

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

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



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention

D'un Diplôme de Master en Informatique

Option : Génie des Systèmes Informatiques

THÈME :

**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**

Réalisé par :

M^{lle}. BOUYAICHE Imane

M^{lle}. KOUHAL Soumia

Soutenue le : 01-07-2017 , devant :

Mr. Kameche Abdallah Hicham

Promoteur

Mr. Bey Mohamed

Encadreur

Mr. BENDIFALLAH Hassen

Encadreur

Mr. Benyahia Mohamed

Président

Mr. Chemchem

Examineur

2016/2017

Remerciement

Avant tout nous devons remercier Allah, le tout puissant de nous avoir donné la force afin de mener à bien ce travail. Elhamdulillah.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur et à mademoiselle Belkacemi Nour el Houda qui ont proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres d'équipe CFAO au niveau du CDTA pour leurs encouragements et leurs conseils.

Nos sincères remerciements vont à nos encadreurs monsieur Bey Mohammed et monsieur Bendifallah Hassene qui ont bien voulu nous accueillir au sien de leur équipe CFAO et nous les remercions pour la documentation mise à notre disposition, leurs aides précieuses et leurs conseils tout au long de ce projet, voire leurs conseils pour notre vie professionnelle, pour leur grande disponibilité et leurs encouragements et qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

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

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Imane et Soumia

Je dédie ce travail

À la mémoire de ma tante et de ma grande mère.

À La plus belle créature que Dieu a créée sur terre...

À cette source de tendresse, de patience et de générosité....

À la personne qui m'a donnée la vie, le courage et le soutien Tout au long de ma vie, Ma mère Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte, en témoignage, je t'offre ce modeste travail pour je te remercie pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée.

À Mon cher père qui a toujours veillé également à

Ma réussite et mon succès.

À Ma chère tante Fatiha symbole de soutien moral.

À Mon oncle Mounir et sa femme Wahiba ainsi que ses fils Moussab,

Ziyed et sa merveilleuse fille Arwa.

À ma très chère sœur Nesrine.

À mes très chères frères Aimen, Sami et Sife el-dinne.

À tous mes cousins et cousines, Ratiba, Cherifa, Farida, Hakima et Kenza, ainsi que leurs enfants.

À la personne qui m'a soutenu et supporté mes problèmes, ma folie tout au long de l'année

Mon binome et ma sœur « Kouihal Soumia » merci beaucoup ma chérie.

À tous mes amis : Saida, Asma, Sofia, Zahra, Khianssa, Sarah, Raouf, Othmane, Asma,

Nesrine, Awatif, Meriem, Houda, Karima, Yacine, hayet, walid, Tadjou.

À tous les étudiants de la promotion 2016/2017 Option GSI.

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

Imane.

Je dédie ce modeste travail :

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre, ma mère : Tu m'as donnée la vie, le courage et la tendance pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte, en témoignage, je t'offre ce modeste travail pour je te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée.

À mon père :

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne serait exprimer mes sentiments que dieu te préserve et te procure santé et long vie.

À ma très chère sœur Fatima.

À mes très chers frères Mohamed, Ahmed et Abdou

À ma très chère belle sœur Lamia.

À ma très chère cousine Faiza.

Un spécial dédicace à une personne qui a été très patiente et satisfaite avec moi ; ma copine et ma sœur qui peut pendant toute l'année trouve les moyens et les mots corrects pour me diriger vers la bonne voix :

Mon binôme « Bouyaiche Imane » Je te remercie infiniment.

À mes intimes Karima et Karima un grand merci pour vous.

À mes amis : Ikram, Khansa, Zahra, Saida, Nesrin, Assma, Sofya, Soumia, Khadidja, Zineb, Salima, Assma, Sarah, Houda, Mounira, Mahie eldine, Sid-ali, Yacine, Abd el Raouf, Othmane et Walid .

Qui sans leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.

À tous les étudiants de la promotion 2016/2017 Option GSI.

À toute ma famille et à tous ceux que j'aime.

Soumia

Résumé

Ce travail s'intègre dans le cadre de développement d'un environnement de fabrication de surfaces gauches initié au niveau de l'équipe CFAO du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).

L'objectif de ce travail est le développement d'une approche géométrique basée sur le concept de la forme générique de l'outil pour générer le trajet d'usinage pour différentes formes d'outil (hémisphérique, cylindrique, torique, conique, ...etc.) hors interférences et hors collisions afin d'usiner des pièces avec des surfaces de formes gauches sur des fraiseuses numériques à 05-axes à partir d'un modèle STL.

Pour ce faire, des approches géométriques sont développées pour la détermination des interférences et des collisions et des orientations pour la correction.

Mots clés : surface gauche, usinage 05-axes, interférence, collision, outil générique, outil hémisphérique, outil cylindrique, outil torique.

ملخص

نهتم في هذه المذكرة بتطوير مجال تصنيع القطع ذات الأسطح المعقدة التي يتم معالجتها على مستوى وحدة التصنيع و الروبوتيك التابعة لمركز تنمية التكنولوجيات المتطور الهدف من هذا العمل هو تصميم برنامج لتحديد مسارات أدوات قطع ذات نهايات كروية، أسطوانية و حلقة بالاعتماد على الشكل العام لمجموع هذه الأشكال دون تداخل أو تصادم مع المساحات لأجل ذلك نستعمل طرق تستند على أسس المراد تصنيعها على ماكينات 5 محاور ارتكازا على تمثيل مرقم، لأسطح هندسية لتحديد التداخل و التصادم و تقنيات التوجيه و الإنحناء المطبقة على أداة القطع لتصحيحها.

الكلمات المفتاحية: المساحات الحرة، تصنيع 5 محاور، تداخل و تصادم، أداة قطع ذات شكل عام، أداة قطع كروية، أداة قطع أسطوانية، أداة قطع حلقة،

Abstract

This work is a part of the software developed by CAD/CAM team at CDTA. The objective of this work is to develop a geometric approach based on the concept of the generic form of the tool to generate the machining tool path for different tool shapes of tools (ball end tools, flat end tool and toroid end tool, conical tool, ...etc.) and avoiding interferences and collisions in order to machine parts with free form surfaces on 05-axis CNC milling machines from STL models.

To do this, geometric approaches are adopted for the determination of interferences and collisions and orientations of tools for the correction.

Key words: free form surface, 05-axis machining, interference, collision, generic tool, ball end tools, flat end tool, toroid end tool.

Le processus de réalisation des pièces avec des surfaces de formes libres telles que les moules les matrices, les formes aérodynamiques comme les hélices et les aubes de turbines requièrent une très grande expertise afin de garantir la qualité des surfaces usinées ainsi que des temps d'usinage minimum. Généralement, le procédé de fraisage est adopté pour la réalisation de ces pièces. Les formes de ces pièces sont obtenues par enlèvement de matière et sans déformation suite au balayage de l'outil de coupe pour couvrir toute la surface et en utilisant des stratégies d'usinage et des outils de coupe adéquats tout en respectant les formes géométriques exigées par la fabrication, le dessin et le cahier des charges. La stratégie d'usinage est un ensemble de trajets d'usinage successifs juxtaposés en fonction de certains critères d'optimisation tels que la qualité de la surface, le temps d'usinage, la rigidité de l'outil, les coûts de réalisation, ...etc.

Ces surfaces complexes, appelées aussi surfaces gauches ou surfaces de formes libres, sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de surfaces concaves, convexes, selle de cheval ou à double courbure.

Outre la complexité de l'opération d'usinage, s'ajoute la difficulté de considérer l'ensemble des formes complexes et du design. La production de ces surfaces est un domaine complexe et est sans cesse confronté à de nouveaux défis : des exigences de précision de plus en plus grandes, des formes de plus en plus complexes, une pression relative aux coûts croissants, une meilleure efficacité et une plus grande productivité. En effet, de nombreux paramètres conditionnent le processus d'usinage, tels que les caractéristiques géométriques des outils de coupe, le posage de la pièce dans l'espace machine, la stratégie de balayage de la surface, le choix de la direction d'usinage, les conditions de coupe, ... etc. Le choix de ces paramètres s'effectue aujourd'hui par expérience mais il s'avère très complexe de prendre en compte l'ensemble des contraintes et caractéristiques d'un problème global d'usinage de surfaces gauches. Cette difficulté impose la décomposition du problème selon une certaine logique et prendre en compte les caractéristiques et contraintes liées à chaque sous-problème.

L'équipe Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur « CFAO » du Centre de Développement des Technologies Avancées « CDTA » active dans le domaine de l'usinage des surfaces gauches depuis une quinzaine d'années dont une dizaine d'années ont été consacrées à l'usinage des surfaces gauches en trois axes. Les principaux travaux réalisés par l'équipe CFAO liés à l'usinage en cinq axes se résument au développement de modules logiciels pour :

- Identifier les contours de passage de l'outil en utilisant la stratégie «Z-Constant».
- Déterminer les orientations de l'outil hémisphérique évitant les interférences.
- Déterminer les orientations de l'outil hémisphérique évitant les collisions.
- Déterminer l'outil hémisphérique optimum en chaque point de contact outil-surface évitant les interférences.
- Déterminer les orientations de l'outil hémisphérique évitant les collisions en chaque point de contact outil-surface en utilisant une approche basée sur le concept de compensation de rayon d'outil pour la génération de trajet d'outil.

- La combinaison optimale des outils hémisphériques permettant la minimisation des temps d'usinage.
- Génération des trajets d'outils pour l'opération de finition.
- Simulation virtuelle de l'opération d'enlèvement de matière pour l'opération de finition avec des outils hémisphériques en utilisant les Triple-Dexels.

L'objectif fixé dans ce projet consiste à proposer et à développer une approche pour la finition des surfaces gauches en cinq axes en utilisant le concept de l'outil générique standard. Pour cela, les informations issues du module de génération des point de contact développé antérieurement pour et le modèle discret des surfaces sont exploitées pour générer le parcours d'outil quel que soit sa forme tout en évitant les interférences et les collisions.

Dans ce même contexte, il nous a été confié de traiter la génération du chemin d'outil en cinq axes en utilisant la stratégie d'usinage « Z-Constant » appliquée à des surfaces gauches présentant des flanc en contre dépouille et définies par leurs modèle STL en considérant un outil générique standard. L'objectif de ce travail est la mise en place d'une application logicielle graphique et interactive en considérant les contraintes suivantes :

- ✓ Surfaces représentées par leurs modèles STL.
- ✓ Surfaces gauches avec des régions en contre dépouille.
- ✓ Stratégie d'usinage « Z-Constant ».
- ✓ Outil générique standard (cylindrique, torique ou hémisphérique).
- ✓ Génération du trajet pour la finition des surfaces complexes.

Autrement dit, Il s'agit de positionner l'outil générique sur une surface gauche et de définir son orientation pour assurer un usinage continu sans interférences et sans collisions. Pour atteindre cet objectif, une étude sur l'état de l'art sur le processus de fabrication des surfaces gauches incluant les stratégies d'usinages, le positionnement des outils, les machines outil, les outils de coupe ainsi que le modèle de représentation des surfaces.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Dans une présentation du contexte et des objectifs de l'étude, des notions sur les surfaces complexes et leurs modèles de représentation, les machines et les outils utilisés pour le fraisage en cinq axes en bout ainsi que les stratégies d'usinages sont présentés dans le premier chapitre. Le deuxième chapitre est réservé à la présentation de l'approche présentée tout en mettant l'accent sur la géométrie de l'outil générique. Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la conception de l'application ; les différentes approches ; algorithmes utilisés et les exemples de validation du travail effectué.

Pour achever une conclusion et les éventuelles perspectives de ce travail seront présentées.

Table des matières

Table des figures.....	1
Liste des tableaux.....	3
Liste des organigrammes.....	3
1. Etude des surfaces.....	8
1.1. Forme non paramétrique.....	8
1.2. Forme paramétrique.....	8
1.2.1. Méthode de conception des surfaces paramétriques.....	9
2. Usinage des surfaces gauches.....	9
2.1. Conception assisté par ordinateur CAO.....	10
2.2. Fabrication assisté par ordinateur FAO.....	10
3. Entité géométrique et association des stratégies d'usinage.....	11
4. Format d'échange de données.....	11
4.1 STL (Standard Tessellation Language).....	11
4.1.1. Structure de fichier STL.....	12
5. Processus d'usinage.....	14
5.1. Stratégie d'usinage des surfaces gauches.....	14
5.2. Gamme d'usinage.....	15
5.3. Usinage.....	16
5.3.1. Usinage 05-axes.....	16
5.3.2. Phases d'usinage.....	18
5.3.3. Stratégies d'usinage.....	18
6. Machine-outil.....	20
6.1. Machine-outil à commande numérique.....	20
6.1.1. Principales machines-outils à commande numérique.....	21
6.1.2. Présentation des fraiseuses.....	22

6.1.3. Types des fraiseuses.....	22
7. Outil de coupe.....	23
7.1. Types d'outils de coupe.....	23
7.2. Positionnement d'outil.....	26
7.3. Orientation des outils.....	27
8. Problèmes des interférences et des Collisions.....	28
8.1. Types des interférences.....	29
8.2. Evitement des interférences et des collisions.....	30
8.3. Détection des positions de vitesse nulle.....	30
9. Conclusion.....	30
1. Architecture générale de l'application.....	33
1.1. Restructuration du fichier STL.....	35
1.2. Enrichissement du modèle STL.....	35
1.3. Création du brut.....	36
1.4. Création des cellules de points.....	36
1.4.1. Affectation des sommets aux cellules.....	37
1.4.2. Organigramme d'affectation des sommets aux cellules.....	38
1.5. Création des contours.....	38
1.6. Positionnement d'outil générique.....	40
1.7. Détermination de la zone d'interférence et de collision.....	42
1.8. Test d'interférence et de collision.....	45
1.8.1. Vérification d'interférence et de collision.....	48
1.8.2. Evitement d'interférences et de collisions.....	53
2. Conclusion.....	54
1. Présentation du Language C++.....	55
1.1. Motivation de l'utilisation de Language C++.....	56

2. Présentation d'OpenGL.....	56
3. Présentation de Borland C++ Builder 6.....	56
4. Interface générale de l'application.....	57
4.1. Simulation et capture d'écran.....	57
4.1.1. Lecture du fichier STL.....	58
4.1.2. Préparation des données.....	59
4.1.3. Création des contours d'usinage.....	59
4.1.4. Formes d'outil.....	60
4.1.5. Test d'interférences et de collisions.....	61
4.1.6. Evitement d'interférences et de collisions.....	62
4.1.7. Simulation virtuelle des mouvements de l'outil.....	63
5. Exemple de validation.....	64
6. Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	76
Bibliographie	78

Tables des figures :

Figure 1 : Surface paramétrique.....	9
Figure 2 : Surface simple et Surface composée.....	9
Figure 3 : Modèle STL d'un modèle continu.....	12
Figure 4 : Format ASCII du modèle STL.....	13
Figure 5 : Format Binaire du modèle STL.....	13
Figure 6 : phases du processus d'usinage.....	15
Figure 7 : Orientation de l'outil en 3 axes et en 5 axes.....	17
Figure 8 : Types de fraiseuse à commande numérique.....	17
Figure 9 : Positionnement de l'outil en 3 axes et en 5 axes.....	17
Figure 10 : Phase d'usinage.....	18
Figure 11 : Modes de balayage pour les stratégies iso paramétriques.....	19
Figure 12 : Stratégie des Plans Parallèles.....	19
Figure 13 : Stratégie Z-Constant.....	20
Figure 14 : Structure d'une MOCN.....	21
Figure 15 : Géométrie de l'outil générique.....	24
Figure 16 : Paramétrage des outils cylindriques, toriques et hémisphériques.....	24
Figure 17 : Outil hémisphérique.....	25
Figure 18 : Outil cylindrique.....	25
Figure 19 : Outil torique.....	26
Figure 20 : Point extrémité l'outil (point CL).....	26
Figure 21 : Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil.....	27
Figure 22 : Modes d'orientations de l'axe de l'outil en 05-axes.....	28
Figure 23 : Types d'interférences.....	29
Figure 24 : Enrichissement de modèle STL.....	35
Figure 25 : Création du brut.....	36
Figure 26 : Création des cellules.....	37
Figure 27 : Affectation des points aux cellules.....	37

Figure 28 : Contours d'usinage.....	39
Figure 29 : Positionnement d'outil générique.....	41
Figure 30 : Points spécifiques C_C , C_E et C_L des trois formes d'outil.....	42
Figure 31 : Enveloppe de l'outil.....	44
Figure 32 : Test de collision et d'interférence.....	47
Figure 33 : Changement de repère.....	47
Figure 34 : Entité géométrique constituant l'outil générique.....	49
Figure 35 : Détection de l'interférence dans la partie tronc conique.....	51
Figure 36 : Détection de l'interférence dans la partie torique.....	52
Figure 37 : Détection de l'interférence dans la partie conique.....	52
Figure 38 : Orientation d'outil.....	53
Figure 39 : Forme de la pièce de test.....	57
Figure 40 : Ongle « Lecture du fichier STL ».....	58
Figure 41 : Ongle «Préparation des données ».....	59
Figure 42 : Ongle « calcul des contours d'usinage ».....	60
Figure 43 : Formes d'outils.....	61
Figure 44 : Test d'interférence et de collision.....	62
Figure 45 : Evitement d'interférences et de collisions.....	63
Figure 46 : Simulation virtuelle des mouvement de l'outil	63
Figure 47 : Modèle CAO de la pièce de test et les modèles STL associés	64
Figure 48 : Sélection d'un fichier STL.....	65
Figure 49 : Estimation des normales.....	66
Figure 50 : Enrichissement du modèle STL.....	66
Figure 51 : Division de la pièce en cellules.....	67
Figure 52 : Contours d'usinage et normales aux points contacts.....	67
Figure 53 : Formes d'outils.....	68
Figure 54 : Enveloppe d'outil et cellule de chevauchement pour l'outil torique.....	68
Figure 55: Enveloppe d'outil et cellule de chevauchement pour l'outil cylindrique.....	69
Figure 56 : Enveloppe d'outil et cellule de chevauchement pour l'outil hémisphérique.....	69
Figure 57: Types des points de contacts pour l'outil torique.....	70
Figure 58: Types des points de contacts pour l'outil hémisphérique.....	70
Figure 59: Types des points de contacts pour l'outil cylindrique.....	70

Figure 60: Orientation d'outil autour de segment.....	71
Figure 61: Inclinaison de l'outil vers le segment.....	71
Figure 62: Enveloppe des outils lors de l'orientation.....	72
Figure 63: Enregistrement des paramètres du trajet d'usinage.....	72
Figure 64: Simulation des mouvements.....	73
Figure 65: Résultats du modèle STL fin.....	74

Liste des Organigrammes :

Organigramme 1 : vue générale de l'application.....	33
Organigramme 2 : Architecture générale de l'approche implémenté.....	34
Organigramme 3 : Affectation des points aux cellules.....	38
Organigramme 4 : Génération des contours.....	39
Organigramme 5 : Détermination des zones d'interférence et de collision.....	44

Liste des Tableaux :

Tableau 1 : Principales caractéristiques de modèle STL.....	12
Tableau 2 : Avantages et inconvénients de modèle STL.....	13
Tableau 3 : Comparaison entre modèle grossier et modèle fin.....	74

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LE PROCESSUS D'USINAGE DE SURFACES GAUCHES

Introduction

I.1 Représentation des surfaces.

I.2 Usinage des surfaces gauches.

I.3 Entité géométrique et association des stratégies d'usinage.

I.3 Format d'échange de données.

I.4 Processus d'usinage.

I.5 Machine-outil.

I.6 Problèmes d'interférence et de collision.

Conclusion.

Introduction

Dans divers domaines d'activité tels que l'aéronautique, l'automobile ou les biens d'équipements, la concurrence conduit à l'élaboration de produits au design toujours plus complexe et de meilleure qualité. Ces produits allient à la fois esthétique et fonctionnalité. Les produits de ce genre les pièces complexes de structures d'avion, de carrosseries d'automobile ou encore les coques des appareils électroménagers.

Ces surfaces complexes, appelées aussi surfaces gauches, sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de surfaces concaves, convexes ou à double courbure. La fabrication de ces surfaces se fait par le procédé d'enlèvement de matière. Outre la complexité de l'opération d'usinage classique, se basant souvent sur des réalisations existantes servant de modèles de départ, s'ajoute la difficulté de considérer l'ensemble des formes complexes et du design. Les concepteurs sont confrontés à un double challenge, réaliser des surfaces à topologie complexe et de qualité élevée en un minimum de temps.

La génération du trajet d'outils en finition de ces surfaces, passe impérativement par la manipulation des informations issues du modèle de surfaces de l'objet à usiner, la définition des formes et des dimensions des outils d'usinage, la sélection des stratégies d'usinage les mieux appropriées en fonction de la géométrie des surfaces, la détermination des conditions de coupe et enfin la sélection de la cinématique des machines outil à utiliser.

Ce chapitre est organisé en trois parties. Dans la première partie, une présentation succincte des différents modèles de représentation des surfaces complexes ainsi que le format d'échange de données est réalisée. La deuxième partie est consacrée à la présentation des machines-outils à commande numérique ainsi que les outils d'usinage utilisés en finition en introduisant le concept de l'outil générique standard. La dernière partie est réservée à l'étude du processus d'usinage des surfaces complexes sur des fraiseuses numériques à 05-axes.

1. Etude des surfaces :

Les surfaces sont classées en deux grandes catégories selon leurs représentations.

1.1. Forme non paramétrique [1] :

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 fréquente.

- **Forme implicite** : ces formes sont définies par une fonction de trois variables :

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

La forme implicite 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(\)$, $Z(\)$ qui dépendent de deux paramètres u et v . Une surface paramétrique est donnée par la formulation suivante (Figure 1) :

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

Où 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 $(1, 1)$.

En général, les surfaces paramétriques ne sont pas utilisées individuellement mais plusieurs morceaux de surfaces paramétriques sont raccordés entre eux avec des contraintes de continuité pour former une surface plus complexe (Figure 2).

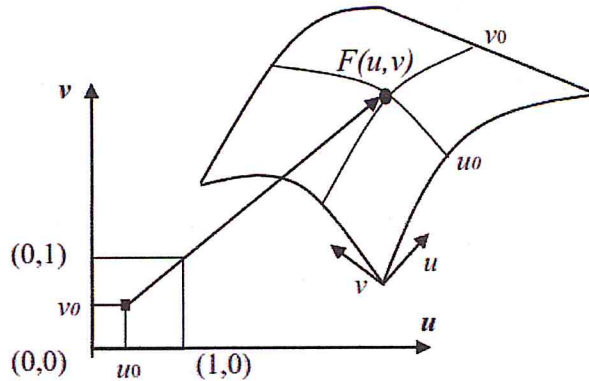
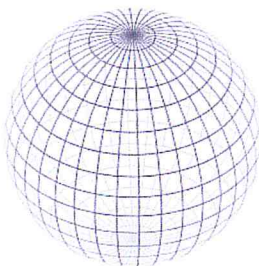


Figure 1 : Surface paramétrique.



a. Surface simple.



b. Surface composée de plusieurs morceaux.

Figure 2 : Surface simple et surface composée.

