

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ALGÉRIE**

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

N° D'ordre:.....



Faculté des sciences

Département d'informatique

Présenté par :

Belkacemi Nour El Houda.

Mémoire

Présenter pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Mathématique et informatique

Filière : Informatique

Spécialité : Informatique

Option : Génie des systèmes informatique

**Conception et Développement d'une Application Logicielle pour la
Combinaison des Outils Hémisphériques Lors de la Finition des Surfaces
Complexes sur des Fraiseuses 05-axes**

Soutenu le :

Mr. Kameche Abdallah Hicham	Promoteur
Mr. Bey Mohamed	Encadreur
Mr. Bendifallah Mohamed El Hassane	Co-encadreur
Mr Cherif Zahar Amine	Président
M ^{elle} Toubaline Nesrine	Examinatrice

Promotion 2015/2016



Merci Allah (Mon Dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire (ya kayoum).

La présentation d'un mémoire est certes le produit de l'effort de l'élève master, mais il est aussi le fruit d'un travail de groupe

Je ferais un agréable devoir de remercier mon promoteur, Mr KAMECHE Abdallah Hicham pour sa patience et sa persévérance dans le suivi de ce travail et de m'avoir fait bénéficier de son expérience.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr. M. BEY et Mr H. BENDIFALLAH Co-encadreur de m'avoir proposé un sujet aussi intéressant, d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaire pour mener à bien la réalisation de ce projet et surtout pour leurs disponibilité et leurs sens de communication.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres de l'équipe CFAO du CDTA en particulier Mme K. Bouhadja, Mme Z. Tchantachan, Melle S. Ferhat sans oublier Mr A. Mehdoum chercheur permanent au CDTA pour la pertinence de leurs remarques et la justesse de leurs conseils

Je tiens à remercies le président de jury ainsi que les membres de jurys d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Un remerciement spéciale pour Madame Arossi Sana et Madame Boutoumi Bachira enseignantes à l'université du Blida qui nous ont toujours aidées et apportées leur directives et remarques.

Ainsi qu'à l'ensemble des enseignants du département d'informatique qui ont contribué à ma formation durant mes années d'étude et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merçi 

Dédicace

*L'être le plus cher au monde en témoignage de mon respect, à mon amour et mon plus grand rattachement, à mon très cher père **ABDNACER** aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fourni jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.*

*A la femme la plus affectueuse et la plus douce au monde, l'ange le plus tendre qui a été toujours pour moi une source d'amour, de pitié et d'espoir, ma très chère mère **HAYET***

A mes frères et mes sœurs

A mes très chères tantes et mes oncles

*A tous les membres de la famille **BELKACEMI ET CHARFAOUI***

*A tous mes très chères amies, A tous les membres de la section **GSI** qui m'ont fasciné par leur savoir, leur curiosité d'esprit et leur influence*

Belkacemi Nour el Houda.



Table des matières

Introduction générale	2
Chapitre I : Méthode de conception des surfaces gauches et modèle STL	5
1. Représentation des surfaces	6
1.1. Formes non paramétriques	6
1.2. Formes paramétriques	7
2. Méthode de conception des surfaces paramétriques.....	8
2.1. Méthodes basées sur l'utilisation des points (Modèles discrets).....	8
2.2. Méthodes basées sur l'utilisation des courbes	8
3. Formats d'échange de données	8
3.1. Format STL (Stereo-lithography Tessellation Language).....	9
3.1.1. Structures d'un fichier STL.....	10
3.1.2. Caractéristiques du format STL	10
4. Processus d'usinage	11
4.1. Phases du processus d'usinage	11
4.1.1. Gamme d'usinage	12
4.1.2. Usinage.....	12
4.1.3. Choix d'outils.....	17
4.1.4. Génération de la trajectoire en FAO	18
4.1.5. Le post processeur.....	20
5. Machine-outil.....	20
5.1. Machine-outil à commande numérique (MONC)	21
5.1.1. Orientation et Axes normalisés	21
5.2. Outil de coupe	23
5.2.1. Types d'outils de coupe	23
5.2.2. Paramètres d'outil de coupe.....	24
5.2.3. Positionnement de l'outil	24
5.2.4. Orientations des outils.....	25
5.3. Identification des problèmes d'interférences et de collisions	25
5.3.1. Les types d'interférences	26
5.3.2. Détection des interférences et collisions.....	26
5.3.3. Détection des positions de vitesse nulle.....	27

6. Conclusion	27
Chapitre II : Etude conceptuelle.....	30
1. Architecture générale de l'application.....	29
1.1. Génération des contours	30
1.1.1. Organigramme de génération de contour.....	31
1.2. Création des cellules.....	32
1.2.1. Affectation des sommets aux cellules.....	33
1.2.2. Organigramme de création de cellules.....	34
1.3. Détermination de la zone d'interférence	35
1.3.1. Organigramme de détection de la zone d'interférence	36
1.4. Détermination de la zone de collision	37
1.4.1. Organigramme de détection de la zone de collision	38
2. Stratégies de tests.....	39
2.1. Première approche.....	40
2.1.1. Test des interférences.....	40
2.1.2. Test de collision	43
2.2. Deuxième approche.....	49
2.2.1. Organigramme de gestion des interférences et de collisions deuxième approche..	49
2.3. Etude critique	51
2.4. Test de vitesse nulle	51
2.5. Visualisation d'outil	51
2.6. Génération de la trajectoire	52
3. Conclusion	52
Chapitre III : Réalisation de l'application et expérimentation.....	57
1. Présentation du langage c++	54
1.1. Motivation de l'utilisation du langage C++	54
2. Présentation d'OpenGL	55
3. Présentation de Borland C++ Builder 6.....	55
4. La simulation et les captures d'écran.....	56
4.1. Lecture d'un fichier STL	56
4.2. Création des contours	57
4.3. Récupération des paramètres.....	58
4.4. Division de la pièce brute	61

4.5. Test d'interférences	62
4.5.1. Détection de la zone de test.....	62
4.5.2. Correction d'interférence	63
4.6. Test de collisions	63
4.6.1. Détection de la zone de collision	64
4.6.2. Correction de collision	64
4.7. Enregistrement de la trajectoire.....	64
5. Exemple de test.....	67
5.1. Résultats numériques.....	73
5.2. Etude critique	73
6. Conclusion	74
Conclusion générale	75
Bibliographie.....	76

Table des Figures

Figure 1: Localisation d'un point sur une surface paramétrique.....	7
Figure 2: Exemple d'un model STL.....	9
Figure 3: Exemple de format STL.....	9
Figure 4 : syntaxe d'un fichier STL ASCII.....	10
Figure 5: Phases du processus d'usinage.....	11
Figure 6: Orientation de l'outil en 3 axes et en 5 axes.....	13
Figure 7: Stratégies d'orientation de l'axe de l'outil lors de l'usinage en bout en 5 axes.....	13
Figure 8: Phases d'usinage.....	14
Figure 9: Modes de balayage pour les stratégies iso paramétriques.....	16
Figure 10: Stratégie des « Plans Parallèles ».....	16
Figure 11: Stratégie « Z-Constant ».....	16
Figure 12: Outil de coupe.....	17
Figure 13: Trajectoire d'Outil.....	18
Figure 14: Tolérance d'usinage.....	19
Figure 15: Hauteur de crête.....	19
Figure 16: Poste processeur.....	20
Figure 18: Machine-outil à commande numérique.....	21
Figure 17: Exemple machine-outil.....	21
Figure 19: Axes de machine-outil.....	22
Figure 20: Affectation des Axes de machine-outil.....	22
Figure 21: Outil Hémisphérique.....	23
Figure 22: Point caractéristique suivant la géométrie de l'outil.....	24
Figure 23: Mise en position et orientation des outils en 5 axes.....	25
Figure 24: Types d'interférences.....	26
Figure 25: Contours de la pièce.....	31
Figure 26: Matrice de la pièce.....	33
Figure 27: Affectation des sommets aux cellules.....	34
Figure 28: Zone de test d'interférence.....	36
Figure 29: Zone de test de collision.....	38
Figure 30: Surface de la sphère.....	40
Figure 31: Sommet S à l'intérieur de la sphère d'outil.....	41
Figure 32: Sommet S est sur la surface de la sphère d'outil.....	41
Figure 33: Sommet S est à l'extérieur de la sphère d'outil.....	41
Figure 34: point T à l'intérieur du cylindre.....	44
Figure 35: possibilité de collision.....	44
Figure 36: Point centre d'outil.....	45
Figure 37: point d'extrémité d'outil (h).....	46
Figure 38: Rotaion autour du segment.....	48
Figure 39: Inclinaison vers le segment.....	48
Figure 40: Outil hémisphérique.....	52
Figure 41: Modèle STL.....	56
Figure 42: Lecture d'un fichier STL et calcul de la normale.....	57
Figure 43: Création des contours.....	58
Figure 44: Récupération des contours.....	59
Figure 45: Points de surface.....	59
Figure 46: Contours de la pièce.....	60
Figure 47: Points centres outil.....	60
Figure 48: Normales des points de contour.....	61

<i>Figure 49: Bouton division de la pièce.</i>	61
<i>Figure 50: Matrice de la pièce.</i>	61
<i>Figure 51: Test d'interférence.</i>	62
<i>Figure 52: Zone de test d'interférence.</i>	62
<i>Figure 53: Division de la zone selon le nouvel outil.</i>	62
<i>Figure 56: Test de collisions.</i>	63
<i>Figure 54: Correction d'interférence.</i>	63
<i>Figure 55: Cas d'interférence.</i>	63
<i>Figure 57: Zone de test de collision.</i>	64
<i>Figure 58: Correction de collision.</i>	64
<i>Figure 59: Cas d'une collision.</i>	64
<i>Figure 61: Fichier de la trajectoire.</i>	65
<i>Figure 60: Enregistrement du trajet.</i>	65
<i>Figure 62: Exemple de test.</i>	67
<i>Figure 63: Ouverture d'un fichier STL.</i>	68
<i>Figure 64: Calcul des normales.</i>	68
<i>Figure 65: Calcul des contours.</i>	69
<i>Figure 66: Lecture des paramètres de la pièce.</i>	69
<i>Figure 67: Affichage des points de contours.</i>	70
<i>Figure 68: Division de la pièce en cellules.</i>	70
<i>Figure 69: Détermination de la zone de test.</i>	71
<i>Figure 70: Détermination de la zone de test.</i>	71
<i>Figure 71: inclinaison autour du segment.</i>	71
<i>Figure 72: Enregistrement de la trajectoire.</i>	72
<i>Figure 73: Fichier de la trajectoire.</i>	72

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1: caractéristiques du format STL.</i>	10
<i>Tableau 2 : caractéristiques de chaque phase.</i>	15
<i>Tableau 3: Comparaison des différents formats d'échange de données.</i>	51
<i>Tableau 4: Résultat de test selon la 1ère approche.</i>	73
<i>Tableau 5: Résultat de test selon la 2ème approche.</i>	73

Liste des Organigrammes

<i>Organigramme 1 : Architecture générale de l'application.</i>	30
<i>Organigramme 2: Génération des contours.</i>	32
<i>Organigramme 3: Création des cellules.</i>	35
<i>Organigramme 4: Création de la zone.</i>	37
<i>Organigramme 5: Détection de la zone de collision.</i>	39
<i>Organigramme 6: Gestion des interférences.</i>	42
<i>Organigramme 7: Gestion des collisions.</i>	47
<i>Organigramme 8: Gestion d'interférence et collision en même point.</i>	50

Résumé

Ce travail s'intègre dans le cadre de développement d'un environnement de fabrication de surfaces gauches initié au niveau de la division de productique et robotique du centre de développement des technologies avancées (CDTA).

L'objectif de ce travail est de concevoir et d'implémenter une approche géométrique basée sur le concept de compensation de rayon d'outil hémisphérique pour la génération de trajet d'outil sans interférences et sans collisions permettant l'usinage des surfaces gauches sur des fraiseuses 05 axes à partir de modèles de pièce discrets.

Pour se faire, nous utilisons des approches géométriques pour l'identification des interférences et des collisions, et des orientations angulaires pour leurs éliminations.

Mots clés : Surfaces gauches, modèle discret, usinage 05 axes, trajet d'outil, interférence et collision, outil hémisphérique.

ملخص

نهتم في هذه المذكرة بتطوير مجال تصنيع القطع ذات الاسطح المعقدة التي يتم معالجتها على مستوى وحدة التصنيع الروبوتيك التابعة لمركز تنمية التكنولوجيات المتطورة. الهدف من هذا العمل هو تصميم برنامج لتحديد مسارات أدوات قطع ذات نهايات كروية دون تداخل ولا تصادم مع المساحات لأجل ذلك نستعمل طرق تستند على اسس المراد تصنيعها على ماكانت ذات ٥ محاور ارتكازا على تمثيل مرقمن. للأسطح هندسية لتحديد التداخل والتصادم وتقنيات التوجيه والانحناء المطبقة على أداة القطع لتصحيحها. الكلمات المفتاحية: مساحات معقدة, نماذج متقطعة, تصنيع ٥ محاور, مسار التصنيع, تداخل و تصادم, اداة قطع كروية.

Abstract

We are interested in this memory in the development of complex surfaces manufacturing environment initiated at the production engineering division and robotics Advanced Technology Development Center (CDTA).

The goal of this work is to implement an approach based on the concept of compensation in hemispheric tool radius to generate a tool path without interference and without collisions, in order to manufacture a warped surfaces on milling 05 axes machining from a discontinuous model.

For these purposes, geometric approaches are used to identify the interference and collision. We use also an angular orientations to eliminate them.

Keywords : Complex surfaces, discrete model, 05 axes machining, tool path, interference and collision, hemispherical tool.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La mise en production d'une pièce de forme complexe réalisée sur Machine-outil à commande Numérique (MOCN) multiaxes nécessite l'utilisation de logiciels de Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO). Les données de conceptions sont fixées dans la partie Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et le processus de fabrication s'effectue dans la partie Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO). La partie conception consacre le modèle des surfaces, support permettant de déterminer les propriétés intrinsèques des surfaces (vecteurs tangents, vecteurs normaux et les rayons de courbure en chaque point de la surface) nécessaires au positionnement des outils d'usinage. Ces propriétés sont calculées à partir des formulations mathématiques des surfaces si le modèle CAO est disponible. Si le modèle CAO n'est pas disponible ou la géométrie des surfaces est très complexe, il faut recourir au processus du « Reverse Engineering » pour la reconstruction du modèle CAO en se basant sur le nuage de points acquis par digitalisation d'un objet réel sur des MMT « Machines à Mesurer Tridimensionnelle ». La reconstruction du modèle CAO étant très délicate, il devient dès lors plus judicieux de générer le trajet d'outils en utilisant le modèle triangulé créé à partir du nuage de points ou récupéré à partir des logiciels de CAO à travers les formats d'échange de données (STL).

La création du modèle triangulé permet d'estimer les propriétés intrinsèques en utilisant les méthodes d'approximation. La fiabilité de ces informations dépend de la densité des points et des triangles.

Dans la partie FAO, le choix d'une stratégie d'usinage est le point clé de la génération des trajectoires d'usinage. Pour effectuer ce choix, l'opérateur prendra en compte le type de machine en définissant le nombre d'axes nécessaires. Il fera ensuite appel à sa connaissance globale des moyens de production pour choisir le mode d'usinage ainsi que le type d'outil et des paramètres de coupe. Dans ce schéma-là, la réalisation de pièces de formes gauches présentant des flans à contre dépouille comme les aubes de turbines, les moules de fonderie ou les matrices d'emboutissage est

préparée en CFAO et exécutée sur des Machines Outil à Commandes Numérique (MOCN) 5-axes. Ces machines pilotent le bout d'outil avec trois coordonnées et l'orientation de l'axe d'outil avec deux coordonnées angulaires.

En un point de la trajectoire d'usinage un positionnement (coordonnées du bout d'outil et orientation de l'axe), est donc calculé par la FAO. Pour respecter l'intégrité de la surface, ce calcul doit aboutir à un positionnement :

- ✓ qui élimine l'interférence locale, c'est à dire que l'outil n'enlève pas la matière de la pièce mais seulement la surépaisseur d'usinage à la tolérance de forme près,
- ✓ qui élimine l'interférence globale c'est à dire la collision corps d'outil/pièce ou porte-outil/pièce.

Plusieurs approches sont utilisées pour positionner l'outil hors interférence locale et globale et montrent que pour un point de contact outil-pièce donné, l'orientation angulaire de l'axe d'outil assurant un positionnement hors collision n'est pas unique. Il existe une infinité de solutions comprises dans un domaine borné et le choix définitif des coordonnées angulaires est alors effectué en utilisant d'autres critères supplémentaires.

L'objectif assigné à ce travail est la mise en place d'une application logicielle interactive pour la finition des pièces de forme gauche à contre dépouille représentées par leur modèle discret sur des fraiseuses à 05axes par combinaison d'outils hémisphériques. Autrement dit, étant donné une surface gauches représentée par son modèle STL, et sachant que les solutions de positionnement d'un outil sur une surface complexe en fraisage en bout sont contenues dans un domaine borné sont illimitées ; « qu'elle est la combinaison d'outils hémisphériques optimale et quelles sont les angles d'orientations de ces outils qui assurent 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 ; positionnement des outils, les machines outil, les outils de coupe ainsi que le modèle de représentation des surfaces sont nécessaires.

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 leur modèle de représentation, les machines et les outils utilisés pour le fraisage en 5-axes en bout ainsi que les stratégies d'usinages sont présentés dans le premier chapitre.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation de la conception de l'application et les différentes approches et algorithmes utilisés sont mis en évidence.

Dans le troisième chapitre l'implémentation de l'application est présentée avec les exemples de validation du travail effectué

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

CHAPITRE I :

METHODE DE CONCEPTION DES SURFACES GAUCHES ET MODELE STL

Introduction

I.1 Représentation des surfaces

I.2 Méthode de conception des surfaces paramétriques

I.3 Format d'échange de donnée

I.4 Processus d'usinage

I.5 Machine-outil

Conclusion

Les pièces de formes gauches ou de formes libres sont des pièces très répandues dans notre vie quotidienne. Elles sont utilisées dans la conception et la réalisation des moules, des matrices, des formes esthétiques, ...etc. En raison de leurs formes géométriques très complexes, ces pièces sont usinées sur des fraiseuses à commande numérique à 3, 4 et 5 axes.

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 sur les différents modèles de représentation des surfaces complexes ainsi que le format des échanges de données est présenté. La deuxième partie est réservée à l'étude du processus d'usinage des surfaces complexes sur des fraiseuses numériques à 5-axes. La dernière partie est consacrée à la présentation des machines-outils à commande numérique ainsi que les outils d'usinage.

1. Représentation des surfaces

En CAO (Conception Assistée par Ordinateur) la modélisation des surfaces de formes libres (surfaces gauches) est devenue un maillon incontournable dans divers domaines industriels tels que la fabrication des moules, des matrices, des formes aérodynamiques et des formes esthétiques, ...etc. La forme de la surface est déterminée à partir de sa représentation mathématique. En CAO, les surfaces sont classées en deux grandes catégories selon leurs représentations.

1.1. Formes non paramétriques

Ces surfaces peuvent être représentées sous deux différentes formes [1] :

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

$$Z = F(X, Y) \quad (1.1)$$

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

- b. **Forme implicite:** les surfaces implicites sont définies par une fonction de trois variables [1]:

$$F(X, Y, Z) = 0 \quad (1.2)$$

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

1.2. Formes paramétriques

Une surface paramétrique est définie par un ensemble de trois fonctions réelles $X()$, $Y()$ et $Z()$. Ces fonctions dépendent de deux paramètres u et v qui appartiennent à l'intervalle $[0,1]$. Cette forme est donnée par la formule suivante [2]:

$$F(u, v) = (X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)) \quad (1.3)$$

Chaque point $F(u, v)$ de la surface paramétrique dépend des coordonnées paramétriques u et v (Figure 1).

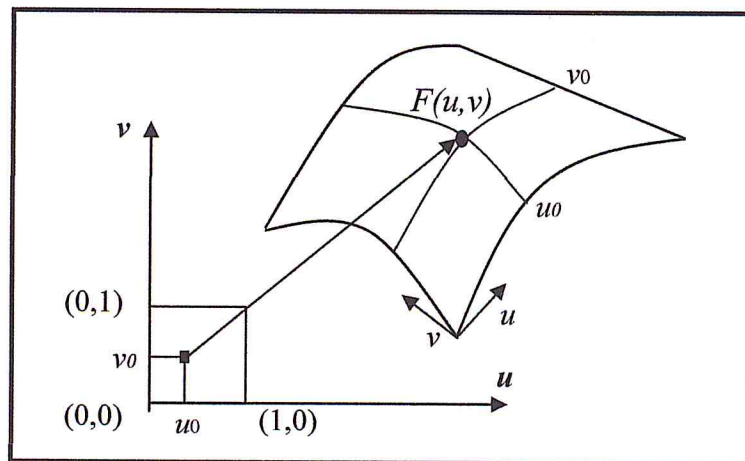


Figure 1: Localisation d'un point sur une surface paramétrique.

En Général, les surfaces paramétriques ne sont pas utilisées séparément, mais plusieurs morceaux de surfaces paramétriques sont assemblés avec des contraintes de continuité pour former une surface plus complexe.

2. 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] [3].

2.1.Méthodes basées sur l'utilisation des points (Modèles discrets)

Cette classe de méthodes, est basée sur l'utilisation des points pour concevoir une surface. Elle contient les types de surfaces suivantes :

- Surface obtenue par interpolation d'un nuage de points,
- Surface obtenue par approximation d'un nuage de points,
- Surfaces de Bézier,
- Surfaces de Bézier Rationnelle, Surfaces B-Spline, Surfaces NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline).

2.2.Méthodes basées sur l'utilisation des courbes

Cette classe de méthodes, est basée sur la conception d'un ensemble de courbes. Ces méthodes permettent de générer les surfaces suivantes [2] :

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

3. Formats d'échange de données

Afin de passer à la phase de fabrication effective, la FAO nécessite les résultats de la CAO, contenant non seulement l'information géométrique précise mais également toutes les métas-données qui peuvent s'y rattacher.

Dans un système homogène, où la CAO et la FAO sont intégrées dans un seul environnement, l'information se passe souplement. Mais là, où la FAO et la CAO sont deux différents systèmes, ou tournent sous deux environnement différents, il est nécessaire d'utiliser des translateurs pour assurer le passage de l'information entre ces deux plateformes distinctes et garantir la compréhensibilité. Ces translateurs sont nommés « **Formats d'échange de données** ».

Cet état de fait, a nécessité le développement d'outils permettant de réaliser ces échanges dans un format neutre indépendamment des logiciels. Pour cela, plusieurs formats d'échange de données sont créés tels que IGES, STL, VRML, DWG, DXF, STEP, ...etc. Aucun standard ne répond aux besoins des différents logiciels [4] [5].

3.1.Format STL (Stereo-lithography Tessellation Language)

Le format STL est le plus largement utilisé, il a été initialement conçu pour exporter les modèles CAO vers les machines de prototypage rapide de stéréo lithographie. Ce format a été lancé par 3D système en 1989. La discrétisation permet d'obtenir des fichiers robustes lisibles sans problèmes sur un grand nombre de plateformes. Le format de fichier STL ne décrit que la géométrie de surface d'un objet en 3D et ne comporte pas d'informations concernant la couleur, la texture ou les autres paramètres habituels d'un modèle de conception par ordinateur (Figure2) [6].

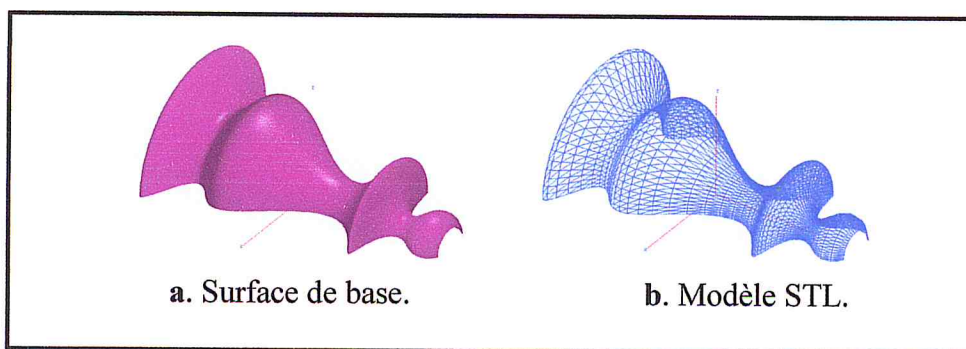


Figure 2: Exemple d'un model STL.

