

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

École National Polytechnique Alger



Département Génie Mécanique

Laboratoire de génie mécanique et développement

**Thèse de Doctorat
en
Génie Mécanique**

**Contribution à l'étude de la topographie 3D
des surfaces gauches usinées sur des
machines 5 axes**

Khadija BOUHADJA Magister en Génie Mécanique de l'EMP

Sous la direction de Mr. Mohamed BOUAZIZ Professeur ENP

Présenté et soutenu publiquement le 23/01/2023

Composition du Jury :

Président	Said RECHAK	Professeur	ENP, Alger
Directeur de thèse	Mohamed BOUAZIZ	Professeur	ENP, Alger
Examineurs	Yacine BELKACEMI	MCA	ENP, Alger
	Nasreddine ZEROUDI	MCA	EMP, Bordj El Bahri
	Nasreddine AMOURA	MCA	Univ. Médéa
	Taha CHETTIBI	Professeur	Univ. SD Blida

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

École National Polytechnique Alger



Département Génie Mécanique

Laboratoire de génie mécanique et développement

**Thèse de Doctorat
en
Génie Mécanique**

**Contribution à l'étude de la topographie 3D
des surfaces gauches usinées sur des
machines 5 axes**

Khadidja BOUHADJA Magister en Génie Mécanique de l'EMP

Sous la direction de Mr. Mohamed BOUAZIZ Professeur ENP

Présenté et soutenu publiquement le 23/01/2023

Composition du Jury :

Président	Said RECHAK	Professeur	ENP, Alger
Directeur de thèse	Mohamed BOUAZIZ	Professeur	ENP, Alger
Examineurs	Yacine BELKACEMI	MCA	ENP, Alger
	Nasreddine ZEROUDI	MCA	EMP, Bordj El Bahri
	Nasreddine AMOURA	MCA	Univ. Médéa
	Taha CHETTIBI	Professeur	Univ. SD Blida

Dédicace

À la mémoire de mes parents,

à mon cher époux Abdeldjouad,

à mes trésors Nour, Ayoub et Younes,

à mon frère Mohamed-el-Amine,

à toutes ma famille et amies.

Remerciements

Le présent travail s'inscrit dans le cadre des activités de recherche s'intéressant à la production mécanique avancée caractérisée par la complexité croissante des problématiques engendrées autour du procédé de fabrication des formes gauches, et auxquelles des produits de bonne qualité « topographie de surfaces produites » doivent être apportés.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein de l'équipe CFAO de la division Productique et Robotique du Centre de Développement des Technologies Avancées, et le département de Génie Mécanique de l'École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, sous la direction de Monsieur le Professeur Mohamed BOUAZIZ. Je tiens à le remercier chaleureusement pour sa disponibilité, ses encouragements, ses conseils et ses directives rigoureuses pour mener à bien ce travail à son terme. Je remercie aussi le Chef d'équipe CFAO, Monsieur Mohamed BEY, de m'avoir impliqué dans sa thématique de recherche.

Je tiens aussi à remercier Monsieur le Professeur Said RECHAK de l'ENP de m'avoir honoré d'accepter de présider le jury de soutenance. Je remercie également les membres de jury, Monsieur Yacine BELKACEMI, Maître de Conférences à l'ENP, Monsieur Nasreddine AMOURA, Maître de Conférences à l'Université de Médéa, Monsieur Nasreddine ZIROUDI, Maître de Conférences à l'École Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri (Alger) et Monsieur le Professeur Taha CHETTIBI à l'Université Said Dahleb de Blida, qui ont bien voulu examiner ce travail.

Un remerciement particulier à mes collègues Sara BOURAINE, Fethi REMLI, Zahida TCHANTCHAN et Nadjat HAMDAOUI pour leurs aides et leurs soutiens.

Je n'oublie pas de remercier tous mes amis pour leur soutien et leur sympathie. Je remercie aussi toute personne m'ayant apporté son aide, ne serait-ce qu'un minimum.

Enfin, je ne remercierai jamais assez ma chère famille qui m'a accompagné et encouragé depuis toujours et qui m'a soutenu particulièrement tout au long de ce travail.

ملخص:

الغرض من هذه الأطروحة هو دراسة الطوبوغرافيا ثلاثية الأبعاد للأسطح الحرة المشكّلة على آلات خماسية المحاور. تم إجراء الدراسة وفقاً لمحورين بحث. الأول يتعلق بتطوير تطبيقات البرمجيات وتحسين التقنيات المستخدمة في هذه التطبيقات. تم تخصيص تطبيق البرنامج الذي تم تطويره للتنبؤ بالطوبوغرافيا ثلاثية الأبعاد للأسطح الحرة في المرحلة النهائية للصنع التي يتم تشكيلها بواسطة أدوات نصف كروية. تعتمد الدراسة على المحاكاة الهندسية لإزالة المواد على النطاق العياني. والثاني مخصص لتوصيف حالة السطح ثلاثي الأبعاد من سحابة نقطية وفقاً لمعيار 2-25178 لعام 2012. وتأخذ الدراسة في الاعتبار مشكلة القطع الميكانيكية ذات الشكل الحر. يتم وصف هندسة هذه الأجزاء بنماذج مستمرة أو منفصلة. إن استخدام النماذج المنفصلة (نقطة ، خط ، سطح ، حجم) سهل التنفيذ مقارنة بالنماذج المستمرة ولكنه يتطلب معطيات كثيفة لتمثيل الأشكال النظرية بأمانة. ولكن في هذه الحالة، يزيد وقت المعالجة. لحل هذه المشكلة تم اقتراح نهج يتكون من تجميع مراكز العناصر الهندسية (مقاطع، مثلثات) في مجموعات بواسطة طريقة تصنيف K-Means. يتم تقديم هذا لأول مرة في CAD / CAM. حلت مشكلة تهيئة المجموعة التي وجدناها في هذه الطريقة من خلال "Fast Global K-Means". أعطت المقارنة مع الطريقة الكلاسيكية للتصنيف "الخلية" نتائج مثيرة للاهتمام والتي جعلت من الممكن إظهار فعالية الدراسة التي تم إجراؤها لتحسين جودة التقسيم أو مدة الحساب. بالإضافة إلى ذلك يمكن توحيد الطريقة المستخدمة لأي نوع من البرامج التي تتعامل مع نماذج هندسية منفصلة (شبكة).

الكلمات الرئيسية: تصنيع خماسي المحاور ، السطح الحر ، أداة نصف كروية ، خشونة السطح 2D-3D ، STL ، Dexe ، K-Means ،

Abstract :

The purpose of this thesis is to study the 3D topography of free surfaces machined on 5-axis machines. The study is conducted along two lines of research: The first relates to the development of software applications and the optimization of the techniques used in these applications. The developed software application is dedicated to the prediction of the 3D topography of free surfaces in the finishing phase machined by hemispherical tools. The study is based on the geometric simulation of material removal at the macroscopic scale. The second is devoted to the 3D roughness characterization from a points cloud according to the 25178-2 standard of 2012. The study takes into account the problem of the mechanical parts complexity with free shape. Continuous or discrete models describe the geometry of these parts. The use of discrete models (point, linear, surface, volume) is simple to implement compared to continuous models, but requires dense discretization to faithfully represent the theoretical forms. However, in this case, the processing time increases. To remedy this problem, an approach is proposed consisting of grouping the geometric elements centers (segments, triangles) into clusters by the K-Means classification method. This is introduced for the first time at CAD/CAM. The cluster initialization problem encountered in this method is solved by the "Fast Global K-Means" method. The comparison with the classic method of "cell" classification gave interesting results that made it possible to show the effectiveness of the study carried out for the improvement of the quality of partitioning or the calculation time. In addition, the method used can be standardized to any type of software dealing with discrete geometric models (mesh).

Keywords: 5-axis machining, Free surface, Hemispherical tool, 2D-3D surface roughness, K-Means, STL, Dixel.

Résumé :

L'objet de cette thèse est d'étudier la topographie 3D des surfaces gauches usinées sur des machines 5 axes. L'étude est menée suivant deux axes de recherche. Le premier porte sur le développement des applications logicielles et l'optimisation des techniques utilisées dans ces applications. L'application logicielle développée est dédiée à la prédiction de la topographie 3D des surfaces gauches en phase de finition usinées par des outils hémisphériques. L'étude est basée sur la simulation géométrique d'enlèvement de matière à l'échelle macroscopique. Le deuxième est consacrée à la caractérisation de l'état de surface 3D à partir d'un nuage de points selon la norme 25178-2 de 2012. L'étude prend en compte le problème de la complexité des pièces mécaniques de forme gauche. La géométrie de ces pièces est décrite par des modèles continus ou discrets. L'utilisation de modèles discrets (ponctuel, linéaire, surfacique, volumique) est simple à mettre en œuvre par rapport aux modèles continus, mais nécessite une discrétisation dense pour représenter fidèlement les formes théoriques. Mais, dans ce cas, le temps de traitement augmente. Pour pallier à cette difficulté, une approche est proposée consistant à regrouper les centres des éléments géométriques (segments, triangles) en clusters par la méthode de classification K-Means. Celle-ci est introduite pour la première fois à la CFAO. Le problème d'initialisation des clusters rencontré dans cette méthode est résolu par la méthode « Fast Global K-Means ». La comparaison à la méthode classique de classification « cellule » a donné des résultats intéressants qui ont permis de faire apparaître l'efficacité de l'étude menée pour l'amélioration de la qualité de partitionnement ou le temps de calcul. En outre, la méthode utilisée peut être standardisée à tout type de logiciel traitant des modèles géométriques discrets (maillage).

Mots-clés : Usinage 5 axes, Surface gauche, Outil hémisphérique, Etat de surface 2D-3D, K-Means, STL, Dixel.

TABLE DES MATIERES

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Liste des Abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....15

Chapitre 1 : Revue bibliographique et situation du problème

1.1	Introduction	21
1.2	Généralités	21
1.2.1	Définition fonctionnelle des formes gauches [Duc 1998]	21
1.2.2	Machine multiaxes à commande numérique.....	24
1.2.3	Processus d'élaboration des pièces complexes en usinage 5 axes	26
1.2.4	Méthode de conception des surfaces gauche en CFAO	29
1.2.5	Génération de trajectoire d'outil en usinage 5 axes	31
1.2.6	Typologie de surfaces	37
1.3	Problématique liée aux défauts de fabrication.....	39
1.3.1	Identification des défauts	41
1.3.2	Analyse des défauts d'usinage	43
1.3.3	Ecart de FAO	45
1.4	Problématique liée à la quantification des défauts de fabrication	51
1.4.1	Caractérisation de la topographie de surface	51
1.4.2	Prédiction de la topographie de surface	53
1.5	Synthèse de la problématique et objectif du travail.....	55
1.5.1	Synthèse	55
1.5.2	Objectif	56
1.6	Conclusion	56

Chapitre 2 : Outils de quantification des défauts de fabrication

2.1	Introduction	58
2.2	Description de la topographie de surface.....	58
2.2.1	Spécification de l'état de surface.....	58
2.2.2	Caractéristiques de l'état de surface	60

2.2.3 Paramètres de l'état de surface	63
2.3 Méthodes de mesure des états de surface en métrologie dimensionnelle.....	71
2.3.1 Méthodes mécaniques [Raphet 2005].....	71
2.3.2 Méthodes optiques [Raphet 2005].....	75
2.4 Prédiction de la topographie de surface.....	78
2.4.1 Simulation d'usinage	78
2.4.2 Choix de la technique adoptée pour la représentation de la pièce à usiner	85
2.3 Conclusion	88

Chapitre 3 : Prédiction de la topographie 3D des Surfaces gauches par la simulation d'enlèvement de matière

3.1 Introduction	90
3.2 Problématique et contributions.....	90
3.3 Objectif.....	91
3.4 Approche de résolution.....	91
3.4.1 Génération du modèle TD	93
3.4.2 Simulation d'enlèvement de matière.....	99
3.5 Implémentation et validation	105
3.5.1 Implémentation et exécution.....	105
3.5.2 Test et validation	109
3.5.3 Résultats et discussion	110
3.6 Conclusion.....	116

Chapitre 4 : Analyse de l'état de surface 3D

4.1 Introduction	118
4.2 Problématique.....	118
4.2.1 Problématique liée à la caractérisation de l'état de surface tridimensionnelle	118
4.2.2 Problématique liée au système de numérisation	121
4.3 Objectif.....	124
4.4 Démarche de résolution	124
4.4.1 Partie expérimentale.....	124
4.4.2 Partie théorique	126

4.4.3	Algorithme et démarche de travail.....	127
4.4.4	Programme Matlab.....	128
4.5	Résultats & Discussion.....	129
4.5.1	Caractérisation de la rugosité 2D et 3D de surface plane	130
4.5.2	Caractérisation de la rugosité 3D de surface cylindrique.....	131
4.5.3	Caractérisation de la rugosité 3D de surface gauche	136
4.5.6	Test et résultats.....	138
4.6	Conclusion.....	140

CONCLUSION GENERALE.....142

REFERENCES.....145

ANNEXES :

Annexe1	: Algorithmes des méthodes K-Means.....	152
Annexe2	: Algorithme d'intersection Triangle-droite.....	155
Annexe3	: Algorithme de création des Dexels.....	156
Annexe4	: Algorithme de calcul de chevauchement sphère-cellule.....	157
Annexe5	: Algorithme d'intersection segment sphère.....	158
Annexe6	: Surface optimale et calcul des écarts.....	159

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Pièces de formes complexes [Prevost 2011]	21
Figure 1.2	Usinage 5 axes de surface gauche	21
Figure 1.3	Exemples d'associations à une définition fonctionnelle d'une forme	22
Figure 1.4	Parties de MOCN	24
Figure 1.5	Orientation des axes d'une machine	24
Figure 1.6	Usinage à trois axes et l'usinage à cinq axes	25
Figure 1.7	Répartition des axes rotatifs sur des fraiseuses à 5 axes	26
Figure 1.8	Processus d'élaboration complet [Tournier 2001]	26
Figure 1.9	Flux d'information sur le système de CAO-FAO	28
Figure 1.10	Méthodes de conception des surfaces en CAO	29
Figure 1.11	Opérations d'usinage	32
Figure 1.12	Différents types d'outils	33
Figure 1.13	Inclinaison de l'axe de l'outil hémisphérique	33
Figure 1.14	Calcul par construction de surface décalée (surface offset)	36
Figure 1.15	Discrétisation polyédrique de la surface	36
Figure 1.16	Surfaces de références en fraisage [Choi et Jerard 1998]	37
Figure 1.17	Classification des surfaces [Duc et al 1999]	39
Figure 1.18	Diagramme cause à effet des écarts de reprise [Tichadou 2005]	41
Figure 1.19	Diagramme cause à effet des écarts d'usinage [Tichadou 2005]	42
Figure 1.20	Processus d'élaboration UGV [Prevost 2011]	43
Figure 1.21	Modes de fraisage [Prevost 2011]	45
Figure 1.22	Trajectoire du point de contact CC et point extrémité CL	46
Figure 1.23	Erreur de flèche	47
Figure 1.24	Erreur de crête	47
Figure 1.25	Stratégies isoparamétriques [Azzam 2015]	48
Figure 1.26	Usinage en One-Way et zig-zig	49
Figure 1.27	Usinages en concentrique	49
Figure 1.28	Stratégie d'usinage « plans parallèles » [Azzam 2015]	49
Figure 1.29	Stratégie d'usinage Z-Constant	50
Figure 1.30	Stratégie d'usinage Gradient	50
Figure 1.31	Termes d'état de surface [Sarazin 2010]	52

Figure 1.32	Ordres de défauts [DIN4760-82]	53
Figure 1.33	Problèmes lié à la topographie de surface usinée sur machine 5axe	55
Figure 2.1	Indication de l'état de surface sur un dessin technique	59
Figure 2.2	Parties de la norme [Blateyron 2006]	60
Figure 2.3	Défauts géométrique	61
Figure 2.4	Profil brut	61
Figure 2.5	Longueurs d'évaluation et de base [Bouchareine 1999]	62
Figure 2.6	Ligne enveloppe supérieure et ligne moyenne [Bouchareine 1999]	62
Figure 2.7	Profondeur moyenne et pas moyen d'ondulation	63
Figure 2.8	Profondeur moyenne et pas moyen de rugosité	64
Figure 2.9	Écart moyen arithmétique du profil	65
Figure 2.10	Hauteur maximale du profil	65
Figure 2.11	Représentation de paramètre d'état de surface R_p	66
Figure 2.12	Représentation de paramètre d'état de surface R_v	66
Figure 2.13	Hauteur des irrégularités sur 10 points	67
Figure 2.14	Taux de longueur portante	68
Figure 2.15	Représentation de la moyenne arithmétique S_a	68
Figure 2.16	Représentation de la moyenne quadratique S_q	69
Figure 2.17	Représentation graphique de S_p	70
Figure 2.18	Représentation graphique de S_v	70
Figure 2.19	Représentation graphique de S_z	71
Figure 2.20	Représentation schématique d'un appareil à palpeur [Raphet 2005]	72
Figure 2.21	Déplacement de la pointe du palpeur (effet du rayon de courbure) [Raphet 2005]	73
Figure 2.22	Machine de Mesure Tridimensionnel	74
Figure 2.23	Tête d'un palpeur dynamique [Raphet 2005]	75
Figure 2.24	Méthodes par profilométrie laser [Raphet 2005]	75
Figure 2.25	Principe de mesure interférométrique [Raphet 2005]	76
Figure 2.26	Schématization d'un Microscope à effet tunnel [Raphet 2005]	77
Figure 2.27	Schéma de fonctionnement d'un microscope à force atomique [Raphet 2005]	77
Figure 2.28	Classification des méthodes de simulation d'usinage [Bouhadja et Bey 2014]	79
Figure 2.29	Méthode Z-map [Yun et al. 2002]	80
Figure 2.30	Orientation des vecteurs [Zhang et al. 2011].	81
Figure 2.31	Modèle Graftree [Kawashima et al. 1991].	82

Figure 2.32	Simulation à base espace image [Karunakaran et al. 2010]	82
Figure 2.33	Deux modèles géométriques possibles pour une pièce avec un trou	83
Figure 2.34	Représentation des voxels et des dexels [Assouline 2005]	83
Figure 2.35	Représentations du modèle triple-nailboard [Weinert et Zabel 2004]	83
Figure 2.36	Décomposition de l'outil en outil élémentaires [Assouline 2005]	84
Figure 2.37	Représentation de l'enveloppe du volume balayé par l'outil conique (a), (b) et (c) en 03 axes. (d), (e) et (f) en 05 axes [Lee et Nestler 2012]	84
Figure 2.38	Model Voxels	85
Figure 2.39	représentation d'un dexel sur le plan XY	85
Figure 2.40	Représentation en Dexel et en Triple-Dexel [Peng et Zhang 2009].	86
Figure 2.41	Comparaison entre les données en simple-Dexel et en Triple-Dexel [Zhang et Leu 2009]	86
Figure 2.42	Représentation du simple Dexel dans chaque plan [Bouhadja et al. 2016].	87
Figure 2.43	Représentation du modèles Triple-Dexel [Bouhadja et al. 2016].	87
Figure 3.1	Architecture générale de l'application développée	92
Figure 3.2	Modèle STL	93
Figure 3.3	Paramètres et structuration du modèle STL	93
Figure 3.4	Classification par cellule	94
Figure 3.5	Paramètres de classification des triangles par K-Means.	95
Figure 3.6	Classification par K-Means.	96
Figure 3.7	Création des grilles de cellules sur les trois plans	97
Figure 3.8	Création de grilles de cellules dans le plan XY	97
Figure 3.9	Intersection de la ligne passant par P et Q contre le triangle ABC.	97
Figure 3.10	Intersection Droites/STL.	98
Figure 3.11	Génération du modèle Triple-Dexel	99
Figure 3.12	Ajout d'une surépaisseur.	99
Figure 3.13	Homogénéisation des segments.	100
Figure 3.14	Classification des segments	100
Figure 3.15	Trajet d'outil (CE)	101
Figure 3.16	Outil hémisphérique tangent à la surface [Lavernhe 2006]	101
Figure 3.17	différents cas de chevauchement sphère clusters (cellules).	102
Figure 3.18	Différents cas d'intersection rayon-sphère.	103
Figure 3.19	Ecarts obtenus après simulation.	104
Figure 3.20	Tolérance d'usinage.	104

Figure 3.21	Fenêtre principale.	106
Figure 3.22	Fonctionnalités de la fenêtre "modèle STL"	107
Figure 3.23	Classification par cellules	107
Figure 3.24	Classification par K-Means	108
Figure 3.25	Fonctionnalités de la fenêtre "État de surface"	108
Figure 3.26	Modèle STL de la pièce testée	109
Figure 3.27	Influence de la profondeur de passe sur la qualité de surface	110
Figure 3.28	Erreur de crête.	111
Figure 3.29	Test de Génération du modèle TD.	111
Figure 3.30	Test de prédiction de l'état de surface.	112
Figure 3.31	Comparaison de la qualité de clustering.	114
Figure 3.32	Comparaison de temps de calcul de la simulation.	115
Figure.4.1	Représentation de la texture	120
Figure 4.2	Représentation de l'état de surface 3D d'une pièce	121
Figure 4.3	Principaux constituants d'un système de numérisation	122
Figure 4.4	Sources d'imprécision	122
Figure 4.5	Caractéristiques des données numérisées.	123
Figure 4.6	Bras de mesure ROMER Absolute Arm	125
Figure 4.7	Pièces mesurées	125
Figure 4.8	Interface de l'application curve fitting	126
Figure 4.9	Représentation de l'état de surface 2D	130
Figure 4.10	Représentation du niveau de coupe	131
Figure 4.11	Représentation des différents niveaux de coupe sur la surface	131
Figure 4.12	Représentation de la courbe du taux de longueur portante	131
Figure 4.13	Représentation de l'état de surface 3D d'un plan	132
Figure 4.14	Paramètres de la rugosité 3D de surfaces planes avec et sans revêtement	133
Figure 4.15	Pièces cylindriques	134
Figure 4.16	Nuage de points des pièces cylindriques	134
Figure 4.17	Nuage de points et les surfaces cylindriques optimisées	135
Figure 4.18	Nuage de points de l'ailette	136
Figure 4.19	État de surface des deux faces	137
Figure 4.20	Densité de points pour chaque cluster	139
Figure 4.21	Temps de calcul de la reconstruction de surface pour chaque partition	140

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 :	Surfaces basées sur l'utilisation des courbes	30
Tableau 1.2 :	Défauts influents sur la qualité géométrique et la productivité [Lavernhe2006]	40
Tableau 1.3 :	Défauts sur la qualité géométrique, causes et paramètres influents [Lavernhe2006]	44
Tableau 1.4 :	Paramètres de surface [Lavernhe et al. 2010]	52
Tableau 2.1 :	Comparaison des différents modèles 3D	88
Tableau 3.1 :	Outils matériels et logiciels utilisés dans l'implémentation	105
Tableau 3.2 :	Comparaison de temps d'exécution lors des générations d'un modèle Triple-Dexel	113
Tableau 4.1 :	Algorithme de résolution	127
Tableau 4.2 :	Présentation graphique des étapes de l'application développée	129
Tableau 4.3 :	Paramètres de la rugosité 2D d'une surface plane.	130
Tableau 4.4 :	Paramètres de la rugosité 3D d'une surface plane	133
Tableau 4.5 :	Résultats des paramètres de l'état de surface 3D de surfaces planes avec et sans revêtement	133
Tableau 4.6 :	Résultats des paramètres de l'état de surface 3D des deux cylindres	135
Tableau 4.7 :	Caractérisation de la rugosité 3D de surface d'une ailette	137
Tableau 4.8 :	Qualité de partitionnement [Tchantchane et al 2022]	139

LISTE DES ABREVIATIONS

GPS	G eometrical P roducts S pecification
ISO	I nternational S tandardization O rganization
CEM	C oncept E uropéen M écanique
CFAO	C onception et F abrication A ssistées par O rdinateur
MRS	M aterial R emoval S imulation
STL	S tandard T riangle L anguage (S tandard T essellation L anguage)
IGES	I nitial G raphics E xchange S pecification
VRML	V irtual R eality M odeling L anguage
DWG	D rawing
DXF	D rawing eX change F ormat
STEP	S Tandard for the E xchange of P roduct model data
LES	L igne E nveloppe S upérieure
UGV	U sinage à G rande V itesse
CAM	C omputer A ided M anufacturing
CL	C utter L ocation files
CE	C Entre d'outil
BK	B asic K -Means
FGK	F ast G lobal K -Means
IK	I ncrémentale K -Means
Cells	C ellules

Introduction générale

1. Introduction générale

1.1 Contexte

Toute machine est composée d'un ensemble de pièces mécaniques caractérisées par leurs géométries et leurs matériaux adéquats fiables répondant aux exigences des conditions de service. La compétitivité de la fabrication de ces pièces en termes de productivité et de qualité est maintenue grâce à l'évolution permanente des machines-outils à commande numérique (CNC) et des logiciels de Conception et de Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO).

De nos jours, une forte demande sur les produits de qualité est en pleine émergence, notamment dans les secteurs économiques stratégiques tels que : automobile, aéronautique, énergie, appareillage, etc. La concurrence conduit à l'élaboration de produits au design toujours plus complexes et de meilleure qualité. Ces produits allient à la fois esthétique et fonctionnalité. Les pièces mécaniques de formes complexes, qui sont souvent définies par un ensemble de surfaces gauches, sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de surfaces concaves, convexes ou à double courbure. La fabrication de ces surfaces se fait par le procédé d'enlèvement de matière. Les concepteurs sont confrontés à un double challenge : réaliser des surfaces à topologie complexe avec une qualité élevée en un minimum de temps. Malgré l'évolution rapide de la technologie et de la disponibilité des moyens de production mis en œuvre, ils existent des problématiques qui restent encore posés que ce soit au niveau développement qu'au niveau recherche.

Dans cet ordre d'idées et dans le cadre du programme de recherche « production mécanique avancée » piloté par l'équipe CFAO de la division productique et robotique de CDTA, ce sujet de thèse a été proposé, où s'est envisagé de mener des actions de recherche et de développement dans le domaine de fabrication des surfaces gauches par enlèvement de matière en portant sur le triptyque indispensable en usinage : pièce, outil et machine-outil.

En mécanique, la surface d'un solide est habituellement caractérisée par une structure et des propriétés qui diffèrent de l'intérieur du matériau, elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que l'aptitude aux frottements, la résistance à l'usure ou à la corrosion, la conduction thermique ou électrique, la résistance aux contraintes mécaniques et l'étanchéités statique ou dynamiques...etc.

Les divers procédés d'usinages (rabotage, tournage, fraisage, rectification, rodage, super finition, etc.) laissent tous à des degrés plus ou moins importants, subsister des défauts d'état de surface sur les pièces. Les surfaces industrielles produites par des moyens techniques présentent toujours des irrégularités par rapport à la surface idéale. Pour le décrire en toute rigueur, il faudrait utiliser une fonction continue $z(x, y)$ donnant l'altitude de chaque point par rapport à la surface idéale.

Les problèmes relatifs à la géométrie des surfaces se posent à trois niveaux :

- la conception : quel état de surface convient à la fonction à assurer et comment doit-on le spécifier sur un dessin technique ?
- la réalisation de la surface : quels moyens mettre en œuvre pour obtenir l'état de surface souhaité ?
- la mesure de la surface : quels moyens et quelles conditions de mesure pour vérifier que la surface correspond aux spécifications ?

La maîtrise de la géométrie des surfaces gauches usinées dans un contexte fraisage 5 axes à grande vitesse est associée à un ensemble d'éléments intervenants influent directement sur l'obtention de la qualité géométrique de la pièce usinée.

1.2 Objectif

Ce travail est une suite des travaux réalisés au niveau de l'équipe CFAO. Il se focalise sur l'étude de la topographie des surfaces gauches usinées sur des machines 5 axes, dont l'objectif est, d'une part, la caractérisation et l'analyse de la topographie de l'intégralité ou d'une portion de surface (3D) pour définir son relief, sa texture et ses défauts de surface, et d'autre part, l'étude de l'influence des paramètres d'usinage sur la qualité des surfaces et la sélection des paramètres appropriés conduisant à obtenir un meilleur état de surface pour éviter l'opération de superfinition afin de réduire les coûts de fabrication.

Concernant le premier enjeu, la définition de paramètres tenant compte de la nature 3D de la rugosité de surface est devenue nécessaire. Un projet normalisé [ISO 25178-2 : 2007] propose des paramètres tels qu'une extension 3D des paramètres 2D classiques, avec une définition similaire à ceux définis par la norme [ISO 12085: 1996]. Parmi ces paramètres, 12 sont plus souvent utilisés et sont classés en quatre grandes familles : paramètres d'amplitude, paramètres spatiaux, paramètres fonctionnels et paramètres hybrides.

Concernant le deuxième enjeu relatif au cycle de développement d'un nouveau produit qui passe par plusieurs étapes successives à savoir : Design initial, planification de la fabrication, simulation, fabrication, vérification et contrôle. La CFAO fait partie des techniques qui concourent à l'automatisation de la production et elle est un maillon incontournable de la productique du fait de l'intégration des fonctions conception/planification/fabrication dans le processus de production. C'est dans ces deux enjeux que se situent les travaux de cette thèse.

1.3 Problématique

Les pièces mécaniques de formes gauches sont largement utilisées dans diverses industries (emballage, moules, automobile, aéronautique ...etc.). Ces pièces sont usinées, en raison de leurs formes géométriques très complexes, sur des fraiseuses numériques multiaxes à grande vitesse pour l'obtention d'une bonne qualité de surfaces. Dans la pratique, ces pièces ne peuvent pas être fabriquées aux dimensions idéales exigées par le concepteur étant donné les imprécisions inhérentes aux procédés de fabrication. Ces imperfections sont reconnues comme des défauts de fabrication. Elles sont divisées en deux catégories principales : défauts de positionnement et défauts d'usinage.

Les défauts de fabrication dépendent de différentes erreurs qui peuvent provenir de différentes sources. Les études de [Bui 2011] ont identifié et simulé les incertitudes de fabrication en 27 sources d'erreurs dans un processus de fabrication pour les 8 éléments de fabrication suivants : machine-outil, outil de coupe, pièce usinée, conditions de coupe, stratégie d'usinage, montage d'usinage, lubrification et opérateur. Certains travaux ont souligné l'importance de la topographie 3D des surfaces notamment dans les applications d'ingénierie. La métrologie est le moyen adéquat de quantification de ces défauts. Elle se divise en deux catégories, à savoir : préventive (virtuelle) et la métrologie conventionnelle (réelle). Notre contribution s'articule sur ces deux aspects.

✓ **Premier aspect : Prédiction de la topographie 3D des surfaces gauches usinées sur des machines 5 axes**

Les travaux de recherche traitant la prédiction de la topographie 3D des surfaces en fraisage 05-axes considèrent différents paramètres (stratégie d'usinage, forme et dimensions de l'outil, inclinaison de l'outil, avance par dent, profondeur de passe, etc.). Ces travaux sont distingués en approche : empirique, analytique/numérique et simulation d'enlèvement de matière, dont deux catégories d'approches pour la modélisation de l'usinage sont considérées : approches liées à la trajectoire d'outils et approches liées à la modélisation d'enlèvement de matière. Une étude de synthèse recensant et classifiant les différentes approches de simulation d'enlèvement de matière dans le système pièce-outil-machine est présentée dans [Bouhadja et Bey 14]. Ces approches, sont classées selon leurs applications que soit géométrique (vérification de trajet d'outil, collision, etc.) ou physique (prédiction de l'état de surface, effort de coupe, etc.) à différentes échelles (humaine, macroscopique et microscopique).

Contribution 1 : À partir des derniers travaux traitant le cas des défauts d'usinage par la simulation d'enlèvement de matière, trois modèles de représentation géométrique sont envisagés : modèle de la pièce à usiner, modèle du trajet d'outil et modèle du volume balayé par l'outil. Ces modèles peuvent être discrets ou continus. Les modèles discrets sont simples à implémenter relativement aux modèles continus, mais pour une bonne précision, le nombre d'éléments géométrique de discrétisation est très important, ce qui augmente le temps de calcul. Dans nos travaux de thèse, nous avons proposé et implémenté une approche permettant de prédire la topographie 3D des surfaces gauches lors de l'opération de finition (usinage en bout) avec des outils hémisphériques sur des fraiseuses numériques à 05-axes par la prise en compte de plusieurs paramètres (stratégie d'usinage, outil, profondeur de passe...etc.). L'approche est basée sur la simulation d'enlèvement de matière en répondant au compromis précision et temps de calcul. Ses principales étapes sont les suivantes :

- 1) Approximation du modèle de la pièce à usiner par Triple Dexels,
- 2) Traitement des Triple Dexels,
- 3) Regroupement de Dexels en clusters en utilisant les K-Means et les cellules,
- 4) Calcul des intersections entre l'enveloppe de l'outil et les Dexels,
- 5) Mise à jour de Triple Dexels,
- 6) Calcul des paramètres d'état de surface décrits selon la norme ISO 25178-2.

Afin de valider cette approche expérimentalement, et comme nous ne disposons pas d'un appareil de mesure de la rugosité 3D, une méthodologie d'analyse de l'état de surface 3D a été proposée et développée en exploitant un nuage de points acquis via une machine de mesure tridimensionnelle (MMT) et un bras de mesure avec des capteurs laser. À travers ces données, nous avons introduits le deuxième aspect.

✓ **Deuxième aspect : Métrologie dimensionnelle par analyse de l'état de surface 3D**

La métrologie dimensionnelle donne des spécifications sur les états de surfaces pour décrire les irrégularités et les défauts de ces surfaces par rapport à la surface idéale qui en fait, n'existe pas. L'avancement de la métrologie a permis d'automatiser la prise de mesure à travers divers appareils dans le but d'aboutir aux vraies valeurs de la grandeur désirée. La mesure des états de surfaces se fait à travers divers appareils de mesure qui peuvent être divisés en 2 méthodes : la méthode mécanique et la méthode optique. La première méthode est dite méthode avec contact, car elle comporte des appareils à palpeur. La deuxième méthode est dite méthode sans contact, car elle comporte des appareils à laser. Les appareils de mesure sont distingués en rugosimètre

spécialement utilisé pour le calcul de rugosité, ou des systèmes de numérisation, profilomètre, MMT, bras de mesure et aussi toutes sortes de microscopes électroniques et autres.

Les systèmes de numérisation sont composés d'un système d'acquisition de données, d'un système de déplacement et d'un système de traitement des informations acquises. La principale fonction de ces systèmes est d'obtenir une représentation numérique de la géométrie à mesurer sous forme d'un nuage de points, un maillage, ou d'autres types de représentation (imagerie par résonance magnétique ou par tomographie). Le système d'acquisition (ou capteur) permet d'acquérir des données de la surface. Le capteur est généralement un capteur optique comme un capteur laser-plan, ou un capteur à projection de franges. Le système de déplacement (ou porteur) permet de déplacer le capteur et/ou l'objet afin d'avoir une numérisation complète. Le système de traitement est nécessaire à l'obtention de données caractérisant la surface mesurée.

Contribution 2 : Dans nos travaux, nous avons traité la prise de mesure tridimensionnelle sans contact par un bras de mesure et une MMT à capteur laser pour la caractérisation de l'état de surface à partir d'un nuage de points. L'étude est basée sur l'analyse de mesure d'un nuage de points 3D et la sélection des paramètres appropriés dans l'étude et l'analyse de mesure de l'état de surface selon les normes ISO 4287,13565-1 2 et 25178-2 de 2012, afin de déterminer les paramètres de rugosité 2D et 3D de surface de différentes formes.

1.4 Organisation du document

Le document s'articule autour de quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre présente le processus d'élaboration de pièces de forme complexe dans sa globalité. Le processus est analysé à travers trois grandes étapes : la génération de trajectoires en FAO, l'exécution des trajectoires et la réalisation effective en usinage. Pour chaque étape, les phénomènes induisant des écarts ou erreurs sont détaillés menant à définir la problématique et les objectifs du sujet de thèse proposés. Celle-ci concerne l'évaluation de l'importance relative des écarts générés à chaque étape, avec pour objectif la réduction de ces écarts. Une attention plus particulière est portée aux écarts de la FAO. Ce premier chapitre est conclu par la présentation d'une synthèse situant la problématique traitée dans ce document.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, l'accent est mis sur les outils de quantification des défauts de fabrication. Trois volets sont pris en considération, à savoir : le premier volet est la caractérisation de la topographie de surface qui est définie par des paramètres représentant la nature 3D de la rugosité de surface selon la norme ISO 25178-2. Le deuxième volet est lié à la métrologie dimensionnelle où les différentes méthodes de mesure de la topographie 3D des surfaces, les appareils de mesure associés à ces méthodes sont présentés. Le dernier volet est consacré à la présentation des techniques de prédiction de la topographie fondée sur la simulation virtuelle d'enlèvement de matière en usinage 5 axes. Afin de sélectionner une approche appropriée à la problématique définie dans le premier chapitre, une attention particulière est accordée aux méthodes de simulation géométrique à l'échelle macroscopique dans le système pièce-outil-machine. Ce chapitre est conclu par une brève comparaison entre les modèles de représentation volumique des pièces à usiner utilisés dans la simulation du processus d'enlèvement de matière (Dexel, Voxel, Triple-Dexel) afin de justifier le choix de la méthode adoptée.
- ✓ Le troisième chapitre traite les écarts de la FAO pour la prédiction de la topographie 3D des surfaces gauches où l'interaction outil/pièce est considérée. Dans cette étude, la

caractérisation de l'état de surface est virtuelle ce qui a permis de mettre en avant l'importance de la modélisation de la pièce à usiner ayant des surfaces gauches. Pour ce faire, une méthodologie de simulation d'enlèvement de matière en usinage 5 axes en finition est proposée et implémentée. Afin de valider cette méthode, des comparaisons entre la méthode de classification K-Means [Macqueen 1967] que nous avons proposée, appliqué pour la première fois en simulation d'usinage [Bouhadja et al.2019] et la méthode classique de cellules sont effectués, les résultats obtenus sont approuvables. Cependant, notre méthode constitue une originalité.

- ✓ le dernier chapitre est consacré à la caractérisation de la topographie de surface qui est définie par des paramètres représentant la nature 3D de la rugosité de surfaces par une mesure réelle selon la norme ISO 25178-2 est exposée. Dans ce chapitre, les différentes méthodes de mesure de la topographie 3D des surfaces, les appareils de mesure associés à ces méthodes sont présentés. Par suite, nous avons élaboré des mesures par une numérisation des surfaces étudiées à l'aide des instruments existants au niveau du CDTA. Ces mesures ont été traitées et analysées pour différentes formes de surface.

Le travail est terminé naturellement par une conclusion générale résumant les travaux effectués et des annexes où en :

- Annexe 1 : Algorithmes des méthodes K-Means.
- Annexe 2 : Algorithme d'intersection Triangle-droite.
- Annexe 3 : Algorithme de création des Dexels.
- Annexe 4 : Algorithme de calcul de chevauchement sphère-cellule.
- Annexe 5 : Algorithme d'intersection segment-sphère.
- Annexe 6 : Surface optimale et calcul des écarts.

Chapitre 1

Revue bibliographique et
situation du problème

1.1 Introduction

Dans divers domaines d'activités tels que l'aéronautique, l'automobile ou les biens d'équipements, la concurrence conduit à l'élaboration de produits au design toujours plus complexes et de meilleure qualité (Figure 1.1). Ces produits allient à la fois esthétique et fonctionnalité. Les produits de ce genre englobent à titre d'exemples les pièces complexes des structures d'avions, des carrosseries d'automobiles ou encore les coques des appareils électroménagers. Ces surfaces complexes, appelées aussi surfaces gauches, sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de surfaces concaves, convexes ou à double courbure. La fabrication de ces surfaces se fait généralement par le procédé d'enlèvement de matière. Outre la complexité de l'opération d'usinage classique, se basant souvent sur des réalisations existantes servant de modèles de départ, s'ajoute la difficulté de considérer l'ensemble des formes complexes et du design. Les concepteurs sont confrontés à un double challenge, réaliser des surfaces à topologie complexe avec une qualité élevée en un minimum de temps.

Face à ces challenges, la compétitivité de la fabrication de ces pièces est maintenue grâce à l'évolution permanente des machines-outils à commande numérique (CNC) et des logiciels de Conception et de Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO). Cependant, et dans le but de fabriquer un produit de qualité dans un temps réduit, notre étude s'oriente vers le domaine de fabrication des surfaces gauches par enlèvement de matière qui est un domaine très vaste et touche plusieurs niveaux d'études, en portant sur le triptyque indispensable en usinage : pièce, outil et machine-outil.



Figure 1.1 Pièces de formes complexes [Prevost 2011]

1.2 Généralités

Les pièces mécaniques de formes complexes qui sont souvent définies par un ensemble de surfaces gauches sont largement utilisées dans diverses industries (emballage, moules, automobile, aéronautique ...etc.). Le processus d'élaboration de ces pièces fait de plus en plus appel à l'usinage 5 axes à grande vitesse UGV (Figure 1.2). Le choix de la machine 5 axes est lié à leurs formes géométriques très complexes et l'utilisation de l'UGV permet d'augmenter significativement la productivité.



Figure 1.2 Usinage 5 axes de surface gauche

1.2.1 Définition fonctionnelle des formes gauches [Duc 1998]

Parmi toutes les fonctions que l'on peut appliquer à une surface, plusieurs nous paraissent être des fonctions principales applicables à une surface gauche [Chaillie 1997]. Ce sont les fonctions de frottement d'un fluide (aubes de réacteurs), de glissement (matrice d'emboutissage) entre deux pièces en contact avec déplacement, et d'aspect dans le cas d'une surface indépendante sans contrainte (surface de style, maquette, carter d'appareil d'électroménager). Ces trois fonctions sont difficiles à exprimer aussi bien en termes de grandeurs dimensionnelles qu'en termes de tolérances. Déjà le vocabulaire de description d'une forme est peu rigoureux, on dit qu'une forme file, est lisse, voire «smooth», ou bien qu'elle est torturée, brusquée. Ces termes, souvent accompagnés d'un geste de la main, n'indiquent pas toujours la caractéristique que l'on souhaite mettre en valeur ; la tôle ondulée peut être lisse, mais un capot en tôle ondulée n'est pas vraiment satisfaisant. Souvent ce sont plutôt des spécifications sur la courbure, sur les positions de centres de courbure, sur la concavité ou sur les directions de tangente qui sont exprimées. On obtient une spécification plus globale difficile à vérifier par des mesures. Par contre, l'œil de l'expert assure plus simplement le jugement. Citons par exemple le cas de la reconstruction d'un aileron de planche à voile, en vue de changer le matériau de cette pièce. Cette pièce est mesurée au moyen d'une machine à mesurer par coordonnées et on obtient un ensemble de points représentant la forme fonctionnelle. L'étape suivante du processus de réalisation est d'associer une surface à cette définition fonctionnelle. Normalement, cette association est construite en respectant les spécifications géométriques requises. Ici, le besoin se situe au niveau de la forme générale qui ne doit pas perturber l'écoulement et au niveau du bord d'attaque. Pour construire la surface de la pièce, deux approches sont utilisées. La première est basée sur une interpolation simple de ces points, par une seule surface. La seconde approche est basée sur une interpolation dirigée par le constructeur qui tient compte des tangentes aux extrémités et réalise la pièce en plusieurs morceaux (Figure 1.3). La seconde solution présente un bord d'attaque de meilleure qualité et une forme plus tendue. Le choix du constructeur s'oriente donc vers la seconde solution plus satisfaisante. Mais il n'y a pas de moyen de spécifier géométriquement que l'on cherche à obtenir la seconde solution plutôt que la première.

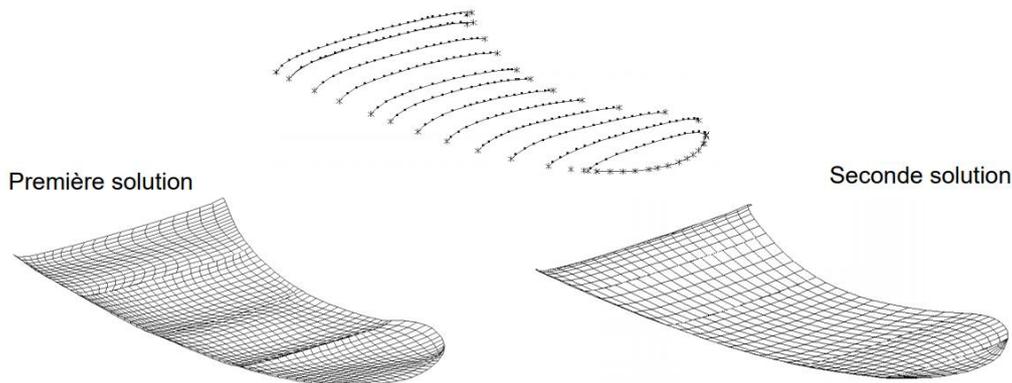


Figure 1.3 Exemples d'associations à une définition fonctionnelle d'une forme

Ainsi, nous constatons que les outils de spécification ne permettent pas de choisir l'une ou l'autre des solutions. Il existe ainsi une différence profonde entre l'expression du besoin, sa spécification géométrique dans le langage du mécanicien et la construction géométrique associée, les différentes méthodes de conception des surfaces gauches sont présentées dans la section 1.2.4.

1.2.1.1 Données géométriques fonctionnelles de la forme

Pour construire une forme, l'ingénieur possède des informations géométriques issues de calculs ou de mesures. Ce sont, par exemple, des points, des courbes, des surfaces. Nous les appelons les données géométriques fonctionnelles. Elles servent de canevas pour la reconstruction de la surface dans l'environnement de CAO. En plus de ces données, l'ingénieur doit prendre en compte des contraintes fonctionnelles de construction, qui ne peuvent pas être exprimées sous forme d'éléments géométriques (points, droites...) d'une base de données CAO. Ce sont par exemple des contraintes de masse, de volume, de surface ou plus particulièrement de direction de tangence et de concavité.

1.2.1.2 Conception de pièces techniques

Dans le cas où la surface assure des fonctions de frottement de fluide ou de glissement, la construction de la forme se fait par communication entre le logiciel de CAO et le logiciel de calcul. Celui-ci assure soit une simulation du comportement mécanique de la forme soit une optimisation de la forme selon des critères mécaniques. Ces calculs de la mécanique des milieux continus sont très exigeants en temps, et il est peu concevable que le résultat du calcul soit directement l'équation de la surface à concevoir. Généralement, l'information est exprimée sous forme d'un maillage, de points de passage, voire de courbes à interpoler. Dans le cas où les données géométriques sont exprimées par des surfaces, il peut se poser un problème de reconstruction du modèle de façon à le rendre exploitable par le logiciel de CFAO.

Ces logiciels ne permettent que le traitement de modèles polynomiaux particuliers et de quelques formes coniques. Toute modélisation à base de fonctions non polynomiales, trigonométriques par exemple, impose une reconstruction.

1.2.1.3 Conception de pièces de style

Dans le cas de la construction de formes de style, la principale technique consiste à mesurer par points une maquette à l'échelle. On obtient alors un nuage de points qu'il faut modéliser par une ou plusieurs surfaces polynomiales [Szalek 1993]. Du fait de l'imprécision de la mesure, les données à interpoler peuvent perturber la modélisation, les formes construites ne sont pas satisfaisantes. Actuellement, cette phase de reconstruction tend à disparaître au bénéfice de la maquette virtuelle, mais souvent même si le designer construit un modèle géométrique sur un logiciel de CAO, la maquette en grandeur nature est encore utilisée au moment des prises de décisions stratégiques.

1.2.1.4 Adaptation des données géométriques à la construction

Ainsi nous constatons que la donnée géométrique fonctionnelle (point, ligne, surface...) est souvent une donnée brute exprimée dans un format difficile à manipuler par la suite, ou sous forme de points. De plus, la description des données géométriques fonctionnelles avec un modèle polynomial particulier associé à un logiciel de CAO peut faire perdre la connaissance d'exigences fonctionnelles implicites. Par exemple, lors du mesurage de l'aileron, la donnée unique du nuage de points ne permet pas d'indiquer que la forme finale doit pouvoir «filer» proprement. Il y a alors existence d'une contrainte fonctionnelle implicite ajoutée, qui est le prolongement par continuité des éléments de surfaces. Les contraintes fonctionnelles ajoutées sont des contraintes que l'on ne peut pas faire apparaître dans le modèle comme des éléments géométriques, ou qui sont issues de raisonnements ou de méthodes heuristiques. Ces spécifications peuvent contraindre la forme dans des zones ayant peu de données géométriques

fonctionnelles ou bien être des critères de choix entre deux solutions d'association. Par exemple, on peut interdire les ondulations sur la forme ou les défauts d'aspect.

1.2.2 Machine multiaxes à commande numérique

Vu la complexité des surfaces gauches, elles doivent être réalisées sur des machines multiaxes à commande numérique. Ce type de machine est composé de deux parties complémentaires (Figure 1.4) :

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

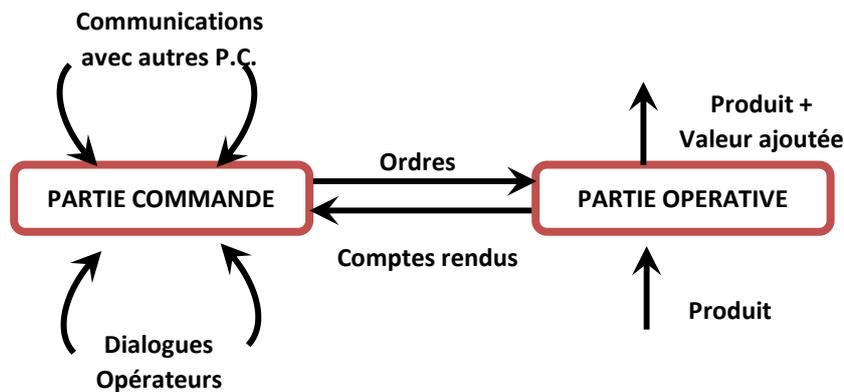


Figure 1.4 Parties de MOCN

1.2.2.1 Axes de déplacement

Un système de coordonnées permet de repérer les positions et les déplacements d'un objet par rapport à un point origine. Un système de coordonnées cartésiennes rectangulaire est un trièdre de sens direct constitué de trois axes linéaires X, Y et Z auxquels sont associés trois axes rotatifs A, B et C. La règle des trois doigts permet de retrouver l'orientation des axes X, Y et Z (Figure 1.5).

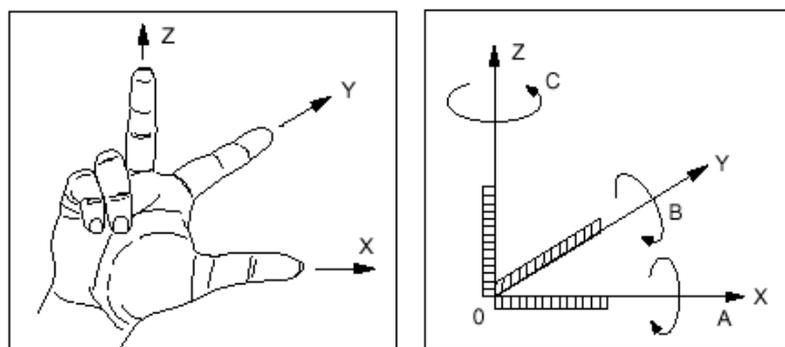


Figure 1.5 Orientations des axes d'une machine

L'orientation des axes d'une machine dépend du type de machine et de la disposition des éléments qui la constituent. Pour une fraiseuse :

- L'axe Z est confondu avec l'axe de la broche principale lorsque celui-ci est parallèle à l'une des glissières. Un déplacement dans le sens Z positif accroît la distance entre la pièce et l'outil.

- L'axe X est perpendiculaire à l'axe Z et correspond au plus grand déplacement.
- L'axe Y forme avec les axes X et Z un trièdre de sens direct.

Chaque axe représente un degré de liberté. Donc, la combinaison des différents axes donne plusieurs types de fraiseuses [Duc 1998]. Les fraiseuses 3, 4 et 5 axes sont menées d'une cinématique comme suit :

- X, Y, Z simultanés.
- X, Y, Z et B (1 rotation) simultanés.
- X, Y, Z et (A et B) ou (A et C) ou (B et C) (2 rotations) simultanés.

