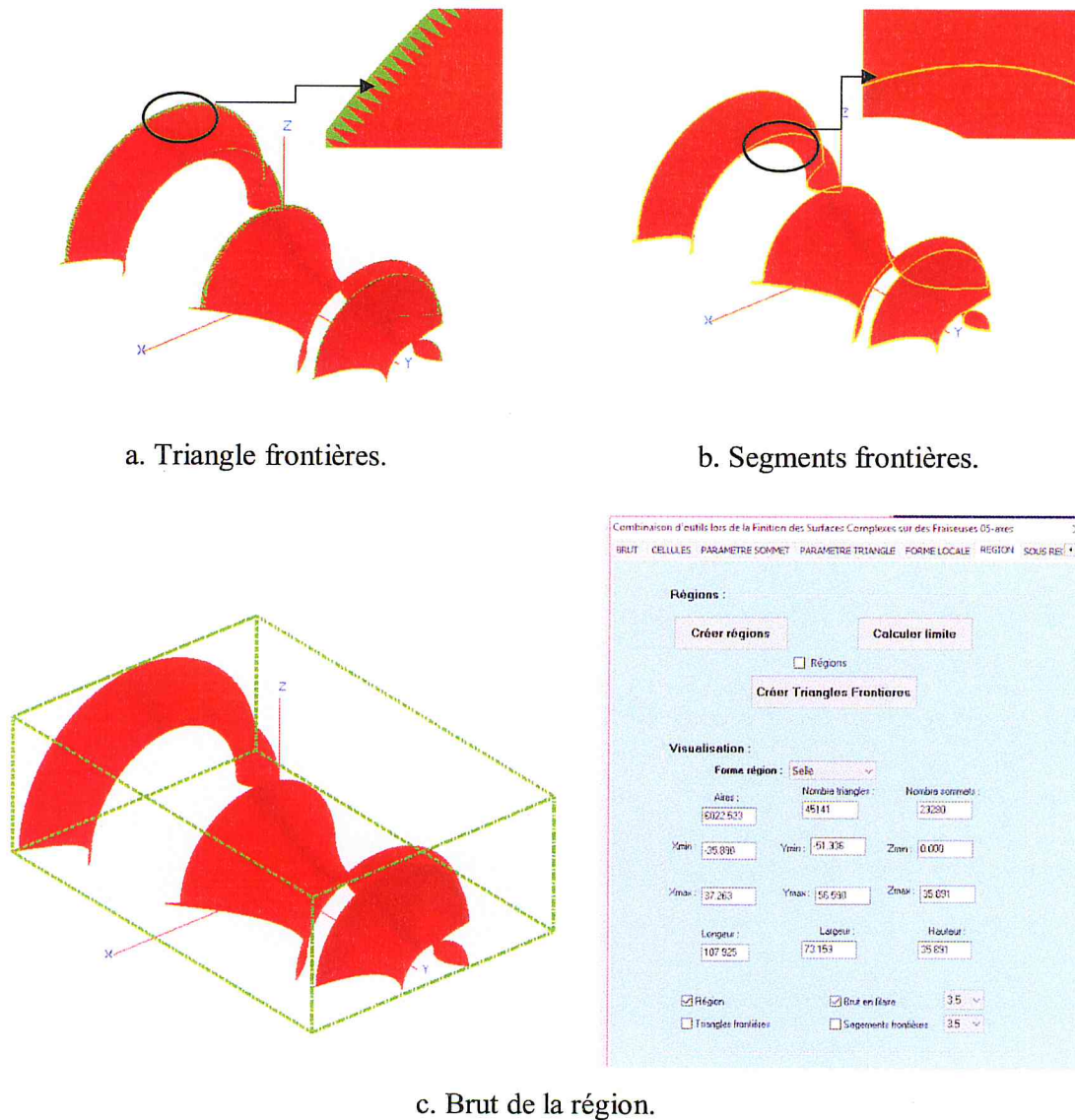


Figure III.24. Visualisation des paramètres de la région en selle de cheval.