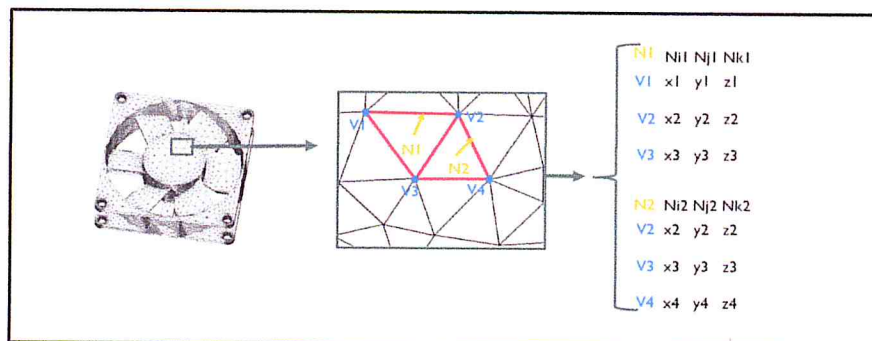


Figure 3: Exemple de format STL.

La surface est décomposé en série de petits triangles (facettes) chacun d'eux est décrit par une direction perpendiculaire (la normale) et trois points représentant les sommets du triangle (Figure 3) ce qui le rend très simple d'utilisation [7].

3.1.1. Structures d'un fichier STL

Il existe deux Formats de fichier STL, un format ASCII et un format binaire. Le format est spécifié comme un fichier ASCII (caractère imprimable) qui est plus descriptif et lisible mais gros de taille et un fichier binaire plus commun, moins de taille mais non lisible et trop condensé [6].

i. Format ASCII

Le fichier ASCII commence par une ligne de description de (nom, nom de l'auteur...) précédée par le mot réservé « **Solid** » suivie par les composantes de la normal puis les coordonnées des sommets des triangles. Cette partie peut être répétée une ou plusieurs fois. La fin de fichier est indiquée par « **endsolid** » [7].

```

solid name
  {
    facet normal  $n_i$   $n_j$   $n_k$ 
      outer loop
        vertex  $v_1$   $v_1$   $v_1$ 
        vertex  $v_2$   $v_2$   $v_2$ 
        vertex  $v_3$   $v_3$   $v_3$ 
      endloop
    endfacet
  }
endsolid name
    
```

Figure 4 : syntaxe d'un fichier STL ASCII.

3.1.2. Caractéristiques du format STL

Les caractéristiques du format STL sont présentées dans le tableau suivant [8] [9]:

Format	Géométrie	Volume	Texture couleur	Echelle	Représentation	Vecteur normal
Simple ; des triangles représentés par ses 3 sommets	3D	Fermé	Aucune	Aucune	Aucune équation mathématique, model approximé	Dirigé Vers l'extérieur

Tableau 1: caractéristiques du format STL.

4. Processus d'usinage

La conception et la fabrication constituent deux phases essentielles du processus de réalisation d'un produit manufacturier. Leur développement en lien avec l'évolution des techniques, notamment dans le domaine informatique, permet d'améliorer la qualité des produits et la productivité.

Le respect des délais, des couts et des qualités de production, parmi les aspects principaux de la compétitivité des entreprises, nécessitent l'intégration des fonctions de conception et de fabrication. Pour satisfaire les demandes concurrentielles de la fabrication moderne, il est nécessaire de réduire les temps de conception et d'intégrer la planification de processus dans l'activité de conception en utilisant des principes concourants de technologie.

Le processus d'usinage d'une pièce nécessite des interactions fortes entre de nombreuses activités ; activité de conception (C.A.O), activité de planification (gamme d'usinage) et l'activité de fabrication (F.A.O). Chaque activité doit garantir la conformité de la pièce et le respect de ses spécifications ainsi que les ressources et les moyens de production disponibles.

4.1. Phases du processus d'usinage

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 C.A.O puis la phase de planification « gamme d'usinage » et enfin la phase de fabrication suivie par le contrôle , ces points sont détaillés dans la figure suivante.

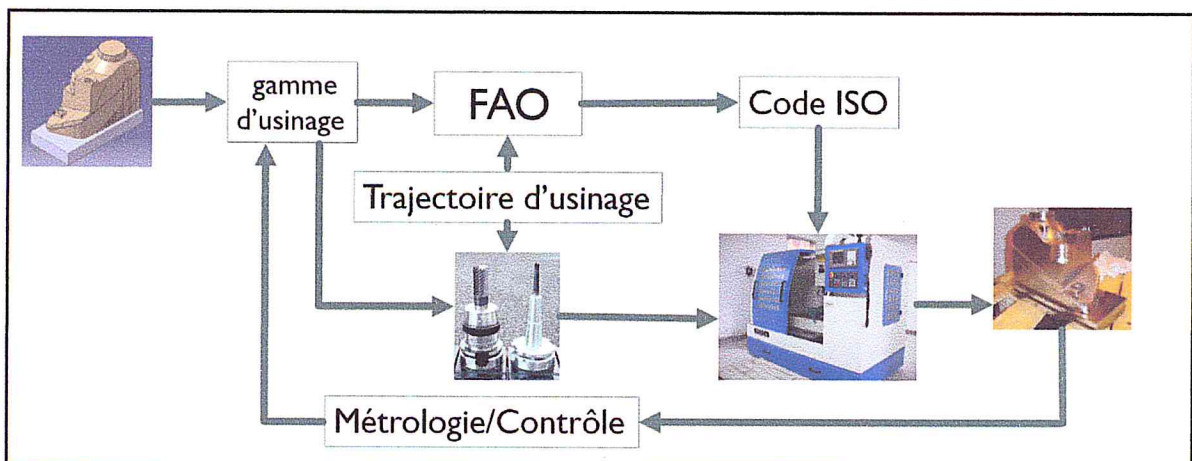


Figure 5: Phases du processus d'usinage.

4.1.1. Gamme d'usinage

L'usinage effectif d'une pièce sur machine-outil nécessite l'établissement d'une 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 :

➤ 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:

- La qualité des différentes surfaces de la pièce et leur positionnement,
- Le matériau constituant la pièce,
- La présence éventuelle de traitement thermique ou de traitement de surface,
- Le procédé d'obtention 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 de copeau maximal, direction de travail) [10].

4.1.2. 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 (gamme d'usinage) 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 3,4 et 5 axes [11].

i. Usinage 5axes

En usinage à 3 axes, l'orientation de l'axe de l'outil est fixe et se fait par trois déplacements linéaires. Par conséquent pour chaque point de contact il existe une et une seule position de l'outil qui soit tangente à la surface à usiner au point considéré (figure 6.a).

L'usinage 5-axes intègre simultanément les trois (03) axes linéaires X, Y et Z, et les deux (02) axes supplémentaires de rotation autour des axes de translation (deux parmi A,B et C). Par convention, (A) tourne autour de l'axe (X), (B) tourne autour de l'axe (Y) et (C) tourne 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 liberté supplémentaire comme ils augmentent les possibilités de positionnement de l'outil et d'accès aux différentes régions de la surface, ils augmentent également 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 6.b) En plus, il est possible de choisir différentes stratégies pour orienter l'axe de l'outil telles que passage par un point (figure 7.b) ou passage par un arc circulaire (figure 7.c). 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 (partie active et corps) et la surface à usiner , est indispensable surtout pour des surfaces avec fortes variations de courbure ou des surfaces à contre dépouille, sinon une correction de l'orientation s'impose.

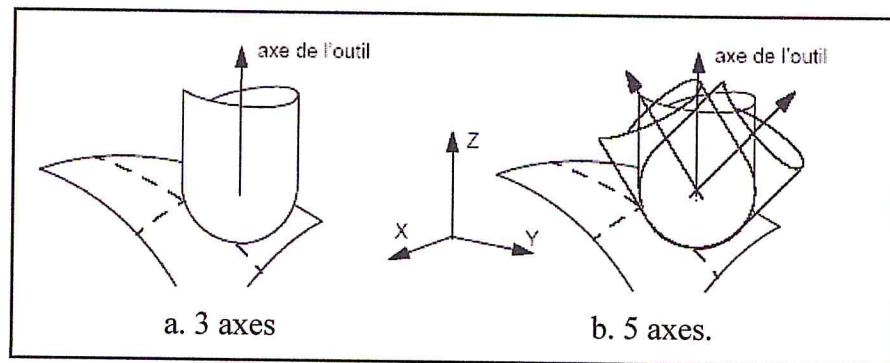


Figure 6:Orientation de l'outil en 3 axes et en 5 axes.

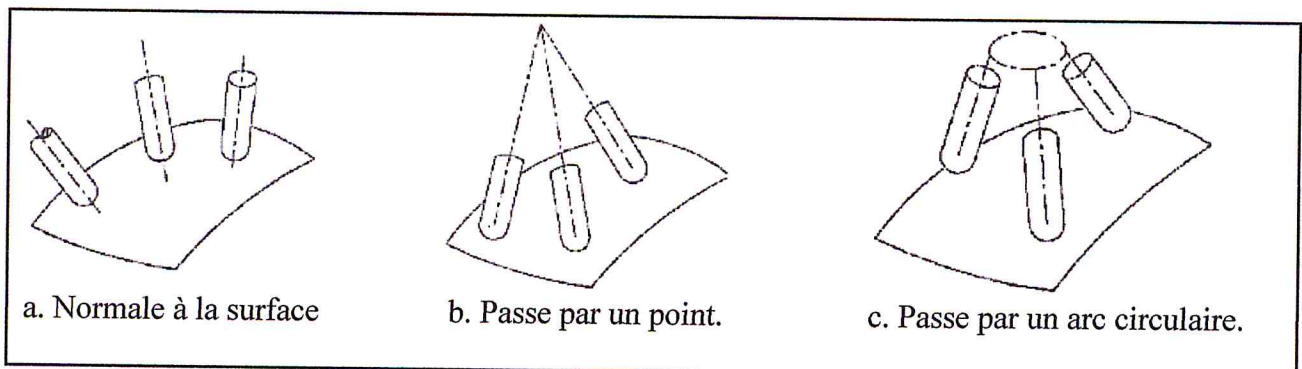


Figure 7:Stratégies d'orientation de l'axe de l'outil lors de l'usinage en bout en 5 axes.

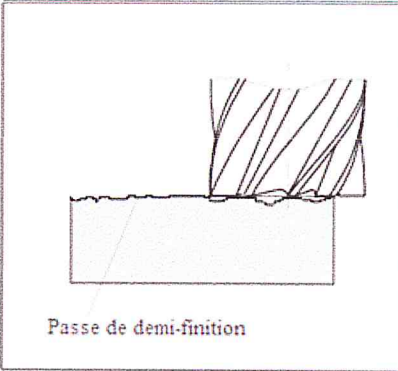
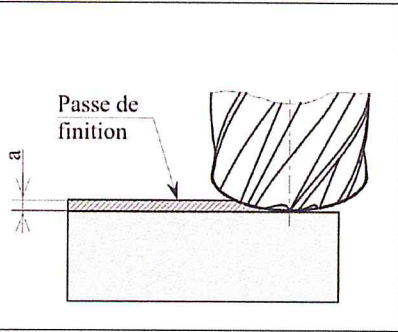
<p>Demi-finition</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Préparer une finition précise en corrigeant les défauts géométriques résultants d'une ébauche • Assurer une surépaisseur constante et faible finition. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cette phase a des caractéristiques similaires au même temps à celles de l'ébauche et de la finition. 	
<p>Finition</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Respecter toutes les spécifications imposées par le dessin de définition sur la ou les surfaces concernées par l'opération. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualités géométriques précises • Appuis précis et serrages plus modérés (faible effort de coupe) • Géométrie et formes d'outils spécifiques. 	

Tableau 2 : caractéristiques de chaque phase.

iii. 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, choix d'une direction d'usinage) 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. Nous distinguons trois stratégies d'usinage en finition.

- ❖ **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 [12].

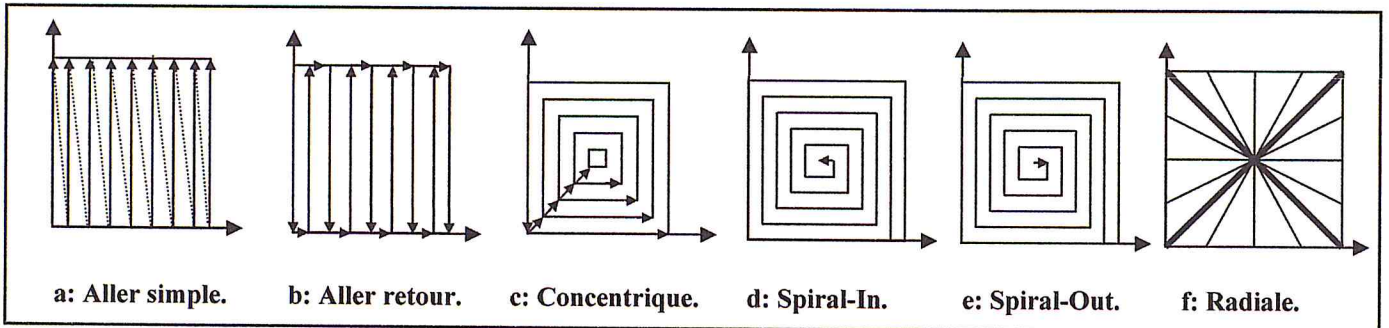


Figure 9: Modes de balayage pour les stratégies iso paramétriques.

- ❖ **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 pouvant avoir n'importe quelle orientation. [12]

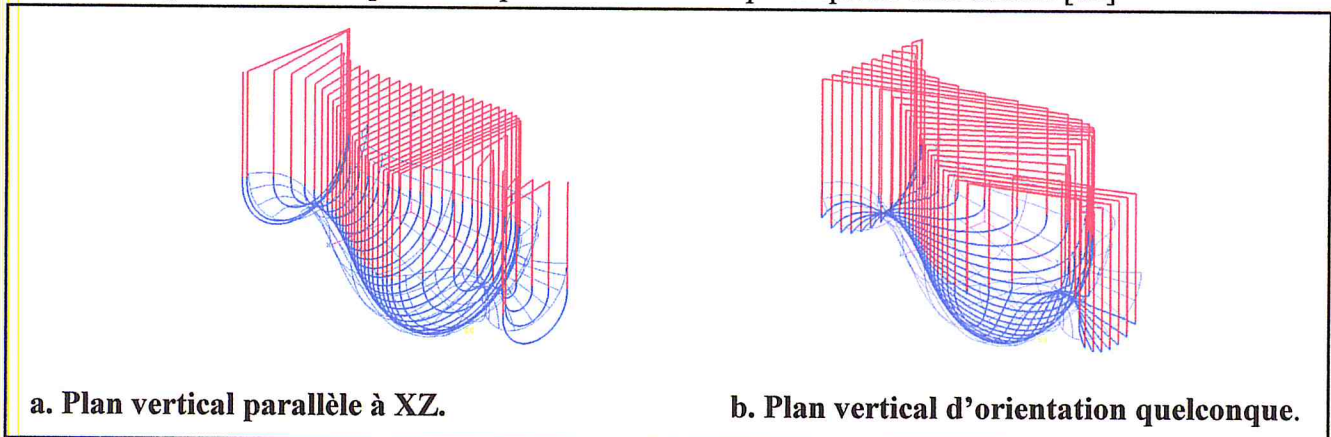


Figure 10: Stratégie des « Plans Parallèles ».

- ❖ **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 niveaux » (Figure 11).

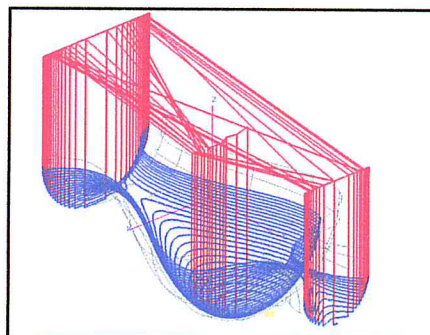


Figure 11: Stratégie « Z-Constant ».

4.1.3. Choix d'outils

Les opérations de fraisage nécessitent l'utilisation d'outils spécifiques associés à des trajectoires simples pour des pièces simples. Néanmoins, pour usiner des surfaces complexes, il n'existe pas d'outil permettant l'obtention des formes en un seul mouvement élémentaire. Trois types d'outils peuvent être utilisés dans la phase de finition, les outils Cylindriques, les outils Toriques et les outils Hémisphériques, objet de notre étude.

Plusieurs études ont été faites sur le choix des dimensions des outils Hémisphériques et leur succession qui permet d'optimiser les critères de fabrication. Le premier outil, de plus grand diamètre, est choisi pour enlever le maximum de matière possible. Par la suite, les outils qui suivent de diamètre moins important que le premier sont choisis pour usiner les zones non usinées par le premier.

La détermination des diamètres des outils dépend des courbures de la surface à usiner. Le choix du diamètre des seconds outils est facile à déterminer et dépend de la géométrie (rayon de courbure) de la plus petite zone non usinée.

Le choix d'outil de finition est un problème sous contraintes associés à plusieurs contraintes telles que, les défauts de forme, l'état de surface, l'usure de l'outil et sa durée de vie, le critère géométrique appelé largeur de passe, les contraintes de positionnement (interférence et collision) c.à.d. le diamètre de l'outil doit être égal à la largeur minimum de la passe de la poche. La sélection des outils doit impérativement répondre à deux contraintes prépondérantes; la non interférence ; par un choix adéquat du diamètre qui exclu tout point de la surface de l'enveloppe de la partie active de l'outil, et la non collision qui exclu toutes intersection entre le corps d'outil et les points de surface en chaque point du trajet [12].

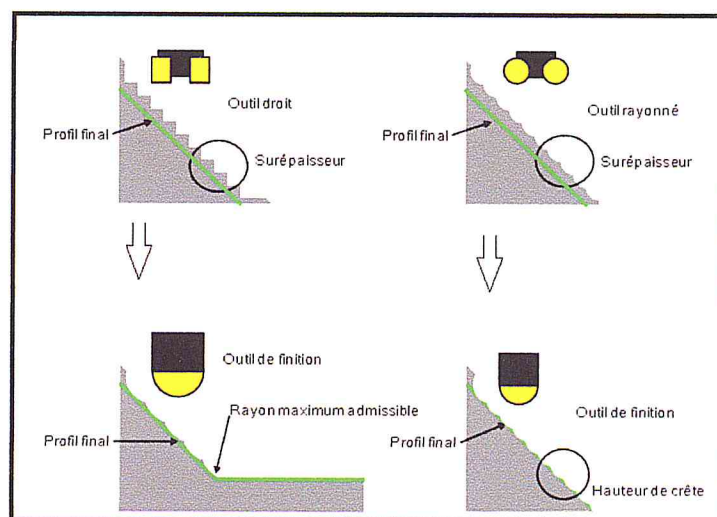


Figure 12: Outil de coupe.

4.1.4. Génération de la trajectoire en FAO

La génération de trajectoire consiste tout d'abord à calculer le chemin à suivre par les points pilotés de l'outil à partir soit d'un modèle CAO, d'un nuage de points ou d'un fichier STL. Le modèle FAO créé est classiquement constitué d'une séquence de points et de divers paramètres d'usinage (vitesse de déplacement, vitesse de coupe, diamètre outil, orientation et inclinaison des outils,.....)(Figure 13). La finalité est un code ISO exécutable par la commande de la machine et qui transcrit les déplacements de l'outil pour balayer toute la surface à usiner.

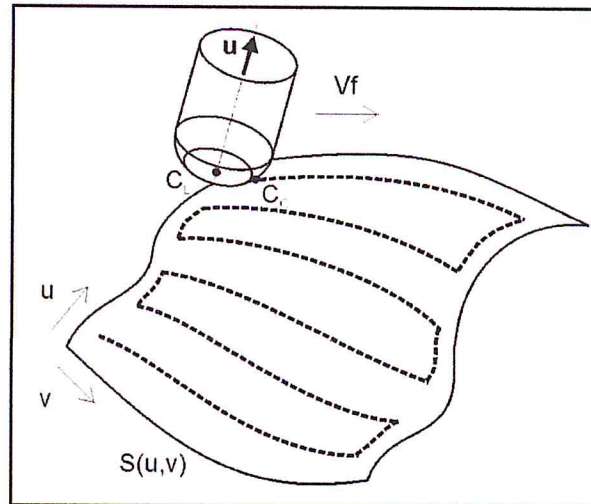


Figure 13: Trajectoire d'Outil.

Lors de l'usinage en 5 axes, Une trajectoire peut être définie par les trois points suivants [13] :

- Le positionnement outil, ou comment définir la position et l'orientation de l'outil par rapport à la pièce.
- Le parcours de l'outil sur la surface, ou comment enchaîner les positionnements outils sur la surface pour l'usiner.
- La description de la géométrie de la trajectoire.

Divers paramètres inhérents à l'activité FAO, sont à respecter au moment de la programmation des trajets d'usinage pour maîtriser l'état de surface. Parmi ces paramètres nous citons :

i. La tolérance d'usinage

Elle devra être suffisamment étroite pour éviter les phénomènes de facettisation et pas trop étroite pour ne pas ralentir la machine. Précision et vitesse sont antinomiques et leur choix est forcément le résultat d'un compromis [12].

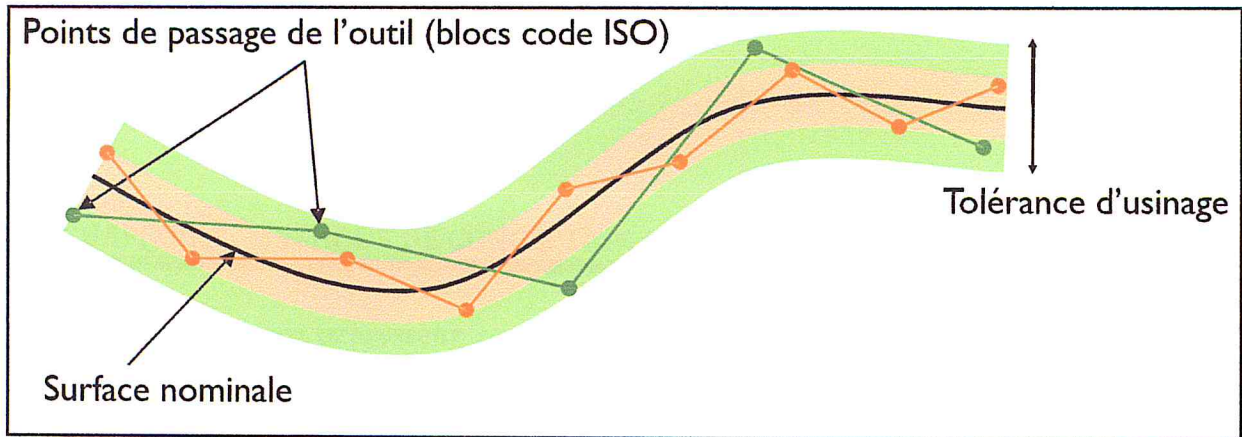


Figure 14: Tolérance d'usinage.

ii. Hauteur de crête

La hauteur de crête correspond à l'épaisseur résiduelle laissée par l'outil sur la pièce après usinage. Le choix de la hauteur de crête et du pas radial dépendent en fait d'un grand nombre de facteurs, et en particulier : de la machine-outil utilisée, du niveau de la complexité de forme de la pièce usinée, du matériau retenu, du prix et de la durée de vie de l'outil de coupe retenu, du coût et des délais de production à respecter.

Pour les différentes stratégies proposées, la hauteur de crête correspond à la trace laissée par la fraise lors de chaque pénétration verticale de l'outil (Fig. 15). Les paramètres permettant de déterminer cette hauteur correspondent au diamètre nominal de l'outil (R) et du pas radial (P) [12] [14].

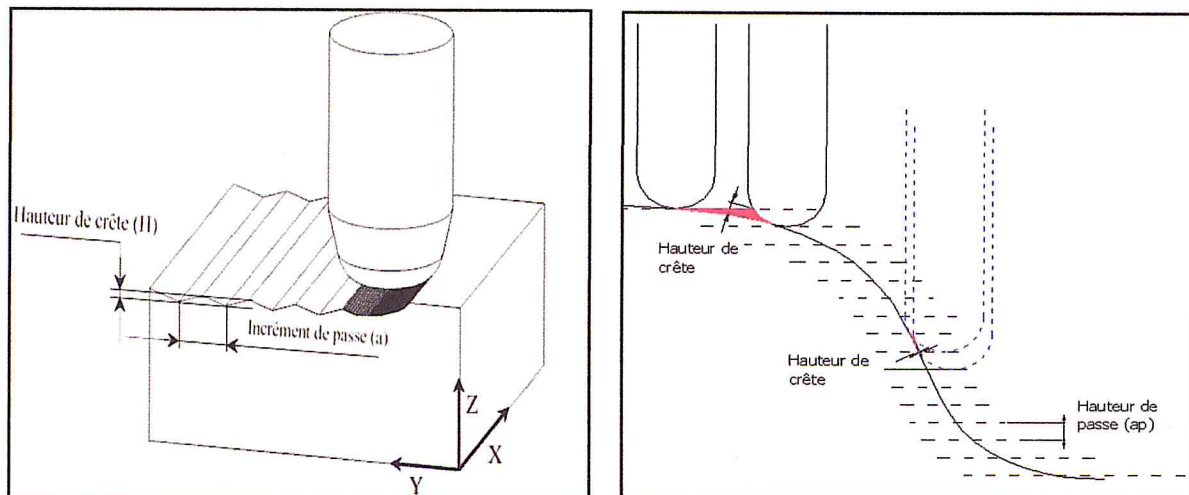


Figure 15: Hauteur de crête.