1.2.2.2 Fraiseuses 3 axes et 5 axes

Par définition, une fraiseuse à cinq axes offre deux degrés de liberté supplémentaires par rapport à une fraiseuse à trois axes. Ces deux degrés de liberté permettent d'orienter l'axe de l'outil. En usinage à trois axes, pour une surface usinable, il existe une unique position de l'outil tangente à la surface en une position donnée. Par contre, en usinage à cinq axes, il existe une infinité de positions de l'outil tangentes à la surface au point de contact. Ces degrés de liberté supplémentaires rendent le problème sous contraint lors du calcul du trajet d'usinage, mais permettent l'optimisation de l'orientation de l'axe de l'outil en fonction de critères tels que la minimisation des efforts de coupe ou l'augmentation de la zone usinée [Duc 1998] (Figure 1.6).

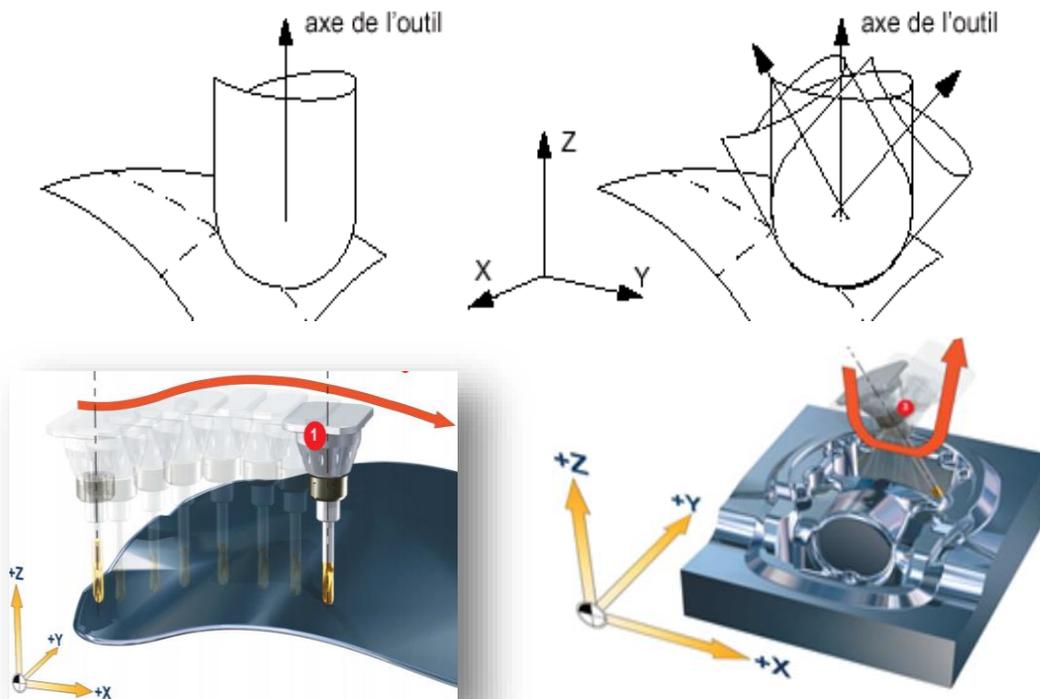


Figure 1.6 Usinage à trois axes et l'usinage à cinq axes

Avec les géométries complexes, comme les cavités profondes, les parois hautes et à fortes pentes et les contre-dépouilles, l'usinage 3 axes n'est pas adapté en raison des collisions sauf avec des rallonges d'outils. L'usinage de ces zones exige de nombreuses positions d'outils dans des zones d'usinage parfaitement délimitées. Ces positions peuvent être atteintes avec l'usinage 5 axes sans collisions. En fonction de la géométrie des pièces à usiner et de la cinématique de

la machine, il est possible de choisir entre l'usinage 5 axes fixes, l'indexage automatique ou un véritable usinage simultané (Figure 1.7).

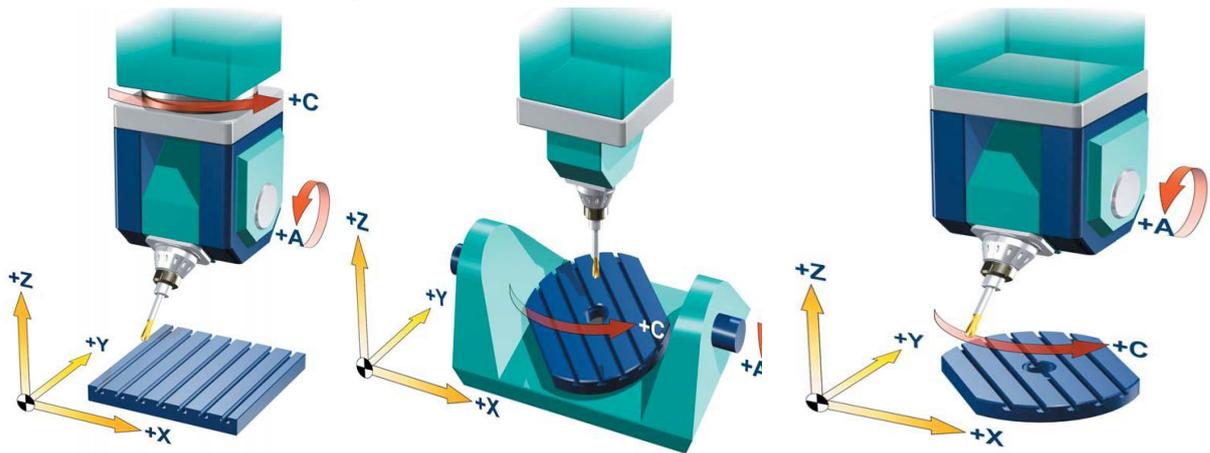


Figure 1.7 Répartition des axes rotatifs sur des fraiseuses à 5 axes

1.2.3 Processus d'élaboration des pièces complexes en usinage 5 axes

Le processus d'élaboration des pièces de forme complexe est formé d'une suite d'activités importantes à savoir : Design initial, planification de la fabrication, simulation, fabrication, vérification et contrôle (Figure 1.8).

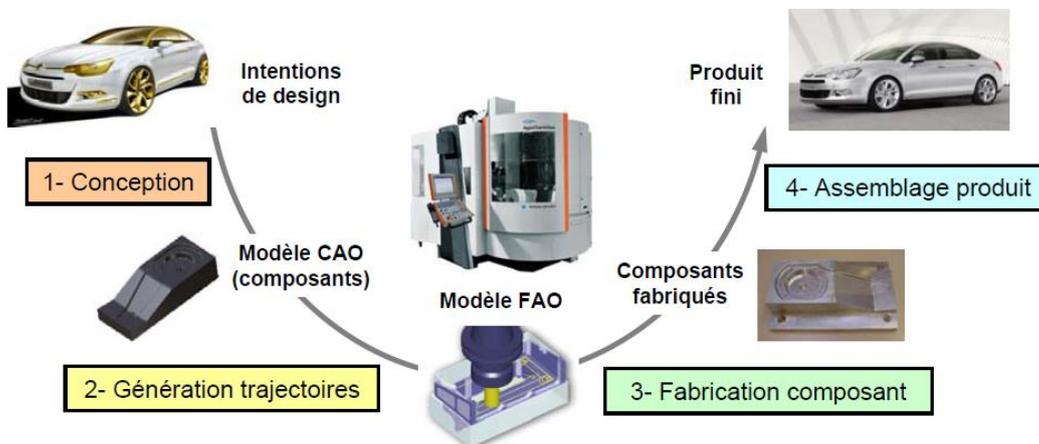


Figure 1.8 Processus d'élaboration complet [Tournier 2001]

1.2.3.1 Processus de CFAO

La CFAO fait partie des techniques qui concourent à l'automatisation de la production et elle est un maillon incontournable de la productique du fait de l'intégration des fonctions conception/planification/fabrication dans le processus de production. L'ensemble de ces fonctions se résument en deux étapes principales ; Construction du modèle géométrique et génération de trajectoires d'outils.

✚ **Construction du modèle géométrique** : cette étape a pour but d'exprimer l'ensemble des contraintes fonctionnelles décrites dans le cahier des charges sous forme de surfaces ou d'éléments géométriques décrits à l'aide d'un système de CAO.

✚ **Génération de trajectoires d'outils** : cette étape est dite de fabrication et a pour but de transformer les éléments géométriques décrits à l'aide de système CAO en une forme réelle qui permet à l'objet de répondre à sa fonction à l'aide de système FAO.

- **Trajectoires en format neutre** : ce sont des trajectoires d'outils exprimées dans un repère lié à la pièce à usiner. Ces trajectoires ne tiennent compte ni de la cinématique de la machine ni de la position de la pièce sur le plateau de la machine. Elles ne sont pas modifiables dans la plupart des cas et seul un programmeur expérimenté peut modifier à ce niveau de la chaîne. Par ailleurs, il est à noter que chaque ligne du programme comporte des informations sur les trajectoires et sur l'attitude de la machine en tout point de la trajectoire. Pour exprimer ces trajectoires dans un repère lié à la machine et dans un langage compréhensible par la commande numérique, un post processeur doit être utilisé. Le format neutre le plus courant est le CL-FILE (Cutter Location -File).
- **Trajectoires en format "machine"** : ce sont les trajectoires exprimées dans un langage compréhensible par la commande numérique. Le langage de programmation ISO (souvent nommé G-Code ou M-Code) est le plus couramment utilisé. Il n'est malheureusement pas neutre et dépend fortement de la machine sur laquelle est réalisé l'usinage. Seules les fonctions de base du langage ISO sont communes à toutes les machines l'utilisant. Ces fonctions sont les lignes droites, les arcs de cercle et quelques fonctions annexes. Ces trajectoires sont modifiables dans la plupart des cas, car le langage de programmation est généralement simple et compact. Le langage ISO comporte deux types d'ordre : les ordres "G" et les ordres "M". Les ordres "G" (comme GO) ont un rapport avec la trajectoire à suivre (avancer, tourner, percer de telle ou telle manière, décaler la trajectoire à droite ou à gauche en fonction du diamètre de la fraise ...etc.). Les ordres "M" s'occupent de tout ce qui n'a pas de rapport direct avec les mouvements de la machine (état de la broche, changement d'outils, fonctions précâblées, arrêt du programme ...etc.).
- **Validation et simulation** : c'est l'étape où est validé le choix de la méthode de calcul des trajectoires d'outils avec la stratégie d'usinage optimale suivi d'une simulation d'usinage afin de détecter des anomalies (problèmes de collisions et d'interférences) et d'autres problèmes concernant le choix des paramètres d'usinage et des conditions opératoires.
- **Post processeur** : c'est un programme qui transforme les trajectoires en format neutre (CL-FILE) en des trajectoires comprises par la machine en prenant en compte la cinématique de la machine, ses courses et ses capacités. Il signale les erreurs et exprime les trajectoires dans le langage spécifique à la machine. Donc, chaque machine possède son propre post processeur.

Enfin, le processus d'enlèvement de matière réalisé par l'outil conduit à la surface finale usinée.

1.2.3.2 Structure générale d'un système de CFAO

En général, il existe deux types de systèmes de CFAO :

- Système de CFAO découplé ou interfacé (Figure 1.9.a).
- Système de CFAO intégré (Figure 1.9.b).

Le premier système montre une organisation linéaire des différentes étapes à franchir depuis la phase conceptuelle jusqu'à la mise en place de l'usinage. Le passage d'une étape à une autre s'effectue à travers une ou plusieurs bases de données. Les fichiers de passage représentent les interfaces entre les différentes étapes sont appelées format d'échange de données tel que les IGES, STL, VRML, DWG, DXF, STEP et autres. Chaque fichier contient les résultats de l'activité précédente avec un enrichissement de la base de données (géométrie pour la CAO, gamme ...etc.). Le deuxième montre une organisation intégrée des modules CAO-FAO dans une même plateforme [Ziroudi 2011].

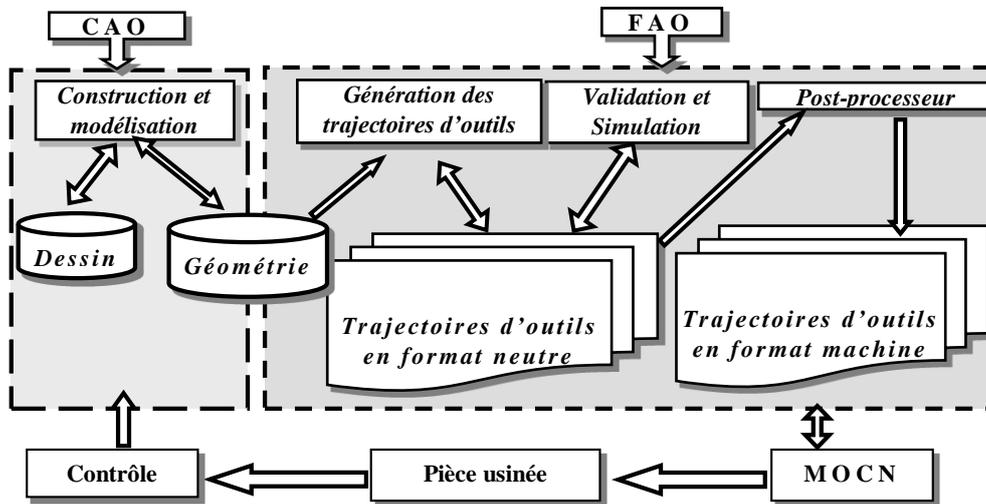


Figure 1.9. a) Flux d'informations sur le système de CAO-FAO découplé [Ziroudi 2011]

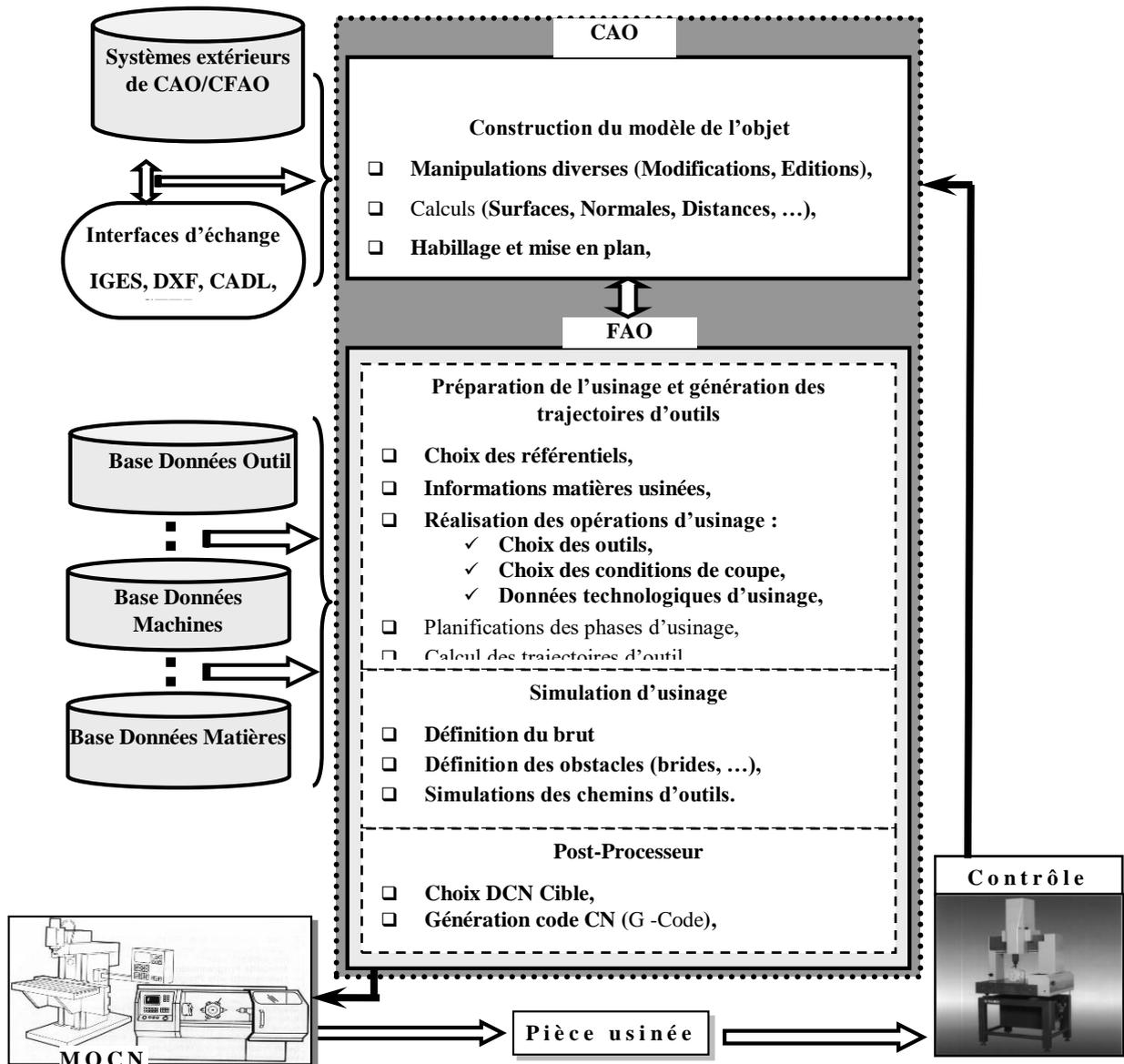


Figure 1.9. b) Flux d'informations sur le système de CFAO intégré [Ziroudi 2006]

Figure 1.9. Flux d'informations sur le système de CAO-FAO

1.2.4 Méthode de conception des surfaces gauche en CFAO

Comme indiqué préalablement, la première étape dans le processus CFAO est la conception des pièces. Ces pièces sont conçues à partir d'une image de la forme que l'ingénieur concepteur veut obtenir. La difficulté dans la conception des pièces de forme complexe réside dans leur modélisation, car elles ne sont pas décrites par des équations analytiques. Donc, il est nécessaire d'avoir un système de conception qui permet de concevoir des formes très complexes sans avoir à donner les équations de ces surfaces. Ces dernières sont appelées « surfaces gauches » ou « surfaces de formes libres ». Les différentes méthodes de représentation des surfaces gauches en CAO ainsi que leurs principales propriétés sont présentées dans l'annexe1.

Les différentes méthodes de conception des surfaces gauches en CAO sont classées en deux grandes classes à savoir : méthodes basées sur l'utilisation des courbes et méthodes basées sur l'utilisation des points (Figure 1.10).

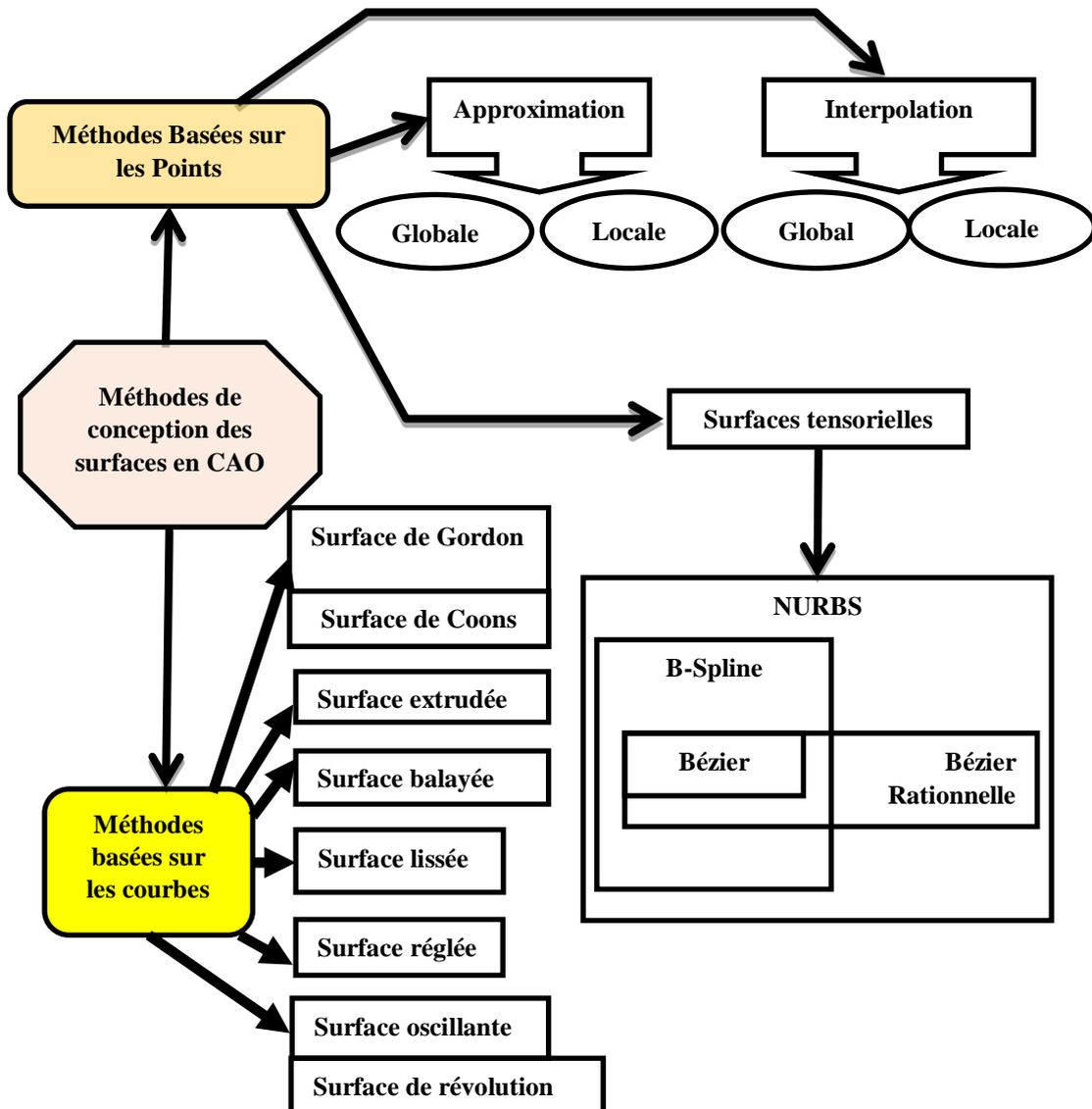
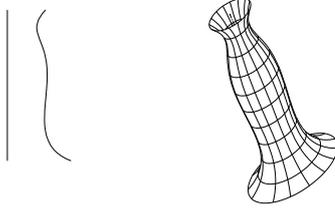
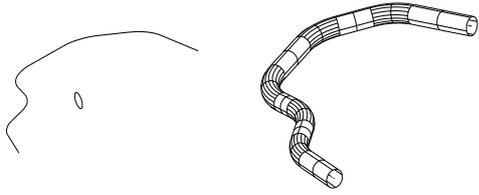
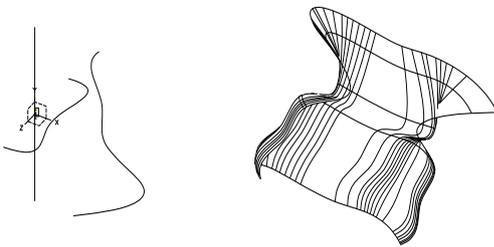
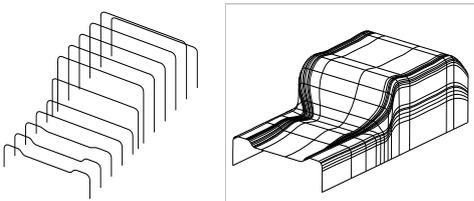
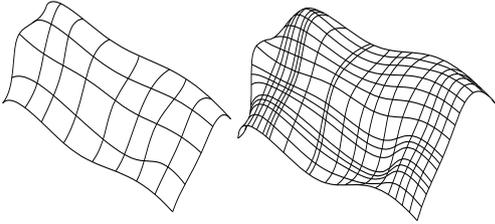
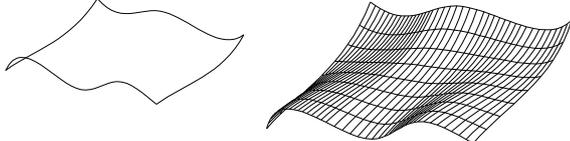


Figure1.10 Méthodes de conception des surfaces en CAO

1.2.4.1 Méthodes basées sur l'utilisation des courbes

Dans ces méthodes, la connaissance de quelques courbes clés permet la détermination de la forme de la surface. Les types de surfaces de cette classe sont illustrés sur le tableau 1.1 [Salomon 2006] [Piegl et Iegl 1995].

Tableau 1.1 Surfaces basées sur l'utilisation des courbes

Surfaces	Figures représentatives
Surface de révolution	
Surface balayée	
Surface oscillante	
Surface lissée	
Surface de Gordon	
Surface de Coons	

1.2.4.2 Méthodes basées sur l'utilisation des points :

Dans ces méthodes, l'information élémentaire est le point. Les types de surfaces de cette classe sont [Piegl et Iegl 1995] [Farin 1992] :

- Interpolation et approximation (globale, locale) d'un nuage de points ;
- Surfaces de Bézier ;
- Surfaces de Bézier Rationnelle ;
- Surfaces B-Spline ;
- Surfaces NURBS.

Le choix de la méthode de conception d'une surface repose sur plusieurs critères :

- La représentation de toutes les surfaces de la même façon ;
- La représentation des surfaces fermées ;
- La modification de la surface en temps réel et d'une manière intuitive ;
- La translation, la rotation, le changement d'échelle, le changement de repère et toutes autres transformations géométriques linéaires n'influent pas sur la méthode de représentation de la surface ;
- Peut satisfaire au maximum les contraintes de design et certaines contraintes de continuités ;
- La moins coûteuse en source informatique et la plus fidèle à la représentation de l'objet ;
- La conception d'une surface ou la modification d'une surface existante est intuitive et flexible.

Étant donné les moyens informatiques disponibles, les formes polynomiales paramétriques représentent la grande majorité dans les systèmes de CFAO. Néanmoins, les schémas de représentation de ces systèmes diffèrent dans la base de polynômes utilisés. Les fonctions de base fréquemment utilisées et pouvant remplir les critères mentionnés précédemment sont celles de : Bézier, Bézier rationnelle, B-Spline (Basic Spline) et NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline). Les B-Spline et les NURBS sont les plus puissantes et les plus présentes en CAO.

1.2.5 Génération de trajectoire d'outil en usinage 5 axes

En usinage, l'enlèvement de matière passe par plusieurs opérations (Figure 1.11) : ébauche, semi-finition, finition, puis éventuellement superfinition (polissage ou autre). Chaque étape se caractérise par des objectifs spécifiques. Pour le travail de finition, les objectifs recherchés sont principalement : La qualité de la surface produite et le temps de réalisation. Pour réussir ces objectifs et éviter l'opération de superfinition afin de réduire les coûts de fabrication, le travail de finition va s'appuyer sur le choix de l'outil et aux techniques d'usinage qui comprennent plusieurs aspects à savoir : un mode de fraisage, une description de la géométrie de la trajectoire et une gestion des entrées et sorties d'outil.

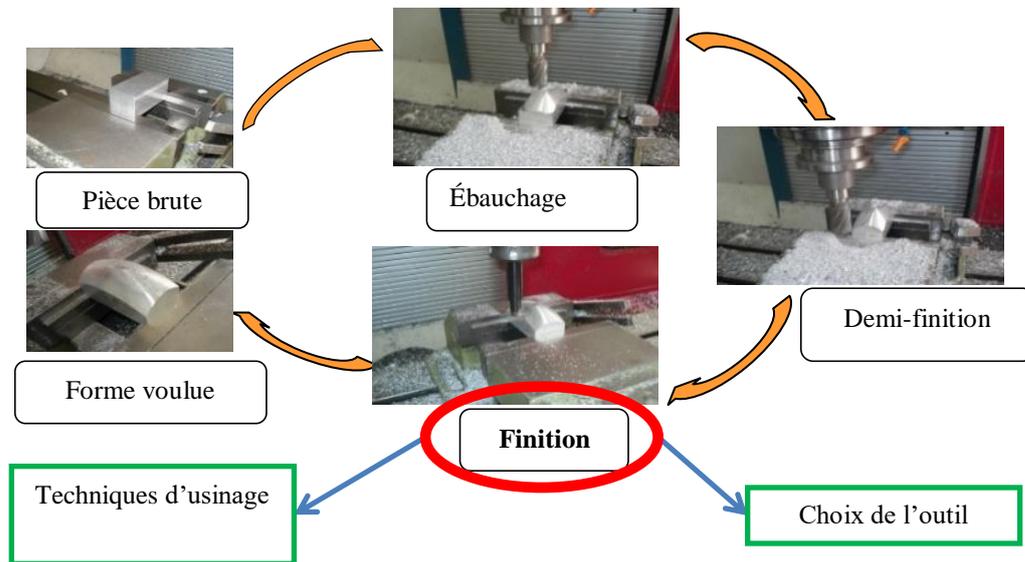


Figure 1.11 Opérations d'usinage

1.2.5.1 Outils utilisés en finition

Contrairement aux autres types d'usinage rencontrés en mécanique générale, il n'existe pas de forme d'outil qui permette l'obtention d'une forme gauche exactement en un seul mouvement élémentaire. Donc, l'obtention de la forme désirée nécessite un enchaînement de déplacements d'outils. Le choix de l'outil est donc le résultat d'un compromis entre :

- La rigidité de l'outil,
- La cinématique de la machine,
- La forme de la pièce à usiner.

Pour générer une forme gauche par un enchaînement de déplacements, il faut une forme d'outil qui soit toujours tangente à la surface. La forme la plus simple est la sphère. Mais, pour garantir l'existence de la tangence et donc d'un unique point de contact sur des zones concaves, il faut que la valeur de son rayon soit plus faible que le plus petit des rayons de courbures principales de la forme. Sinon, il y aura pénétration de la partie active de l'outil dans la forme (problèmes interférences). L'outil hémisphérique est donc la solution pour tous les usinages du type 3 axes (Figure 1.12). Mais, il est nécessaire de conserver des petits rayons pour permettre d'usiner toute la pièce, ce qui diminue la rigidité de l'outil et augmente le nombre de passes nécessaires pour respecter la hauteur de crête exigée. De plus, l'outil hémisphérique possède une vitesse de coupe très faible sur les zones de l'arête de coupe proches de l'axe de rotation (Figure 1.13). Cette vitesse trop faible entraîne un mauvais comportement de la coupe, un mauvais état de surface et une usure importante de l'outil [Duc 1998].

Pour avoir de bonnes conditions d'usinage, deux solutions sont possibles :

- Usinage sur une fraiseuse avec plus de degrés de liberté (4 axes ou 5 axes) ce qui impose un angle α minimum ou constant entre l'axe et la normale \vec{n} à la surface.
- Usinage avec une fraise torique ou cylindrique dont la partie active reste toujours éloignée de l'axe de l'outil.

En finition, les outils toriques et principalement hémisphériques sont les plus utilisés sur les machines-outils à commande numérique 3 axes et plus.

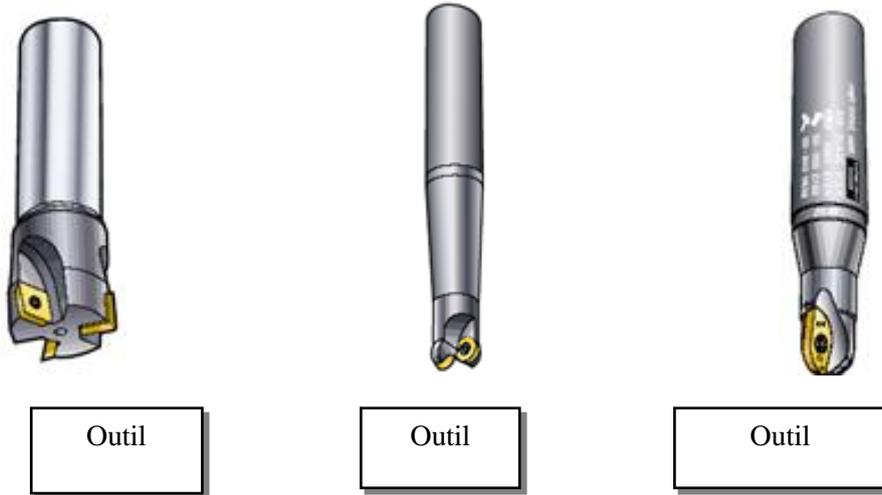


Figure 12 Différents types d'outils

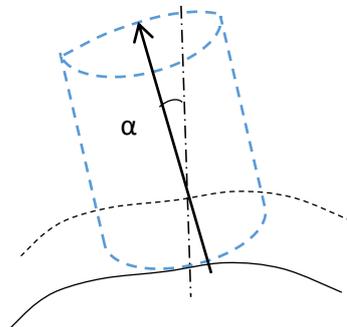


Figure 1.13 Inclinaison de l'axe de l'outil hémisphérique

1.2.5.2 Techniques d'usinage

Les techniques d'usinage comprennent plusieurs aspects à savoir :

a) Modes de fraisage

Il existe deux grandes familles de technique de coupe liée au positionnement de l'outil par rapport à la surface à usiner :

- Fraisage en bout : réalisation des surfaces en ayant un seul point de contact (travail de forme).
- Fraisage en roulant (en flanc) : réalisation des surfaces en ayant une ligne de contact (travail d'enveloppe).

b) Une description de la géométrie de la trajectoire

La trajectoire est calculée par interpolation de l'ensemble des positionnements, elle doit être transformée pour être interprétable par le directeur de commande numérique (DCN). Cette transformation dépend du type de format de description géré par le DCN. Les trajectoires sont programmables en interpolation linéaire, circulaire ou polynomiale [Prevost 2011]. Dans un

travail de synthèse [Lasemi et al. 2010], les auteurs constatent que la génération du programme de réalisation de surface complexe passe par deux étapes très souvent distinctes : génération de trajectoire et choix de l'orientation de l'axe de l'outil. Le choix de la trajectoire conduit à un problème couplé entre le temps d'usinage et la qualité de la surface produite. Le seul critère de l'augmentation de la qualité de la surface conduit à l'accroissement du temps de réalisation. Il faut donc trouver un compromis sur les deux aspects. Le choix de l'orientation d'outil se base sur les mêmes objectifs de temps et de qualité avec en plus la contrainte d'éviter les collisions et interférences [Prat 2014].

c) Une gestion des entrées et sorties d'outil (stratégie d'usinage)

Elle définit la direction d'usinage, le mode de guidage (plans parallèles, isoparamétriques ...) et les paramètres de discrétisation longitudinale et transversale. Cette partie sera détaillée ultérieurement dans la section 1.3.2.3.

1.2.5.3 Méthodes de calcul de la trajectoire d'outil en fraisage en bout

Selon Duc [Duc98] le calcul d'un trajet d'usinage nécessite les informations suivantes :

- une forme à usiner, définie de manière géométrique sous forme d'un modèle surfacique ou solide.
- une géométrie d'outil paramétrée selon les besoins de l'utilisateur.
- une stratégie d'usinage qui caractérise la direction d'usinage et les tolérances d'usinage associées à l'usinage, la direction d'usinage étant souvent donnée par un plan de guidage de l'outil.

Le calcul de la trajectoire est mené en fonction du type d'interpolation, ou plus généralement du format de description des trajectoires. Dans notre travail, le type d'interpolation retenu est l'interpolation linéaire. La stratégie d'usinage contient l'ensemble des données technologiques nécessaires au calcul, alors que la forme à usiner et la géométrie de l'outil contiennent les données géométriques. Au niveau technologique, la trajectoire est obtenue en associant une courbe plane à la surface. Cette courbe est définie par la direction d'usinage. On obtient ainsi une passe d'usinage. En dupliquant la courbe plane et en associant les courbes obtenues à la surface, on obtient un ensemble de passes d'usinage, qu'il faut raccorder pour construire le trajet. Au niveau géométrique, calculer un trajet est une opération qui vise à exprimer le mouvement d'un point fixe de l'outil, le centre ou l'extrémité, de façon à ce que la surface enveloppe du mouvement de l'outil soit confondue avec la surface à usiner aux tolérances d'usinage près. Autrement dit, calculer un trajet d'usinage revient à chercher tous les lieux de passage de l'outil, nécessaires et suffisants, qui permettent d'usiner la forme en respectant les paramètres de précision demandés. Ces lieux de passage appartiennent à une courbe théorique lieu des centres outils. Par conséquent, ce calcul est une opération d'identification d'une courbe théorique sous un format compréhensible par le directeur de commande numérique. Comme dans toute opération d'identification, les fonctions importantes sont l'acquisition d'informations géométriques sur l'identifié et la mesure de la distance relative entre la courbe identifiante et l'identifié. Ainsi, pour résoudre le problème du calcul de la trajectoire d'usinage, il faut donc :

- calculer la position du centre de l'outil en contact sur une zone particulière de la forme ;
- contrôler et gérer les interférences possibles entre l'outil et la surface à usiner, interférences pouvant être dues en particulier à des discontinuités sur la trajectoire ou sur la surface ;
- calculer une passe d'usinage respectant le pas longitudinal. Cette passe est une succession de trajets élémentaires liant deux positions de l'outil, leur ordonnancement en nombre et en position le long de la passe permettant à celle-ci de respecter des critères de précision le long de la trajectoire ;

- calculer le trajet par une accumulation de passes, respectant le pas transversal, positionnées les unes par rapport aux autres de façon à respecter des critères de précision transversalement à la trajectoire.

La résolution de ces quatre problèmes n'est pas nécessairement séquentielle. Des travaux proposent des solutions qui résolvent à la fois deux ou trois problèmes, mais cette séparation nous permet de répartir les méthodes en différentes familles. En particulier, nous avons identifié des méthodes dites directes et indirectes, ainsi que des méthodes explicites et implicites.

Définition 1 : méthode directe de calcul d'une position de l'outil Une méthode est dite directe, si le calcul est mené à partir du modèle géométrique de la surface à usiner.

Définition 2 : méthode indirecte de calcul d'une position de l'outil Une méthode est dite indirecte, si elle impose un maillage de la surface à usiner

Définition 3 : méthode explicite de calcul d'une position de l'outil Une méthode est dite explicite, lorsqu'elle impose la détermination des équations des surfaces et des courbes nécessaires au calcul de la trajectoire.

Définition 4 : méthode implicite de calcul d'une position de l'outil Une méthode est dite implicite, lorsqu'elle est basée sur un échantillonnage des éléments géométriques nécessaires à la construction du trajet.

Il faut remarquer que la différence entre les méthodes explicites et implicites vient du mode de résolution du système d'équations nécessaires au calcul de la position du centre de l'outil. Les méthodes explicites résolvent littéralement le problème, alors que les méthodes implicites le résolvent de manière implicite, c'est à dire discrète.

Détermination par calcul exact des positions de l'outil planifiées ou « Cutter Localisation ». Les différentes méthodes de calcul des trajectoires d'outil peuvent être classées selon le type de modélisation de la pièce à usiner à savoir filaire, surfacique ou volumique [Duc 1998].

Les méthodes traitant des modèles surfaciques peuvent être classées comme suit.

a. Usinage isoparamétrique

Implémentée sur les premiers systèmes de génération automatique de trajectoires d'outils. Cette approche consiste à calculer les points de contact outil/pièce (points C_C) à partir du modèle CAO conformément à la planification de trajectoires adoptée, puis de calculer les points de contrôle (points C_L) lieu géométrique des trajectoires de l'outil. Cette approche est basée sur la notion de distance normale à une surface. Sa mise en œuvre est généralement implémentée grâce à des algorithmes de calculs itératifs sujets à des situations singulières pour lesquelles la convergence n'est pas garantie et donnant lieu à une instabilité numérique.

b. Usinage par décalage ou par « offsetisation »

Cette approche est basée sur le concept de surface décalée (surface offset). En effet, dans le cas de l'usinage avec un outil hémisphérique, les points centres d'outil appartiennent à la surface décalée vers le côté extérieur de la surface d'origine d'une distance égale au rayon R de l'outil (Figure 1.14). De par son fondement, cette approche est limitée au cas des outils hémisphériques puisque la notion de surface offset n'a plus aucun sens dans le cas des autres formes d'outils (cylindriques, toriques ...etc.). De plus, les techniques de calcul et de traitement des surfaces décalées sont assez délicates à mettre en œuvre et ne sont efficaces que sous certaines contraintes quant aux modèles mathématiques utilisés, aux degrés des surfaces et aux formes traitées, ce qui ne répond pas aux critères de performances. En outre, le traitement des interférences pose des problèmes tels que le calcul de courbes d'auto-intersections de surfaces

décalées « offset ». L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'éviter les interférences locales.

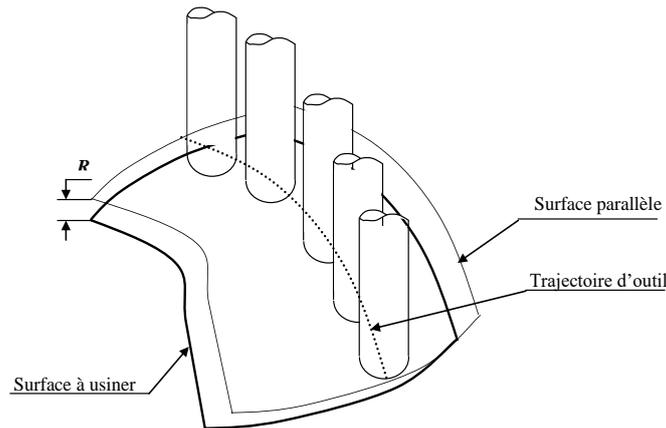


Figure 1.14 Calcul par construction de surface décalée (surface offset)

c. Discrétisation polyédrique

Cette approche permet d'effectuer les calculs à partir du modèle surfacique de l'objet en effectuant une discrétisation polyédrique (triangulation) de ce dernier (Figure 1.15). En plus de la très grande stabilité numérique de cette approche, elle permet aussi une gestion totale des interférences et des collisions.

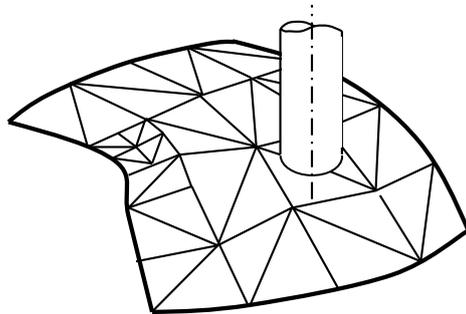


Figure 1.15 Discrétisation polyédrique de la surface

Les principaux avantages de cette approche sont les suivants :

- Facilité de génération du fichier (modèle STL),
- Rapidité d'exécution,
- Utilisation pluridisciplinaire,
- Possibilité d'utiliser la structure générique de données pour des fins algorithmiques,
- Souplesse de réponse aux besoins de développement de toutes sortes d'applications.

Les principaux inconvénients de cette approche sont les suivants :

- Difficulté de modification du fichier STL,
- Taille de données très importantes (fichier volumineux),
- Redondance d'informations (répétition des coordonnées des sommets),
- Approximation de la géométrie de la surface.

Il existe d'autres méthodes de calcul des trajectoires en cours de recherche qui sont basées sur le calcul à partir d'un nuage de points discrets.

1.2.6 Typologie de surfaces

Les auteurs de [Choi et Jerard 1998] ont définis les surfaces utilisées pour la prise d'origine, les surfaces de référence de la pièce pour une étape d'usinage donnée sont (Figure 1.16) :

- Surface initiale avant usinage (brute ou préusinée),
- Surface précédente, ou pré-générée par une trajectoire précédente,
- Surface usinée lors de l'étape,
- Surface nominale à obtenir à la fin de la gamme.

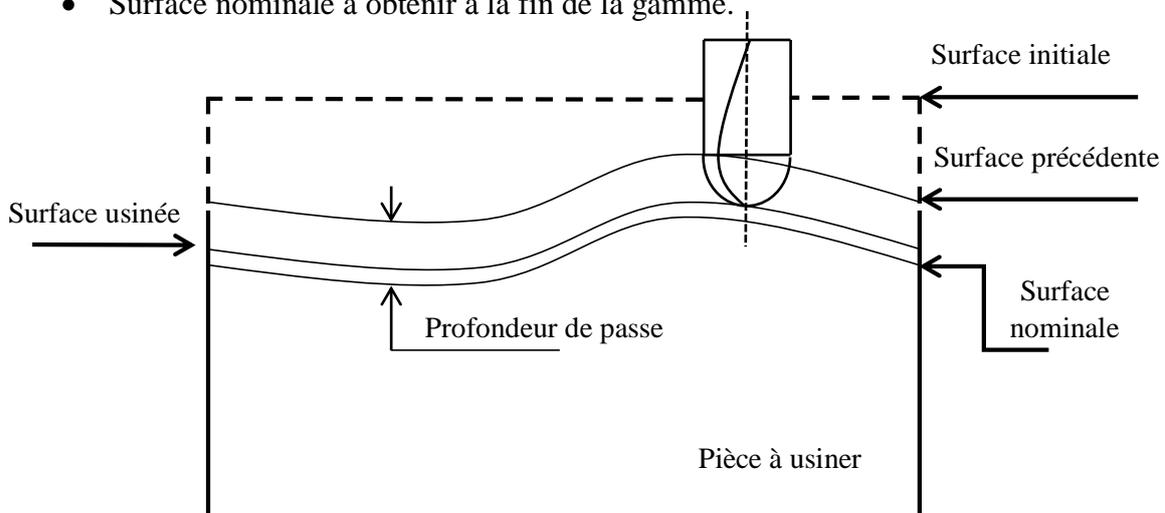


Figure 16 Surfaces de références en fraisage [Choi et Jerard 1998]

Ces surfaces doivent être décrites afin de déduire, pour chaque position de l'outil, son engagement dans la matière.

1.2.6.1 Surface initiale de la pièce

La surface initiale au début de la gamme d'usinage considérée peut être issue d'une opération de fonderie, de forgeage, de soudage (surface rechargée ou cordon de soudure) ou encore d'une gamme d'usinage précédente. La forme de surface dépend donc du procédé de mise en forme utilisé précédemment et de la forme des outils, matrices ou moules utilisés. Ce type de surface est souvent décrit de façon très approximative à partir de la géométrie théorique résultante du procédé utilisé ou de mesures rapides. Les défauts de forme ou d'état de surface ne sont alors pas pris en compte.

Dans le cas d'une pièce préusinée, la surface initiale est souvent plane ou présente une forme en escalier (surface ébauchée, Figure 1.16) avant la première passe. Pour une pièce issue de fonderie ou de forge, c'est rarement le cas. Il faut prendre en compte cette forme initiale pour gérer l'engagement de l'outil dans la matière lors des premières passes, en particulier pour l'usinage de surfaces complexes, car dans ce cas, la trajectoire de l'outil lors de la première passe est très différente de la forme de la surface initiale. Le calcul de l'engagement dans la matière et des efforts de coupe permet dans ce cas d'éviter une usure prématurée voire un bris des outils d'ébauche à cause d'une profondeur de passe trop importante ou d'une succession d'entrées-sorties dans la matière (usinage de marches laissées par l'usinage précédent). Ceci est d'autant plus important que les pièces brutes de forge ou de fonderie présentent des surfaces initiales souvent hétérogènes (sable de moule piégé, surface fortement écrouie) qui menacent l'intégrité de l'outil de coupe. Les pièces traitées thermiquement (pièces trempées) sont également délicates à ébaucher.

1.2.6.2 Surface précédente

La surface précédente ou prégénérée est la surface formée par le passage de l'outil (ou d'un autre) lors d'une étape (ensemble de passe) précédente. En fraisage 3 axes, cette surface se situe généralement au-dessus de la surface actuelle à usiner. L'accumulation de passes à profondeurs ou altitudes différentes est due à la limitation de la profondeur de passe qui impose de générer des surfaces successives pour retirer une épaisseur de matière importante. La profondeur de passe ainsi que les autres conditions de coupe peuvent changer d'une passe à l'autre (ébauche, demi-finition, reprise, finition) en fonction de la qualité qu'on veut lui associer, mais la forme de la trajectoire utilisée varie souvent peu ou pas du tout entre deux étapes. Dans tous les cas, la forme de la surface prégénérée dépend de la géométrie de l'outil utilisé, de sa trajectoire, de la description géométrique de la surface de référence, de la distance qui sépare les passes (pas de balayage), du respect de la consigne par la machine et de différentes perturbations liées à la coupe (faux rond d'outil, déflexion de l'outil, vibrations). En règle générale, seule la forme de cette surface est intéressante pour décrire l'engagement de l'outil, et on ne prend pas en compte les défauts d'état de surface inférieurs aux défauts de forme. On peut également se contenter de la surface théorique à obtenir lors de cette étape précédente que l'on suppose alors réalisée sans défaut. On néglige alors les défauts de forme (envisageable s'il ne s'agissait pas d'ébauche), mais la description de la surface peut être réalisée ou récupérée aisément à partir de la trajectoire ou de la surface consigne en la décalant.

1.2.6.3 Surface usinée

La forme de la surface usinée dépend des mêmes facteurs que la surface prégénérée et seuls les défauts de formes sont intéressants à considérer pour déterminer l'engagement de l'outil dans la matière. Néanmoins, si l'on souhaite obtenir des informations sur l'état de surface obtenu, il convient de prendre en compte toutes les perturbations citées plus avant, en particulier si cette surface coïncide avec la surface finale de la pièce que l'on veut approcher au plus près. La définition de la surface usinée à chaque passe est utile à la détermination de l'engagement de l'outil, car elle constituera la future surface prégénérée si l'on veut modéliser plusieurs passes successives. On doit alors prendre la passe de l'outil pour la passe à côté de celle considérée pour gérer l'engagement de l'outil dans le cas d'un usinage par balayage.

1.2.6.4 Surface à usiner

La surface à usiner est la surface consigne pour l'étape considérée. Elle doit être décrite avec soin pour proposer une trajectoire d'outil adaptée, en particulier s'il s'agit d'une étape de demi-finition ou de finition. La trajectoire calculée à partir de la description de cette surface va conditionner le déplacement de l'outil dans l'espace, et ainsi l'engagement de l'outil vis-à-vis de la matière non encore usinée.

1.2.6.5 Surface nominale

La surface nominale est celle à obtenir théoriquement à la fin de la gamme d'usinage, c'est la surface finale de la pièce sans défaut, à ne pas la confondre avec la surface finale obtenue réellement qui est alors la dernière surface usinée. La définition de toutes les trajectoires de l'outil dépend de la forme de cette surface consigne. La qualité de ces trajectoires est directement liée à la précision de description de cette surface, sachant que pour une opération de finition, ces dernières trajectoires vont définir directement la forme finale obtenue. Les méthodes de modélisation utilisées pour décrire les surfaces de référence sont présentées dans la section suivante.

En ce qui concerne les surfaces nominales issues de l'étape de conception, il est possible de distinguer deux familles de surfaces [Duc 1999] (Figure 1.17) :

- les surfaces fonctionnelles, qui assurent les besoins de la pièce ;
- les surfaces de liaison et de raccordement, qui relient ces surfaces fonctionnelles entre elles.

Cette classification prend tout son sens si l'on considère que les surfaces fonctionnelles doivent concentrer l'effort d'optimisation de la stratégie pour des objectifs de qualité et que les surfaces intermédiaires nécessitent surtout un effort d'optimisation de productivité.

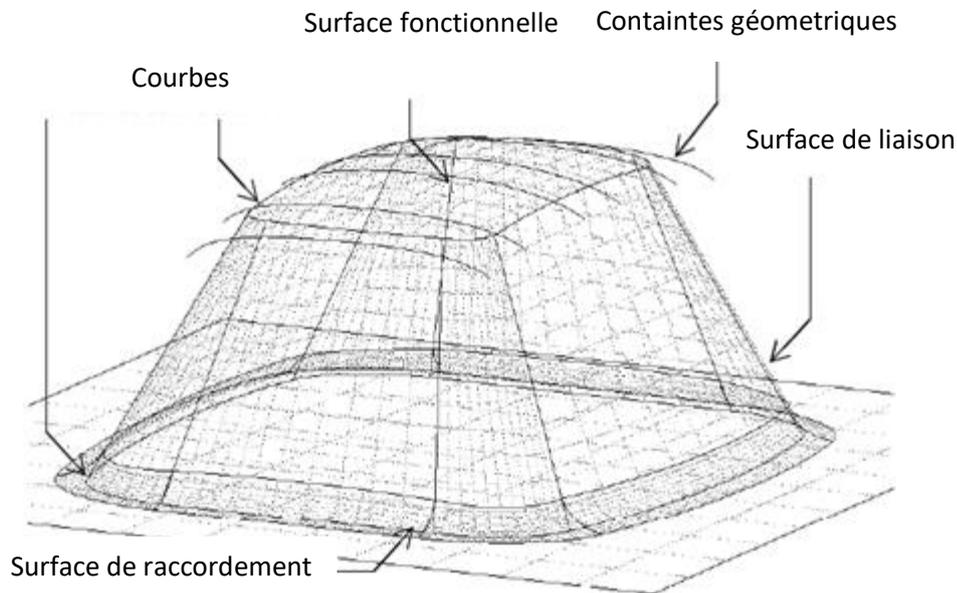


Figure 1.17 Classification des surfaces [Duc et al 1999]

1.3 Problématique liée aux défauts de fabrication

Dans la pratique, les pièces ne peuvent pas être fabriquées aux dimensions idéales exigées par le concepteur étant donné les imprécisions inhérentes aux procédés de fabrication. Ces imperfections sont reconnues comme des défauts de fabrication. Les défauts de fabrication dépendent de différentes erreurs qui peuvent provenir de différentes sources. Les études de [Bui 2011] ont permis d'identifier et de simuler les incertitudes de fabrication en 27 sources d'erreurs dans un processus de fabrication pour 8 éléments de fabrication qui sont les suivants : outil, outil de coupe, pièce usinée, conditions de coupe, stratégie d'usinage, montage d'usinage, lubrification et opérateur. L'auteur [Lavernhe 2006] a classé les principaux défauts observés en fabrication, selon deux catégories : les écarts au niveau de la géométrie et les pertes de productivité (tableau 1.2), l'auteur cite les éléments spécifiques à l'usinage 5 axes UGV.