**Étape 7 :** création des sous-régions des régions et calcul des paramètres associés. Pour visualiser le résultat obtenu, la région convexe est considérée. Cette région est composée de 4 différentes sous-régions présentées par une dégradation de couleurs (Figure III.25 et Figure III.26).

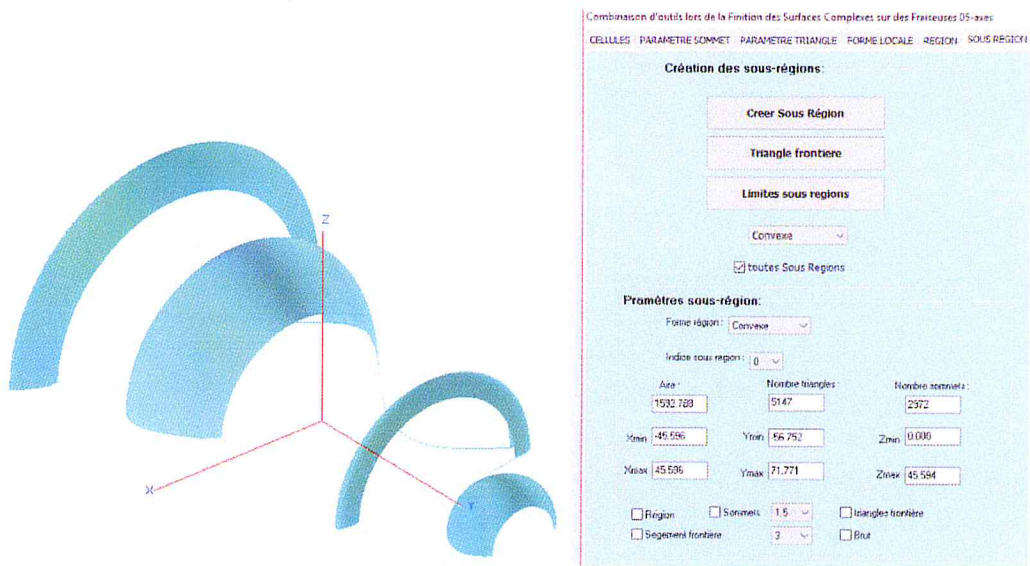


Figure III.25. Visualisation des sous-régions de la région convexe.