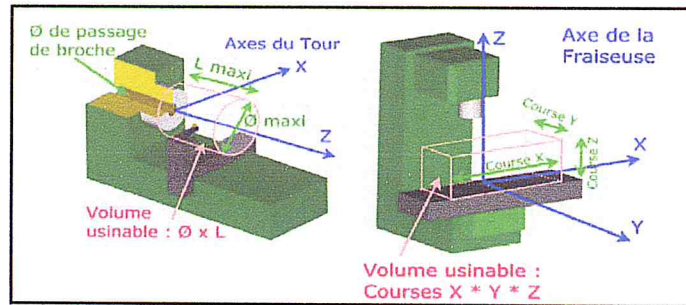


Figure 17: Exemple machine-outil.

5.1.Machine-outil à commande numérique (MONC)

Une Machine-outil à Commande Numérique fonctionne de manière automatique (figure18). Ce type de machine se compose de deux parties complémentaires: une partie opérative; c'est la machine outils qui agit directement sur le produit à réaliser et une partie commande; c'est la commande numérique qui permet d'élaborer des ordres en fonction des consignes et des comptes rendu. Le déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage est décrit par l'opérateur à l'aide d'un programme. On utilise pour cela les coordonnées des différents points de passage de l'outil par rapport à la pièce.

Les mouvements sont possibles sur plusieurs axes simultanément et sont générés par des moteurs qui permettent aussi de choisir des vitesses d'avance. Le réglage de ces vitesses s'effectue par un variateur [10].



Figure 18: Machine-outil à commande numérique.

5.1.1. Orientation et Axes normalisés

C'est la direction suivant laquelle le mouvement est commandé numériquement en continu en position et en vitesse (figure 19).

L'axe Z est situé parallèlement à l'axe de la broche principale quelle que soit la machine

L'axe X est associé au mouvement qui définit le plus grand déplacement après avoir situé l'axe Z.

L'axe Y forme avec les axes X et Z un trièdre de sens direct.

Les constructeurs de MOCN ont conçu des fraiseuses 5 axes comportent toujours les trois (03) axes linéaires X, Y et Z et deux (02) axes rotatifs à choisir parmi A, B et C. Les machines vont se différencier par la position des axes rotatifs.

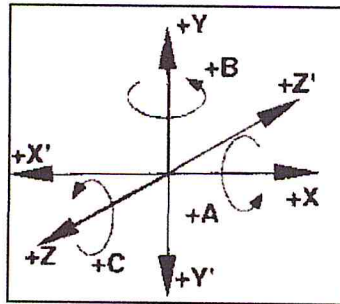


Figure 19: Axes de machine-outil.

i. Orientation pour la table

Pour ce type les deux axes rotatifs se trouvent sur la table, l'axe B incline la pièce et l'axe C fait tourner la pièce (figure 20 a).

ii. Orientation pour l'outil:

Pour ce type aussi la table tourne selon l'axe C, mais la rotation se fait par la tête portant l'outil suivant l'axe B. (figure 20 b)

iii. Orientation pour la tête

Dans le dernier type, les deux axes (rotation et inclinaison) se trouvent au niveau de la tête (figure 20 c) [15] [16].

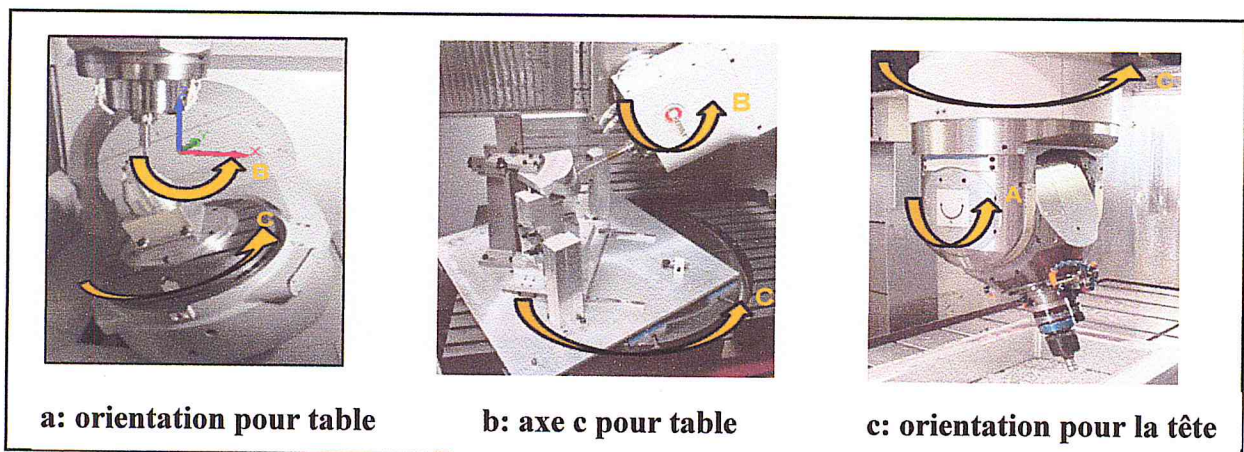


Figure 20: Affectation des Axes de machine-outil.

5.2. Outil de coupe

L'outil de coupe est défini selon des critères géométriques et technologiques. 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, la longueur utile coupante. Ensuite, le second définit les conditions de coupe (sources industrielles et commerciales comme les données catalogue) ainsi que les modes d'attachement (rallonge, extension...) [17].

5.2.1. Types d'outils de coupe

Les outils de coupe en fraisage sont définis par une enveloppe de types cylindrique, hémisphérique ou torique choisies en fonction du processus d'usinage de l'entité. Les outils cylindriques sont réservés au travail d'ébauche et de demi-finition, les outils toriques pour les travaux de demi-finition et finition de certaines surfaces par contre les outils hémisphériques sont largement utilisés pour travaux de finition surtout des surfaces gauches. Dans notre travail nous avons considéré les outils hémisphériques [18].

i. Fraise Hémisphérique

Les fraises hémisphériques ou fraises boules figurent parmi les plus universelles pour usiner à grande vitesse (figure 21). Elles conviennent pour la finition de n'importe quelle matière, quelle qu'en soit sa dureté. Ces fraises peuvent travailler à des vitesses de coupe bien plus élevées que les autres. Elles permettent, aussi, de prendre des profondeurs de passes plus importantes car leur forme hémisphérique permet de transmettre à la broche un pourcentage plus important de la pression de coupe.

- D = Diamètre de la queue d'outil
- $D1$ = Méplat
- L = Longueur de l'outil
- $L1$ = Longueur active d'outil
- α = Angle de coupe

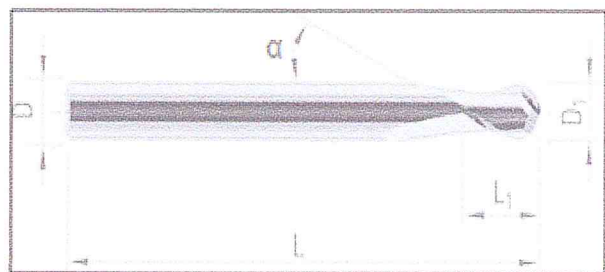


Figure 21: Outil Hémisphérique.

5.2.2. Paramètres d'outil de coupe

L'objectif final de l'usinage est d'obtenir une pièce usinée avec un bon état de surface, ceci nous impose de déterminer certains paramètres spécifiques :

La vitesse de coupe: La relation entre la vitesse de coupe V_c et la vitesse de rotation w de la fraise est donnée par la relation suivante : $V_c = R w$, où R est le rayon de la fraise.

La vitesse d'avance: La relation entre la vitesse d'avance de la table et la vitesse de rotation de la fraise est donnée par: $V_a = N_f \cdot S_t \cdot N$ avec:

- N_f : nombre de dents de la fraise,
- S_t : avance par tour ou par dent,
- N : vitesse de rotation de la broche en tr/min [18].

5.2.3. Positionnement de l'outil

Le positionnement de l'outil sur la surface consiste à déterminer un couple (P, \mathbf{u}) , où P représente le point piloté, caractéristique de la géométrie de l'outil, et \mathbf{u} le vecteur directeur de l'axe de l'outil. Classiquement, le point piloté de l'outil est le point C_L , point extrémité (figure 22). 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 $(C_C, \mathbf{f}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$ est tel que \mathbf{f} représente le vecteur tangent à la courbe, \mathbf{n} le vecteur normal à la surface, et \mathbf{t} le vecteur issu du produit vectoriel de \mathbf{f} par \mathbf{n} . La figure suivante positionne les points caractéristiques de l'outil suivant sa géométrie par rapport à la base locale ; C_E représente le centre de l'outil, R le rayon de l'outil [15] [16].

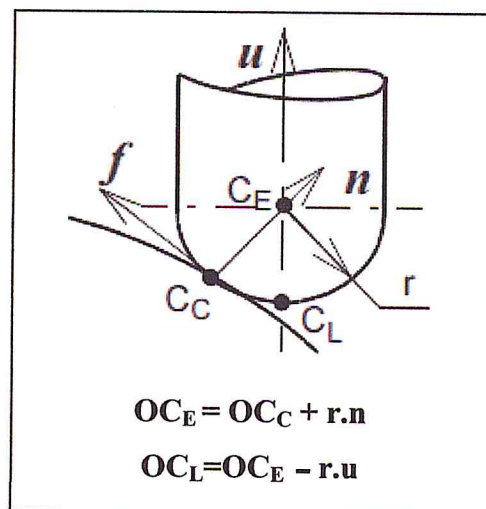


Figure 22: Point caractéristique suivant la géométrie de l'outil.

Une fois la position de l'extrémité de l'outil déterminée, il reste à définir l'orientation de son axe.

5.2.4. Orientations des outils

Le paramétrage de l'orientation de l'outil est nécessaire à son positionnement par rapport à la surface. 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.

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 n et la direction d'avance f . Dans un premier temps, l'outil est orienté, pour que son axe soit vertical. On applique ensuite deux rotations pour orienter l'axe dans la direction appropriée.

Les rotations peuvent être différentes (figure 23). Aucune règle n'est imposée. Les rotations les plus utilisées sont celles vers le segment d'avance (inclinaison) et autour du segment d'avance.

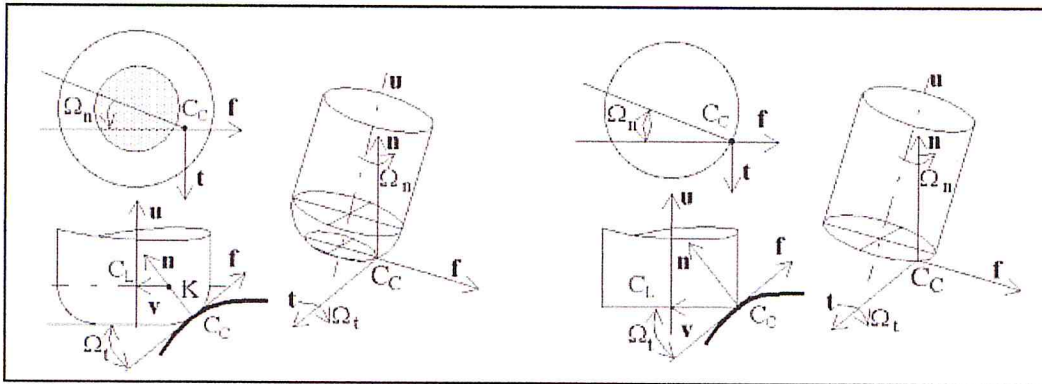


Figure 23: Mise en position et orientation des outils en 5 axes.

5.3. Identification des problèmes d'interférences et de collisions

Du fait des deux rotations supplémentaires, le risque de collision est plus fréquent en usinage 5 axes qu'en usinage 3 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.

Dans Notre étude nous utilisons une approche géométrique pour la détection des interférences et des collisions. L'interférence est vérifiée en positionnant l'outil verticalement en tous points de trajet et en testant l'appartenance des points de la surface à l'enveloppe de la partie active de l'outil hémisphérique modélisée par une sphère. La présence de collision est détectée si un point de la surface appartient au cylindre qui modélise le corps de l'outil [15].

5.3.3. Détection des positions de vitesse nulle

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 positionnements sur la surface, mais ils présentent l'inconvénient d'avoir des vitesses de coupe nulle au point extrémité confondu avec leur 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 collision.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale les différentes méthodes de modélisation des surfaces gauches en mettant en avant le modèle discret plus particulièrement le modèle STL support de notre étude. Une présentation du processus d'usinage des surfaces gauches sur des fraiseuses numériques 05 axes et les différentes méthodes de génération du trajet d'outil s'en est suivie et nous avons terminé ce chapitre par la présentation des machines outil à commande numérique et les différents outil d'usinage en particulier l'outil hémisphérique. 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

Le fraisage 5 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 fraises boules ou de fraises hémisphériques. La mise en œuvre de ce type d'opération sur fraiseuse 5 axes, offre la possibilité d'incliner l'outil suivant deux angles. Il en résulte une multitude 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 5 axes.

Cet objectif est réalisé en trois étapes ; la première étape consiste à récupérer un trajet à partir d'une application développée antérieurement, de structurer la surface à usiner représentée par son model discret en cellules et de regrouper ces cellules en zones de manière à optimiser l'identification des interférences locales et de les corriger. La deuxième étape consiste à proposer deux approches pour la détection et l'élimination des interférences et des collisions.

- La première approche repose sur des concepts géométriques pour la recherche des outils optimums qui permettent l'évitement des interférences locales en premier lieu puis corriger ces outils en appliquant des tests de collision pour générer les outils à utiliser pour chaque contour.
- La deuxième approche combine les tests d'interférence et de collision en même temps pour chaque point du contour. La génération et la correction des outils utilisables se fait successivement en chaque point du contour.

La troisième étape consiste à corriger les orientations obtenues lors de la deuxième étape en chaque point du contour de façon à éviter une position équivalente à une vitesse de coupe nulle.

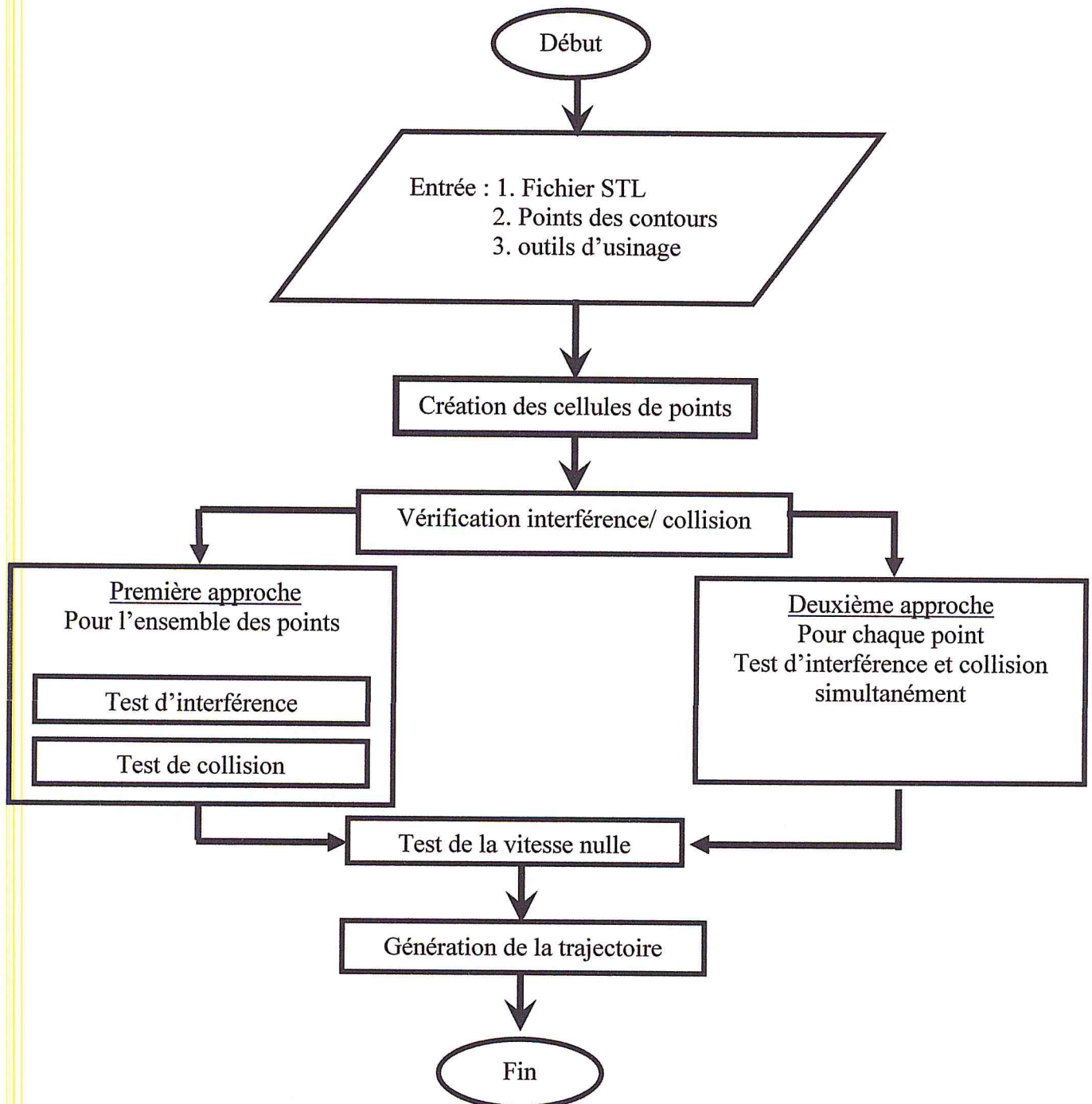
1. Architecture générale de l'application

L'architecture générale de l'application est divisée en quatre 04 parties :

- Structuration de la surface discrète
- Test d'interférence et collision avec correction des orientations des outils
- Test de vitesse de coupe nulle
- Génération de la trajectoire d'outil

L'application développée utilise comme entrées certaines données issues des modèles STL, des contours et des bases de données outils pour créer les cellules qui vont servir pour la création des zones de test d'interférence et de collision. Le test d'interférence est basé sur le

calcul de l'intersection entre les points de surfaces et la partie active de l'outil (sphère), par contre le test de collision utilise le corps de l'outil.



Organigramme 1 : Architecture générale de l'application.

1.1. Génération des contours

La création des contours est une fonctionnalité complexe. Cette étape est composée de plusieurs tâches séquentielles. Un contour est composé de segments issus de l'intersection de la surface à usiner avec des plans horizontaux. La surface étant représentée par son modèle STL,

l'intersection des plans avec les triangles du modèle de la surface génère des points qui sont reliés entre eux selon un ordre bien déterminé pour créer une chaîne fermée ou ouverte (Figure25).

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 d'usinage sélectionné est effectué. Généralement, un plan d'usinage passe par un nombre limité de triangles mais pas la totalité des triangles, alors pour minimiser le temps de calcul il est préférable de regrouper les triangles en des bandes disjointes. Par la suite, pour chaque plan, l'intersection de ce plan uniquement avec les triangles de la bande qui l'englobe est calculée.

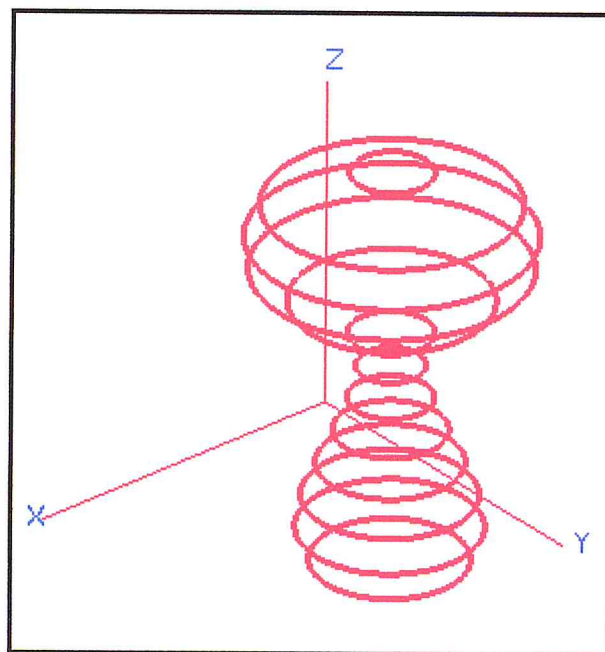
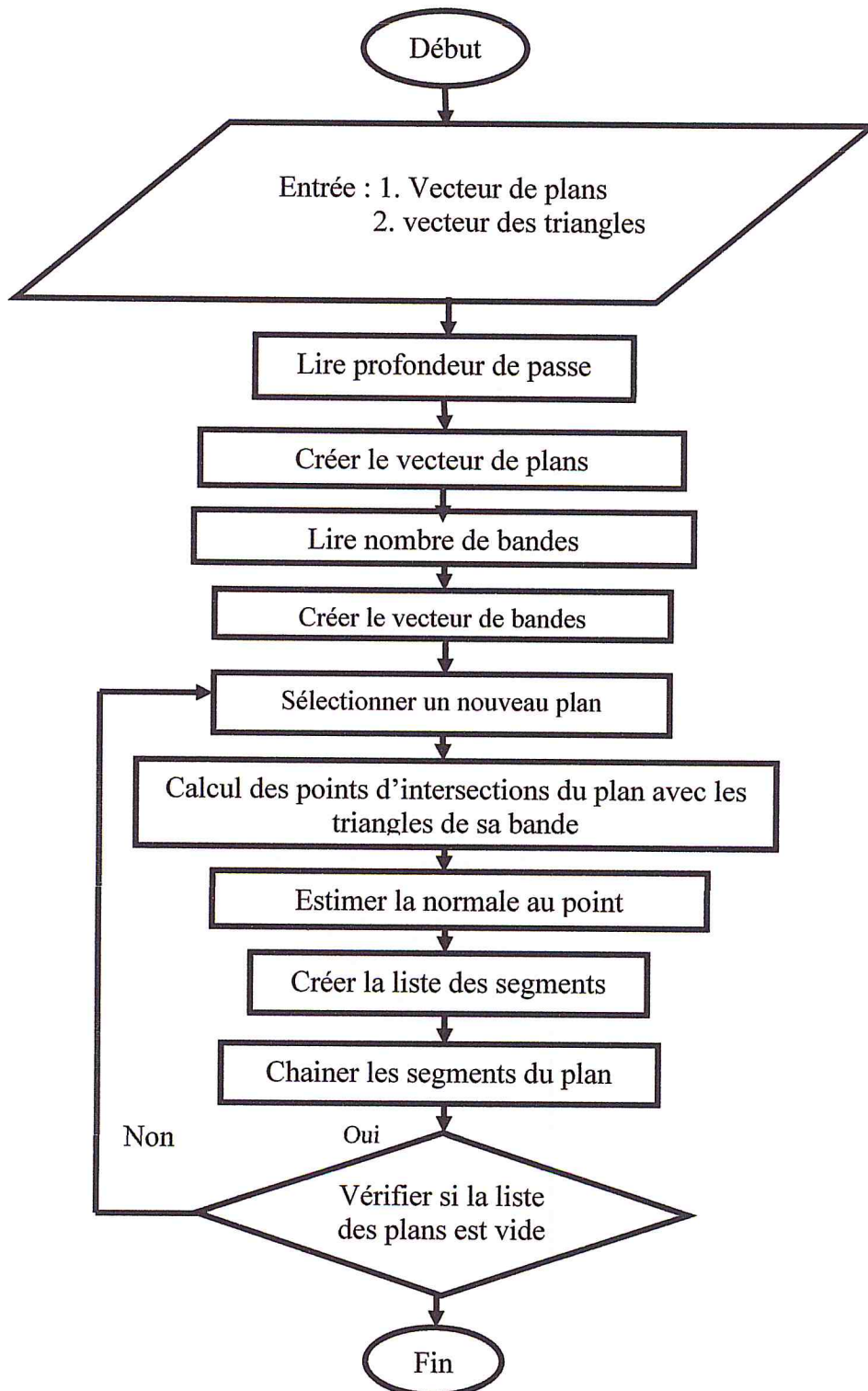


Figure 25: Contours de la pièce.

1.1.1. Organigramme de génération de contour

La création des contours consiste à introduire la profondeur de passe pour avoir le nombre de plan. L'ensemble des points d'intersection entre chaque plan et les triangles composants la surface est récupéré pour créer les segments. L'organigramme détaillé est décrit ci-dessous :



Organigramme 2: Génération des contours.