Les problèmes qui doivent être traités dans l'étude de la topographie 3D des surfaces gauches usinées sur des machines 05 axes sont discutés à travers la littérature en trois sections : D'abord, l'identification puis l'analyse et en fin la quantification des défauts de fabrication.

Tableau 1.2 Défauts influents sur la qualité géométrique et la productivité [Lavernhe 2006]

Impact sur :	Phénomène entrant en jeu	Causes possibles	Paramètres influents
Géométrie	Déformation outil	Efforts de coupe	Section copeau - Matériau outil Attachement outil (technologie) Géométrie outil (diamètre, géométrie de l'extrémité, longueur)
Géométrie	Déformation pièce	Efforts de coupe	Section copeau Montage d'usinage (rigidité) Matériau de la pièce Mode d'obtention du brut Trajectoire d'usinage (séquencement)
Géométrie	Vibrations Dynamique	Efforts de coupe Rigidité - Structures - Modes propres des ensembles {pièce - porte-pièce} et {outil/broche/axes/bâti}	Trajectoire d'usinage (moins accidentée, modifier la stratégie d'usinage) Montage d'usinage Outil (matériau, attachement, longueur)
Géométrie	Mouvement relatif outil - pièce (enveloppe du mouvement outil - pièce)	Génération de trajectoires au sens calcul	Valeurs des paramètres d'usinage Format d'interpolation Méthode de calcul du positionnement outil
Géométrie	Mouvement relatif outil - pièce (enveloppe du mouvement outil - pièce)	Défauts géométriques des liaisons géométriques des de la machine et des règles de mesure	
Géométrie Productivité	Mouvement de l'outil dans le repère machine et /ou mouvement relatif outil - pièce non désiré (singularité géométrique)	Architecture machine Génération de trajectoire (géométrie) CN (transformation géométrique)	Montage d'usinage (posage + orientation pièce) Programme CN Mode de pilotage de la CN Architecture machine
Géométrie	Dilatation thermique	Frottements - Échauffements	Mise en chauffe - Stabilité thermique
Géométrie Productivité	Vitesse d'avance réelle limitée	Saturation des moteurs (surtout les moteurs rotatifs)	Posage pièce (solicitation des axes différente rotation/translation)
Géométrie Productivité	Vitesse d'avance réelle limitée	CN (temps de cycle faible)	Format d'interpolation Trajectoire (longueur des segments)
Géométrie Productivité	Ralentissements de la vitesse d'avance	Inertie des axes (accélération, jerk maxi)	Trajectoire (changement de direction, courbure, mode de parcours, longueur des segments) Réglage des asservissements CN

1.3.1 Identification des défauts

Selon [Hong et Chang 2003], les défauts de fabrication sont observés sur l'état des pièces en sortie de fabrication, mais leur origine est classée en deux catégories principales. Ils sont dus aux écarts de reprise et à ceux d'usinage. Une méthode de mesure et un traitement de ces mesures sont développés à partir des études antérieures de [Tichadou 2005], [Tichadou et al. 2007] et permettent de distinguer ces deux catégories d'écarts.

1.3.1.1 Écarts de reprise

Les écarts de reprise sont les écarts de positionnement lors de la mise et du maintien en position de la pièce dans le porte-pièce. L'auteur [Tichadou 2005] a résumé par un diagramme Ishikawa de cause à effet, les sources d'écarts de reprise sur la Figure 1.18.

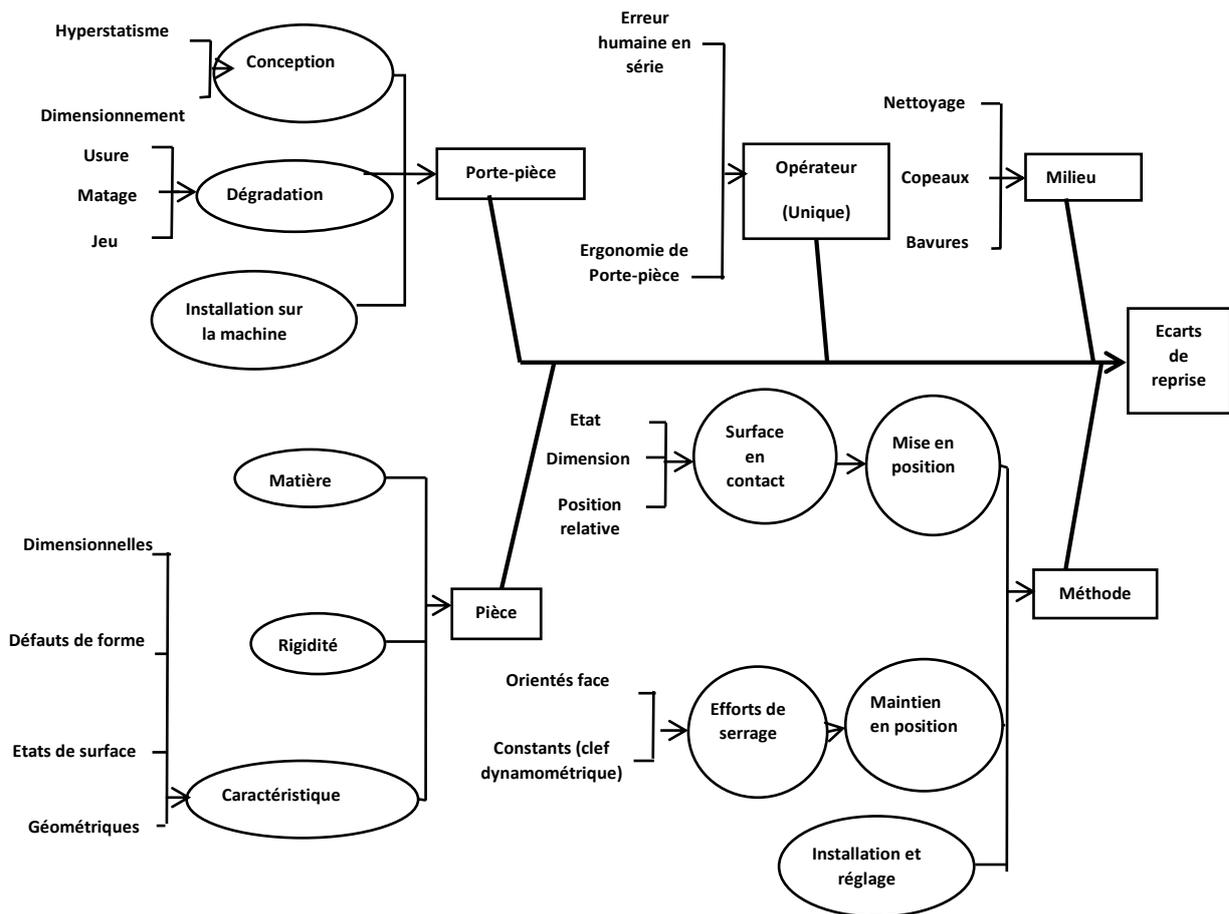


Figure 1.18 Diagramme cause à effet des écarts de reprise [Tichadou 2005]

Dans [Bui 2011], les auteurs présentent l'étude des méthodes pour identifier et simuler les défauts de fabrication tridimensionnels. Les méthodologies ont été élaborées sur la base des travaux antérieurs, tels que la méthode de simulation MMP (Model of Manufactured Part) présentée dans [Villeneuve et Vignat 2007], associée à la méthode de la double mesure présentée dans [Tichadou et al. 2007].

1.3.1.2 Écarts d'usinage

Les écarts d'usinage sont formés par les écarts entre la surface visée lors de l'opération d'usinage et la surface réelle usinée. Ils résultent des phénomènes ayant eu lieu lors de l'usinage. Les écarts d'usinage sont fonction d'un grand nombre de paramètres liés à l'opération, l'outil, la machine, etc. Il n'est pas envisageable de lister toutes les modélisations qui ont été faites sur ce thème. L'auteur [Tichadou 2005] a présenté sous la forme d'un diagramme Ishikawa de cause à effet des sources d'écarts d'usinage sur la Figure 1.19.

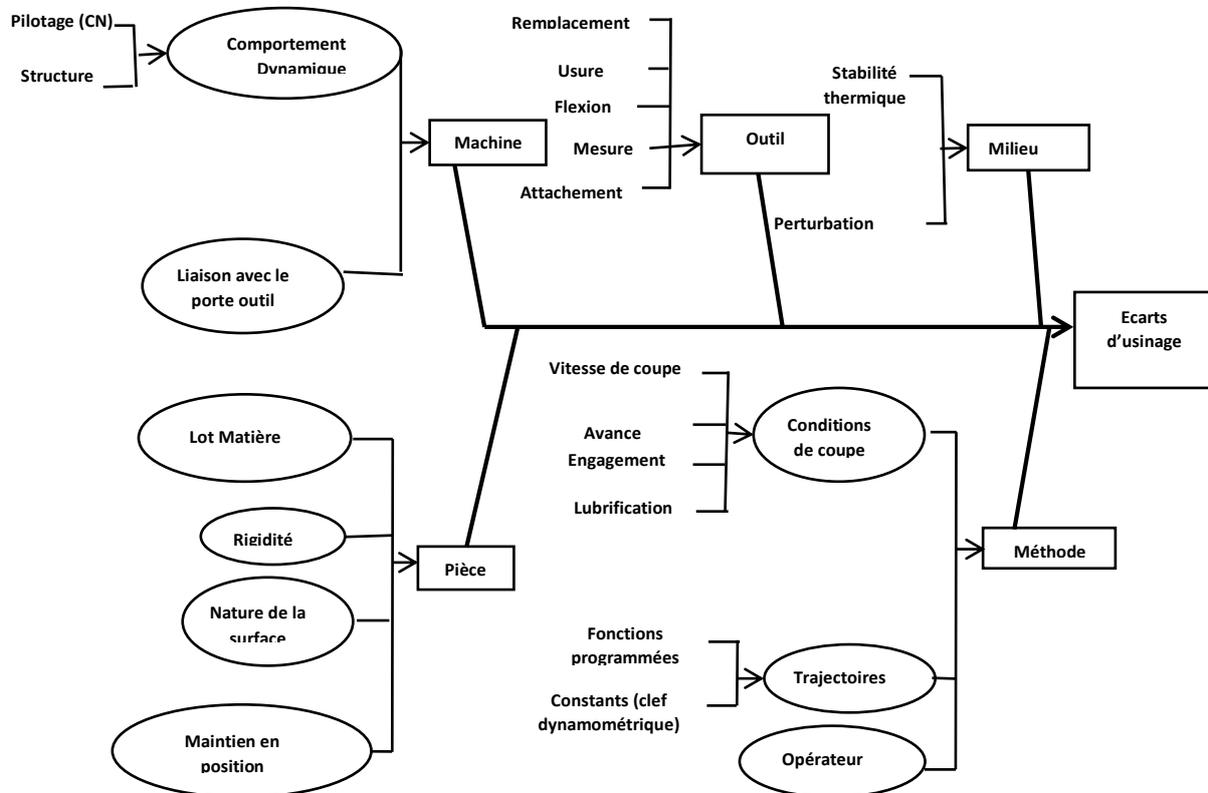


Figure 1.19 Diagramme de cause à effet des écarts d'usinage [Tichadou 2005]

Chaque branche fait l'objet de publications. Les phénomènes physiques sont nombreux, ils portent sur les déflexions d'outil [Seo 1998], le comportement dynamique des machines [Terrier et al. 2004], des déformations des pièces, des formes générées en fonction du type d'usinage [Larue et Anselmetti 2003], de la dilation thermique de la broche [Segonds et al. 2001]. Indépendamment des modélisations et des phénomènes physiques, il est intéressant d'observer les méthodes de mesures des écarts d'usinage. Celles-ci sont peu nombreuses. Musa [Musa et al. 2004] propose de mesurer des défauts de fabrication en fraisage avec un capteur de déplacement linéaire monté sur la broche. Ce capteur accoste la pièce après l'usinage. Cette méthode est pertinente, car elle permet de filtrer les écarts de reprise. En revanche l'information est unidimensionnelle. Dugas [Dugas 2002] reconstitue les défauts des surfaces usinées en collectant les déplacements réels de la machine lors de l'usinage. Ce travail d'analyse de comportement dynamique est destiné à la simulation d'usinage des formes complexes. Il intègre les caractéristiques machine dans les écarts d'usinage. La variabilité des phénomènes mesurés n'est pas encore prise en compte dans les mesures, mais ce type de défauts d'usinage doit être intégré à terme dans l'analyse de la fabrication. Nous remarquons que ces deux propositions

font appel à des méthodes de mesure sur les moyens de production. Elles ont un point commun : Dans le premier cas, la position de pièce est évaluée par rapport à la machine ; dans le second cas, les surfaces usinées sont reconstruites à partir des données des codeurs de la machine. Ces mesures ne sont pas des caractéristiques propres à la pièce, mais des caractéristiques de la pièce par rapport à la machine. Cette particularité est importante pour comprendre qu'en effectuant ce type de mesure on isole les écarts d'usinage des écarts de mise en position

1.3.2 Analyse des défauts d'usinage

Après avoir présenté les différentes étapes constituant le processus général d'élaboration des pièces de forme complexe en usinage 5 axes dans la section 1.2.3. Chacune de ces étapes est source d'erreurs ou imprécisions qui peuvent conduire à une pièce non conforme. Dans [Prevost 2011] la description des sources d'écarts générés à chaque étape sont illustrées sur la figure 1.20 et l'auteur a défini les écarts e1, e2, e3 comme suit :

- **Écart e1** : est un écart de FAO. Il est dû aux erreurs numériques qui résultent d'un ensemble d'approximations associées au positionnement de l'outil sur la pièce, à la stratégie d'usinage, etc. À l'issue de l'activité de FAO, l'enveloppe de la trajectoire de l'outil générée constitue une approximation de la surface nominale.

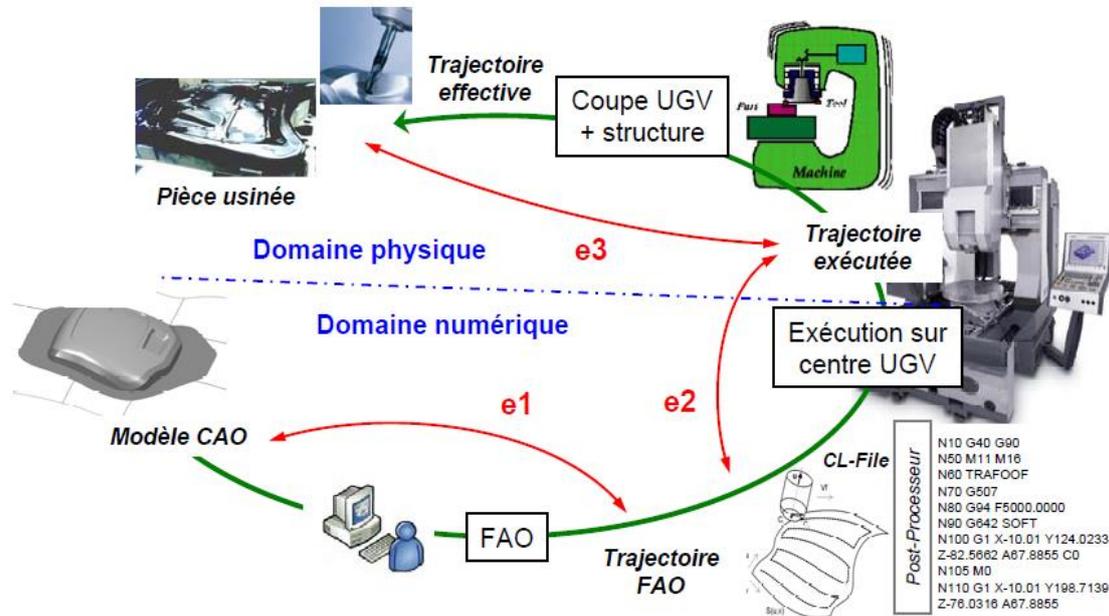


Figure 1.20 Processus d'élaboration UGV [Prevost 2011]

- **Écart e2** : est un écart d'exécution. L'étape d'exécution permet en particulier de générer le mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce. Ainsi, cette étape nécessite d'être séparée en sous-activités en relation avec la partie numérique (interpolation, commande) et la partie physique (motorisation, composants mécaniques de transformation de mouvement...). La partie numérique réalisée par la CN entraîne des écarts lors de la génération des consignes de position des axes. Le pilotage des axes, affecté par la structure de commande influe sur l'exécution de la trajectoire. Ainsi les erreurs engendrées par la structure d'asservissement sont couplées numériques / physiques (effets d'inertie, de frottement, d'échantillonnage) [Prevost 2011].

- **Écarts e3** : est un ensemble d'écarts engendrés par le cumul des phénomènes purement physiques (géométrie non idéale de la structure de la machine, dynamiques associés à la coupe, déformations des composants ...) et des conditions de coupe utilisées.

Dans [Lavernhe 2006], l'auteur définit une classification des erreurs et des écarts observés au cours du processus. Il propose des causes possibles et les paramètres influents sur les phénomènes mis en jeu. La synthèse de ses études est illustrée sur le tableau 1.

Tableau 1.3 Défauts sur la qualité géométrique, causes et paramètres influents [Lavernhe 2006]

Phénomène entrant en jeu	Causes possibles	Paramètres influents
Déformation outil → e3	Efforts de coupe	- Section copeau - Attachement outil (technologie) - Géométrie outil (diamètre, géométrie de l'extrémité, longueur.
Déformation pièce → e3	Efforts de coupe	- Section copeau - Montage d'usinage (rigidité) - Matériau de la pièce - Mode d'obtention du brut
Vibration – Dynamique → e3	Efforts de coupe Rigidité – Structure – Modes Propre des ensembles (pièce/ porte – pièces) et (outil/broche/axes/ bâti	- Trajectoire d'usinage (jerks, accélérations, stratégie d'usinage) - Montage d'usinage - Outil (matériau, attachement, longueur). - Architecture machine (sérielle/parallèle)
Mouvement relatif outil/pièce (enveloppe du mouvement outil) → e1	Génération de trajectoires au sens calcul	- Valeurs des paramètres d'usinage - Format d'interpolation - Méthode de calcul du positionnement outil
Mouvement relatif outil/pièce (enveloppe du mouvement outil) → e3	Défauts géométriques des liaisons géométriques de la machine	
Mouvement de l'outil dans le repère et/ou mouvement relatif outil/pièce non désiré (singularité géométrique) → e2	Architecture machine, Génération de trajectoire (géométries), CN (transformation géométrique)	- Montage d'usinage (posage + orientation pièce) - Programme CN - Mode de pilotage de la CN - Architecture machine
Dilatation thermique → e3	Frottements, échauffements chaleur dégagée par la coupe	- Mise en chauffe - Stabilité thermique (cycles climatisation)

		- Matériau, outil, section copeau, lubrification
Vitesse d'avance réelle limitée → e2	Saturation des moteurs (surtout les moteurs rotatifs)	- Posage pièce (solllicitation des axes différente rotation/translation)
Vitesse d'avance réelle limitée et erreurs de contour → e2	C.N. (temps de cycle faible, méthode de calcul interpolateurs, lissage)	- Format d'interpolation - Trajectoire (longueur des segments)
Ralentissement de la vitesse d'avance et erreurs de contour → e2	Inertie des axes (accélérations, jerks maxis) Frottements	- Trajectoire (changement de direction, courbure, mode de parcours, longueur de segments) - Interpolation CN - Réglage des asservissements

La description des sources d'écarts générés à chaque étape nous permet alors de situer nos travaux dans ce contexte dont l'objectif principal est d'estimer les écarts générés à chaque étape.

1.3.3 Ecart de FAO

La première étape FAO associée à la chaîne numérique concerne la génération de trajectoire ou modèle FAO à partir du modèle CAO. Cette étape consiste à calculer un ensemble de points et orientations caractéristiques : les positionnements de l'outil sur la surface CAO (points de passage ou points de contrôle selon le format de description de trajectoire choisi). En fonction de la complexité de la surface à usiner, des écarts entre la surface nominale et la surface nominale usinée sont générés. Ces écarts sont principalement liés aux paramètres de calcul de la trajectoire d'outil. Étant donné que l'usinage effectué est une succession de trajets d'outils, les trajectoires suivies par l'outil sont établies en fonction du mode d'usinage, des paramètres de guidage et des paramètres de passe ainsi que la stratégie d'usinage.

1.3.3.1 Modes d'usinage

Il existe deux grandes familles de technique de coupe liée au positionnement de l'outil par rapport à la surface à usiner (Figure 1.21).

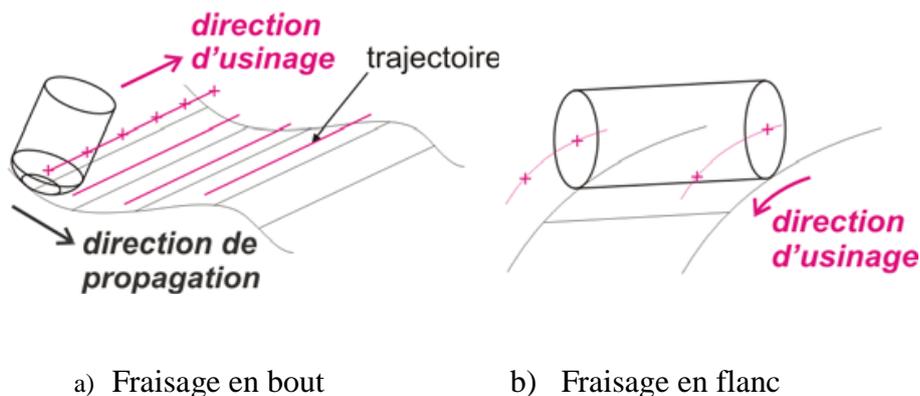


Figure 1.21 Modes de fraisage [Prevost 2011]

a) Usinage en bout

La surface est réalisée par balayage de l'outil. Les libertés d'orientation de l'outil permettent :

- d'usiner des surfaces en contre-dépouille par orientation de l'axe de l'outil de façon à éliminer les collisions entre l'outil et la surface ;
- d'optimiser la vitesse de coupe dans le cas de l'utilisation d'un outil hémisphérique par rotation de l'axe de l'outil. Dans ce cas, le point de contact court le long de l'arête de coupe et la valeur du rayon effectif de coupe varie ;
- de changer de géométrie d'outil. Cette technique autorise l'usage d'outils toriques, sans risque de talonnement du fond de l'outil sur la surface. Il est alors possible d'usiner des petits rayons de raccordement, dont la valeur est supérieure à celle du petit rayon du tore, avec un outil plus massif et plus rigide. La valeur du grand rayon du tore permet de couvrir la surface en moins de balayages et donc en moins de temps.

b) Usinage en roulant (flanc)

L'usinage en roulant usine la surface de la pièce avec le flanc de l'outil. D'où, le contact entre l'outil et la surface est une ligne. Ici, toute la partie coupante est en contact avec la surface. Cette technique ne peut être utilisée que pour des types particuliers de surfaces. Les surfaces les plus simples à usiner avec des flancs d'outil rectilignes sont les surfaces réglées développables. Les autres surfaces peuvent être usinées par cette technique si une certaine erreur au niveau du contact entre la surface et l'outil est autorisée.

L'usinage en roulant 05 axes d'aubes de turbines suit un trajet en une spirale continue. Le type de contact opéré par l'outil passe en continu d'un usinage en bout des surfaces de la pale à un usinage en roulant des surfaces latérales.

1.3.3.2 Paramètres de guidage de l'outil

Le guidage de l'outil le long de la courbe peut se faire de deux manières différentes, soit par guidage du point extrémité de l'outil CL, soit par guidage du point centre d'outil CE. En effet, pour l'usinage d'une surface quelconque, le point extrémité d'outil et le point centre d'outil n'ont pas la même trajectoire et les algorithmes de calcul des trajets ne sont pas les mêmes si l'outil est guidé par son point d'extrémité ou son centre (Figure 1.22).

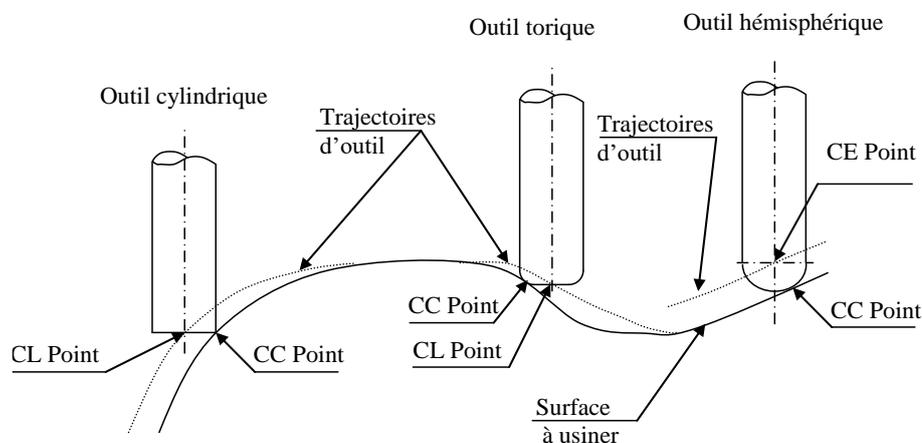


Figure 1.22 Trajectoires du point de contact CC et du point extrémité d'outil CL

Le mode de balayage de la surface permet d'usiner dans le sens «aller» ou dans les deux sens «aller et retour» couramment appelés «One-Way» et «Zig-Zag». Pour les opérations de finition,

le mode «One-Way» est utilisé pour usiner toujours en «avalant» afin d'améliorer l'état de surface. Pour usiner en avalant, il faut fixer le sens de parcours en fonction du sens de rotation de la broche.

1.3.3.3 Paramètres de passes de l'outil

Un trajet est représenté par une succession de couples formés par la position de l'extrémité de l'outil et la direction de l'axe d'outil. Générer des trajets outil, c'est trouver les positions de l'outil successives qui permettent d'usiner une surface selon des trajectoires définies par le programmeur machine-outil. Ces trajectoires sont en général des courbes 3D.

La stratégie d'usinage définit complètement le mode de balayage de la surface et son interpolation dans un format compréhensible par le directeur de commande numérique. Pour la direction d'usinage, il faut associer deux paramètres d'usinage, le premier le long de la passe et le deuxième entre deux passes [Lavernhe 2006]. Le choix de ces deux paramètres définit respectivement la tolérance d'usinage et la hauteur de crête qu'elles conduisent à leur tour à la réalisation d'une surface réelle respectant des spécifications géométriques de défaut de forme et d'état de surface [Prevost 2011].

a) Paramètres de passe longitudinale :

Le long d'une passe longitudinale de l'usinage, deux paramètres de précision de la trajectoire d'outil peuvent être utilisés :

- **Pas longitudinal** : variable ou non le long du trajet d'usinage. Il est dû à l'emploi de l'interpolation linéaire pour décrire le trajet. Il a pour but de garantir le respect de la position relative de la trajectoire par rapport à la surface nominale.
- **Erreur de flèche** : puisque lors de l'usinage l'outil suit une ligne brisée, le pas longitudinal d'usinage est calculé en général par le respect de la tolérance d'usinage qui est la valeur maximale de l'erreur de flèche entre la courbe et chacun des segments de la ligne brisée (Figure 1.23).

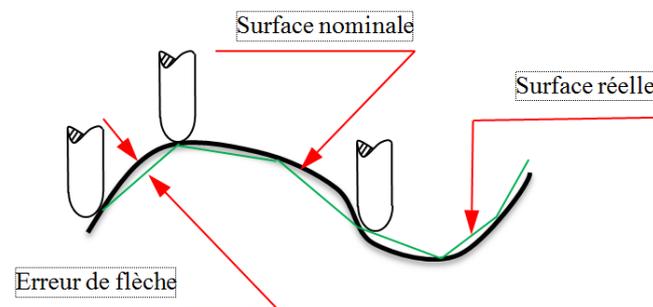


Figure 1.23 Erreur de flèche

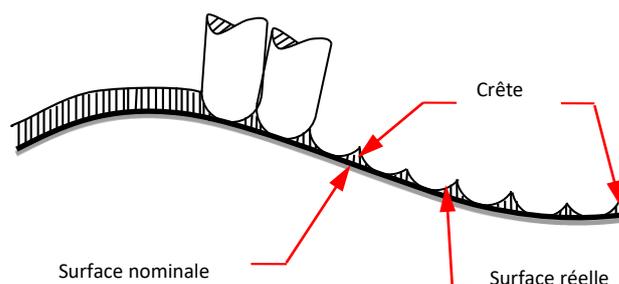


Figure 1.24 Erreur de crête

b) Paramètres de passe transversale :

Entre deux passes transversales d'usinage, deux paramètres de précision de la trajectoire d'outil peuvent être utilisés :

- **Pas transversal** : variable ou non-entre-deux passes élémentaires d'usinage. Ce pas est mis en rapport avec la hauteur de la crête maximale à laisser sur la pièce du fait du balayage par un outil hémisphérique ou torique.
- **Erreur de crête** : afin d'usiner la totalité de la surface, les passes sont juxtaposées avec une erreur donnée. Le pas d'usinage transversal peut être calculé en respectant soit un critère de distance maximale entre deux passes soit un critère de hauteur de crête. Ces deux paramètres sont équivalents et liés par le rayon de l'outil. De plus, la distance maximale entre passes peut être établie entre les surfaces de guidage ou sur la surface nominale (Figure 1.24).

1.3.3.4 Stratégies d'usinage des surfaces gauches en finition

Comme il n'existe pas une forme d'outil qui permette de générer une surface gauche directement, ces surfaces 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. En plus, le 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.

Dans l'usinage des surfaces gauches, plusieurs techniques peuvent être utilisées. Le choix d'une stratégie d'usinage dépend de la forme de la surface, du temps d'usinage et des possibilités d'accès.

a) Stratégies isoparamétriques

Cette stratégie consiste à balayer la surface $S(u, v)$ en fonction d'une succession de courbes iso-paramétriques $P(v)$ obtenues en fixant l'un des paramètres u ou v de la surface (Figure 1.25). Ainsi dans ce cas, les paramètres de discrétisation de trajectoire suivant les deux directions sont des variations Δu et Δv [Tournier et al. 2006].

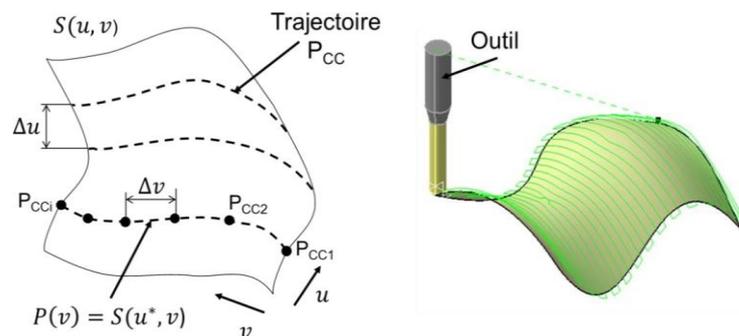


Figure 1.25 Stratégies isoparamétriques [Azzam 2015]

- 1) **Aller simple (One-Way)** : l'usinage des surfaces suit un isoparamétrique u ou v jusqu'à sa fin et après cela, l'outil est déplacé en quittant la surface dans l'autre isoparamétrique. Ce processus est répété pour l'usinage de toute la surface (Figure 1.26.a).

- 2) **Aller-retour (Zig-Zag) :** L'usinage des surfaces suit un isoparamétrique u ou v jusqu'à sa fin, ensuite on déplace l'outil sans quitter la surface à usiner afin d'usiner la surface dans le sens opposé. Le processus est répété pour l'usinage de toute la surface (Figure 1.26.b).

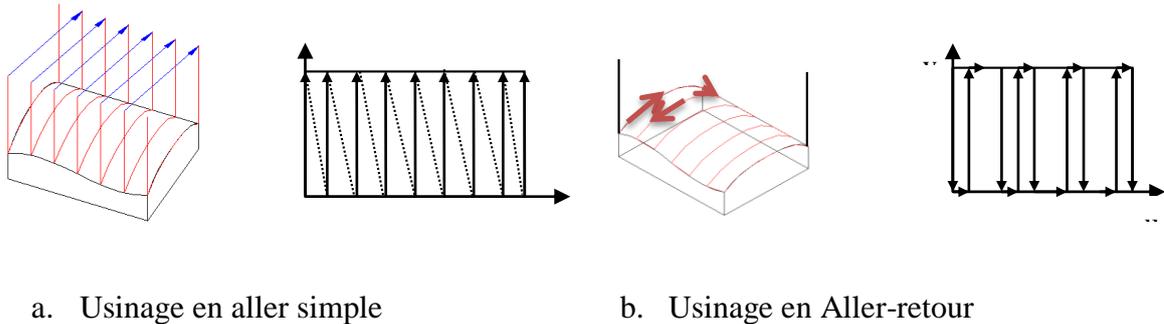


Figure 1.26 Usinage en One-Way et Zig-Zag

- 1) **Concentrique :** la surface est usinée suivant des courbes parallèles aux limites de celle-ci jusqu'à sa fin.
- a. **Spiral-In :** l'outil d'usinage suit une trajectoire en forme de spirale jusqu'à usinage de toute la surface en partant de l'extérieur de la surface vers l'intérieur (Figure 1.27a).

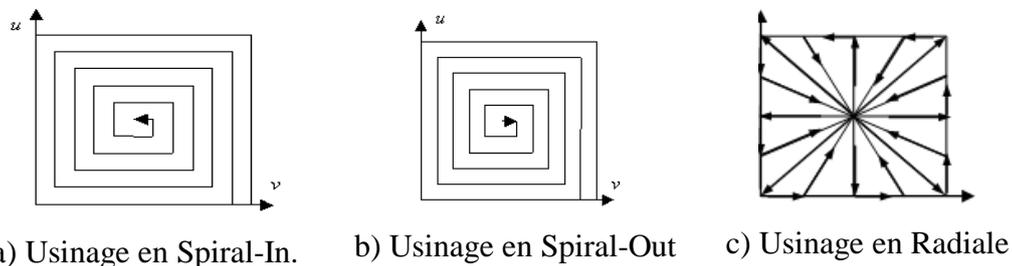


Figure 1.27 Usinages en concentrique

- b. **Spiral-Out :** l'outil d'usinage suit une trajectoire en forme de spirale jusqu'à usinage de toute la surface en partant de l'intérieur de la surface vers l'extérieur (figure 1.27b).
- c. **Radiale :** la surface est usinée en commençant du centre de la surface jusqu'à la frontière de la surface et refaire la même étape jusqu'à la fin de la surface en déplaçant chaque fois le point de l'extrémité (Figure 1.27c).

b) **Par plans parallèles :**

La trajectoire générée par cette stratégie est similaire à la trajectoire isoparamétrique sur le plan des conditions d'usinage. Dans le premier cas, les chemins d'outils sont parallèles dans l'espace

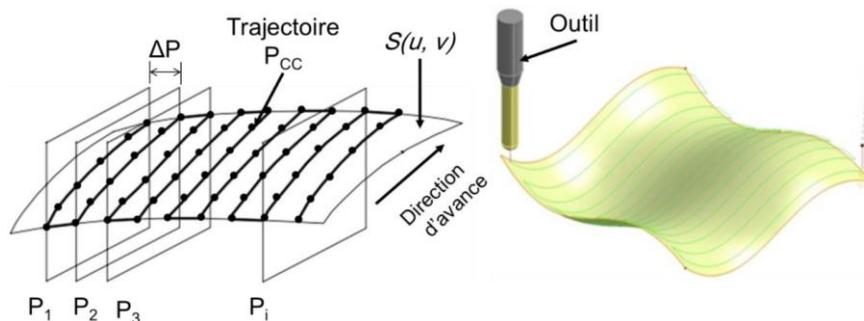


Figure 1.28 Stratégie d'usinage « plans parallèles » [Azzam 2015]

paramétrique alors que dans ce cas, ils le sont dans l'espace euclidien (Figure 1.28). Ces plans peuvent être parallèles au plan XZ où inclinés d'un certain angle.

c) Z-Constant

La stratégie Z-Constant est utilisée pour l'usinage des cavités profondes afin d'éviter les longues descentes et montées d'outil. Cela est réalisé par le découpage de la surface en plusieurs plans parallèles à l'axe Z. L'intersection de ces plans avec la surface théorique produit les contours d'intersection (Figure 1.29).

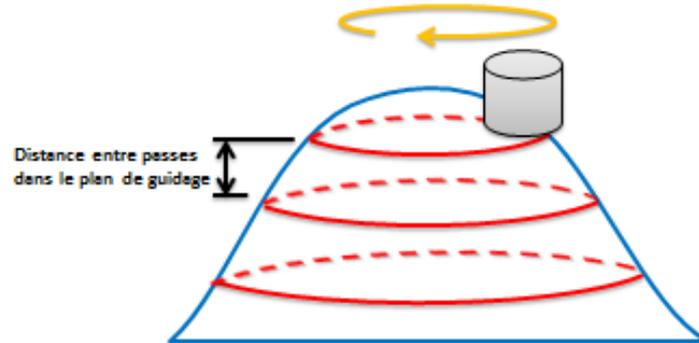


Figure1.29 Stratégie d'usinage Z-Constant

d) Stratégie du Gradient :

Pour une surface gauche, il existe une seule direction tangente de plus grande pente pour chaque point de la surface. La trajectoire de l'outil lors de l'usinage en montant en utilisant la direction tangente de plus grande pente est une liste de points de contact appelés « C_C » du bas au sommet de la surface (Figure 1.30). Par conséquent, la trajectoire de l'outil ne peut être déterminée que si un point de début en bas de la surface est donné. De ce fait, chaque trajectoire de l'outil est représentée par un ensemble de points C_C placés séquentiellement sur des contours de la surface. L'utilisation de cette stratégie impose l'identification des points stationnaires (points ayant une normale parallèle à l'axe de l'outil). Un point stationnaire fait référence souvent à un point convexe, à un point concave ou à un point en selle de cheval [Chen et Qiang 2007].

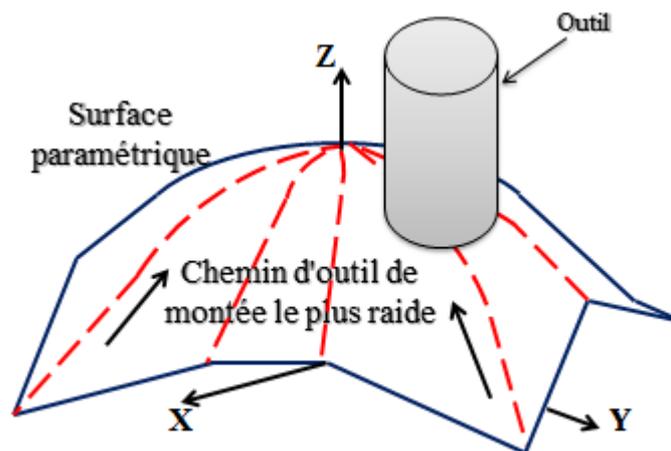


Figure1.30 Stratégie d'usinage Gradient

1.4 Problématique liée à la quantification des défauts de fabrication

La caractérisation de la topographie de surface met en évidence deux problèmes majeurs de même degré d'importance :

- la définition des paramètres pertinents qui caractérisent les modèles de surface 3D résultante de l'usinage multiaxes à grande vitesse,
- L'évaluation des relations liant l'usinage avec la topographie de surface (stratégie, direction d'usinage et l'inclinaison de l'outil de coupe...).

Dans ce contexte, plusieurs travaux sont à souligner. Ils sont présentés successivement dans les deux sections qui suivent.

1.4.1 Caractérisation de la topographie de surface

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées. Elle constitue une recherche spécifique et un problème de conception, car elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que :

- l'aptitude aux frottements
- la résistance à l'usure ou à la corrosion
- conduction thermique ou électrique
- résistance aux contraintes mécanique
- étanchéité statique ou dynamique...etc.

La définition des paramètres représentant la nature 3D de la rugosité de surface est indispensable. Un projet standardisé [ISO 25178-2 : 2007] propose des paramètres 3D qui sont l'étendu des paramètres classiques en 2D, avec une définition similaire à ceux définis par la norme [ISO 12085: 1996]. La norme ISO 25178-2 est présentée en détail dans le deuxième chapitre.

Les paramètres souvent utilisés sont classés en quatre grandes familles : paramètres d'amplitude, paramètres spatiaux, paramètres fonctionnels et paramètres hybrides (tableau 1.4) [Lavernhe et al. 2010].

Certains travaux portent sur la caractérisation de la géométrie de la surface à l'aide des dimensions fractales [Ganti et Bhushan 1995], [Thomas et al. 1999]. D'autres auteurs proposent des modèles pour décrire la topographie de la surface par l'introduction d'une structure équivalente conforme [Roques-Carmes et al. 2001], [Roques-Carmes et al. 2001']. Quelques études tentent de relier la rugosité de surface avec la fonctionnalité de surface à travers les paramètres 3D de rugosité de surface [Saravanakumar 2009]. Dans [Blunt et Jiang 2003] les paramètres S_q , S_k , S_{vk} , le S_{ds} , et le S_{bi} sont plus importants pour décrire la consommation d'huile alors que S_v et S_{vi} sont bien adaptés pour pousser des gaz dans les cylindres automobiles. En ce qui concerne la limite de fatigue, il semble plus intéressant de considérer S_q , S_{td} , et S_{al} [Novovic et al. 2004]. L'utilisation de paramètres 3D pour caractériser la topographie de surface 3D est maintenant efficace. Néanmoins, en raison de la complexité de la surface.

Tableau 1.4 Paramètres de surface [Lavernhe et al. 2010]

Paramètres d'amplitude	Sq, Sz, Ssk, Sku
Paramètres fonctionnels	Sci, Svi, Sbi
Paramètres spatiaux	Sal, Std, Str, Sds
Paramètres hybrides	SΔq

1.4.1.1 Caractéristiques de l'état de surface réelle

Une surface réelle est caractérisée par plusieurs termes à définir :

- Longueur d'évaluation L : c'est la longueur de l'échantillon de profil utilisée pour déterminer les paramètres liés à l'état de surface. Cette longueur est normalisée : 0.08, 0.25, 0.80, 2.50, 8.25 mm
- Longueur de base l : La longueur d'évaluation L est divisée en « n » longueurs de base ' l ' qui dépendent des irrégularités du profil.
- Ligne enveloppe supérieure LES : C'est l'ensemble des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies locales du profil.
- Ligne moyenne ou ligne des moindres carrées : Cette ligne est une droite ayant la direction du profil sur chaque longueur de base. Elle est définie telle que la somme des aires (entre profil et ligne) au-dessus de la ligne moyenne soit égale à la somme des aires en dessous de cette ligne.

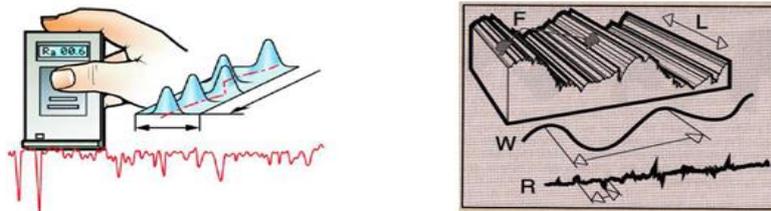


Figure 1.31 Termes d'état de surface [Sarazin 2010]

1.4.1.2 Types de défauts

Selon la norme DIN 4760-82, les défauts sont classés à quatre échelles de grandeur géométrique, définies comme suit (Figure 1.32) :

- Défauts de forme (défauts macro géométriques 1^{er} ordre) : Défauts affectant la forme géométrique, l'orientation ou la position relative des pièces usinées. Ces défauts sont qualifiés de 1^{er} ordre.
- Défauts de rugosité (défauts micro géométriques) : Défauts caractérisant la qualité de surface des pièces. Ils sont qualifiés de 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} ordre.
- Défauts de 2^{ème} ordre : Défauts moyens d'ondulation périodiques provoqués par l'avance de l'outil de coupe.
- Défauts de 3^{ème} ordre : Ce sont des petits défauts (stries, sillons) réguliers de rugosité de hautes fréquences. Ils sont provoqués par un mauvais état de l'arête de coupe (géométrie et qualité d'affûtage).
- Défauts de 4^{ème} ordre : Ce sont des petits défauts anormaux de rugosité (fentes, piquûre, arrachement de matière par un outil exerçant un frottement intense sur la surface usinée), ils

sont dus par exemple à l'hétérogénéité du matériau, aux conditions de lubrification (nature, filtrage), etc.

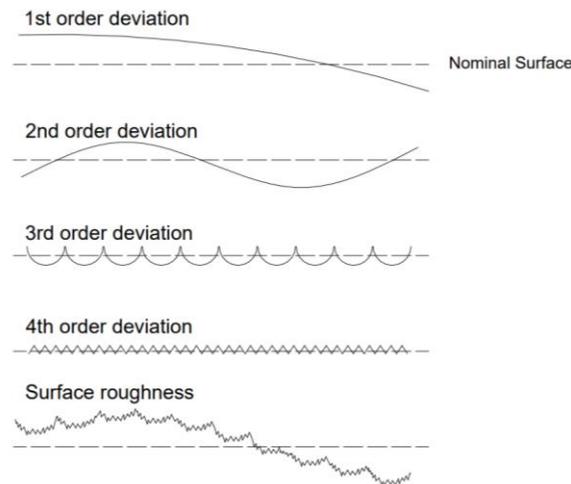


Figure.32 Ordres de défauts [DIN4760-82]

1.4.2 Prédiction de la topographie de surface

Le produit fini doit passer par un contrôle de la topographie de la surface usinée (défaut de forme et d'état de surface) afin de vérifier la conformité de la pièce avec les exigences du concepteur. Les pièces qui ne sont pas conformes sont rejetées, cela provoque une perte en productivité. La prédiction de la topographie de surface est le seul moyen pour remédier à cette problématique en répondant au compromis qualité et prix. Dans ce contexte, plusieurs travaux sont à souligner. Différentes classifications sont présentées dans la littérature, les auteurs de [Benardos et Vosniakos 2003], [Lu 2008] classe les différentes méthodologies de prédiction de la géométrie en se basant sur quatre grandes catégories à savoir :

- a) Approches basées sur la théorie de l'usinage pour développer des modèles analytiques et/ou des algorithmes informatiques pour représenter la surface usinée,
- b) Approches qui examinent les effets de divers facteurs à travers l'exécution d'expériences et l'analyse des résultats,
- c) Approches utilisant des expériences conçues,
- d) Approches d'intelligence artificielle (AI).

Les auteurs de [Denkena et al. 2015] distinguent les approches de prédiction en : empirique, analytique/numérique et simulation d'enlèvement de matière.

1.4.2.1 Approche analytique/numérique

L'approche est basée sur la théorie de l'usinage, cette catégorie comprend des approches qui mettent l'accent sur certains aspects de la théorie de l'usinage tels que la cinématique des processus, les propriétés des outils de coupe, le mécanisme de formation des copeaux [Denkena et al. 2015]. Mais en général, le développement de modèles géométriques constitue la base de l'approche à travers des équations mathématiques rigoureuses. Ce modèle est ensuite implémenté par un algorithme informatique afin de gérer les calculs complexes. Dans tous les cas, des expériences sont menées afin de comparer les résultats prévus avec les résultats réels. Il convient de noter que malgré le solide arrière-plan des théories susmentionnées, les phénomènes qui conduisent à la formation de la rugosité de surface sont très complexes et interagissent dans la nature, de sorte qu'une solution globale n'a pas encore été trouvée. Le

contexte théorique utilisé par les efforts de recherche dans cette catégorie est considéré comme une condition préalable pour toute personne impliquée dans des études d'usinage

1.4.2.2 Approche empirique

L'approche expérimentale peut être considérée comme la méthode la plus évidente, les expériences avec les facteurs qui sont considérés comme les plus importants sont menées et les résultats obtenus sont utilisés pour étudier l'effet de chaque facteur ainsi que le mécanisme d'influence sur la caractéristique de qualité observée. L'analyse de régression est souvent utilisée pour construire des modèles sur la base des données expérimentales. L'intuition et la perspicacité du chercheur jouent un grand rôle dans cette approche, mais une compréhension forte du phénomène examiné est également nécessaire pour l'expérience afin d'obtenir des résultats significatifs. L'approche expérimentale est principalement adoptée dans les cas où il peut n'y avoir aucune formulation analytique des relations de cause à effet entre les différents facteurs [Benardos et Vosniakos 2003].

1.4.2.3 Approche de conception expérimentale

La raison pour laquelle des expériences conçues ont été classées dans une catégorie différente des approches précédentes est parce qu'ils constituent une méthode systématique concernant la planification des expériences, la collecte et l'analyse des données avec l'utilisation quasi optimale des ressources disponibles. La méthodologie de surface de réponse et des techniques de Taguchi pour la conception de l'expérience semblent être les méthodes les plus répandues pour le problème de prédiction de la rugosité de surface.

Bien que l'objectif commun des techniques étudiées soit d'organiser la procédure expérimentale et le traitement des données nécessaires, chacun suit un chemin différent. Le RSM est principalement un modèle de procédure de formulation pour déterminer comment des facteurs importants affectent la réponse d'une expérience et conduit au développement des modèles polynomiaux du premier et deuxième ordre qui incluent les paramètres considérés et leur signification statistique [Denkena et al. 2015]. La conception de l'expérience dicte une série d'étapes à suivre pour que l'expérience aboutisse à une meilleure compréhension des performances du produit ou du processus [Benardos et Vosniakos 2003].

1.4.2.4 Approche de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est mise en œuvre dans des problèmes d'ingénierie à travers le développement du réseau de neurones (ANN) modèles artificiels, algorithmes génétiques (AG), la logique floue et les systèmes experts. Ces approches sont utilisées afin de simuler la manière dont les êtres humains traitent les informations et prennent des décisions, la plupart des travaux publiés sur le problème de la prédiction de la rugosité de surface, reposent principalement sur les algorithmes génétiques, la logique floue et les réseaux de neurones.

1.4.2.5 Simulation d'enlèvement de matière

La simulation d'enlèvement de matière en usinage multi-axes des surfaces de formes gauches est un domaine très vaste et touche différents niveaux. Un travail de synthèse est présenté dans [Bouhadja et Bey 2014] proposant des critères de classification des travaux de recherche liés aux divers problèmes de la simulation d'usinage. Les objectifs de la simulation d'usinage sont multiples tels que la vérification du trajet d'outil, la détection des collisions, la prédiction des efforts de coupe et l'état de la surface finie...etc. selon ces objectifs la simulation d'usinage est distinguée en simulation de trajet d'outil et en simulation d'enlèvement de matière (MRS), cette dernière correspond au problème de prédiction de la topographie de surface, où la quantification

de la matière enlevée est indispensable. En MRS la pièce est représentée par des voxel, dextel ou une modélisation solide telle que la géométrie solide constructive. La simulation avec MRS est généralement plus lente par rapport aux modèles analytiques et empiriques, mais permet la plus grande flexibilité. Il a été montré par [Liu et al 2015] que le mouvement de l'arête de coupe est une approche supérieure en termes de précision par rapport à une soustraction booléenne entre la pièce à usiner et le corps de rotation de l'outil de fraisage, par exemple. Une sphère pour fraises à boulets. Les surfaces résultantes après MRS sont parfaitement lisses sans influences stochastiques. Afin d'améliorer le MRS à des fins aérodynamiques, les auteurs de [Denkena et al. 2015] présente une approche de MRS combinée avec un modèle empirique qui prend en compte les influences stochastiques telles que les vibrations des outils. Dans notre étude la prédiction de la topographie va être traitée par la simulation d'enlèvement de matière en faisant l'objet des prochains chapitres.