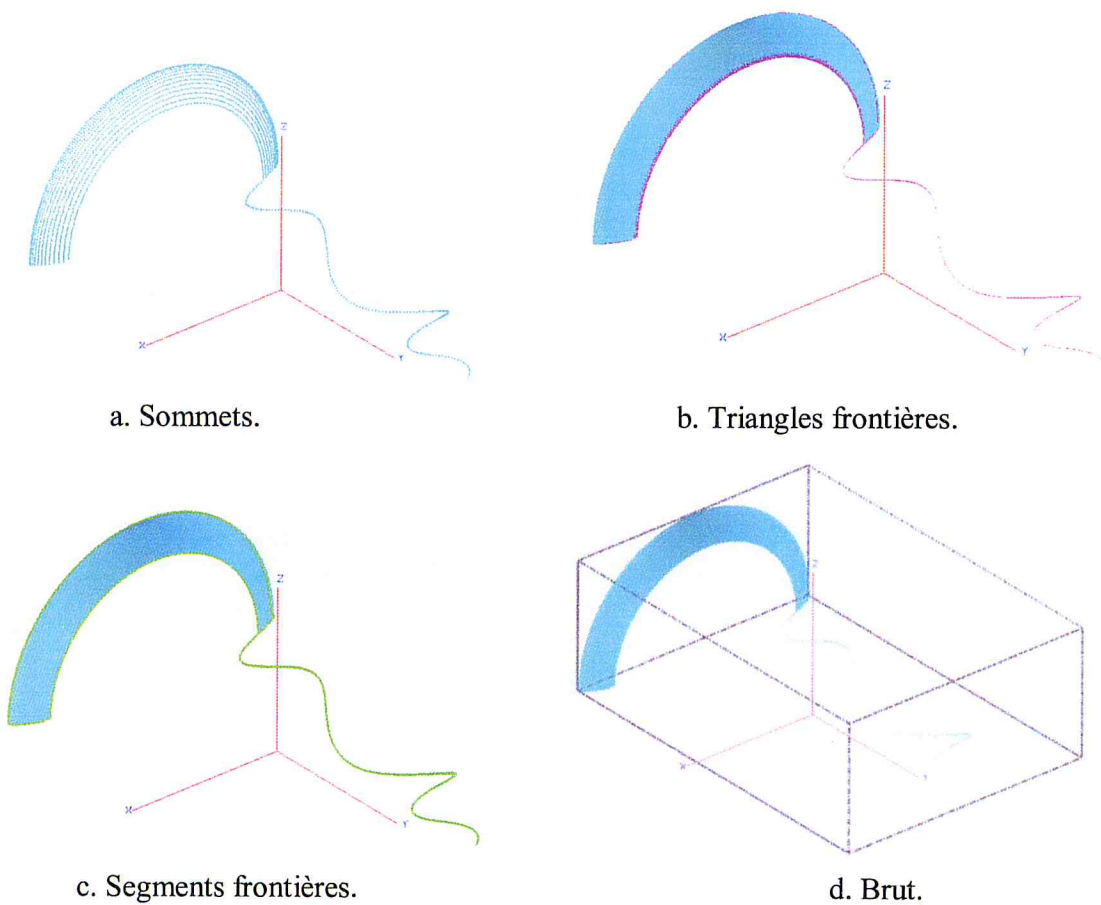


Figure III.26. Visualisation des paramètres d'une sous-région.

**Etape 8 :** dans cette étape, les trois formes d'outils à utiliser ainsi que leurs paramètres sont récupérés à partir d'une base de données afin de les utiliser.

**Etape 9 :** en chaque point de contact de la sous-région sélectionné, les paramètres d'outil sont calculés et les enveloppes sont déterminées. Par la suite les cellules qui se chevauchent avec les enveloppes d'outil sont identifiées ainsi que la détection problèmes d'interférences et de collisions en fonction de la forme d'outil et les paramètres introduits (Figure III.27 à Figure III.30).

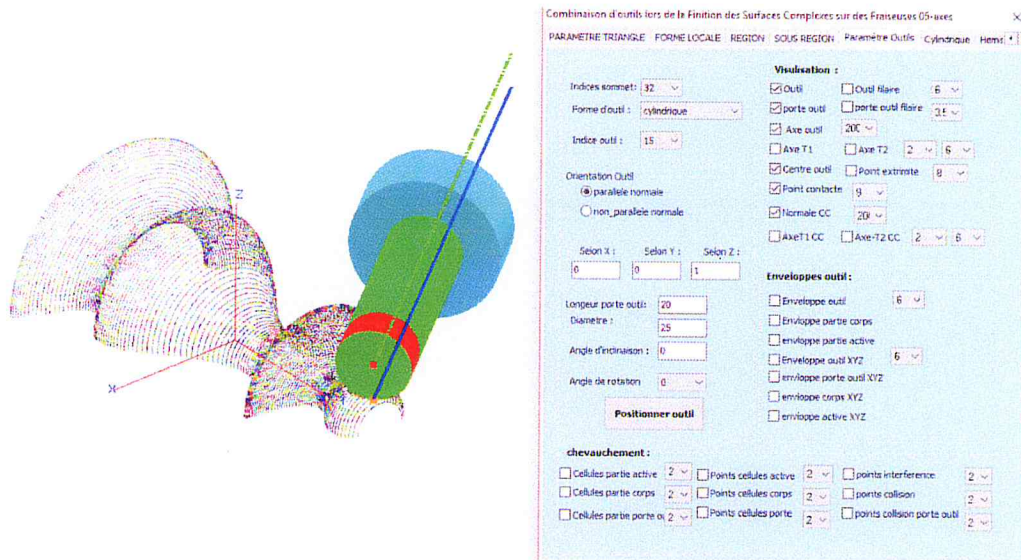


Figure III.27. Visualisation du point de contact et des paramètres d'outil.