1.2.1. Méthode de conception des surfaces paramétriques

Lors de la conception d'une surface, dans la plupart des situations, ni sa représentation mathématique ni ses propriétés géométriques ne sont connues, seule sa forme générale est représentée dans l'esprit du concepteur. La conception suit alors l'une des deux méthodes principales suivantes [1, 2]:

- **Méthodes à base de points** : cette classe de méthodes est basée sur l'utilisation des points pour concevoir une surface. Elle contient les types de surfaces suivantes [2] :
 - Surface obtenue par interpolation d'un nuage de points.
 - Surface obtenue par approximation d'un nuage de points.
- **Méthodes à base de courbes** : cette classe de méthodes est basée sur la conception d'un ensemble de courbes. Ces méthodes permettent de générer les surfaces suivantes :

- Surfaces réglées,
- Surfaces de révolution,
- Surfaces de Coons,
- Surfaces de Gordon,
- Surfaces balayées,
- Surfaces lissées.

2. Usinage des surfaces gauches :

Le développement d'un produit manufacturier a toujours impliqué plusieurs processus interactifs qui concourent à la réalisation de la fonction objective. Avec la pénétration de l'ordinateur dans le domaine de la production, la conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO) sont apparues pour faciliter et pour augmenter la vitesse de production en synthétisant deux processus distincts à savoir la CAO et la FAO [3].

2.1. Conception assistée par ordinateur « CAO » :

C'est le système (logiciel) qui permet aux concepteurs de modéliser les objets avec des contraintes souvent très avancées, de les visualiser sous une grande variété de représentations et de les tester en simulant des conditions réelles. Il offre les avantages suivants [3]:

- Augmentation de la productivité et amélioration de la qualité de la conception.
- Gestion collaborative des données et standardisation.
- Création de bases de données de fabrication.

2.2. Fabrication assistée par ordinateur « FAO » :

La fabrication assistée par ordinateur « FAO » est un processus plus en moins pré-désigné. Il prend le modèle généré dans la CAO et l'utilise pour le transcrire en un format exploitable par la commande de la machine-outil. Il offre les avantages suivants [3]:

- Dans la production à grande échelle, les résultats sont cohérents.
- Niveau de précision très élevé dans la production à grande échelle.
- Accélération de la production de produits à faible volume.

3. Entités géométrique et association de stratégies d'usinage :

Une stratégie d'usinage est une méthodologie utilisée pour générer une ou une série d'opérations dans le but de réaliser une forme donnée. Elle permet d'associer un processus d'usinage à une entité géométrique. Dans le but d'augmenter la flexibilité des stratégies, les outils spéciaux sont abandonnés et remplacés par des outils plus génériques à savoir l'outil hémisphérique et l'outil torique. Donc, il est impossible d'associer les mêmes stratégies d'usinage aux mêmes entités géométriques de bases. C'est pourquoi de nombreux travaux ont été réalisés dans le domaine de l'association des pièces de formes complexes ainsi que dans l'association de stratégies d'usinage aux entités géométriques. Tous ces travaux sont classés par la suite suivant l'implication de l'expert lors de l'association des stratégies d'usinage [4].

4. Format d'échange de donnée :

Dans un système homogène où la CAO et la FAO sont intégrées dans un seul environnement, l'information se passe simplement. Mais dans le cas où la CAO et la FAO ne font pas partie du même environnement ou tournent sous deux environnements différents, il est nécessaire d'utiliser des translateurs nommés « Formats d'échange de données » pour assurer la transmission de l'information entre ces deux plateformes distinctes et garantir la compréhensibilité [5].

4.1. STL (Standard Tessellation Language) :

Le format STL est un format dédié à la stéréo-lithographie « une technique qui permet de fabriquer un objet à partir d'un modèle numérique c.-à-d. créer un objet solide à partir d'un modèle numérique » introduit par la société 3D Systems, Le format STL permet de décrire un objet sous la forme d'un polyèdre à facettes triangulaires [5]. La figure 3 nous donne un exemple

objet sous la forme d'un polyèdre à facettes triangulaires, la figure 3 nous donne un exemple [5].



a. Modèle continu d'une surface.

b. Modèle STL de la surface continue.

Figure 3 : Modèle STL d'un modèle continu.

Le fichier STL décrit un objet par sa surface externe. Cette surface est nécessairement fermée et définie par une série de triangles où chaque triangle est décrit par une normal unique dirigée vers l'extérieur et trois points représentant ces sommets. Il ne décrit que la géométrie de la surface d'un objet en 3 dimension, ce format ne comporte notamment pas d'informations concernant la couleur, la texture ou d'autres paramètres habituels d'un modèle CAO. Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques du modèle STL.

Format	Géométrie	Volume	Texture	Echelle	Représentation	Vecteur normal
Simple, triangle défini par ses sommets	3D	Fermé	Aucune	Aucune	Pas d'équation mathématique, Modèle approximé	Dirigé vers l'extérieur

Tableau 1 : Principales caractéristiques du modèle STL.

4.1.1. Structure d'un fichier STL :

Il existe deux formats de fichier STL, un format ASCII et un format binaire. Le format ASCII est plus descriptif et lisible mais de taille plus grande. Un fichier binaire plus commun, taille plus réduite mais non lisible et trop condensé [6].

- **Format STL ASCII :** le fichier ASCII commence par une ligne de description (nom, nom de l'auteur...) précédée par le mot réservé « solid » suivie par les composantes du vecteur normal de la face triangulaire puis les coordonnées des sommets des triangles. Ces

informations sont enregistrées pour chaque triangle. Le fichier se termine par « endsolid » [7].

```

solid name
{
  facet normal ni nj nk
  {
    outer loop
    {
      vertex v1 v1 v1
      vertex v2 v2 v2
      vertex v3 v3 v3
    }
    endloop
  }
  endfacet
}
endsolid name
    
```

Figure 4 : Format ASCII du modèle STL.

- **Format STL binaire:** les fichiers STL binaires sont constitués d'une suite de bits. L'entête se compose de 84 octets. Ensuite, pour chaque facette, 50 octets sont utilisés pour représenter les x, y et z des normales aux facettes, puis 4 octets sont utilisés pour chaque coordonnée x, y et z de chaque sommet du triangle qui en résulte et 48 octets par facette. Les deux derniers octets ne sont pas utilisés [7] (Figure 5). Le Tableau 2 résume les avantages et les inconvénients du modèle STL.

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

Figure 5 : Format Binaire du modèle STL.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Format de fichier compact et simple. • Compatible avec de nombreux logiciels de modelage 3D. • Très répandu dans l'industrie des prototypes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Supprime les informations de connectivité. • Ne supporte ni la couleur ni la texture. • Erreurs topologiques pour géométrie complexe. • Temps important de génération des petits triangles et fichiers volumineux

Tableau 2 : Avantages et inconvénients du modèle STL.

5. Processus d'usinage :

L'usinage rentre dans la gamme de fabrication des pièces mécaniques. Il consiste à réaliser des pièces par enlèvement de matière en respectant l'état de surface, les tolérances de formes et la géométrie spécifiée par le dessin de définition. Ils existent principalement deux types d'opérations d'usinage : le tournage et le fraisage. Le tournage consiste à usiner une surface avec un mouvement de coupe obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin et un mouvement d'avance obtenu par le déplacement de l'outil coupant. Cette opération est utilisée pour usiner des surfaces de révolution, tandis que le fraisage résulte d'un mouvement de rotation de l'outil de coupe d'une part, et de l'avance de la pièce à usiner d'autre part [8].

Le fraisage des surfaces gauches est un domaine complexe et est sans cesse confronté à de nouveaux défis : des exigences de précision de plus en plus grandes, des formes de plus en plus complexes, une pression relative aux coûts croissants, une meilleure efficacité et une plus grande productivité. De nombreux paramètres conditionnent le processus d'usinage, tels que les caractéristiques géométriques des outils de coupe, le posage de la pièce dans l'espace machine, la stratégie de balayage de la surface, le choix de la direction d'usinage, ... etc.

Dans ce chapitre, le processus de réalisation des surfaces gauches, les stratégies d'usinage, les outils utilisés en finition et les contraintes de positionnements sont présentées.

5.1. Stratégie d'usinage des surfaces gauches :

Dans ce processus complexe, plusieurs points clefs permettent la maîtrise de l'état de surface de la pièce finie, en commençant par la phase de conception qui génère un modèle CAO puis la phase de planification « gamme d'usinage » et enfin la phase de fabrication suivie par le contrôle. La Figure 6 illustre le processus d'usinage d'une pièce.

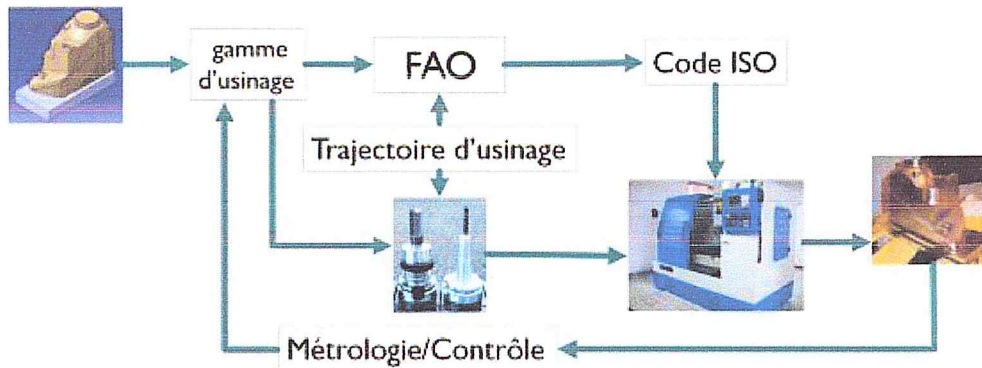


Figure 6: Phases du processus d'usinage.

5.2. Gamme d'usinage :

C'est une méthode qui permet d'établir l'ordre chronologique des différentes opérations d'usinage, de préciser ce que doit être respecté et les outils à utiliser pour permettre l'obtention d'une pièce finie conforme au dessin de définition du produit fini. Cette méthode est effectuée à partir des données suivantes [9] :

- Données relatives à la pièce: il s'agit généralement d'un dessin représentant la pièce finie d'usinage ou son modèle CAO et les informations complémentaires qui sont:
 - Qualité des différentes surfaces de la pièce et leur positionnement,
 - Matériau constituant la pièce,
 - Traitement thermique ou de traitement de surface de la pièce brute.

- Les données économiques : il s'agit du nombre de pièces à fabriquer, de la taille des lots et des délais de fabrication.

- Les données technologiques: il s'agit des machines-outils, des outils et des outillages disponibles, les possibilités des machines-outils (cinématique, courses maximales et la qualité garantie pour la série de pièces) et des conditions d'usinage (volume du copeau maximal, direction de travail).

5.3. Usinage :

L'usinage consiste à réaliser des pièces par enlèvement de matière en respectant, l'état de surface, les tolérances de formes et la géométrie spécifiée par le dessin de définition. À chaque phase de la gamme de fabrication, le bureau des méthodes établit la gamme d'usinage et associe la machine, le type d'usinage à réaliser, l'outil ainsi que le support de pièce permettant l'obtention de tous les éléments de cotation de la surface considérée. L'usinage des surfaces gauches est réalisé dans sa grande majorité par fraisage en 03, 04 et 05-axes.

5.3.1. Usinage 5axes :

En usinage 03-axes, il existe une unique position de l'outil tangente à la surface en une position donnée [10] (Figure 7.a). En usinage 05-axes, il existe une infinité de positions de l'outil tangentes à la surface au point de contact [11] (Figure 7.b).

L'usinage 05-axes intègre simultanément les trois (03) axes linéaires X, Y et Z et deux (02) axes supplémentaires de rotation autour des axes de translation (deux parmi A, B et C) (Figure 8). Par convention, « A » est la rotation autour de l'axe X, « B » est la rotation autour de l'axe Y et « C » est la rotation autour de l'axe Z. Ainsi, les faces en contre d'épouille peuvent être usinées sans démontage de la pièce grâce au deux degrés de liberté supplémentaires permettant le positionnement de l'axe de l'outil dans n'importe quelle orientation. Ces deux degrés de libertés supplémentaires comme ils augmentent les possibilités de positionnement de l'outil et d'accès aux différentes régions de la surface, ils augmentent aussi les risques d'interférences et de collisions en même temps. De là, parmi toutes les orientations possibles, il faut choisir la plus optimale. Ainsi, l'orientation de l'axe de l'outil doit être déterminée pour chaque point de contact outil/ surface. Généralement, cette orientation est choisie proche de la normale à la surface (Figure 9). En plus, il est possible de choisir différentes stratégies pour orienter l'axe de l'outil telles que le passage par un point ou le passage par un arc circulaire. Peu importe la stratégie d'orientation choisie, la vérification de l'absence des interférences et des collisions sur l'ensemble des points du trajet entre l'outil et la surface à usiner est indispensable surtout pour des surfaces avec fortes variations de courbure ou des surfaces à contre épouille, sinon une correction de l'orientation s'impose [11].

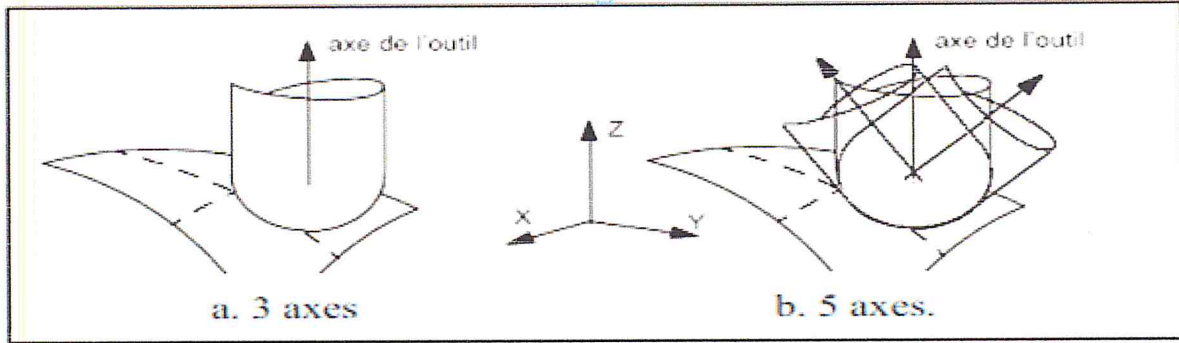
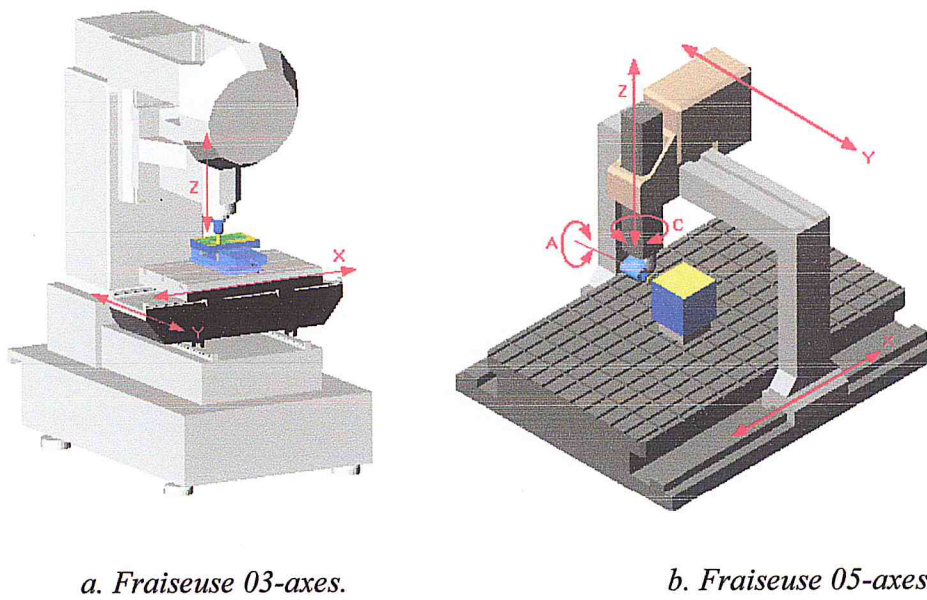


Figure 7: Orientation de l'outil en 3 axes et en 5 axes.



a. Fraiseuse 03-axes.

b. Fraiseuse 05-axes.

Figure 8: Types de fraiseuses à commande numérique.

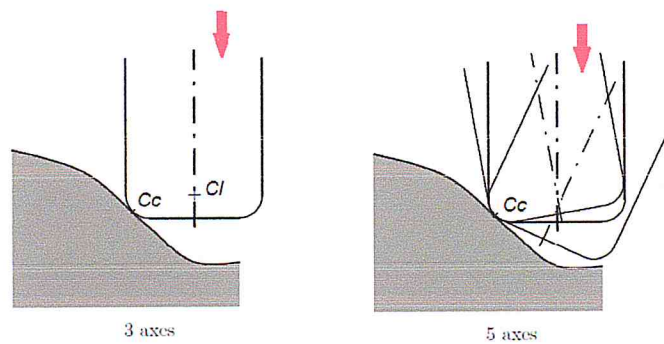


Figure 9: Positionnement de l'outil en 03-axes et en 05-axes.

5.3.2. Phases d'usinage :

Afin de transformer un métal en une pièce finie, il faut passer par trois phases, où chacune de ces phases transforme la forme du métal de manière à se rapprocher du modèle de la pièce à produire (Figure 10).

- **Ebauche** : utiliser de grande fraise afin d'enlever le maximum de matière en un minimum de temps [12].
- **Demi-Finition** : utiliser de grande fraise (cylindriques, hémisphériques ou toriques) pour supprimer les épaulement laissés sur la surface après la phase d'ébauche et pour avoir une forme qui se rapproche plus de la forme théorique [12].
- **Finition** : utiliser de petites fraises (cylindriques, hémisphériques ou toriques) pour enlever les parties qui restent pour obtenir la forme finale de la pièce [12].



Figure 10 : Phases d'usinage.

5.3.3. Stratégies d'usinage :

Comme il n'existe pas une forme d'outil permettant la génération de surfaces gauches directement, ces dernières sont usinées par balayage d'une fraise selon une direction privilégiée caractérisant le mode de balayage. Les directions de balayage sont définies dans la stratégie d'usinage dont le choix doit permettre de réaliser complètement l'usinage. Ce choix peut être basé sur un critère d'optimisation du temps d'usinage (couverture optimale de la

surface) ou sur la qualité des surfaces à usiner. Il dépend de la forme de la surface, du temps d'usinage et des possibilités d'accès. Pour l'opération de finition, généralement, trois stratégies d'usinage sont utilisées [13].

➤ **Stratégie « Iso-paramétrique »** : elle est basée sur la génération du trajet d'outil dans le plan paramétrique de la surface et par suite le transformé dans l'espace 3D. Elle consiste à fixer un paramètre (u ou v) et varier l'autre sur son domaine de définition. Plusieurs modes de balayage sont possibles : aller simple (One-Way), aller-retour (Zig-Zag), concentrique, Spiral-In, Spiral-Out et radiale (Figure 11) [13].

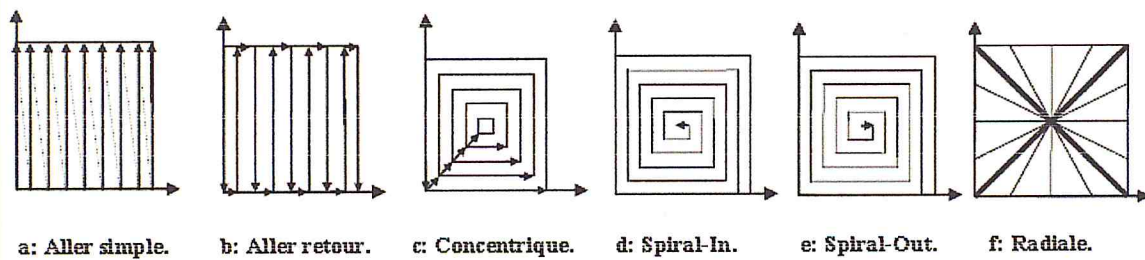


Figure 11 : Modes de balayage pour les stratégies iso paramétriques.

➤ **Stratégie des « Plans Parallèles »** : dans cette stratégie, le trajet d'usinage est obtenu par la construction des courbes résultantes de l'intersection de la surface à usiner avec des plans verticaux parallèles entre eux et pouvant avoir n'importe orientation (Figure 12) [13].

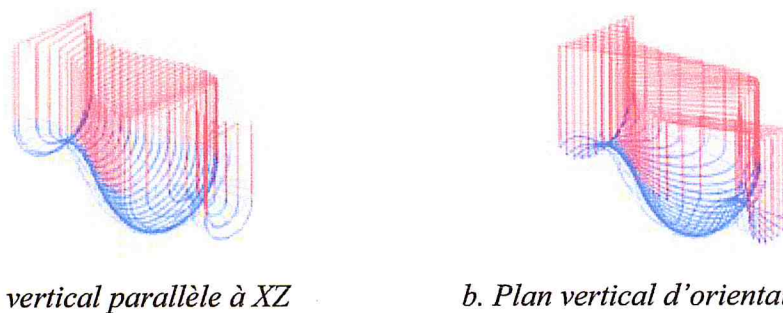


Figure 12 : Stratégie des « Plans Parallèles ».

➤ **Stratégie « Z-Constant »** : ce type de trajectoire est obtenu par l'intersection de la surface à usiner avec des plans horizontaux avec différentes valeurs de Z. Les courbes obtenues sont appelées « courbes de niveau » (Figure13) [13].

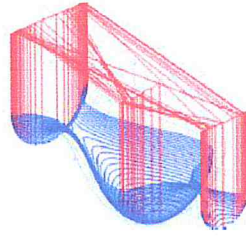


Figure 13 : Stratégie « Z-Constant ».

6. Machine-outil :

Une machine-outil est un équipement mécanique destiné à exécuter un usinage ou une autre tâche répétitive avec une précision et une puissance adaptées. C'est un moyen de production destiné à maintenir un outil fixe, mobile, ou tournant, et à lui imprimer un mouvement afin d'usiner ou de déformer une pièce ou un ensemble fixé sur une table fixe ou mobile.

Une machine-outil a pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une surface par enlèvement de matière. Elle réalise le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce. De plus, elle doit permettre l'obtention de pièces en respectant les spécifications fonctionnelles [14].

6.1. Machine-outil à commande numérique :

Une machine-outil à commande numérique (MOCN) est une machine d'usinage à cycle automatique programmable. Ce type de machine est composé de deux parties complémentaires (Figure 14) :

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

Ainsi, la MOCN commande et contrôle ses propres mouvements, mesure ses déplacements avec une précision constante. Un exemple de non-qualité serait une mauvaise surveillance (panne ou bris d'outil) ou le non-contrôle de l'usure des outils [14].

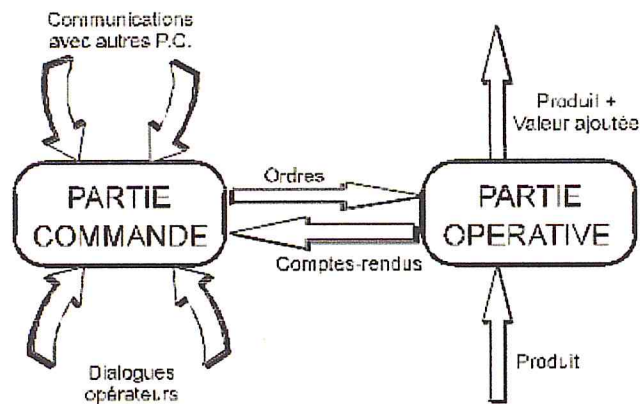


Figure 14: Structure d'une MOCN.