1.5 Synthèse de la problématique et objectif du travail

1.5.1 Synthèse

Selon la revue bibliographique élaborée, la figure 1.33 présente un schéma de synthèse situant la problématique de la thèse à travers un cheminement logique partant de l'identification de défauts d'usinage et passant par l'analyse des écarts pour arriver à la quantification de ces derniers. Cette quantification se fait à travers deux aspects :

1. Prédiction de la topographie 3D de surfaces gauches usinées sur fraiseuse 5 axes par la simulation d'enlèvement de matière dont les écarts de FAO sont considérés.
2. Caractérisation de la topographie de surface gauche par l'analyse de la mesure de la topographie 3D de surface gauche.

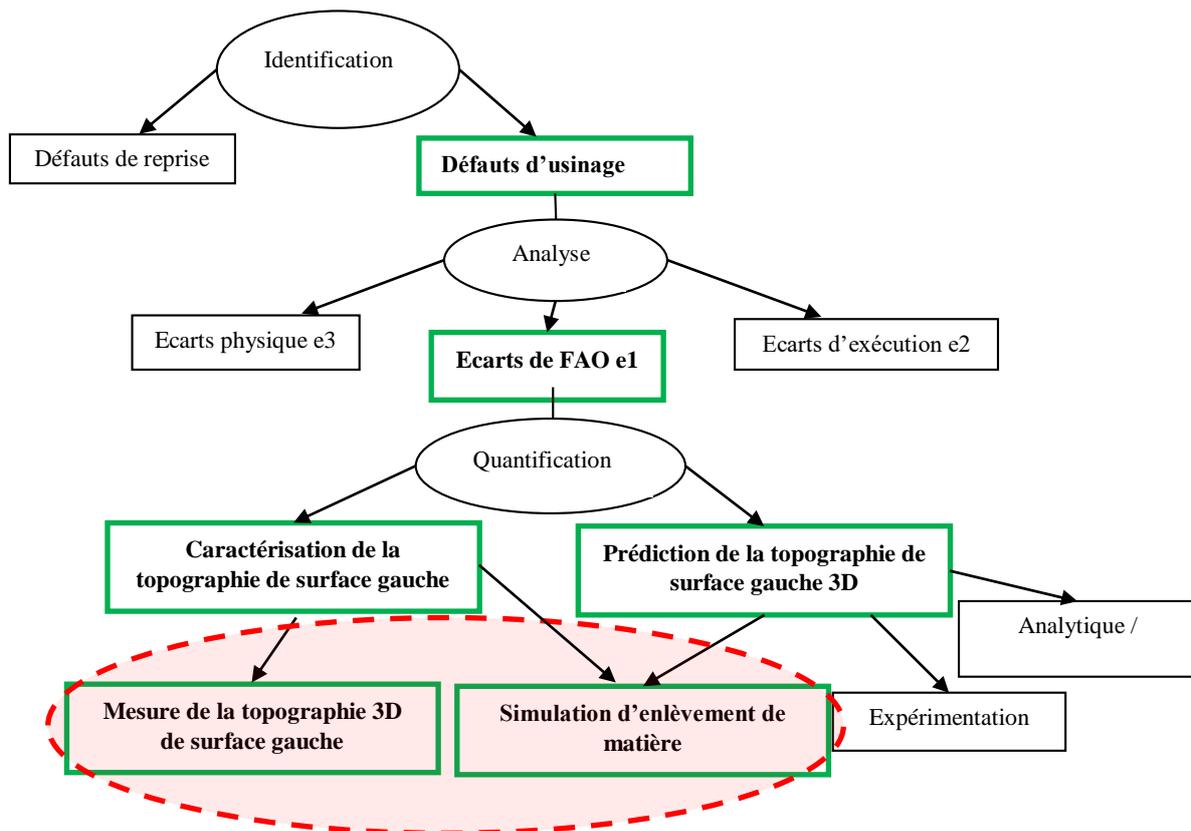


Figure 1.33 Problèmes lié à la topographie de surface usinée sur machine 5axe

1.5.2 Objectif

L'objet de la thèse est la prédiction et la caractérisation de la topographie 3D des surfaces gauches lors de l'opération de finition (usinage en bout) avec des outils hémisphériques sur des fraiseuses numériques 5-axes, en prenant en compte les différents paramètres d'usinage (stratégie d'usinage, orientation d'outil, profondeur de passe ...etc.). Le but recherché est l'étude de l'influence de ces paramètres sur la qualité des surfaces (rugosité) et la sélection des paramètres appropriés conduisant à obtenir un meilleur état de surface pour éviter l'opération de super finition afin de réduire les coûts de fabrication.

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons introduit, d'une part, les notions nécessaires dans le processus d'élaboration des pièces de forme gauches en usinage multi axes et d'autre part, nous avons défini la problématique du sujet dont elle est liée aux défauts de fabrication. Le traitement de cette problématique s'accroît sur les outils de quantification de ces défauts. Ces outils seront présentés dans le prochain chapitre, et sont orientés vers la prédiction par simulation d'enlèvement de matière et la mesure par analyse de l'état de surface 3D, faisant l'objet du troisième et quatrième chapitre respectivement.

Chapitre 2

Outils de quantification des défauts de fabrication

2.1 Introduction

Afin de quantifier les défauts de fabrication, trois volets sont à prendre en considération faisant l'objet de ce chapitre : le premier est la caractérisation de la topographie de surface qui est définie par des paramètres représentant la nature 3D de la rugosité de surface selon la norme ISO 25178-2. Le deuxième volet est lié à la métrologie dimensionnelle où les différentes méthodes de mesure de la topographie 3D des surfaces, les appareils de mesure associés à ces méthodes sont présentées. Le dernier volet est consacré à la présentation des techniques de prédiction de la topographie fondée sur la simulation virtuelle d'enlèvement de matière en usinage 5 axes disponibles dans la littérature, elles sont classées à leur tour par catégorie (géométrique et physique), par échelle (approche multi-échelle) et par modèle de coupe.

Afin de sélectionner une approche appropriée à la problématique définie dans le premier chapitre, une attention particulière est accordée aux méthodes de simulation géométrique à l'échelle macroscopique dans le système Pièce-Outil-Machine. Ce chapitre est conclu par une brève comparaison entre les modèles de représentation volumique des pièces à usiner utilisés dans la simulation du processus d'enlèvement de matière (Dexel, Voxel, Triple-Dexel) afin de justifier le choix de la méthode adoptée.

2.2 Description de la topographie de surface

La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant. En effet son concept a été défini de plusieurs manières selon la discipline de la science ou de la technologie de l'objet à étudier.

En mécanique, la surface d'un solide est habituellement caractérisée par une structure et des propriétés qui diffèrent de l'intérieur du matériau. Elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que :

- l'aptitude aux frottements
- la résistance à l'usure ou à la corrosion
- la conduction thermique ou électrique
- la résistance aux contraintes mécanique
- l'étanchéité statique, dynamique, etc...

2.2.1 Spécification de l'état de surface

Les divers procédés d'usinages (rabotage, tournage, fraisage, rectification, rodage, superfinition, etc.) laissent tous à des degrés plus ou moins importants, subsister des défauts d'état de surface sur les pièces. Les surfaces industrielles produites par des moyens techniques présentent toujours des irrégularités par rapport à la surface idéale. Pour le décrire en toute rigueur, il faudrait utiliser une fonction continue $z(x, y)$ donnant l'altitude de chaque point par rapport à la surface idéale.

Les problèmes relatifs à la géométrie des surfaces se posent à trois niveaux :

- la conception : quel état de surface convenant à la fonction à assurer et quels paramètres doit-on les spécifier sur un dessin technique (figure 2.1) ?
- la réalisation de la surface : quels moyens mettre en œuvre pour obtenir l'état de surface souhaité ?
- la mesure de la surface : quels moyens et quelles conditions de mesure sont-ils nécessaires pour vérifier les spécifications indiqués de la surface ?

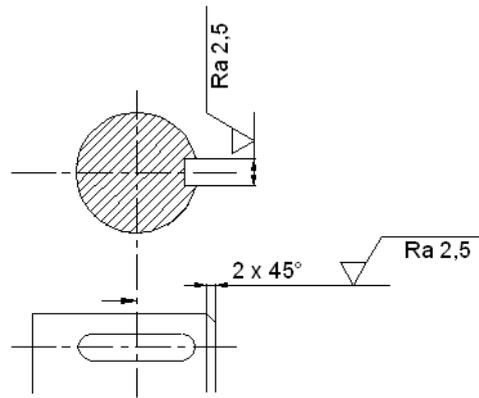


Figure 2.1 Indication de l'état de surface sur un dessin technique

2.2.1.1 Concept GPS (Geometrical Products Specification)

Le concept GPS couvre plusieurs types de normes :

- Norme de base : règle et procédure de base pour la cotation et le tolérancement des pièces et des produits.
- Normes globales : règles pour tout ou partie des normes générales (température de référence, guide pour l'expression de l'incertitude...)
- Normes générales et complémentaires : règles pour l'indication sur les dessins, les définitions et principes de vérification

Le concept GPS couvre ainsi plusieurs types de caractéristiques géométriques par exemple :

- Taille, distance.
- Angle, forme, position, orientation.
- Défauts d'état de surface.

2.2.1.2 Normes d'état de surface

Les états de surface ont été l'un des premiers sujets traités suivant le concept GPS. En se basant sur la matrice GPS [Raphet 2005], les normes ISO concernant les états de surfaces sont positionnées suivant cette matrice.

Il existe aujourd'hui une série de normes ISO reconnues par le CEM (Concept Européen Mécanique).

Exemple :

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

2.2.1.3 Norme ISO25178-2012

La norme ISO 25178 désigne un ensemble de normes internationales définissant l'analyse des états de surface 3D, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface. Il s'agit de la première norme au monde prenant en compte la spécification et la mesure des états de surface tridimensionnels. La norme définit notamment les paramètres surfaciques d'état de surface et

les opérateurs de spécification associés. Elle décrit également les technologies de mesure applicables, les méthodes pour les étalonner ainsi que les étalons matérialisés ou les étalons logiciels nécessaires [Blateyron 2006]. La partie 2 de la norme ISO 25178 qui spécifie les termes, définitions et paramètres applicables à la détermination de l'état de surface au moyen de méthodes surfaciques, et elle est la partie qui contient les paramètres d'état de surface 3D (figure 2.2).

Partie 1 – Indications sur les dessins	Partie 600 – Caractéristiques
Partie 2 – Termes, définitions et paramètres	Partie 601 – Profilomètre à contact
Partie 3 – Opérateurs de spécification	Partie 602 – Capteur confocal
Partie 6 – Classification des instruments	Partie 603 – Interféromètre PSI
Partie 70 – Étalons matérialisés	Partie 604 – Interféromètre WLI
Partie 71 – Format de fichier SDF	Partie 605 – Capteur point autofocus
Partie 72 – Format de fichier X3P	Partie 606 – Microscope à variation de
	Partie 607 – Microscope confocal
	Partie 700 – Étalonnage

Figure 2.2 Parties de la norme [Blateyron 2006]

2.2.2 Caractéristiques de l'état de surface

Quel que soit le procédé de fabrication et la méthode d'usinage ainsi que les outils utilisés et le matériau à usiner, la surface finie n'est pas parfaitement lisse. Elle présente de nombreuses irrégularités, micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne "moyenne" et sont classées en deux catégories : des aspérités ou "pics", et des cavités ou "creux". L'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité.

2.2.2.1 Types de défauts

Les défauts possibles d'une surface peuvent être divisés en quatre catégories, en allant du plus grand au plus petit (Figure 2.3).

- **Défaut d'ordre 1** : Ils correspondent aux défauts géométriques des surfaces : planéité, rectitude, circularité, etc.
- **Défaut d'ordre 2** : Ils sont relatifs aux ondulations, sortes de collines et de vallées successives, inscrites dans le profil et engendrées par les vibrations, déformations des machines, traitements thermiques, etc.
- **Défaut d'ordre 3** : Ce sont les stries de rugosité, sortes de sillons tracés avec régularité dans le relief des ondulations par les outils de coupe.

- **Défaut d'ordre 4** : Plus irréguliers, parfois accidentels, ils correspondent à des arrachements de matière, fente, etc.

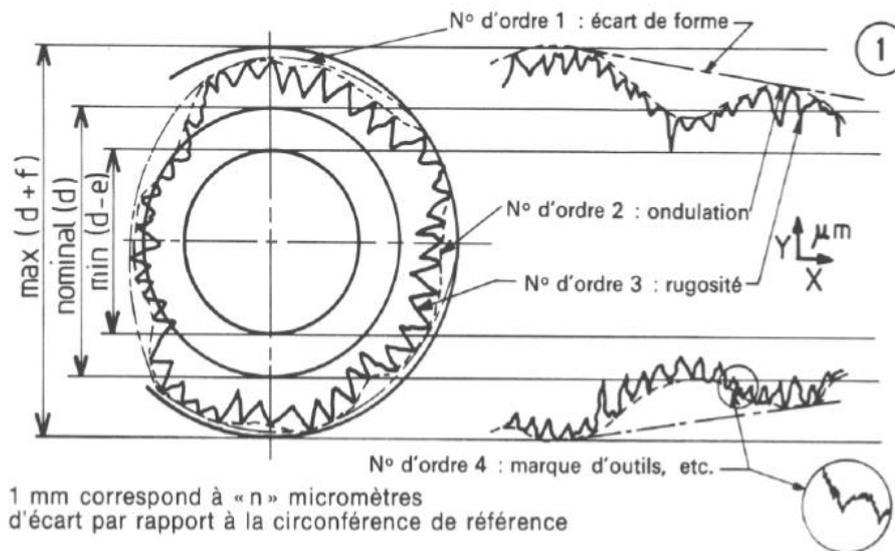


Figure 2.3 Défauts géométrique

2.2.2.2 Types de profils

D'après la norme ISO 3274, le profil est divisé en quatre types :

- Profil brut : profil résultant de l'intersection de la surface et d'un plan spécifié (figure 2.4).
- Profil primaire : Profil issu de profil brut après application du filtre de longueur d'onde courante λ_c qui sépare les composantes de rugosité des composantes d'onde encore plus courantes (arrachements) présentes sur la surface et après optimisation aux moindres carrés qui redresse le profil brut. Il est la base du traitement numérique du profil au moyen d'un filtre de profil et du calcul des paramètres [Bouchareine 1999].
- Profil de rugosité : Profil dérivé du profil primaire par suppression des composantes de grande longueur d'onde (ondulation) en appliquant le filtre de profil λ_g qui sépare les composantes de rugosité des composantes d'ondulation.
- Profil d'ondulation : Profil dérivé du profil primaire par application successive des filtres de profil λ_c et λ_g . Ce profil est ainsi intentionnellement modifié et sert à l'évaluation des paramètres d'ondulation.

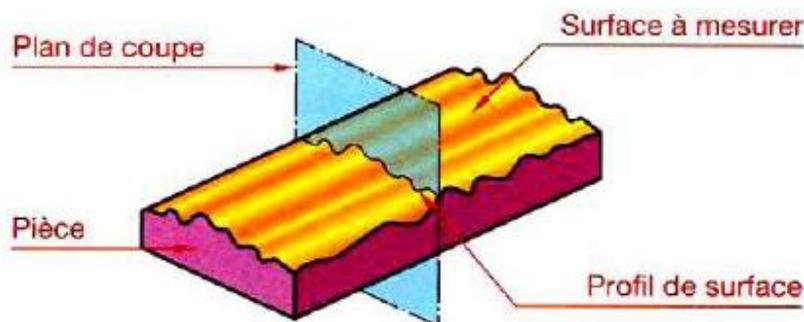


Figure 2.4 Profil brut

2.2.2.3 Caractéristiques de l'état d'une surface réelle

Une surface réelle est caractérisée par plusieurs termes à définir :

- Longueur d'évaluation (l_n) : Longueur, mesurée suivant la direction générale du profil (figure 2.5).
- Longueur de base (l_r) : Partie de la longueur d'évaluation utilisée pour séparer les irrégularités du profil.
- Ligne enveloppe supérieure : Segments de droites joignant les points les plus hauts des saillies locales du profil (figure 2.6).
- Ligne moyenne : C'est la droite ayant la direction générale du profil et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base, la somme des carrés des écarts à partir de cette ligne soit minimale.

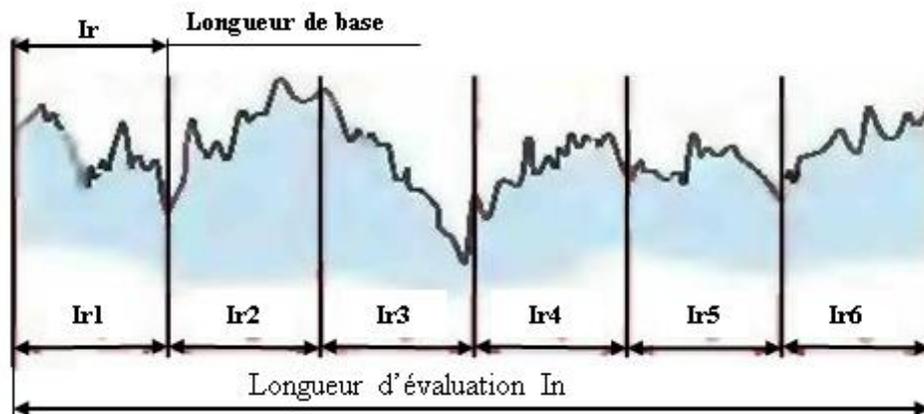


Figure 2.5 Longueurs d'évaluation et de base [Bouchareine 1999]

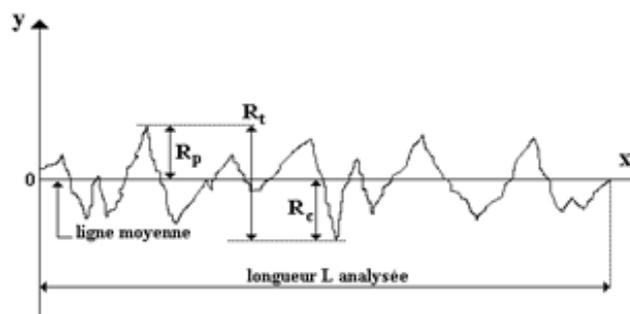
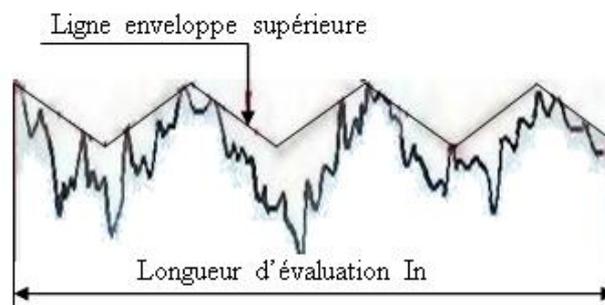


Figure 2.6 Ligne enveloppe supérieure et ligne moyenne [Bouchareine 1999]

2.2.3 Paramètres de l'état de surface

Dans la norme ISO 25178, tous les paramètres surfaciques 3D commencent par la lettre capitale S ou V. Contrairement aux paramètres 2D, il n'y a pas de préfixe reflétant la nature de la surface filtrée permettant de savoir si on a affaire à un paramètre de rugosité, d'ondulation ou de profil primaire. Sur un profil, on a Pa, Ra et Wa, mais sur une surface on a seulement Sa, qui peut donc être tantôt un paramètre de rugosité ou d'ondulation, selon les opérations de filtrage appliquées en amont. Ce choix s'explique par la multiplicité des méthodes de filtrage à la disposition des métrologues. Ces filtres ne servent pas toujours à séparer l'ondulation de la rugosité mais altèrent parfois la surface de façon plus subtile.

2.2.3.1 Paramètres de l'état de surface 2D

Il existe une cinquantaine de paramètres de rugosité qui permettent la caractérisation des états de surface. Parmi ces paramètres il y en a qui sont normalisés, d'autres qui ont disparus et le reste qui est normalisé mais non utilisé.

a) Paramètres liés au motif du profil

Les paramètres de l'état de surface 2D qui sont liés au motif du profil sont classés comme suit :

- *Profondeur moyenne d'ondulation W* :

C'est la moyenne des distances saillies-creux des écarts du 2ème ordre (figure 2.7) et décrite par l'équation 2.1.

$$w = \sum_{i=1}^n (w_i/n), n \geq 3 \quad (2.1)$$

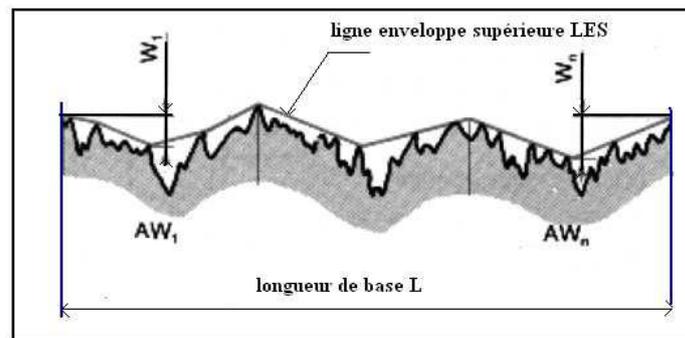


Figure 2.7 Profondeur moyenne et pas moyen d'ondulation

- *Pas moyen d'ondulation WP* :

C'est la moyenne des distances saillie-saillie des écarts des défauts de 2ème ordre et décrite par l'équation 2.2.

$$Wp = \sum_{i=1}^n (PW_i/n), n \geq 3 \quad (2.2)$$

- *Profondeur moyenne de rugosité R* :

C'est la moyenne des distances saillies-creux des écarts des défauts de 3ème et 4ème ordre (figure 2.8), décrite par l'équation 2.3.

$$R = \sum_{i=1}^n (R_i/n), n \geq 8 \quad (2.3)$$

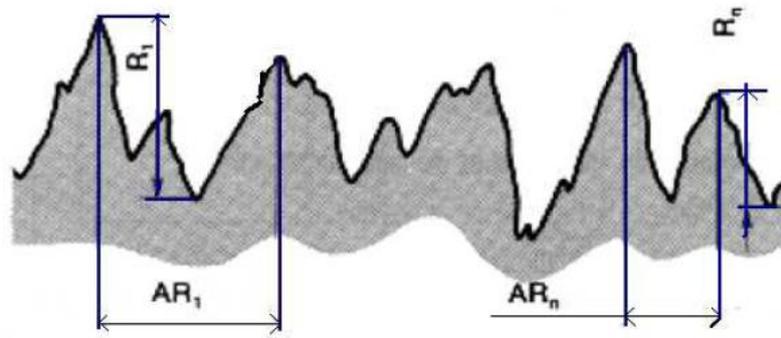


Figure 2.8 Profondeur moyenne et pas moyen de rugosité

○ *Pas moyen de rugosité R_p :*

C'est la moyenne des distances saillies-saillies des écarts des défauts de 3ème et 4ème ordre, décrite par l'équation 2.4.

$$R_p = \sum_{i=1}^n (R_{pi}/n), n \geq 8 \quad (2.4)$$

b) Paramètres hybrides

La classe de paramètres d'état de surface caractérisant un critère dépendant à la fois de l'amplitude et de l'espacement, comme les pentes, les courbures. Ces paramètres permettent de connaître la forme moyenne des sommets, soit aigus ou bien arrondis d'après la valeur moyenne de la courbure de la surface en ces points.

c) Paramètres liés à la ligne moyenne

Les paramètres de rugosité 2D qui sont liée à la ligne moyenne sont les plus utilisés dans la métrologie. Il existe une trentaine de ces paramètres, les plus importants sont :

○ *Écart moyen arithmétique du profil (R_a):*

C'est la rugosité moyenne du profil sur une ligne. Elle représente l'écart absolu moyen des points de profil à partir de la ligne moyenne. Il est le paramètre de rugosité le plus utilisé. Si $y=f(x)$ est le profil mesuré à partir de la moyenne de référence en ligne, et 'L' est la longueur du profil en cours d'évaluation, alors R_a est défini par l'équation 2.5 :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (2.5)$$

Cependant, la fonction $f(x)$ n'est pas connue alors l'expression de R_a revient à calculer la moyenne des R_{ai} qui sont les écarts moyens arithmétiques pour chaque longueur de base ℓ (figure 2.9). Elle est décrite par l'équation 2.6.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum R_{ai} \quad (2.6)$$

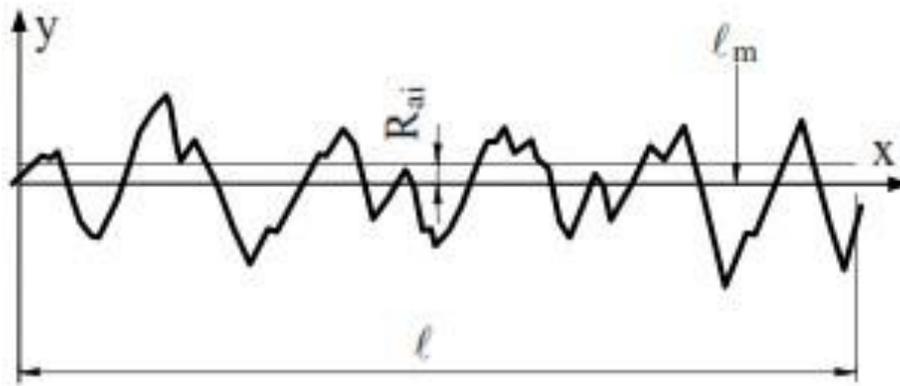


Figure 2.9 Écart moyen arithmétique du profil

Dans la longueur de base ℓ et si la fonction $y(x)$ est discontinue, le paramètre R_{ai} est donné par la formule suivante :

$$R_{ai} = \frac{1}{n} \sum_i^n |y_i| \quad (2.6 \text{ bis})$$

○ *Écart moyen quadratique du profil (R_q):*

C'est l'écart quadratique moyen d'un profil sur une ligne moyenne. R_q est un paramètre important qui est assez récent défini par l'équation 2.7 :

$$R_q = \frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx \quad (2.7)$$

Sur la longueur d'évaluation l , nous avons l'équation 2.8 :

$$R_q = l \sum R_{qi} \quad (2.8)$$

Avec R_{qi} la moyenne quadratique des valeurs des ordonnées $y(x)$, à l'intérieur d'une longueur de base ℓ .

○ *Hauteur maximale du profil (R_t):*

C'est la somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, et de la plus grande des profondeurs de creux du profil à l'intérieur d'une longueur d'évaluation. C'est un paramètre très sensible qui peut s'affecter par la moindre égratignure. R_{yi} est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux sur la longueur de base l (figure 2.10), la détermination de R_t sur la longueur d'évaluation revient donc à déterminer la valeur maximale des R_{yi} .

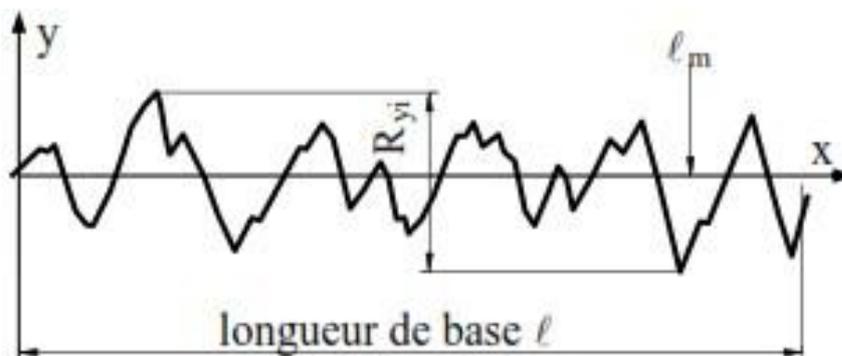


Figure 2.10 Hauteur maximale du profil

○ Paramètres R_p et R_v :

Ces paramètres illustrés sur les Figures 2.11 et 2.12 sont un sous-ensemble de R_t , ils se réfèrent à la distance de la ligne moyenne au point le plus élevé ou le plus bas respectivement, sur un profil numérisé.

$(R_p)_i$ est la distance du point le plus haut à la ligne moyenne ℓ_m , la hauteur maximale sur la longueur d'évaluation l est décrite par l'équation 2.9 :

$$R_p = \frac{1}{n} \sum R_{p_i} \quad (2.9)$$

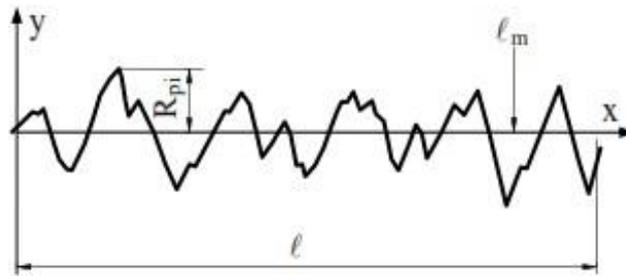


Figure 2.11 Représentation de paramètre d'état de surface R_p

$(R_v)_i$ est la distance du point le plus bas à la ligne moyenne ℓ_m . C'est le creux maximal sur la longueur d'évaluation qui correspond à y_v sur la figure 2.12 et décrit par l'équation 2.10.

$$R_v = \frac{1}{n} \sum R_{v_i} \quad (2.10)$$

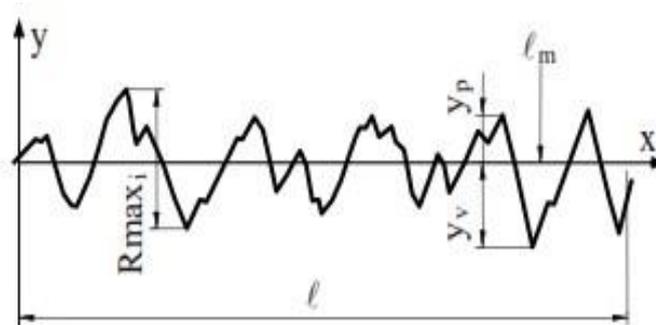


Figure 2.12 Représentation du paramètre d'état de surface R_v

○ Hauteur des irrégularités sur 10 points (R_z):

R_z illustrée sur la Figure 2.13, représente la moyenne des hauteurs de 10 points de la surface, 5 points les plus hauts et 5 points les plus bas. À noter que l'ISO et DIN définissent ce paramètre différemment.

$$R_{z_i} = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{p_i} + \sum_{i=1}^5 |y_{v_i}|}{5} \quad (2.11)$$

Rzi est déterminée en prenant 5 saillies les plus hautes et 5 creux les plus bas. Sur la longueur de base, nous avons l'équation 2.12 :

$$Rz = \frac{1}{n} \sum Rzi \quad (2.12)$$

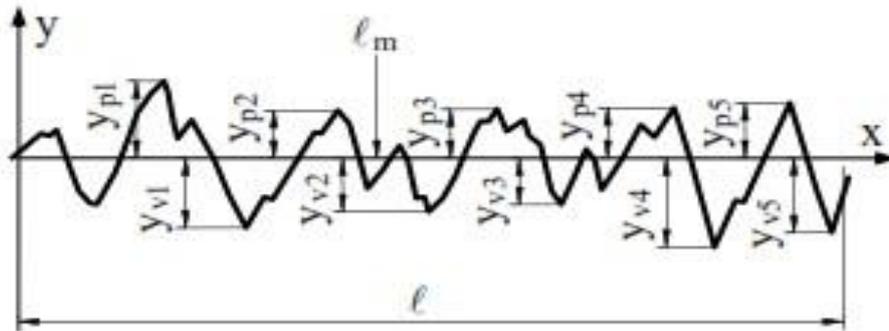


Figure 2.13 Hauteur des irrégularités sur 10 points

- *Facteur d'asymétrie du profil évalué (Rsk):*

Quotient de la moyenne des cubes des valeurs des ordonnées $y(x)$ par le cube du paramètre Rq à l'intérieur d'une longueur de base :

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^3(x) dx \right] \quad (2.13)$$

Ce paramètre représente une mesure de l'asymétrie de la courbe de distribution de l'amplitude.

- *Facteur d'aplatissement du profil évalué (Rku):*

Quotient de la moyenne des valeurs à la puissance 4 des ordonnées $y(x)$ par la valeur à la puissance 4 du paramètre Rq à l'intérieur d'une longueur de base :

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^4(x) dx \right] \quad (2.14)$$

Ce paramètre représente l'aplatissement de la courbe de distribution de l'amplitude.

- *Taux de longueur portante (Tp):*

Ce terme fréquemment utilisé en tribologie signifie l'étude de contact entre deux pièces. Le taux de longueur portante est le rapport entre la somme des longueurs portantes du profil à une profondeur donnée et la longueur d'évaluation du profil.

La longueur portante Tp du profil (Figure 2.14) est donnée par :

$$(Tp)_c = \frac{\eta}{l}, \eta = b_1 + b_2 + \dots + b_n \quad (2.15)$$

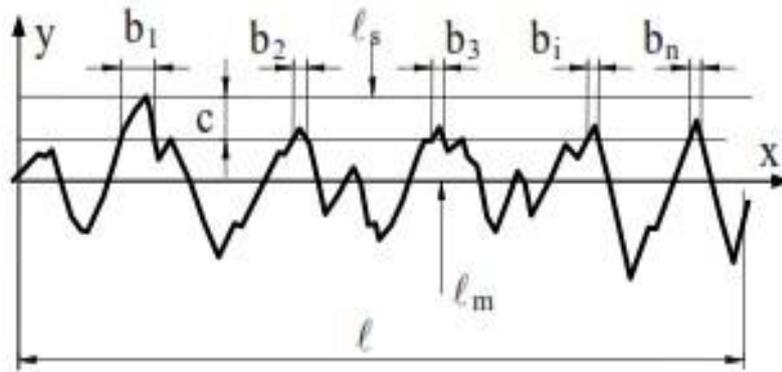


Figure 2.14 Taux de longueur portante

2.2.3.2 Paramètres de l'état de surface 3D

Selon la norme ISO 25178-2-2012, les paramètres 3D les plus répondus en métrologie sont :

a) Amplitude moyenne de la surface (rugosité moyenne S_a)

Elle représente la moyenne arithmétique de la valeur absolue de l'ordonnée à l'intérieur d'une zone de définition (A) (figure 2.15).

$$S_a = \frac{1}{A} \iint |Z(x, y)| dx dy \quad (2.16)$$

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

$$S_a = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |z(x_i, y_j)| \quad (2.17)$$

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

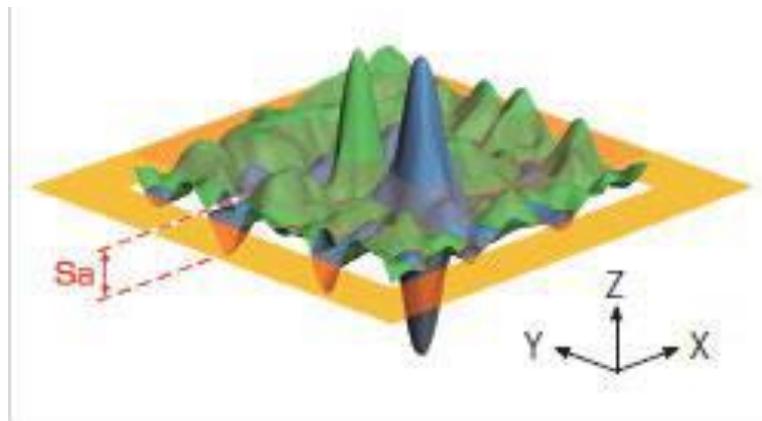


Figure 2.15 Représentation de la moyenne arithmétique S_a

b) Rugosité moyenne quadratique de la surface (S_q)

Moyenne quadratique des valeurs des ordonnées à l'intérieur d'une zone de définition (A) (figure 2.16).

$$Sq = \sqrt{\left(\frac{1}{A}\right) \iint z^2(x,y) dx dy} \quad (2.18)$$

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |Z^2(x_i, y_j)|} \quad (2.19)$$

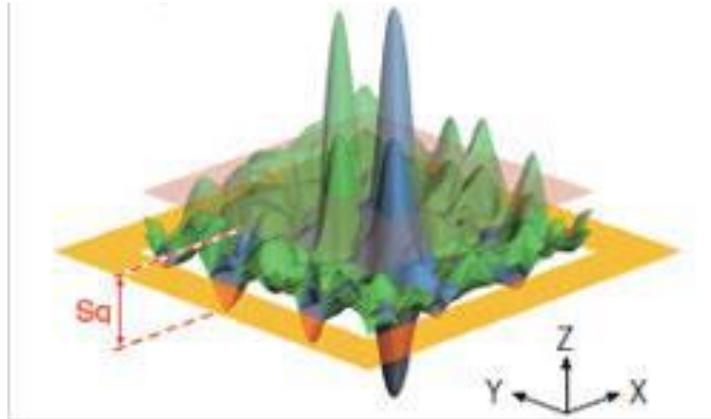


Figure 2.16 Représentation de la moyenne quadratique Sq

c) Facteur d'asymétrie de la surface (Ssk)

Quotient de la moyenne des cubes des valeurs des ordonnées par le cube du paramètre Sq à l'intérieur d'une zone de définition (A).

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[\frac{1}{A} \iint z^3(x,y) dx dy \right] \quad (2.20)$$

Ce qui implique :

$$Ssk = \frac{1}{mnSq^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |z^3(x_i, y_j)| \quad (2.20 \text{ bis})$$

Ce paramètre est une mesure de la forme de la distribution.

d) Facteur d'aplatissement de la surface (Sku)

Quotient de la moyenne des valeurs à la puissance quatre des ordonnées par la valeur à la puissance quatre du paramètre Sq à l'intérieur d'une zone de définition (A).

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[\frac{1}{A} \iint z^4(x,y) dx dy \right] \quad (2.21)$$

$$Sku = \frac{1}{mnSq^4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z^4(x_i, y_j) \quad (2.22)$$

Ce facteur caractérise la rapidité de la hauteur de la distribution. La surface Gaussienne a un facteur de 3.0. Une surface avec une distribution étroite a un facteur plus grand que 3. Une combinaison de ce facteur et le facteur d'asymétrie peut identifier des surfaces avec les sommets plats et les rainures profondes (portée des surfaces), c'est stable avec les changements dans l'intervalle de l'échantillonnage.

e) Paramètres S_p , S_v

S_p est la plus grande valeur de hauteur de pic à l'intérieur d'une zone de définition A (figure 2.17).

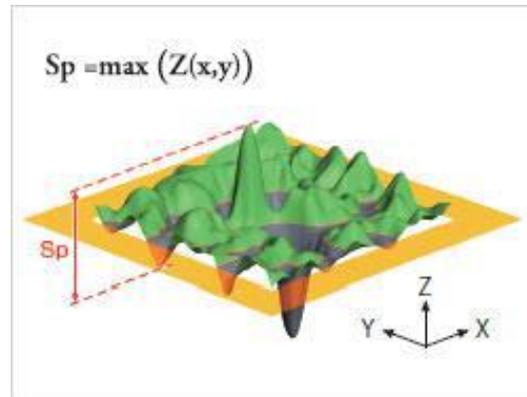


Figure 2.17 Représentation graphique de S_p

S_v est la plus petite valeur de profondeur de fosse à l'intérieur d'une zone de définition A (figure 2.18).

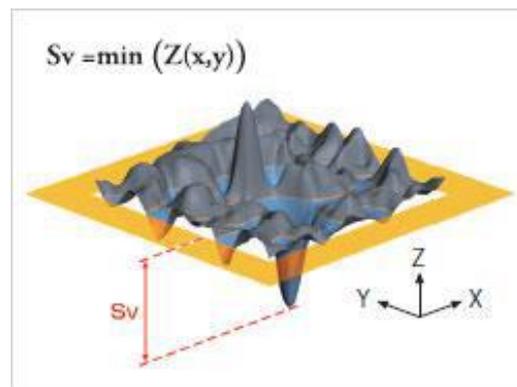


Figure 2.18 Représentation graphique de S_v

f) Hauteur de dix points de la surface (S_z)

S_z représente la moyenne des hauteurs de 10 points de la surface, 5 points les plus hauts et 5 points les plus bas à l'intérieur d'une zone de définition (figure 2.19).

$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 z_{pi} + \sum_{i=1}^5 |z_{vi}|}{5} \quad (2.23)$$

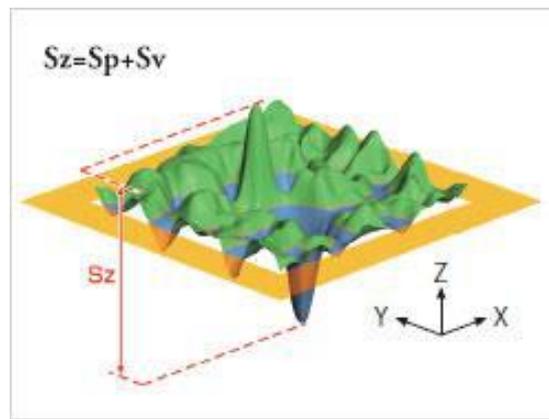


Figure 2.19 Représentation graphique de Sz

2.3 Méthodes de mesure des états de surface en métrologie dimensionnelle

La métrologie dimensionnelle a un rôle très important dans l'industrie, car elle permet de contrôler et de mesurer les pièces en cours et après la fabrication afin de valider le respect de ces pièces aux cotations et aux tolérances exigées par le concepteur. Cette métrologie donne aussi des spécifications sur les états de surfaces pour décrire les irrégularités et les défauts de ces surfaces par rapport à la surface idéale qui en fait, n'existe pas. L'avancement de la métrologie a aussi permis d'automatiser la prise de mesure à travers divers appareils dans le but d'aboutir aux valeurs conventionnellement vraies de la grandeur désirée.

La mesure des états de surfaces se fait à travers divers appareils de mesure qui peuvent être divisés en 2 méthodes :

- Méthode mécanique : est dite méthode avec contact. Elle est couramment utilisée dans l'industrie, car elle comporte des appareils à palpeur.
- Méthode optique : est dite méthode sans contact, car elle comporte des appareils à laser.

Les appareils de mesure sont distingués en rugosimètre spécialement utilisé pour le calcul de rugosité, profilomètre, MMT, bras de mesure et aussi toutes sortes de microscopes électroniques et autres.

2.3.1 Méthodes mécaniques [Raphet 2005]

En raison de leurs simplicités et leurs grandes diversités, les méthodes mécaniques peuvent englober une vaste gamme de paramètres de rugosité, les instruments conventionnels de mesure de surfaces utilisant ces méthodes présentent certains inconvénients tels que :

- Technique relativement lente.
- La force du palpeur peut parfois endommager la surface.
- Limitation sur des secteurs de mesure.

Par contre, elles possèdent les avantages suivants :

- Souplesse pour s'adapter à une large diversité de forme.
- Très haute résolution dans la direction verticale.

2.3.1.1 Appareils à palpeur

Dans l'industrie, le moyen le plus utilisé pour la mesure d'état de surface est l'appareil de mesure à palpeur dit à contact. Selon son degré de perfectionnement, ce type d'équipement permet pratiquement la mesure de tous les paramètres d'états de surface.

La figure 2.20 représente, de façon schématique, un profilomètre dont les composants sont définis comme suit :

- Chaîne de mesure : chaîne fermée qui comprend tous les éléments mécaniques reliant la pièce à mesurer et la pointe du palpeur.
- Référence de guidage : composant de l'appareil qui guide le capteur dans le plan d'intersection selon une trajectoire théoriquement exacte (profil de référence), qui est généralement une ligne droite.
- Unité d'avance : composant qui assure le déplacement du capteur le long de la référence de guidage, ce dernier transmettant la position horizontale de la pointe du palpeur sous forme de coordonnée horizontale du profil.
- Capteur : composant qui contient l'élément de palpation, avec la pointe du palpeur, et le transducteur.
- Élément de palpation : élément qui transmet le déplacement de la pointe du palpeur au transducteur.
- Pointe du palpeur : élément constitué d'un cône nominale circulaire ayant un angle défini et d'une extrémité nominale sphérique avec un rayon défini.
- Transducteur : dispositif qui convertit les coordonnées verticales du profil tracé par rapport au profil de référence en un signal utilisé dans l'appareil.
- Amplificateur : dispositif qui effectue une transformation du signal dans l'appareil sans provoquer de modification intentionnelle du profil.
- Convertisseur analogique-numérique (ADC) : dispositif qui convertit le signal de l'appareil en valeurs numériques.

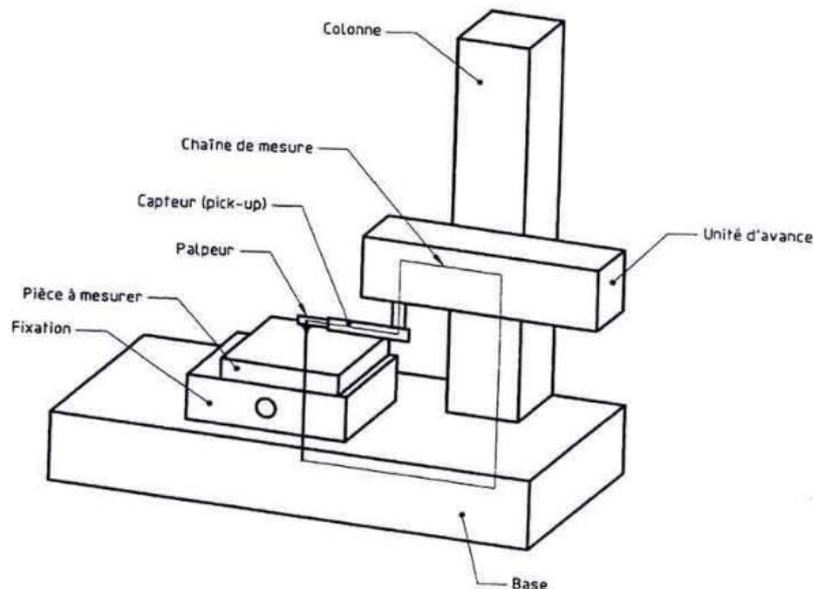


Figure 2.20 Représentation schématique d'un appareil à palpeur [Raphet 2005]

2.3.1.2 Principe de fonctionnement des appareils à palpeur

Le transducteur transforme en une tension proportionnelle la composante verticale des mouvements du palpeur qui se déplace sur la surface rugueuse. Le profil de la surface analysée est ensuite enregistré. Le capteur est associé à un ensemble électronique qui effectue l'amplification, l'échantillonnage, l'acquisition et la conversion du signal, il est alors transmis vers un micro-ordinateur, qui calcule les paramètres de rugosité.

Cet instrument a fait l'objet de nombreuses publications qui décrivent des possibilités d'amélioration. La sensibilité peut être abaissée à quelques centièmes de nanomètre et le bruit instrumental à 0.03 nm. Le stylet (pointe de palpeur) peut avoir diverses formes et en particulier, celle d'un cône dont la pointe a un rayon de 0.5 μm . la force d'appui bien réglée peut être inférieure à 10 μN .

La résolution spatiale dépend de la pente des défauts et de la géométrie du stylet, elle a une limite théorique de 0.1 μm . la fidélité de mesure (écart entre deux mesures consécutives sur la même zone d'un échantillon) est de l'ordre de quelques centièmes de nanomètre sur la valeur Rms de la rugosité.

La mesure avec les appareils à palpeur est très utilisée en industrie cependant elle comporte quelques inconvénients tels :

- Le profil de rugosité mesuré ne constitue pas une représentation parfaite du profil réel de la surface (figure 2.21). Il est seulement la convolution de la forme de la pointe et celle du relief. C'est le cas notamment de travailler sur des surfaces creuses et des surfaces rentrantes.
- La force d'appui de la pointe peut influencer le résultat d'une mesure de rugosité, car, si cette force est trop grande, le stylet peut endommager la surface étudiée et dans certains cas on risque de casser la pointe et avoir des résultats faux.

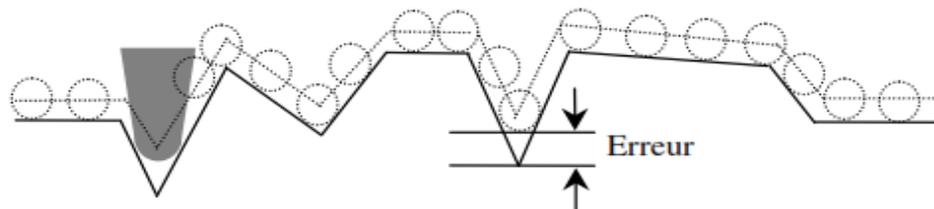


Figure 2.21 Déplacement de la pointe du palpeur (effet du rayon de courbure) [Raphet 2005]

2.3.1.3 Mesure tridimensionnelle

La caractérisation de l'état d'une surface ne peut se limiter à l'analyse d'une trajectoire. L'objectif recherché est la caractérisation et l'analyse de l'intégralité d'une surface (3D) ou d'une portion de surface et pour connaître son relief, sa texture et ses défauts de surface.

Les avancées technologiques repoussent toujours la connaissance et la mesure des états de surface. Ces dernières années ont vu un grand développement d'équipements destinés à la quantification de la topographie de surface, grâce à l'évolution des appareils de mesure à contact (ajout d'un troisième axe de mesure), de la microscopie à haute résolution et du traitement de l'information et du traitement d'image.

La mesure tridimensionnelle est assurée par les MMT (Machine à Mesurer Tridimensionnelle) comme illustrée sur la figure 2.22. Elles sont des machines qui servent à saisir et à traiter l'information. Elles sont équipées de palpeur se déplaçant grâce à trois glissières de directions orthogonales. La mesure est effectuée lorsque le palpeur vient au contact de la surface réelle

(figure 2.23). Lors de chaque accostage, le calculateur mémorise les coordonnées X, Y et Z du centre de la sphère de palpation (dans le cas fréquent où le palpeur se termine par une petite sphère). Les points palpés permettent de déterminer une image de la surface réelle. À partir des coordonnées saisies, le logiciel de traitement des données effectue des opérations mathématiques pour déterminer les valeurs des dimensions ou les spécifications que l'on cherche à connaître (par exemple, paramètres de rugosité 3D) ou à contrôler.

La mesure tridimensionnelle des états de surface dépasse le cadre du contrôle qualité des surfaces sur des produits industriels. L'image tridimensionnelle permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture des surfaces. Elle est destinée davantage à la recherche et à l'expertise et permet ainsi d'optimiser la fonction pour laquelle est destinée une surface : frottement, adhérence, étanchéité, lubrification, écoulement, etc.

Les problèmes rencontrés dans la mesure du profil de surface sont négligeables par rapport à ceux rencontrés dans la mesure tridimensionnelle qui sont communs à tous les instruments et sont comme suit :

- Maintenir des données de la hauteur précise entre les trajectoires.
- Adopter un modèle numérique approprié.
- Adopter un modèle d'échantillonnage qui permet à assez de zones d'être suffisamment couvertes.
- Maintenir une résolution suffisante pour détecter les défauts.



Figure 2.22 Machine de Mesure Tridimensionnelle

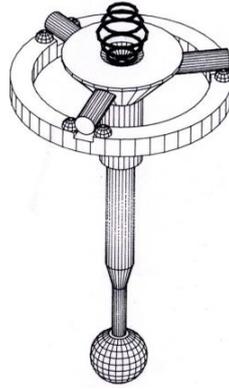


Figure 2.23 Tête d'un palpeur dynamique [Raphet 2005]

2.3.2 Méthodes optiques [Raphet 2005]

Ces méthodes sont très proches de la méthode par contact, à savoir qu'elles nécessitent l'exploration de la surface au moyen d'une série de trajectoires parallèles régulièrement espacées par déplacement de l'échantillon ou de la source.

2.3.2.1 Profilomètre laser

Pour un profilomètre laser, les coordonnées Z sont acquises à l'aide d'un capteur optique à source laser. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de la triangulation suivant que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet ou une trajectoire différente. La figure 2.24 illustre le principe d'un profilomètre laser. L'exploitation des données, le calcul des paramètres et la visualisation de la surface, se font avec les mêmes outils que ceux utilisés par la méthode avec contact.