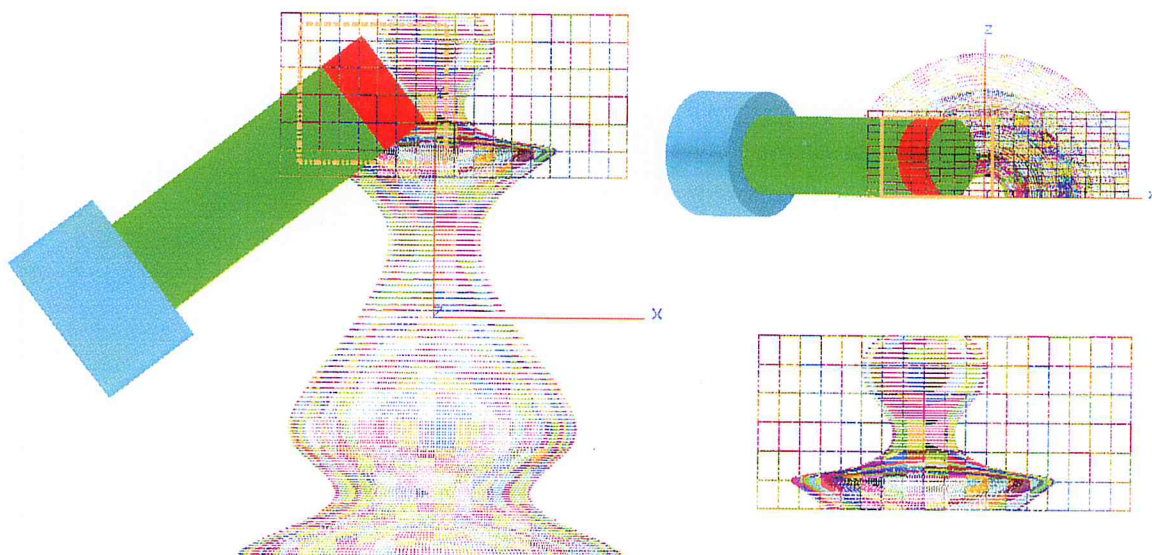


Figure III.28. Enveloppe de la partie active d'outil et cellules de chevauchement.

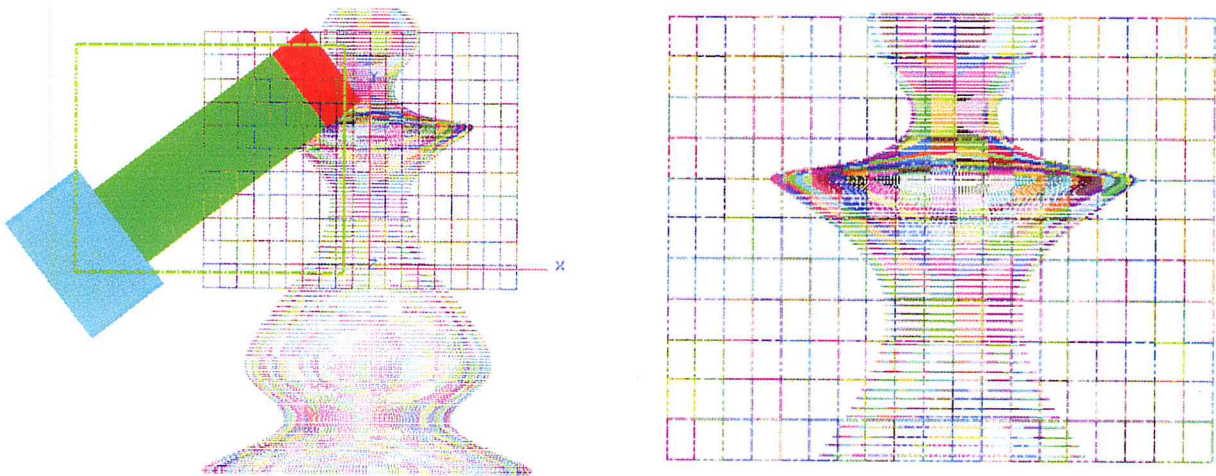
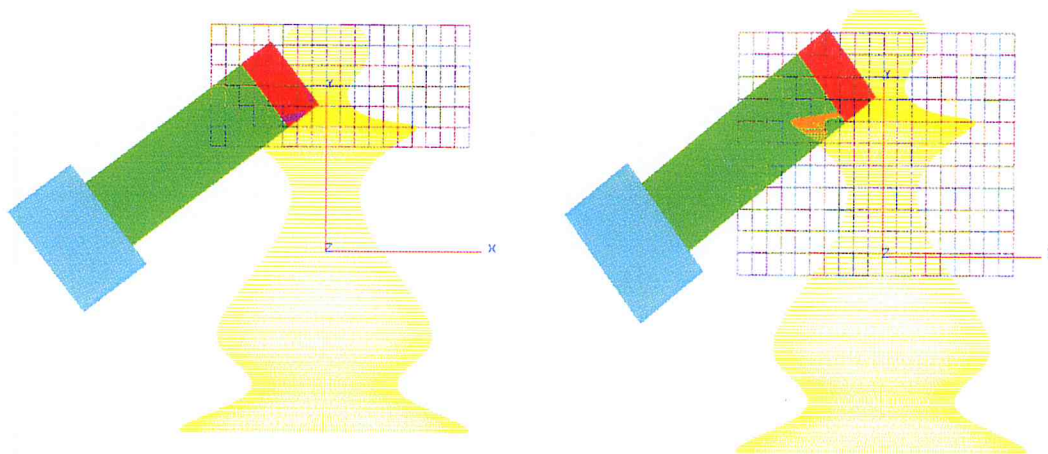