1.2.Création des cellules

Afin d'optimiser les tests d'interférences et de collisions, le volume enveloppant la pièce est créé puis divisé en des cellules afin de créer une matrice de cellules ou chaque cellule est

définie par ses dimensions et ses extrémités maximales et minimales (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} et Z_{max}) suivant les trois axes. Les dimensions (D_x , D_y , D_z) de la cellule sont pris égales au diamètre de l'outil dans un premier temps (figure 26). Cette façon de faire permet de limiter les tests d'interférences en tout point du contour du fait que les points de la surface à tester sont ceux appartenant aux cellules englobant la sphère représentant la partie active de l'outil. A chaque présence d'interférence l'outil est changé par celui qui vient juste après dans la base de données des outils et un test d'évaluation du rapport entre le diamètre précédant et actuel est fait. Lorsque le rapport des deux diamètres est égale ou supérieur à deux (2), la cellule qui le comporte sera divisé à nouveau selon le diamètre du nouvel outil et ainsi de suite. Les cellules sont stockées dans un tableau de type vecteur ou chaque case contient un vecteur de points et ses dimensions.

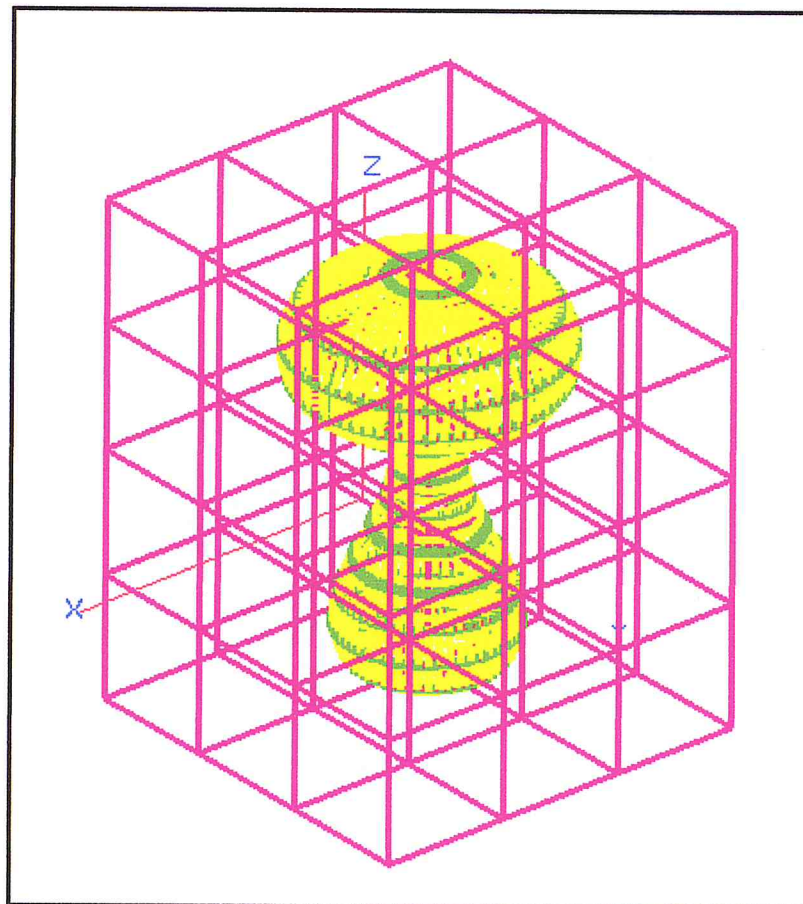


Figure 26: Matrice de la pièce.

1.2.1. Affectation des sommets aux cellules

Après la création de la matrice des cellules, chaque point de la surface (sommets des triangles du modèle STL) est affecté à la cellule correspondante (figure 27). L'affectation se fait par comparaison entre les coordonnées de chaque point de la surface et les limites max et min de

chaque cellule. A noter que les coordonnées des points de la surface sont calculées par rapport au repère de conception.

Soit $S(x_s, y_s, z_s)$ un sommet et C une cellule avec ses limites ($x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$). S appartient à la cellule C si :

- $x_{\min} < x_s < x_{\max}$
- $y_{\min} < y_s < y_{\max}$
- $z_{\min} < z_s < z_{\max}$

Après la nouvelle représentation des sommets et pour minimiser le nombre des sommets à tester dans la détection des interférences et des collisions, seules les cellules au voisinage de la sphère représentant la partie active de l'outil (pour l'interférence) et/ou au voisinage du cylindre représentant le corps de l'outil (pour la collision) sont considérées.

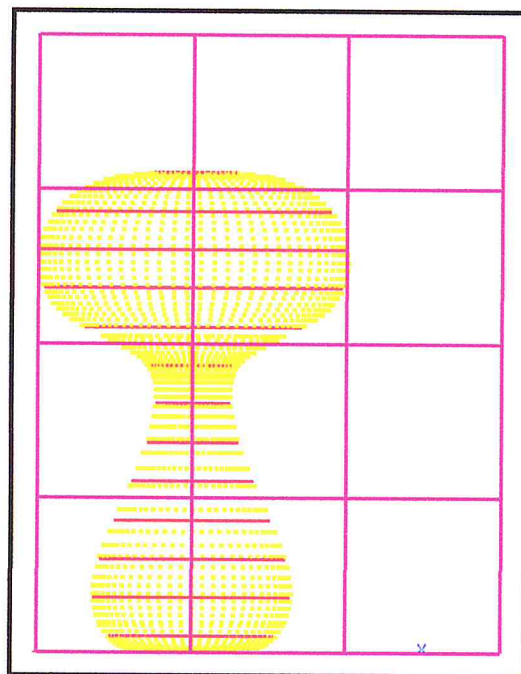
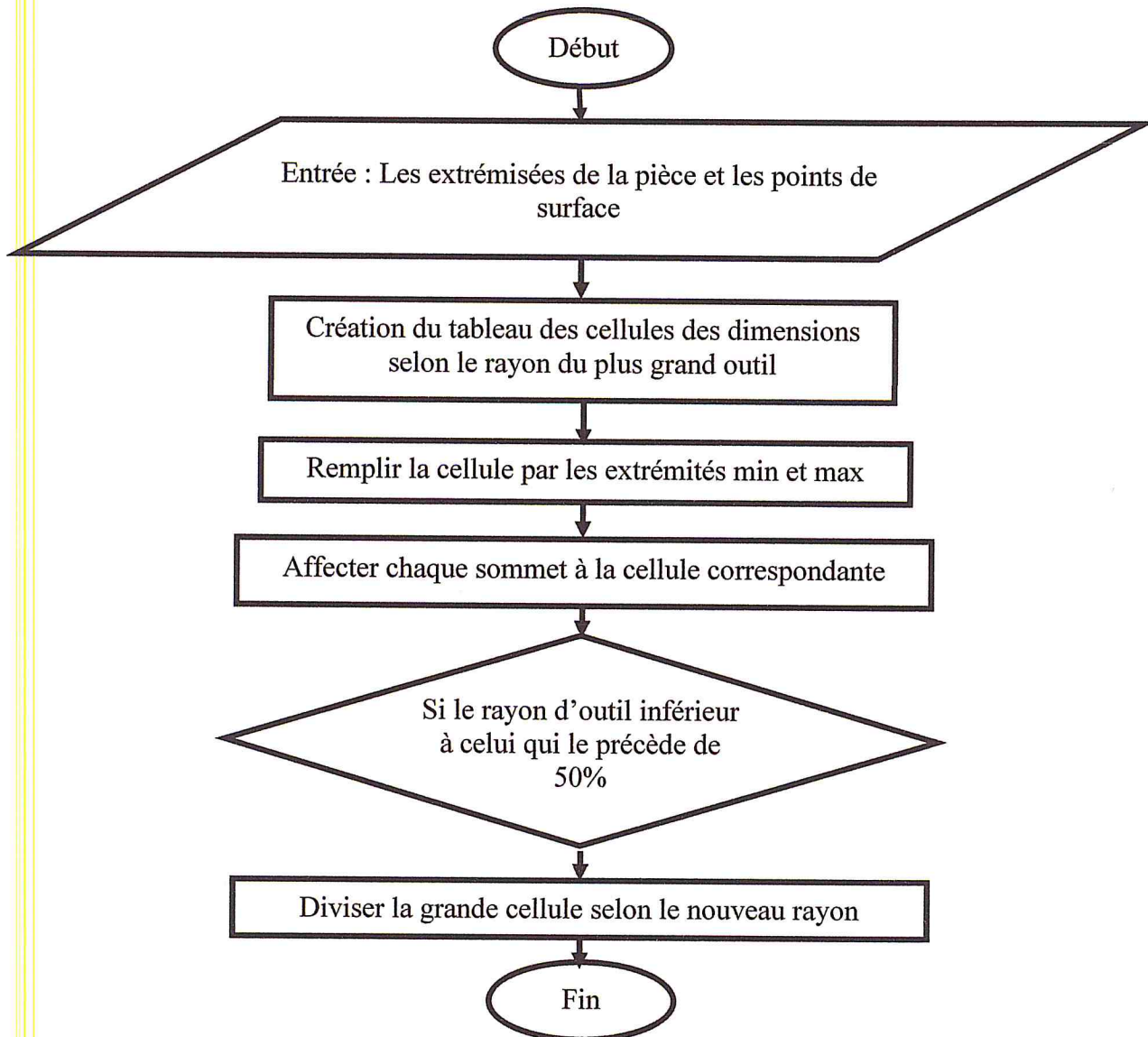


Figure 27: Affectation des sommets aux cellules.

1.2.2. Organigramme de création de cellules

La création de cellules utilise comme entrées certaines données issues des coordonnées de la pièce et les points de surfaces. Un tableau de cellules est créé où chaque cellule est définie par ses extrémités min et max. Les sommets (points de surface) sont affectés aux cellules correspondantes.



Organigramme 3: Création des cellules.

1.3.Détermination de la zone d'interférence

La détermination de la zone d'interférence consiste à identifier l'ensemble des cellules à considérer lors du test d'interférence en chaque point du trajet. Pour se faire ; la sphère partie active de l'outil; est positionnée virtuellement dans la matrice des sommets et par la suite les cellules qui se chevauchent avec la sphère sont déterminées (figure 28). Cette manière de faire limite le test d'interférence à l'ensemble des points au voisinage du point de contact et permet d'éviter le test avec l'ensemble des points de la surface.

La détermination de la zone de test est faite par le calcul des coordonnées des points extremums:

- Extrémité minimale

$$Lx_{min}=X_c - r$$

$$Ly_{min}=Y_c - r$$

$$Lz_{min}=Z_c - r$$

- Extrémité maximale

$$Lx_{max}=X_c + r$$

$$Ly_{max}=Y_c + r$$

$$Lz_{max}=Z_c + r$$

Avec X_c , Y_c et Z_c coordonnées du point de contour au point de test.

Après le calcul des extrémités de la sphère, et pour tester tous les points de la surface susceptible de provoquer une interférence, les extrémités de la zone ainsi calculées (Lx_{min} , Ly_{min} , Lz_{min} , Lx_{max} , Ly_{max} , Lz_{max}) sont comparées avec les limites de chaque cellule (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} , Z_{max}) et les coordonnées x , y et z des cellules qui comportent les points extremums sont sauvegardées dans un tableau.

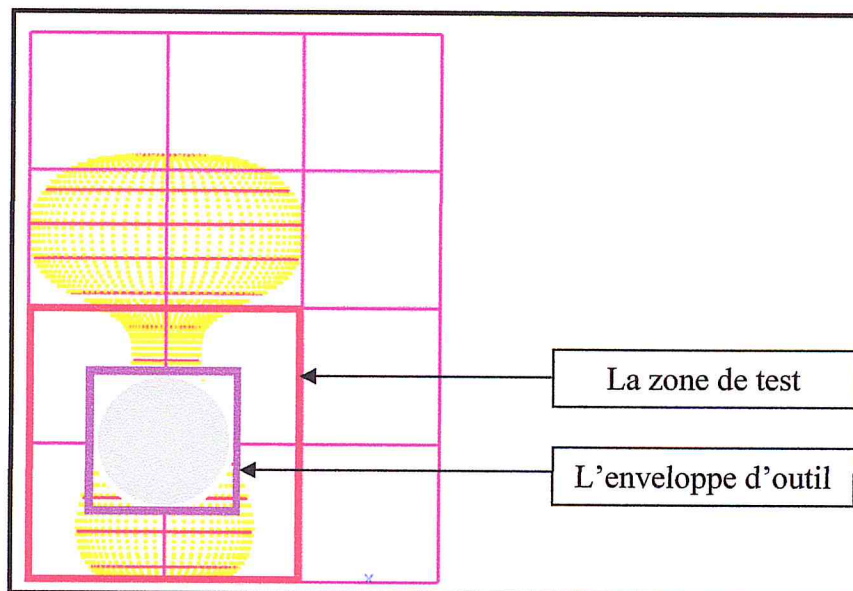
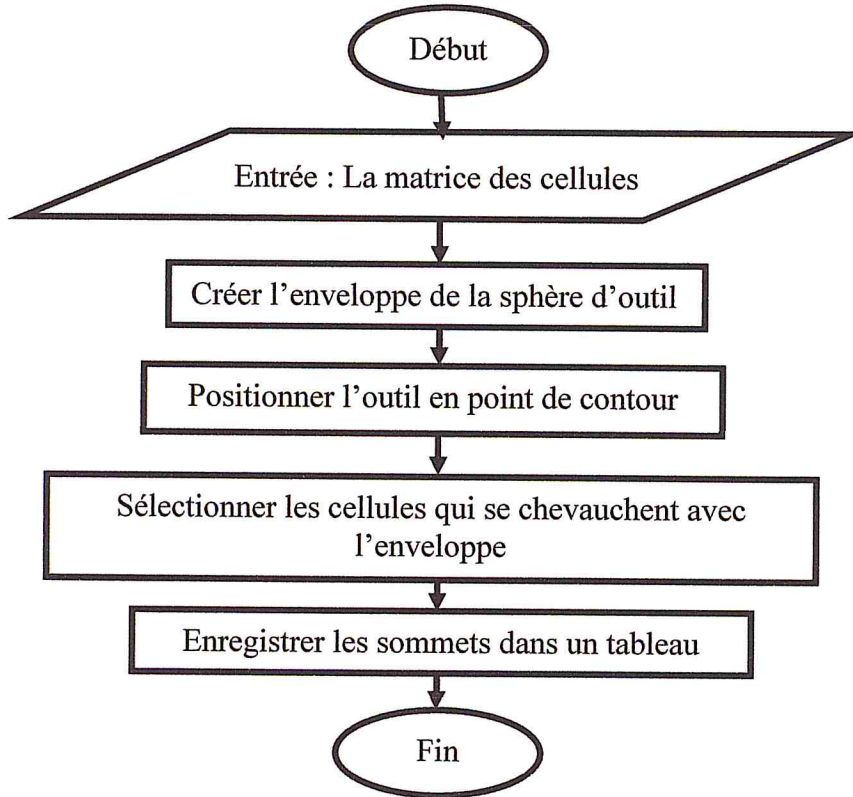


Figure 28: Zone de test d'interférence.

1.3.1. Organigramme de détection de la zone d'interférence

La création de la zone d'interférence utilise comme entrées la matrice des cellules. L'enveloppe de la partie active de l'outil est créée, par la suite les sommets des cellules qui se chevauchent avec l'enveloppe sont enregistrés dans un tableau. L'organigramme ci-dessous illustre le processus de création des zones d'interférences.



Organigramme 4: Création de la zone.

1.4. Détermination de la zone de collision

La zone de collision est la partie de la surface susceptible de rentrer en collision avec le corps de l'outil ou avec l'environnement de travail. Dans notre étude, seule la collision avec le corps de l'outil est prise en compte (figure 29). Pour déterminer la zone de collision, l'outil est positionné verticalement en chaque point du trajet primaire et les extrémités de l'enveloppe qui est un prisme rectangulaire droit sont calculées comme suit :

- **Extrémité minimale**

$$L_{x\min} = X_c - r - h$$

$$L_{y\min} = Y_c - r - h$$

$$L_{z\min} = Z_c - r$$

- **Extrémité maximale**

$$L_{x\max} = X_c + r + h$$

$$L_{y\max} = Y_c + r + h$$

$$L_{z\max} = Z_c + r$$

Après le calcul d'enveloppe de l'outil, les cellules comportant l'ensemble des points de la surface qui se chevauchent avec cette enveloppe sont calculées.

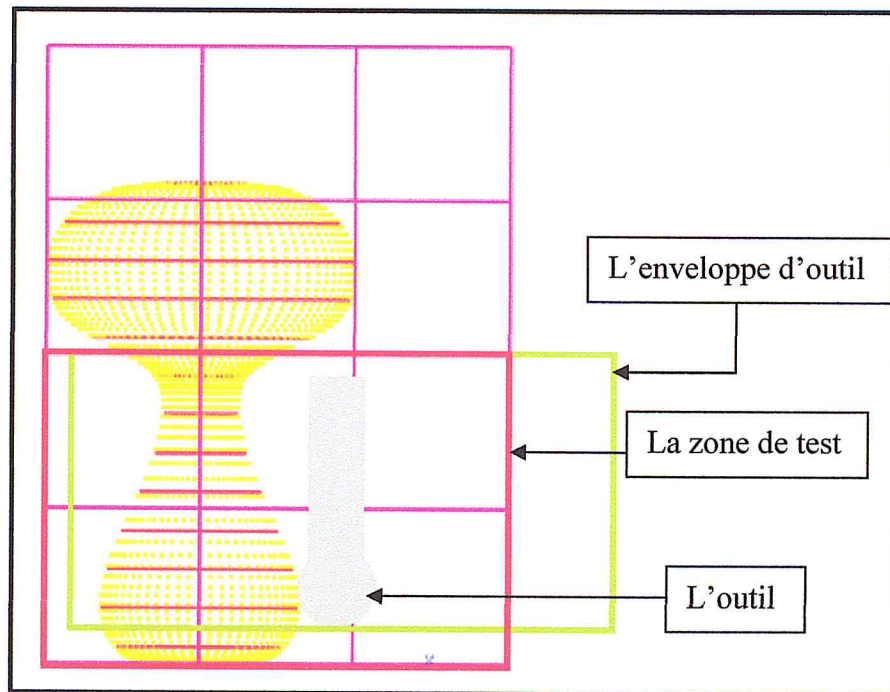
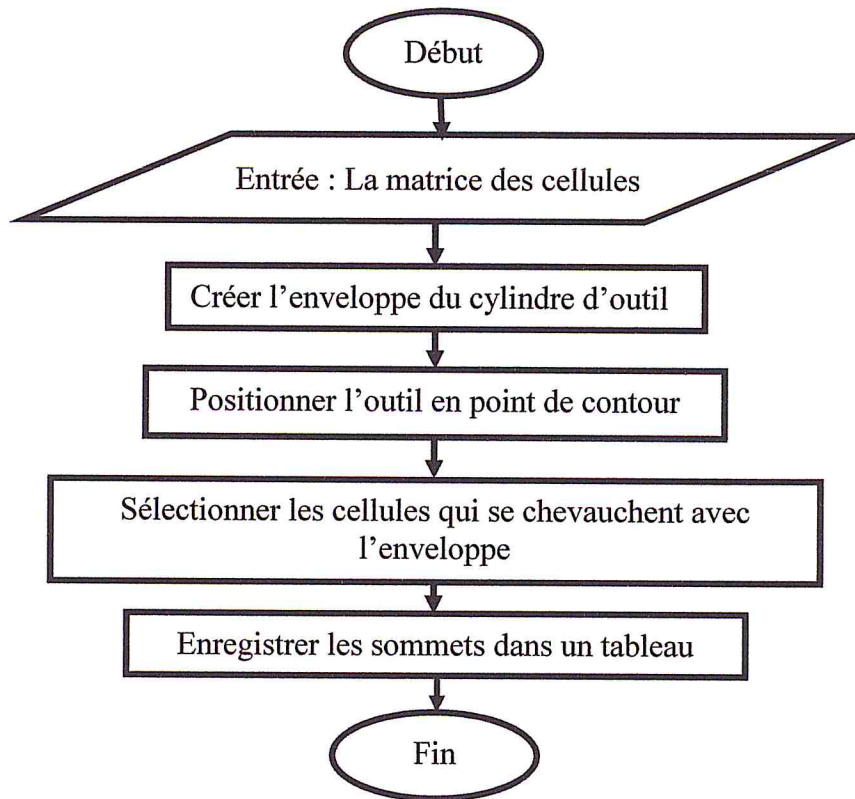


Figure 29: Zone de test de collision.

1.4.1. Organigramme de détection de la zone de collision

Le support utilisé pour la création de la zone de collision est la matrice des cellules. L'enveloppe du corps de l'outil est créée, par la suite les sommets des cellules qui se chevauchent avec l'enveloppe sont enregistrés dans un tableau. L'organigramme ci-dessous illustre le processus de création des zones de collision.



Organigramme 5: Détection de la zone de collision.

2. Stratégies de tests

Le test consiste à déterminer dans un premier temps ; les outils optimum éliminant les interférences en tout point de contact, et dans un deuxième temps, déterminer les positions (orientation) éliminant les collisions puis les corrigées si nécessaire pour éviter les positions de vitesses de coupe nulles en tous point du trajet. Tous point du trajet primaire ne répondant pas aux trois conditions citées, est éliminer du trajet. Dans notre étude deux approches ont été proposées :

- La première approche consiste à tester en premier lieu l'interférence en tout point d'un même contour et assigner à chaque contour un seul outil éliminant l'interférence sur l'ensemble des points. Le test est réalisé avec les zones d'interférences. Ces outils sont utilisés pour déterminer les positions (centre outil et orientation) qui évitent la collision. Ce deuxième test est réalisé en utilisant les zones de collision créées à cet effet.
- La deuxième repose sur le test d'interférence et de collision successivement en chaque point de contour simultanément.

2.1.Première approche

Dans cette approche, le test d'interférence commence avec le plus grand outil (plus grand diamètre) de la base de données des outils en chaque point de chaque contour. A chaque interférence, l'outil est changé par un autre plus petit et le test continu sans avoir à revenir au premier point. L'outil qui élimine l'interférence au dernier point du contour est affecté au contour entier. Ces outils sélectionnés dans la phase de l'élimination des interférences sont utilisés pour définir les orientations qui éliminent les collisions. Les différentes étapes du test d'interférence sont détaillées dans ce qui suit :

2.1.1. Test des interférences

Dans les approches utilisant les modèles continus de surface (modèle CAO) le test d'interférence consiste à récupérer les paramètres de la surface en chaque point puis sélectionner l'outil dont le diamètre est inférieur ou égale au petit rayon de courbure. Dans les 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 l'équation de la sphère en chaque point du trajet pour calculer la distance entre les points de la surface et le centre de la sphère en commençant par celui dont le diamètre est le plus grand. L'outil optimum est alors celui qui exclut tous les points de la zone d'interférence du volume de la sphère. Ce principe est décrit dans ce qui suit :

Soit C (X_C, Y_C, Z_C) un point qui représente le centre de la sphère et R_1 le rayon de cette sphère. Un point P de coordonnées (X_P, Y_P, Z_P) appartient à la sphère si l'équation suivante est vérifiée :

$$(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 + (z_p - z_c)^2 = (R_1)^2$$

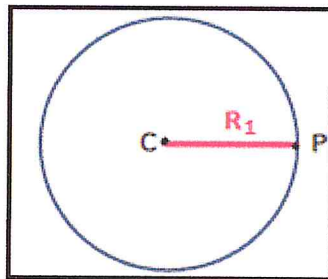


Figure 30:Surface de la sphère.

Soit un point S de coordonnées (x_s, y_s, z_s) appartenant à une deuxième sphère de rayon R_2 . Alors, les coordonnées du point S vérifient l'équation suivante :

$$(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2 + (z_s - z_c)^2 = (R_2)^2 \text{ Donc :}$$

- Si $R_2 < R_1$, alors la deuxième sphère se trouve à l'intérieur de la première sphère ce qui implique l'existence de l'interférence.

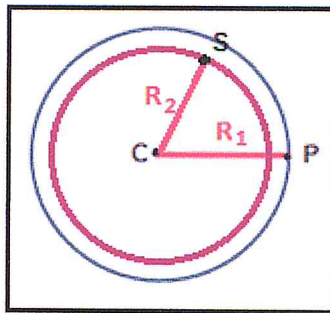


Figure 31: Sommet S à l'intérieur de la sphère d'outil.

- Si $R_2 = R_1$, alors les deux sphères sont identiques ce qui implique l'absence d'interférence.

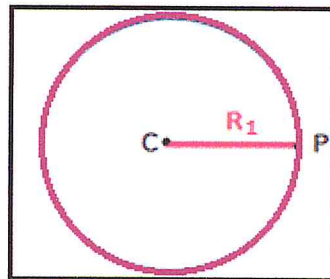


Figure 32: Sommet S est sur la surface de la sphère d'outil.

- Si $R_2 > R_1$, alors la deuxième sphère se trouve à l'extérieur de la première sphère ce qui implique l'absence d'interférence.