6.1.1. Principales machines-outils à commande numérique :

Les machines-outils sont classées en fonction de leurs modes de distribution des mouvements sur la tête et sur la table d'une part, et des opérations qu'elles peuvent assurées d'autre part. [15]

- **Fraiseuse** : l'outil est animé d'un mouvement de rotation et la pièce d'un mouvement d'avance. Elle permet la réalisation des opérations de fraisage, de perçage et de gravure.
- **Tour** : l'outil est animé d'un mouvement d'avance et la pièce d'un mouvement de rotation. Elle permet la réalisation des opérations de tournage mais aussi de perçage.
- **Centre d'usinage** : peut-être un centre de tournage, un centre de fraisage ou une combinaison des deux. C'est une machine polyvalente pouvant réaliser un nombre important d'opérations d'usinage sur une même pièce sans démontage de celle-ci grâce au magasin d'outils de la machine.

6.1.2. Présentation des fraiseuses :

Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner tous types de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant nommé **fraise**. La fraise munie de dents est mise en rotation se déplace et taille la matière. Elle est souvent montée sur une tête à trois axes (fraiseuse 03-axes) [16].

6.1.3. Types de fraiseuses :

Aujourd'hui, les machines à manivelles ont quasiment disparu, la commande numérique permet de faire bouger simultanément des axes qui étaient autrefois presque systématiquement fixes. Cela a entraîné une révision des classifications plus dépendantes des contraintes rencontrées au niveau des opérations d'usinage [16].

➤ **Fraiseuse 03-axes :**

- Broche verticale: l'axe de l'outil « Z » est vertical.
- Broche horizontale: l'axe de l'outil « Z » est horizontal.

Dans les deux cas, la fraise est perpendiculaire à la table et c'est la table qui se trouve positionnée de façon différente.

- **Fraiseuse 04-axes :** c'est souvent une fraiseuse 03-axes à broche horizontale dotée d'un plateau tournant. C'est une configuration très pratique en production industrielle mécanique (automobile, aviation, ... etc.).
- **Fraiseuse 05-axes :** plusieurs configurations peuvent être rencontrées. Une fraiseuse 05-axes comporte toujours trois (03) axes linéaires (X, Y, Z) et deux (2) axes rotatifs à choisir parmi les axes (A, B, 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.

7. Outils de coupe :

L'outil de coupe est défini selon des critères géométriques et techniques. Le premier indicateur caractérise la forme et les dimensions de l'outil en relation avec la forme finale à obtenir par rapport à une ou plusieurs entités (en mode d'ébauche, demi-finition ou finition)

Les caractéristiques géométriques définissant l'outil peuvent être en fraisage par exemple le diamètre et la longueur utile coupante. Ensuite, le second définit les conditions de coupe ainsi que les modes d'attachement [17].

7.1. Types d'outils de coupe :

Les outils de coupe utilisés pour la finition des surfaces gauches sont les outils cylindriques, hémisphériques et toriques. Ils sont choisis en fonction du processus d'usinage de l'entité à usiner. Ils sont sélectionnés selon leurs rigidités et leurs capacités à réaliser le travail eu égard du temps d'usinage. En phase d'ébauche, il est préférable d'utiliser les outils cylindriques et toriques du fait qu'ils supportent des charges relativement importantes générés par les profondeurs de passe très importantes. En phase de demi-finition et finition, les outils toriques et les outils hémisphériques sont largement utilisés surtout pour les travaux de finition des surfaces gauches [18] [19] [20].

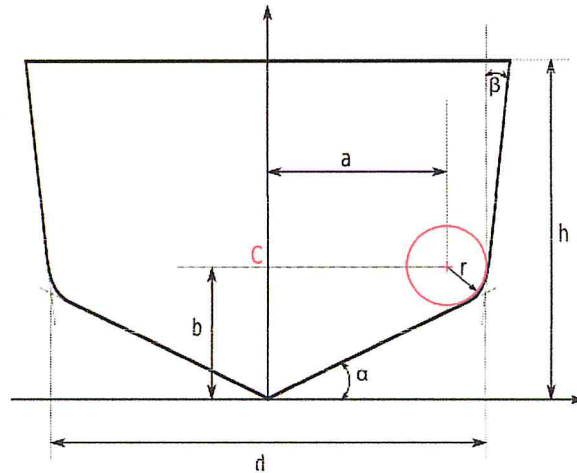
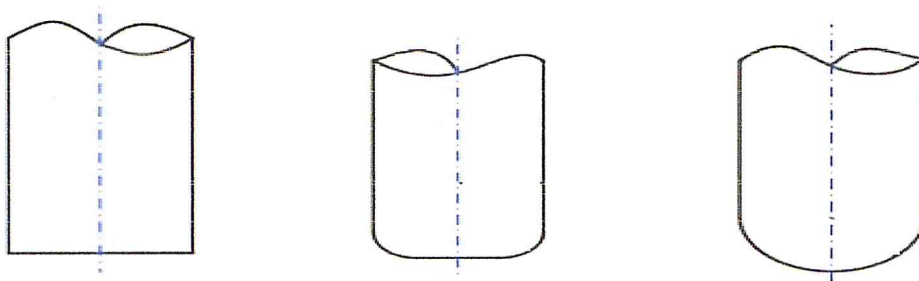


Figure15 : Géométrie de l'outil générique.



a. Outil Cylindrique.
($\alpha = \beta = a = r = 0$)

b. Outil Torique.
($\alpha = \beta = 0, b = r \neq 0$)

c. Outil Hémisphérique.
($\alpha = \beta = 0, b = r = R$)

Figure16 : Paramétrage des outils cylindriques, toriques et hémisphériques.

- **Fraise hémisphérique** : les fraises hémisphériques conviennent pour la finition de n'importe quelle matière, quelle qu'en soit sa dureté (Figure 17). Ces fraises peuvent travailler à des vitesses de coupe bien plus élevées que les autres. 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 [19] [20]. Les paramètres de cet outil sont :

D1 : diamètre de queue d'outil.

D1 : méplat.

L2 : longueur de l'outil.

L1 : longueur de la partie active de l'outil.

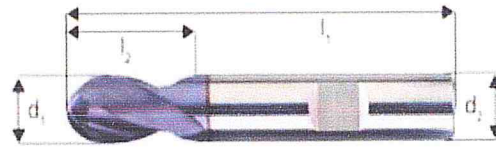


Figure 17: Outil hémisphérique.

- **Fraise cylindrique** : les fraises cylindriques sont utilisées pour plusieurs usages avec sa face plane .Sa fonction principale réside dans l'usinage d'épaulements, elles peuvent avoir une « coupe au centre » c'est-à-dire que les dents se rejoignent au centre de la fraise ce qui permet de faire un évidement. Son avantage majeur est leur partie active, le cylindre située sur un rayon éloigné de l'axe de l'outil dont la vitesse est non nulle [19] [20]. Les paramètres de cet outil sont :

D1 : diamètre de queue d'outil.

D1 : méplat.

L2 : longueur de l'outil.

L1 : longueur de la partie active de l'outil.

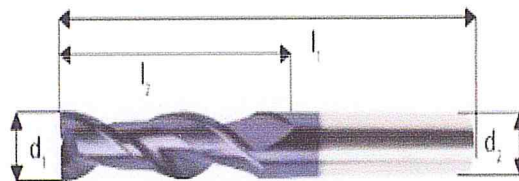


Figure 18 : Outil cylindrique.

- **Fraise torique** : est un outil intermédiaire entre l'outil hémisphérique et l'outil cylindrique (Figure 19). Cet outil est de plus en plus utilisé dans l'industrie. Son avantage majeur est leur partie active, le tore, située sur un rayon éloigné de l'axe de l'outil dont la vitesse est non nulle [19] [20]. Les paramètres de cet outil sont :

D1 : diamètre de queue d'outil.

D1 : méplat.

L2 : longueur d'outil.

L1 : longueur de la partie active de l'outil.

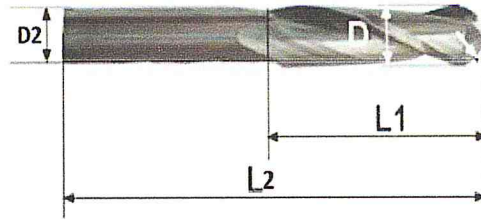


Figure 19 : Outil torique.

7.3. Positionnement d'un outil générique :

Le positionnement de l'outil sur la surface à usiner consiste à déterminer un couple (P, \vec{u}) , où P représente le point piloté, caractéristique de la géométrie de l'outil, et \vec{u} le vecteur directeur de l'axe de l'outil. Classiquement, le point piloté de l'outil est le point CL, point extrémité (Figure 20). Ce couple est défini localement par rapport à la surface à usiner, au niveau du point de contact outil-pièce C_c . Le repère local associé (C_c, f, n, t) est tel que f représente le vecteur tangent à la courbe, n le vecteur normal à la surface, et t le vecteur issu du produit vectoriel de f par n [21].

Le concept de l'outil générique en fraisage 05-axes s'impose comme une nouvelle manière de planifier les trajectoires et plus particulièrement l'orientation de l'axe de l'outil. Afin de générer des trajets d'outil hors collision et hors interférence, un positionnement de l'outil sur la surface est nécessaire. Il consiste d'abord à amener l'outil verticalement sur la surface au point de contact et ensuite à orienter son axe. Le contact (outil générique /surface) se fait au niveau de la partie torique. A cet effet, on utilise l'équation de positionnement de l'outil torique pour définir le centre outil de l'outil générique.

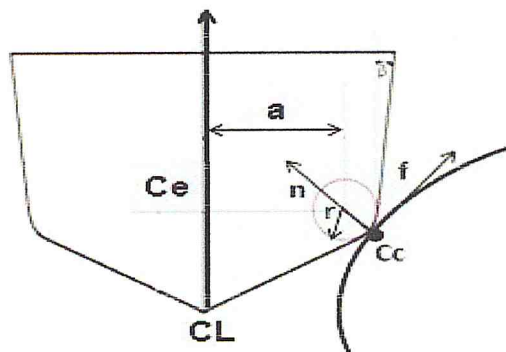


Figure 20 : Point extrémité l'outil (point CL).

Le positionnement des outils cylindrique, hémisphérique et torique est obtenu à partir de celui du générique. La Figure 21 illustre le positionnement des points caractéristiques de l'outil suivant sa géométrie par rapport à la base locale.

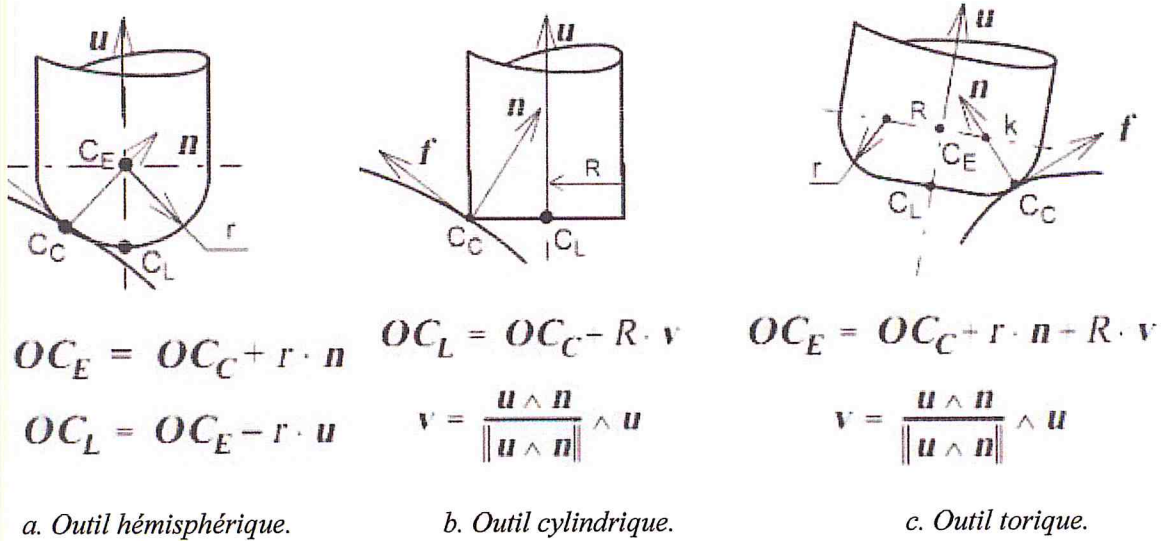


Figure 21: Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil.

Pour le positionnement de l'outil, deux méthodes de posage peuvent être utilisées:

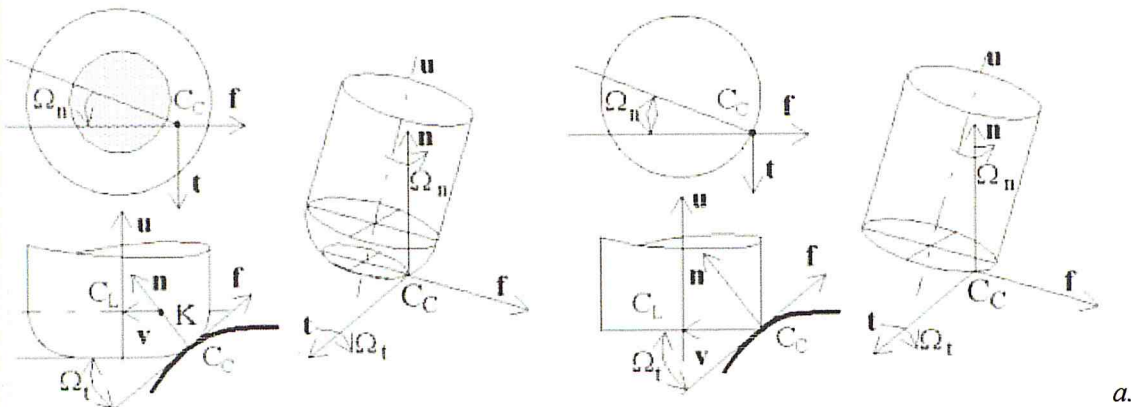
- Posage par le point de contact : c'est l'opération de calcul de la position du centre de l'outil à partir d'une position de contact donnée.
- Posage par le centre : c'est l'opération de calcul direct d'une position du centre de l'outil sans la donnée initiale de la position du point de contact

7.4. Orientation des outils :

Une fois la position de l'extrémité de l'outil déterminée, il reste à définir l'orientation de son axe. L'axe de l'outil est alors orienté par rapport à la normale à la surface au point de contact dans le sens de l'avance en évitant l'apparition d'une interférence entre l'arrière de l'outil et la pièce si celle-ci est concave (Figure 22). 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 \vec{n} 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. Généralement, deux modes d'orientation de l'axe de l'outil sont utilisés [22] :

- Premier mode : pour ce mode, les deux rotations sont vers le segment et autour du vecteur normal à la surface au point de contact (Figure 22.a).
- Deuxième mode : pour ce mode, les deux rotations sont vers le segment et autour du segment (Figure 22.b). Généralement, c'est ce mode qui est le plus utilisé en raison de sa simplicité.



a. Premier mode d'orientation de l'axe de l'outil. b. Deuxième mode d'orientation de l'axe de l'outil.

Figure 22: Modes d'orientations de l'axe de l'outil en 05-axes.

8. Problèmes d'interférences et de collisions :

Du fait des deux rotations supplémentaires, le risque de collision est plus fréquent en usinage 05-axes qu'en usinage 03-axes. Ces collisions peuvent apparaître au niveau des positionnements d'outils calculés, lors de l'interpolation de la trajectoire ou encore lors des mouvements hors matière.

Pour un point de contact outil pièce donné, toute la difficulté consiste à déterminer l'orientation efficace de l'axe de l'outil. 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.

La maîtrise des interférences outil/pièce lors de la génération de trajectoires est une condition nécessaire pour garantir la conformité de la pièce en termes de géométrie [23].

8.1. Types d'interférences :

Les interférences sont en général classées selon trois types : les interférences locales, les interférences vers l'arrière et les interférences globales ou collisions [24].

- **Interférences locales** : les interférences locales traduisent un enlèvement de matière excessif par la partie active de l'outil sur la surface à usiner. Elles sont principalement dues aux différences de courbures de la partie active de l'outil et de la surface au point de contact.
- **Interférences vers l'arrière** : les interférences vers l'arrière sont des pénétrations intempestives de l'arrière de l'outil dans la surface à usiner.
- **Collisions** : les interférences globales quant à 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, ...etc.}

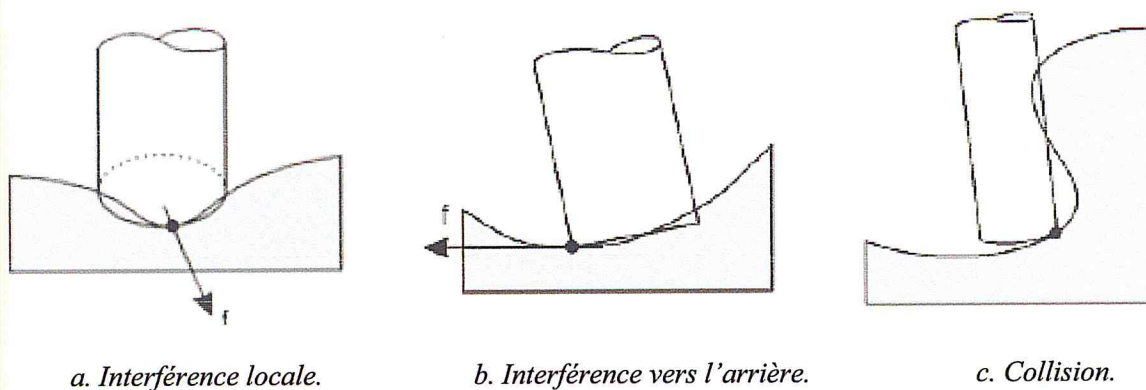


Figure 23 : Types d'interférences.

8.2. Evitement des interférences et des collisions :

Le problème de la détection des interférences locales ou globales est très largement développé dans le domaine de l'usinage multiaxes. Certaines méthodes sont principalement basées sur la comparaison locale de la surface de l'outil avec la surface à usiner. L'objectif consiste alors à positionner l'outil hors interférence afin d'obtenir un enlèvement matière maximum. Pour corriger les interférences, deux solutions sont utilisées :

- Changement d'outil dans le cas de fraises hémisphériques ou cylindriques ou bien l'orientation dans le cas des fraises toriques.
- Pour corriger les collisions, il suffit juste de réorienter l'outil, quel que soit sa géométrie.

8.3. Détection des positions de vitesse nulle :

La détection des positions de vitesse nulle est à considérer lors de l'utilisation de la géométrie hémisphérique. Dans la pratique, le recours à l'utilisation des outils hémisphérique en finition 05-axes est très fréquent à cause de la difficulté moindre lors de leur positionnement sur la surface, mais ils présentent l'inconvénient d'avoir des vitesses de coupe nulles au point extrémité confondu avec leurs axes. Ce phénomène provoque un écrasement de la matière ce qui altère la qualité de la surface usinée. Ceci impose une autre correction du positionnement de l'outil et une nouvelle vérification de l'absence de collisions.

9. 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, qui joue un rôle intrinsèque dans la CFAO, car il joue le rôle d'une passerelle entre le modèle CAO et le modèle FAO. Par la suite, nous avons présenté les différentes méthodes d'usinage utilisées dans l'opération de finition des surfaces gauches ainsi que les critères à respecter afin d'obtenir une surface usinée qui se rapproche le plus de la surface théorique, en plus des problèmes d'interférence et de collision. Par la suite, nous avons enchaîné par la présentation des machines outil à

commande numérique et les différents outils d'usinage utilisés en phase de finition et nous avons terminé le chapitre par la présentation de l'outil générique standard objet de notre étude et nous avons mis en évidence la complexité de sa mise en position.

Le prochain chapitre fera l'objet de la présentation de la conception de notre application.

CHAPITRE II

ETUDE CONCEPTUELLE

Introduction

II.1 Architecture générale de l'application

II.2 Stratégies de tests

Conclusion

Introduction

Le fraisage 05-axes en continu est une technique de pointe utilisée pour la réalisation de surfaces complexes. En finition, cette technique repose généralement sur l'emploi de trois types de fraises : fraises cylindriques, fraises hémisphériques et fraises toriques.

- Fraise cylindrique : elle est rigide et permet l'usinage des épaulements avec une grande facilité. Par contre, son emploi dans les cavités à rayons de courbures très petits est très délicat.

- Fraise hémisphérique : elle est caractérisée par un positionnement et une orientation très simple à mettre en œuvre et les traces laissées sur la pièce engendrées par le passage de l'outil sont très homogènes. Son inconvénient est la possibilité d'avoir des vitesses de coupe nulles au voisinage de l'axe de l'outil ce qui provoque un écrasement de la matière et par conséquent un mauvais état de surface.

- Fraise torique : elle est de plus en plus utilisée dans l'usinage des surfaces gauches à cause de sa géométrie torique de la partie active qui se trouve éloignée de l'axe de l'outil, ce qui élimine le problème de la vitesse nulle.

Le positionnement de l'outil sur la surface en usinage 05-axes, offre la possibilité d'incliner l'outil suivant deux angles. Il en résulte un nombre très important de configurations géométriques et donc une difficulté de déterminer les paramètres adéquats. Ce travail propose une approche pour résoudre le problème de positionnement en finition de l'outil de coupe sur la surface à usiner en usinage 05-axes en utilisant un outil générique standard. Cet objectif est réalisé en plusieurs étapes (Organigramme 1) :

- Première étape : elle consiste à récupérer le modèle discret de la surface (modèle STL) puis affiner sa triangulation en introduisant certaines contraintes pour avoir une surface plus représentative de l'objet réel.

- Deuxième étape : elle consiste à récupérer le trajet d'outil à partir d'une application développée antérieurement, de structurer la surface à usiner représentée par son modèle discret en cellules et de regrouper ces cellules en zones de manière à optimiser l'identification des interférences et des collisions et de les corriger.