Figure III.29. Enveloppe de la partie corps d'outil et cellules de chevauchement.

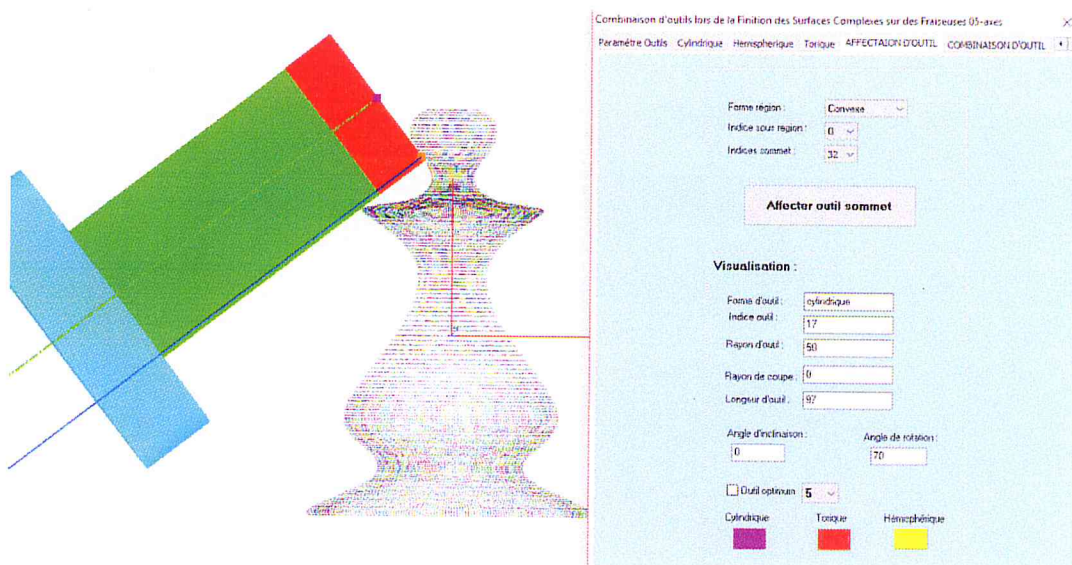


a. Points provoquant interférences.

b. Points provoquant collisions.

Figure III.30. Point de contact avec interférences et collisions.