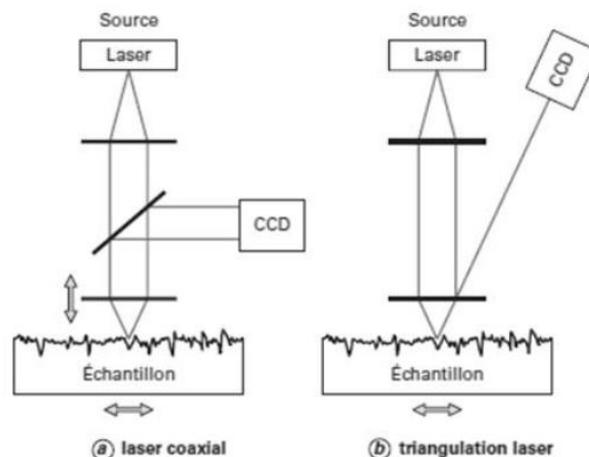


Figure 2.24 Méthodes par profilomètre laser [Raphet 2005]

L'interférométrie est habituellement utilisée pour la mesure d'une longueur donnée par comparaison de deux chemins optiques. La figure 2.25 montre d'une façon simplifiée de ce principe. La lumière d'une source est divisée à l'aide d'un miroir séparateur, une partie du

faisceau est dirigé sur la pièce, l'autre sur un miroir de référence. Après réflexion, les deux faisceaux sont de nouveau superposés au niveau du miroir séparateur.

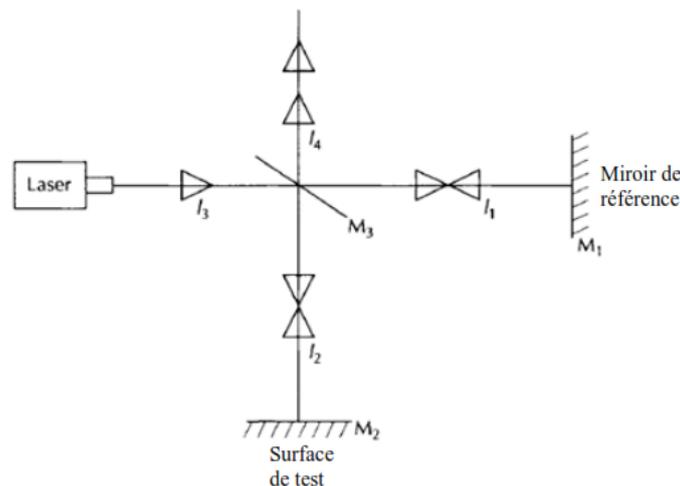


Figure 2.25 Principe de mesure interférométrique [Raphet 2005]

Le chemin de référence est $l_3 + l_1 + l_4$ tandis que le chemin d'essai (à mesurer) a une longueur $l_3 + l_2 + l_4$. La comparaison doit se faire entre l_1 et l_2 . Leurs combinaisons dépendent de leurs différences de phase parfois en les additionnant et parfois en les soustrayant sous une lumière cohérente.

2.3.2.2 Microscopie électronique

Un microscope électronique est un type de microscope qui utilise un faisceau de particules d'électrons pour illuminer un échantillon et en créer une image très agrandie. Le pouvoir séparateur d'un microscope optique (son grossissement) est limité par la longueur d'onde de la lumière visible, aucun détail de dimension supérieure à $0,2 \mu\text{m}$ ne peut être observé. Aussi l'utilisation de particules accélérées de plus courte longueur d'onde associée permet-elle d'augmenter le grossissement. Le choix d'électrons accélérés, pour produire un rayonnement de courte longueur d'onde, est déterminé par plusieurs critères dont :

- La masse faible de ces particules.
- Une source d'électrons est aisée à mettre en œuvre.
- Les électrons sont plus facilement focalisés que les particules plus lourdes.
- L'interaction des électrons avec la matière est plus faible que pour des particules.

Il existe deux variantes de microscope électronique :

- Microscopie électronique en transmission : La microscopie électronique en transmission MET (TEM en anglais pour Transmission Electron Microscopy) est une technique de microscopie où un faisceau d'électrons est « transmis » à travers un échantillon très mince. Les effets d'interaction entre les électrons et l'échantillon donnent naissance à une image, dont la résolution peut atteindre $0,08 \text{ nanomètre}$. Les images obtenues ne sont généralement pas explicites et doivent être interprétées à l'aide d'un support théorique.
- Microscopie électronique à balayage : Le microscope électronique à balayage (MEB) (SEM pour Scanning Electron Microscopy) permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe ($\times 10$) à celle du microscope électronique en transmission ($\times 500.000$ ou plus).

- Microscopie à sonde locale : L'introduction du concept de la microscopie de champ proche qui est à la base des microscopes à sonde a constitué une révolution dans le domaine des microscopies, différentes dans son principe des microscopies traditionnelles. Les microscopies à sonde locale (ou de champ proche) se développent en effet à partir des avancées scientifiques et techniques de la microscopie par effet tunnel. Utilisant toutes le balayage d'une pointe sonde à proximité d'un échantillon, elles fournissent des images qui sont des cartographies à très haute résolution de propriétés spécifiques de la surface de l'échantillon selon le type de sonde utilisé. Il existe deux variantes de microscope à sonde locale :
 - Microscope à effet tunnel : L'effet tunnel se manifeste lorsqu'une particule doit traverser une région de l'espace où son énergie totale est inférieure à son énergie potentielle (figure 2.26).
 - Le microscope à force atomique : Il prend en considération les interactions entre pointe et surface dans les conditions d'imagerie STM (scanning tunneling microscope). Ces interactions sont importantes et donnent lieu, selon les distances pointe-surface, à des forces répulsives ou attractives agissant sur la pointe (figure 2.27).

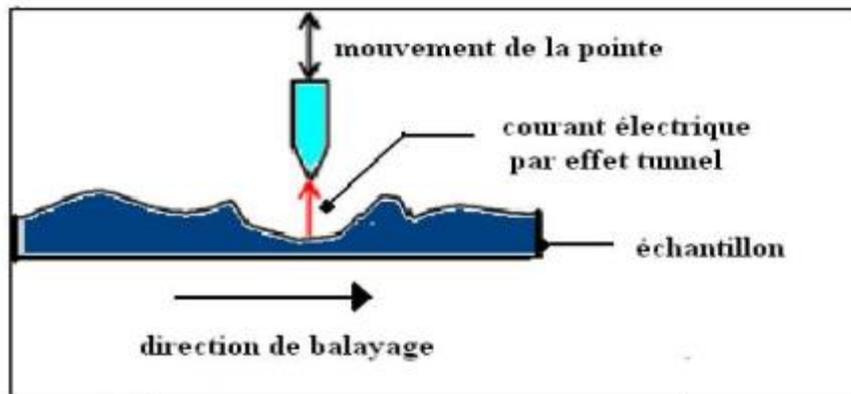


Figure 2.26 Schématisation d'un Microscope à effet tunnel [Raphet 2005]

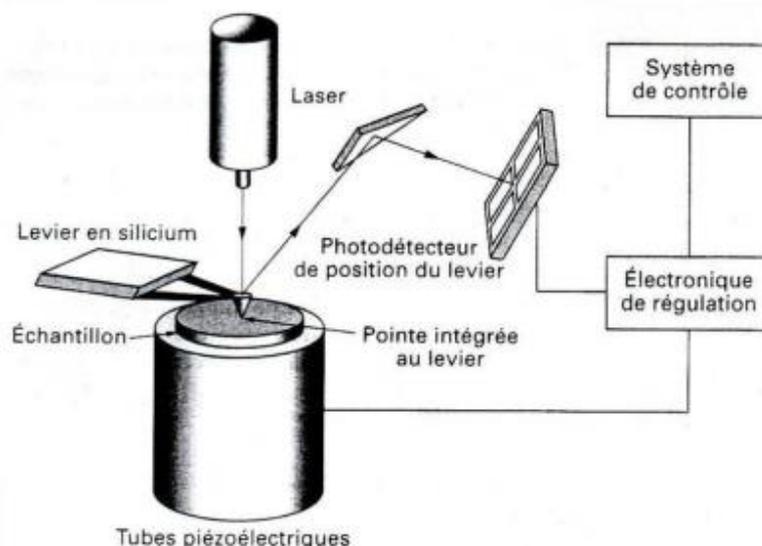


Figure 2.27 Schéma de fonctionnement d'un microscope à force atomique [Raphet 2005]

2.4 Prédiction de la topographie de surface

Les surfaces gauches sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de surfaces concaves, convexes ou à double courbure. La fabrication de ces surfaces par le procédé d'enlèvement de matière met les concepteurs en un double challenge : réaliser des surfaces à topologie complexe avec une qualité élevée en un minimum de temps. La clé de ce challenge est le développement des outils de simulation d'usinage. Ces outils permettent de représenter le phénomène de coupe le plus réaliste possible afin de prédire la topographie de la surface finie.

2.4.1 Simulation d'usinage

La simulation d'usinage multiaxes est un domaine très vaste et touche différents niveaux. Un travail de synthèse est présenté dans [Bouhadja et Bey 2014] proposant des critères de classification des travaux de recherche liés aux divers problèmes de la simulation d'usinage, ouvrant la voie à une explication optimale en répondant aux questions clés : Pourquoi ? À quelle échelle ? Et comment faire ? Le problème de la simulation est présenté dans la figure 2.28 comme suit :

- a. Catégories de simulation : Selon les objectifs visés, la simulation d'usinage est divisée en simulations géométriques et physiques.
- b. Échelles de simulation : L'étude de l'usinage est souvent abordée à l'aide d'une approche multi-échelles. Ceci permet de séparer les difficultés en limitant le nombre de phénomènes à prendre en compte et la taille du modèle à une échelle donnée. Trois niveaux d'analyse peuvent être distingués : humain, macroscopique et microscopique.
- c. Modèle de simulation (Pièce-Outil-Machine) : Pour simuler les phénomènes actuels dans la dynamique du système Pièce-Outil-Machine à l'échelle macroscopique, le modèle dynamique et le modèle géométrique sont introduits.

Dans ce travail, nous considérons la simulation géométrique à l'échelle macroscopique.

2.4.1.1 Simulation géométrique à l'échelle macroscopique

La littérature montre l'existence de différentes manières de classification pour la représentation géométrique en simulation à l'échelle macroscopique. Les méthodes utilisées sont classées comme suit : mode filaire, mode solide, mode espace objet, mode espace image.

a) Mode filaire

Dans ce mode de simulation, la trajectoire et la forme de la pièce à usiner sont affichées sous forme de fil de fer. Ce modèle a une structure de données simple et rapide. Il a été largement appliqué au début de la simulation de l'usinage. L'utilisation de ce modèle reste applicable aux pièces de géométrie simple.

b) Mode à base solide

Ce mode est une modélisation volumique de représentation 3D plus complète. Il est utilisé pour la simulation géométrique et pour la simulation physique. Ce mode permet une représentation géométrique très précise, mais coûteuse [Zhang et al. 2011]. Les deux modèles existants pour ce mode sont :

- Modèle CSG : Il définit la forme constructive d'un modèle 3D en utilisant les volumes primitifs tels que le cylindre, la sphère ...etc.

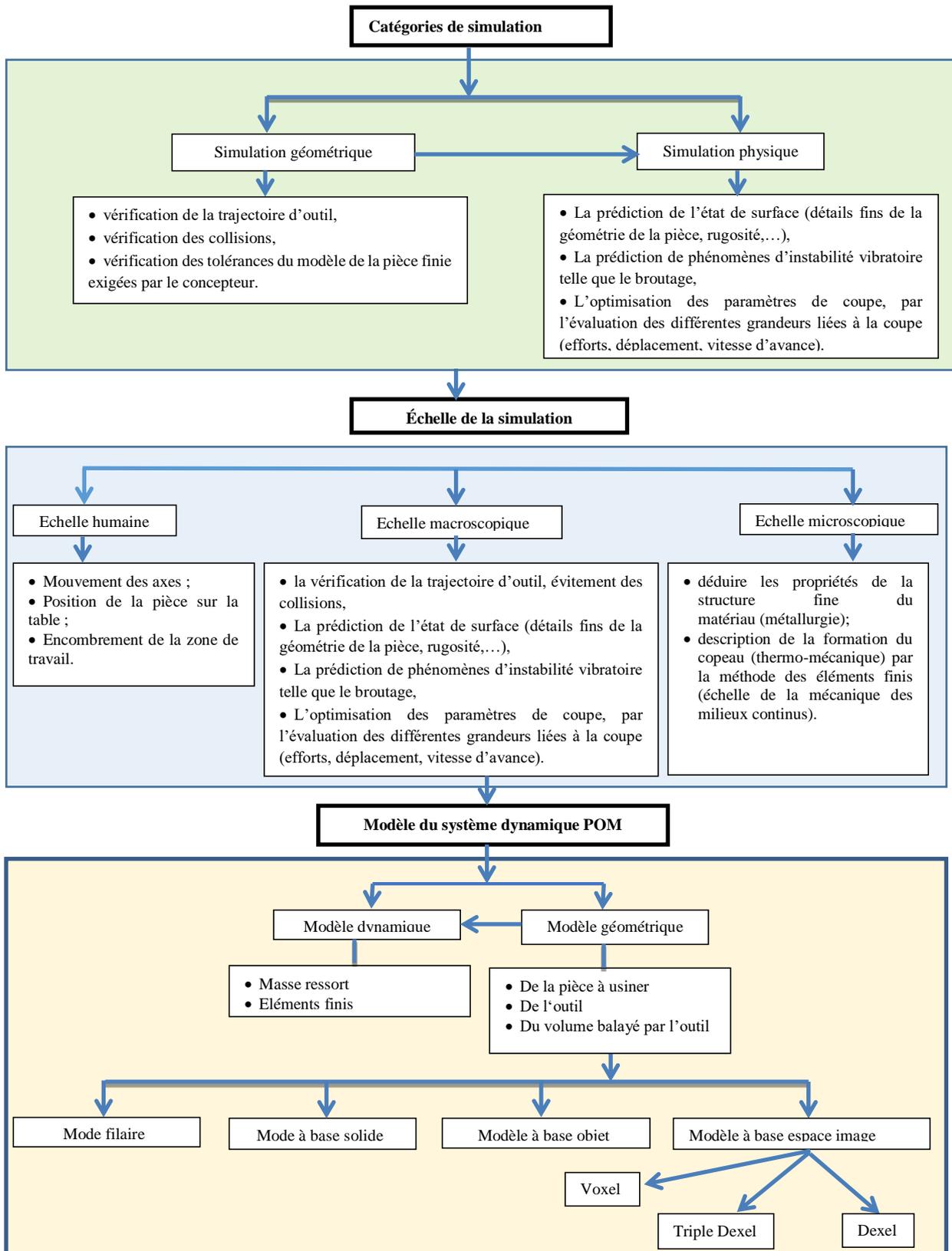


Figure 2.28 Classification des méthodes de simulation d'usinage [Bouhadja et Bey 2015]

- Bien que les opérations booléennes et la vérification de cohérence soient simples, la visualisation ou l'analyse des données peut exiger une transformation en un autre modèle B-Rep. Le coût approximatif de la simulation à l'aide de CSG est d'ordre $O(n^4)$ où n est le nombre de mouvements de l'outil [Voelcker et Hunt 1981]. Donc, la simulation d'usinage des surfaces gauches devient intraitable [Jerard et al. 1989].
- Modèle B-Rep : ce modèle est adapté à la visualisation. Contrairement au modèle CSG, le modèle B-Rep définit explicitement le volume par une liste de surfaces, arrêtes et sommets. Le coût de calcul est élevé en termes de temps, de stockage de données et de complexité. Pour un total de « n » mouvements de l'outil, le coût de la simulation est estimé à $O(n^{1.5})$ [Karunakaran et Shringi 2008].

c) Modèle à base objet

Dans une simulation d'usinage à base d'espace objet, les pièces sont représentées par un ensemble de points discrets avec des vecteurs ou des surfaces, avec des vecteurs ou certains éléments de volume. Il existe trois grandes méthodes de décomposition pour les modèles de simulation d'usinage espace objet :

- Méthode de Z-map : la méthode de Z_map consiste à décomposer le modèle de la pièce en plusieurs vecteurs 3D (Figure 2.29). Chaque vecteur commence par la valeur de la hauteur du brut. Pendant le processus de simulation, les mises à jour des hauteurs des vecteurs 3D sont relatives aux mouvements de l'outil. Dans ce cas, les opérations booléennes ont une seule dimension et par conséquent la simulation est très rapide.

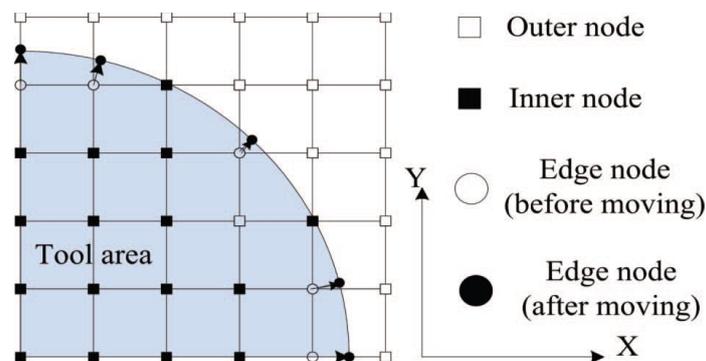


Figure 2.29 Méthode Z-map [Yun et al. 2002]

- Méthode de vecteur : cette méthode consiste à découper la surface selon des méthodes spécifiques pour avoir un ensemble de points. Pour chaque point est associé un vecteur dont les limites sont la surface nominale et la pièce brute. Ses vecteurs peuvent être orientés de deux manières (Figure 2.30) :
 - Suivant la normale à la surface (exacte) : dans ce cas, chaque vecteur est indépendant linéairement des autres vecteurs.
 - Suivant l'axe Z de l'outil (simplifiée) : dans ce cas, tous les vecteurs sont parallèles à l'axe Z. Ce cas s'adapte à l'usinage 03 axes.

Pour simuler l'usinage, les intersections des vecteurs avec l'enveloppe du volume balayé par l'outil doivent être calculées au fur et à mesure des déplacements de l'outil. La longueur et le

sens des vecteurs sont modifiés pour chaque déplacement élémentaire de l'outil. Pour détecter les zones non usinées, il suffit de vérifier la direction et la longueur des vecteurs :

- Direction positive : zone non usinée.
- Direction négative : usinage plus que nécessaire.
- Longueurs des vecteurs : s'ils ne sont pas dans les tolérances d'usinage, une correction est indispensable.

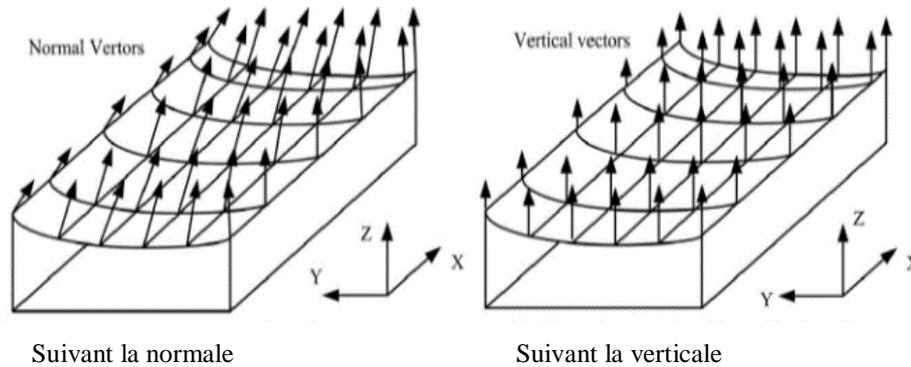


Figure 2.30 Orientation des vecteurs [Zhang et al. 2011]

- Méthode d'Octree : Elle représente la pièce à usiner dans une structure arborescente. Chaque nœud d'un arbre est subdivisé récursivement en huit nœuds enfants disjoints jusqu'à ce que la précision exigée à l'objet soit atteinte. Cette représentation en Octree hiérarchique offre à la simulation d'usinage CN une simplicité de calcul des opérations booléennes même lorsque la zone de coupe locale est complexe. Les auteurs [Kawashima et al. 1991], ont élaboré un modèle Octree étendu appelé Graftree (Figure 2.29) pour représenter plus fidèlement les objets 3D dans la simulation géométrique. Dans le cas de Graftree, chaque cellule limite a été décrite dans la forme de CSG avec certaines restrictions. Les auteurs [Kim et Ko 2005] ont utilisé la méthode de super-échantillonnage de l'ordinateur graphique pour améliorer le modèle d'octree.

d) Modèle à base espace image

Dans la simulation d'usinage en espace image, les pièces sont représentées par des profondeurs et des pixels (appelé model Dixel). Le modèle Dixel est l'extension du Z-buffer qui est utilisé pour l'élimination des surfaces cachées dans l'ordinateur. Il découle des limites de Z-map. Ce modèle est particulièrement performant. Il est directement issu des méthodes de représentation de l'imagerie et de rendu réaliste. La base de la méthode est de projeter une grille (soit un écran) selon une direction donnée sur la surface, suivant le point de vue choisi (figure 2.31 et 2.32). Elle s'adapte très bien à l'usinage à trois axes avec pour direction de projection, l'axe de l'outil, soit l'axe Z. Ainsi la construction de la surface est obtenue par intersection entre un ensemble de droites parallèles à Z et la surface. Les surfaces les plus adaptées ont une fonction qui réalise une bijection entre le plan de base XY et les points de la surface. Dans le cas d'un amas de surfaces, il n'est pas toujours possible d'usiner l'ensemble de l'amas. Pour chaque droite, on cherche toutes les intersections avec l'ensemble des surfaces, et on retient l'intersection la plus haute appartenant à la peau de la pièce, on n'usine ainsi que l'enveloppe externe de la pièce.

Des travaux importants basés sur le modèle de Dixel en fraisage par l'outil hémisphérique développé par, [Fussell et al. 2001, 2003]. Ils réalisent l'intégration de la simulation géométrique et la simulation physique pour la prédiction d'effort de coupe en usinage 03 et 05 axes. Selon leur constatation la force de coupe peut être prédite avec précision sauf dans des situations de condition de coupe non stable.

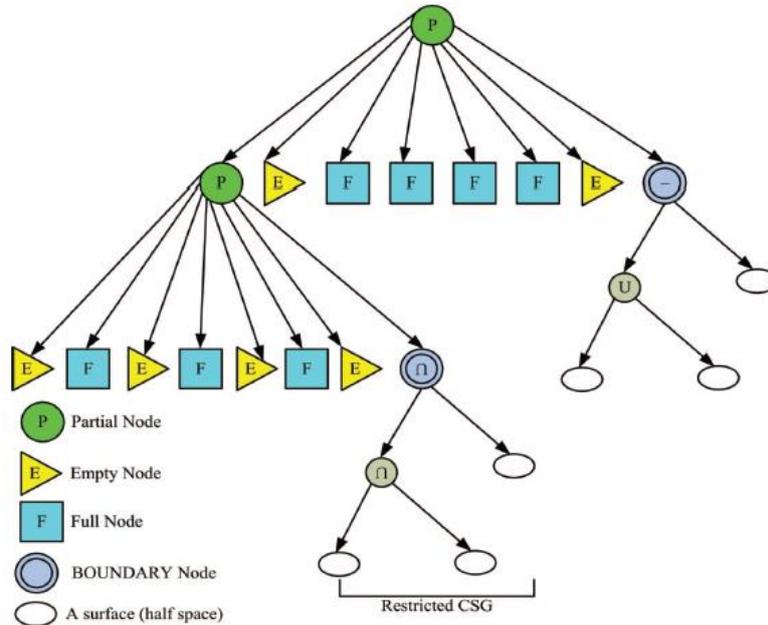


Figure 2.31 Modèle Graftree [Kawashima et al. 1991]

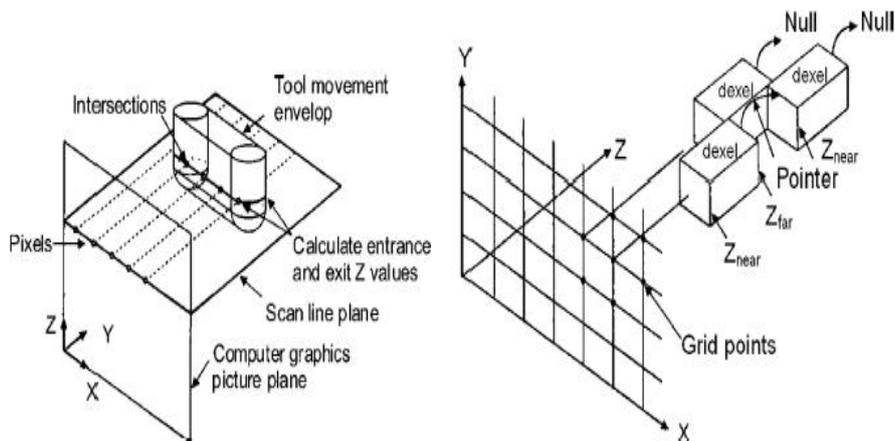


Figure 2.32 Simulation à base espace image [Karunakaran et al. 2010]

2.4.1.2 Simulation géométrique d'enlèvement de matière dans le système POM

Trois modèles sont à prendre en considération : modèles de la pièce, de l'outil et du trajet d'outil.

a) Modèle géométrique de la pièce

Trois grandes familles de représentations géométriques peuvent être dégagées :

- Le contour du volume (la frontière du domaine volumique) peut être représenté par une liste de points en projection sur un plan.
- Les domaines volumiques peuvent avoir pour représentation leurs frontières (surfaiques) : on parle alors du modèle B-Rep (figure 2.33).
- Le modèle géométrique peut aussi être un modèle volumique, il est possible d'utiliser entre autres trois modèles : des voxels , des dexels (figure 2.34) ou des triple-nailboard (« planches à clous dans les trois directions orthogonales ») (figure 2.35).

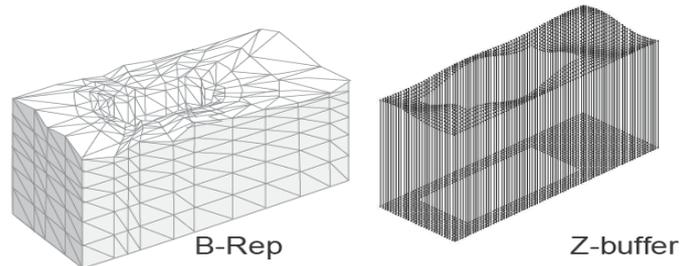


Figure 2.33 Deux modèles géométriques possibles pour une pièce avec un trou

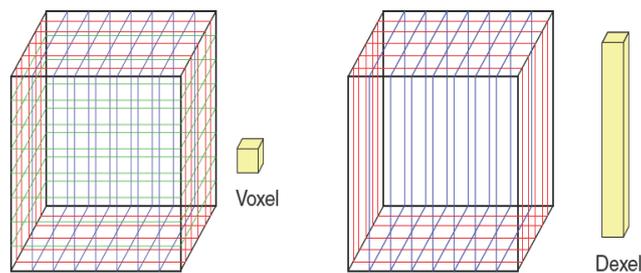


Figure 2.34 Représentation des voxels et des dexels [Assouline 2005]

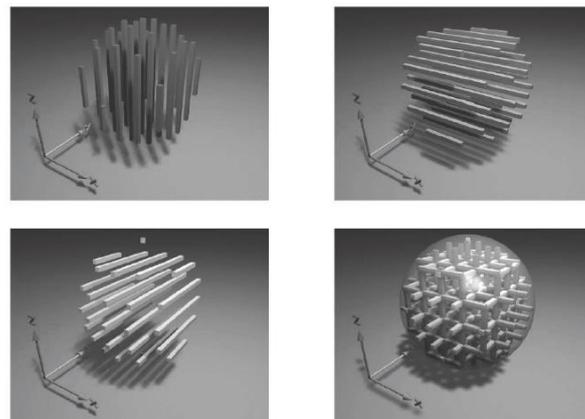


Figure 2.35 Représentations du modèle triple-nailboard [Weinert et Zabel 2004]

b) Modèle géométrique de l'outil

La modélisation géométrique de l'outil permet de générer la surface usinée et le calcul des grandeurs géométriques utilisées dans la loi de coupe. La géométrie de l'outil est généralement constante tout au long de l'usinage si on ne fait pas intervenir l'usure de l'outil.

Plusieurs axes de recherches ont été développés pour améliorer la modélisation à commencer par la prise en compte de géométrie d'outil plus complexe et réaliste. Cette problématique est complexe, car la modélisation requiert d'une part un modèle de loi d'effort de coupe et d'autre part une description géométrique de l'outil compatible avec le principe de la simulation.

La réponse a été trouvée dans les modifications développées pour le calcul des efforts statiques de coupe. Ainsi les simulations dédiées aux opérations de fraisage de profil se sont inspirées du modèle d'effort de coupe proposé par Kline et DeVor. Dans leurs travaux, les auteurs traitent les géométries d'outil complexe comme une somme d'outils élémentaires (figure 2.36).

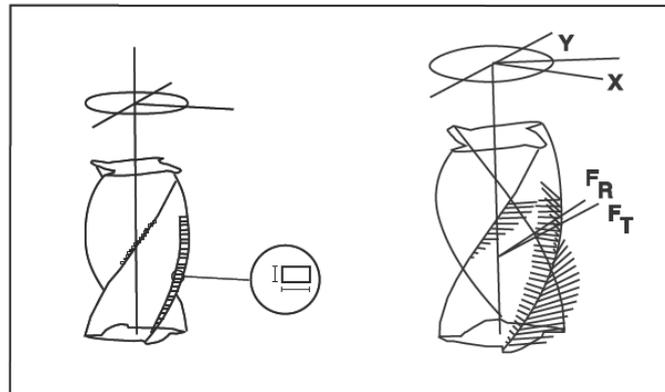


Figure 2.36 Décomposition de l'outil en outils élémentaires [Assouline 2005]

c) Modèle géométrique du volume balayé

La modélisation du volume balayé par l'outil est basée sur la représentation CSG (Constructive Solid Geometry) du solide d'enveloppe du trajet d'outil pour l'usinage 03 axes.

Plus récent les travaux se focalisent sur la génération du volume balayé par l'outil de coupe en usinage 05 axes, la difficulté est prononcée par la cinématique de la machine, où l'outil subit un mouvement de rotation et de translation simultanément (figure 2.37).

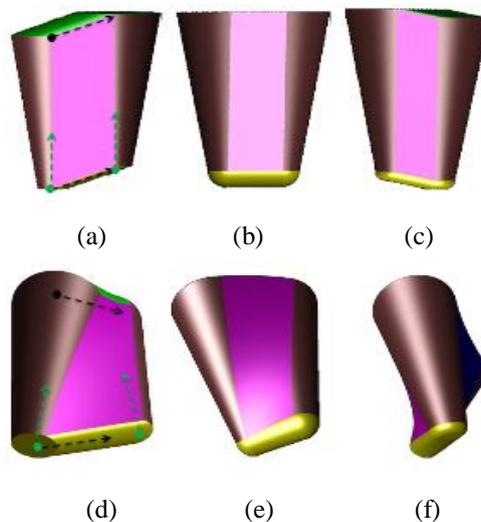


Figure 2.37 Représentation de l'enveloppe du volume balayé par l'outil conique

(a), (b) et (c) en 03 axes. (d), (e) et (f) en 05 axes [Lee et Nestler 2012].

2.4.2 Choix de la technique adoptée pour la représentation de la pièce à usiner

Afin d'introduire la notion de matière, les pièces sont modélisées par des volumes élémentaires de discrétisation à savoir : Dexels, Voxels et les Triples Dexels.

2.4.2.1 Voxel

Le Voxel (contraction de « volumetric pixel ») est un pixel en 3D (Figure 2.38). Il consiste à stocker une information colorimétrique avec ses coordonnées spatiales qui s'inscrivent plus généralement dans des espaces matriciels bien que les espaces vectoriels leur soient favorables. Son point faible est de nécessiter énormément de ressources, tant pour son stockage que pour son rendu. Aujourd'hui, la disponibilité de GPU a rendu possible d'obtenir un rendu en temps réel et l'interactivité avec les simulations voxels constituées de plusieurs milliards de voxels.

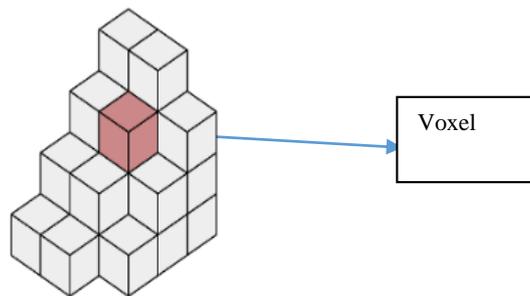


Figure 2.38 Model Voxels

2.4.2.2 Simple Dixel

Un Dixel est un parallélépipède caractérisé par sa section représentée par la forme de la cellule, sa hauteur représentée par la longueur du segment de type « matière » (voir figure 2.39). À partir de la section et de la longueur d'un Dixel, le volume du Dixel est calculé. Le volume total de l'objet est la somme des volumes de tous les Dexels. Le modèle de l'objet en Triple-Dexels est obtenu en combinant les Dexels créés dans les trois directions.

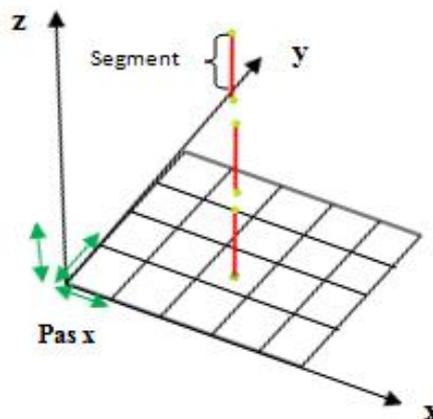


Figure 2.39 représentation d'un dixel sur le plan XY

2.4.2.3 Triple Dixel

Le modèle simple Dixel présenté dans la section 2.4.1.2 est limité dans les régions où les surfaces normales sont presque perpendiculaires à la direction du rayon (figure 2.40.a, figure 2.41.a et 2.41.c) [Peng et Zhang 2009]. Pour surmonter ce problème, une modélisation Triple-Dixel est présentée (figures 2.41.b, 2.41.d), qui est une extension de la modélisation simple Dixel. Ce modèle est construit par les rayons orientés par les trois directions orthogonales (X, Y et Z) pour discrétiser le modèle (Figure 2.40.b). Les auteurs de [Zhang 2008] montrent clairement que la surface générée à partir des données Triple-Dixel est plus précise que la surface reconstruite à partir des données simples Dixel, en utilisant la même résolution.

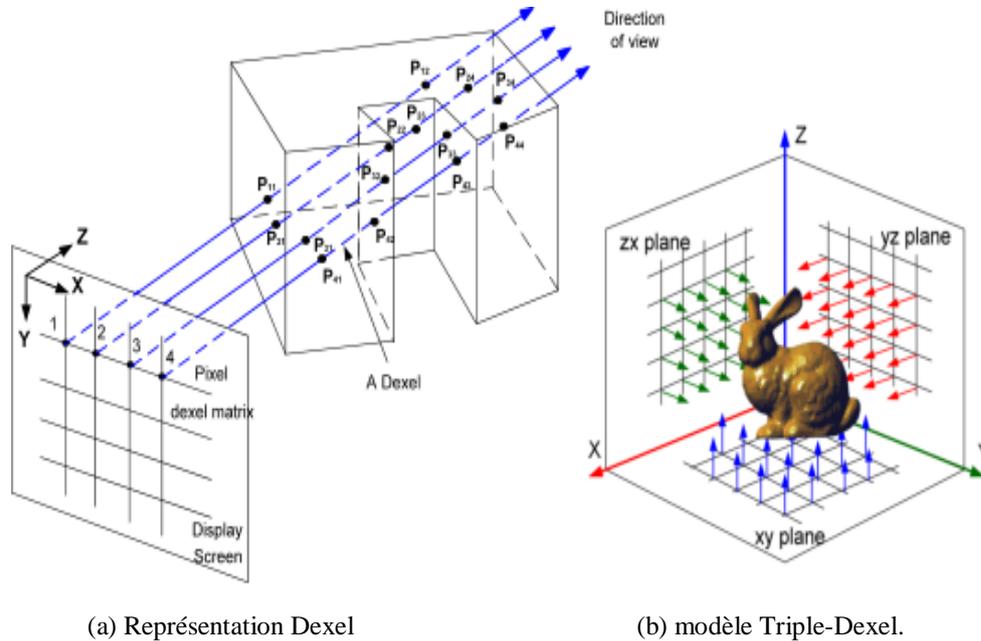


Figure 2.40 Représentation en Dixel et en Triple-Dixel [Peng et Zhang 2009].

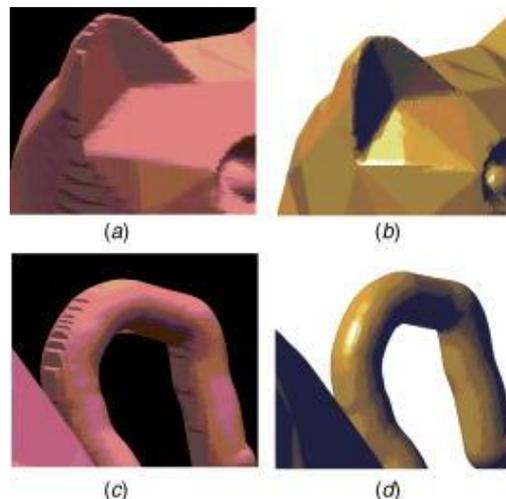


Figure 2.41 Comparaison entre les données en simple-Dixel et en Triple-Dixel [Zhang et Leu 2009].

2.4.2.4 Analyse

La modélisation Triple-Dexel est parfaitement adaptée pour les applications de simulation à base graphique en temps réel telles que la simulation d'usinage et la sculpture virtuelle [Zhang et Leu 2009]. Il a été montré qu'une méthode de reconstruction de surface à partir des données Triple-Dexel est plus rapide et précise que la méthode de Voxel. Dans nos travaux [Bouhadja et al. 2016], nous avons montré que la modélisation volumique des pièces de formes complexes par Triple-Dexels est meilleure que la modélisation par simple Dexels (figure 2.42 et 2.43). À partir du tableau 2.1 comparatif illustré ci-dessous, La technique de représentation en Triple-Dexels nous offre une meilleure solution pour le traitement de notre sujet, s'appuyant quant à lui sur un usinage 5axes.

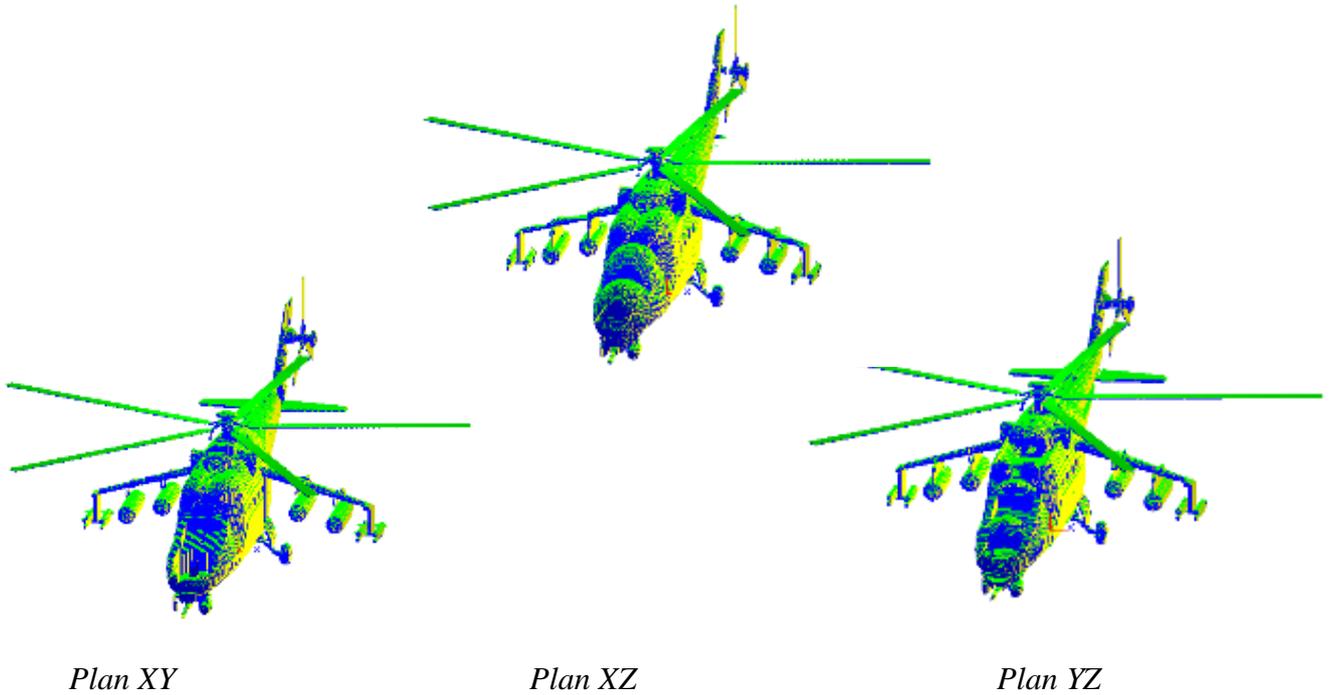


Figure 2.42 Représentation du simple Dexel dans chaque plan. [Bouhadja et al. 2016]

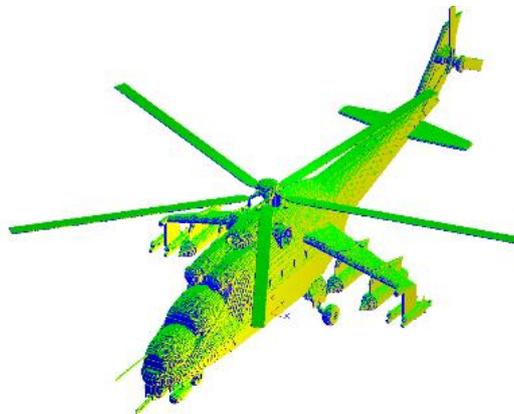
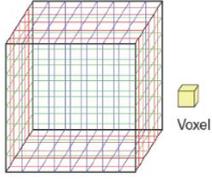
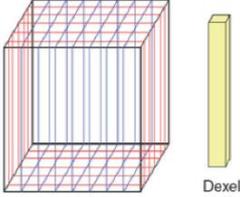
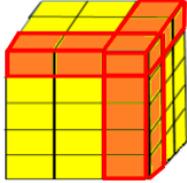


Figure 2.43 Représentation du modèles Triple-Dexel [Bouhadja et al. 2016]

Tableau 2.1 : Comparaison des différents modèles 3D

Modèles	Presentations	Comparaisons
Voxel		Leur point faible : nécessite énormément de ressources, tant pour leur stockage que pour leur rendu.
Doxel		Leur point faible : elle ne prend pas en charge de manière cohérente, les courbures et les évidements de la pièce à usiner.
Triple Doxel		Pour surmonter ces problèmes, la modélisation Triple- Doxel est présentée, qui est une extension de la modélisation simple Doxel.

2. 3 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons introduit la caractérisation de la topographie des surfaces qui est définie par des paramètres représentant la nature 3D de la rugosité de surface selon la norme ISO 25178-2, et afin de recenser les outils de quantification des défauts de fabrication, nous avons présenté, d'une part, les méthodes de mesure 3D (métrologie dimensionnelle) et les divers appareils de mesure associés à ces méthodes.

D'autre part, nous avons présenté les approches de prédiction de la topographie fondée sur la simulation virtuelle de l'usinage dont le principe de base est celui de la représentation du phénomène de coupe le plus réaliste possible. Cette technique est encore fortement pénalisée par les lacunes dans la connaissance de la coupe. Ce domaine est très vaste et touche différents niveaux. Une classification des méthodes de simulation est décrite et complétée par une brève comparaison entre les modèles de représentation volumique des pièces pour le processus d'enlèvement de matière (Doxel, Voxel, Triple-Doxel).

Ce chapitre est conclu par la sélection du modèle Triple-Doxel pour la modélisation volumique de la pièce à usiner en simulation géométrique à l'échelle macroscopique dans le système pièce-outil-Machine. Cette modélisation est appropriée à l'approche de résolution de la prédiction de la topographie de surface gauche qui sera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 3

Prédiction de la topographie
3D des Surfaces gauches par la
simulation d'enlèvement de
matière

3.1 Introduction

Les surfaces gauches sont caractérisées par une topologie complexe composée d'un ensemble de surfaces concaves, convexes ou à double courbure. La fabrication de ces surfaces par le procédé d'enlèvement de matière met les concepteurs en un double challenge, réaliser des surfaces à topologie complexe avec une qualité élevée en un minimum de temps. La clé de ce challenge est le développement des outils de simulation d'usinage. Ces outils permettent de représenter le phénomène de coupe le plus réaliste possible afin de prédire la topographie de la surface finie.

L'objet de ce chapitre est de proposer et implémenter une approche de prédiction de la topographie 3D des surfaces gauches appropriée à la problématique définie dans le premier chapitre (figure 1.34). L'approche proposée porte sur le cas des défauts d'usinage par la simulation d'enlèvement de matière où l'on traitera la simulation géométrique à l'échelle macroscopique et la technique de représentation volumique Triple Dixel en prenant en compte le compromis précision et temps de calcul.

3.2 Problématique et contributions

Dans l'approche proposée, trois modèles de représentation géométrique sont envisagés : modèle de la pièce à usiner, modèle du trajet d'outil et modèle du volume balayé par l'outil. Comme présenté dans la section précédente, ces modèles peuvent être discrets ou continus. Les modèles discrets sont simples à implémenter relativement aux modèles continus, mais pour une bonne précision, le nombre d'éléments géométrique de discrétisation est très important, ce qui augmente le temps de calcul. Dans [Lee et Nestler 2012] [Lee et Nestler 2008] [Ren et al. 2008], le modèle TD a été utilisé sur MRS basé sur la soustraction booléenne qui dépend du temps d'exécution, de la précision de calcul et de la mémoire. Pour minimiser le coût de calcul, de nombreuses solutions sont possibles. Des méthodes adaptatives liées aux données spatiales ont été développées Dans [Sullivan et al. 2012] [Yau et al. 2005], le processus de génération du modèle TD de ces méthodes a été accéléré grâce au GPU dans [Milojevic et al. 2015].

La solution la plus adaptée et la plus efficace consiste à regrouper les triangles STL et les segments TD en clusters. Parmi les approches examinées dans [Halkidi et al. 2001], les algorithmes basés sur la grille sont les méthodes les plus fréquentes dans les données spatiales tandis que les algorithmes K-Means sont les plus couramment utilisés dans les données numériques. Les algorithmes basés sur la grille quantifient l'espace en un nombre fini de cellules, puis effectuent toutes les opérations sur l'espace quantifié. Cependant, le principal inconvénient de cette méthode est le processus de clustering. En partitionnant l'espace en cellules, un objet élémentaire (ex. triangle) peut appartenir à différentes cellules. Par conséquent, un traitement supplémentaire sur l'objet élémentaire est nécessaire dans ce cas. De plus, les cellules ne sont pas homogènes et certaines sont vides en fonction de la complexité des formes de la pièce. L'algorithme Means proposé par Macqueen [Macqueen 1967] est une tentative de clustering partitionné pour décomposer directement l'ensemble de données en un ensemble de clusters disjoints. Elle a été appliquée à de nombreux domaines comme le traitement d'images [Lezoray et Charrier 2004] [Mokhtari et al. 2014].

Notre contribution consiste à regrouper les triangles STL et les segments TD en clusters par la méthode de classification K-Means. A notre connaissance, cette approche a été appliquée pour la première fois pour générer un modèle TD, tel dans notre travail [Bouhadja et al. 2016].

Les principaux avantages de cet algorithme sont :

- i) une grande simplicité
- ii) une tendance à réduire l'erreur quadratique
- iii) applicable aux mégadonnées [Kogan 2007], [Bradley et al. 1998]. Cependant, sa principale limitation est liée à l'initialisation des centres de cluster. Chaque initialisation de processus correspond à une solution différente qui peut dans certains cas être très éloignée de la solution optimale. Une solution naïve à ce problème est d'exécuter l'algorithme des K- Means plusieurs fois avec des initialisations différentes et de conserver le meilleur regroupement trouvé [Guellil et Zaoui 2009].

Pour faire face à cette problématique, notre deuxième contribution est d'intégrer en plus de la méthode Basic K-Means (BK) [Macqueen 1967] deux autres méthodes de clustering à savoir la méthode Fast Global K-Means (FGK) [Likas et al.2003] et la méthode K-Means incrémentale (IK) [Guellil et Zaoui 2009] pour trouver une meilleure partition en une seule exécution et améliorer les performances de clustering pour les objets géométriques élémentaires (triangles et segments). Une étude comparative de ces techniques a été établie afin de démontrer leurs performances et de déterminer la méthode la plus appropriée dans une telle application.

3.3 Objectif

L'objectif global est la réalisation et le développement d'un module logiciel graphique et interactif sous Windows qui permet *la prédiction de la topographie 3D des surfaces libres* dans un environnement de programmation orientée objet en répondant au compromis temps-précision de calcul. Ce logiciel utilisera comme données les paramètres venant de la gamme d'usinage, par exemple (géométrie de l'outil, trajectoire des outils et profondeur de passe etc.). Cet objectif peut être subdivisé en plusieurs sous objectifs :

1. Exploitation de l'existant :
 - Récupération du modèle CAO de la pièce à usiner en STL ;
 - Récupération du modèle volumique de la pièce à usiner en Triple-Dexels ;
 - Récupération du trajet d'usinage approprié au modèle de la pièce ;
2. La modélisation volumique d'une pièce complexe :
 - Classification des données STL pour optimiser le temps de calcul ;
 - Calcul des intersections entre les segments et le modèle STL ;
 - Génération du modèle Triple-Dexels ;
3. Simulation d'usinage :
 - Optimisation de temps d'usinage en classifiant les Triple-Dexels ;
 - Calcul des intersections entre l'outil et les Triple-Dexels pour chaque point de trajet ;
 - Calcul des écarts de la FAO ;
 - Calcul des paramètres de rugosité 3D.

3.4 Approche de résolution

La réalisation d'une approche de prédiction de la topographie 3D des surfaces libres usinées sur machine 05-axes nécessite des interactions fortes entre de nombreuses activités et chaque étape doit permettre de garantir la conformité de la pièce complexe et le respect du cahier des charges. Parmi les activités sur lesquelles nous allons travailler (figure 3.1) :

1. Récupération du modèle STL de la pièce à partir du modèle CAO.
2. Récupération du modèle TD de la pièce à partir de la génération du modèle ou bien à partir d'un fichier existant dans la base de données.

3. Sélection de la méthode de classification du modèle STL "K-Means" ou bien "Cellules"
4. Création des grilles pour les trois plans XY, XZ et YZ.
5. Calcul des intersections entre les droites sortantes des centres des cellules des grilles et les triangles du modèle STL de la pièce à usiner.
6. Détection des segments matières et les représenter par des Dexels.
7. Génération du modèle Triple-Dexels et le sauvegarder dans un fichier "TD".
8. Ajout de la surépaisseur aux segments.
9. Homogénéisation des segments pour obtenir une bonne classification.
10. Classification des segments par "k-Means" ou bien "Cellules".
11. Simulation d'enlèvement de matière.
12. Calcul des paramètres d'état de surface.
13. Visualisation de la topographie 3D de la surface usinée.