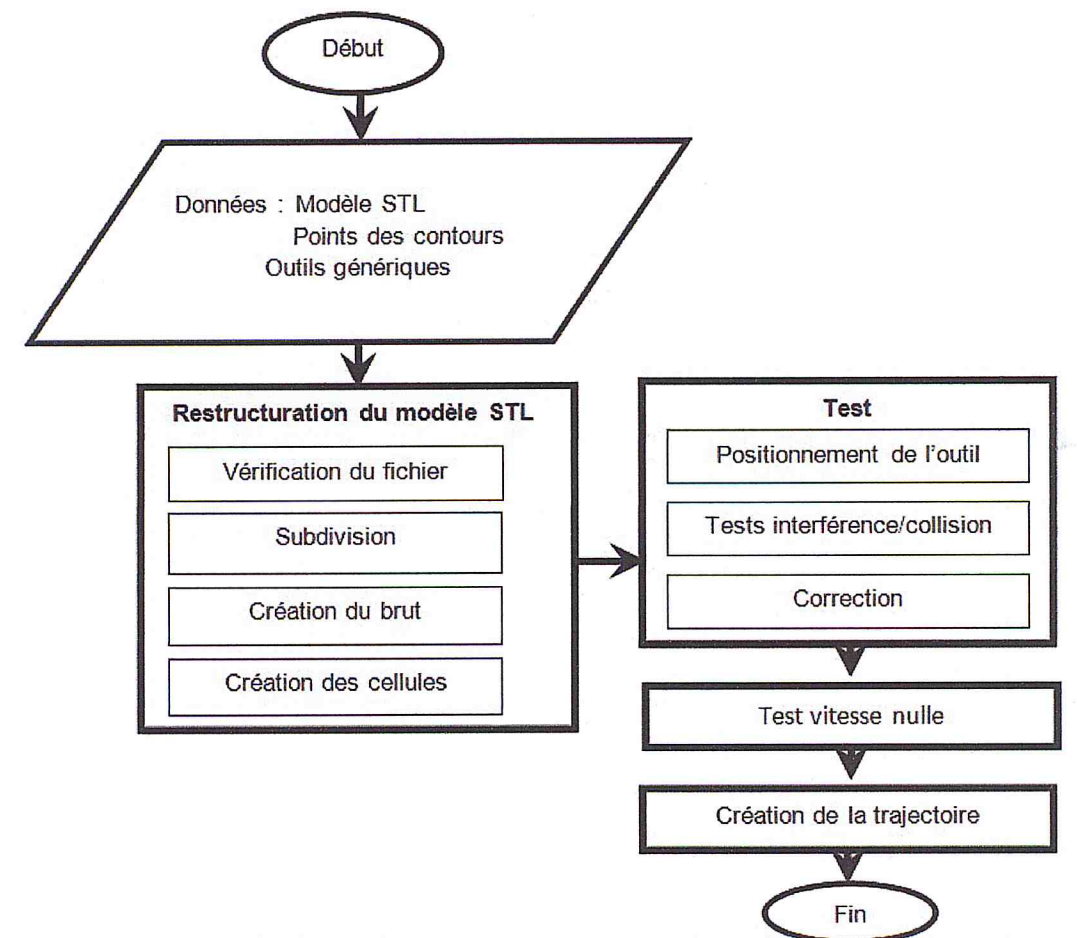
- Troisième étape : elle consiste à proposer une approche pour la détection et l'élimination des interférences et des collisions en considérant la géométrie de l'outil générique.

1. Architecture générale de l'application :

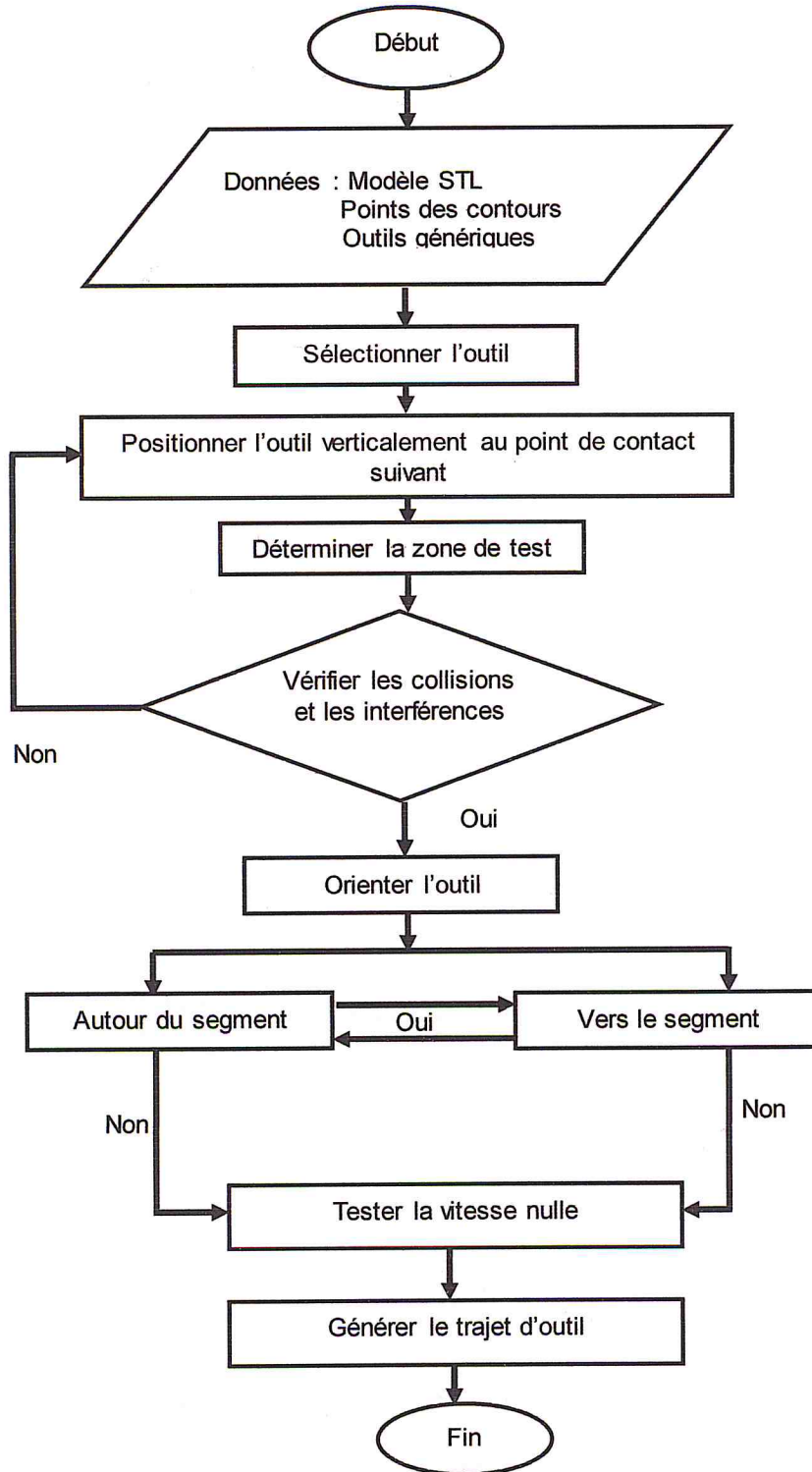
L'architecture générale de l'application logicielle à développer est composée de quatre parties (Organigramme 2):

1. Restructuration de la surface discrète.
2. Test d'interférences et de collisions avec correction des orientations des outils.
3. Test de la vitesse de coupe nulle.
4. Génération de la trajectoire d'outil.

L'application à développer utilise comme entrées les données issues des modèles STL, des contours d'usinage et des bases de données d'outils. Ces données sont utilisées dans la création des cellules support de création des zones de tests d'interférences et de collisions. Les tests d'interférences et de collisions sont basés sur la vérification de l'appartenance des points de la surface aux différentes parties de l'outil générique (cône, tore, tronc de cône et cylindre). L'organigramme 2 donne l'architecture générale de l'application.



Organigramme 1 : Vue générale de l'application.



Organigramme 2: Architecture générale de l'approche proposée et implémentée.

1.1. Restructuration du fichier STL :

La restructuration du modèle discret (modèle STL) consiste tout d'abord à vérifier la conformité du modèle discret de base de la pièce. Cette vérification se fait par l'identification de l'extension du fichier. Dans le cas où l'extension est différente du format STL un message d'erreur est retourné. Si l'extension est valide, les triangles définissant le modèle STL, leurs vecteurs normaux et les sommets des triangles sont stockés dans deux vecteurs différents. Pour éviter la duplication des coordonnées des sommets des triangles les opérations d'identification et de filtrage sont mis au point.

1.2. Enrichissement du modèle STL :

Des anomalies et des erreurs peuvent surgir lors de la détection et de la correction des interférences et des collisions dans le cas où le modèle STL est globalement grossier ou grossier dans certaines régions. Ce problème est fréquemment rencontré lors de l'usinage des surfaces présentant de fortes variations de courbures (Figure 24). Pour ces cas, la densité des points n'est pas importante et l'outil peut pénétrer dans la surface sans être détecté. Pour éviter cette situation, il faut augmenter la densité des points. Pour cela, l'approche proposée consiste à enrichir le modèle initial par l'ajout de nouveaux points dans les triangles. Le critère utilisé dans cette approche est l'aire maximale d'un triangle (seuil). Par la suite, pour chaque triangle, si son aire est plus grande que le seuil, alors ce triangle est subdivisé récursivement en six (06) triangles jusqu'à ce que son aire soit plus petite ou égale au seuil. A la fin de ce processus, tous les points des triangles concernés par la subdivision sont insérés dans le vecteur des points représentant la surface de l'objet.

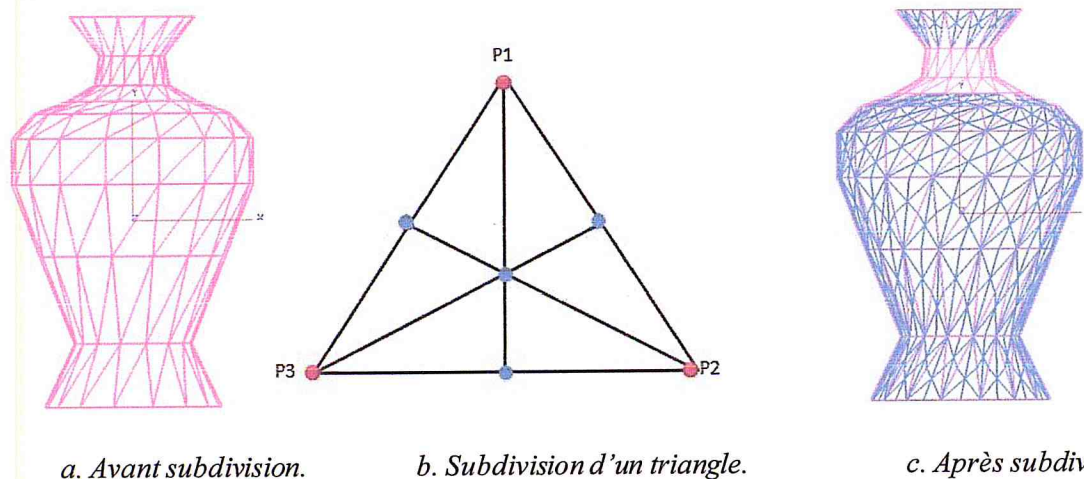


Figure 24 : Enrichissement du modèle STL.

1.3. Création du brut :

La création du brut a pour but d'englober tous les points du modèle de la pièce dans une enveloppe parallélépipédique parallèle aux axes X , Y et Z . Il s'agit de trouver les coordonnées X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} et Z_{max} coordonnées des points extrêmes du modèle STL (Figure 25). Par la suite, la longueur, la largeur et l'épaisseur du brut sont calculées par :

$$\text{Longueur} = Y_{max} - Y_{min} \quad \text{Largeur} = X_{max} - X_{min} \quad \text{Hauteur} = Z_{max} - Z_{min}$$

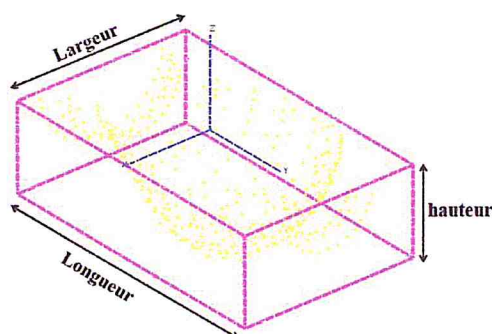


Figure 25 : Création du brut.

1.4. Création des cellules de points :

Comme le modèle STL des surfaces gauches est défini par un nombre très important de triangles et de points, la vérification de l'existence des problèmes d'interférences et de collisions requiert la considération de tous les points. Par cette manière, la vérification pour tous les points de contact nécessite un temps de calcul très important. Pour le minimiser, les points de la surface sont groupés dans des blocs parallélépipédiques appelés « cellules ». Ces cellules sont créées à partir du brut et du nombre de cellules suivant chaque axe. Chaque cellule est définie par ses dimensions (longueur « Dy », largeur « Dx » et épaisseur « Dz ») les coordonnées de ses points extrêmes X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} et Z_{max} (Figure 26). Cette façon de faire permet de limiter les tests d'interférence en tout point de contact du fait que les points de la surface à tester sont ceux appartenant aux cellules se chevauchant avec l'enveloppe de l'outil. Les cellules créées forment une matrice tridimensionnelle où chaque cellule contient les points appartenant à son enveloppe.

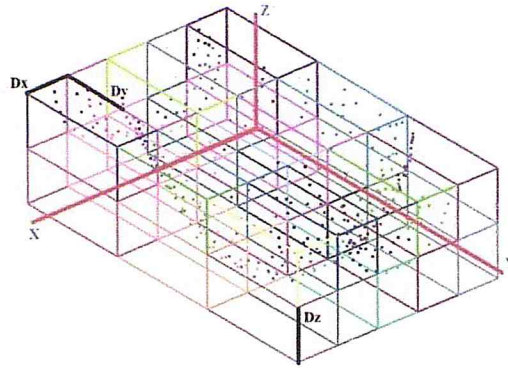


Figure 26: Création des cellules.

1.4.1. Affectation des points aux cellules :

Après la création de la matrice des cellules, chaque point de la surface est affecté à la cellule correspondante (Figure 27). Cette affectation se fait par comparaison entre les coordonnées de chaque point de la surface et les limites maximale et minimale de chaque cellule. Pour un point S de coordonnées X_s , Y_s et Z_s et une cellule avec ses limites X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} et Z_{max} , le point S appartient à la cellule si :

$$X_{min} < X_s < X_{max} \quad \text{et} \quad Y_{min} < Y_s < Y_{max} \quad \text{et} \quad Z_{min} < Z_s < Z_{max}$$

Après la nouvelle représentation des points et pour minimiser le nombre de points à tester dans la détection des interférences et des collisions, pour l'interférence, seules les cellules se chevauchant avec l'enveloppe de la partie active sont considérées et pour la collision seules les cellules se chevauchant avec l'enveloppe du corps de l'outil sont considérées. L'organigramme 3 décrivant la procédure suivie pour la création des cellules et l'affectation des points aux cellules est représenté par la Figure 27.

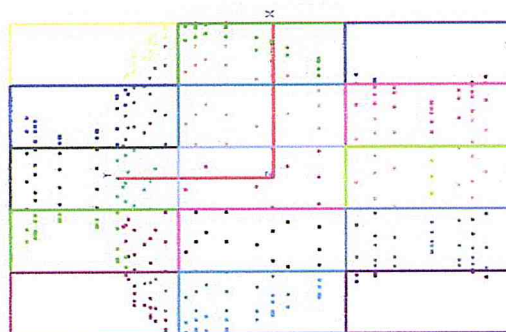
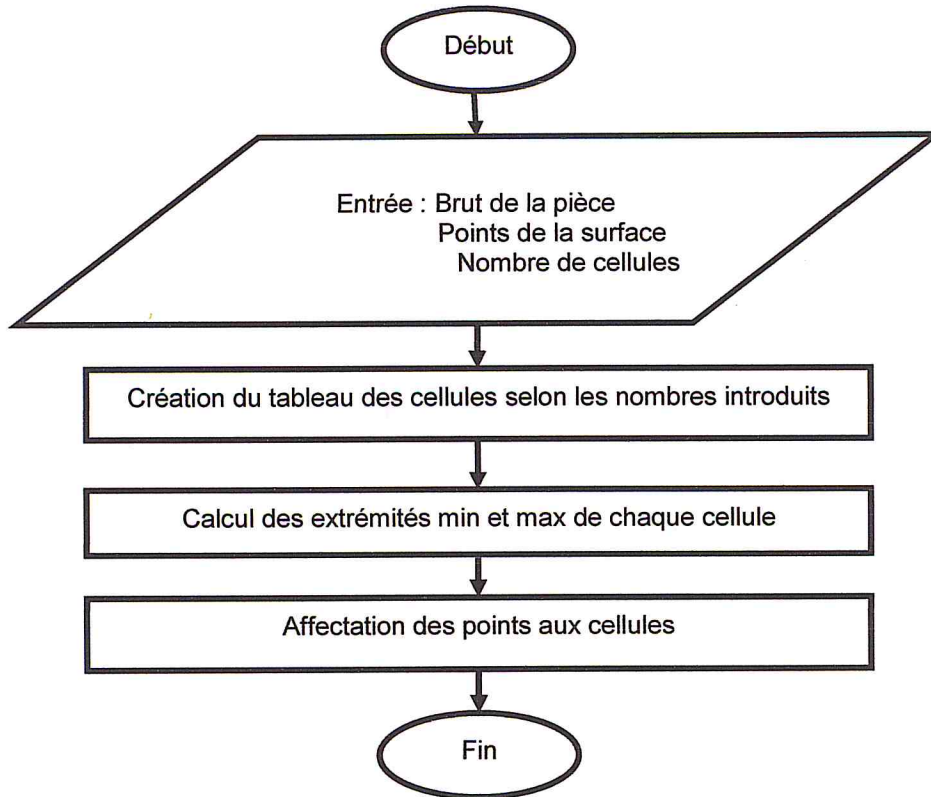


Figure 27 : Affectation des points aux cellules.



Organigramme 3 : Affectation des points aux cellules.

1.5. Création des contours :

La stratégie de finition utilisée est « Z-Constant ». Elle consiste à générer les contours d'usinage. Ce trajet est obtenu par l'intersection des segments des triangles avec des plans parallèles horizontaux. Le nombre de plans dépend de la profondeur de passe choisie (Figure 28). La surface étant représentée par le modèle STL, l'intersection des plans avec les triangles génère des segments qui sont reliés entre eux pour former une chaîne de segments « contour » qui peut être fermée ou ouverte. La création des contours de chaque plan, passe par le parcours du vecteur des triangles et pour chaque triangle, le calcul des points d'intersection avec le plan horizontal représentant un plan d'usinage. Afin de minimiser le temps de calcul des intersections, les triangles sont groupés dans des bandes disjointes et chaque plan est intersecté avec les triangles de la bande qui l'englobe. L'organigramme de calcul des contours est représenté par l'organigramme 4.

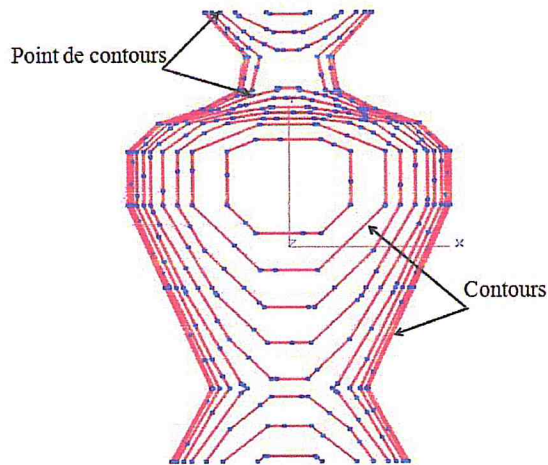
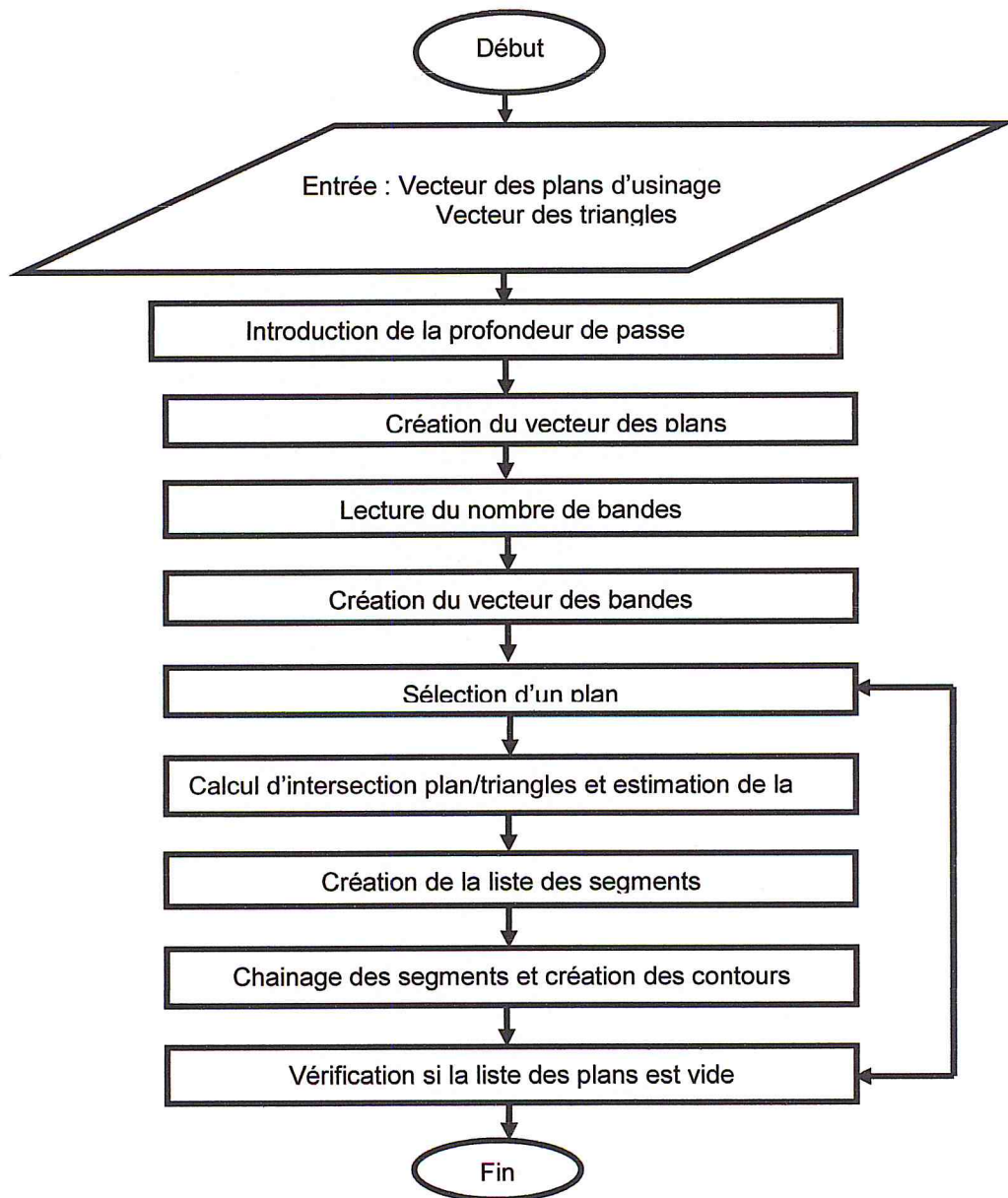


Figure 28: Contours d'usinage.



Organigramme 4 : Génération des contours.

1.6. Positionnement de l'outil générique :

Le but assigné à ce travail consiste à proposer une approche pour le positionnement d'un outil générique sans interférence et sans collision sur une surface gauche avec ou sans contre dépouille en usinage 05-axes. Ce positionnement est réalisé en trois étapes :

1. Définition du point piloté par la commande numérique de la machine-outil.
2. Orientation de l'axe de l'outil de façon à éliminer toutes les interférences et toutes les collisions avec la pièce. Dans ce travail, seule, la collision corps d'outil/pièce est considérée. La collision avec le porte outil et avec le système de fixation de la pièce ne sont pas pris en compte.
3. Dans le cas où l'outil sélectionné est hémisphérique, il est nécessaire de vérifier que l'axe de l'outil n'est pas aligné avec la normale \vec{n} à la surface pour éviter le problème de vitesse nulle au point de contact.