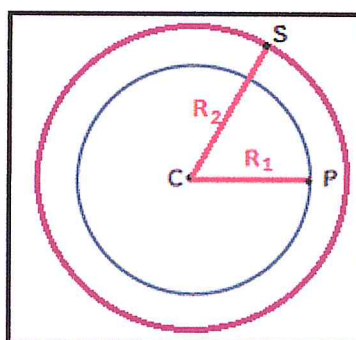
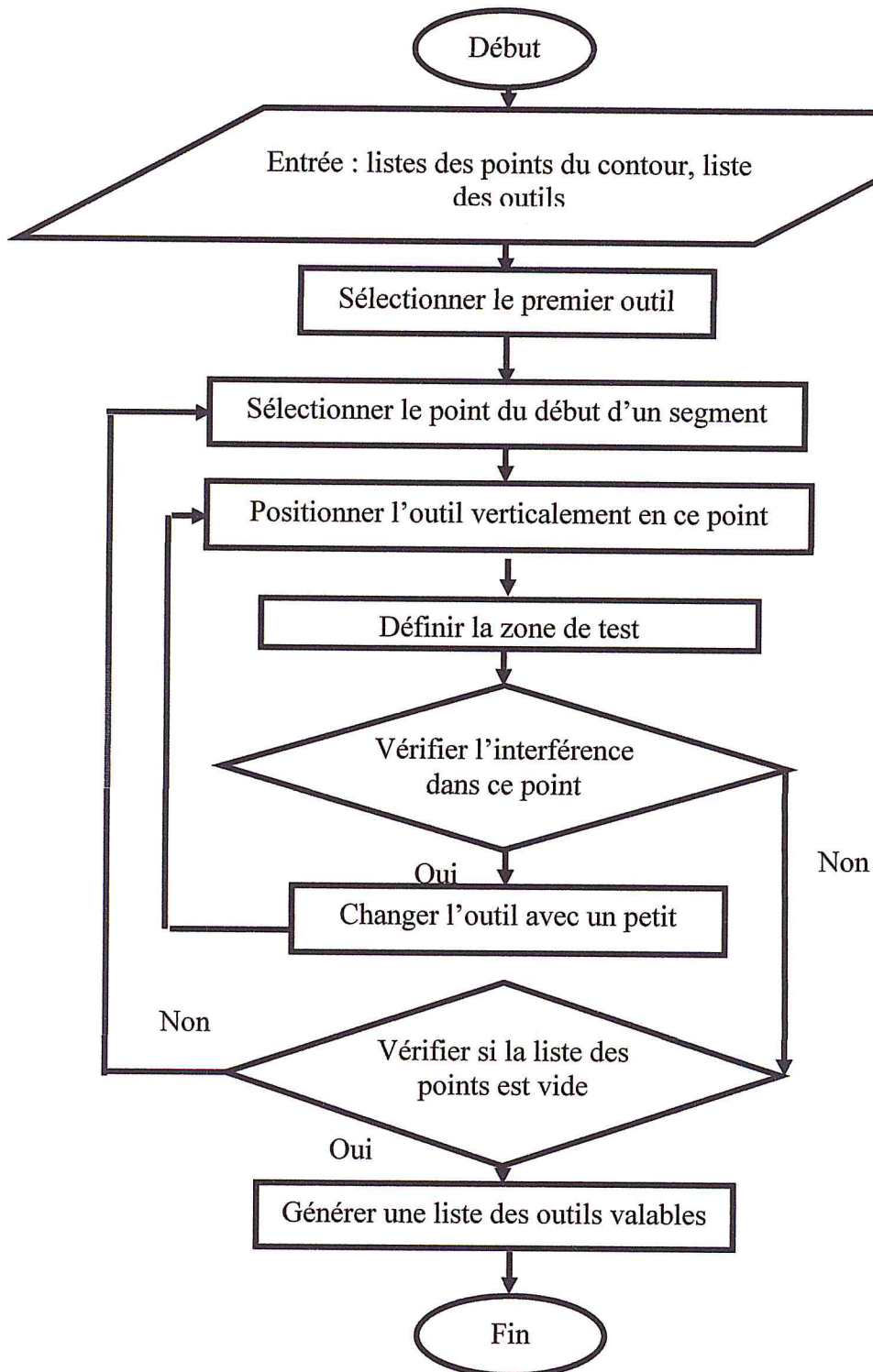


Figure 33: Sommet S est à l'extérieur de la sphère d'outil.

i. Organigramme de gestion des interférences

La gestion des interférences consiste à tester les outils avec l'ensemble des points appartenant à la surface en commençant par le plus grand jusqu'au plus petit. Le test consiste à positionner l'outil verticalement en chaque point du contour, puis tester l'appartenance des

points de la surface à la sphère représentant la partie active de l'outil, et affecter à chaque contour un seul outil qui élimine toutes les interférences en tous points du même contour.



Organigramme 6: Gestion des interférences.

ii. **Correction d'interférence**

Dans le cas de présence d'interférence, l'outil est remplacé par celui qui le succède dans la base de données des outils. Notons que les outils sont classés dans la base de données dans un ordre décroissant de diamètre. Si tous les outils de la base de données sont consommés avant la correction totale des interférences, le point est retiré du trajet. Si les points retirés du trajet dépassent un taux prédéfini, alors le contour n'est pas usinable. Dans ce cas de figure, la base de données des outils doit être corrigées en rapport avec le profil de la pièce.

A la fin du test, a tous les points du même contour est affecté un seul outil. Chaque point est représenté par ces coordonnées (x,y,z), les deux orientations (alpha et beta) et son rayon.

2.1.2. Test de collision

La détermination des outils éliminant les interférences pour chaque contour est une étape préliminaire pour le positionnement des outils hors collision. Plusieurs approches sont utilisées pour résoudre ce problème. Les plus importantes utilisent la géométrie de l'outil et de la surface pour déterminer la distance entre l'outil et la pièce. En cas de collision, une orientation angulaire est appliquée à l'outil suivant plusieurs méthodes pour le dégager de la zone de collision. Les orientations appliquées peuvent être autour de n'importe quel point et autour de n'importe quel axe. Aucune règle n'est à respecter.

Dans ce travail une approche basée sur le concept de compensation du rayon d'outil est utilisée pour trouver les orientations angulaires hors interférence en tout point du trajet. Ceci est réalisé en faisant incliner l'outil vers l'avant par rapport à la direction d'avance dans un intervalle angulaire prédéfini et si nécessaire (si la collision persiste) autour du segment d'avance pour trouver les positions requises.

Le principe est de tester le chevauchement entre le corps de l'outil (cylindre) et les sommets appartenant à la zone de test des collisions définie précédemment. Le test se fait en deux étapes :

Dans un premier temps l'appartenance d'un sommet au cylindre de longueur infini représentant le corps de l'outil est vérifié par l'équation suivante:

$$x^2+y^2+z^2 - \frac{(ax+by+cz)}{a^2+b^2+c^2} \tag{1}$$

Dans le cas où le point appartient au cylindre, l'appartenance du point à l'espace engendré par les deux plans délimitant la longueur du corps de l'outil est testée.

Soit C le point centre de deux bases circulaires, R le rayon de ces cercles et n (a,b,c) vecteur du position de l'axe de l'outil.

Un point T (x, y, z) est à l'extérieur du cylindre, ceci implique l'absence de collision (figure 34).

$$x^2+y^2+z^2 - \frac{(ax+by+cz)}{a^2+b^2+c^2} > R^2 \quad (2)$$

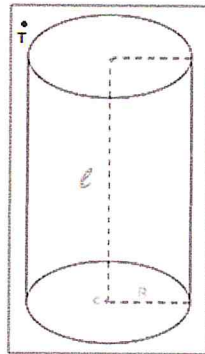


Figure 34: point T à l'intérieur du cylindre.

Si un point T (x, y, z) appartient à la génératrice (figure 35 a) ou à l'intérieur du cylindre, ceci implique la possibilité d'existence d'une collision (figure 35 b)

$$x^2+y^2+z^2 - \frac{(ax+by+cz)}{a^2+b^2+c^2} < = R^2 \quad (3)$$

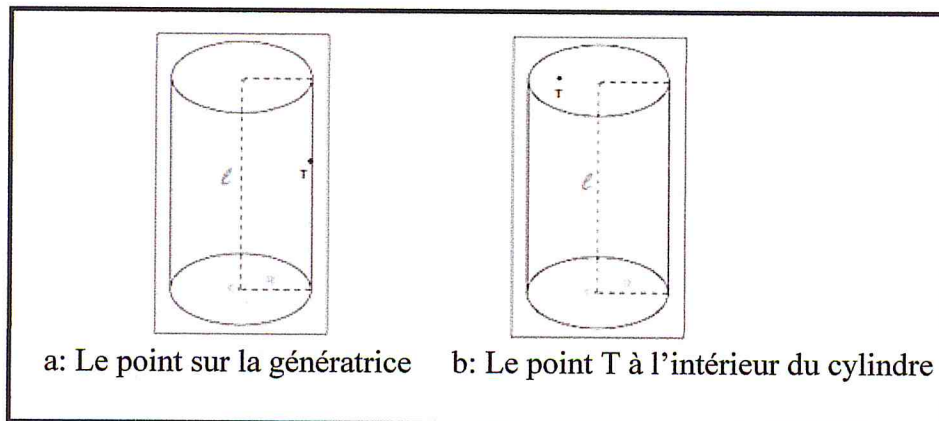


Figure 35: possibilité de collision.

i. Positionnement d'outil

L'objectif terminal de l'étude est de proposer un positionnement d'outil hémisphérique hors interférence et hors collision sur une surface complexe en fraisage 5-axes avec compensation de rayon d'outil.

Le positionnement d'un outil sur une surface complexe peut être décomposé en deux étapes :

- Définition du point piloté par le directeur de la commande numérique de la machine-outil.
- Orientation de l'axe de l'outil. Lors de cette deuxième étape, l'axe de l'outil ne doit pas être aligné avec la normale \mathbf{n} à la surface pour éviter le problème de vitesse nulle au point de contact.

a. Calcul du point centre outil

Le posage de l'outil peut être fait soit par le point de contact soit par le point centre outil. En usinage 3 axes, les deux modes de positionnement peuvent être utilisés par contre en usinage 5 axes le positionnement se fait toujours à partir du point de contact en raison de la difficulté du deuxième mode de positionnement.

Le calcul de la position de l'outil par rapport à la surface à usiner repose sur la forme géométrique de l'outil et de la géométrie de la surface.

Dans notre travail nous avons considéré un posage par le centre d'outil dont les coordonnées sont calculées à partir du point de contact. Ainsi, à partir des coordonnées de chaque point de contact et de sa normale estimée à partir des points de la surface pour chaque rayon d'outil, les coordonnées du point centre outil sont calculées (figure 36).

Soit un outil de rayon r (rayon de sa sphère) et soit P le point de contact ; point de début du segment de coordonnées X_P , Y_P et Z_P et de vecteur normal U dont les composantes unitaires sont U_x , U_y et U_z .

Les coordonnées X_C , Y_C et Z_C du point C centre d'outil sont données par :

- $x_c = x_p + u_x \cdot r$
- $y_c = y_p + u_y \cdot r$
- $z_c = z_p + u_z \cdot r$

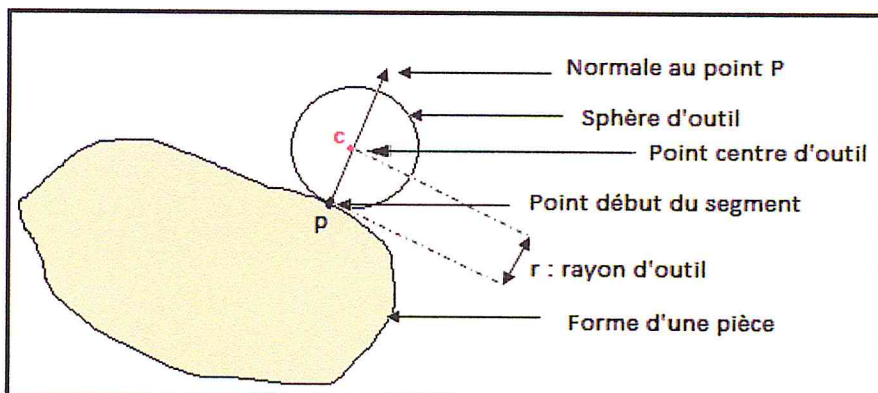


Figure 36: Point centre d'outil.

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

b. Identification du point extrémité de l'outil

Les coordonnées du point de l'extrémité d'outil sont calculées à partir du point centre outil et de la longueur d'outil.

Soit un outil de longueur (l) et soit C le point du centre outil de coordonnées x_c , y_c et z_c . Les coordonnées x_h , y_h et z_h du point H (point de l'extrémité d'outil) sont données par :

- $X_h = x_c$
- $Y_h = y_c$
- $Z_h = z_c + l$

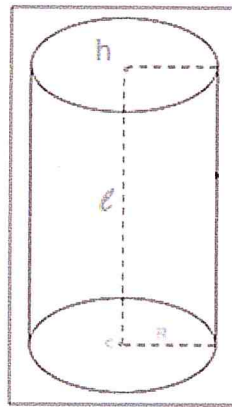
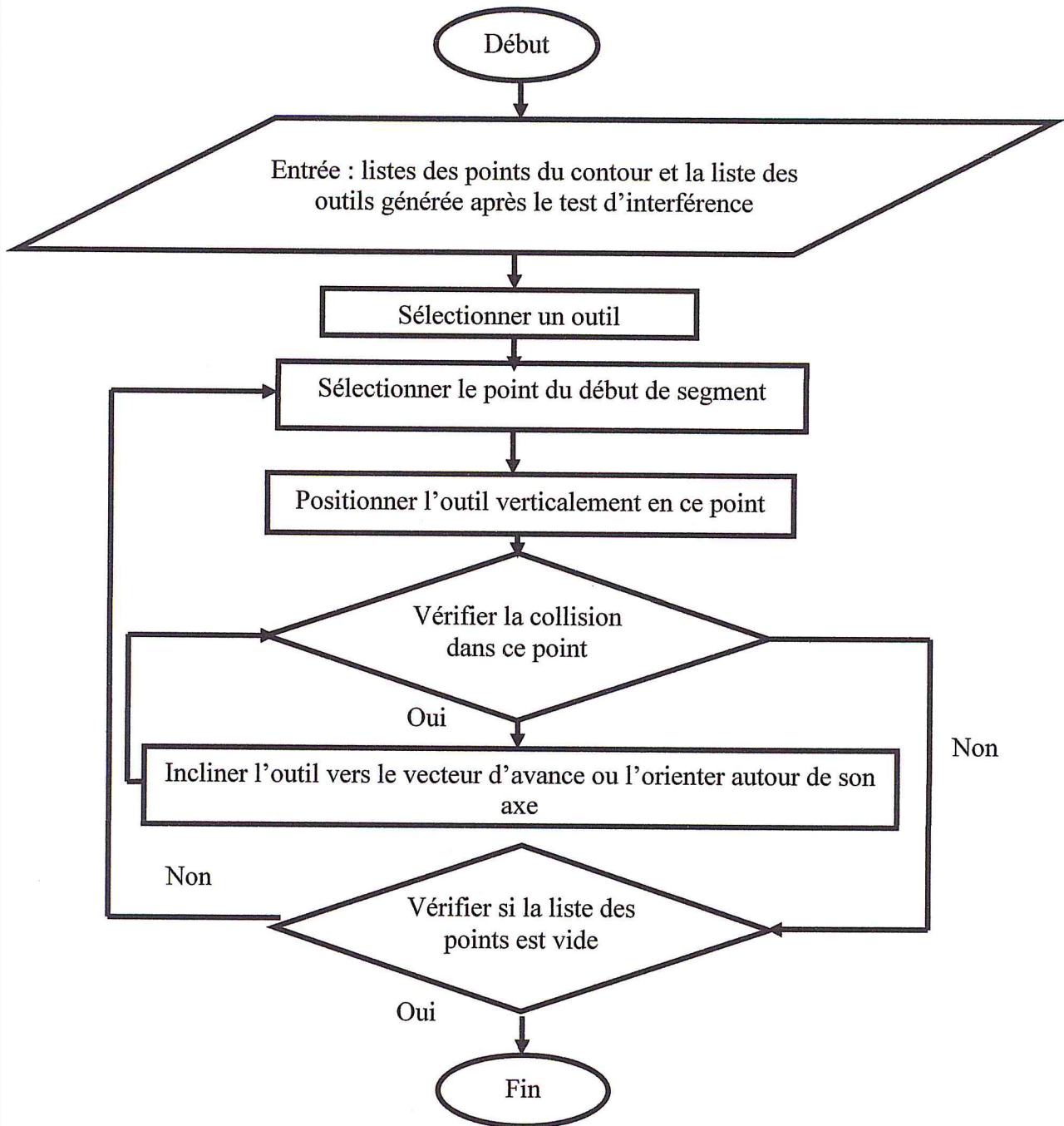


Figure 37: point d'extrémité d'outil (h).

ii. Organigramme de gestion des collisions

La gestion des collisions consiste à prendre les outils déjà sélectionnés lors de la phase d'interférence et tester l'appartenance des points de la surface au corps d'outil. En cas de collision l'outil est orienté selon deux directions ; vers le segment dans le sens d'avance et autour du même segment.



Organigramme 7: Gestion des collisions.

iii. Correction de collision

La correction de collision consiste à proposer une stratégie d'orientation 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 notre travail nous avons proposé une approche dite de compensation de rayon d'outil qui combine une

inclinaison de l'outil vers le segment (figure 39) dans le sens de l'avance (alpha) et rotation autour du même segment (beta) (figure 38). Deux stratégies sont utilisées :

- La première stratégie consiste à combiner les deux orientations autour du segment avec l'inclinaison dans le sens de l'avance comme suit:

En chaque point du contour :

- Orientation autour du segment et dans les deux sens avec un incrément dans une plage prédéfinie en premier lieu.
- Inclinaison de l'outil vers le segment d'avance et dans le sens d'usinage dans une plage prédéfinie en deuxième lieu.

- La deuxième stratégie consiste :

Pour tous les points du contour :

- Inclinaison de l'outil vers le segment d'avance et dans le sens d'usinage dans une plage prédéfinie du point du début de contour au dernier point du contour.
- Orientation autour du segment et dans les deux sens avec un incrément dans une plage prédéfinie du premier point du contour au dernier point de contour.

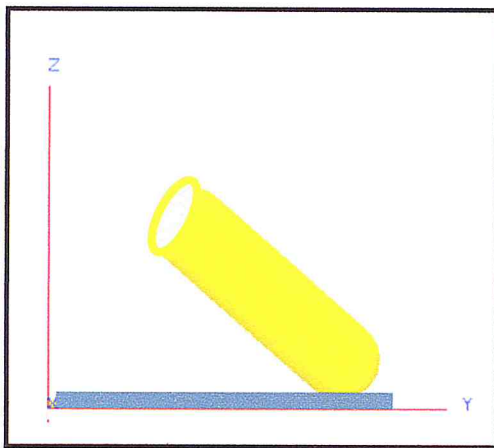


Figure 38: Rotation autour du segment.

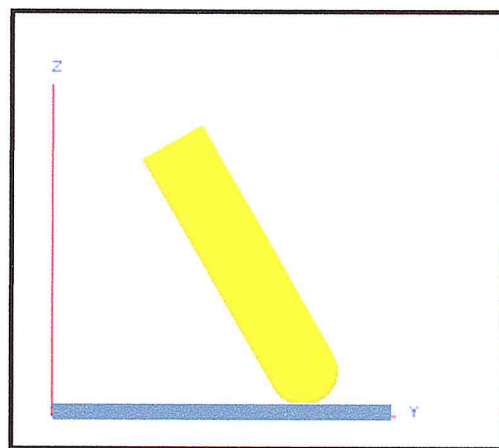


Figure 39: Inclinaison vers le segment.

➤ Première stratégie de correction de la collision

A l'inverse de la première approche, l'interférence et la collision sont testées respectivement en chaque point du contour en utilisant le plus grand outil de la base de données des outils. L'outil qui élimine l'interférence est utilisé pour tester la collision. L'outil optimum est celui qui élimine l'interférence et la collision en chaque point d'un contour.

➤ **Deuxième stratégie de correction de la collision**

Dans cette approche, pour chaque contour, l'outil issu de la phase d'interférence est positionné verticalement en début du contour et en cas de collision l'outil est incliné vers le segment jusqu'à identification d'un angle qui positionne l'outil hors collision. Tous les points dont la collision n'a pas été éliminée subissent l'orientation autour du segment dans les deux sens jusqu'à élimination de toutes les collisions.

2.2. Deuxième approche

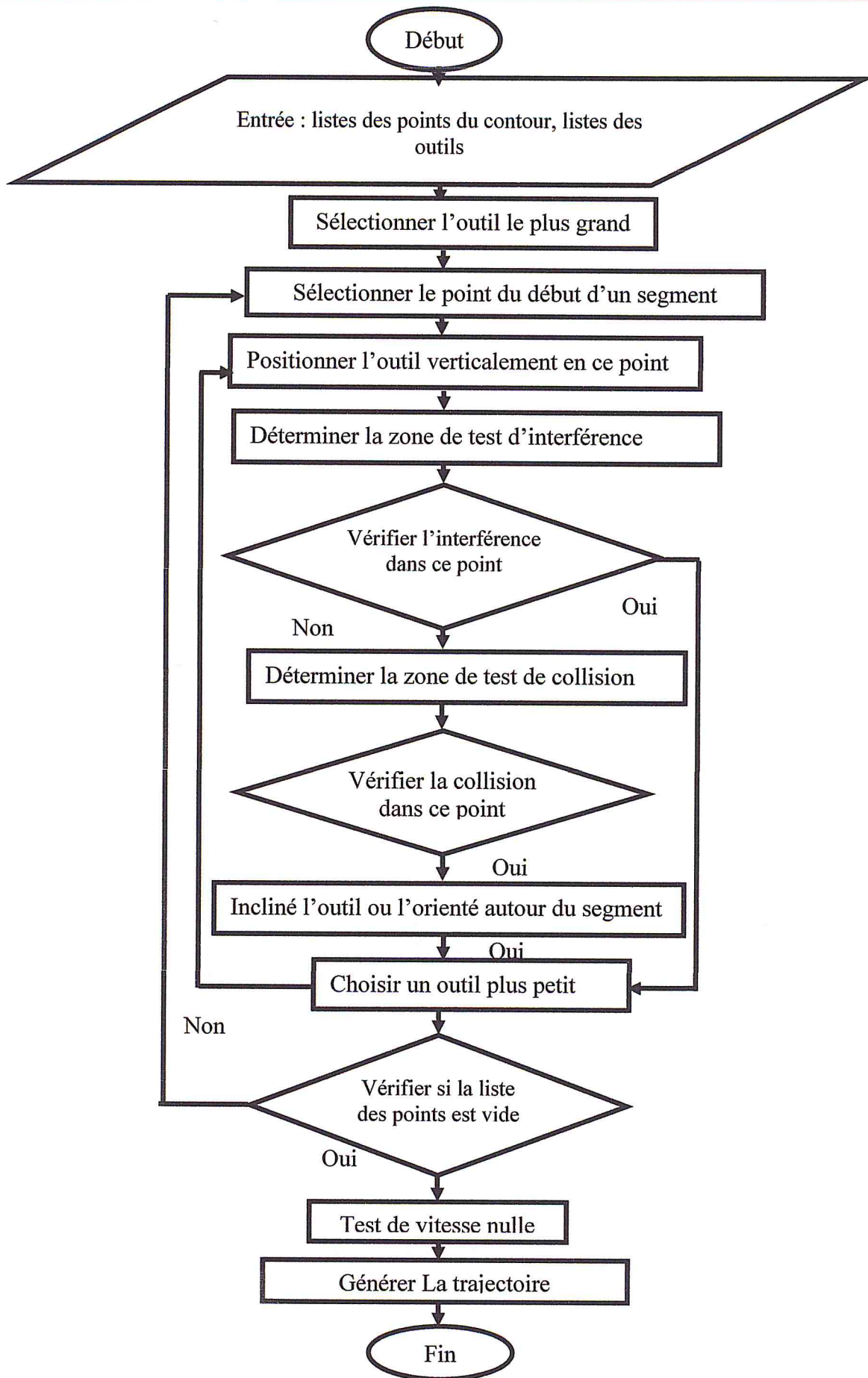
Dans cette approche, l'interférence et la collision sont testées simultanément en chaque point de contour. Il s'agit de sélectionner le plus grand outil (plus grand diamètre) de la base de données des outils :

- tester l'interférence au point du trajet
- prendre celui qui élimine l'interférence
- tester la collision en ce même point
- Au cas de collision corriger l'outil en prenant l'outil de diamètre plus petit.
- Refaire le test pour l'ensemble des points.