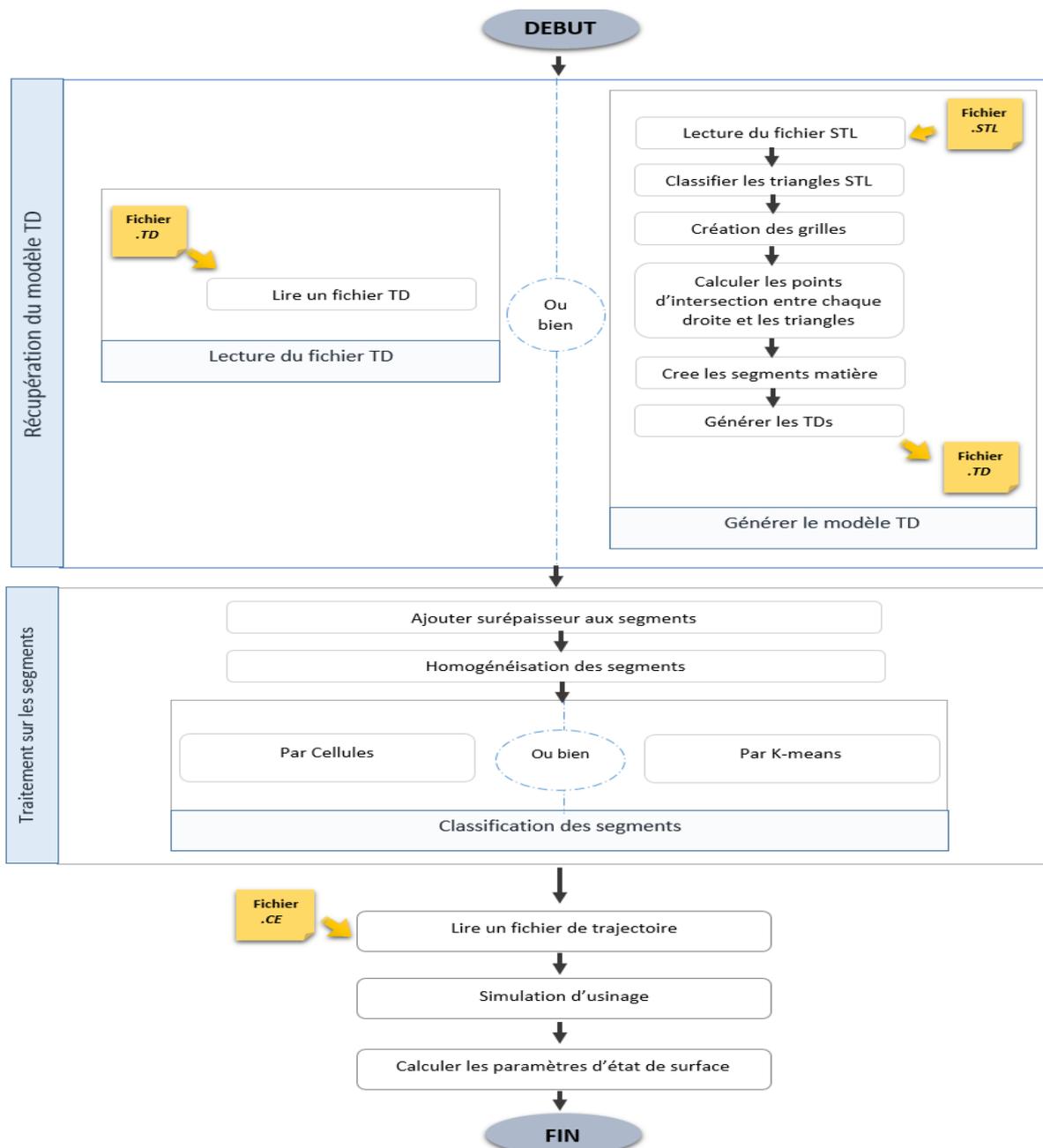


Figure 3.1. Architecture générale de l'application développée.

Dans l'approche proposée, le travail développé est divisé en deux tâches principales à savoir : la modélisation volumique de la pièce à usiner et la simulation d'enlèvement de matière.

3.4.1 Génération du modèle TD

Les modèles volumiques des pièces à usiner sont :

- ✓ Soit déjà en modèle volumique Triple Dexels enregistré dans la bibliothèque de l'application, d'où le fichier est à récupérer.
- ✓ Soit le modèle n'existe pas dans la bibliothèque de l'application, d'où le modèle doit être généré à partir d'un modèle STL.

3.4.1.1 Récupération du Fichier STL

Le modèle STL permet d'approximer les surfaces d'un objet par un ensemble de triangles dont le nombre et la taille dépendent des précisions imposées (Figure 3.2). Chaque triangle est défini par sa normale unitaire \vec{N} dirigée vers l'extérieur et les coordonnées de ses trois sommets orientés P1(X1, Y1, Z1), P2 (X2, Y2, Z2) et P3(X3, Y3, Z3) (Figure 3.3.a). À partir des coordonnées des points limites du brut de la pièce XMIN, YMIN, ZMIN, XMAX, YMAX, ZMAX, les dimensions minimales du brut (largeur, longueur et hauteur) sont calculées (figure 3.3.b).

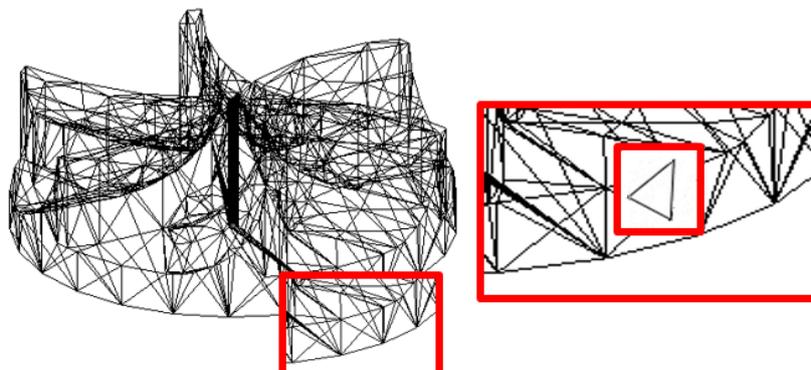


Figure 3.2 Modèle STL

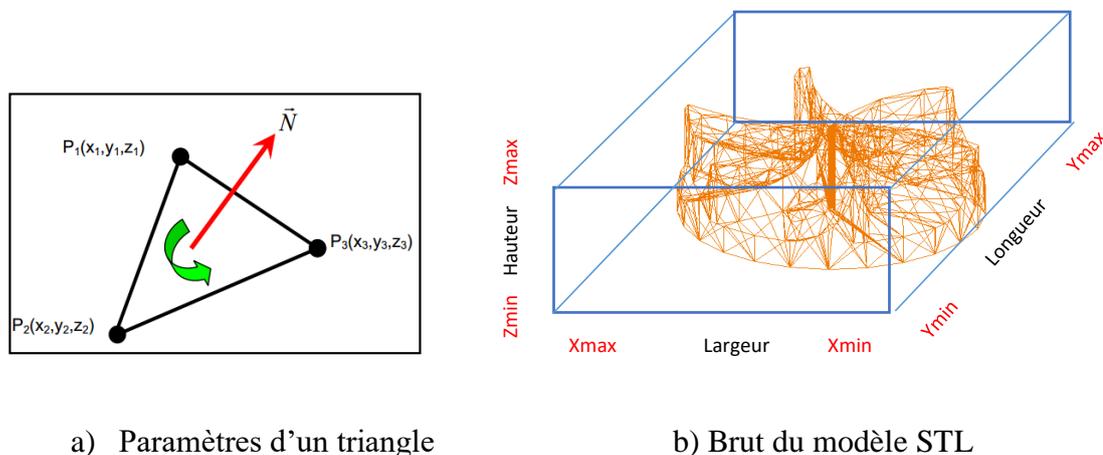


Figure 3.3 Paramètres et structuration du modèle STL

3.4.1.2 Classification des triangles

Avant de passer à la représentation volumique des pièces complexes (Triple-Dexels), nous calculons les points d'intersection entre des droites et des triangles en 3D. Pour un modèle STL de grande précision et une discrétisation volumique très précise, le temps de calcul augmente considérablement. Pour cela, il est indispensable de grouper les triangles en zones afin de faciliter et de réduire le temps de traitement global. Pour créer ces zones, nous avons proposé et implémenté deux méthodes de classification par cellule et par les K.Means et ses dérivées.

a) Regroupement des triangles par cellules

Cette méthode est une méthode classique utilisée dans les logiciels graphiques, son principe est de partager l'espace global en sous espaces égaux et séparés en volume appelé cellule. Chaque cellule est caractérisée par une longueur, une largeur et une hauteur. Les triangles sont affectés aux cellules qui sont en chevauchement avec eux. Puis une mise à jour des nouvelles cellules qui sont à leur tour chevauchée.

a. Création des cellules

À partir de la pièce brute à discrétiser, une matrice des cellules (blocs parallélépipédiques) est créée. Pour cela, le nombre de cellules suivant les trois axes X, Y et Z doit être spécifié. La figure 3.4 présente une classification d'une surface gauche avec un nombre de cellules 3 pour chaque axe, pour un global de 9 cellules. À partir de ces données, les dimensions et les coordonnées des points extrêmes de toutes les cellules sont calculées (Figure 3.4 b).

b. Affectation des triangles aux cellules

C'est l'étape de détermination des triangles appartenant entièrement à une cellule donnée. Pour un triangle partiellement contenu dans une cellule, il suffit qu'un parmi ses trois sommets appartient à cette cellule (figure 3.4 c).

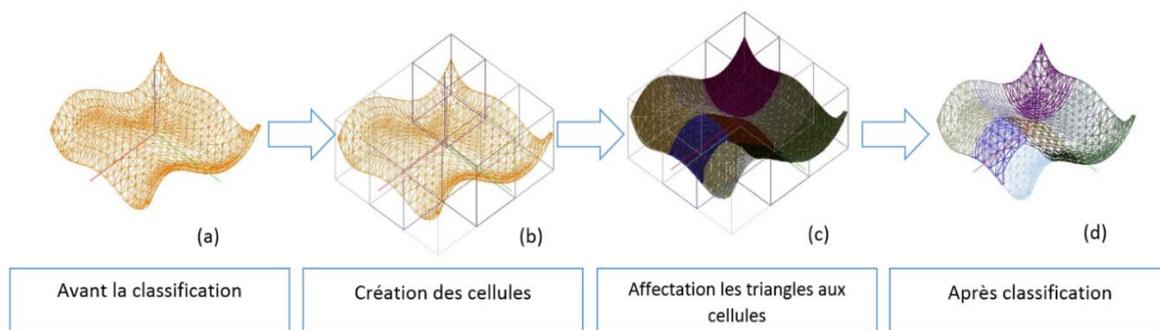


Figure 3.4 Classification par cellule.

b) Regroupement des triangles par K-Means

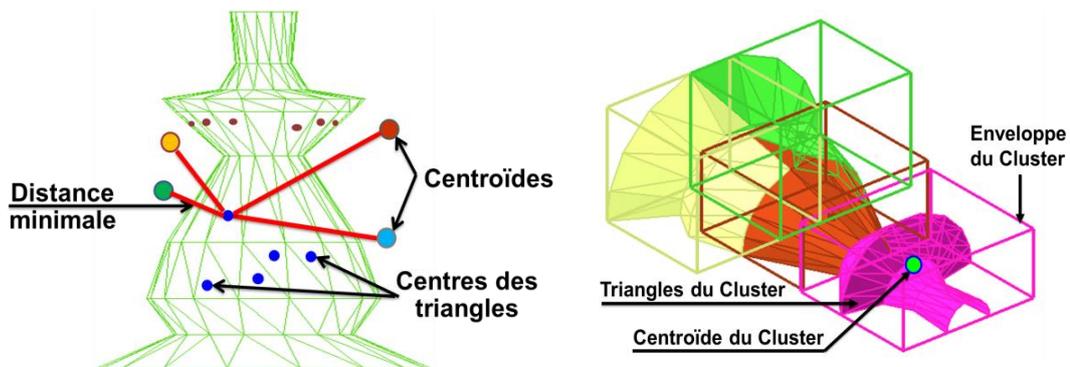
Nous avons introduit pour la première fois les K-Means Basic (BK) ou initiale dans la CFAO. Partant du principe de considérer que l'individu est un triangle du modèle STL réduit en son point centre, le traitement se fait sur les points centres de triangle. Par cette approche de classification, les triangles sont classés systématiquement sans passer par l'opération d'affectation des triangles comme le cas de classification par cellules.

- *Principe des K-Means*

L'algorithme de K-Means est un des plus simples algorithmes de classification automatique des données. L'idée principale est de choisir aléatoirement un ensemble de centres fixé a priori et de chercher itérativement la partition optimale. Chaque individu est affecté au centre le plus proche, après l'affectation de toutes les données la moyenne de chaque groupe est calculée, elle constitue les nouveaux représentants des groupes, et cela jusqu'à arriver à l'état stationnaire (aucune donnée ne change de groupe) [Guellil et Zaoui 2009].

Dans l'application développée, les triangles sont regroupés en zones. Ces zones sont appelées « Clusters », chaque cluster est défini par une liste de triangles et un point spécifique appelé Centroïde qui est le centre de gravité des triangles (Figure 3.5). Ces étapes sont :

- Introduction du nombre de Clusters K à créer et le nombre d'itérations I.
- Calcul du centre de gravité de chaque triangle du modèle STL.
- Initialisation des Clusters par un choix arbitraire des coordonnées des K Centroïde.
- Affectation des triangles aux Clusters en fonction de la distance minimale entre les Centroïdes et le centre de gravité de chaque triangle (Figure 3.5 a).
- Mise à jour des coordonnées du Centroïde de chaque Cluster en fonction de ses triangles.
- Calcul des écarts entre le nouveau et l'ancien Centroïde de chaque Cluster pour vérifier la stabilité du processus (convergence).
- Arrêt du processus si la stabilité est atteinte (pas de changement des coordonnées des Centroïdes) ou le nombre d'itérations est atteint.
- Calcul des limites de l'enveloppe de chaque Cluster (Figure 3.5 b).



a. Distances d'un sommet aux Centroïdes.

b. Paramètres d'un Cluster.

Figure 3.5 Paramètres de classification des triangles par K-Means.

- *Problème d'initialisation des centres*

La principale limite de cette méthode est la dépendance des résultats des valeurs de départ (centres initiaux). À chaque initialisation correspond une solution différente (optimum local) qui peut dans certains cas être loin de la solution optimale (optimum global). Une solution naïve à ce problème consiste à lancer l'algorithme (Basic K-Means) plusieurs fois avec différentes initialisations et retenir le meilleur regroupement trouvé. L'usage de cette solution reste limitée du fait de son coût et que l'on peut trouver une meilleure partition en une seule exécution [Guellil et Zaoui 2009].

Pour remédier à cette problématique, trois méthodes ont été développées à savoir :

- *Global K-Means (GK)*: elle est fondée sur les données et vise à atteindre une solution globalement optimale. Elle consiste à effectuer un clustering incrémental et à ajouter

dynamiquement un nouveau centre suivi par l'application du K-Means jusqu'à la convergence. Les centres sont choisis un par un de la façon suivante : le premier centre est le centre de gravité de l'ensemble des données (résultat de l'application du K-Means avec $k=1$), les autres centres sont tirés de l'ensemble de données ou chaque donnée est une candidate pour devenir un centre, cette dernière sera testée avec le reste de l'ensemble, le meilleur candidat est celui qui minimise la fonction objectif [Guellil et Zaoui 2009], l'algorithme est détaillé en Annexe 1.1.

- *Fast Global K-Means* (FGK) : les auteurs [Guellil et Zaoui 2009] ont remarqué que cette solution été lourde à cause de la stratégie de choix du nouveau centre, ils ont proposé le Fast global k-Means, avec une nouvelle stratégie permettant d'accélérer le global k-Means. Cette stratégie garde la même philosophie que sa précédente (toutes les données peuvent être candidates pour devenir un centre), mais évite d'affecter les données aux centres le plus proches (centres déjà existants en plus du centre candidat) et de calculer l'erreur quadratique, sachant que l'erreur quadratique diminue en fonction du nombre de centres par un taux bn , le nouveau centre sera le candidat qui maximise ce taux [Guellil et Zaoui 2009], l'algorithme est détaillé en Annexe 1.2.
- *K-Means incrémental* (IK) : l'approche incrémentale de classification est similaire à celle du Global k-Means. La différence entre ces deux approches réside dans les points suivants :
 - — Le nombre de points initiaux, dans ce cas deux au lieu d'un seul dans le global k-Means.
 - La recherche du nouveau centre se limite à la recherche de l'élément le mal classé au lieu de tester toutes les données [Guellil et Zaoui 2009]. L'algorithme est détaillé en Annexe 1.3.

La figure 3.6 présente une classification par K-Means d'une surface gauche pour un $K=9$ clusters.

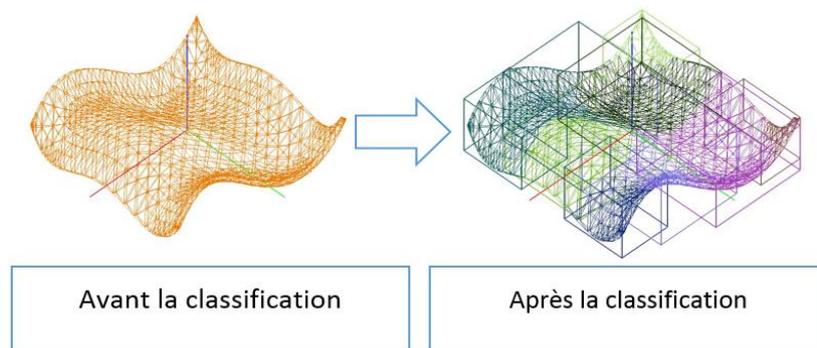


Figure 3.6 Classification par K-Means

3.4.1.3 Création des grilles

Cette étape permet de créer les trois grilles de cellules sur les trois plans XY, XZ, et YZ perpendiculaires entre eux (Figure 3.7).

- a) La première grille est générée dans un plan parallèle au plan XY et passant par la face horizontale du brut de coordonnée ZMIN.
- b) La deuxième grille est générée dans un plan parallèle au plan XZ et passant par la face verticale du brut de coordonnée YMIN.

- c) La troisième grille est générée dans un plan parallèle au plan YZ et passant par la face horizontale du brut de coordonnée XMIN.

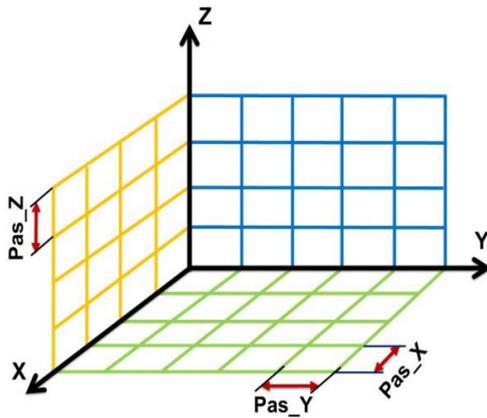


Figure 3.7 Création des grilles de cellules sur les trois plans.

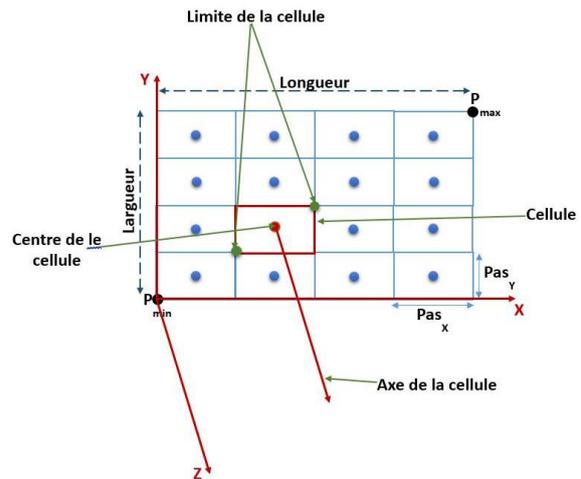


Figure 3.8 Création de grilles de cellules dans le plan XY.

La création de chaque grille nécessite les paramètres suivants :

- Limites de grille : dépend des dimensions du brut calculé à partir des points extrémités du modèle STL.
- Pas de discrétisation : un paramètre introduit au début de la création des grilles, il représente la dimension du Dixel.
- Cellules : elles représentent les bases des Dixel à créer. Le nombre de cellules suivant chaque axe dépend des pas de discrétisation et des dimensions du brut. Chaque cellule est caractérisée par ses points limites, son centre et son axe qui est perpendiculaire au plan de la cellule, et il est dirigé vers l'intérieur du brut (Figure 3.8).

Ces paramètres sont calculés en fonction des dimensions du brut et des pas de discrétisation.

3.4.1.4 Calcul des points d'intersection

La méthode utilisée pour le calcul des points d'intersection entre la droite et les triangles est décrite dans le travail de [Ericson et Christer 2004] comme suit :

Une ligne PQ coupe un triangle ABC si le point R de l'intersection entre la ligne et le plan d'ABC se trouve à l'intérieur du triangle (Figure 3.9).

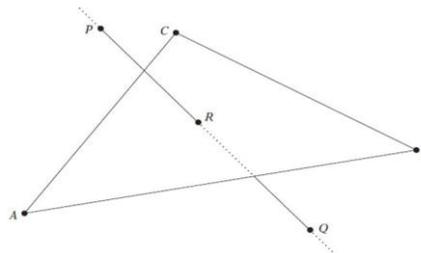


Figure 3.9 Intersection de la ligne passant par P et Q contre le triangle ABC.

Considérant les triples produits scalaires :

$$\begin{cases} u = [PQ \ PC \ PB] \\ v = [PQ \ PA \ PC] \\ w = [PQ \ PB \ PA] \end{cases} \quad (3.1)$$

- Si ABC est orienté au sens antihoraire, R est dans ABC si R se situe à gauche des arêtes du triangle AB, BC et CA (ou les arêtes sont considérées comme des segments de ligne dirigés). Pour cela les expressions $u \geq 0$, $v \geq 0$ et $w \geq 0$ (respectivement) doivent être vérifiées.
- Si ABC est horaire, R est à l'intérieur du triangle ABC, si R est à droite de toutes les arêtes (bords) du triangle, pour cela les triples produits scalaires doivent être négatifs.
- Pour un triangle double face, qui est à la fois dans le sens horaire et dans le sens antihoraire en fonction de quel côté il est vu, PQ passe à l'intérieur si les trois triples produits scalaires ont le même signe (en ignorant les zéros). Pour obtenir le point d'intersection R, il faut montrer que u , v et w sont proportionnels :

$$\begin{cases} u = ku = [PQ \ PC \ PB] \\ v = kv = [PQ \ PA \ PC] \\ w = kw = [PQ \ PB \ PA] \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{Avec } k = \|PR\| / \|PQ\| \quad (3.3)$$

- Le cas où PQ se situe dans le plan ABC doit être traité séparément. PQ est dans le plan ABC lorsque $u = v = w = 0$, ce qui va donner une erreur de division par zéro si elle n'est pas gérée.

L'algorithme de calcul d'intersection droite-triangle est illustré en annexe 2.

La figure 3.10 montre l'intersection entre les axes de grille et le modèle STL de la pièce à usiner selon un plan.

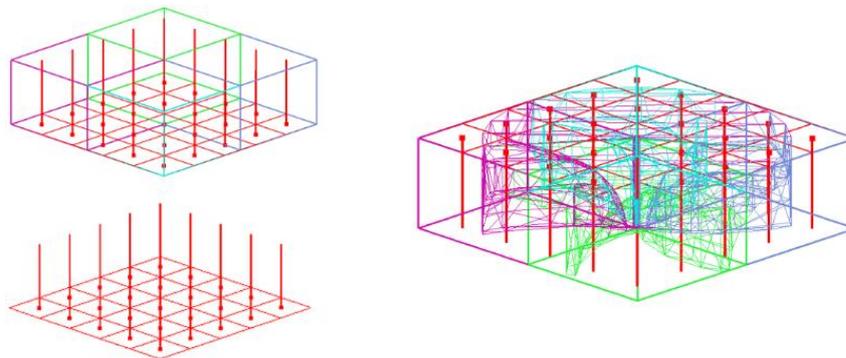


Figure 3.10 Intersection Droites /STL

3.4.1.5 Création des Dexels

La génération du modèle Triple-Dexels nécessite la génération du modèle Dexels en suivant les trois directions. La création de ces Dexels passe par l'identification des zones représentant la matière ou du le vide, puisque les points d'intersection de chaque axe de cellule ne sont pas structurés. Le processus de création des Dexels passe par les étapes suivantes (figure3.11) :

- Tri de la liste des points d'intersection suivant le sens de la droite de la cellule,
- Initialisation de la liste des segments,
- Identification du type de chaque segment (matière ou vide),
- Création des Dexels : les segments dont le type est « matière » forment les Dexels de la pièce dans la direction de l'axe de la cellule. Le volume du Dexel est calculé à partir de sa section et sa longueur.

L'algorithme pour l'identification du type de segment est illustré en annexe 3.

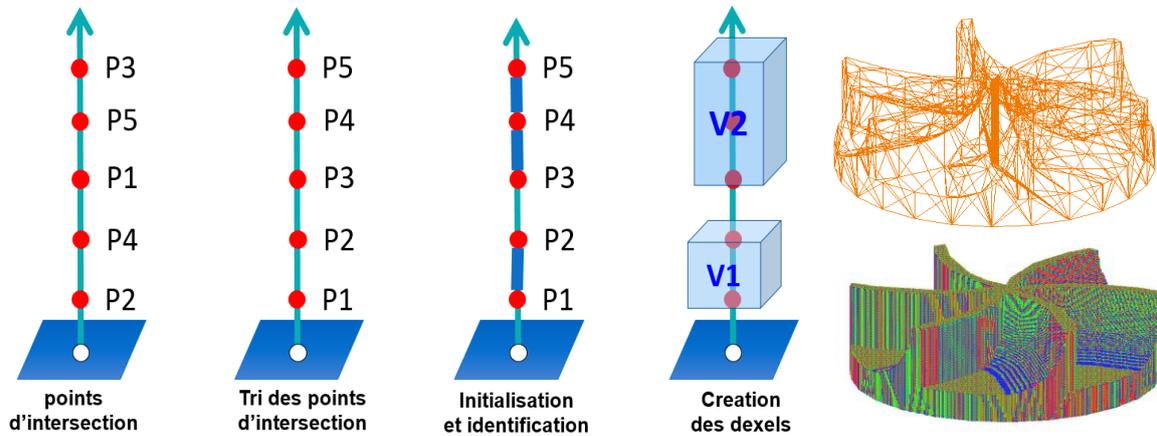


Figure 3.11 Génération du modèle Triple-Dexel

3.4.2 Simulation d'enlèvement de matière

Dans la simulation d'enlèvement de matière, les Dexels doivent subir un traitement spécifique pour qu'ils puissent être exploitables dans la simulation d'enlèvement de matière.

3.4.2.1 Traitement sur les segments (Dexels)

Après avoir générer le modèle Triple-Dexels et le sauvegarder dans un fichier ".TD", un traitement spécifique est intégré au modèle TD à savoir : ajout de la surépaisseur aux segments et homogénéisation des segments pour obtenir une bonne classification des segments par "K-Means" ou bien "Cellules».

a) Ajout de la surépaisseur aux segments

Cette opération représente la surface de la pièce avant l'opération de finition, car la surépaisseur présente la profondeur de passe (figure 3.12).

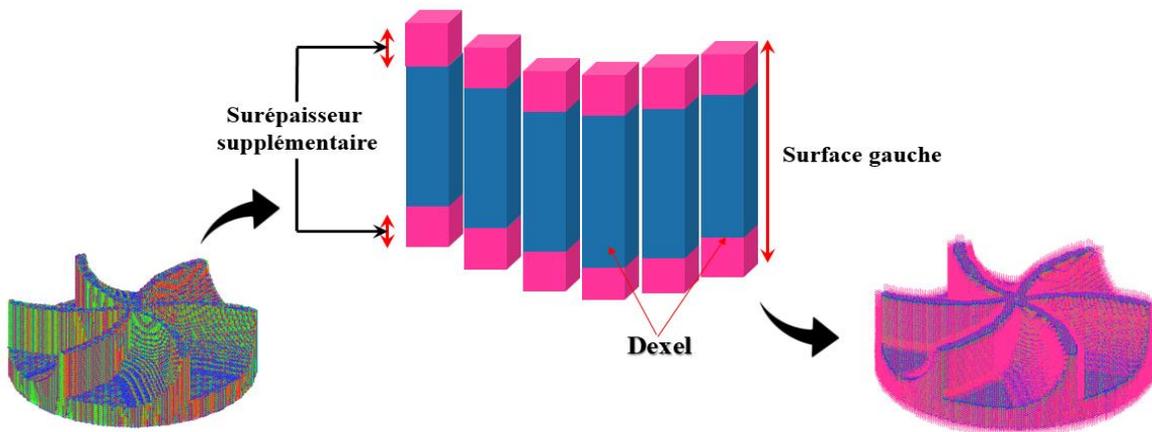


Figure 3.12 Ajout d'une surépaisseur

b) Homogénéisation des segments

La longueur des segments peut poser un problème dans la classification dont les enveloppes des groupes des segments ne sont pas bien structurées (chevauchement des enveloppes), pour régler ce problème et rendre les segments courts et plus homogènes deux cas se présentent :

- *Dans les K-Means* : il suffit de diviser les segments qui dépassent une longueur initialisée au début de l'algorithme (figure 3.13).
- *Dans les Cellules* : pour diviser les segments, les coordonnées du point début et du point fin de chaque segment de la surface sont comparées aux limites maximums et minimums de chaque cellule.

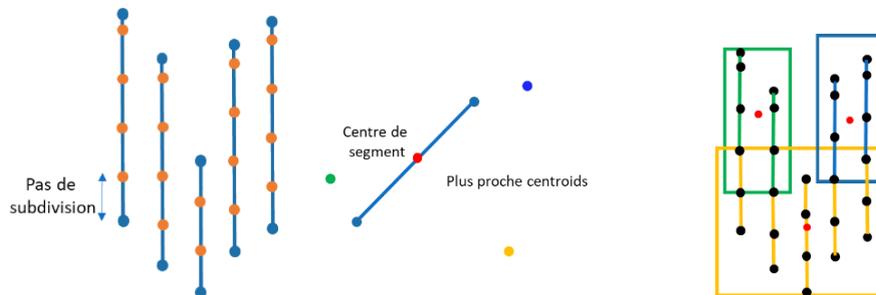


Figure 3.13 Homogénéisation des segments

c) Classification des segments

Le calcul d'intersection entre l'outil et les Triple-Dexels, permet de vérifier si la sphère est en intersection avec tous les TD formant la pièce pour chaque point de la trajectoire. Pour diminuer le volume de calcul, les segments sont classés en groupes et les intersections des segments qui appartiennent à ceux qui chevauchent avec l'enveloppe de la sphère sont calculés. Les méthodes de classification des triangles du modèle STL dans la partie de génération de Triple-Dexels sont les mêmes méthodes de classification appliquées dans la simulation d'enlèvement de matière (figure 3.14).

— Classification par cellule

- *Création des cellules* : Pour créer les cellules, le principe utilisé dans la partie de classification des triangles du modèle STL est le même, sauf que dans ce cas, c'est les segments qui vont être classés.
- *Affectation des segments aux cellules* : Après la nouvelle représentation des segments et pour minimiser le temps de calcul dans l'étape de simulation d'usinage, les segments subdivisés sont affectés aux cellules correspondantes.

— Classification par K-Means :

Le principe de classification des segments par K-Means est similaire à celle de classification des triangles. La différence entre eux, c'est le type d'éléments géométriques à classer. Dans ce cas, c'est les segments du modèle TD qui vont être classés et manipulés par leurs centres.

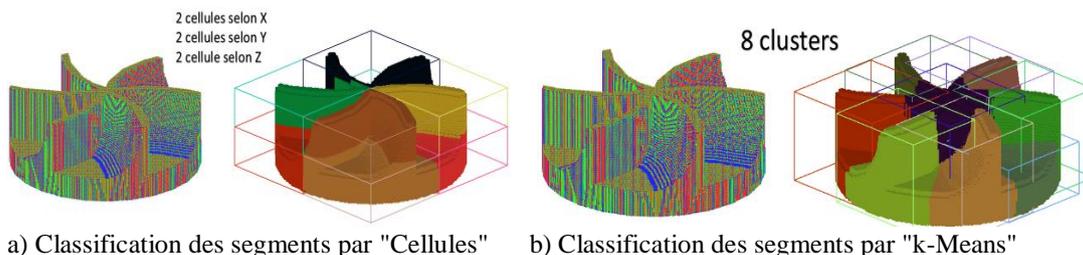
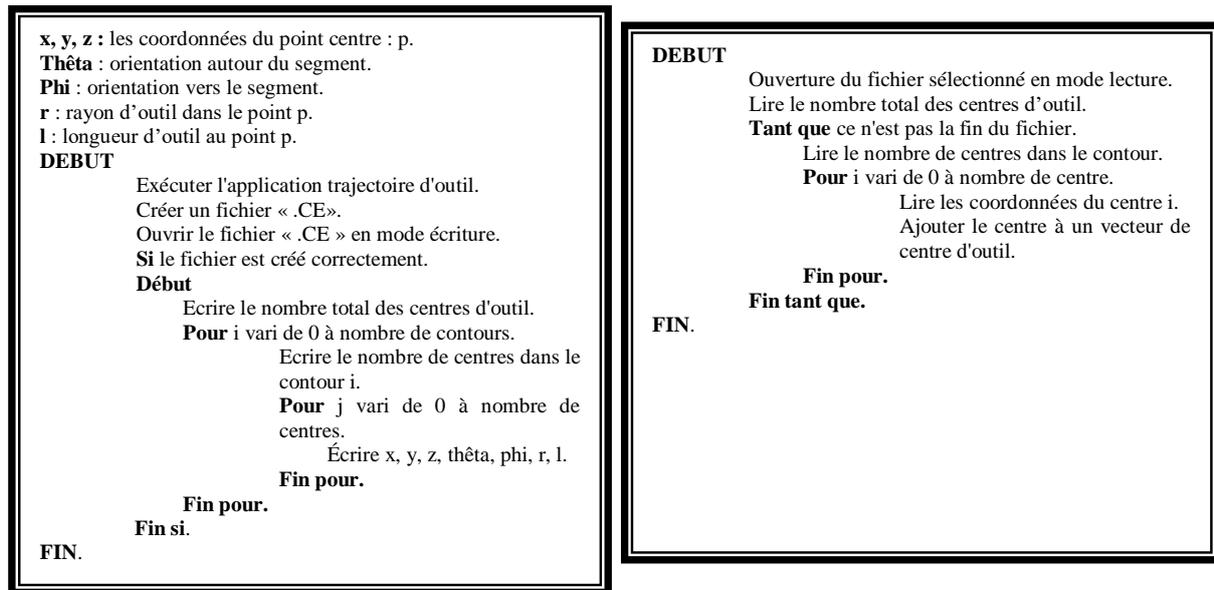


Figure 3.14 Classification des segments

3.4.2.2 Lecture du trajet d'outil

Après l'étape de traitement sur les segments, c'est l'étape de lecture du trajet d'outil qui suit. Le trajet correspondant à la pièce à usiner est récupéré sous forma d'un fichier (.CE) (Figure 3.15).



a. Ecriture du fichier trajectoire

b. Lecture du fichier trajectoire

Figure 3.15 Trajet d'outil (.CE)

4 Récupération d'un trajet d'outil via la FAO

Pour avoir plus de flexibilité sur nos tests, nous avons élaboré une série de trajets relatifs aux paramètres géométriques de coupe tels que la stratégie d'usinage, profondeur de passe et diamètres d'outil, etc. Le logiciel CAMWorks a été utilisé pour la génération du trajet d'outil afin de récupérer le fichier CL et puis le convertir en fichier CE pour l'exploiter dans l'application développée.

5 Conversion d'un fichier CL à un fichier CE

Le positionnement d'une fraise hémisphérique tangente à la surface est présenté sur la figure 3.14, et la relation entre le point C_E et le point C_L est donnée par la formule suivante :

$$\overrightarrow{OC_L} = \overrightarrow{OC_E} - r \times \vec{u} \quad (3.4)$$

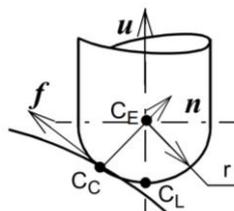


Figure 3.16 Outil hémisphérique tangent à la surface [Lavernhe 2006]

- Avec :
- CC (cutter contact) le point de contact entre l'outil et la surface ;
 - CE le point centre de l'outil ;
 - CL (cutter location) le point extrémité de l'outil ;
 - \vec{u} l'axe de l'outil ;
 - r le rayon de l'outil hémisphérique et le petit rayon de l'outil torique ;

5.1.1.1 Simulation d'usinage

La simulation d'usinage est réalisée suite aux calculs des intersections entre les segments et la sphère pour obtenir les nouvelles dimensions des segments. Sachant que la pièce est divisée en clusters, chaque cluster regroupe un nombre N de segments et il est caractérisé par une enveloppe (box), donc à chaque point de la trajectoire, nous calculons l'intersection avec les segments appartenant aux clusters qui chevauchent avec la sphère au niveau de ce point.

5.1.1.2 Calcul des chevauchements sphère-cellule

Plusieurs cas de chevauchements sphère clusters (enveloppe) peuvent se présenter. La figure 3.14 montre tous ces différents cas. Les enveloppes de clusters chevauchant avec l'enveloppe de la sphère doivent être vérifiées par les conditions suivantes :

- $X_{minC} < X_{maxCL}$ et $X_{maxC} > X_{minCL}$.
- $Y_{minC} < Y_{maxCL}$ et $Y_{maxC} > Y_{minCL}$.
- $Z_{minC} < Z_{maxCL}$ et $Z_{maxC} > Z_{minCL}$.

Avec :

- X_{minC} , Y_{minC} et Z_{minC} : les limites minimales de l'enveloppe de la sphère.
- X_{maxC} , Y_{maxC} et Z_{maxC} : les limites maximales de l'enveloppe de la sphère.
- X_{minCL} , Y_{minCL} et Z_{minCL} : les limites minimales de l'enveloppe du cluster.
- X_{maxCL} , Y_{maxCL} et Z_{maxCL} : les limites maximales de l'enveloppe du cluster.

Les conditions sont appliquées sur les trois plans. La figure 3.17 présente le cas dans le plan XY. L'algorithme 6 présenté dans l'annexe 4 montrant cette procédure.

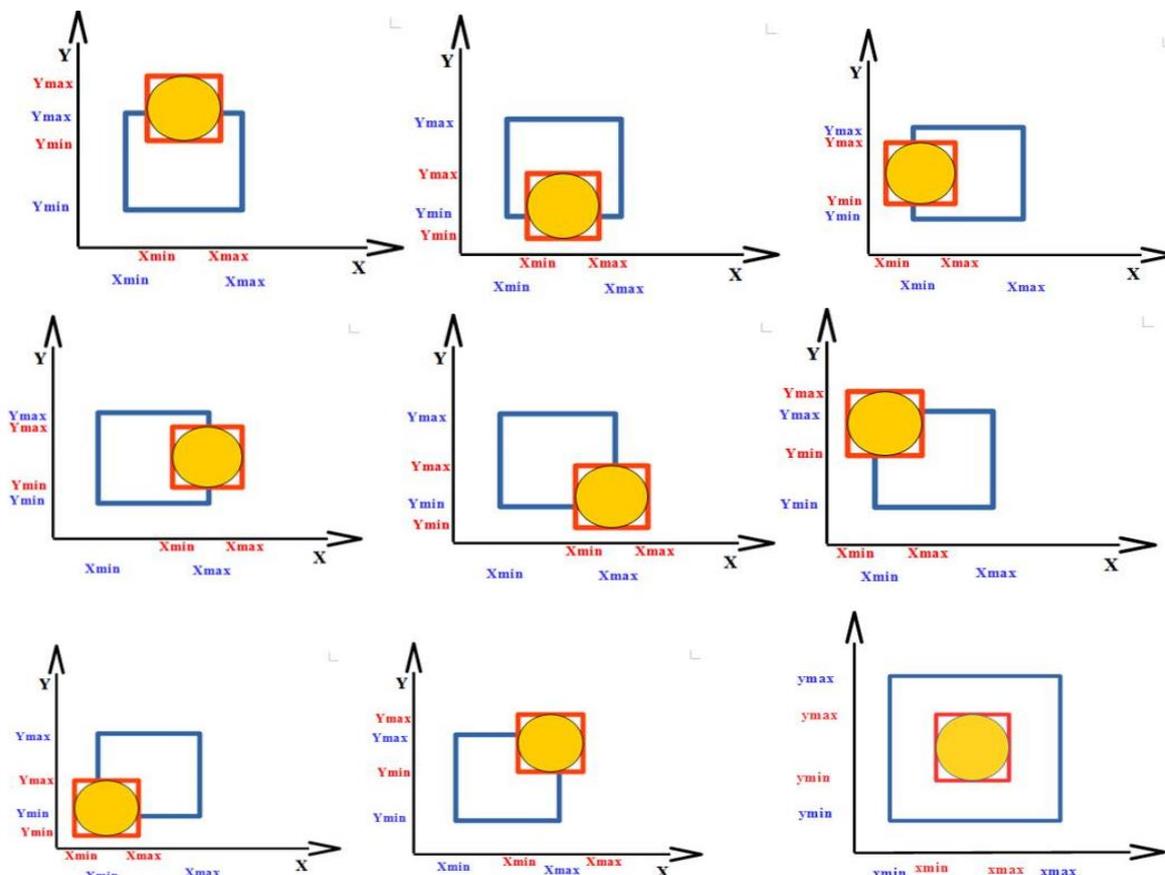


Figure 3.17 différents cas de chevauchement sphère clusters (cellules).

5.1.1.3 Calcul des points d'intersection

Après avoir sélectionné les clusters qui chevauchent avec l'enveloppe de la sphère, un calcul d'intersection entre les segments appartenant à ce cluster et la sphère représentant l'outil a été effectué selon la démarche suivante :

➤ Soit un segment AB donné par

$$R(t) = p + td \quad (3.5)$$

$$d = (B - A) / \|(B - A)\| \quad (3.6)$$

Avec :

$p = A$ (début de segment)

d : vecteur direction normalisé

$0 \leq t \leq t_{\max}$

➤ Soit la limite de la sphère définie par :

$$(X - C) \cdot (X - C) = r^2 \quad (3.7)$$

avec :

C : centre de sphère

r : rayon de sphère

Pour trouver la valeur t au quelle le rayon coupe la surface de la sphère, $R(t)$ est substitué à X , donnant :

$$(p + td - C) \cdot (p + td - C) = r^2 \quad (3.8)$$

L'équation 3.8 peut être écrite sous la forme d'une équation quadratique en t . Les solutions de cette équation donnent les cas d'intersections possibles (figure 3.18), où les résultats sont classés par le discriminant Δ .

- Si $\Delta < 0$, il n'y a pas de vraie racine, ce qui correspond au rayon manque complètement la sphère.
- Si $\Delta = 0$, il y a une (double) racine réelle, correspondante au rayon lorsqu'il frappe la sphère tangentiellement en un point.
- Si $\Delta > 0$, il y a deux racines réelles et le rayon coupe la sphère deux fois, une fois entrant, une fois sortant et une fois entrant et sortant de la limite de la sphère.

Les algorithmes développant cette démarche sont détaillés en annexe 5.

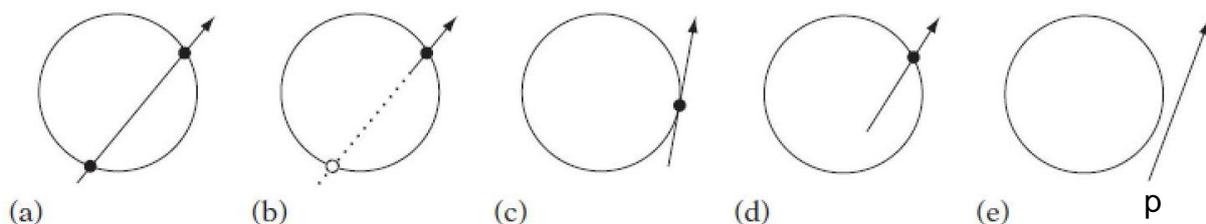


Figure 3.18 Différents cas d'intersection rayon-sphère.

5.1.1.4 Calcul des paramètres de l'état de surface

Dans ce travail l'intérêt est porté aux 5 paramètres définis dans le chapitre 2, Sa (Amplitude moyenne), Sq (Rugosité moyenne quadratique), Sp (Hauteur de crête maximale), Sv (Hauteur de puits maximale) et le paramètre Sz (Hauteur maximale).

- a. *Calcul des écarts* : les écarts calculés sont les distances entre les points extrémités des segments de la pièce idéale et les points extrémités des segments de la pièce usinée.

$$\text{Ecart1} = \text{PointDebutOriginal} - \text{PointDebut} \quad (3.9)$$

$$\text{Ecart2} = \text{PointFinOriginal} - \text{PointFin} \quad (3.10)$$

Avec :

PointDebutOriginal et PointFinOriginal : les points extrémités des segments de la pièce idéale.
 PointDebut et PointFin : les points extrémités des segments de la pièce usinée.

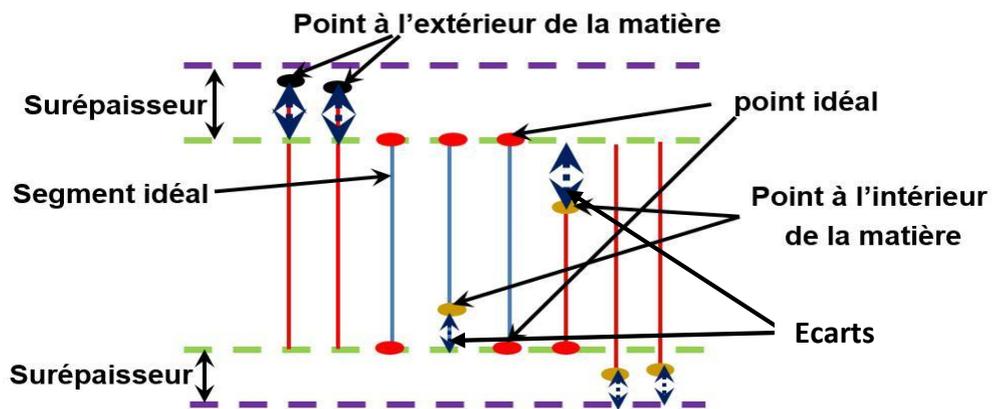


Figure 3.19 Ecarts obtenus après simulation.

- b. *Topographie de surface*

Les points extrémités obtenus en simulation doivent être dans l'intervalle de tolérance (figure 3.20) pour pouvoir passer au calcul des paramètres d'état de surface. Ces paramètres définissent la topographie de surface.

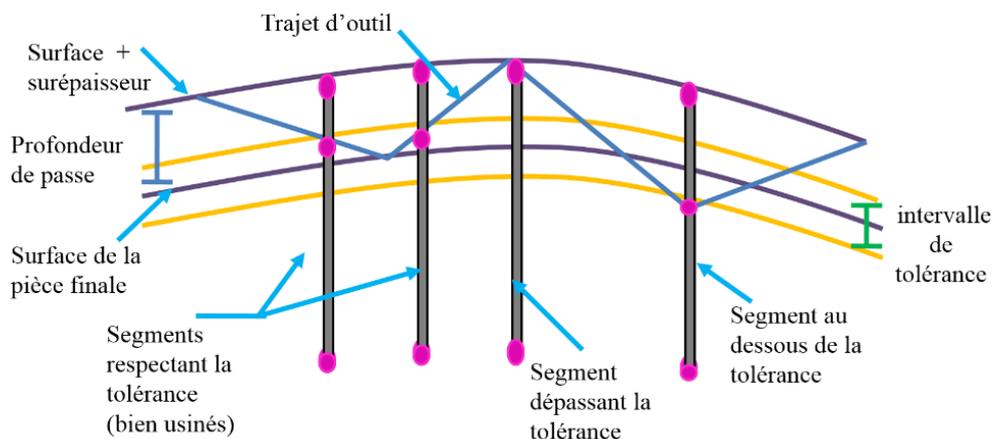


Figure 3.20 Tolérance d'usinage.

5.2 Implémentation et validation

L'approche proposée a été implémentée et testée sur différentes formes de pièces et avec différents paramètres d'usinage, la validation de l'approche a été effectuée par une étude comparative qualitative et non pas quantitative. Cela est dû au nombre de paramètres importants influant le phénomène de coupe et qui n'ont pas été pris en considération dans notre modélisation.

5.2.1 Implémentation et exécution

Après avoir concevoir la démarche de résolution, le développement de l'application logicielle a été élaboré dans un environnement de travail matériel et logiciel bien défini.

5.2.1.1 Environnement de travail

La partie implémentation a été développée dans un environnement matériel et logiciel indiqué sur le (tableau 3.1).

Tableau 3.1 Outils matériel et logiciel utilisés dans l'implémentation.

Environnement matériel	Ordinateur : Processeur Intel (R) Core (TM) i7-5600U @2.60 GHz 2.59GHz RAM 8.00 GO, Windows 10.	
Environnement logiciel	PyCharm 	Environnement de développement intégré utilisé pour programmer en Python. Interface de programmation d'applications graphiques 2D et 3D (largement utilisée).
	OpenGL 	Dédié pour la conception et la construction d'interfaces utilisateur graphiques (GUI) avec Qt Widgets. Il permet de composer et personnaliser les fenêtres ou les boîtes de dialogue et les tester à l'aide de différents styles et résolutions.
	QtDesigner 	Python est un langage de programmation open source. Il s'agit d'un langage interprété, qui ne nécessite donc pas d'être compilé pour fonctionner. Un programme "interpréteur" permet d'exécuter le code Python sur n'importe quel ordinateur.
	Python 	Environnement de développement intégré utilisé pour programmer en Python.

5.2.1.2 Présentation graphique de l'application

a) Fenêtre principale

Plusieurs fenêtres ont été créées afin d'exécuter les tâches citées dans la section 3.4, les deux tâches principales sont indiquées sur les deux fenêtres représentées dans la figure 3.21.

b) Génération du modèle TD

À partir de cette fenêtre, l'utilisateur doit passer par cinq fenêtres dans un ordre chronologique afin de générer un modèle TD, les plus importants sont :

a. Fenêtre "Modèle STL"

L'interface représentant les étapes de récupération du modèle STL est illustrée sur la (figure3.22).

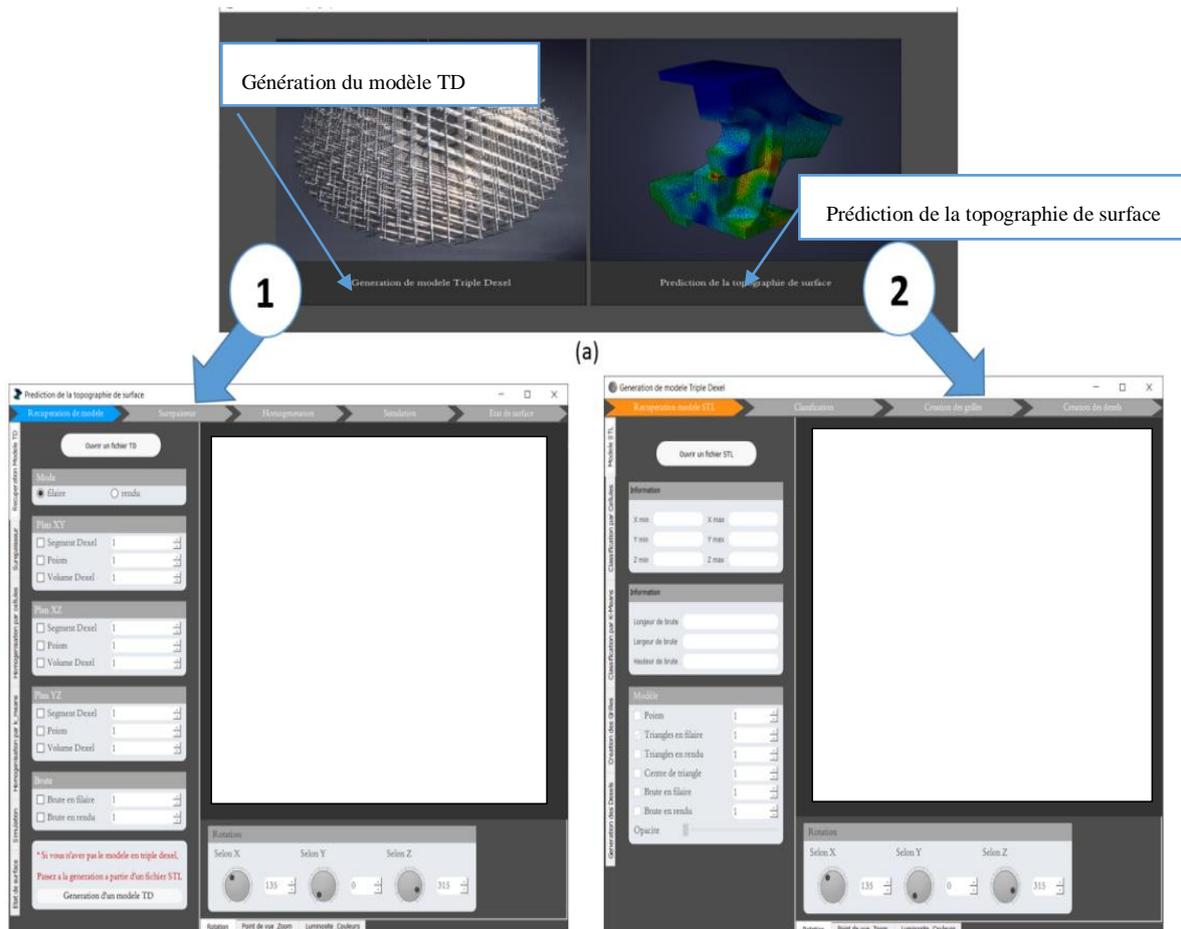
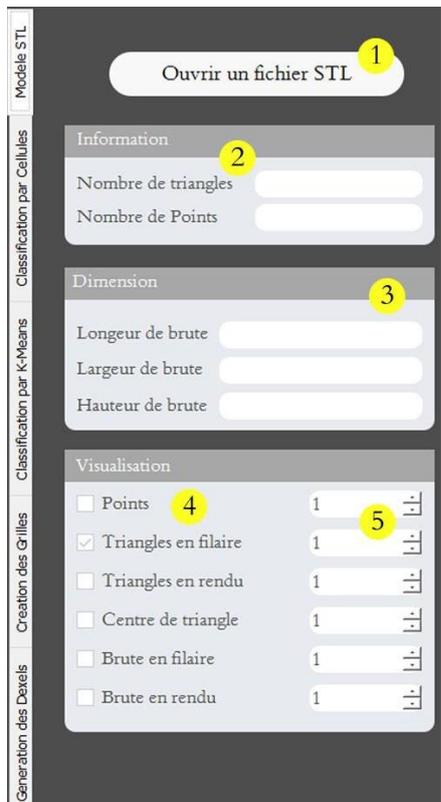


Figure 3.21 Fenêtre principale.