Pour positionner l'outil générique, il est supposé que le contact entre outil et surface à usiner se produit au niveau de la partie torique de l'outil (Figure 29). Dans ce cas, les équations permettant de déterminer le point centre outil (C_E) de l'outil torique sont utilisées pour déterminer le point centre outil de l'outil générique. Par la suite, les coordonnées des autres points caractéristiques sont déterminées à partir de la géométrie de l'outil et des coordonnées du point centre outil.

Le point centre outil C_E de l'outil torique est donné par (Figure 29) :

$$OC_E = OC_C + r \cdot \vec{u} + (R - r) \cdot \vec{V} \quad (1)$$

$$\vec{V} = \frac{(\vec{u} \wedge \vec{n}) \wedge \vec{u}}{\|\vec{u} \wedge \vec{n}\|} \quad (2)$$

Avec :

OC_E : point centre outil.

OC_C : point de contact.

r: rayon de coupe de la partie torique.

R : rayon de l'outil.

\vec{n} : vecteur normal à la surface.

\vec{u} : vecteur axe de l'outil.

Le point extrémité minimale de la partie active de l'outil C_L de l'outil générique est donné par (Figure 29) :

$$O_{CL} = O_{Ce} - b \cdot \vec{u} \quad (3)$$

Avec :

B: hauteur de la partie conique.

Le point extrémité maximale du corps de l'outil C_{L1} de l'outil générique est donné par (Figure 29) :

$$O_{CL1} = O_{CL} + (L + r) \cdot \vec{u} \quad (4)$$

Avec :

L : longueur du corps d'outil.

r: rayon de coupe de la partie torique.

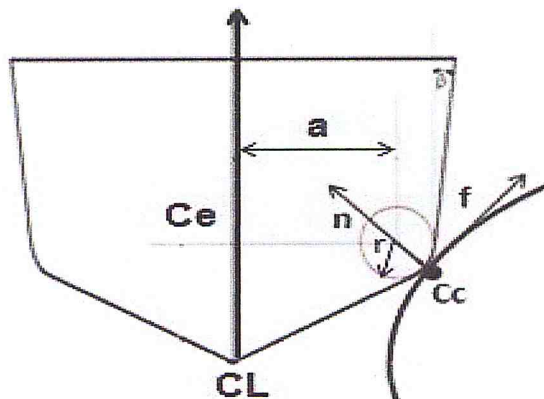


Figure 29 : Positionnement de l'outil générique.

A partir des coordonnées de chaque point de contact et de sa normale estimée à partir des points de la surface, et pour chaque rayon d'outil et chaque rayon de coupe respectivement R et r , les coordonnées du point centre outil sont calculées.

Soit (C_c) un point de contact de coordonnées (X_{cc}, Y_{cc}, Z_{cc}) et le vecteur directeur de l'axe de l'outil de composantes (U_x, U_y, U_z) , les coordonnées (X_{ce}, Y_{ce}, Z_{ce}) du centre outil C_e sont données par :

$$L_{ymin} = Y_{CL} - R \quad (11)$$

$$L_{ymax} = Y_{CL} + R \quad (12)$$

$$L_{zmin} = Z_{CL} \quad (13)$$

$$L_{zmax} = Z_{CL} + L \quad (14)$$

Avec :

X_{CL}, Y_{CL}, Z_{CL} : coordonnées du point extrémité minimale C_L .

L : Longueur de l'outil générique.

R : Rayon de l'outil générique.

2. Axe de l'outil n'est pas vertical : dans ce cas, les coordonnées de l'enveloppe de l'outil sont données par (Figure 31.b) :

$$L_{xmin} = \min ((X_{CL} - R), (X_{CL} + L * U_x - R)) \quad (15)$$

$$L_{xmax} = \max ((X_{CL} + R), (X_{CL} + L * U_x + R)) \quad (16)$$

$$L_{ymin} = \min ((Y_{CL} - R), (Y_{CL} + L * U_y - R)) \quad (17)$$

$$L_{ymax} = \max ((Y_{CL} + R), (Y_{CL} + L * U_y + R)) \quad (18)$$

$$L_{zmin} = \min ((Z_{CL} - R), (Z_{CL} + L * U_z - R)) \quad (19)$$

$$L_{zmax} = \max ((Z_{CL} + R), (Z_{CL} + L * U_z + R)) \quad (20)$$

Avec :

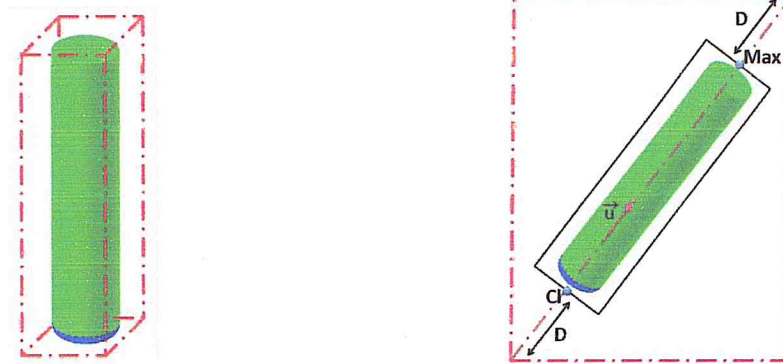
X_{CL}, Y_{CL}, Z_{CL} : coordonnées du point extrémité minimale C_L .

U_x, U_y, U_z : composantes du vecteur directeur de l'axe de l'outil.

L : Longueur de l'outil générique.

R : Rayon de l'outil générique.

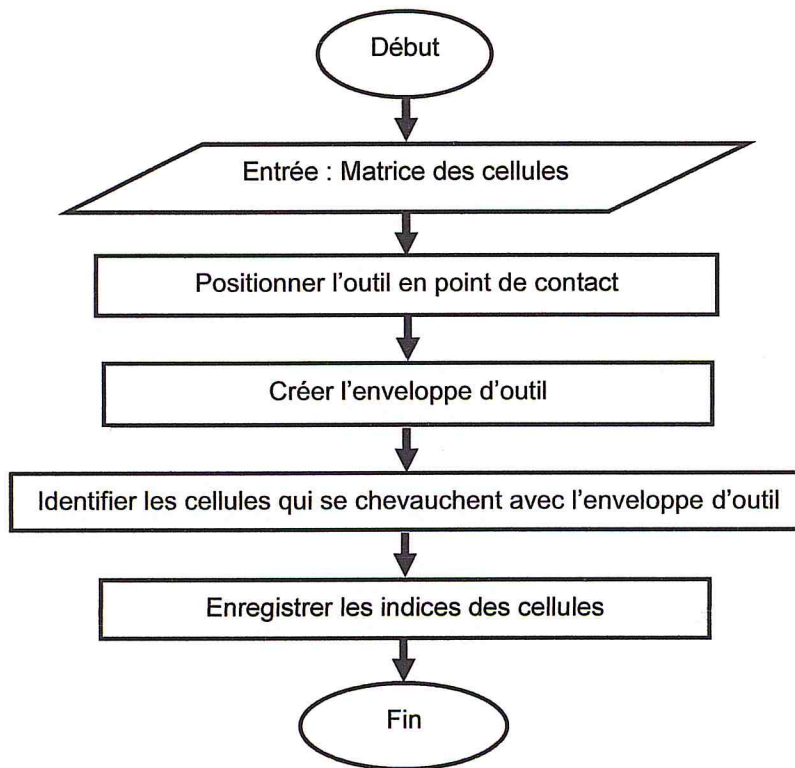
Les coordonnées des extrémités minimale et maximale de l'enveloppe de l'outil sont utilisées pour définir les cellules en chevauchement. Le processus de détermination des zones de collisions et d'interférences est illustré par l'organigramme 5.



a. Axe d'outil verticale

b. Axe d'outil incliné.

Figure 31 : Enveloppe de l'outil.



Organigramme 5: Détermination des zones d'interférences et de collisions.

1.8. Test d'interférences et de collisions :

Dans les approches utilisant les modèles continus des surfaces (modèles CAO), l'évitement des interférences consiste à récupérer les paramètres exacts de la surface en chaque point de contact et par la suite sélectionner l'outil dont le rayon est inférieur ou égal au rayon de courbure de la surface au point de contact. Dans le cas des modèles discrets, tous les paramètres de la surface sont estimés, ce qui rend impossible d'utiliser le même principe.

Pour résoudre ce problème, une des méthodes consiste à utiliser les équations du corps de l'outil et de la partie active de l'outil en chaque point du trajet pour détecter les collisions et les interférences puis procéder à leurs éliminations par applications de transformations géométriques adéquates. Le processus de vérification se décompose en plusieurs étapes :

- ❖ Calcul de la distance « d » entre le point de la surface et l'axe de l'outil en utilisant l'équation vectorielle suivante :

$$d = \frac{(\overline{C_E P} \wedge \vec{u})}{\|\vec{u}\|} \quad (21)$$

Avec :

C_E : Centre outil.

P : Point de la surface de coordonnées (X, Y, Z) appartenant aux cellules de test.

\vec{u} : Axe de l'outil.

Le développement de l'équation (21) donne la relation suivante :

$$A = (U_z (Y - Y_{CE}) - U_y (Z - Z_{CE}))^2 \quad (22)$$

$$B = (U_x (Z - Z_{CE}) - U_z (X - X_{CE}))^2 \quad (23)$$

$$C = (U_y (X - X_{CE}) - U_x (Y - Y_{CE}))^2 \quad (24)$$

$$d^2 = \frac{A+B+C}{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (25)$$

➤ Comparer la distance d avec R (Figure 32) :

- Si $d > R$, alors absence d'interférence et de collision.
- Si $d \leq R$, alors il y'a possibilité (risque) d'existence d'interférence ou de collision.

Pour trancher, la position de la projection du point sur l'axe de l'outil est comparée par rapport au point extrémité minimale C_L et le point extrémité maximale C_{L1} .

- Si le point projeté n'est pas compris entre ces deux points, alors il y a absence d'interférence et de collision.
- Si le point projeté est compris entre ces deux points, il y a risque d'interférence et de collision.

Pour faciliter le processus de vérification, un changement de repère s'impose. Il consiste à exprimer, pour chaque point de contact, les coordonnées des points de la surface susceptibles d'engendrer des interférences et/ou des collisions dans un repère local lié à l'outil dont l'origine est le point extrémité minimale de l'outil C_L (Figure 33). 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 de points seront exprimées dans le repère (T_1, T_2, U) . Le changement de repère se fait donc du repère global (repère de conception) au repère local (repère de vérification).

Soit P un point de coordonnées (X_1, Y_1, Z_1) exprimées dans un repère global R_1 , les coordonnées du point P (X_2, Y_2, Z_2) exprimées dans le repère local R_2 sont données par (Figure 33) [25]:

$$P_{/R1} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad P_{/R2} = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Le passage du repère R_2 vers le repère R_1 est donné par :

$$P_{/R1} = M * P_{/R2} \quad (27)$$

Avec :

$$M = \begin{bmatrix} T_{1x} & T_{1y} & T_{1z} & x_0 \\ T_{2x} & T_{2y} & T_{2z} & y_0 \\ U_x & U_y & U_z & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Le passage du repère R_1 vers le repère R_2 est donné par :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} * M^{-1} \quad (29)$$

Avec :

M^{-1} : matrice inverse de la matrice M .

X_0, Y_0, Z_0 : coordonnées de l'origine du repère R_2 exprimées dans le repère R_1 .



a. Absence d'interférence et de collision.

b. Risque d'interférence et de collision.

Figure 32 : Test de collision et d'interférence.

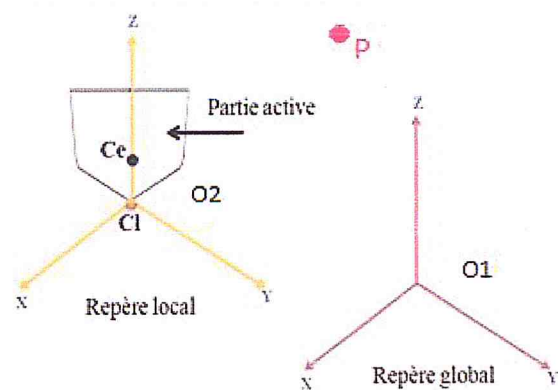
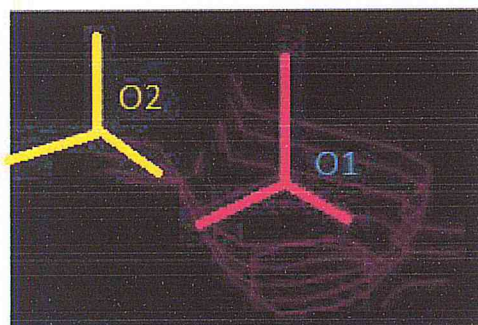


Figure 33 : Changement de repère.

1.8.1. Vérification de l'interférence et de la collision:

La vérification de l'interférence et de la collision consiste à tester l'appartenance des points des cellules de la surface susceptibles de les provoquer, à l'une des parties composant l'outil générique (corps et partie active). La vérification étant globale, alors la position des points impose lequel des deux tests s'exécutent. Ainsi, quatre tests s'imposent; un pour la collision et trois pour l'interférence :

- ✓ Appartenance des points à la partie cylindrique (collision).
- ✓ Appartenance des points au tronc de cône (interférence).
- ✓ Appartenance des points à la partie torique (interférence).
- ✓ Appartenance des points à la partie conique (interférence).

Les tests de vérification reposent sur l'utilisation des équations cartésiennes modélisant les entités géométrique composant l'outil générique. Ces équations sont exprimées dans un repère local par rapport à un axe vertical (axe Z).

L'équation d'un cylindre de rayon R et d'axe vertical est donnée par [26] (Figure 34.a) :

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2 \quad (30)$$

L'équation d'un tronc de demi-angle au sommet est égal à α et d'axe vertical est donnée par [27] (Figure 34.b) :

$$X^2 + Y^2 = Z^2 \tan^2 \alpha \quad (31)$$

L'équation d'un tore de rayon du tore r et du rayon de rotation du tore est R et d'axe vertical est donnée par [28] (Figure 34.c) :

$$(\sqrt{X^2 + Y^2} - R)^2 - Z^2 = r^2 \quad (32)$$

L'équation d'un cône de demi-angle au sommet est égal à α et d'axe vertical est donnée par [27] (Figure 34.b) :

$$X^2 + Y^2 = Z^2 \tan^2 \alpha \quad (33)$$

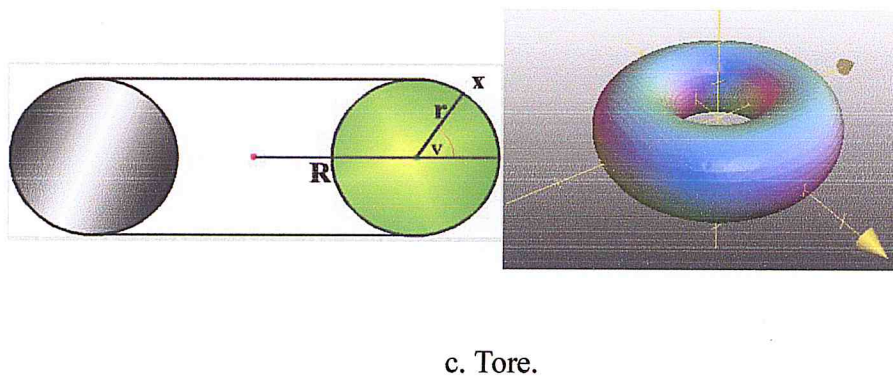
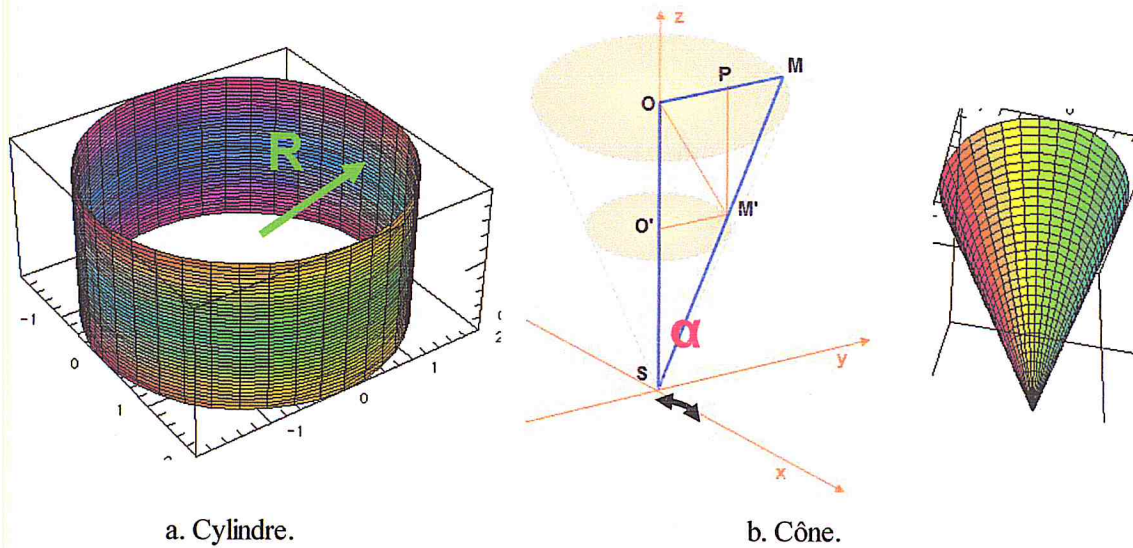


Figure 34 : Entités géométriques constituant l'outil générique.

En usinage 05-axes, les problèmes d'interférences et de collisions sont dus en général à une mauvaise orientation de l'axe de l'outil par rapport à la surface à usiner. Alors, il devient dès lors judicieux d'exprimer les points de la surface à usiner et les équations modélisant l'outil générique dans un même repère.

- **Détection des collisions :**

Les collisions se produisent lorsque des points de la surface appartiennent au corps de l'outil (partie cylindrique). Ceci se produit lorsque :

$$L_a \leq Z_p \leq L \quad (34)$$

Avec :

Z_p : coordonnée Z du point projeté sur l'axe de l'outil dans le repère local.

L_a : coordonnée du point extrémité maximum de l'outil dans le repère local.

L : coordonnée du point début de la partie cylindrique de l'outil dans le repère local.

Dans ce cas, tous les points de la surface qui vérifient l'équation du cylindre provoquent des collisions. Donc, l'équation suivante doit être vérifiée :

$$X^2 + Y^2 + Z^2 - R^2 \leq 0 \quad (35)$$

Avec :

X, Y, Z : Coordonnées du point projeté dans le repère local.

R : Rayon du cylindre.

- **Détection des interférences :**

Les interférences se produisent lorsque des points de la surface appartiennent à la partie active de l'outil. Pour l'outil générique, trois parties sont concernées par ce problème.

- **Tronc de cône :** pour détecter l'interférence au niveau du tronc de cône, celui-ci est subdivisé en deux régions (Figure 35) : 1) région centrale en forme de cylindre de rayon R_1 , 2) région en périphérie en forme de cône. L'interférence peut se produire si la condition suivante est satisfaite :

$$b \leq Z_p \leq L_a \quad (36)$$

Dans ce cas, tous les points qui vérifient l'équation du cylindre de rayon R_1 et l'équation du tronc de cône provoquent des interférences. Ces conditions sont :

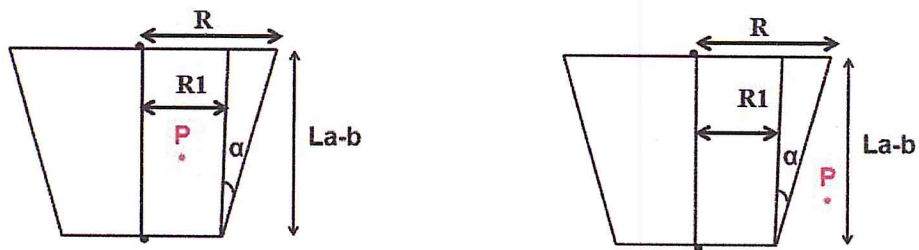
$$\begin{aligned} X^2 + Y^2 + Z^2 - R_1^2 &\leq 0 \\ X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2 \tan^2 \alpha &\leq 0 \end{aligned}$$



$$x^2 + y^2 - z^2 \tan^2 \alpha \leq 0 \quad (38)$$

Avec :

$$\tan \alpha = \frac{R-R_1}{L_a-b} \quad (39)$$



a. Présence d'interférence.

b. Absence d'interférence.

Figure 35 : Détection de l'interférence dans la partie tronç conique.

- Tore : pour détecter l'interférence au niveau du tore, celui-ci est subdivisé en deux régions (Figure 36) : 1) région centrale en forme de cylindre de rayon R, 2) région en périphérie en forme de demi-tore. L'interférence peut se produire si la condition suivante est satisfaite :

$$b \leq Z_p \leq b + 2.r \quad (40)$$

Avec :

Z_p : coordonnée Z du point projeté sur l'axe de l'outil dans le repère local.

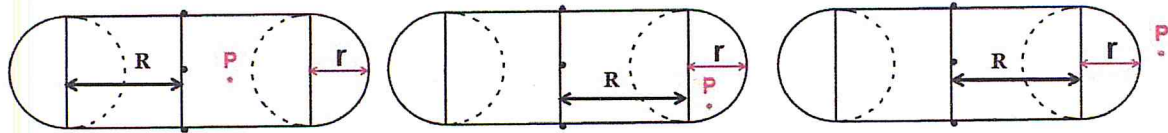
r : rayon de la partie active du tore.

b : coordonnée du point inférieur du tore dans le repère local.

Dans ce cas, tous les points qui vérifient l'équation du cylindre de rayon R et l'équation du demi-tore de rayon r provoquent des interférences. Ces conditions sont :

$$X^2 + Y^2 + Z^2 - R \leq 0 \quad (41)$$

$$(\sqrt{X^2 + Y^2} - R)^2 - Z^2 - r^2 \leq 0 \quad (42)$$



a. Interférence avec le cylindre. b. Interférence avec le tore. c. pas d'interférence.

Figure 36 : Détection de l'interférence dans la partie torique.

- Cône : l'interférence au niveau du cône peut se produire si la condition suivante est satisfaite (Figure 37) :

$$0 \leq Z_p \leq b \quad (43)$$

Avec :

Z_p : coordonnée Z du point projeté sur l'axe de l'outil dans le repère local.

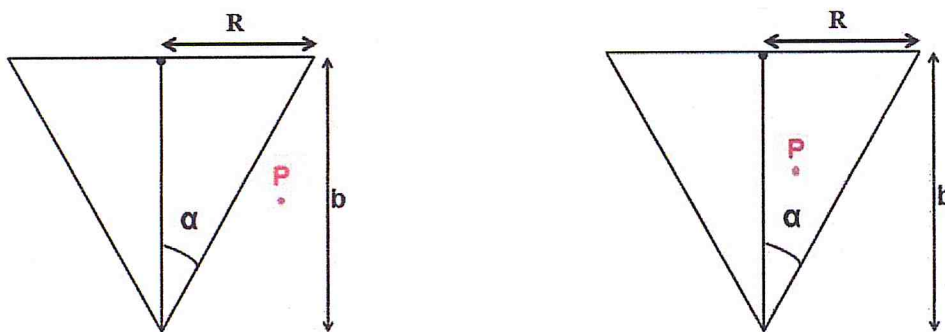
b : coordonnée du point supérieur du cône dans le repère local.