Cette procédure est appliquée pour l'ensemble des points de chaque contour

2.2.1. Organigramme de gestion des interférences et de collisions deuxième approche

L'organigramme de gestion des interférences et de collision est réparti en plusieurs étapes dont les principales sont la sélection du début du contour, l'identification des zones de test et le test d'interférence et de collision.



Organigramme 8: Gestion d'interférence et collision en même point.

2.3. Etude critique

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des deux approches de test. .

Approche	Avantage	Inconvénient
Première approche	<ul style="list-style-type: none"> • Permet d'éviter de tester les points plus qu'une fois avec le même outil. 	<ul style="list-style-type: none"> • En changeant l'outil en cas d'interférence dans un point, les points déjà testés seront retester à nouveau et les orientations d'outil seront recalculer. • Temps de calcul modéré.
Deuxième approche	<ul style="list-style-type: none"> • Le positionnement d'outil ce fait une seule fois en chaque point. • Gain en temps de calcul. 	<ul style="list-style-type: none"> • En cas d'interférence, le test d'interférence et de collision sera refait à partir de la première position.

Tableau 3: Comparaison des différents formats d'échange de données.

2.4. Test de vitesse nulle

La vitesse nulle se produit aux points de contact lorsque l'axe de l'outil est confondu avec la normale à la surface au point considéré. Ceci impose un test supplémentaire après l'élimination des interférences et des collisions. Ce test consiste à calculer le vecteur directeur de l'axe de l'outil à la position hors interférence et hors collision calculée précédemment, le comparer avec le vecteur normal à la surface au point de contact et le corriger si nécessaire en l'inclinant d'un incrément puis refaire le test de collision.

2.5. Visualisation d'outil

La visualisation de l'outil implique la visualisation de son cylindre et sa sphère.

Le passage d'un outil hémisphérique réel à une forme graphique, se fait en deux étapes :

- Le calcul des paramètres permettant de dessiner la sphère en introduisant le centre et le rayon.
- Le calcul des paramètres permettant de dessiner le cylindre en introduisant le centre de la sphère, le rayon et la longueur de l'outil.

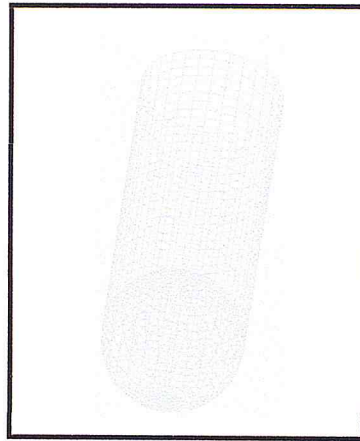


Figure 40:Outil hémisphérique.

2.6.Génération de la trajectoire

La génération de trajectoires en 5 axes se décompose en plusieurs étapes : construction d'une position outil optimale sans interférence, agencement des positions le long d'une passe, distribution des passes pour couvrir la pièce, test d'interférence global entre l'outil et la pièce et enfin repositionnement de l'outil si la normale à la surface est colinéaire avec l'axe de l'outil.

Une fois la trajectoire calculée ; les point centres outils, les inclinaisons et les orientations de l'axe de l'outil sont définies en chaque point de contour. Cette trajectoire est enregistré dans un fichier texte contenant les coordonnées du point centre outil suivi du rayon d'outil utilisé en chaque point de contour, sa longueur et les angles alpha et beta.

3. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, la conception de notre système qui prend en charge la génération de la trajectoire d'outil sans interférence et sans collision à travers les différents diagrammes. Par ailleurs nous avons présenté les méthodes utilisées pour l'optimisation des tests d'interférence et les tests de collision en délimitant le champ de recherche par la création des zones de test. Les problèmes d'interférence et de collision ont été bien détaillés ainsi que les solutions proposées. Dans le chapitre suivant, l'implémentation et la mise en œuvre de notre application sera traitée et la validation de l'application sera prouvée à travers un exemple.

CHAPITRE III :

REALISATION DE L'APPLICATION ET EXPEREMENTATION

Partie I : Présentation de l'application

Introduction

III.1 Présentation du langage c++

III.2 Présentation d'OpenGL


III.3 Présentation de Borland C++ Builder 6

III.4 La simulation et les capture d'écran

La réalisation de notre travail s'achève par une présentation de l'application 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 de trajet d'outil 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 (liste non exhaustive). Enfin, une rétrocompatibilité a été gardée ; les programmes en C compilent sans difficulté avec un compilateur C++.

Comme tout langage, C++ dispose d'une bibliothèque standard, c'est-à-dire de fonctions et de classes prédéfinies. 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...) et les algorithmes les plus usuels [19].

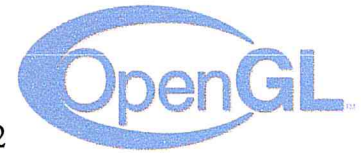
Parmi les environnements de développements nous citons: Anjuta DevStudio , C++ Builder , Code:: Blocks (open-source) , Dev-C++, Eclipse (open-source) , Microsoft Visual C++ , etc [20].

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 greffé un environnement de C.F.A.O déjà existant au niveau du CDTA dont 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 C.F.A.O sont développés en C++ [21] [22].

2. Présentation d'OpenGL

Open Graphic Library ou OpenGL est une API graphique multiplateforme open-source, de bas niveau, dédiée pour les applications générant des images 2D ou 3D. OpenGL est sortie en 1992 par la Sillicon Graphics Inc (ou SGI) et est actuellement géré par la société Khronos Group.



OpenGL est conçu 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, ouvert et portable, la bibliothèque graphique a pu se vendre dans le milieu scientifique et industrielle, et être utilisé dans des nombreuses applications artistiques ou de traitement d'images [23].

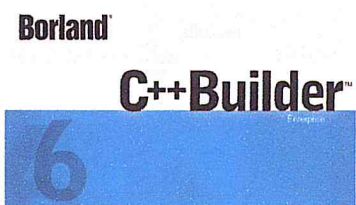
Du fait de ses performances, l'API OpenGL est aussi présent dans différents domaines jeux-vidéo ludiques, les applications web, les systèmes embarqués et les téléphones portables.

C'est une API très performante et simple d'utilisation, qui permet de réaliser des rendus et des scènes complexes, selon les besoins. Cette technologie est ouverte et est implémenté par de nombreuses bibliothèques, sous des langages de programmations différentes (dont des langages de script comme Python ou Ruby) [24].

Par ailleurs, OpenGL est portable et multiplateforme : En théorie, un même code OpenGL fonctionne sur tous les systèmes d'exploitation, dont Windows, Linux, et Mac, et sur toutes les plateformes [25].

3. Présentation de Borland C++ Builder 6

Le Borland c++ builder possède tout la puissance du langage C++ oriente 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. La simulation et les captures d'écran

Le test d'interférence et le test de collision sont effectués sur la pièce représentée par la figure suivante. Cette pièce est conçue dans un logiciel spécialisé de C.A.O et elle est composée de surfaces de formes très complexes. Dans ce même logiciel, la pièce est approximée par un ensemble de triangles. Ces triangles sont stockés dans un fichier STL qui est utilisé comme entrée dans notre application.

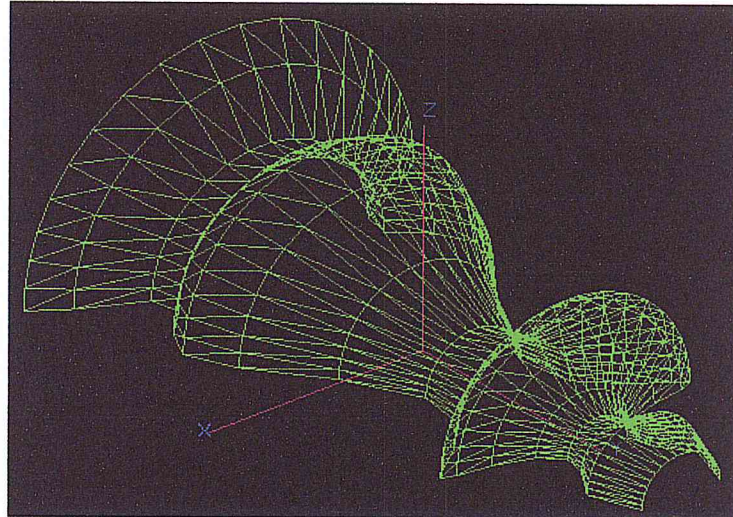


Figure 41: Modèle STL.

L'interface de l'application développée est composée de deux fenêtres. La première contient plusieurs onglets dont les deux premiers sont réservés respectivement à la lecture du fichier S.T.L et la création des contours.

La deuxième fenêtre est réservée au test et à la correction de l'interférence et de la collision à travers la division de la pièce en cellules, la définition des zones de test de l'interférence, des zones de test de la collision, le calcul des positions et les orientations angulaires alpha et beta et les points de passage de l'outil (les points centre outil). Elle permet également de sauvegarder la trajectoire dans un fichier texte.

4.1.Lecture d'un fichier STL

La première étape est la lecture d'un fichier STL, ceci est réalisé par simple clique sur le bouton « Ouvrir fichier STL » suivi par la sélection de fichier à ouvrir. La seconde étape consiste à calculer la normale en cliquant sur le bouton « Calculer la normale ». A ce stade les résultats visibles sont :

- Le nombre total des sommets et le nombre total des triangles
- Les paramètres de la pièce brute : X min, Y min, Z min, X max, Y max, Z max.

Une fois les résultats obtenus, l'utilisateur passe au deuxième onglet pour le calcul des contours.

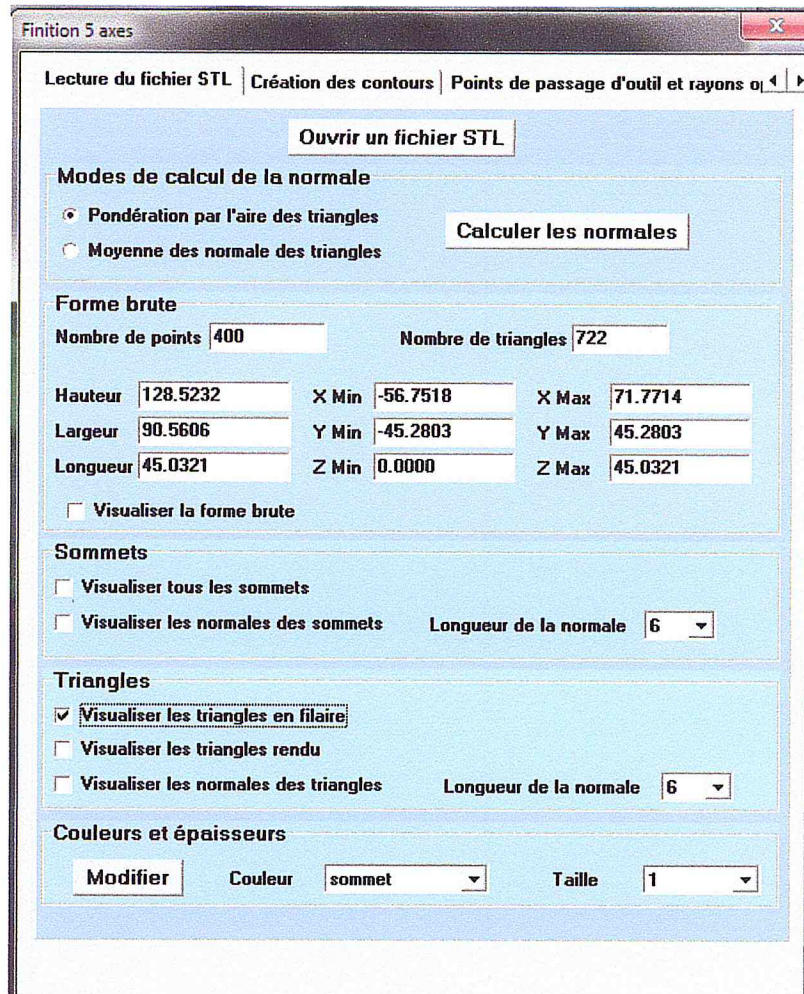


Figure 42: Lecture d'un fichier STL et calcul de la normale.

4.2. Création des contours

La deuxième étape est la création des contours. Dans cet onglet, le nombre de bandes de triangles à créer et la profondeur de passe sont des pré requis pour la création des contours à travers le bouton « création des contours ».

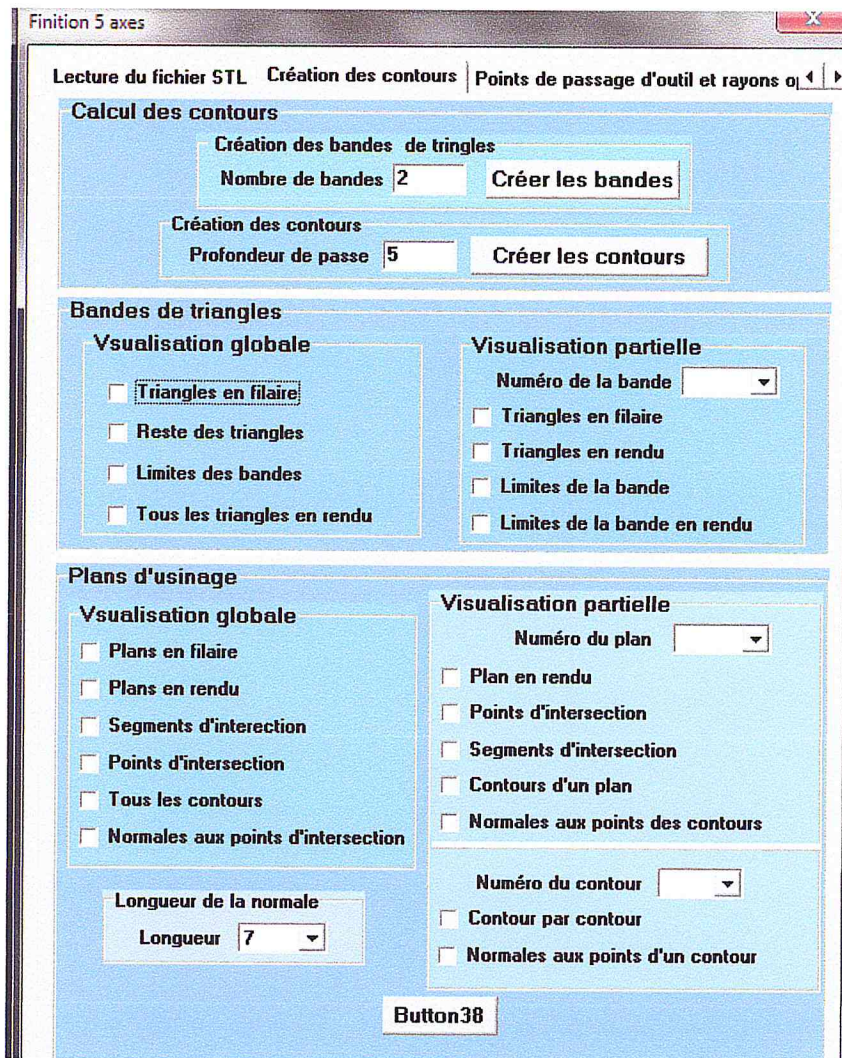


Figure 43: Création des contours.

Une fois les contours calculés, le test d'interférence et le test de collision sont exécutés dans la deuxième fenêtre.

4.3.Récupération des paramètres

Une fois les résultats obtenus, l'utilisateur récupère les paramètres de la pièce ainsi que les contours déjà calculés en activant le bouton « Lire les contours ». Les paramètres visibles sont :

- Les sommets du modèle
- Les points de contour
- Les segments
- Les normales estimées aux sommets

La visualisation se fait en activant la case réservée à chaque check box.

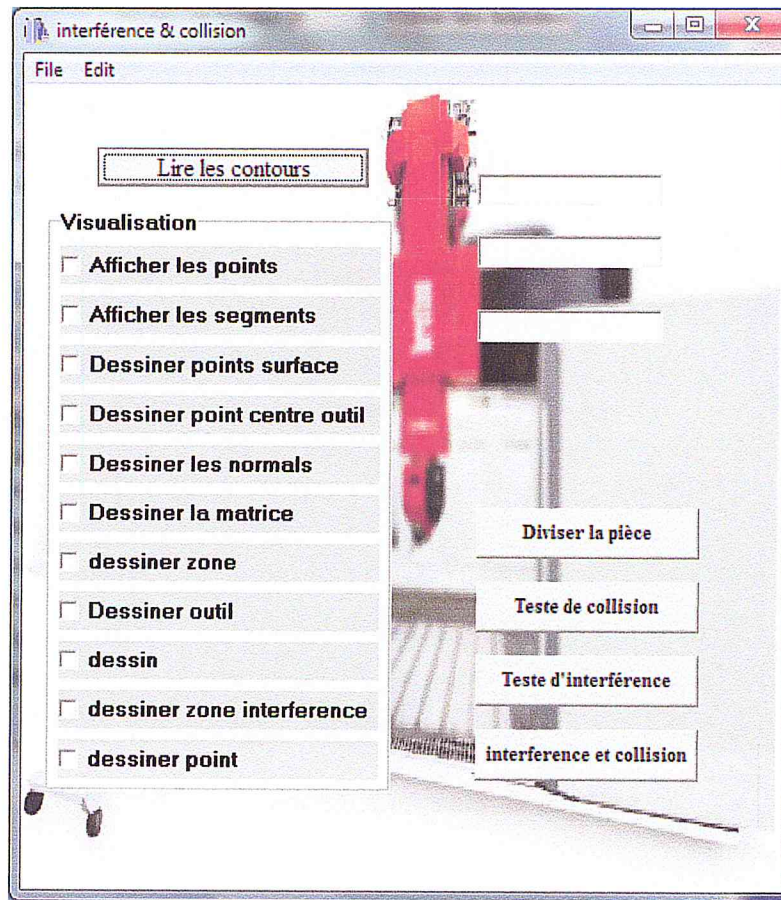


Figure 44: Récupération des contours.

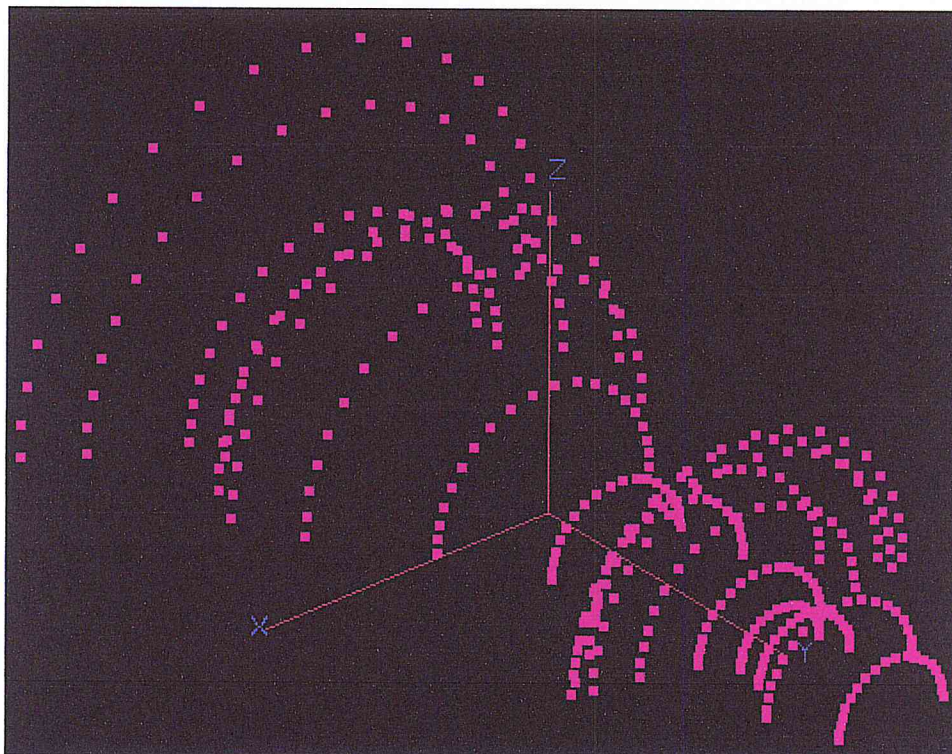


Figure 45: Points de surface.

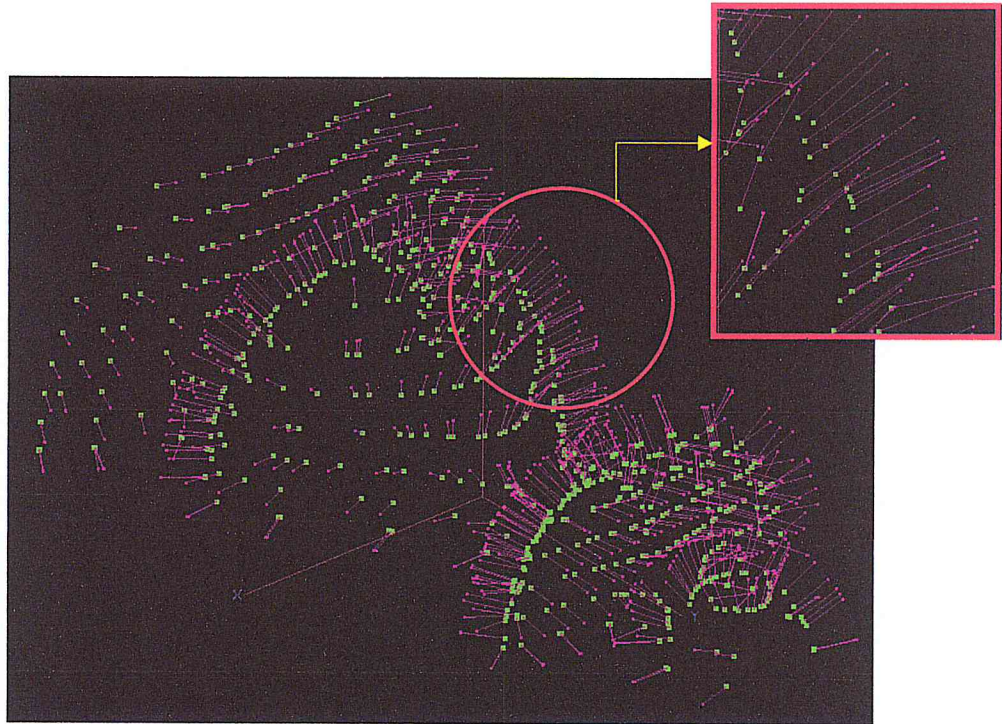


Figure 48: Normales des points de contour.

4.4.Division de la pièce brute

L'activation du bouton « Diviser la pièce » permet la création de la matrice de cellules, et l'affichage des points de la surface dans les différentes cellules.

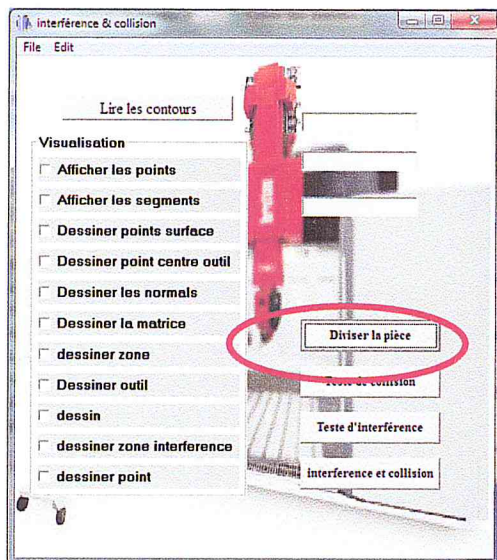


Figure 49: Bouton division de la pièce.

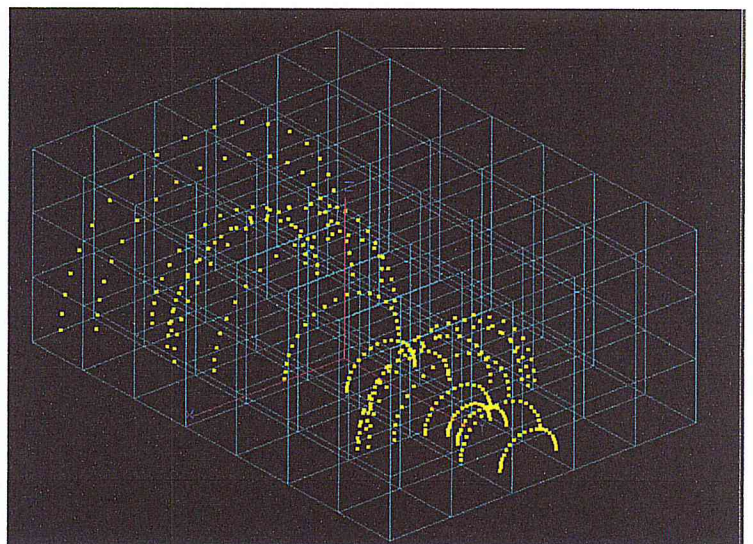


Figure 50: Matrice de la pièce.