**Etape 10 :** cette étape sert à affecter au point de contact sélectionné l'outil optimum. L'affectation est réalisée en parcourant la base des données d'outils du plus grand au plus petit jusqu'à trouver la position de l'outil hors collisions et hors interférences. En cas de collisions ou d'interférences, une réorientation d'outil est appliquée pour éviter ces problèmes. La Figure III.31 montre un exemple d'affectation telle qu'une réorientation d'outil est effectuée en appliquant une rotation autour de la normale.



**Figure III.31.** Affectation de l'outil optimum au point de contact.

### Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté notre application afin de valider les résultats obtenus. Dans un premier temps, nous avons présenté l'environnement de développement de notre application ainsi que les interfaces pour décrire les différentes fonctionnalités. Dans un second temps, nous avons testé les différentes fonctionnalités de notre application à travers un exemple depuis la lecture du fichier STL jusqu'à l'affectation de l'outil optimum pour chaque point de contact de la surface.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé au sein de l'équipe « Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur » «CFAO » de la Division Productique et Robotique du « CDTA » s'articule autour du développement d'une application logicielle graphique et interactive sous Windows, ayant pour but la combinaison des trois formes d'outils « Cylindriques, Hémisphériques et Toriques » lors de la finition des surfaces de formes complexes, définies par leurs modèles « STL », sur des fraiseuses numériques à 05-axes, en considérant les formes locales des surfaces et les temps d'usinage.

Lors de la réalisation de ce projet, une étude bibliographique relative aux méthodes de conception et d'usinage des surfaces gauches en 05-axes a été menée. Par la suite, l'approche utilisée pour déterminer la combinaison optimale des trois formes d'outils permettant l'évitement des interférences et des collisions sous certaines contraintes géométriques et technologiques; ainsi que les algorithmes développés ont été détaillés. L'achèvement du travail réalisé est l'implémentation de l'approche sous Windows en utilisant le langage C++, l'environnement de développement Embarcadero et la bibliothèque graphique OpenGL

Le résultat de l'application développée est l'intégration à l'application logicielle graphique de l'équipe « CFAO » des fonctions qui permettent de :

- ✓ Structurer efficacement le modèle « STL ».
- ✓ Calculer les paramètres du modèle « STL ».
- ✓ Déterminer la forme locale des sommets et des triangles.
- ✓ Créer les régions.
- ✓ Subdiviser les régions en sous-régions.
- ✓ Positionner les outils tout en évitant les problèmes d'interférences et de collisions.
- ✓ Déterminer l'outil optimum de chaque sommet.
- ✓ Déterminer la combinaison optimale des outils hémisphériques, cylindrique et toriques.

De part ce qui précède, nous pouvons en conclure que la finition des surfaces gauches peut être réalisée par des outils cylindriques, hémisphériques et toriques et la sélection des outils adéquats conduit à l'obtention d'un bon état de surface en un minimum de temps.

En perspective à notre travail, nous recommandons de traiter les points suivants :

- Calcul des cônes de visibilité et d'accessibilité pour accélérer la correction des interférences et des collisions.
- Proposition d'une nouvelle approche pour l'orientation de l'outil pour éviter les interférences et les collisions.
- Génération du programme d'usinage « G-Code » pour n'importe quelle cinématique des fraiseuses numériques 05-axes.
- Simulation de l'opération d'enlèvement de matière en finition 05-axes en considérant l'outil générique.
- Simulation virtuelle de la cinématique des fraiseuses numériques 05-axes.
- Ebauchage des surfaces gauches en 05-axes.
- Détermination des conditions de coupe optimales.
- Génération du trajet d'outil en utilisant d'autres stratégies d'usinage (Plans Parallèles, Isoparamétrique, Iso-Crête, ...etc.).
- Génération du trajet d'outil en utilisant l'interpolation polynomiale et en B-Spline.
- Finition des surfaces gauches avec le profil de la fraise (fraisage en roulant).