Dans ce cas, tous les points qui vérifient l'équation du cône provoquent des interférences. Cette condition est la suivante :

$$X^2 + Y^2 - Z^2 \tan^2 \alpha \leq 0 \quad (44)$$

Avec :

$$\tan \alpha = \frac{R}{b} \quad (45)$$



a. Présence d'interférence.

b. Absence d'interférence.

Figure 37 : Détection de l'interférence dans la partie conique.

1.8.2. Evitement des interférences et des collisions :

La correction de l'interférence et de la collision consiste à proposer une stratégie d'orientation de l'axe de l'outil permettant de dégager l'outil de sa position de chevauchement

avec la surface tout en gardant son axe le plus proche de la normal afin de garantir un bon débit de copeaux. Dans ce travail, deux modes d'orientation de l'axe de l'outil sont proposées :

- Inclinaison de l'outil vers le segment dans le sens de la vitesse d'avance.
- Rotation de l'outil autour du segment formé par le point de contact actuel et le point de contact suivant.

Pour les deux modes, pour chaque point de contact, l'outil initialement est positionné verticalement et en cas de collision ou d'interférence, l'outil est orienté « autour du »/« vers le » segment jusqu'à la détermination d'un angle qui positionne l'outil hors collision et hors interférence.

Ces deux modes sont lancés séquentiellement sans aucune priorité au préalable. Néanmoins, pour un expert en fonction de la géométrie de la surface à usiner il peut décider lequel des deux modes doit être lancé en premier.

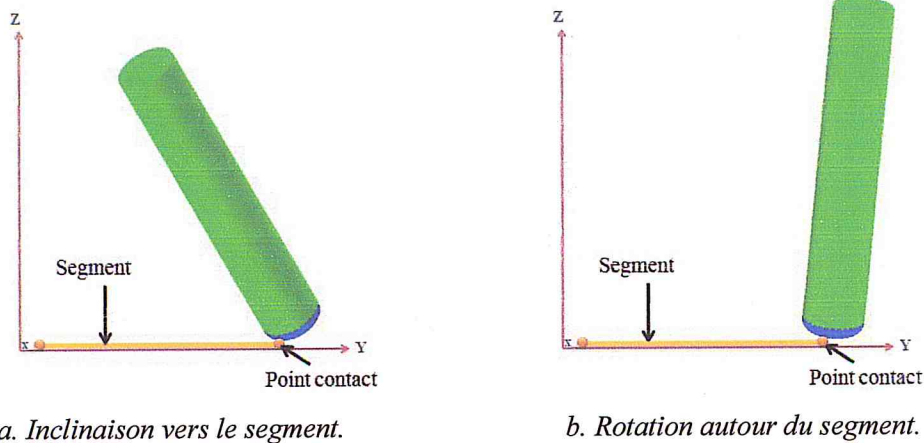


Figure 38 : Orientation de l'outil.

2. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, la conception de notre système qui prend en charge la génération de la trajectoire d'outil sans interférences et sans collisions à travers les différents organigrammes. Par ailleurs, nous avons présenté les approches proposées et utilisées pour l'optimisation des tests d'interférences et les tests de collisions en délimitant le

CHAPITRE II : ETUDE CONCEPTUELLE

champ de recherche par la création des zones de test. Les problèmes d'interférences et de collisions ont été bien détaillés ainsi que les solutions proposées.

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

CHAPITRE III

DEVELOPPEMENT INFORMATIQUE ET VALIDATION

Partie I : Présentation de l'application.

Introduction

III.1 Présentation du langage C++.

III.2 Présentation d'OpenGL.

III.3 Présentation de Borland C++ Builder6.

III.4 Simulation et captures d'écrans

Introduction

La réalisation de notre travail s'achève par la présentation de l'application logicielle graphique et interactive conçue ainsi que l'environnement de développement et les outils utilisés pour sa mise en œuvre. Il s'en suit une présentation de l'interface utilisateur et une évaluation du système à travers un exemple de validation.

Ce chapitre a pour but de donner une vue à la fois intelligible et relativement concrète sur notre application en présentant les informations manipulées à travers les sessions d'utilisation à travers un exemple de validation. Certainement, un exemple ne peut refléter à lui seul, les performances de notre système, mais il peut donner une idée générale sur son intérêt surtout sur la complexité de génération du trajet d'outil sain (sans interférences et sans collisions) en l'absence d'une approche automatisée.

1. Présentation du langage C++ :

Le langage C++, inventé par Bjarne Stroustrup vers 1983, est une évolution orientée objets du langage C de Brian Kernighan et Denis Ritchie. Il s'est enrichi, au cours de la décennie 1980, parallèlement à la stabilisation et la normalisation de C. Ce langage repose sur les mêmes mécanismes d'écriture et de génération. Il apporte notamment la gestion des exceptions, la gestion des références (remplaçant partiellement l'usage quelque peu délicat des pointeurs), la surcharge des opérateurs et les Templates, ...etc. Enfin, une rétrocompatibilité a été gardée où les programmes en C 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.

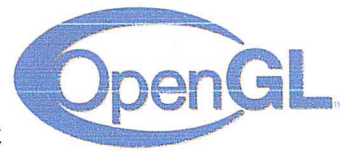
Parmi les environnements de développements, AnjutaDevStudio, C++ Builder, Code:: Blocks (open-source), Dev-C++, Eclipse (open-source), Microsoft Visual C++, ...etc.

1.1. Motivation de l'utilisation du langage C++ :

Les motivations de l'utilisation du C++ lors de la mise en œuvre de notre application résident dans le fait que ce travail sera intégré à la plateforme logicielle de production des surfaces gauches développée par l'équipe CFAO du CDTA où tous les modules sont développés en C++ d'un côté, et d'un autre côté, pour se conformer à la tendance qui veut que la majorité des systèmes de CFAO sont développés en C++.

2. Présentation d'OpenGL :

Open Graphics Library ou OpenGL est une API graphique multiplateforme open-source, de bas niveau, dédiée aux applications manipulant des objets en 2D ou en 3D. OpenGL est sortie en 1992 par Silicon Graphics Inc « SGI » et est actuellement géré par la société Khronos Group.



OpenGL est conçue pour développer des applications graphiques portables et elle favorise l'innovation et la simplicité d'utilisation en offrant aux développeurs de nombreuses fonctionnalités de visualisations. Etant libre, ouverte et portable, la bibliothèque graphique a pu se vendre dans le milieu scientifique et industriel et être utilisé dans de nombreuses applications artistiques ou de traitement d'images.

En raison de ses performances, l'API OpenGL est aussi présente dans différents domaines tels que jeux-vidéo ludiques, applications web, systèmes embarqués, téléphones portables, ...etc. C'est une API très performante et simple d'utilisation qui permet de réaliser des rendus et des scènes complexes selon les besoins. Cette technologie est ouverte et est implémentée par de nombreuses bibliothèques sous des langages de programmation différentes dont des langages de script comme Python ou Ruby. Par ailleurs, OpenGL est portable et multiplateforme : théoriquement, un même code OpenGL fonctionne sur tous les systèmes d'exploitation dont Windows, Linux, Mac et sur toutes les plateformes.

3. Présentation de Borland C++ Builder 6 :

Le Borland C++ Builder possède toute la puissance du langage C++ orienté objet. Il offre la possibilité de développer rapidement des applications sous Windows grâce à ses

différentes bibliothèques. Il permet la création instantanée des interfaces utilisateurs car il offre une gestion de l'interface. Le compilateur C++ qui est inclus, Borland C++ Compiler, est un compilateur et un optimiseur de code, de haut rendement et multithread, qui agit en second plan. Sans arrêter le travail, les applications se compileront et s'exécuteront plus rapidement.

4. Interface générale de l'application

4.1. Simulation et captures d'écran :

Le test d'interférences et le test de collisions sont effectués sur la pièce représentée par la Figure 39. Cette pièce est conçue dans un logiciel spécialisé de CAO et elle est composée de surfaces de formes très complexes. Dans ce même logiciel, la pièce est approximée par un ensemble des triangles. Ces triangles sont stockés dans un fichier STL qui est utilisé comme entrée dans notre application.

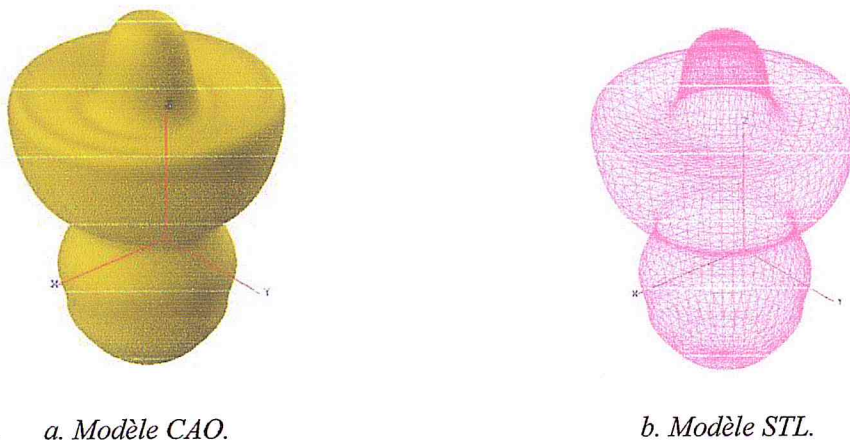


Figure 39 : Forme de la pièce de test.

L'interface de l'application logicielle développée est composée de sept (07) onglets. Chaque onglet est spécialisé dans une phase du processus de vérification et de correction des interférences et des collisions. Les différents onglets sont :

1. Premier onglet : est réservé à la lecture du fichier STL.
2. Deuxième onglet : est réservé à la préparation des données.
3. Troisième onglet : est réservé à la création des contours d'usinage.
4. Quatrième onglet : est réservé à la sélection de la forme de l'outil.

5. Cinquième onglet : est réservé au test de l'interférence et de la collision.
6. Sixième onglet : est réservé à l'évitement des interférences et des collisions.
7. Septième onglet : est réservé à la simulation virtuelle des mouvements de l'outil.

4.1.1. Lecture du fichier STL :

La première étape dans ce travail est la lecture d'un fichier STL. Ceci est réalisé suite au lancement de l'application logicielle et choix de l'onglet « Lecture du fichier STL (Figure 40). Par simple clic sur le bouton « Ouvrir fichier STL » et sélection du fichier à ouvrir. Après lecture du fichier STL, les résultats suivants sont affichés :

- Nombre total des sommets et le nombre total des triangles.
- Coordonnées des points limites de la pièce brute Xmin, Ymin, Zmin, Xmax, Ymax et Zmax.

La seconde étape consiste à afficher la pièce brute en mode filaire et en mode rendu. Les normales des sommets sont déterminées suite au clic sur le bouton « Calculer la normale ». A ce niveau, les résultats visibles sont :

Figure 40 shows a software dialog box titled 'Lecture du fichier STL' with a sub-tab 'Préparation des données'. It contains a 'Lire Fichier STL' button. Below it, a table displays 'Limites du brut' with the following values:

Limites du brut					
Xmin	6.707	Ymin	6.707	Zmin	0.015
Xmax	102.619	Ymax	102.619	Zmax	132.077
Longueur	95.912	Largeur	95.912	Hauteur	132.062
Nombre de points	6750	Nombre de triangles	13512		

Below the table is a 'Visualisation' section with the following options:

- Sommet des triangles: 1
- Triangles en filaire: 1
- Triangle en rendu
- Normale des triangles: 6 1
- Brut en filaire
- Brut en rendu: 1

Figure 40 : Onglet « Lecture du fichier STL ».

Une fois les résultats obtenus, l'utilisateur passe au deuxième onglet pour préparer les données et pour créer les cellules.

4.1.2. Préparation des données :

Dans cet onglet, deux actions sont lancées séquentiellement (Figure 41). La première action consiste à enrichir le modèle STL par l'insertion de points aux triangles tout en imposant l'aire maximale d'un triangle. Dans la deuxième action, la pièce brute est divisée en cellules après la spécification du nombre des cellules suivant les axes X, Y et Z. A cette étape les paramètres visibles sont :

- ✓ Cellules des sommets et les points des cellules.
- ✓ Points et triangles ajoutés.

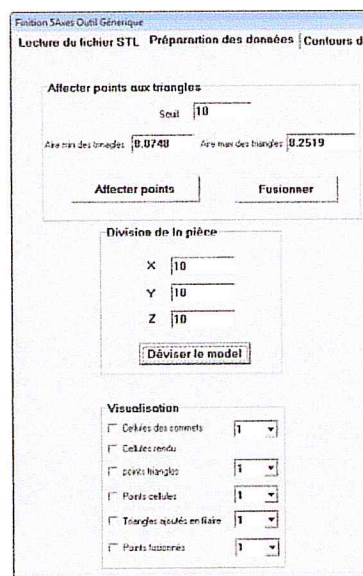


Figure 41 : Onglet « Préparation des données ».

4.1.3. Création des contours d'usinage :

Dans cet onglet, les contours de contact sont calculés à partir d'une profondeur de passe introduite par l'utilisateur (Figure 42). A ce niveau, les paramètres visibles sont :

- ✓ Points de contact.
- ✓ Normales aux points de contact.
- ✓ Contours de contact.

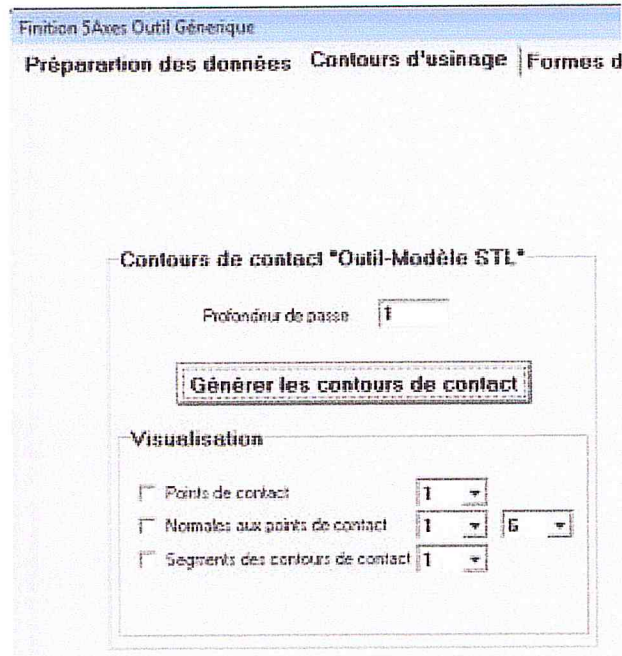


Figure 42 : Onglet « Calcul des contours d'usinage ».

4.1.4. Formes d'outil :

Le quatrième onglet est réservé à la sélection de la forme de l'outil ainsi que de ses dimensions à partir de bases de données. Dans ce travail, quatre formes d'outils peuvent être choisies à savoir : cylindrique, hémisphérique, torique et générique (Figure 43). La sélection d'un outil implique la récupération de ses paramètres :

R : rayon d'outil (corps).

r : petit rayon d'outil (rayon de coupe).

L : longueur d'outil.

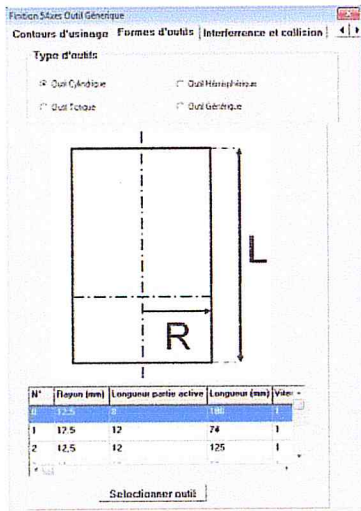
la : longueur de la partie active.

a : distance radiale.

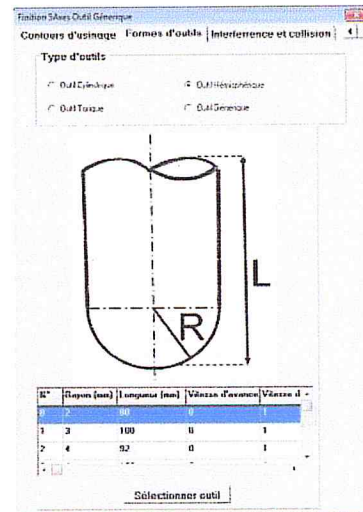
b : hauteur du cône.

α : angle de définition du cône.

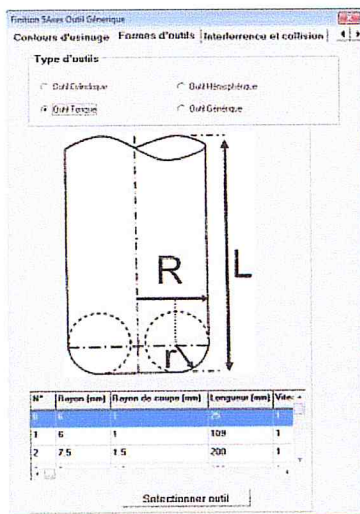
β : angle de définition du tronc de cône.



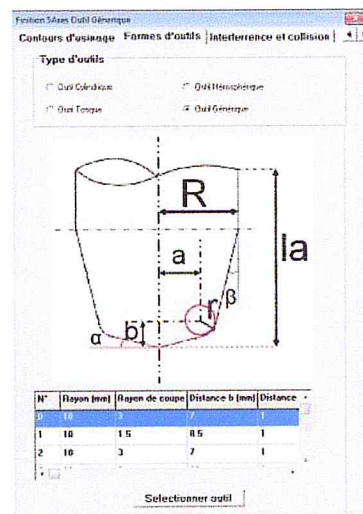
a. Outil cylindrique.



b. Outil hémisphérique.



c. Outil torique.



d. Outil générique.

Figure 43 : Formes d'outils.

4.1.5. Test d'interférences et de collisions :

Le cinquième onglet permet de détecter les interférences et les collisions (Figure 44). Cet onglet est divisé en deux parties.

La première partie permet de visualiser les paramètres de test pour chaque point de contact. A ce niveau, les paramètres pouvant être visualisés sont :

- ✓ Nombre total de plans : l'utilisateur a la possibilité de sélectionner n'importe qu'elle plan et de visualiser ses contours.

- ✓ Nombre de contours d'un plan : dans le cas où le plan contient plusieurs contours l'utilisateur a la possibilité de sélectionner un contour à la fois.
- ✓ Nombre de points d'un contour : donne le nombre total des points du contour actif.

La deuxième partie permet de détecter les interférences et les collisions pour tous les points de contact. A ce niveau, les paramètres visibles sont :

- ✓ Points d'interférences.
- ✓ Points de collisions.
- ✓ Points d'interférences et de collisions.
- ✓ Points hors interférences et hors collisions.
- ✓ Génération du fichier des positions et des orientations de l'outil.
- ✓ Affichage du temps de calcul.

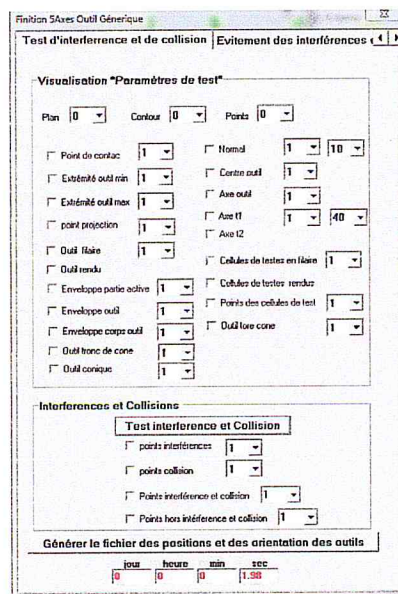


Figure 44 : Test d'interférence et de collision

4.1.6. Evitement d'interférences et de collisions :

Le sixième onglet est réservé à l'évitement des interférences et des collisions (Figure 45). Après la spécification des angles limites de basculement pour le mode « vers le segment » et pour le mode « autour du segment », l'utilisateur peut commencer par n'importe

quel mode en traitement séquentiel. Quand l'une des corrections est active l'autre est inactive. Cet onglet permet d'afficher le temps nécessaire pour éviter les problèmes d'interférences et de collisions.

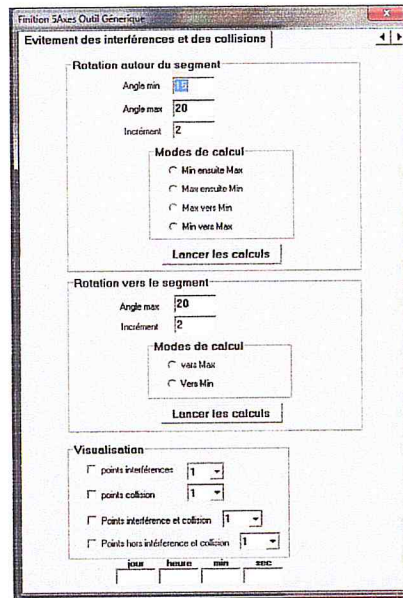


Figure 45 : Evitement des interférences et des collisions.

4.1.7. Simulation virtuelle des mouvements de l'outil :

Après la phase d'évitement des problèmes d'interférences et de collisions, le septième onglet est intégré à l'application logicielle afin de fournir à l'utilisateur un moyen lui permettant de simuler virtuellement les mouvements de l'outil par rapport à la pièce avant de passer à son usinage effectif sur machine. Deux modes de simulations sont possibles : 1) interaction avec l'environnement et 2) sans interaction.

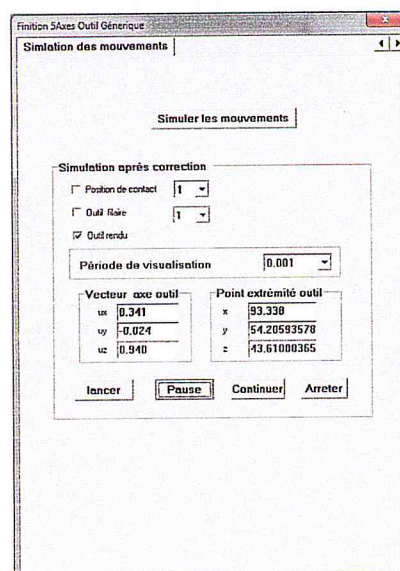


Figure 46 : Simulation virtuelle des mouvements de l'outil.

5. Exemple de validation :

La validation de l'application logicielle développée est réalisée en simulation sur un modèle de pièce avec des régions en contre dépouille (Figure 47.a). Cette pièce est triangulée de deux manières différentes : la première avec un modèle STL grossier (Figure 47.b) tandis que la deuxième avec un modèle STL fin (Figure 47.c). Le processus de génération de la trajectoire d'outil, est appliqué pour les trois formes d'outils : cylindrique, hémisphérique et torique. Par la suite, une comparaison des résultats est menée. Les outils utilisés sont sélectionnés à partir de bases de données d'outils dont les paramètres sont les suivants :

- Outil hémisphérique : $R=5\text{mm}$, $L=110\text{mm}$.
- Outil cylindrique : $R=12.5\text{mm}$, $L=125\text{mm}$.
- Outil torique : $R=8\text{mm}$, $r=1.2\text{mm}$, $L=106\text{mm}$.