4.5. Test d'interférences

Le test d'interférence est lancé une fois que l'utilisateur active le bouton « Test d'interférence » et la correction se fait au fur à mesure que le test avance. Une fois l'outil positionné la zone de test est calculée.

4.5.1. Détection de la zone de test

La zone représentée en violet est l'enveloppe de l'outil. La zone en rouge est la zone de test. Si l'outil est changé avec un autre plus petit, la zone est divisée à nouveau selon le rayon du nouvel outil.

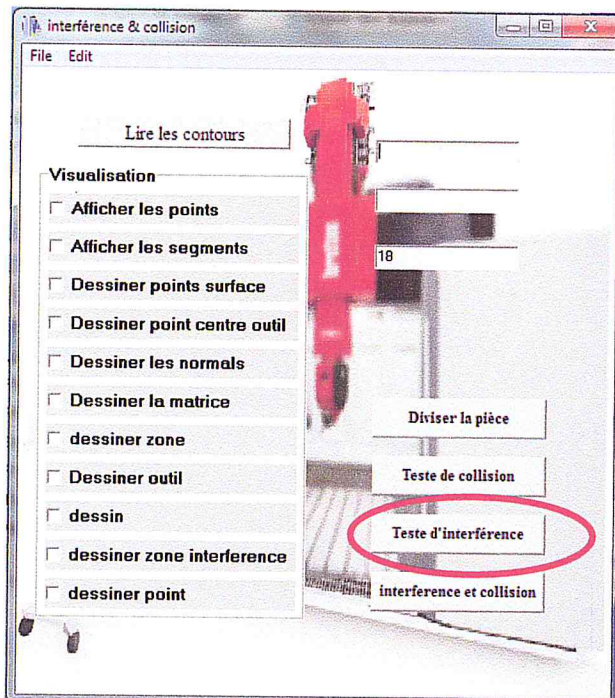


Figure 51: Test d'interférence.

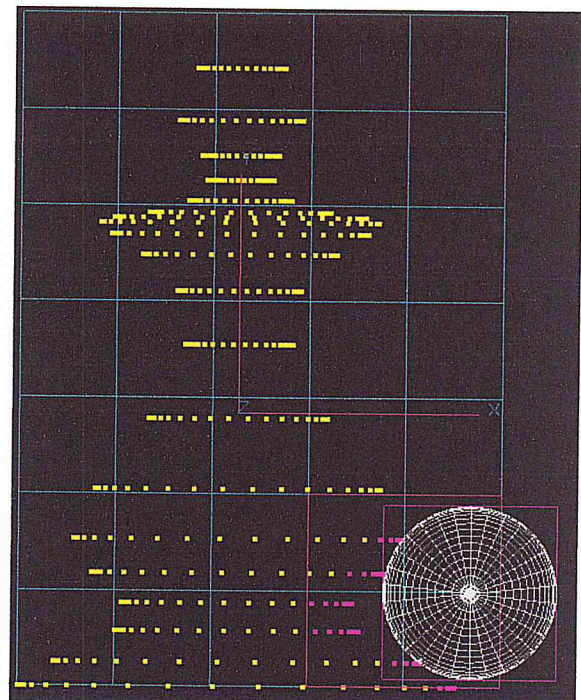


Figure 52: Zone de test d'interférence.

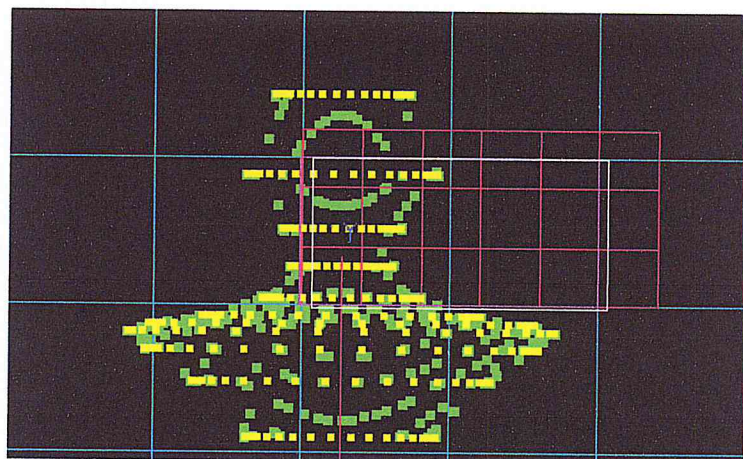


Figure 53: Division de la zone selon le nouvel outil.

4.5.2. Correction d'interférence

L'interférence est corrigée en choisissant l'outil de rayon plus petit. Le test se fait par rapport à la partie active.

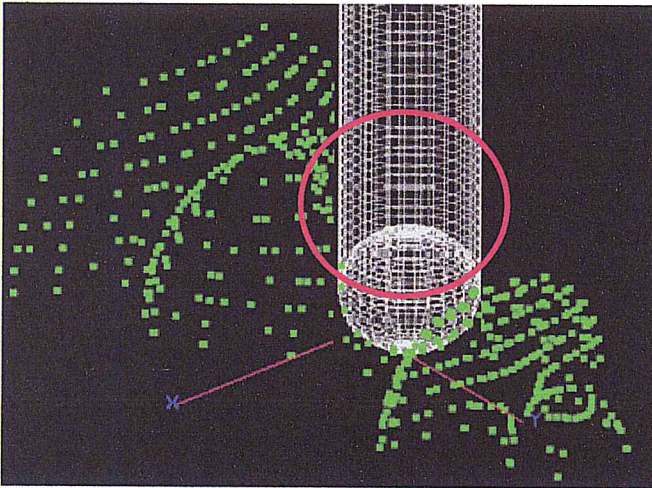


Figure 55: Cas d'interférence.

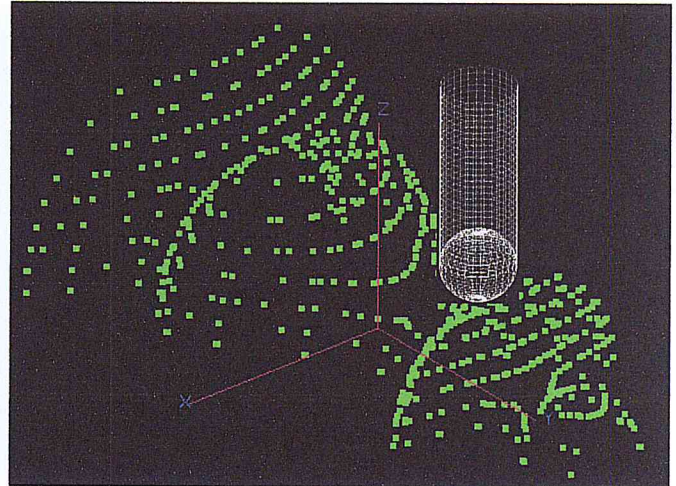


Figure 54: Correction d'interférence.

4.6. Test de collisions

Le test de collision est lancé par cliquer sur le bouton « Test de collision » et la correction se fait au fur à mesure que l'exécution du test avance. Une fois l'outil positionné, la zone de test de collision est calculée, le rayon de l'outil et les angles sont affichés dans l'espace de texte.

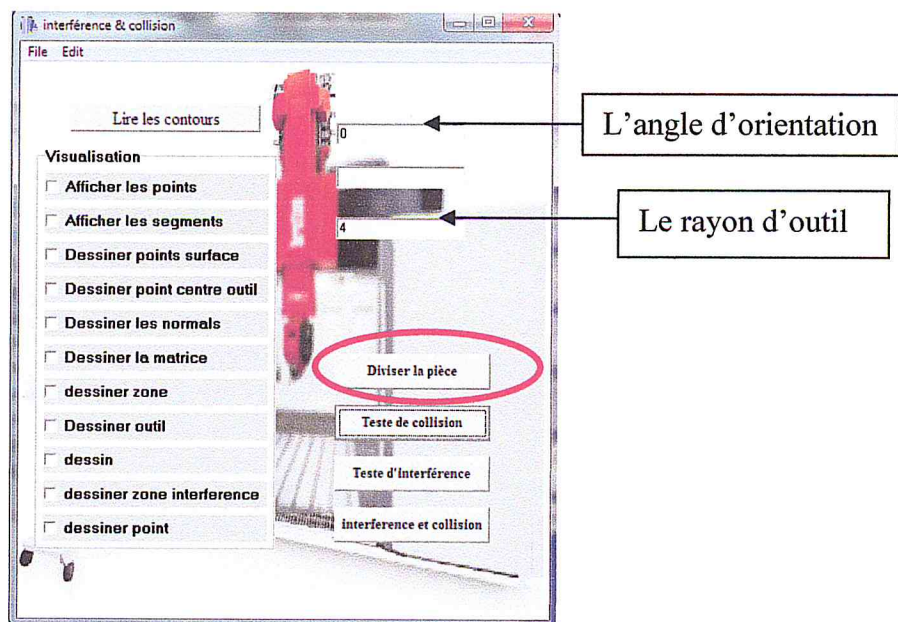


Figure 56: Test de collisions.

4.6.1. Détection de la zone de collision

La zone en rouge est la zone de test, elle englobe toutes les cellules qui se chevauchent avec l'enveloppe de l'outil, représenté en violet.

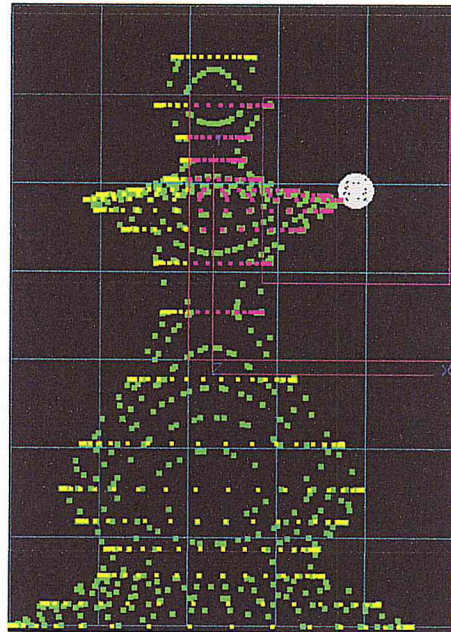


Figure 57: Zone de test de collision.

4.6.2. Correction de collision

Une fois la collision est détectée, des orientations autour du segment et des inclinaisons vers le segment seront appliquées à l'outil pour éliminer le chevauchement d'outil et les sommets.

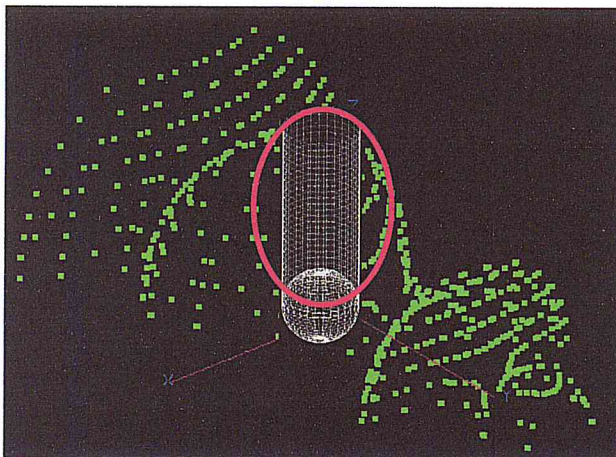


Figure 59: Cas d'une collision.

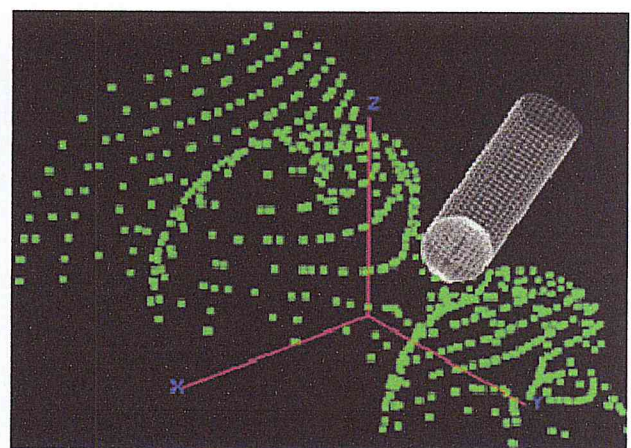
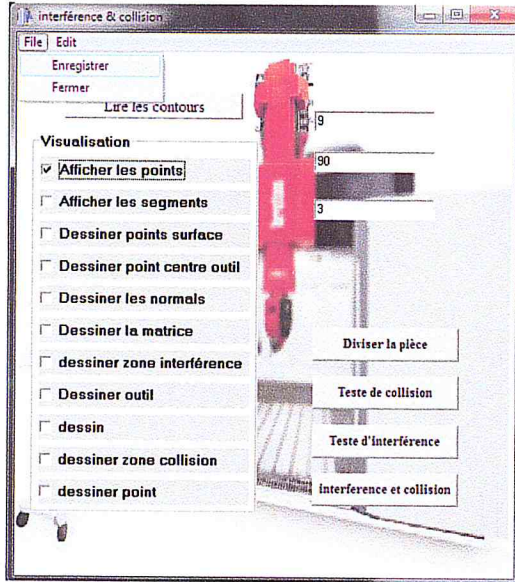


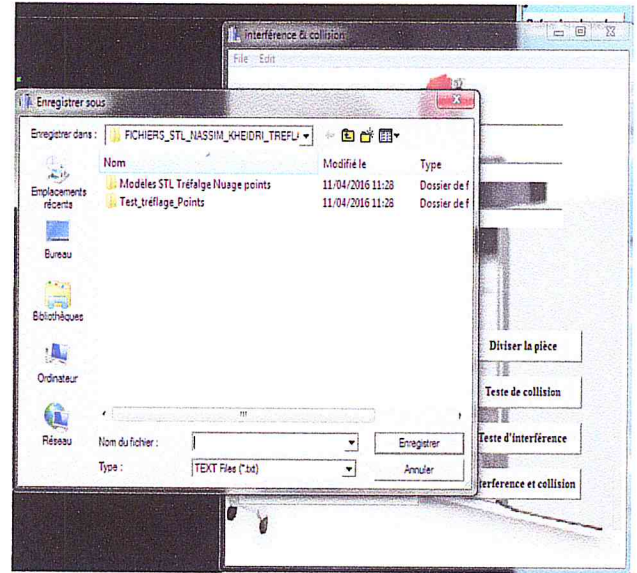
Figure 58: Correction de collision.

4.7. Enregistrement de la trajectoire

Une fois les positions de l'outil sont calculées, la trajectoire est enregistrée sous forme d'un fichier texte, où l'utilisateur doit choisir l'emplacement et le nom de ce fichier.



a: Etape 1



b: Etape 2

Figure 60: Enregistrement du trajet.

Le fichier enregistré est décomposé en deux parties.

- Une partie statique :
 - La première ligne est la description du fichier
- Une partie dynamique structurée comme suit :
 - le nombre total des points.
 - le nombre des points du contour.
 - les coordonnées du point centre outil (x,y,z), alpha, beta, le rayon et la longueur d'outil.

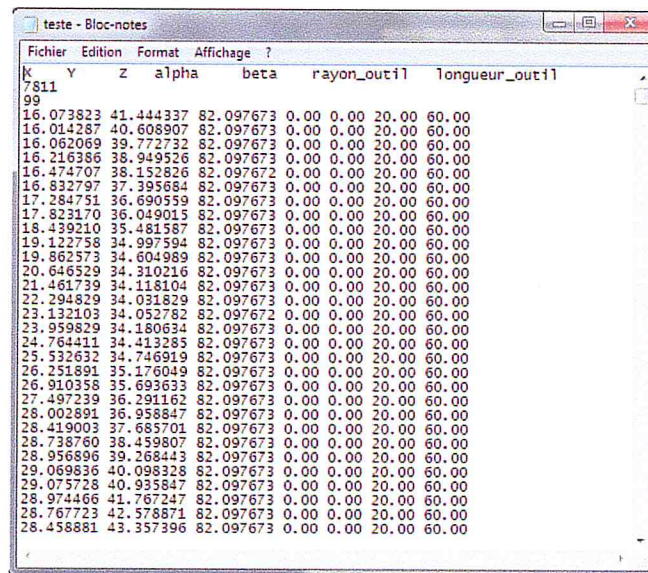


Figure 61: Fichier de la trajectoire

CHAPITRE III :

REALISATION DE L'APPLICATION ET EXPEREMENTATION

Partie II : Test et validation

III.5 Exemple de test

Conclusion

Arrivé au terme de la présentation de l'application, la phase de validation du travail et les différents résultats auquel nous avons abouti sont présentés dans la suite. Le test de validation consiste à utiliser un modèle STL d'une forme gauche issu d'une conception générée dans un logiciel de CFAO spécialisé dans la conception des surfaces gauches.

5. Exemple de test

Tout le processus de génération du trajet d'outil est appliqué sur l'exemple suivant pour montrer la validation de l'application.

L'objet est une pièce de poterie destiné a être réalisée en grande quantité dans un moule d'injection de plastique. Pour cela nous devons générer un trajet pour la réalisation de l'empreinte.

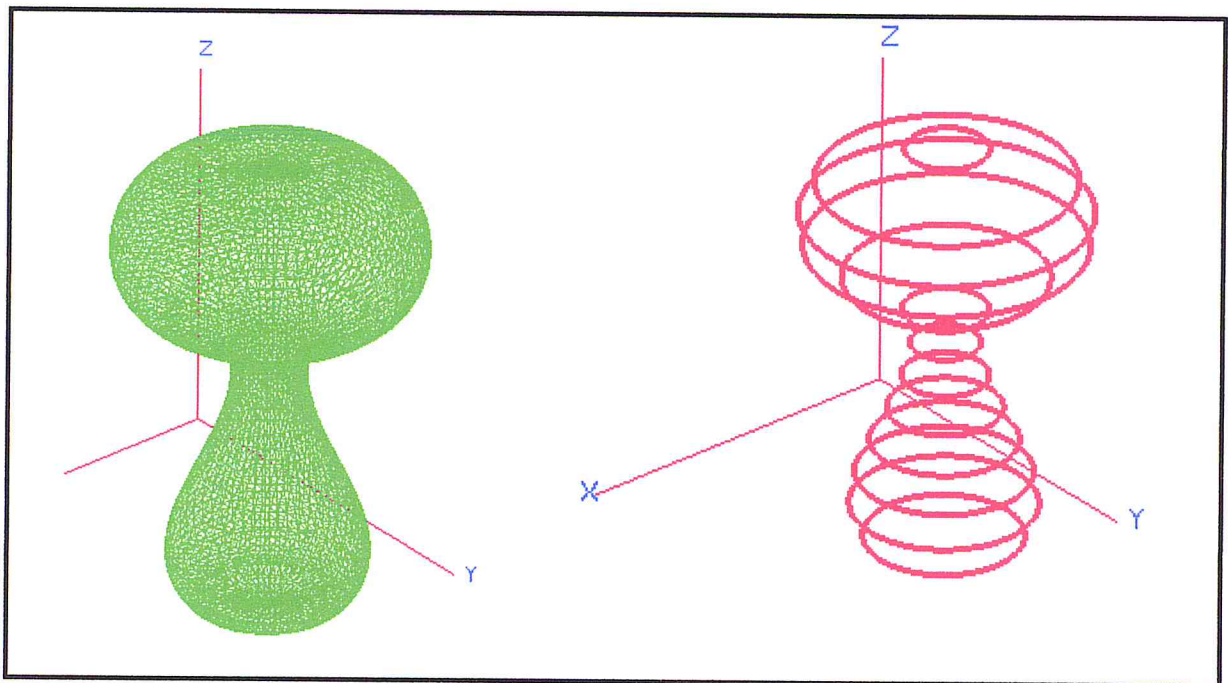


Figure 62: Exemple de test.

❖ Etape1

- Ouverture de l'application et choix du fichier STL de la pièce à usiner.

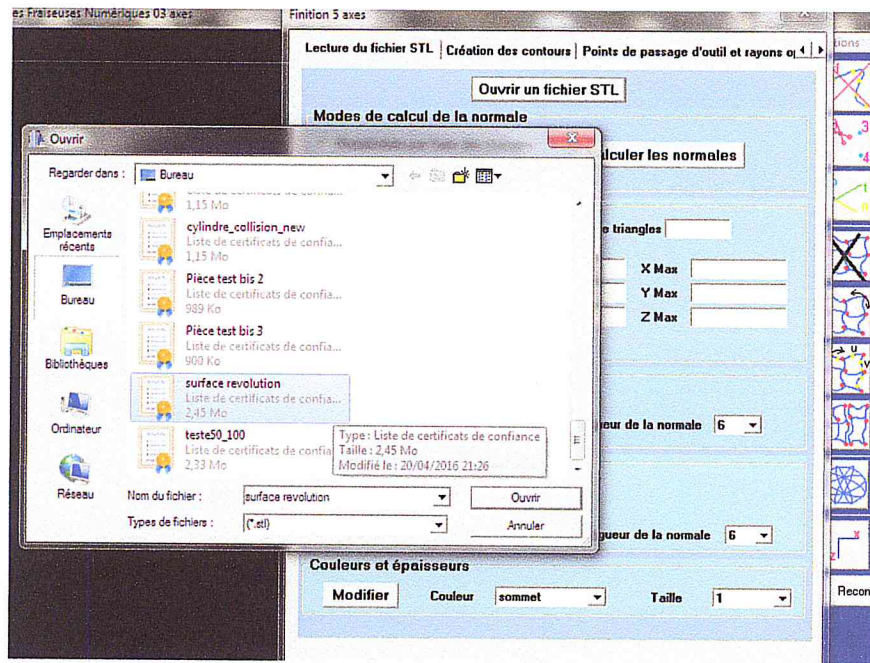


Figure 63: Ouverture d'un fichier STL.

❖ Etape2 :

- Calcul des paramètres de la pièce ainsi que les normales.

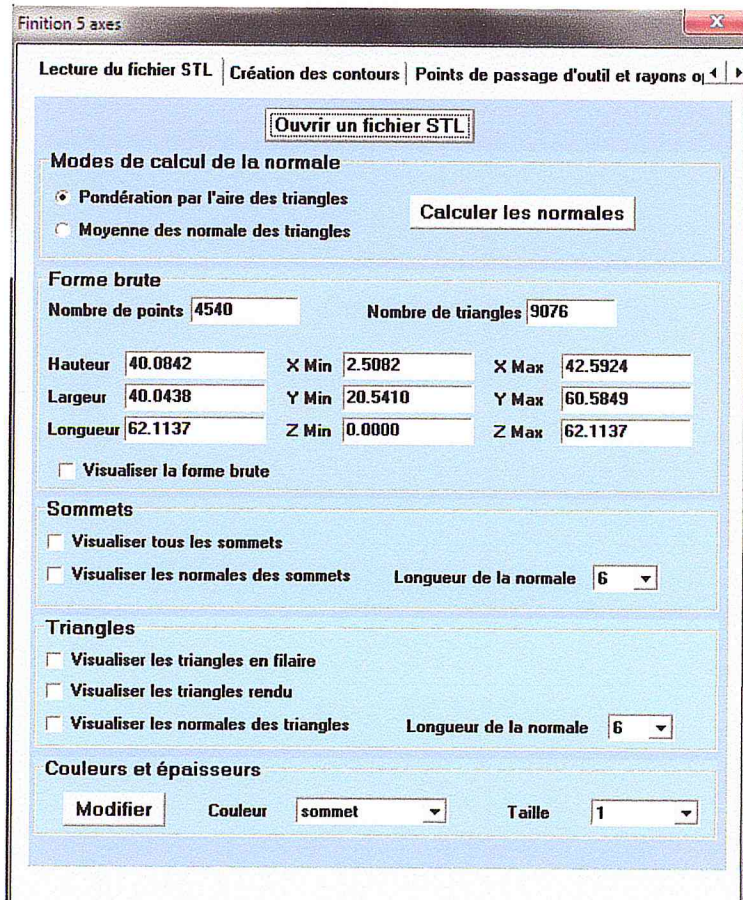


Figure 64: Calcul des normales.

❖ Etape3 :

- Création des contours de la pièce en entrant le numéro de bande et la profondeur de passe. Pour l'exemple de validation le nombre de contour est: 12.

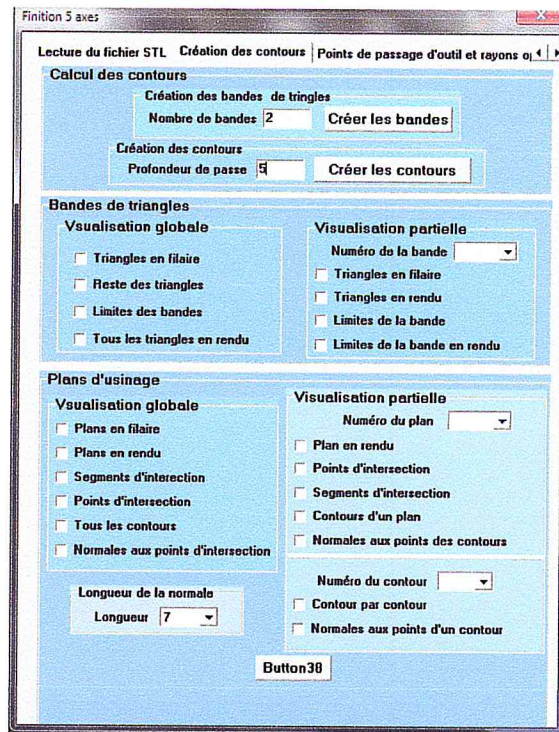


Figure 65: Calcul des contours.