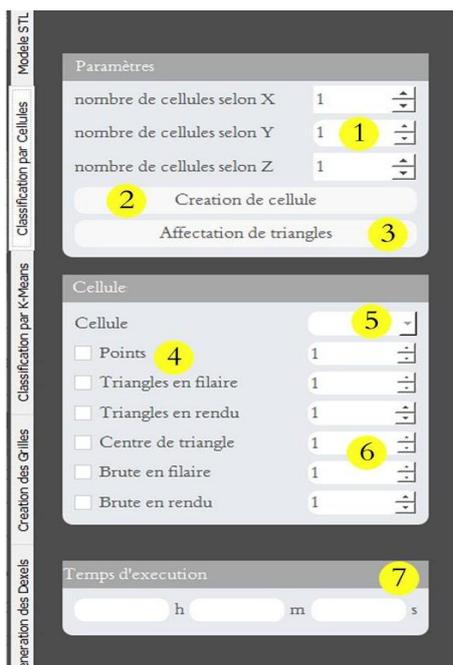


- 1-Sélection d'un fichier STL.
- 2-Information sur le modèle.
- 3-Dimensions du modèle.
- 4-Visualisation du modèle et/ou leur brut.
- 5-Tailles des lignes/ points.

Figure 3.22 Fonctionnalités de la fenêtre "modèle STL"

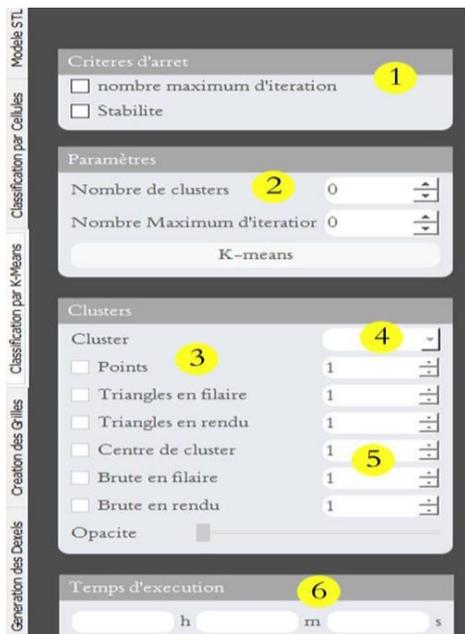
b. Fenêtre des classifications

Les deux interfaces de classification montrant la démarche de chaque méthode (cellul, K-Means) sont présentées sur la (figure 3.23, 3.24).



- 1-Sélection de nombre de cellules selon X, Y et Z.
- 2-Lancement de la création des cellules.
- 3-Affectation des triangles aux cellules adéquates.
- 4-Visualisation des cellules et/ou leurs contenues.
- 5-Sélection de la cellule à visualiser.
- 6-Tailles de lignes/points
- 7-Temps d'exécution de classification

Figure 3.23 Interface de la classification par cellules



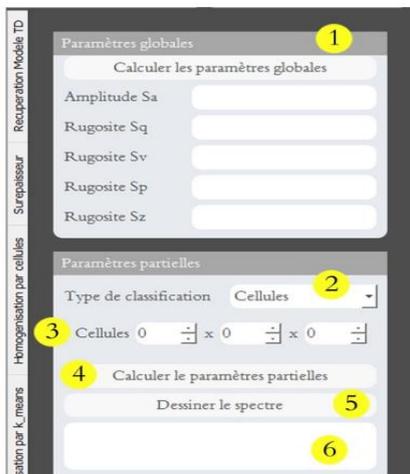
- 1- Sélection des critères d'arrêt.
- 2- Introduction des paramètres de classification par K-Means.
- 3- Visualisation des grilles, centres et droites de chaque plan.
- 4- Sélection du cluster à afficher.
- 5- Taille des lignes/points.
- 6- Temps d'exécution de classification.

Figure 3.24 Interface de la classification par K-Means

c) Prédiction de l'état de surface :

Lorsque la fenêtre de prédiction de l'état de surface s'ouvre, d'autres fenêtres s'ouvrent en permettant d'effectuer les 5 tâches suivantes :

- Récupération du modèle TD ;
- Surépaisseur ;
- Homogénéisation et classification par cellule ;
- Homogénéisation et classification par K-Means ;
- Simulation d'usinage ;
- Paramètres d'états de surface (figure 3.25).



- 1- Lancement de calcul des paramètres d'état de surface globale et les afficher.
- 2- Sélection de la méthode de partitionnement de la pièce à usiner (Cellules/K-Means).
- 3- Introduction de nombre de zones.
- 4- Lancement de calcul des paramètres d'état de surface de chaque zone.
- 5- Visualisation du spectre de la topographie de surface.
- 6- Visualisation de la barre de couleurs associée au spectre de la topographie.

Figure 3.25 Fonctionnalités de la fenêtre "État de surface"

5.2.2 Test et validation

Il existe plusieurs paramètres influant sur la simulation, donc il faut les choisir soigneusement.

5.2.2.1 Choix des paramètres de simulation

Pour réaliser une simulation il faut, après avoir identifié les caractéristiques de l'exemple à traiter, choisir un pas de temps pour le schéma d'intégration temporel et un nombre de Dexels pour d'écrire la géométrie de la zone usinée de la pièce. Ces choix ne sont pas arbitraires et peuvent être liés l'un à l'autre [Assouline 2005].

Dans notre travail, nous avons traité que la simulation géométrique et non pas la simulation dynamique, donc le paramètre de discrétisation temporel n'est pas pris en considération. [Assouline 2005] a montré que le paramètre le plus important dans la simulation géométrique est le pas de Dexels ou le nombre de Dexels par plan, car ce paramètre doit représenter correctement la surface usinée.

L'auteur a bien montré l'influence de pas de discrétisation sur les résultats de la simulation, par ailleurs il nous a permis d'orienter notre travail vers l'optimisation de la qualité et du coût de la simulation. Le bon partitionnement de la pièce nous a permis par conséquent d'augmenter le nombre de Dexels.

Les tests ont été élaborés par deux manières différentes à savoir :

- Validation qualitative et non pas quantitative de l'efficacité de l'application développée. Cela est dû au nombre de paramètres importants influant le phénomène de coupe et qui n'ont pas été pris en considération dans notre modélisation.
- Validation de l'améliorer de la simulation en augmentant le nombre de Dexels, et cela à travers deux critères :
 - ✓ La qualité du partitionnement de la pièce de forme gauche.
 - ✓ Le temps d'exécution de la simulation.

5.2.2.2 Validation de l'application

Comme indiqué dans l'architecture générale de l'application développée (figure 3.1), nos entrées sont : le modèle de la pièce à usiner en forma STL et le trajet d'outil en forma neutre (CL file).

a) Pièce modèle

Les tests ont été effectués sur une pièce de forme gauche. Il s'agit d'une forme générée à partir de l'extrusion d'une surface gauche, ayant pour courbe guide, une courbe gauche différente. La figure 3.26 montre le modèle STL conçu sur SolidWorks

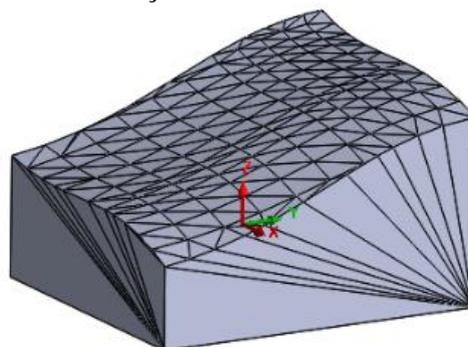


Figure 3.26 Modèle STL de la pièce testée

b) Génération du parcours d'outil

Une succession d'étapes sur CAM Works (logiciel FAO) pour la génération du trajet d'outil a été suivie. Ces étapes sont résumées aux points suivants :

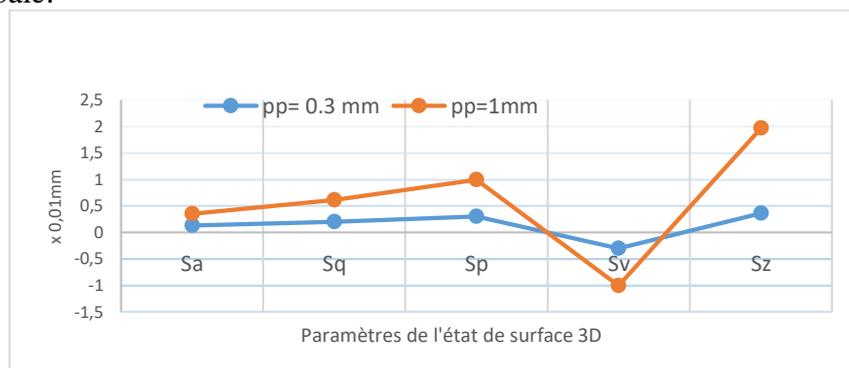
- Génération du plan d'opération : pour définir le référentiel de travail.
- Configuration des paramètres d'usinage : Sur ce logiciel, nous avons le plein contrôle sur tous les paramètres possibles (Outil d'usinage et ses dimensions, Stratégie, Dégagement engagement, Vitesse d'avance, Pas d'avance et profondeur de passe, etc.).
- Calcul du parcours : visualisation du trajet et des éventuelles modifications
- Enregistrement du fichier CL pour une utilisation ultérieure.

5.2.3 Résultats et discussion

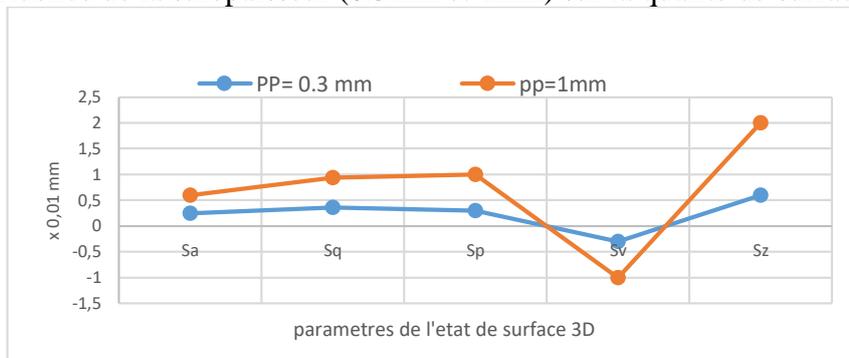
Ce travail se limite sur la simulation géométrique où les paramètres physiques ne sont pas considérés. Le simulateur développé est validé qualitativement et non pas quantitativement, cela veut dire que ce n'est pas les valeurs des paramètres de l'état de surface qui vont être comparé à d'autres, mais plutôt les allures des courbes et des graphes qui vont être discutées par des évidences techniques existantes dans l'usinage des pièces mécaniques.

Les valeurs de la surépaisseur (profondeur de passe 0.3, 1 mm) ont été variées en fixant les autres paramètres. Les paramètres de l'état de surface (Sa, Sq, Sp, Sv et Sz) ont été calculés sur trois portions (zones) de la surface et sur la globalité de surface.

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures 3.27. Les allures des tracés montrent clairement la variation proportionnelle de ces paramètres d'état de surface en fonction de profondeur de passe, car la courbe pour une profondeur de passe 0.3 mm est inférieure à la courbe de profondeur de passe 1mm. Cela est remarquable pour les deux graphes de surface zonale et globale.



a) Influence de la surépaisseur (0.3mm et 1mm) sur la qualité de surface Zonale.



b) Influence de la surépaisseur (0.3mm et 1mm) sur la qualité de surface globale.

Figure 3.27 Influence de la profondeur de passe sur la qualité de surface

L'erreur de crête est visiblement présentée sur la figure 3.28. Pour cela, une profondeur de passe maximum et un rayon d'outil maximum sont introduits.

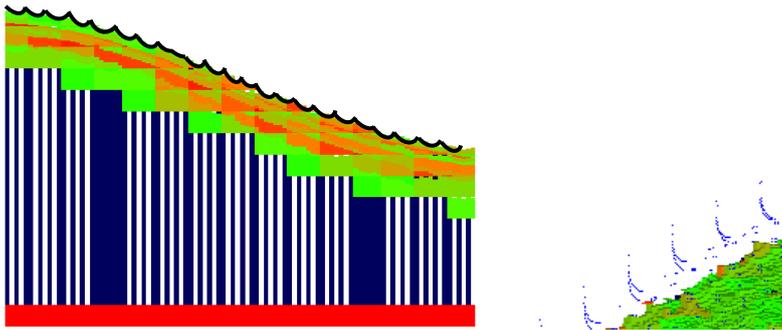


Figure 3.28 Erreur de crête

5.2.3.1 L'influence du pas de Dixel sur la simulation d'enlèvement de matière

Les travaux de [Assouline 2005] montrent l'influence du pas ou du nombre de Dixel sur la simulation d'enlèvement de matière. Pour valider nos travaux qui sont supposés améliorer la simulation en augmentant le nombre de Dixels à travers deux critères :

- ✓ La qualité du partitionnement de la pièce de forme gauche.
- ✓ Le temps d'exécution de la simulation.

Le deuxième critère est proportionnel au premier, meilleure qualité de partitionnement veut dire moins de chevauchement, ce qui implique moins de redondances dans les calculs d'intersection.

Les figures 3.29 et figures 3.30 résument respectivement les tests de l'application développée pour la génération du modèle TD et la prédiction de l'état de surface en visualisation de chaque étape du processus.

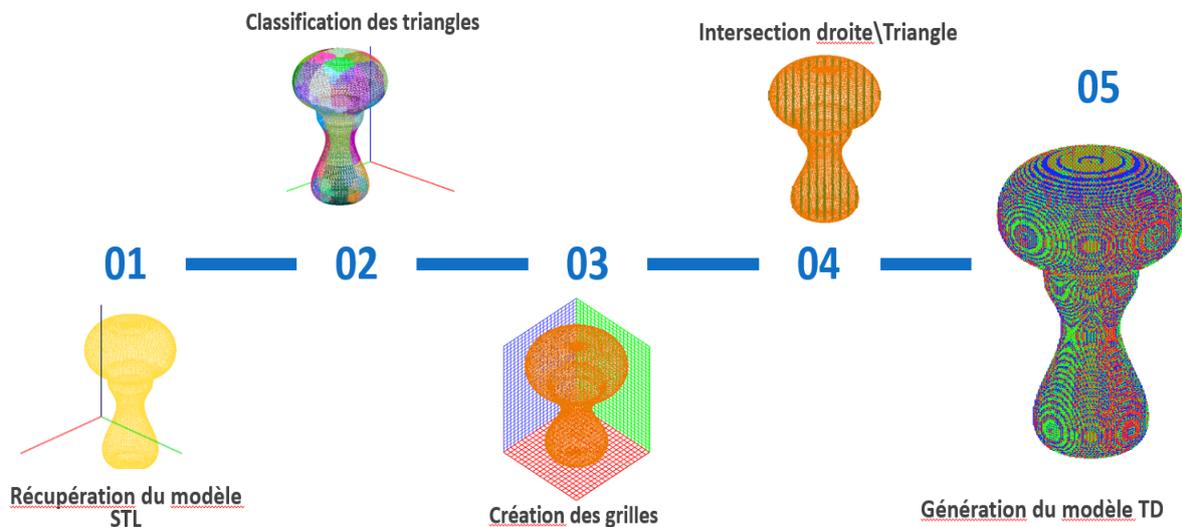


Figure 3.29 Test de génération du modèle TD

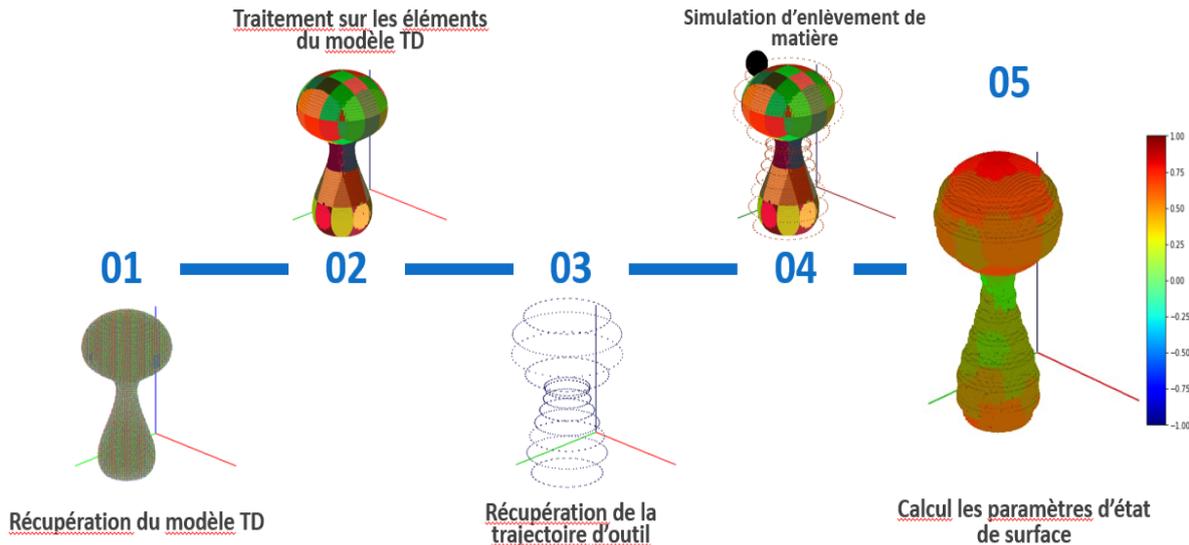


Figure 3.30 Test de prédiction de l'état de surface

5.2.3.2 Validation de l'optimisation de la simulation

Afin de valider la méthodologie proposée et d'illustrer ses performances, nous avons fait fonctionner les algorithmes développés en prenant en considération les critères suivants : Temps d'exécution par rapport aux méthodes de classification ;

- Simulation sans classification,
- Classification classique par cellules (grilles) ;
- Classification par K.Means.

Les paramètres de générations et de simulation ;

- Pas de Dixel ;
- Nombre de partitionnement ;
- Nombre d'éléments géométriques à classer.

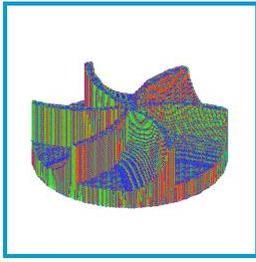
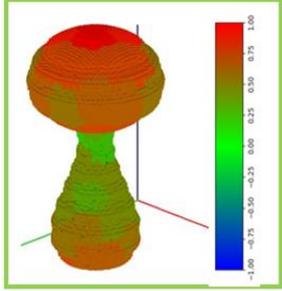
Les tests ont été effectués sur des pièces à des degrés de complexité différentes. Ces pièces sont représentées par des modèles STL et TD. Une pièce contient moins d'éléments géométriques à classifier (9450 triangles, 5279 segments) par rapport aux modèles de la deuxième pièce (16 074 triangles, 49 592 segments). Les algorithmes développés ont été évalués selon deux contraintes importantes, la qualité du clustering et le temps de calcul.

a) Comparaison du temps d'exécution en génération des TD et en MRS

Le tableau 3.2 illustre une comparaison entre la méthode de classification par "cellules" et par "K-Means" en termes de temps de calcul pour la génération d'un modèle Triple-Dixel et pour la simulation d'enlèvement de matière.

Selon les résultats illustrés, la classification par K.Means donne des résultats meilleurs par rapport à la classification par cellules. Néanmoins, les méthodes IK et FGK sont introduites pour améliorer la classification par K.Means.

Table 3.2 Comparaison de temps d'exécution lors des générations d'un modèle Triple-Dexel

	Methode et parametres	Grilles	Temps d'execution (s)	Gain de temps (%)	
	Sans classification		10892,517	0	
	Cellules 5 * 2 * 5 cellules	<u>Selon X</u> : 0,3 <u>Selon Y</u> : 0,3 <u>Selon Z</u> : 0,3	1330,945	87,78	
	K-Means 50 clusters		758,759	93,03	
	Methode et parametres	Grilles	Temps d'execution (s)	Gain de temps (%)	
	Sans classification		1252	0	
	Cellules 5 * 2 * 5 cellules	<u>Selon X</u> : 0,3 <u>Selon Y</u> : 0,3 <u>Selon Z</u> : 0,3	407	67,49	
	K-Means 50 clusters		387	69,09	
	Methode et parametres	Pas de dexel	Surepaisseur	Temps d'execution (s)	Gain de temps (%)
	Sans classification			62,138	0
	Cellules 5 * 5 * 5 cellules	<u>Selon X</u> : 1 <u>Selon Y</u> : 1 <u>Selon Z</u> : 1	0,5	6,495	88,89
	K-Means 125 clusters			3,679	93,65

b) Amélioration de la qualité du clustering

La figure 3.31 illustre une comparaison du clustering de triangles (STL) dans le cas de la pièce poignée (9450 triangles) classée en cinq clusters. D'après les résultats obtenus, il est clair que parmi les trois méthodes, FGK offre le meilleur partitionnement de la pièce en termes de non-chevauchement des clusters.

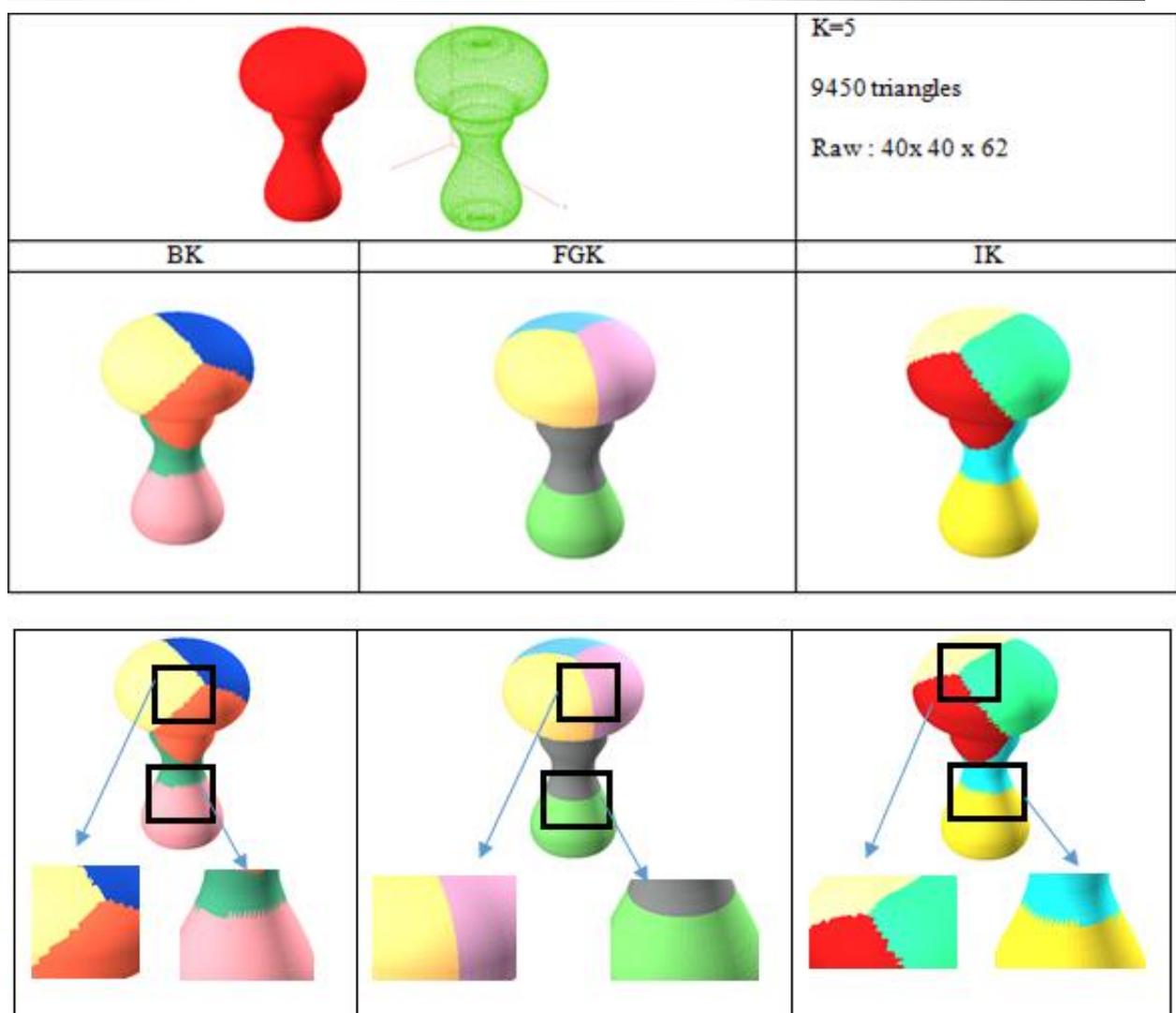


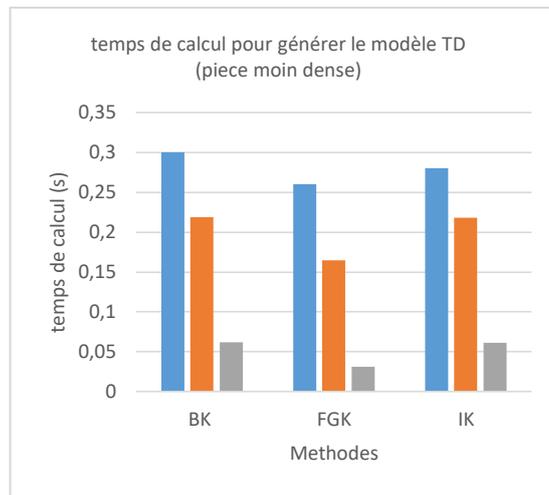
Figure 3.31 Comparaison de la qualité de clustering

c) Amélioration de temps de calcul

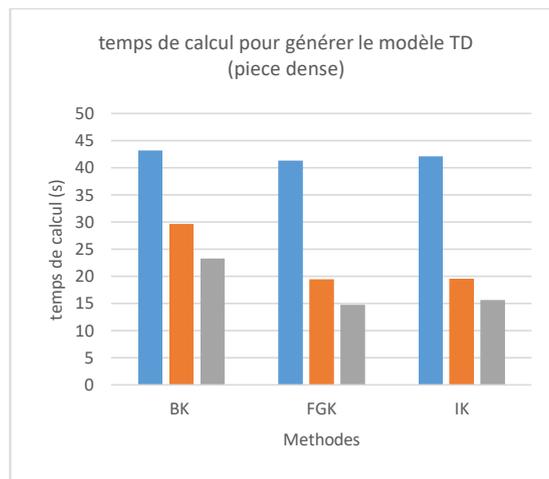
Le calcul a été évalué en utilisant deux pièces, l'une est dense et l'autre est moins dense. Comme il ressort des figures 3.32 a), b) et c), pour les trois méthodes, le temps d'exécution diminue avec le nombre croissant de clusters quel que soit le volume de la base de données.

Cependant, la méthode FGK est la moins coûteuse en temps de calcul. Même si la différence de temps n'est pas importante, mais avec la répétitivité des opérations booléennes en MRS, la valeur ajoutée de cette méthode devient importante.

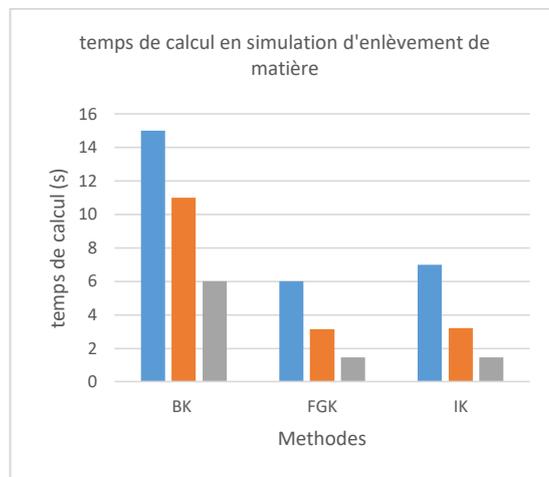
Une constatation intéressante à partir des résultats illustrés est que le temps de calcul est lié au paramètre de qualité de partitionnement. Lorsque les clusters sont homogènes avec moins de chevauchement, la méthode de FGK est plus efficace en termes de temps d'exécution. Donc, c'est la méthode la plus appropriée pour la génération du modèle Triple Dexels et la simulation d'enlèvement de matière.



a)



b)



c)

Figure 3.32 Comparaison des temps de calcul de la simulation

5.3 Conclusion

Dans ce travail, une méthodologie de prédiction de la topographie 3D des surfaces gauches usinée sur machine 5 axes par la simulation d'enlèvement de matière est proposée et implémentée. Notre contribution s'articule sur une division spatiale de la pièce à usiner par un regroupement d'éléments géométriques de discrétisation en des clusters. L'approche a été développée, mise en œuvre et valorisée à travers des tests élaborés par deux manières :

- Validation qualitative et non pas quantitative de l'efficacité du simulateur développé. Cela est dû au nombre de paramètres importants influant sur le phénomène de coupe et qui n'ont pas été pris en considération dans notre modélisation. Les résultats obtenus ont été présentés en allures des courbes et des graphes et discutés par rapport à des évidences techniques existant dans l'usinage des pièces mécaniques.
- Validation de l'amélioration de la simulation en augmentant le nombre de Dexels à travers deux critères :
 - ✓ La qualité du partitionnement de la pièce de forme gauche.
 - ✓ Le temps d'exécution de la simulation

Deux études comparatives ont été élaborées :

- la première est une comparaison entre la méthode classique de partitionnement (méthode de Cellules) et la méthode K. Means
- la deuxième est une comparaison entre les trois méthodes de clustering (BK, FGK et IK).

Les résultats obtenus ont démontré les performances de la méthode K- Means par rapport à la méthode de Cellules. Par ailleurs, les performances de la FGK en fonction du temps de calcul, de l'uniformité des clusters et de la réduction des zones de chevauchement des enveloppes des clusters sont considérables relativement aux méthodes BK et IK.

Chapitre 4

Analyse de l'état de surface 3D

4.1 Introduction

La métrologie est la science des mesures. Elle s'intéresse à tout ce qui est unités de mesure, méthodes de mesure, appareils de mesure et traitements des informations. Il existe différentes sortes de métrologie, à savoir : la métrologie électronique, la métrologie hydraulique, la métrologie chimique, la métrologie dimensionnelle, etc...

La métrologie dimensionnelle a un rôle très important dans l'industrie, car elle permet de contrôler et de mesurer les pièces en cours et après la fabrication afin de vérifier les consignes aux cotations et aux tolérances exigées par le concepteur. Cette métrologie donne aussi des spécifications sur les états de surfaces pour décrire les irrégularités et les défauts de ces surfaces par rapport aux surfaces idéales qui, en fait, n'existent pas. L'avancement de la métrologie a aussi permis d'automatiser la prise de mesure à l'aide de divers appareils dans le but d'aboutir aux valeurs conventionnellement vraies de la grandeur mesurée.

La mesure des états de surfaces peut se faire à l'aide d'appareils équipés de palpeur à contact ou optique. Les appareils de mesure sont distingués en rugosimètre spécialement utilisé pour le calcul de rugosité, Profilomètre, MMT, bras de mesure et aussi toutes sortes de microscopes électroniques et autres [Raphet 2005]. L'étude de la topographie de surface complexe selon la norme ISO 25178-2 de 2012 est caractérisée par des paramètres classés en quatre grandes familles : paramètres d'amplitude, paramètres spatiaux, paramètres fonctionnels et paramètres hybrides. Leur sélection est liée à la fonction de la pièce à étudier dans le système mécanique.

L'objet de ce chapitre est l'analyse de mesure de l'état de surface selon les normes ISO 4287,13565-1, 2 et 25178-2 de 2012. Le traitement d'un nuage de points 2D obtenus avec des appareils classiques ou 3D obtenu par la mesure tridimensionnelle sans contact avec un bras de mesure ou une MMT équipés d'un capteur laser permet la détermination des paramètres de rugosité 2D ou 3D respectivement.

4.2 Problématique

La problématique inscrite dans ce sujet est traitée par l'analyse selon deux aspects. Le premier aspect porte sur la caractérisation d'état de surface tridimensionnelle. Le deuxième concerne la mesure par la numérisation 3D.

4.2.1 Problématique liée à la caractérisation de l'état de surface tridimensionnelle

En métrologie, une norme présente les différents moyens et méthodes pouvant être utilisés pour le mesurage des paramètres géométriques d'états de surface des produits. Les appareils optiques sont reconnus comme méthode d'exploration pour les stries, sillons, rugosités, arrachements... et les méthodes de franges (d'empreintes) projetées sont des méthodes de progression du profil sans contact, celles-ci sont utilisées en 2D. Mais actuellement, il est plus intéressant de définir les caractéristiques d'états de surface d'une pièce sous sa forme réelle (3D). Ainsi des recherches dans le domaine de contrôle métrologie 3D s'approfondissent de plus en plus afin de gagner en productivité et en qualité.

4.2.1.1 Représentation des éléments tolérances et de références en 3D [Bouchareine 1999]

Les éléments de tolérances et de références sont au sens de la norme, des éléments géométriques réels. En métrologie 3D leur représentation se fait de trois façons :

- par un ensemble fini de points mesurés appartenant à la surface réelle : ils seront bien répartis sur toute la surface ou sur la ligne décrite sur la surface,
- par un ensemble de points appartenant aux contours d'un élément géométrique idéal de substitution qui est un élément géométrique réel, défini par ses paramètres de position et d'orientation. Il est le plus souvent défini par l'élément géométrique des moindres carrés,
- par un ensemble de points construits qui est un ensemble de points obtenus par constructions géométriques et donc ne sont pas obtenus directement par mesure d'un élément. Ces ensembles de points construits sont utilisés pour définir de nouveaux éléments géométriques associés.

4.2.1.2 L'intérêt de la caractérisation 3D des états de surface

Notre monde perceptible est tridimensionnel. Par nature, les objets, leurs dimensions, leurs surfaces, leurs textures s'étendent dans les trois dimensions. De même, les interactions entre les objets (contacts, usure, glissement, etc.) se produisent dans l'espace à trois dimensions. Il est donc logique de les analyser dans toutes ces dimensions, dans la mesure où la puissance des moyens de contrôle le permet. Les propriétés des solides et leur comportement dépendant davantage des caractéristiques de leurs surfaces que de leurs propriétés massiques ou volumiques. L'évolution rapide des techniques de fabrication telle que les machines à commande numérique a permis d'obtenir des surfaces relativement complexes qui exigent un contrôle en forme réelle (trois dimensions) en employant des instruments de contrôle tridimensionnels (machine de mesure tridimensionnelle, instruments de mesure optique...). La mesure tridimensionnelle est actuellement le moyen le plus fiable pour caractériser une surface. Elle permet l'observation, l'identification et la quantification des irrégularités. La mesure tridimensionnelle a pris une place importante dans les systèmes de production. En effet la rentabilité économique de l'automatisation des moyens de production nécessite un contrôle rigoureux et automatique des spécifications géométriques des pièces produites. Ces techniques peuvent a priori paraître plus intéressantes du fait qu'elles sont sans contact. Elles offrent en effet plus de rapidité et d'efficacité, mais leur précision est moindre et il arrive souvent que l'on n'ait pas un accès direct à l'objet, ce qui rend leur utilisation impossible [Bassiere et gaignebet 1966].

4.2.1.3 Définitions et éléments constituant la texture d'une surface

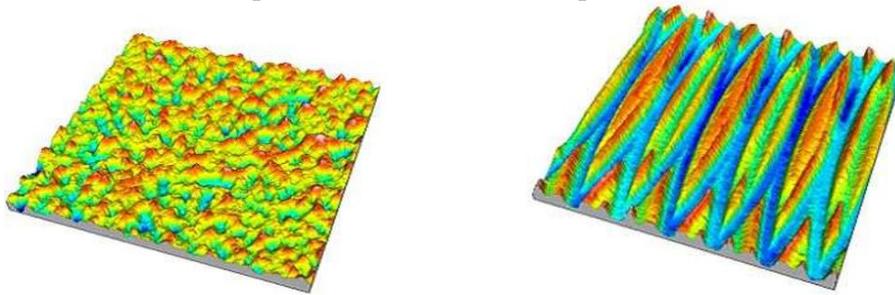
Depuis plusieurs années, des travaux de recherche portant sur l'analyse, la segmentation et l'orientation de textures sont effectuées dans le groupe vision. Intuitivement, la notion de texture nous paraît familière, mais en fait lui donner une définition précise est plutôt complexe. Une texture est une information qui rend compte de l'état de surface d'un objet. Elle se caractérise par l'arrangement plus ou moins régulier de motifs élémentaires. On distingue deux grandes classes de textures :

- Macro textures qui sont constituées par la répartition spatiale d'un ou plusieurs motifs élémentaires nommés Texel
- Micro textures qui ont un aspect aléatoire, mais pour lesquelles l'impression visuelle reste globalement homogène.

Les textures donnent une information interne à une région. Dans des environnements flous ou perturbés, où l'information des contours n'est pas une donnée fiable, posséder une description à l'intérieur d'une région est un atout important. Les méthodes classiques d'analyse de textures sont très liées à la catégorie de textures. Pour la macro textures, en préférence, des méthodes structurales seront utilisées, tandis que l'analyse du micro textures se fera souvent par des méthodes de type statistiques.

4.2.1.4 Isotropie, Anisotropie

Lorsqu'un profil est mesuré en 2D, le capteur n'enregistre le relief que le long de son trajet. La mesure ne peut donc être représentative de la surface elle-même que sous certaines conditions qui dépendent de l'isotropie de la surface. Une surface est dite isotrope lorsqu'elle présente des caractéristiques identiques, et ce quelle que soit la direction de mesure. C'est le cas par exemple, des surfaces dont l'état de surface est aléatoire et ne présente aucune texture marquée. Ce genre de surface est malheureusement assez rare et la plupart des surfaces rencontrées dans l'industrie présentent une texture orientée (surfaces tournées, pierrées, brossées, etc.) ou à structure périodique. On dit dans ce cas que la surface est anisotrope.



Surface présentant une texture isotrope

Surface présentant une texture anisotrope

Figure.4.1 Représentation de la texture

4.2.1.5 Critères et paramètres de définition d'états de surface 3D

a) Rugosité

Les premiers paramètres 3D à être apparus ont été basés sur les paramètres 2D existants, en extrapolant leur équation à deux dimensions. Différents travaux vers une standardisation ont été faits comme le travail accompli par l'équipe du Pr. K. Stout à l'université de Birmingham dans les années 90 [Dong et al 1993] et qui a permis de définir un premier jeu de paramètres (les 14 de Birmingham). En 2001, le projet européen SURFSTAND a étendu et amélioré les paramètres de Birmingham et a jeté les bases de la future norme ISO. Les paramètres ISO diffèrent parfois un peu de la définition donnée lors des programmes européens, et certains paramètres n'ont pas été repris ou ont été remplacés par d'autres.

b) Norme ISO 25178

La première règle adoptée a été celle qui définit l'appellation des nouveaux paramètres surfaciques. Ceux-ci commenceront par la lettre majuscule S (ou V pour certains paramètres fonctionnels). Contrairement à ce qui existe en 2D, les préfixes des paramètres 3D ne reflèteront plus les distinctions entre les composantes de rugosité, d'ondulation ou de structure. Vu la multiplicité des traitements et des filtres qui sont désormais à la disposition des métrologues pour extraire l'information d'une surface, la séparation en trois composantes semble en effet obsolète. Là où l'état de surface en 2D fait la différence entre P_a , R_a et W_a , le domaine de la 3D n'emploiera donc que S_a , ce dernier sera un paramètre surfacique de rugosité, d'ondulation ou calculé sur la surface primaire, suivant le pré filtrage qui aura été effectué avant de calculer

le paramètre. La plupart des formules mathématiques permettant de calculer les paramètres d'amplitude en 2D suivant l'ISO 4287, les paramètres d'amplitude peuvent être facilement applicables à la mesure surfacique. C'est le cas par exemple de la rugosité moyenne quadratique du profil R_q dont la formule contient une intégrale simple. En passant à l'intégrale double (sur une surface), on définit tout naturellement le paramètre S_q (rugosité moyenne quadratique de la surface). La même règle s'applique également pour les paramètres S_a (rugosité moyenne arithmétique), S_{sk} (facteur d'asymétrie), S_{ku} (facteur d'aplatissement), S_p (hauteur maximale des pics) et S_v (profondeur maximale des creux). Seul le célèbre R_z (hauteur maximale du profil) pose problème, puisqu'il existe un paramètre R_z dit "des dix points" (défini dans la norme ISO 4287 de 1984) et une variante, définie (en 1997) comme étant la moyenne des hauteurs maximales de profil R_{ti} calculées sur chaque longueur de base. Par souci de simplification, le S_z sera défini dans la future norme comme "la hauteur maximale du plus haut point à la plus profonde vallée", comme l'est jusqu'à présent où il définit le St . Ce dernier, devenu inutile, disparaît de la norme [Padilla 1986]. Les formules mathématiques pour les caractéristiques sont développées dans le chapitre 2.

c) Mesure de la rugosité

La mesure de rugosité n'est pas aisée à définir. Depuis plus de soixante ans, les normes se succèdent, tentant par de multiples paramètres et toutes sortes de formules mathématiques d'approcher au mieux ce qu'est la rugosité. Ainsi certains paramètres utilisés pour définir la rugosité sont encore très controversés ou semblent réservés à des applications spécifiques. D'autres, enfin, demeurent encore mal connus et sont source de confusion [Zani 2003]. La rugosité d'une surface explique sa sensibilité à la corrosion, à l'usure, ainsi que ses propriétés d'adhérence, de glissement ou encore de roulement. Mais lorsqu'on souhaite mesurer cette rugosité, l'opération est autrement plus compliquée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'années que les systèmes de topographie sont apparus. Leur principe de fonctionnement consiste à mesurer des profils parallèles espacés régulièrement de façon à couvrir une surface rectangulaire. On obtient un relevé d'altitude z en fonction de la position x dans le profil, et la position y du profil dans la surface. C'est ce qu'on appelle un relevé 3D, et l'on parle de topographie 3D ou parfois de surfométrie.

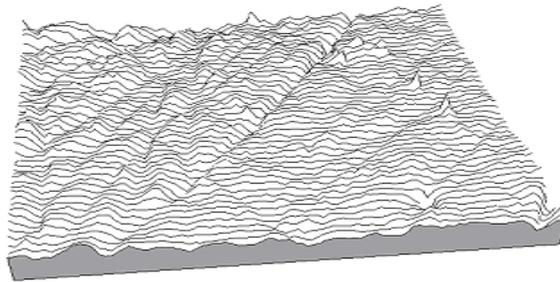


Figure 4.2 Représentation de l'état de surface 3D d'une pièce

4.2.2 Problématique liée au système de numérisation

Les systèmes de numérisation permettent la représentation discrétisée de la peau de la pièce à mesurer. En effet, les données issues de numérisation sont en général bruitées, inhomogènes et incomplètes. De ce fait, la problématique de la mesure de la topographie 3D des pièces de forme gauche est liée au choix du système d'acquisition, ainsi qu'à la définition de la stratégie de numérisation conduisant à une qualité d'information géométrique suffisante. Nous rappelons d'abord, ce qu'est un système de numérisation 3D et quelles sont les caractéristiques associées aux données numérisées.

4.2.2.1 Numérisation 3D [Guarato 2013]

Les systèmes de numérisation sont composés d'un système d'acquisition de données, d'un système de déplacement et d'un système de traitement des informations acquises (Figure 4.3). La principale fonction de ces systèmes est d'obtenir une représentation numérique de la géométrie à mesurer sous forme d'un nuage de points, un maillage, ou d'autres types de représentation (imagerie par résonance magnétique ou par tomographie). Le système d'acquisition (ou capteur) permet d'acquérir des données de la surface. Le capteur est très généralement un capteur optique comme un capteur laser-plan, ou un capteur à projection de franges. Le système de déplacement (ou porteur) permet de déplacer le capteur et/ou l'objet afin d'avoir une numérisation complète. Le système de traitement est nécessaire à l'obtention de données [Audfray et Mehdi-Souzani 2012].

Chacun des systèmes de la chaîne de numérisation constitue une source d'erreur ou d'imprécision potentielle et influence la qualité des données acquises (figure 4.4).

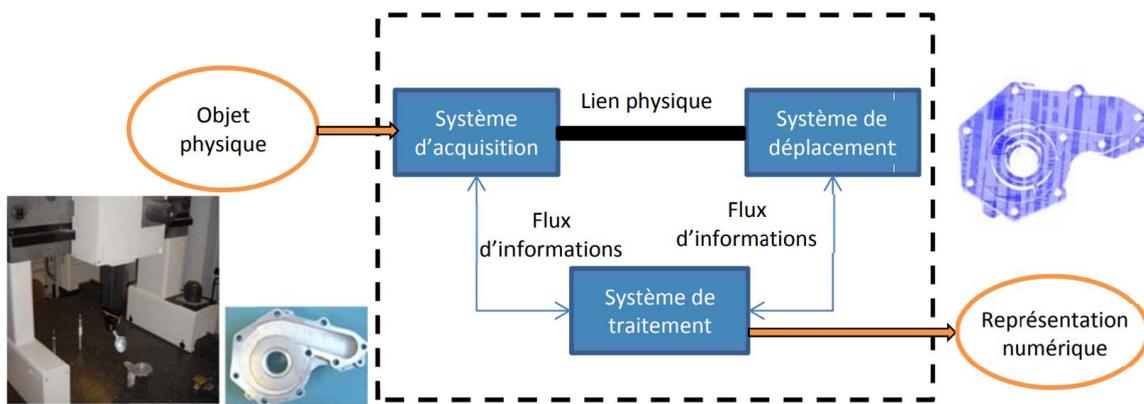


Figure 4.3 Principaux constituants d'un système de numérisation [Contri 2002][Audfray 2012]

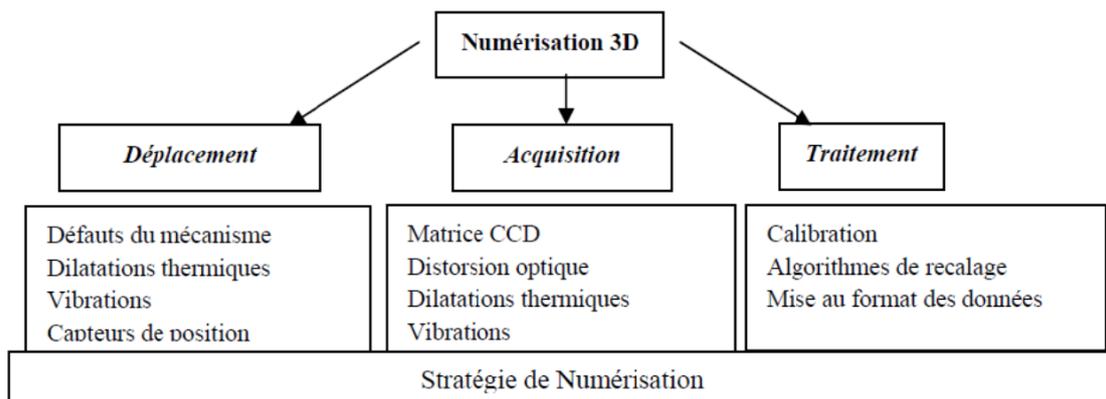


Figure 4.4 Sources d'imprécision [Lartigue 2004]

4.2.2.2 Caractéristiques des données acquises [Guarato 2013]

Les systèmes de numérisation 3D permettent de restituer une représentation numérique d'un objet réel sous la forme d'un nuage de points ou sous la forme d'un maillage, soit un ensemble de données discrètes. Ainsi, ce type de représentation de la surface d'une pièce est discontinu.

En effet, le maillage s'appuie également sur des points. Visuellement le nuage de points forme un espace séparé, mais il n'est pas structuré comme dans un modèle CAO, ce qui rend le nuage

de points désorganisé. De plus le nuage de points peut être caractérisé comme dense, la densité n'étant pas, la plupart du temps, homogène. En effet, afin de numériser la surface complète d'un objet, il est nécessaire de réaliser plusieurs vues de numérisation. Or, le recalage entre une vue et l'autre crée des zones de recouvrement de densité variable. Ainsi, le nuage de points est également qualifié d'inhomogène.

Malgré les larges possibilités offertes par les porteurs, certaines zones de la pièce restent inaccessibles au capteur et ne sont pas numérisées, conduisant à des trous ou lacunes de numérisation (figure 4.5). Les données sont alors qualifiées d'incomplètes vis-à-vis de l'objet initial. Les sources d'erreur génèrent en plus des erreurs aléatoires ou systématiques. Les erreurs aléatoires rendent le nuage de points bruité, alors que les erreurs systématiques dégradent la justesse de mesure [Contri 2002][Audfray et Mehdi-Souzani 2012][Mehdi-Souzani 2006]. Ainsi, nous pouvons qualifier les données : elles sont discrètes, denses, inhomogènes, bruitées et présentant des lacunes de numérisation. La qualité des données est en général appréhendée au moyen d'indicateurs de qualité, elle est fortement liée au capteur qui effectue l'acquisition. Elle dépend également de la stratégie de numérisation adoptée, c'est-à-dire du positionnement relatif du capteur vis-à-vis de la pièce. La qualité du nuage de points influence l'exploitation future qui en est faite [Contri 2002]. Un nuage incomplet ou fortement bruité altère les exploitations telles la reconstruction de surface ou l'inspection. De même, un nuage de points très dense et volumineux augmente les temps de calcul. L'exploitation est souvent facilitée grâce à des traitements des données tels que le filtrage du bruit ou encore la structuration afin de recréer une continuité [Audfray et Mehdi-Souzani 2012]. Notons cependant que la majorité des applications qui sont faites sont : la reconstruction de surface, le prototypage rapide, la visualisation, ou encore l'inspection. (Métrologie dimensionnelle). Sur cette dernière que notre travail se situe.

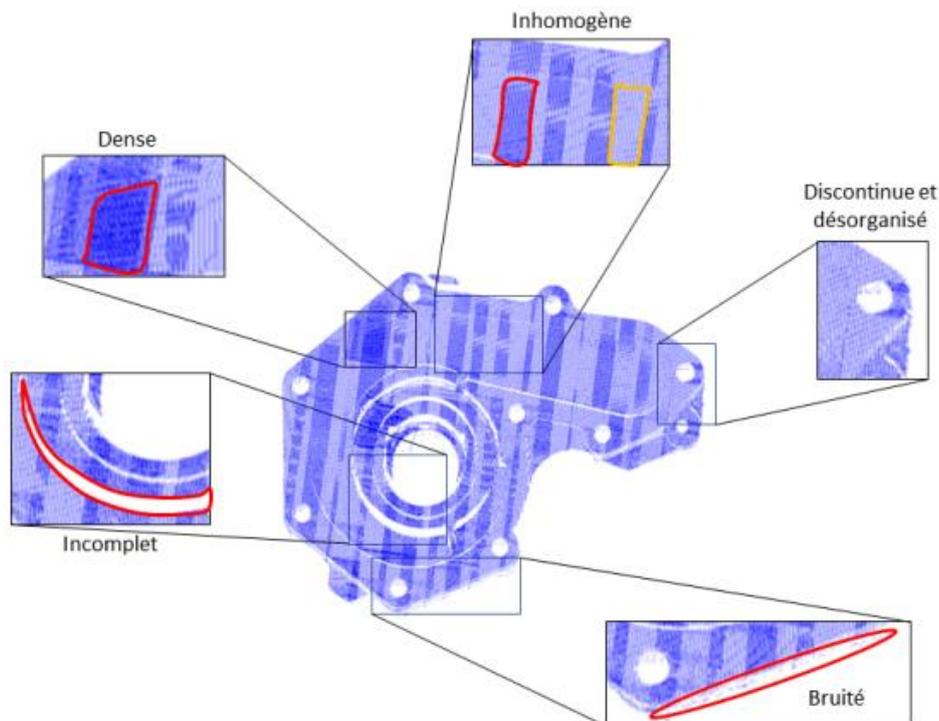


Figure 4.5 Caractéristiques des données numérisées [Guarato 2013]

4.3 Objectif

L'objectif est la réalisation et le développement d'un module logiciel graphique et interactif sous Windows qui permet la mesure par analyse de l'état de surface 3D dans un environnement de programmation Matlab. Ce logiciel utilisera comme données un nuage de points acquis par un bras de mesure à faisceau laser.