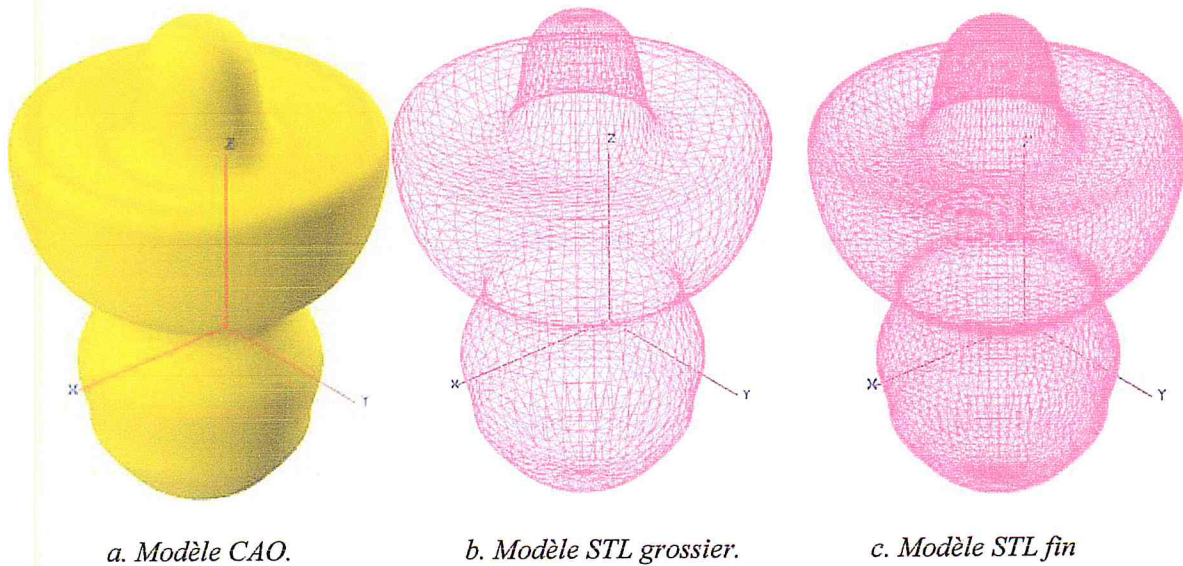


Figure 47 : Modèle CAO de la pièce de test et les modèles STL associés.

Modèle STL grossier :

Les résultats présentés dans ce qui suit sont relatifs au modèle STL grossier.

Étape 1 : dans cette étape, le fichier STL modélisant la forme de la pièce à usiner est sélectionné et le modèle STL est lu (Figure 48). Ce modèle est composé de 2479 sommets et 4954 triangles.

Les coordonnées de ses points limites sont :

$X_{min} = 6,822\text{mm}$ $Y_{min} = 6,734\text{mm}$ $Z_{min} = 0,001\text{mm}$

$X_{max} = 102,620\text{mm}$ $Y_{max} = 102,591\text{mm}$ $Z_{max} = 132,877\text{mm}$

Les dimensions du brut sont :

Longueur = 95,799mm Largeur = 95,857mm Hauteur = 132,876mm

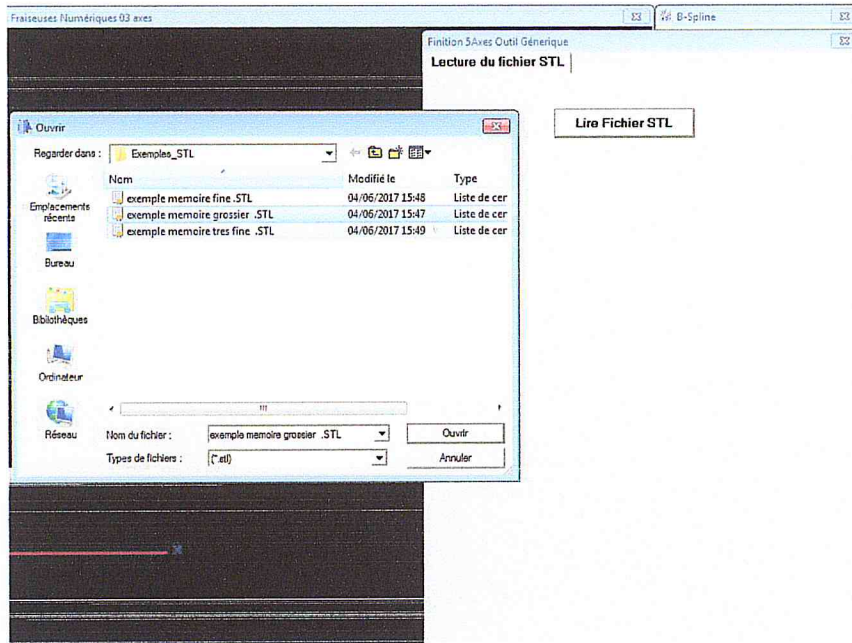


Figure 48 : Sélection d'un fichier STL.

Étape 2 : suite à la lecture du modèle STL, les paramètres du brut de la pièce sont calculés et les normales des sommets des triangles sont estimés (Figure 49). Cette figure montre clairement l'existence de zones où les normales des sommets sont dirigées vers l'axe Z négatif. Donc, ces zones ne peuvent être usinées en 03-axes, d'où l'intérêt de l'application logicielle développée.

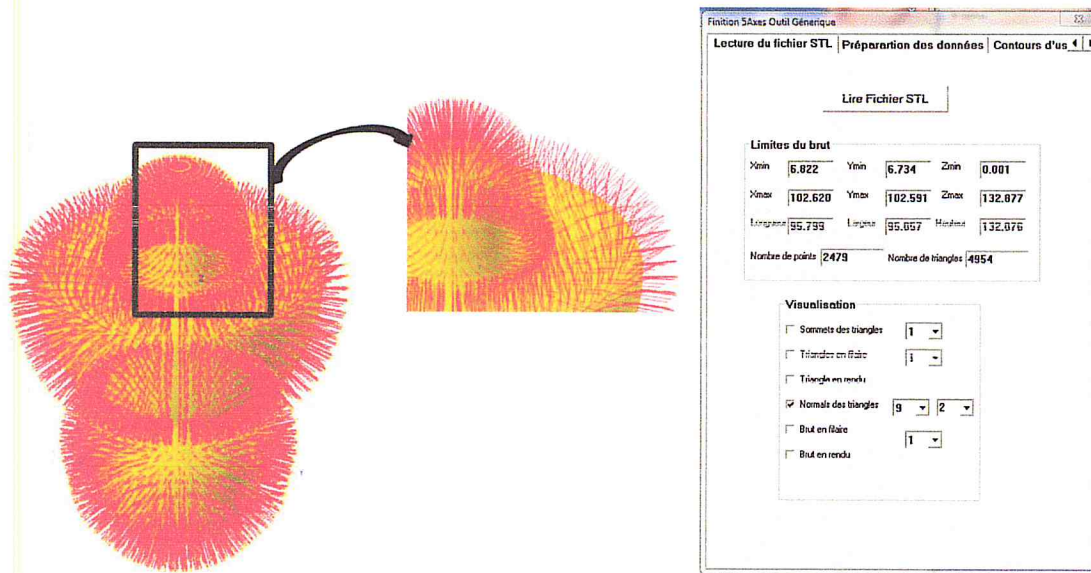


Figure 49 : Estimation des normales.

Etape 3 : dans cette étape, le modèle STL est enrichi en fixant l'aire maximale des triangles égale à 5mm^2 (Figure 50). Avant l'insertion de nouveaux de points, les maximum et minimum des triangles sont égales respectivement à $20,6438\text{mm}^2$ et 0.3632mm^2 . Après l'insertion de nouveaux de points ces aires deviennent $4,98\text{mm}^2$ et 0.3632mm^2 .

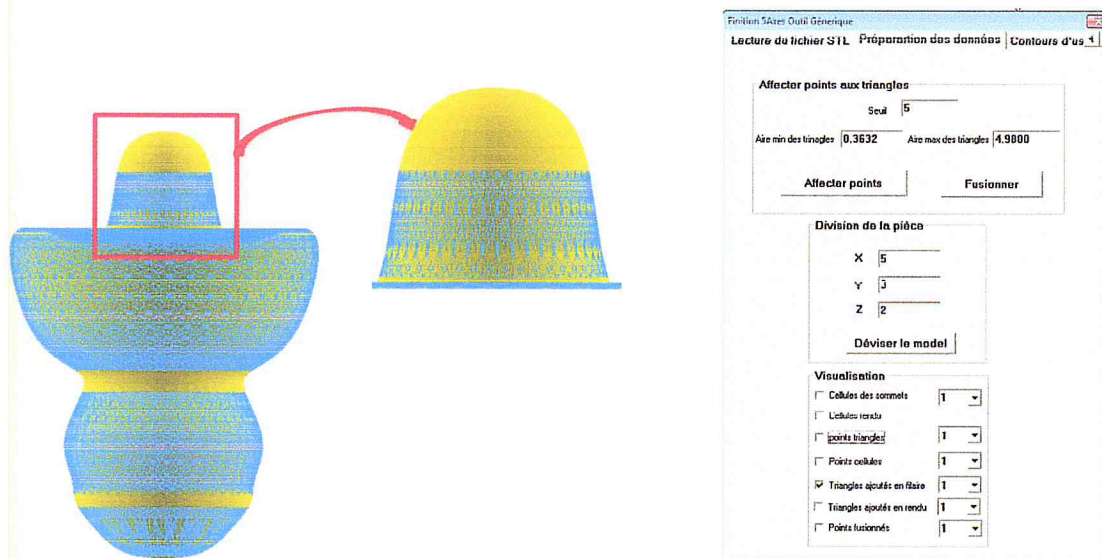


Figure 50 : Enrichissement du modèle STL.

Etape 4 : à ce niveau, les cellules sont créées en fixant le nombre de cellules à 5, 3 et 2 suivant l'axe X, l'axe Y et l'axe Z respectivement (Figure 51). Chaque cellule contient des points de la pièce étudiée.

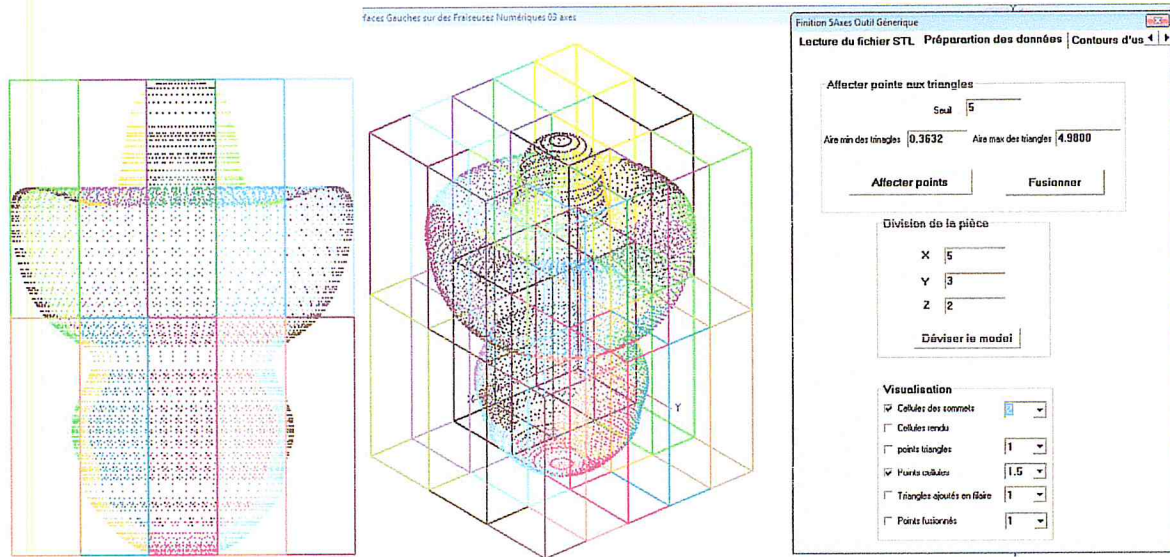


Figure 51: Division de la pièce en cellules.

Etape 5 : dans cette étape, les contours d'usinage, représentant les segments de contact entre l'outil et la surface, sont créés suite à la spécification de la profondeur de passe égale à 5mm. Ce qui donne 12 contours (Figure 52). Lors du calcul des contours d'usinage, la normale en chaque point de contact outil/surface est estimée afin de positionner l'outil correctement (Figure 52).

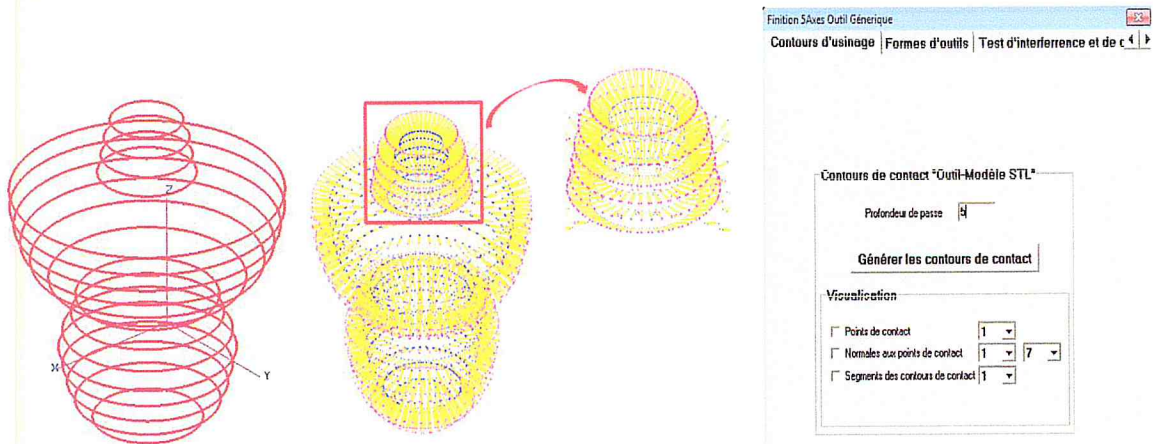


Figure 52 : Contours d'usinage et normales aux points de contact.

Etape 6 : dans cette étape, la forme de l'outil à utiliser ainsi que ses paramètres sont sélectionnés à partir de base de données (Figure 53).



Figure 53 : Formes d'outils.

Etape 7 : en chaque position de contact, l'enveloppe de l'outil est déterminée et par la suite les cellules qui se chevauchent avec l'enveloppe d'outil sont identifiées en fonction de la forme et des dimensions de l'outil sélectionné (Figure 54, Figure 55 et Figure 56). Les points des cellules sont les points susceptibles d'engendrer des problèmes d'interférences et de collisions.

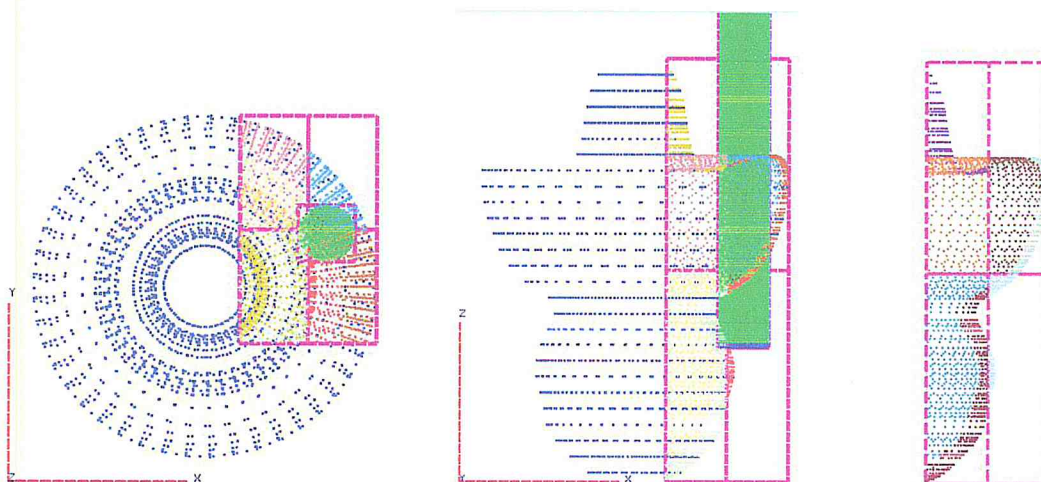


Figure 54 : Enveloppe d'outil et cellules de chevauchement pour l'outil torique.

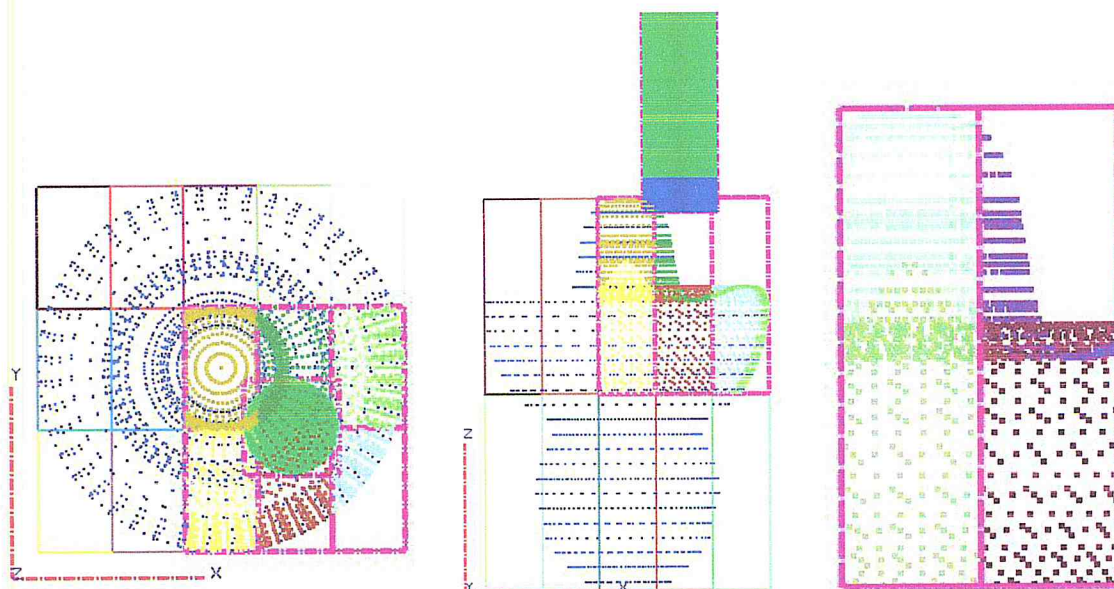


Figure 55 : Enveloppe d'outil et cellules de chevauchement pour l'outil cylindrique.

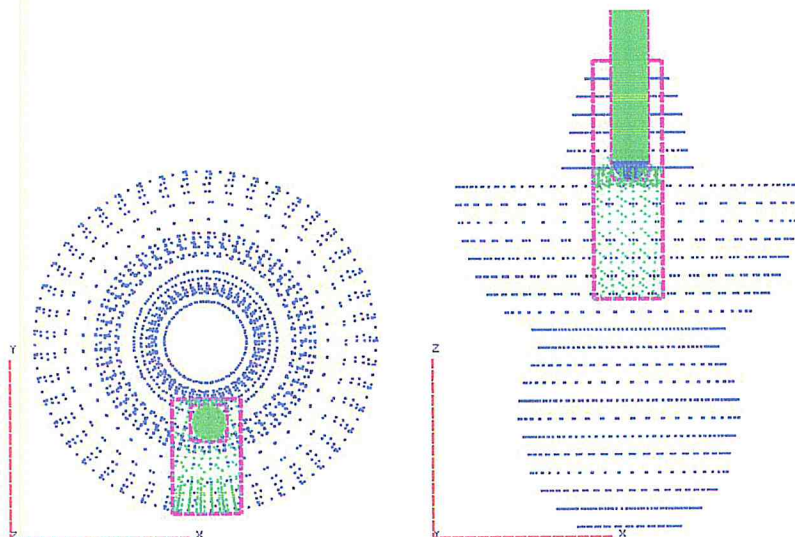
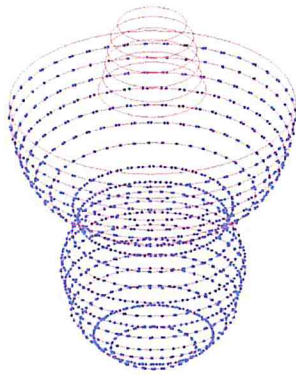
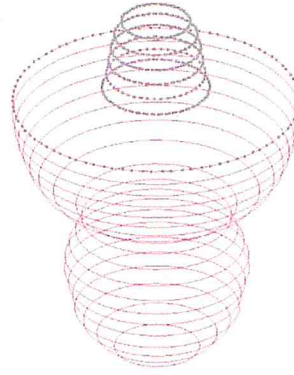


Figure 56 : Enveloppe d'outil et cellules de chevauchement pour l'outil hémisphérique.

Étape 8: la détection des problèmes d'interférences et de collisions pour tous les points de contact est lancée dans cette étape. La Figure 57 montre les résultats de détection pour les trois formes d'outils. L'analyse des résultats montre que l'outil hémisphérique et l'outil torique sélectionné ne créent pas des interférences alors que l'outil cylindrique génère ces problèmes. Ce fait est dû à ce que les rayons des deux outils sont petits par rapport au rayon de courbure de la surface et que l'outil cylindrique n'usine pas les parties concaves.

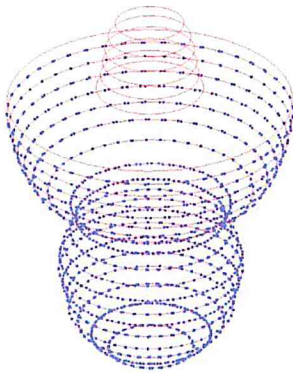


a. Points avec collisions

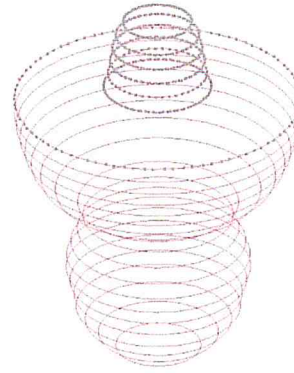


b. Points hors collisions et interférences.

Figure 57: Types des points de contact pour l'outil torique.

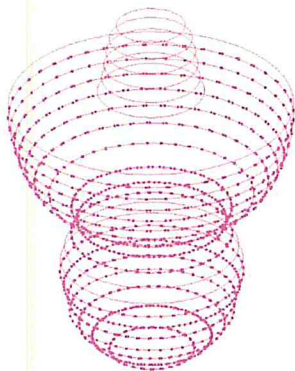


a. Points avec collisions

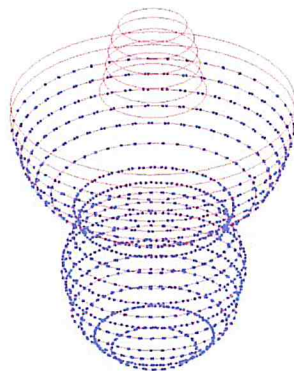


b. Points hors collisions et interférences.

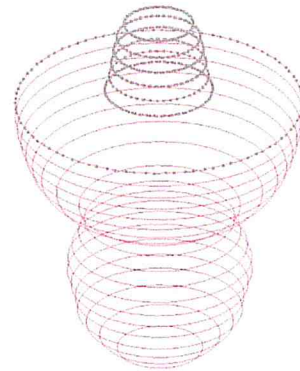
Figure 58 : Types des points de contact pour l'outil hémisphérique.



a. Points avec interférences.



b. Points avec collisions



b. Points hors collisions et interférences.

Figure 59 : Types des points de contact pour l'outil cylindrique.