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Nguyen Tan, K. « Surfaces polyédriques et surfaces paramétriques : une reconstruction par approximation via les surfaces de subdivision ». 2010. Thèse de Doctorat. Aix-Marseille 2, France.
2. Bouyaiche, I. Kouihal, S. « Développement d'une Application pour la Finition des Surfaces Complexes sur des Fraiseuses à 05-axes par l'Intégration des Trois Formes d'Outils Cylindrique, Hémisphérique et Torique ». 2017. Mémoire de fin d'études. Université Saad Dahlab, Blida.
3. En ligne : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Plan\\_tangent](https://fr.wikipedia.org/wiki/Plan_tangent)
4. En ligne : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Normale\\_%C3%A0\\_une\\_surface](https://fr.wikipedia.org/wiki/Normale_%C3%A0_une_surface)
5. En ligne : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbure\\_d%27un\\_arc](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbure_d%27un_arc)
6. Bendifallah, M. Bey, M. Mazouzi, M. Zahra, F. Louajdi, F. « Optimisation de l'usinage par simulation de l'outil de production intégrant le couplet «modèle géométrique pièce/modèle cinématique de MOCN ». 5<sup>ème</sup> Journées de Mécanique, JM'05, 28-29 Mars 2006, École Militaire Polytechnique –EMP-, Alger.
7. Bey, M. Bendifallah, M. Kader, S. Boukhalfa, K. « Optimisation de l'Usinage des Surfaces Gauches par l'Intégration des Formes Locales des Surfaces et des Stratégies d'Usinage ». 6<sup>ème</sup> Journées de Mécanique, JM'EMP06, 15-16 Avril 2008, École Militaire Polytechnique -EMP-, Alger
8. En ligne : <http://junior.universalis.fr>
9. En ligne : <https://www.futura-sciences.com>
10. En ligne : <http://aip-primeca.ups-tlse.fr/themes/fao.html>
11. En ligne : <https://fr.wikipedia.org/wiki/St%C3%A9olithographie>
12. Bey, M. Bendifallah, M. Kader, S. Boukhalfa, k. « Cutting tool combination and machining strategy affectation based on the determination of local shapes for free form

- surfaces ». In : Smart Manufacturing Application, 2008. ICSMA 2008. International Conference on. IEEE, 2008. p. 120-125.
13. La Greca, R. « Segmentation de nuages de points et courbures discrètes pour la reconstruction ». Rapport de DEA, Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II), 2001.
  14. Perles, A. « Optimisation d'usinage de surface gauche par système multi-agent auto-organisateur ». 2013.
  15. En ligne : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Usinage>
  16. En ligne : <http://www.usimm.ca/quelles-sont-les-differences-entre-lusinage-3-axes-et-5-axes/>
  17. Kheris, L. Hedroug, W. « Conception et Développement d'une Application de Simulation d'Enlèvement de Matière Lors de la Finition des Surfaces Complexes sur Fraiseuses 05-axes ». 2016. Mémoire de fin d'études. Université Saad Dahlab, Blida.
  18. Djebali, S. « Optimisation globale du processus d'usinage des surfaces gauches ». 2014. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, France.
  19. Danjou, C. « Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrées ». 2015. Thèse de Doctorat. Compiègne, France.
  20. Bettine, F. « Etude de processus d'usinage des pièces mécaniques sur des machines CNC 5 axes ». 2012. Thèse de Doctorat. Université Mohamed Khider, Biskra.
  21. Bensaada, S. « Coupe des métaux ».
  22. Gilles, P. « Positionnement d'outil torique pour l'usinage de surfaces gauches en fraisage 5-axes avec équilibrage de l'effort de coupe transversale ». 2008. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, France.
  23. Bendifallah, H. Bey, M. Ould Amar, W. Mahroug, N. « Optimisation de l'Opération de Finition des Surfaces Gauches par la Combinaison des Formes et des Dimensions d'Outils à Partir des Modèles STL ». Congrès Algérien de Mécanique, CAM2011, 14-17 novembre 2011, Guelma, Algérie.

24. En ligne : <https://fr.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>
25. En ligne : <https://fr.wikipedia.org/wiki/OpenGL>
26. En ligne : <https://fr.wikipedia.org/wiki/C%2B%2BBuilder>
27. En ligne : <https://www.embarcadero.com/>