❖ Etape4 :

- Lecture des paramètres calculés

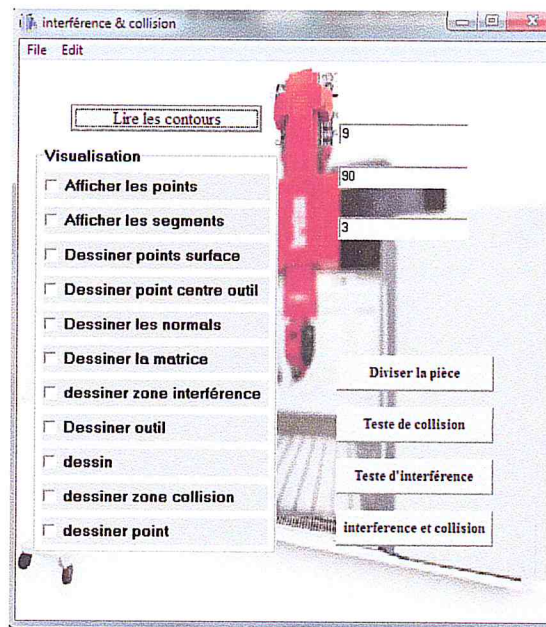


Figure 66: Lecture des paramètres de la pièce.

❖ Etape5 :

- Affichage des points des contours

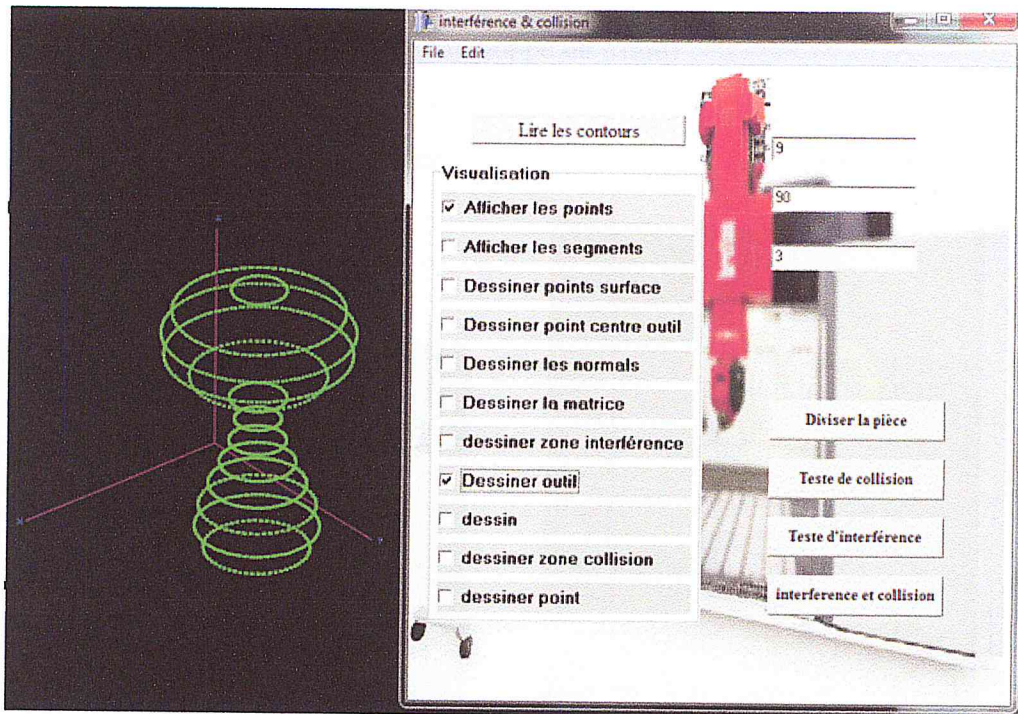


Figure 67: Affichage des points de contours.

❖ Etape6 :

- Division de la pièce en cellules ou chaque cellule contient les sommets de la surface étudiée.

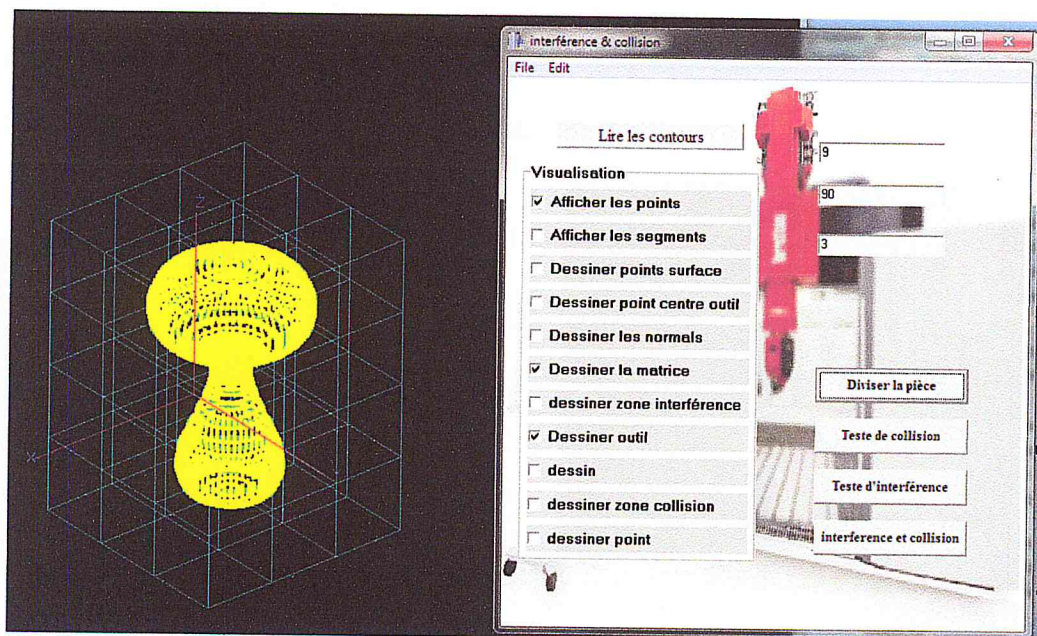


Figure 68: Division de la pièce en cellules.

❖ Etape9 :

- Enregistrement de la trajectoire d'outil

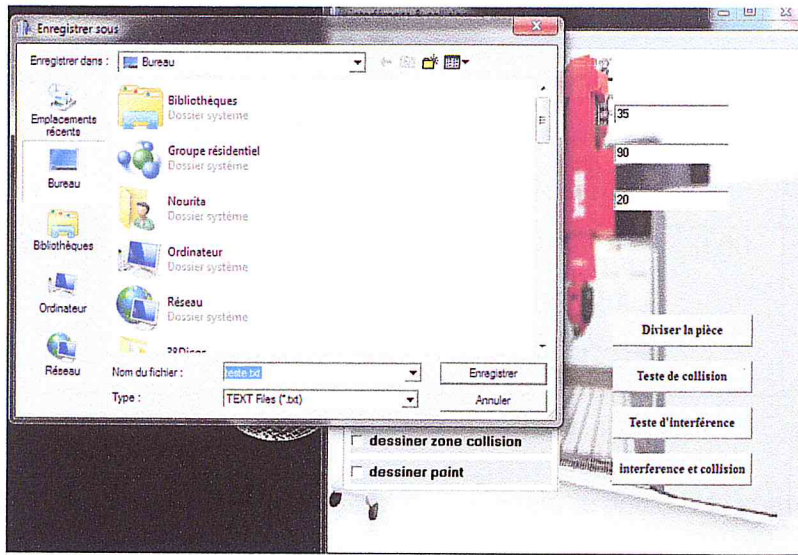


Figure 72: Enregistrement de la trajectoire.

❖ Etape10 :

- Vérification de la trajectoire

Fichier	Edition	Format	Affichage ?
-8.055915	62.765306	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-9.129823	61.164064	39.443350	0.00 25.00 20.00 60.00
-9.922906	59.932414	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-10.848958	58.241351	39.443352	0.00 25.00 20.00 60.00
-11.528445	56.943567	39.449755	0.00 25.00 20.00 60.00
-12.299181	55.176298	39.443350	0.00 25.00 20.00 60.00
-12.859599	53.822829	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-13.468818	51.993588	39.443352	0.00 25.00 20.00 60.00
-13.905657	50.595335	39.449755	0.00 25.00 20.00 60.00
-14.348449	48.718848	39.443351	0.00 25.00 20.00 60.00
-14.658190	47.287064	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-14.930995	45.378441	39.443352	0.00 25.00 20.00 60.00
-15.111146	43.924656	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
0.486105	41.561590	45.964100	0.00 25.00 20.00 60.00
193			
1.636571	40.763021	29.900479	0.00 65.00 14.00 100.00
1.626939	40.568596	29.902323	0.00 65.00 14.00 100.00
1.708320	38.889494	29.897327	0.00 65.00 14.00 100.00
1.724063	38.715577	29.893748	0.00 65.00 14.00 100.00
1.725429	38.617220	29.898931	0.00 65.00 14.00 100.00
1.955769	36.921811	29.899297	0.00 65.00 14.00 100.00
1.983589	36.794320	29.894396	0.00 65.00 14.00 100.00
2.000156	36.673746	29.899516	0.00 65.00 14.00 100.00
2.386567	35.006920	29.899214	0.00 65.00 14.00 100.00
2.421513	34.905670	29.894371	0.00 65.00 14.00 100.00
2.456858	34.764910	29.899493	0.00 65.00 14.00 100.00
2.932664	33.197100	29.920448	0.00 65.00 14.00 100.00
2.966857	33.117408	29.918125	0.00 65.00 14.00 100.00
3.630960	31.658689	29.897853	0.00 65.00 14.00 100.00
3.691910	31.515866	29.898356	0.00 65.00 14.00 100.00
3.724637	31.441789	29.900454	0.00 65.00 14.00 100.00
4.532596	29.945823	29.899171	0.00 65.00 14.00 100.00
4.607351	29.828311	29.894232	0.00 65.00 14.00 100.00
4.660027	29.728409	29.899368	0.00 65.00 14.00 100.00
5.605881	28.302566	29.899316	0.00 65.00 14.00 100.00
5.678672	28.212419	29.894460	0.00 65.00 14.00 100.00
5.755522	28.099797	29.899574	0.00 65.00 14.00 100.00
6.760149	26.794265	29.918102	0.00 65.00 14.00 100.00
6.823426	26.720677	29.918017	0.00 65.00 14.00 100.00
7.953709	25.581409	29.901602	0.00 65.00 14.00 100.00
8.064554	25.479952	29.896323	0.00 65.00 14.00 100.00
8.112527	25.420489	29.902002	0.00 65.00 14.00 100.00
9.387533	24.312884	29.898959	0.00 65.00 14.00 100.00
9.505289	24.223132	29.899373	0.00 65.00 14.00 100.00
9.582289	24.152948	29.899134	0.00 65.00 14.00 100.00
10.967683	23.148824	29.899333	0.00 65.00 14.00 100.00
11.074429	23.064482	29.894453	0.00 65.00 14.00 100.00
11.178209	23.010311	29.899568	0.00 65.00 14.00 100.00
12.650650	22.138837	29.899098	0.00 65.00 14.00 100.00
12.743087	22.097435	29.894260	0.00 65.00 14.00 100.00
12.874612	22.023284	29.899392	0.00 65.00 14.00 100.00
14.329876	21.284247	29.922053	0.00 65.00 14.00 100.00

Fichier	Edition	Format	Affichage ?
-5.942499	65.419438	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-7.155619	63.920905	39.443352	0.00 25.00 20.00 60.00
-8.055915	62.765306	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-9.129823	61.164064	39.443350	0.00 25.00 20.00 60.00
-9.922906	59.932414	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-10.848958	58.241351	39.443352	0.00 25.00 20.00 60.00
-11.528445	56.943567	39.449755	0.00 25.00 20.00 60.00
-12.299181	55.176298	39.443350	0.00 25.00 20.00 60.00
-12.859599	53.822829	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-13.468818	51.993588	39.443352	0.00 25.00 20.00 60.00
-13.905657	50.595335	39.449755	0.00 25.00 20.00 60.00
-14.348449	48.718848	39.443351	0.00 25.00 20.00 60.00
-14.658190	47.287064	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-14.930995	45.378441	39.443352	0.00 25.00 20.00 60.00
-15.111146	43.924656	39.449754	0.00 25.00 20.00 60.00
-15.155114	42.945623	39.449754	0.00 0.00 20.00 60.00
193			
1.636571	40.763021	29.900479	0.00 65.00 14.00 100.00
1.626939	40.568596	29.902323	0.00 65.00 14.00 100.00
1.708320	38.889494	29.897327	0.00 65.00 14.00 100.00
1.724063	38.715577	29.893748	0.00 65.00 14.00 100.00
1.725429	38.617220	29.898931	0.00 65.00 14.00 100.00
1.955769	36.921811	29.899297	0.00 65.00 14.00 100.00
1.983589	36.794320	29.894396	0.00 65.00 14.00 100.00
2.000156	36.673746	29.899516	0.00 65.00 14.00 100.00
2.386567	35.006920	29.899214	0.00 65.00 14.00 100.00
2.421513	34.905670	29.894371	0.00 65.00 14.00 100.00
2.456858	34.764910	29.899493	0.00 65.00 14.00 100.00
2.932664	33.197100	29.920448	0.00 65.00 14.00 100.00
2.966857	33.117408	29.918125	0.00 65.00 14.00 100.00
3.630960	31.658689	29.897853	0.00 65.00 14.00 100.00
3.691910	31.515866	29.898356	0.00 65.00 14.00 100.00
3.724637	31.441789	29.900454	0.00 65.00 14.00 100.00
4.532596	29.945823	29.899171	0.00 65.00 14.00 100.00
4.607351	29.828311	29.894232	0.00 65.00 14.00 100.00
4.660027	29.728409	29.899368	0.00 65.00 14.00 100.00
5.605881	28.302566	29.899316	0.00 65.00 14.00 100.00
5.678672	28.212419	29.894460	0.00 65.00 14.00 100.00
5.755522	28.099797	29.899574	0.00 65.00 14.00 100.00
6.760149	26.794265	29.918102	0.00 65.00 14.00 100.00
6.823426	26.720677	29.918017	0.00 65.00 14.00 100.00
7.953709	25.581409	29.901602	0.00 65.00 14.00 100.00
8.064554	25.479952	29.896323	0.00 65.00 14.00 100.00
8.112527	25.420489	29.902002	0.00 65.00 14.00 100.00
9.387533	24.312884	29.898959	0.00 65.00 14.00 100.00
9.505289	24.223132	29.899373	0.00 65.00 14.00 100.00
9.582289	24.152948	29.899134	0.00 65.00 14.00 100.00
10.967683	23.148824	29.899333	0.00 65.00 14.00 100.00
11.074429	23.064482	29.894453	0.00 65.00 14.00 100.00
11.178209	23.010311	29.899568	0.00 65.00 14.00 100.00
12.650650	22.138837	29.899098	0.00 65.00 14.00 100.00
12.743087	22.097435	29.894260	0.00 65.00 14.00 100.00
12.874612	22.023284	29.899392	0.00 65.00 14.00 100.00
14.329876	21.284247	29.922053	0.00 65.00 14.00 100.00

a : Trajet approche 1

b : Trajet approche 2

Figure 73: Fichier de la trajectoire.

❖ Etape7 :

Identification des zones :

- La zone mauve représente l'enveloppe de l'outil
- La zone en rouge représente la zone de test et contient les points roses susceptible de provoquer une interférence

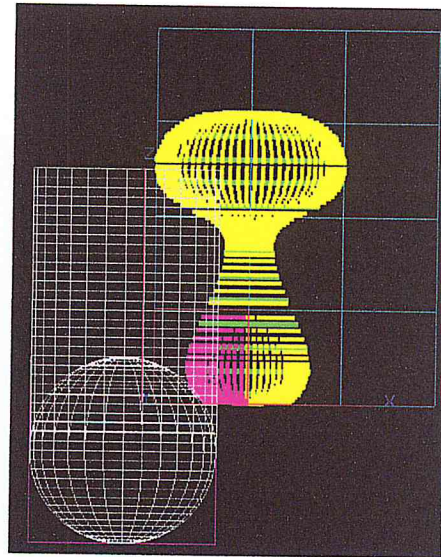
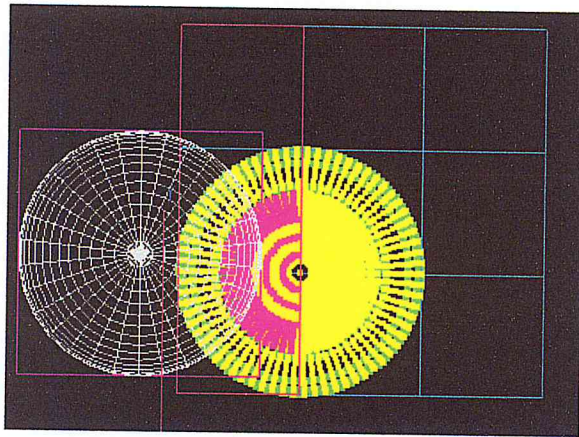


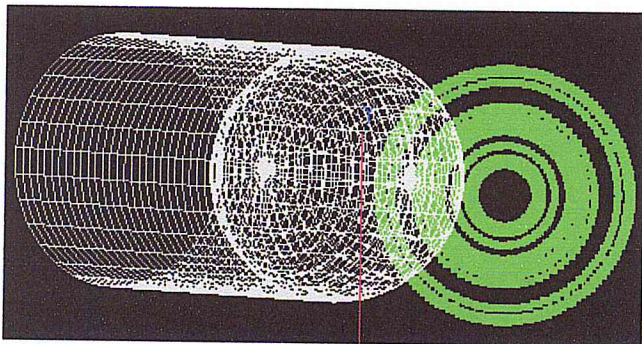
Figure 69: Détermination de la zone de test. Figure 70: Détermination de la zone de test.

❖ Etape 8 :

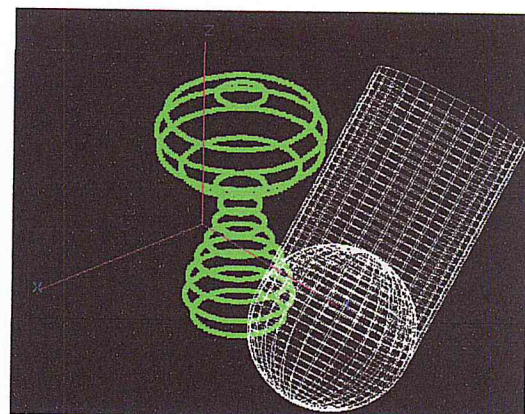
- Test d'interférence puis test de collision suivant les deux approches.
- La correction de ces deux dernières se fait en parallèle avec le test

❖ Etape 9 :

- Calcul des orientations et des inclinaisons d'outil



a : Vue plan xy



b : Vue en trois dimension

Figure 71: inclinaison autour du segment.

- En termes de temps de réponse l'approche deux (02), donne un meilleur résultat que l'approche une (01). Pour les spécialistes du domaine, ceci est dû en grande partie à la géométrie de la pièce.

Ce n'est pas le cas général, en réalité la tendance de géométrie de la surface peut renseigner l'utilisateur expert sur les résultats attendus et par conséquent laquelle des deux approches donne un meilleur résultat. Ceci justifie L'implémentation des deux approches.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes étapes de notre application ont été présentées et le travail réalisé a été validé à travers un exemple concret de pièce de forme complexe. 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 un seul exemple 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 de CFAO du CDTA.

Conclusion générale

Ce travail réalisé au sein de la division productique et robotique du CDTA s'articule autour du développement d'une application pour la finition des surfaces gauches en 05 axes par combinaison d'outils hémisphériques. Il s'agit plus précisément, de la réalisation d'une interface entre la conception en amont et la fabrication en aval par la mise en place d'un module de positionnement et d'orientation d'outil hors interférence et hors collision pour les pièces mécanique à profil complexe.

L'application ainsi conçues prend en charge la division de la surface en des cellules, la création des zones de test d'interférence ainsi que les zones de test de collision, le test et la correction des interférences également des collisions selon deux approches, correction de la position vitesse nulle et la génération du trajet d'outil. Enfin, la validation du travail a été prouvée à partir d'exemple concret de pièce de forme gauche, les résultats (trajet d'usinage et orientation d'outil) se sont avérés satisfaisants.

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

- Le système peut être amélioré par l'intégration de méthodes pour la reconstruction du trajet corrigé en incluant les engagements et les dégagements des outils.
- Prendre en considération le paramètre tolérance (hauteur de crête) d'usinage lors de la reconstruction du trajet d'usinage.
- Intégration de procédures pour l'identification de l'existence ou de l'absence de la matière pour accélérer le test de collision.
- Etendre le test de collision a l'environnement de l'usinage (porte outil, système de bridage,...).
- Finition avec des outils cylindriques et toriques.
- Proposition d'une nouvelle approche pour l'orientation de l'outil afin d'éviter les collisions.
- Détermination de la combinaison optimale des outils hémisphériques en intégrant la contrainte du nombre maximum d'outils à utiliser.

Bibliographie

- [1] Bey, Mohamed, «Modélisation des courbes et des surfaces,». 10th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2006, Barcelona-Lloret de Mar, Spain, 11-15 September, 2006.
- [2] H. S. A. Kerlil, « Adaptation des vitesses d'avance lors de l'usinage en finition des surfaces gauches », rapport de recherche, 2009.
- [3] J. C. Léon, « Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO», édition Hermes, 1991.
- [4] « http://5axes.free.fr/Format_Echange.htm,» 22 10 2015. [En ligne].
- [5] 21 10 2015. [En ligne]. Available: http://5axes.free.fr/Format_Echange.htm.
- [6] [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier_de_st%C3%A9r%C3%A9olithographie.
- [7] [En ligne]. Available: <http://cao.etudes.ecp.fr/?page=formats.htm#STL>.
- [8] [En ligne]. Available: <http://www.ennex.com/~fabbers/StL.asp>.
- [9] [En ligne]. Available: <http://www.invention-europe.com/CMpro-l-s-8.htm>.
- [10] F. Kamel, «Automatisation de la détermination de l'ordre d'usinage des pièces mécaniques,». Thèse de Magister, Université El Hadj Lakhder, 2015.
- [11] O. Zirmi, «Analyse de fabricabilité en conception de gammes,». Thèse de doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE. 8 Mai 2008.
- [12] S. DJEBALI, «Optimisation Globale du Processus d'Usinage des Surfaces Gauches,». Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier. 13/11/2014.
- [13] B. ELHACHEMI, «Sélection optimale des outils de coupe pour l'evidement des poches quelconque en vue de l'optimisation de l'usinage,».Thèse de magister Université de BATNA, 2012/2013.
- [14] B. B. Ahmed BENYOUCEF, «Modélisation de la hauteur de crête pour les fraises de formes complexes,» *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007*, 2007.
- [15] M.Bey, «Automatisation de la sélection de la stratégie et de la direction d'usinage pour la finition des surfaces gauches,». rapport de recherche, JENM (CDTA), 2011.
- [16] E. Duc, « Usinage de formes gauches contribution à l'amélioration de la qualité des

trajectoires d'usinage,». Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée de Paris Sud 11, 1998 .

- [17] «Outil de coupe,» *TRAMETAL*, pp. 15-22, Mai 2004.
- [18] B. Ahmed, «Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique,» UNIVERSITE DE BATNA, BATNA, 2006.
- [19] «depannetonpc,» 02 05 2016. [En ligne]. Available:
http://www.depannetonpc.net/lexique/lire_74_langage-c.html.
- [20] 06 05 2016. [En ligne]. Available:
<http://perso.usthb.dz/~yboudouma/c/Apprendre%20le%20C++,%20Claude%20Delannoy.pdf>.
- [21] [En ligne]. Available: <http://math.univ-lyon1.fr/~omarguin/programmation/C++Polycop2.pdf>.
- [22] [En ligne]. Available: [https://msdn.microsoft.com/fr-fr/library/hh438473\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/fr-fr/library/hh438473(v=vs.110).aspx).
- [23] [En ligne]. Available:
http://assiste.com/Quelle_est_ma_version_OpenGL_et_mise_a_jour.html.
- [24] [En ligne]. Available: http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2011/OpenGL/intro_presentation.html.
- [25] [En ligne]. Available: <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Antoine.Bouthors/teaching/opengl/opengl1.html>.
- [26] F. Kamel, «Automatisation de la détermination de l'ordre d'usinage des pièces mécaniques».