Étape 9: cette étape permet d'éviter les interférences et les collisions suite au changement de l'orientation de l'outil. La Figure 60 montre la rotation de l'outil autour du segment tandis que la Figure 61 montre l'inclinaison de l'outil vers le segment. La figure 62 montre les

enveloppes des outils hémisphériques, cylindriques et toriques pour des orientations quelconques des outils.

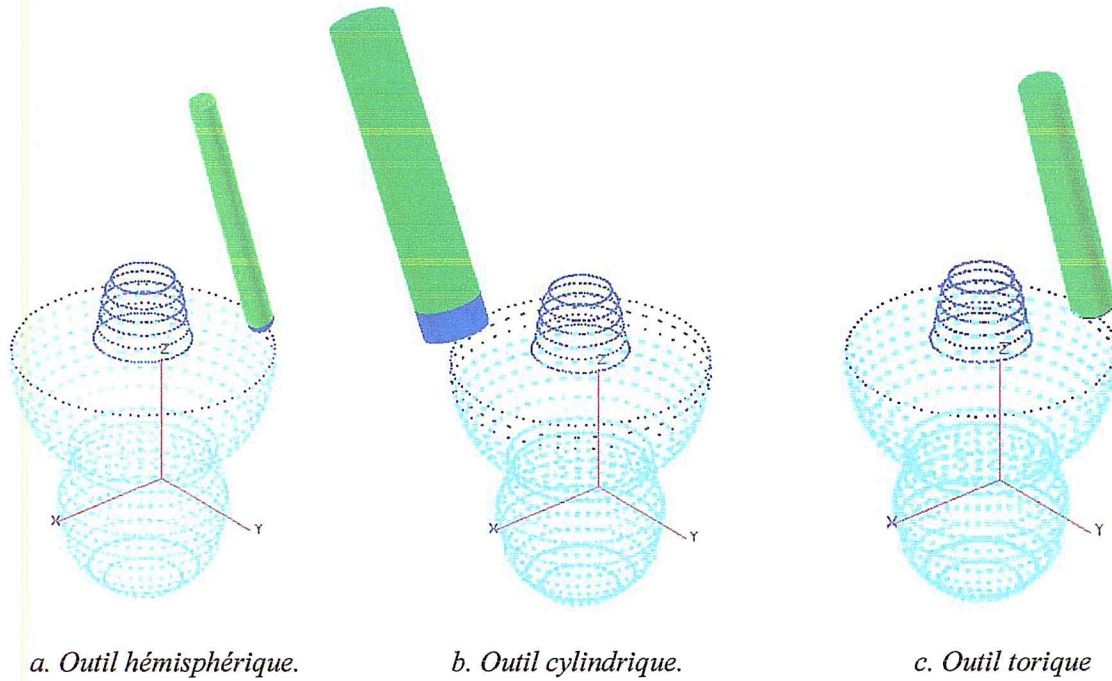


Figure 60 : Orientation de l'outil autour du segment.

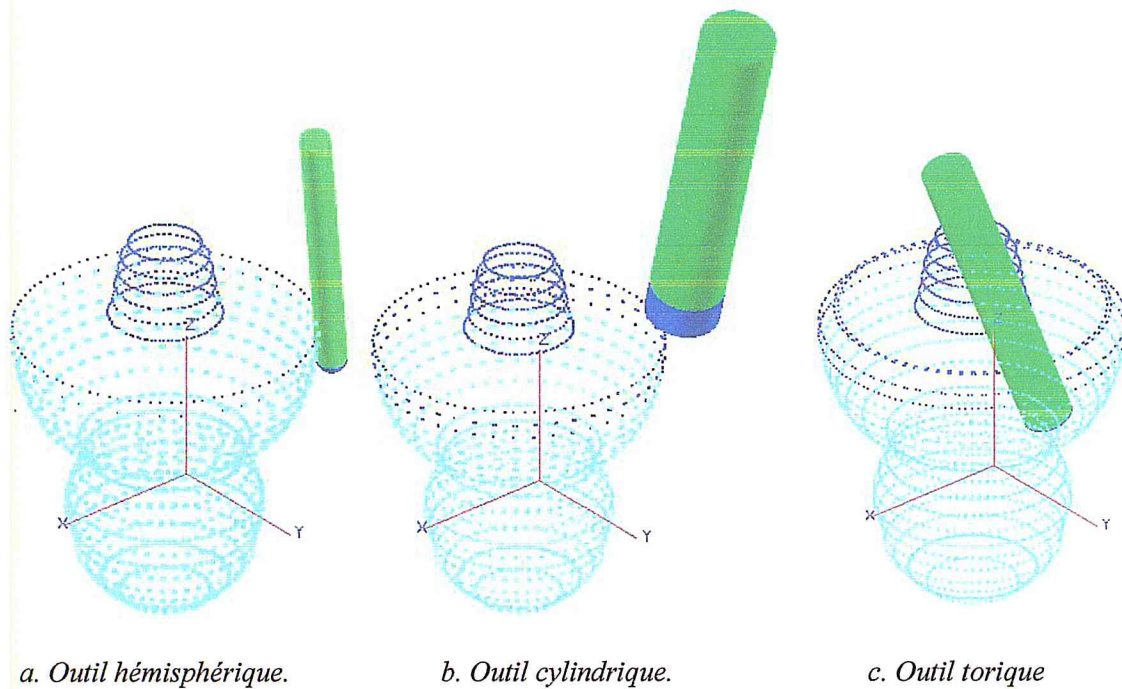
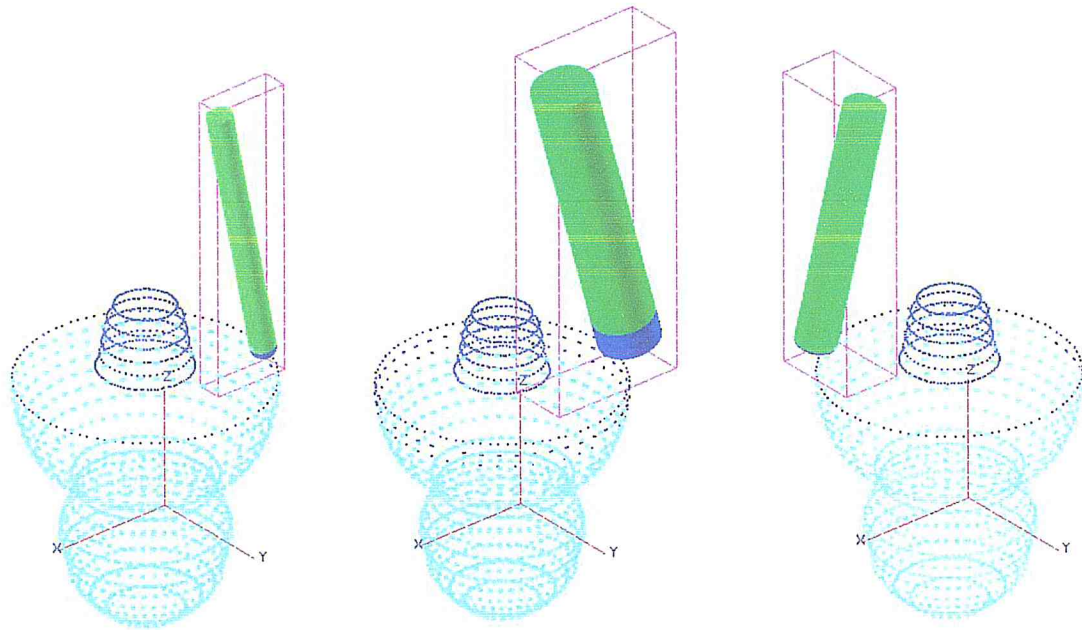


Figure 61 : Inclinaison de l'outil vers le segment.



a. Outil hémisphérique.

b. Outil cylindrique.

c. Outil torique

Figure 62 : Enveloppe des outils lors de l'orientation.

Etape 10 : dans le but de générer le programme d'usinage « G-Code », la trajectoire d'outil est sauvegardée dans un fichier texte avec les paramètres associés aux points de contact (Figure 63). Les données sauvegardées sont les coordonnées du point de contact (X, Y, Z), les composantes du vecteur directeur de l'axe de l'outil (U_x, U_y, U_z) ainsi que les angles d'orientation par rapport au segment « α » et autour du segment « β ».

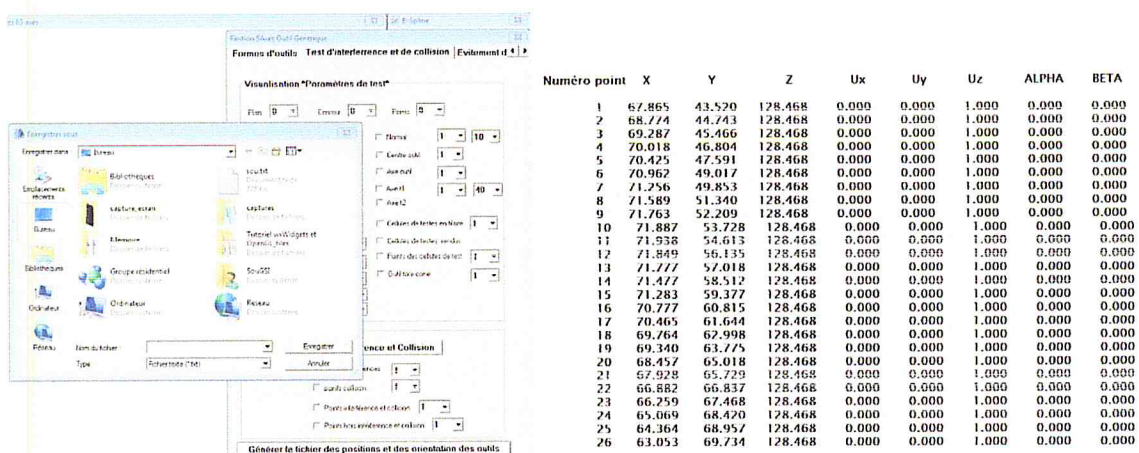


Figure 63 : Enregistrement des paramètres du trajet d'usinage.

Etape 11: à ce niveau, le trajet d'outil est simulé virtuellement où à chaque position sont affichées les coordonnées du point de contact et les composantes du vecteur directeur de l'axe de l'outil. En mode interactif, il est possible de manipuler toute la scène sans restriction.

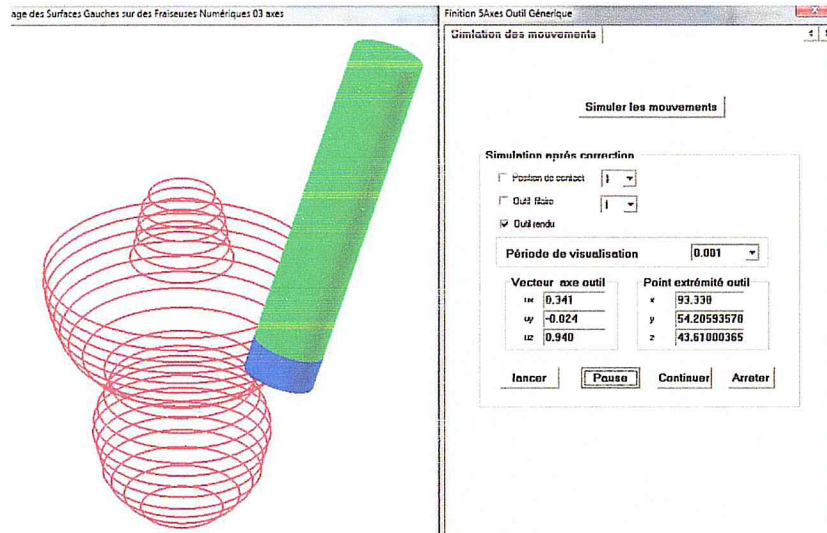


Figure 64 : Simulation des mouvements.

Modèle STL fin :

Pour ce modèle, les résultats des différentes étapes, avec les mêmes paramètres pris pour le modèle grossier, sont donnés par la Figure 65. Ce modèle est composé de 6758 sommets et 13512 triangles.

Les coordonnées de ses points limites sont :

$$X_{\min} = 6,707\text{mm} \quad Y_{\min} = 6,707\text{mm} \quad Z_{\min} = 0,015\text{mm}$$

$$X_{\max} = 102,619\text{mm} \quad Y_{\max} = 102,619\text{mm} \quad Z_{\max} = 132,877\text{mm}$$

Les dimensions du brut sont :

$$\text{Longueur} = 95,912\text{mm} \quad \text{Largeur} = 95,912\text{mm} \quad \text{Hauteur} = 132,862\text{mm}$$

Pour ce modèle, seuls les résultats relatifs à l'outil cylindrique sont présentés.

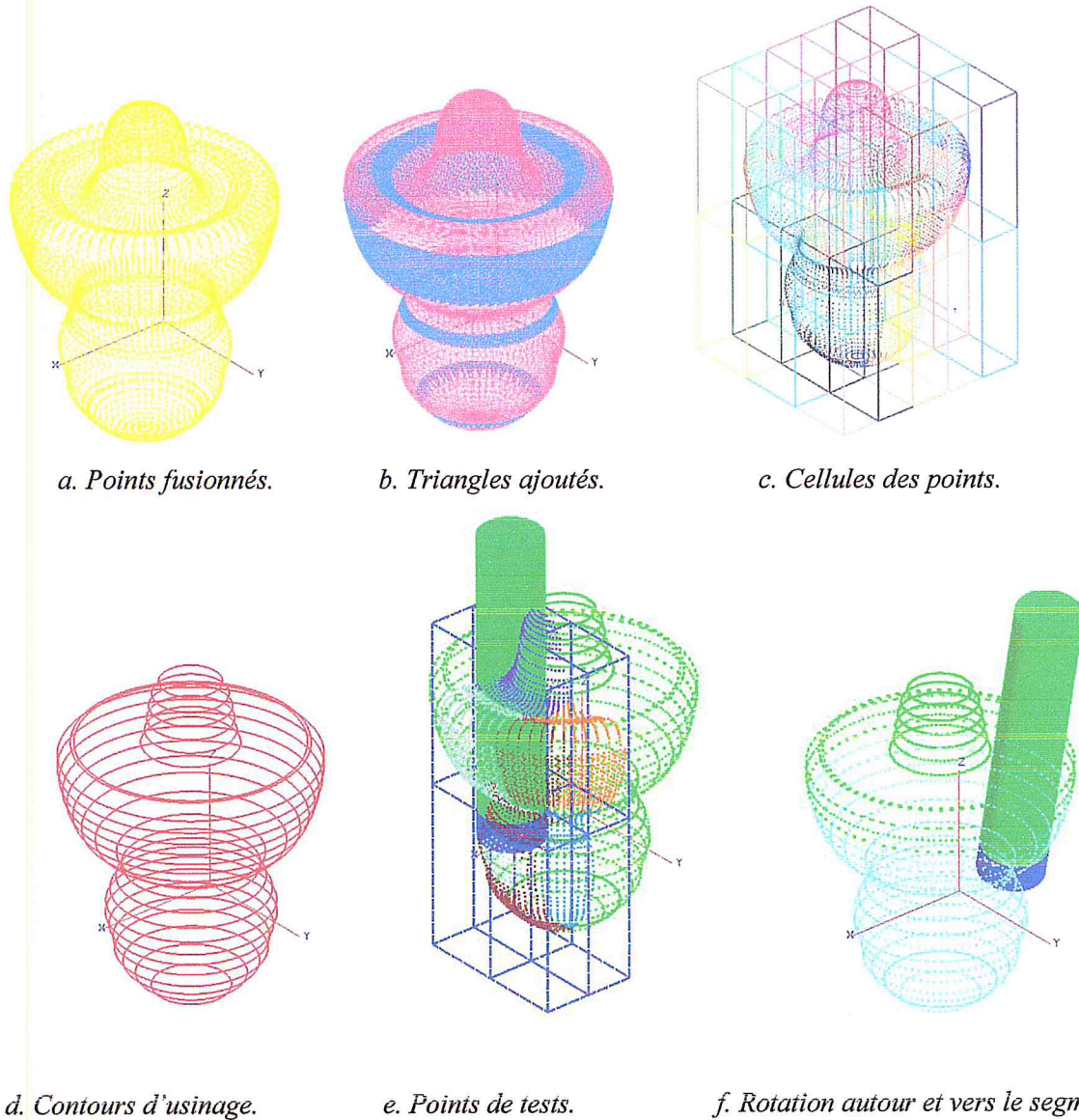


Figure 65 : Résultats du modèle STL fin.

Comparaison :

	Temps de Calcule torique	Temps de calcule hémisphérique	Temps de calcule cylindre	Aire max	Aire min	Nombre de points	Nombre de triangles
Modèle grossier	5.2 min	4.23 min	3.37 min	20.6438 mm ²	0.3632 mm ²	2479	4954
Modèle fin	7.25 min	5.11 min	4.20 min	8.2519 mm ²	0.0748 mm ²	6758	13512

Tableau 3 : Comparaison entre modèle grossier et modèle fin

Il ressort du tableau précédent que plus le modèle STL est fin plus le temps de calcul augmente considérablement. Donc, il est primordial d'optimiser davantage le processus de détection et d'évitement des interférences et des collisions. D'un point de vu matériel, il y a lieu d'utiliser des stations de calcul avec des cartes graphiques très puissantes.

L'analyse des résultats obtenus pour les trois formes d'outils, montre qu'il est impératif de sélectionner judicieusement les formes et les dimensions des outils en fonction de la géométrie surfaces composant la pièce ainsi que de ses dimensions sans oublier sa fonctionnalité.

6. Conclusion :

Dans ce chapitre, les différentes étapes de notre application logicielle ont été présentées et le travail réalisé a été validé à travers un exemple concret de pièce de forme gauche

L'application a été déroulée depuis la lecture du fichier STL jusqu'à la simulation des mouvements de l'outil le long de la trajectoire d'usinage.

La validation à travers deux exemples ne peut refléter l'intérêt de l'application dans le domaine de l'usinage des surfaces gauches en 05-axes, mais elle constitue un nouveau maillon dans l'environnement de fabrication développé par l'équipe CFAO du CDTA.

Les travaux menés dans le cadre de ce mémoire se situent au niveau de la FAO et sont principalement de nature géométrique. Ils portent sur la génération de la trajectoire d'outil en finition en 05 axes des surfaces gauches discrètes à contre dépouille représentées par leurs modèles S.T.L. Le concept de l'outil générique a été introduit, d'une part, pour couvrir une large gamme de surfaces traitées, et d'autre part, pour optimiser la détection des interférences et des collisions.

La modélisation explicite de positionnement et d'orientation de l'outil de coupe (générique) que nous avons mise en œuvre, a permis de développer une nouvelle approche de détection et de correction des interférences et des collisions du fait qu'elles sont intégrées dans la même procédure. Les approches précédemment développées dans la littérature séparent la détection et la correction des interférences de celle des collisions.

Le concept de l'outil générique en fraisage à 5 axes s'impose comme une nouvelle manière de planifier les trajectoires et plus particulièrement l'orientation de l'axe de l'outil. La mise en œuvre proposée dans ce mémoire; a été validée en simulation; sur des exemples de surfaces discrètes très complexes.

Arrivée au terme de ce sujet, nous passons en revues deux aspects : les améliorations éventuelles et les extensions à donner à ce travail :

1. Utilisation d'une nouvelle approche pour l'orientation de l'outil afin d'éviter les interférences et les collisions.
2. Détermination de la combinaison optimale des outils hémisphériques, cylindrique et torique en intégrant la contrainte du nombre maximum d'outils à utiliser.
3. Génération du programme d'usinage « G-Code » pour n'importe quelle cinématique des fraiseuses numériques 05-axes.
4. Simulation de l'opération d'enlèvement de matière en finition 05-axes en considérant l'outil générique.
5. Simulation virtuelle de la cinématique des fraiseuses numériques 05-axes.
6. Ebauchage des surfaces gauches en 05-axes.
7. Détermination des conditions de coupe optimales en particulier la vitesse d'avance.
8. Génération du trajet d'outil en utilisant d'autres stratégies d'usinage (Plans Parallèles, Isoparamétrique, Iso-Crête, ...etc.).

9. Génération du trajet d'outil en utilisant l'interpolation polynomiale et en B-Spline.
10. Finition des surfaces gauches avec le profil de la fraise (fraisage en roulant).

Bibliographié

- [1] Bey, « Modélisation des courbes et des surfaces »Avril 2000.
- [2] « Adaptation des vitesses d'avance lors de l'usinage en finition des surfaces gauches » 2009
- [3] J. C. Léon, « Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO», édition Hermes, 1991.
- [4] « Usinage de pièces de formes complexes: méthode de choix de stratégie d'usinage U.G.V » juin 2006.
- [5] AHEDDAH Hacéne, « Modélisation CAO et stratégies d'usinage pour la réalisation des surfaces à géométrie compliquée (surfaces libres) » 2012-2013.
- [6] N.Belkacemi, « Développement d'une application pour la finition des pièces des formes gauches sur des fraiseuses à 5 axes par combinaison d'outil hémisphérique » juin 2016
- [7] En ligne « [http://cao.etudes.ecp.fr/?page = formats.htm #STL](http://cao.etudes.ecp.fr/?page=formats.htm#STL) »
- [8] « Usinage surfaces gauches » PDF.
- [9] F.Kamel, « Automatisation de la détermination de l'ordre d'usinage des pièces mécaniques » 2015.
- [10] RUBIO, « usinage en fraisage 3 axes » 1993.
- [11] « RÉALISATION DES FORMES GAUCHES »
- [12] S. DJEBALI, «Optimisation Globale du Processus d'Usinage des Surfaces Gauches,» 13/11/2014.
- [13] Article, « Commande numérique par ordinateur » 2003-2004.
- [14] « Sys856 Techniques avancées en EAO »
- [15] En ligne, « <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72695479> Contributeur,melusin, 16@r, Andromeda, Arnaudus, Bob08, Bserin, Butterfly austral, Cdang, Ce`dric, Dhatier, DocteurCosmos, Eblanche, Elg, Erasoft24, F&TI "Monin Stéphane", Florival fr, Greudin, Haha, Jordiferrer, Jpm2112, Kilith, Mike1024, Nerijp, Neuceu, Oxo, Plbcr, Poppynette95, Romary, Sahara, Sardur, Sebjarod, Shakki, Simona, Walpole, Wikialine, Willow51, Wisigoth, Zedh, 52 modifications anonymes ».
- [16] TRAMETAL, PP.15-22 « Outil de coupe » mai 2004.
- [17] Pierre P. Lefebvre 1 and Bert Lauwers2,« STL Model Segmentation for Multi-Axis Machining Operations Planning »

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

[19] « five axis flank milling of impellers: optimal geometry of a conical tool considering stiffness and geometric constraints » 2016.

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

[21] En ligne ; « <http://fr.wikipedia.org/wiki/fichier-de-st%C3%A9olithographie>. »

[22] Mémoire de recherche Bibliographie « Usinage de formes gauches ; génération de trajets outil sans collision » juillet 1996.

[23] « Modélisation mécanique intégrant des champs répulsifs pour la génération de trajectoires 5 axes hors collision » novembre 2014.

[24] En ligne « http://www.anyflo.com/bret/cours/math/am.htm#changement_d_axe »

[25] « <https://www.mathcurve.com/surfaces/cylindrederevolution/cylindrederevolution.shtml> »

[26] En ligne, « <https://www.mathcurve.com/surfaces/tore/tore.shtml> »

[27] En ligne, « <http://www.educastream.com/cones-cylindres-illimites-terminale-s> »