Cet objectif peut être subdivisé en plusieurs sous objectifs :

1. Acquisition d'un nuage de points par la numérisation 3D des surfaces de différentes formes (planes, cylindrique et gauche).
2. Traitement des données exporté par ces instruments de mesure ;
3. Calcul des paramètres de rugosité (2D et 3D) sur les différentes pièces mécaniques ;
4. Visualisation de la topographie de surface.

4.4 Démarche de résolution

La démarche de résolution adoptée se résume aux points suivants :

1. Numérisation 3D par un bras de mesure disponible au CDTA.
 - ✓ Positionnement de la pièce dans le repère machine de mesure ;
 - ✓ Acquisition du nuage de points bruité ;
 - ✓ Nettoyage du nuage de points par le logiciel géomagique studio ;
 - ✓ Enregistrement des données sous format exploitable par Matlab.
2. Traitement des données exportées :
 - ✓ Détermination de la surface optimale ;
 - ✓ Calcul des écarts suivant la normale entre la surface optimale et le nuage de points ;
3. Calcul des paramètres de rugosité (2D et 3D) sur différentes pièces mécaniques :
 - ✓ Sélection des zones à mesurer
 - ✓ Représentation des états de surface de ces pièces partielles et globales ;
 - ✓ Détermination des paramètres d'état de surface.

4.4.1 Partie expérimentale

Afin de développer et de valider les résultats du développement effectué, des expériences ont été réalisées en utilisant le matériel et le logiciel nécessaires.

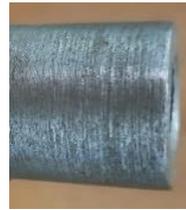
4.4.1.1 Matériels

Le matériel utilisé pour réaliser cette étude est :

- Un bras de mesure (ROMER Absolute Arm) (figure 6) : est un instrument de métrologie dont la mesure s'effectue à l'aide d'un système de palpation à contact ou avec un scanner à nappe laser. La flexibilité du bras permet une mesure plus facile des pièces à des formes complexes. La structure du bras de mesure est inspirée du bras humain. Il permet jusqu'à sept (07) degrés de liberté. L'incertitude du bras de mesure est relativement plus importante par rapport aux Machines de Mesure Tridimensionnelle classique, le manipulateur ainsi que l'environnement contribuent sur cette incertitude.
- MMT type portique du laboratoire Electronique, Informatique et Image de l'Institut Universitaire de Technologie d'Auxerre, Université de Bourgogne (France), équipée de capteur à nappe laser LC50
- Pièces mécaniques avec différentes formes (plane, cylindrique et gauche) (figure 4.7).
- Ordinateur : (Lenovo Core i7, 16GB SDRAM)



Figure 4.6 : Bras de mesure
ROMER Absolute Arm



(b) Cylindre



(a) Plan



(c) Ailette

Figure 4.7 : Pièces mesurées

4.4.1.2 Matériels logiciels

Les logiciels exploités dans cette étude sont :

Matlab : Utilisé pour le développement de l'application logiciel qui permet la mesure par analyse de l'état de surface 3D.

Géomagique Studio : Utilisé pour le traitement et le nettoyage du nuage de points.

Embarcadero -C++ : Utilisé pour le développement de l'algorithme de reconstruction de la surface 3D

4.4.1.3 Manipulation

Le but de la manipulation est l'acquisition d'un nuage de point par la numérisation 3D de surface des pièces mécaniques ayant différentes formes à savoir : plane, cylindrique et de forme gauche (ailette). Pour cela, les étapes de la manipulation sont :

- La pièce est posée de façon à permettre à l'opérateur de prendre les mesures correctement et que la surface à mesurer soit accessible au scanner.
- Un faisceau laser est projeté le long de la pièce selon l'orientation désirée par l'opérateur.
- Les informations recueillies sont traitées comme des coordonnées 3D des points dans l'espace.

- À l'aide du logiciel Géomagique Studio, le nuage de points obtenus est traité et nettoyé, puis exporté comme fichier sous forme d'un tableau à trois (03) colonnes et un nombre de lignes correspondant au nombre de points.

4.4.2 Partie théorique

Dans cette partie, nous présentons la théorie nécessaire pour l'application logicielle développée. Le développement mathématique de cette partie relatif à tous les cas de formes étudiées est présenté dans l'annexe 6.

4.4.2.1 Optimisation des surfaces

Depuis plusieurs années, de nombreux travaux ont porté sur l'association d'une surface théorique à un nuage de points issus d'une machine à mesurer tridimensionnelle. Sur cette dernière, la fonction pour obtenir la surface associée est basée sur la minimisation de la distance entre le point M_i palpé et la surface idéale suivant l'un des critères d'optimisation. Dans cette partie présentée pour l'optimisation des surfaces, on utilise curve fitting qui est une application associée à Matlab (figure4.8). Celle-ci fournit des fonctions pour l'ajustement des courbes et des surfaces à partir des données. Le toolbox permet d'effectuer une analyse exploratoire des données, de pré-traiter et de post-traiter des données, de comparer des modèles et de supprimer des valeurs aberrantes. Il permet aussi de réaliser une analyse de régression à l'aide de la bibliothèque de modèles linéaires et non linéaires disponibles ou en indiquant des équations personnalisées. La bibliothèque fournit des conditions de départ et paramètres de solveur optimisés pour améliorer la qualité des ajustements. Le toolbox prend également en charge des techniques de modélisation non paramétriques telles que les splines, l'interpolation et le lissage. Après avoir créé un ajustement, la fonction curve fitting permet leur utilisation par différentes méthodes de post-traitement pour le tracé, l'interpolation et l'extrapolation, pour l'évaluation d'intervalles de confiance et pour le calcul d'intégrales et de dérivées.

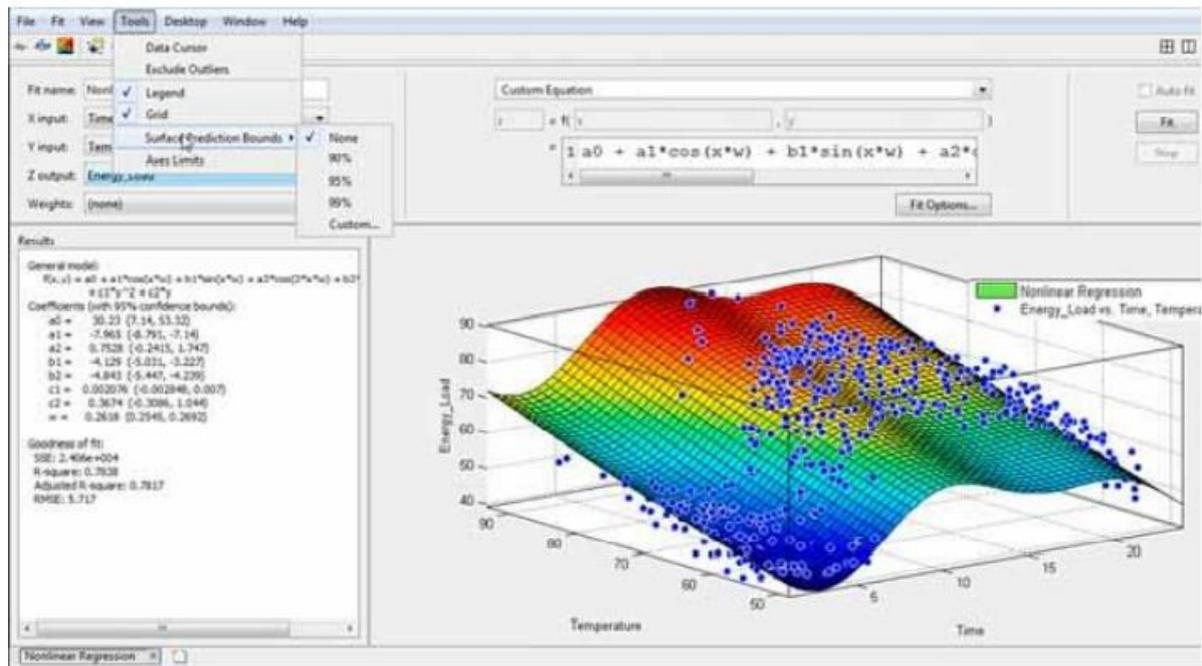


Figure 4.8 Interface de l'application curve fitting

4.4.2.2 Calcul des paramètres de rugosité surfacique

Il existe un grand nombre de paramètres tridimensionnels qui caractérisent l'état de surface comme défini dans la section 2.1.3.2, mais dans ce qui suit, seuls les paramètres de hauteur de la norme ISO 25178-2 de 2012 sont considérés à savoir : Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku.

Pour calculer ces paramètres, il faut d'abord :

- Déterminer la surface optimale ou moyenne (utilisation de la fonction curve fitting),
- Calculer les écarts entre les points mesurés et la surface optimale (utilisation de la fonction *Optimisation*)

4.4.3 Algorithme et démarche de travail

Trois programmes de calcul sous Matlab ont été élaborés afin de faire le traitement des données, la représentation des états de surface et le calcul des paramètres de rugosité 3D. Ces trois programmes sont liés aux trois formes de surface qui ont été traitées :

- *Surface plane*
- *Surface cylindrique*
- *Surface libre*

Les deux premiers programmes font le calcul des paramètres de rugosité surfaciques pour les surfaces particulières (surface plane et surface cylindrique). Tandis que le dernier fait le calcul pour les surfaces libres à condition qu'elles soient bijectives. Les trois (03) programmes diffèrent au niveau de l'optimisation de la surface, mais la démarche suivie est pratiquement la même. Les étapes de la programmation sont illustrées sur l'organigramme présenté sur le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Algorithme de résolution

Étape	Description
1	Lecture des données à partir d'un fichier.
2	Représentation graphique des données.
3	Sélection d'une zone de calcul.
4	Génération de la surface optimale par la méthode des moindres carrés pour la zone de calcul (annexe 6.1)
5	Calcul des hauteurs des points par rapport à la surface optimale (annexe 6.2)
6	Calcul des paramètres de rugosité.
7	Présentation des résultats.
8	Présentation graphique de l'état de surface de la zone sélectionnée.

Chaque étape est décrite comme suit :

- ✓ Le fichier à lire a une forme d'un tableau de données constitué de trois (03) colonnes et un nombre de lignes équivalent au nombre de points.
- ✓ Présentation des données pour la visualisation de la pièce.
- ✓ Le choix de la zone de calcul est fait par l'utilisateur.
- ✓ L'équation de la surface $z = f(x, y)$ est déterminée par la méthode des moindres carrés développée en annexe 6.1.
- ✓ La hauteur orthogonale entre un point et la surface optimale est calculée en minimisant la distance entre ce point et un point appartenant à la surface.
- ✓ Les paramètres sont calculés tels qu'énoncés dans la norme ISO 25178.

4.4.4 Programme Matlab

Les programmes développés sont écrits sur MATLAB R2015a.

4.4.4.1 Fonctions utilisées et intégrées sur MATLAB

Les fonctions les plus importantes dans le programme développé sont :

- load() :
C'est la fonction qui permet de lire les données à partir d'un fichier. Elle prend comme argument le nom du fichier suivi par son extension (*.iv, *.csv, *.txt, *.asc sont tous des extensions valides). Le fichier devrait être dans le même répertoire que le programme principal.
- Curve Fitting :
Cette fonction représente une application de MATLAB. Cependant, MATLAB permet l'autogénération du programme.
- Optimization:
Comme Curve Fitting, elle représente une application pour générer le code sous forme d'une fonction. L'application permet la recherche des valeurs optimales. Dans notre cas, la valeur cherchée est la valeur minimale, en introduisant la fonction en question sous forme d'une '*function hundle @*', le point de départ, le nombre d'itérations et la tolérance maximale.
- solve() :
Pour la résolution des équations. Elle accepte une équation ou un système d'équations sous la forme symbolique de MATLAB et l'ensemble des variables inconnues comme des arguments.

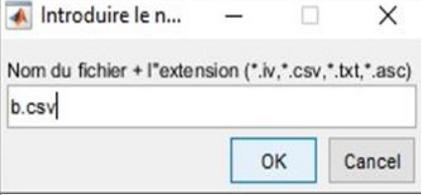
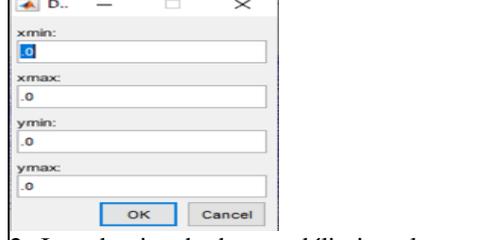
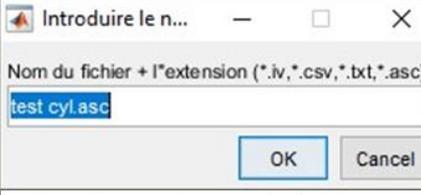
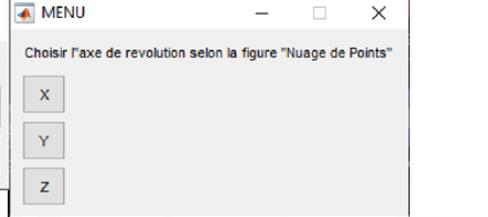
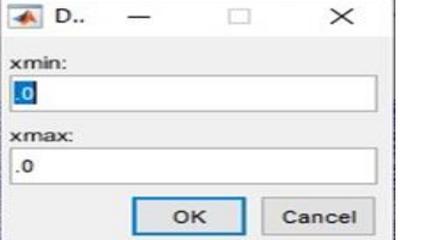
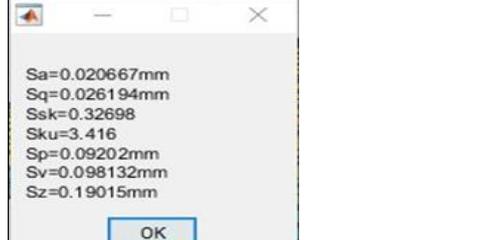
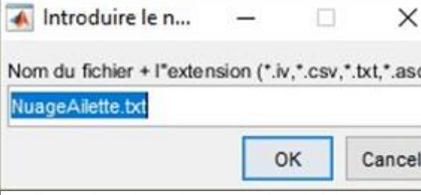
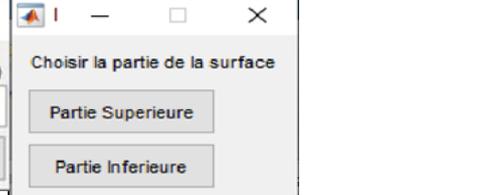
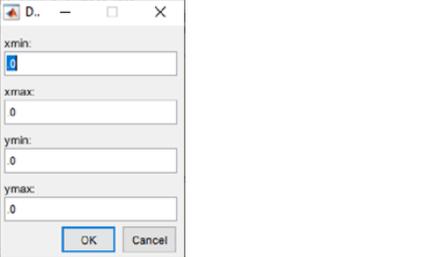
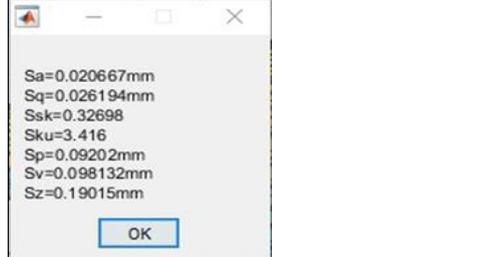
4.4.4.2 Mise en main des programmes

Lors de l'exécution des trois (03) programmes, des fenêtres de messages apparaissent pour introduire les paramètres comme illustrés sur le tableau 4.2.

Remarque :

Dans la partie mesure de la surface de forme libre (ailette), le programme procède par la séparation de la pièce. Ceci est possible si on utilise l'application *Curve Fitting* pour trouver le plan moyen de l'ailette, puis retrouver la position des points par rapport à ce plan. L'intérêt d'y faire c'est parce que, durant les étapes suivantes, la recherche de l'équation de la surface optimale $z = f(x, y)$ ne s'applique que sur les surfaces bijectives.

Tableau 4.2 Présentation graphique des étapes de l'application développée

<p>SurfacePlane.m</p>	 <p>1 : Introduction du nom de fichier</p>	 <p>2 : Introduction des bornes délimitant la zone de calcul</p>
<p>SurfaceCylindrique.m</p>	 <p>1 : Introduction du nom de fichier</p>	 <p>2 : Choisir l'axe de révolution de la pièce</p>  <p>3 : Délimiter une portion du cylindre selon l'axe choisi</p>  <p>4 : Affichage des paramètres de rugosité zonaux</p>
<p>SurfaceLibre.m</p>	 <p>1 : Introduction du nom de fichier</p>	 <p>2 : Choisir la face de l'ailette</p>  <p>3 : Introduction des bornes de la zone de calcul</p>  <p>4 : Affichage des paramètres de rugosité zonaux</p>

4.5 Résultats & Discussion

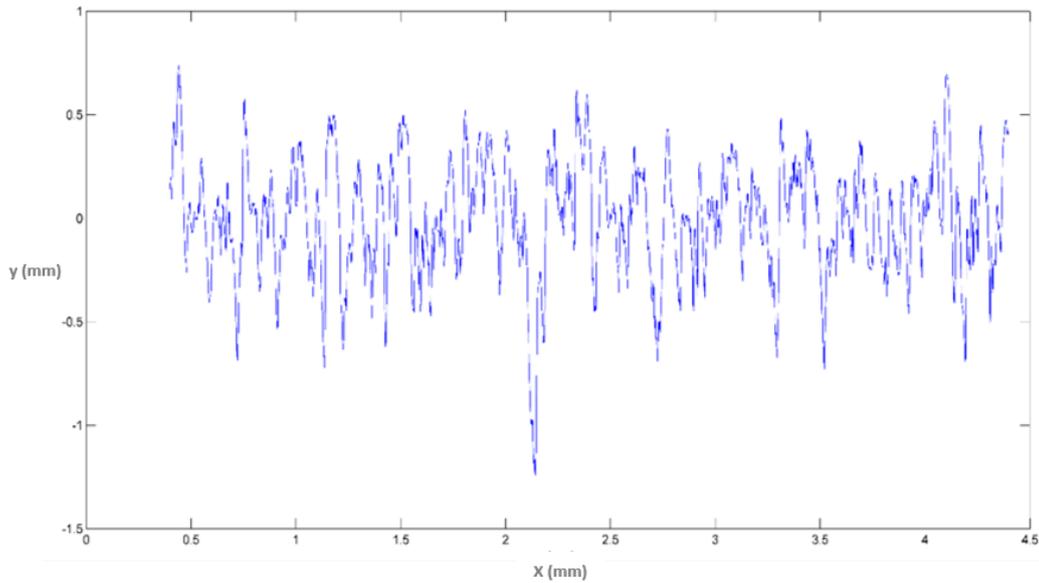
Selon les étapes de travail indiquées dans la section précédente, les pièces mécaniques utilisées dans les tests sont issues de l'usinage par enlèvement de matière (Plan 25×50×30, Cylindre Ø 20×100, enveloppe de l'Ailette 15×100). Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes 2D et 3D, nuage de points et des tableaux comparatifs.

4.5.1 Caractérisation de la rugosité 2D et 3D de surface plane

— Traitement 2D

✓ Caractérisation de la rugosité 2D

La figure 4.9 présente la courbe du profil de la mesure 2D. Les paramètres de la rugosité 2D sont illustrés sur le tableau 4.3.



La figure 4.9 présente la courbe du profil de la mesure 2D.

Tableau 4.3 Paramètres de la rugosité 2D d'une surface plane

2D	
Paramètres	Valeurs calculées
Ra	0.216 μm
Rz	1.349 μm
Rq	0.275 μm
Rv	-0.805 μm
Rsk	-0.263
Rku	3.238

✓ Taux de longueur portante

Le taux de longueur portante est un paramètre très important dans l'étude tribologique des pièces. Ce paramètre donne le pourcentage de matière coupée à une profondeur donnée depuis le haut du profil. La référence du seuil peut également être prise sur la ligne moyenne ou une autre valeur (c_0).

Le choix du niveau de coupe (Figure 4.10) est lié à la connaissance du phénomène d'usure relatif à la pièce en question, pour notre cas d'étude $c=0,5\text{mm}$.

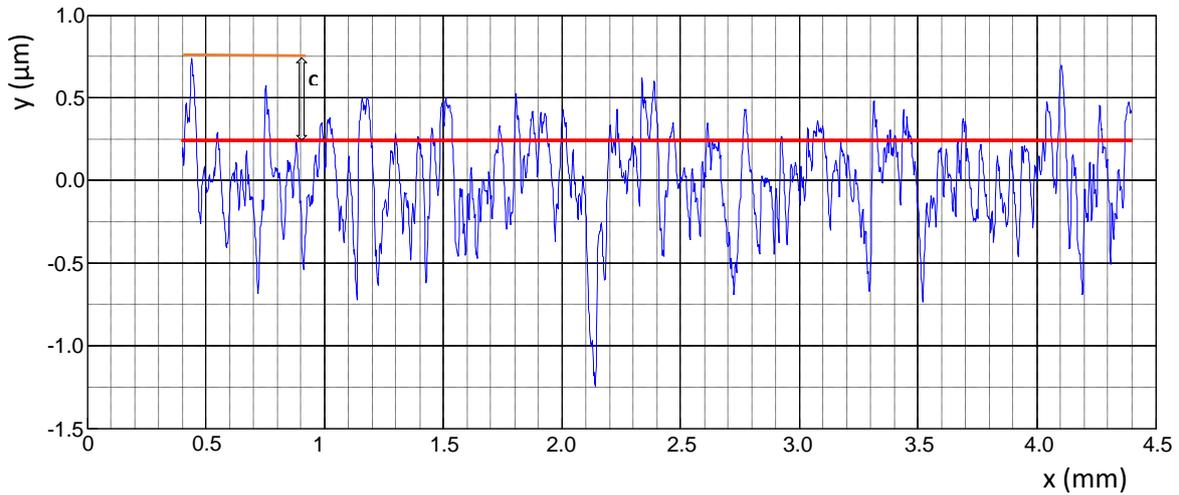


Figure 4.10 Représentation du niveau de coupe

Pour $c = 0,5$, hauteur de coupe $y = 0.240$, la longueur portante du profil calculer est $T_p = 0.173$. La courbe du taux de longueur portante (R_{mr}) est tracée en fonction de la variation du niveau de coupe (c) qui varie de la valeur maximum de (y) jusqu'à la valeur minimum de (y) (Figure 4.11), en passant par toutes les autres valeurs. R_{mr} indique le rapport exprimé en %, à un niveau de coupe (c) donné, entre la longueur totale, passant dans la matière et la longueur d'évaluation. Ce ratio est déterminé sur la longueur d'évaluation. La courbe du taux de longueur portante du profil montre que la répartition de matière est en fonction du niveau de coupe (Figure 4.12).

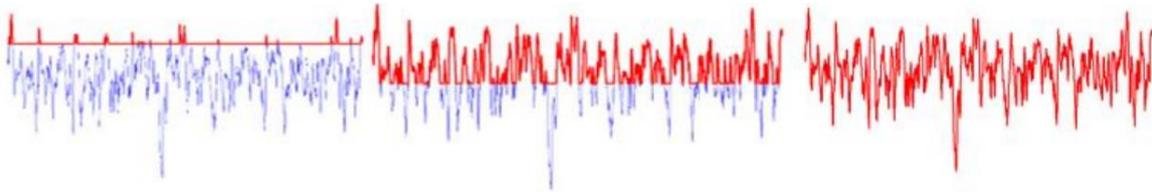


Figure 4.11 Représentation des différents niveaux de coupe sur la surface

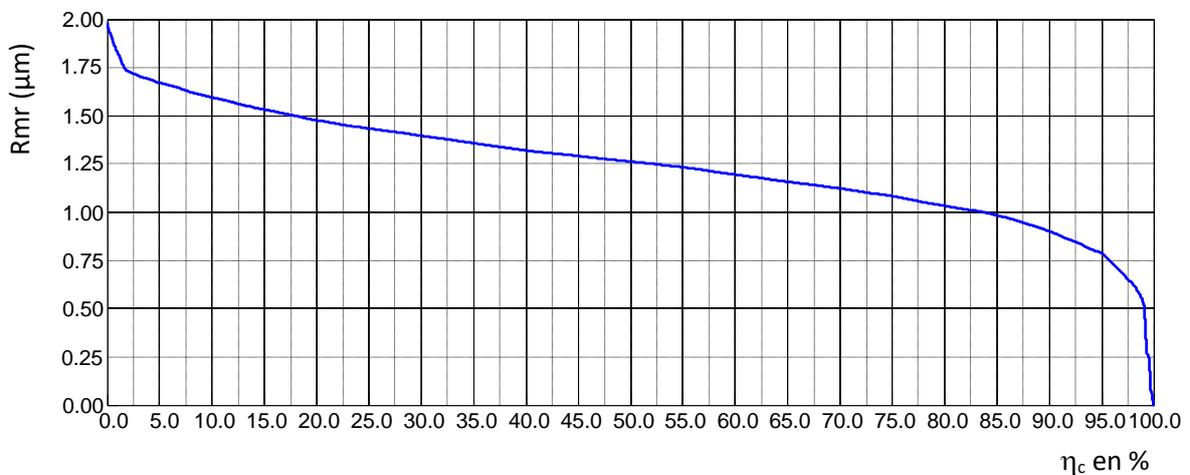
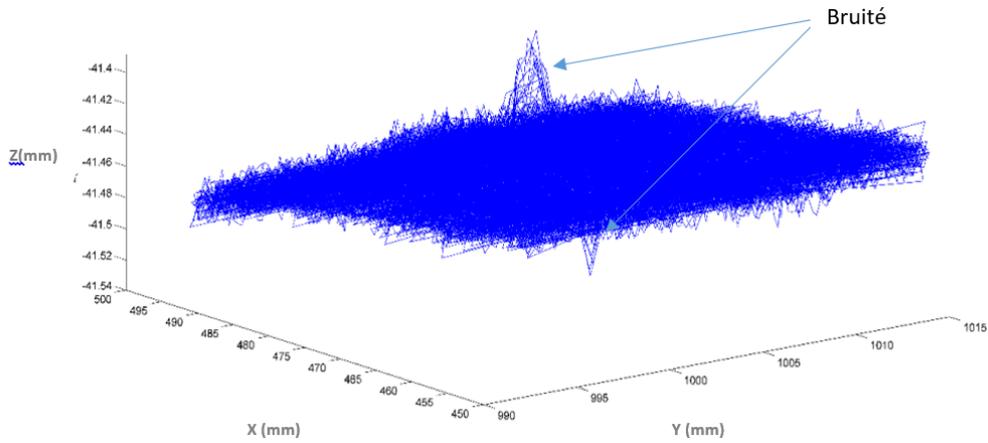


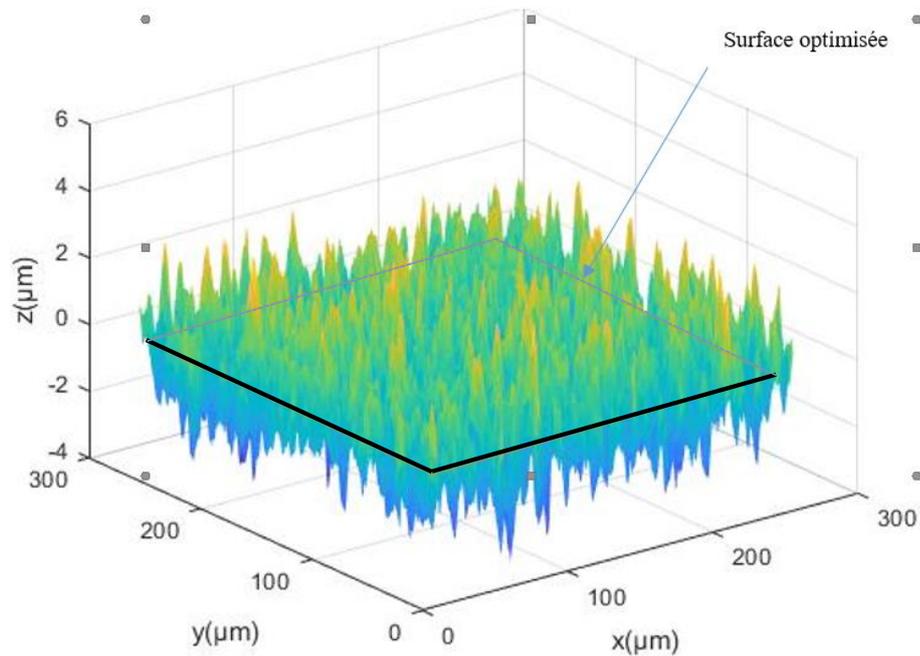
Figure 4.12 Représentation de la courbe du taux de longueur portante

— **Traitement 3D**
 ✓ **Résultat 1**

La figure 4.13a illustre le nuage de points mesurés et bruités. La figure 4.13b montre la surface mesurée et la surface optimisée (plan). Les paramètres de rugosités 2D et 3D calculés par l'algorithme développé sont indiqués sur le tableau 4.3.



a) Nuage de points



b) Surface optimisée

Figure 4.13 Représentation de l'état de surface 3D d'un plan

Tableau 4.4 Paramètres de la rugosité 3D d'une surface plane

3D	
Paramètres	Valeurs calculées
Sa	0.796 μm
Sp	4.062 μm
Sz	7.995 μm
Sq	1.000 μm
Sv	-3,987 μm
Ssk	0.063
Sku	2.991

✓ **Résultat 2**

Sur le tableau 4.5 sont présentés les paramètres de rugosités 3D de deux surfaces, une avant revêtement et l'autre après. La pièce en question est en Acier S335 revêtu d'une couche dure (Ti-W-N) d'épaisseur de 2 μm . Cette couche mince est très lisse ce qu'explique les résultats sur la figure 4.14, dont la courbe des paramètres d'état de surface revêtue est inférieure à la courbe des paramètres d'état de surface non revêtue.

Tableau 4.5 Paramètres de la rugosité 3D de surfaces planes avec et sans revêtement

paramètres (μm)	Sa	Sp	Sz	Sq	Sv
Pièce avec revêtement	0,630	0,948	1,017	0,634	-0,126
Pièce sans revêtement	0,891	1,070	1,437	0,895	-0,332

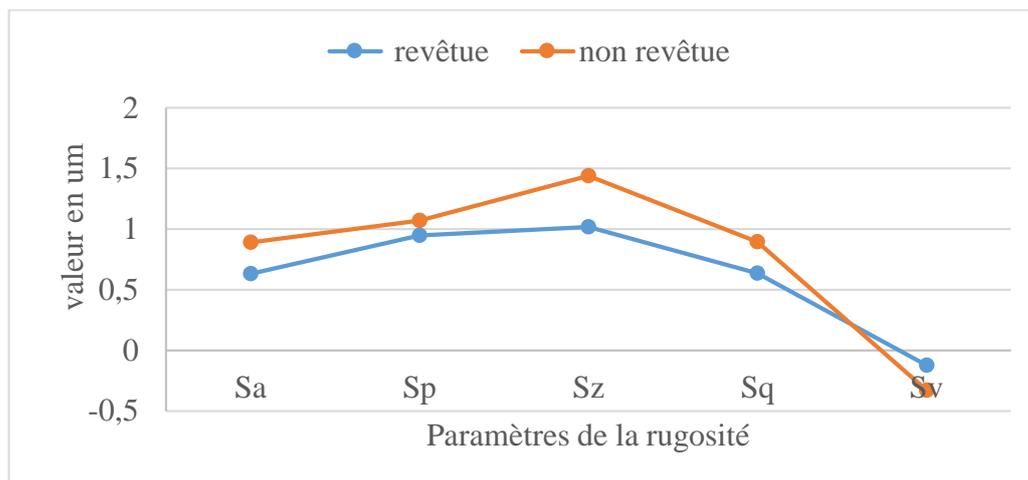


Figure 4.14 Paramètres de la rugosité 3D de surfaces planes avec et sans revêtement

4.5.2 Caractérisation de la rugosité 3D de surface cylindrique

Les tests ont été effectués sur deux surfaces cylindriques, la première pièce est plus lisse que la deuxième (figure 4.15). Un nuage de point acquis par la numérisation 3D des deux pièces (figure 4.16), la première est présenté sur la figure 4.16 a). D'après cette figure, des vides dans le nuage de point sont distingués, ils sont causés par le phénomène de brillance de la pièce, et donc pour éviter d'avoir des résultats erronés, l'étude se limitera à une portion du cylindre figure 4.17.

La figure 4.16 b) représente un nuage de point acquis par la numérisation 3D de la pièce 2 et la zone sur laquelle les calculs ont été faits, cette zone est agrandi et illustrée sur la figure 4.17 b).

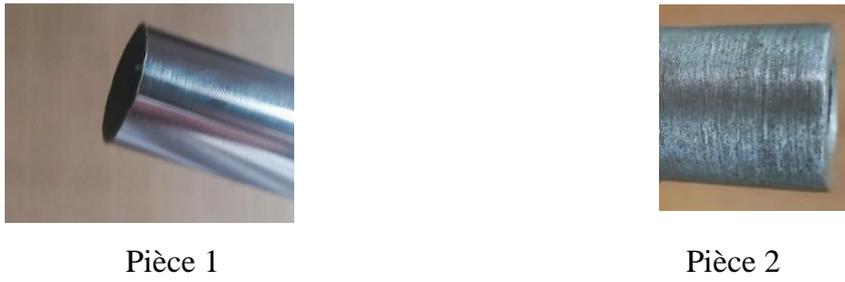


Figure 4.15 pièces cylindriques

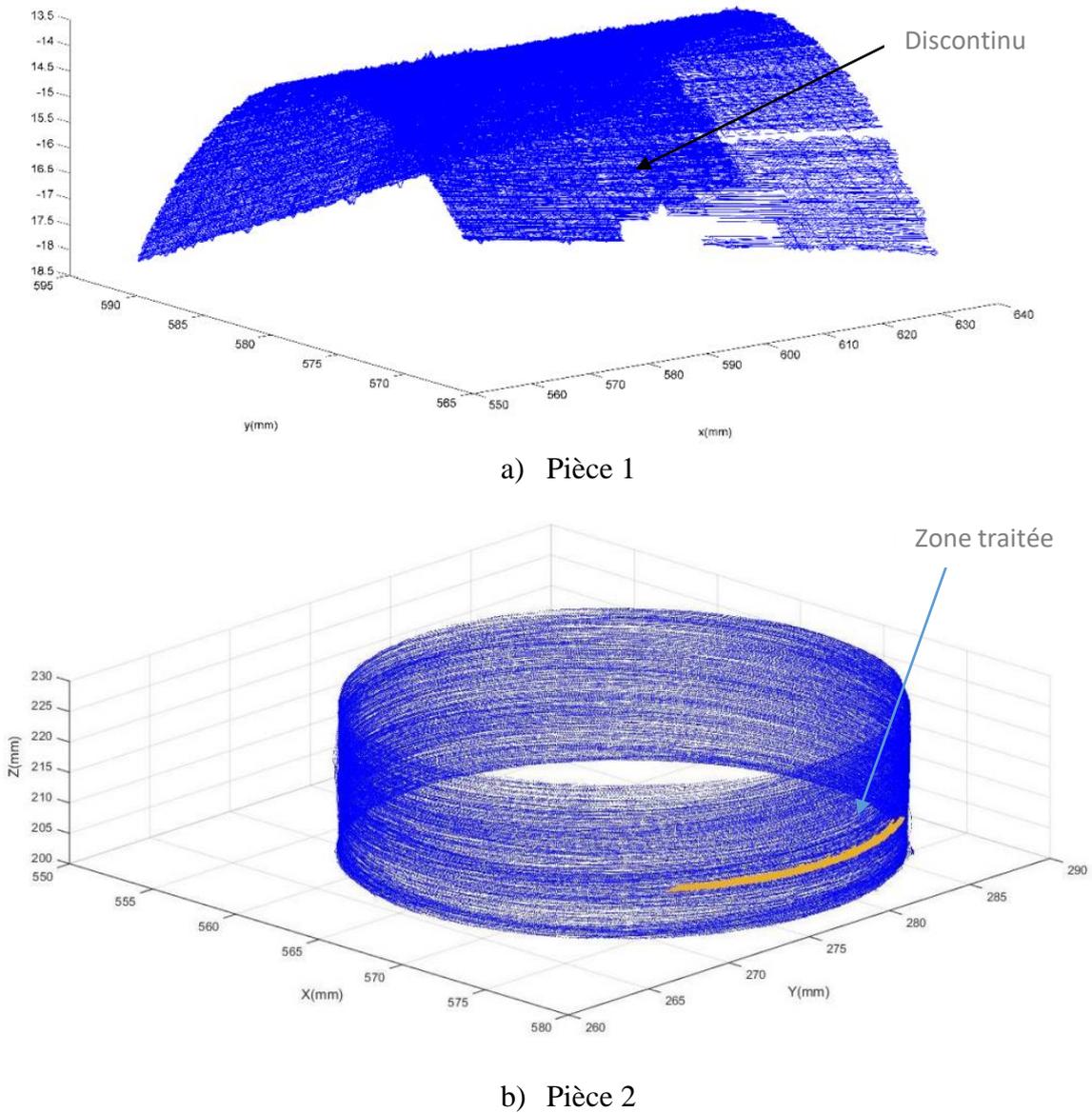
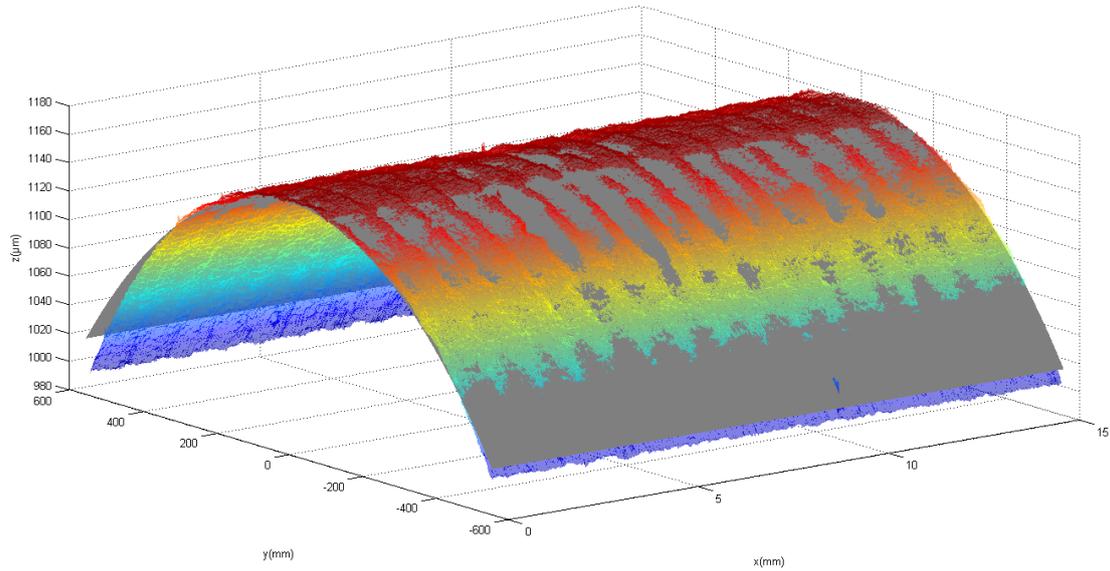
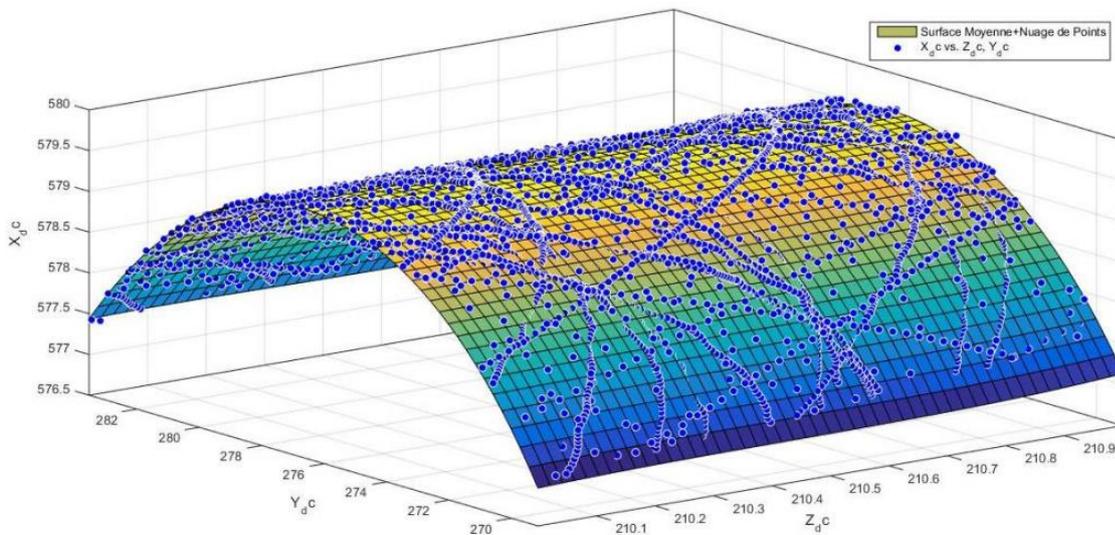


Figure 4.16 Nuage de points des pièces cylindriques



a) Pièce 1



b) Pièce 2

Figure 4.17 Nuage de points et les surfaces cylindriques optimisées

Tableau 4.6 Résultats des paramètres de l'état de surface 3D des deux cylindres

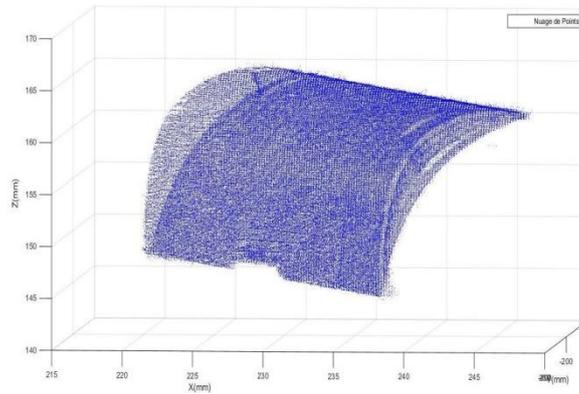
Parametres	Sa (μm)	Sq (μm)	Ssk	Sku	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)
Pièce 1	4.150	6.877	2.392	6.818	9.530	-29.652	38.445
Pièce 2	20.490	26.361	0.043	3.4436	87.230	-89.575	176.740

Discussion

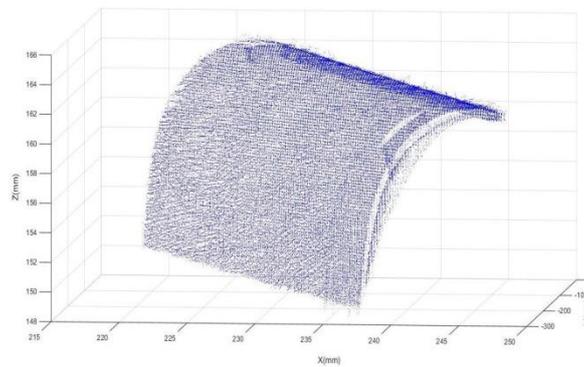
Les valeurs des paramètres de l'état de surface obtenues sur le premier cylindre sont inférieures à celles sur le deuxième cylindre (tableau 4.6). Les résultats signifient que la première surface est plus lisse que la deuxième surface, ceci est totalement justifié par observation visuelle des deux pièces.

4.5.3 Caractérisation de la rugosité 3D de surface gauche

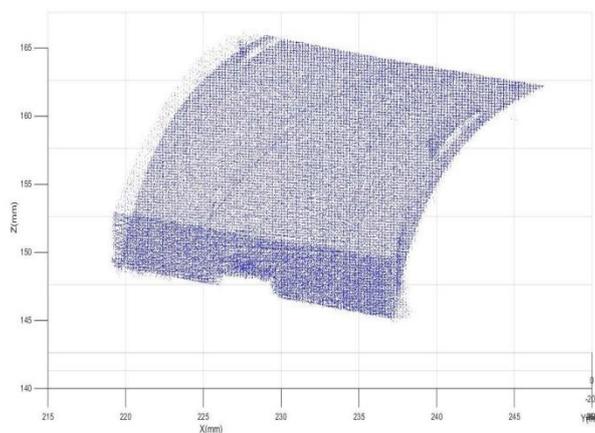
L'ailette d'aube de turbine à gaz présente un modèle de surface gauche bien adaptée à notre étude. Cette pièce est composée de deux surfaces fonctionnelles importantes à savoir : surface concave et surface convexe. Ces deux surfaces nécessitent une attention particulière dans l'étude de leur état de surface. Le nuage de points représentant la pièce et les deux faces est illustré sur la figure 4.18. L'état de surface est présenté sur la figure 4.19.



L'ailette complète

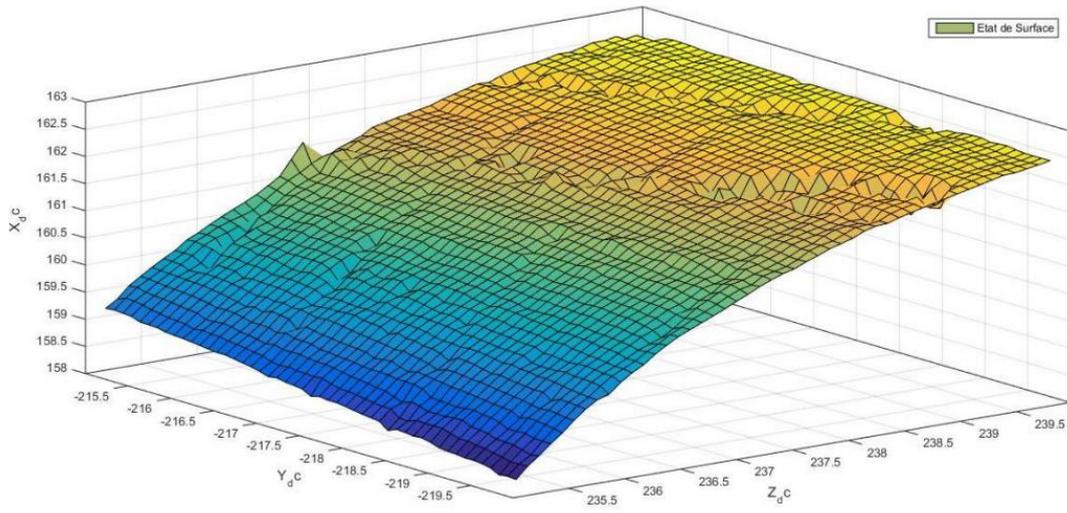


Partie convexe de l'ailette

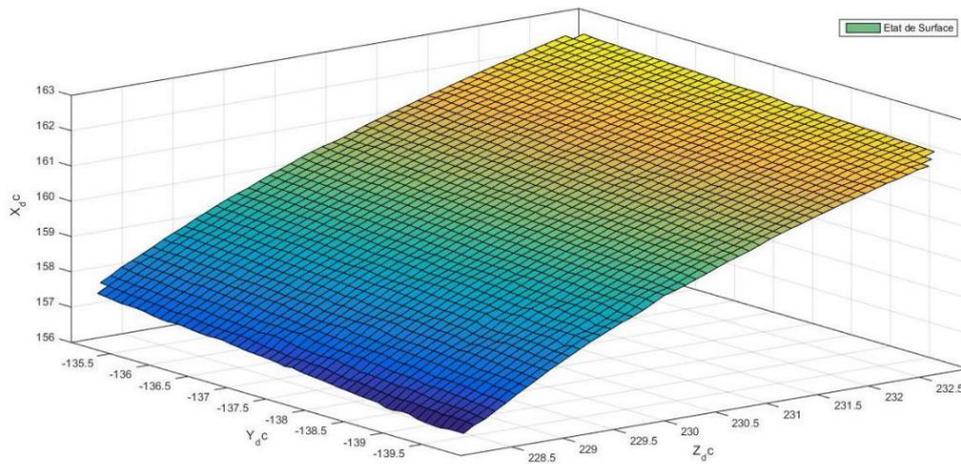


Partie concave de l'ailette

Figure 4.18 Nuage de points sur l'ailette



a) partie convexe



a) partie concave

Figure 4.19 État de surface des deux faces

Tableau 4.7 Caractérisation de la rugosité 3D de surface d'une ailette

Parametres	Sa (μm)	Sq (μm)	Ssk	Sku	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)
surface convexe	23.869	29.681	-0.280	2.967	77.884	-90.750	168.636
surface concave	14.225	19.489	0.185	5.286	74.610	-80.053	154.662

Discussion

En comparant les valeurs de rugosité entre les deux faces (tableau 4.7), spécialement le paramètre **Sa**, nous pouvons directement conclure que la face convexe (qui est la face la plus active de l'ailette) est plus rugueuse que la face concave de l'ailette, cela est observé directement sur l'ailette usée de la turbine à gaz et justifié par le phénomène d'érosion en tribologie qui dégrade la qualité de surface.

Discussion globale

Si l'ensemble des erreurs de manipulation, de mesure et d'instrument est négligé, il reste les erreurs de calcul à prendre en considération. Ensuite, on peut valider le programme.

La démarche de résolution proposée présente des limites. Ces limites sont présentées dans la section suivante.

4.5.4 Limites de la méthode

Certains inconvénients apparaissent et affectent sur la crédibilité des résultats, ils sont cités comme suit :

- L'effet miroir des surfaces lisses fait qu'elles reflètent la lumière en générant des erreurs lors de la mesure.
- La précision de la mesure n'est pas totalement satisfaisante. Certes, le bras de mesure employé est bien précis, mais la précision est mieux avec la MMT, car, pour un calcul de rugosité, une précision plus élevée est souhaitable.
- Un nuage de points dense est requis, mais, dans ce cas, un problème de temps d'exécution se pose. Pour les fichiers traités, le temps d'exécution est de 145s dans le cas d'une surface cylindrique, et de 171s dans le cas d'une surface libre. La performance des programmes devrait être améliorée pour atteindre des meilleurs résultats dans moins du temps.

4.5.5 Adaptation des K. Means dans l'analyse de l'état de surface

La précision des résultats dans l'application développée et proportionnelle à la densité de nuage de points. Elle est relative au temps de calcul. Pour remédier à cette problématique, plusieurs algorithmes parallèles ont été développés pour améliorer le temps de calcul de la reconstruction de surface 3D (triangulation de Delaunay), qui sont basés sur des divisions buckets (Espace de stockage mémoire) ou stripes (environnement de développement). Mais la meilleure méthode pour partitionner un ensemble de points en sous-ensembles de taille appropriée n'a pas été déterminée. L'efficacité du calcul parallèle n'est donc pas pleinement exploitée. Pour surmonter la contrainte de la densité de nuage de points, nous avons proposé et implémenté une solution de partitionnement d'un nuage de points non structuré en partitions à faible coût pour le calcul parallèle de la reconstruction d'objet [Tchantchane et al 2022]. Pour cela, nous avons utilisé les méthodes de partitionnement suivantes :

- ✓ Cellule et Octree : sont des méthodes classiques définies dans la section 2.4.1.1.c.
- ✓ K-Means avec sa variante FGK : Elles représentent notre contribution. Leurs définitions sont présentées dans la section 3.3.1.

Pour montrer la performance d'une partition par rapport aux autres, le nombre de points pour chaque partition a été présenté en conséquence (tableau 4.8). Le meilleur partitionnement signifie un nombre de points plus ou moins proche entre les partitions, ce qui permet de réduire le temps de calcul de la reconstruction de surface en parallèle.

4.5.6 Test et résultats

Afin de montrer l'efficacité des méthodes de classification proposées, les tests ont été effectués sur huit groupes de nuage de points à différentes densités. Deux critères de comparaison ont été considérés à savoir : la qualité du partitionnement et le temps de calcul. Le tableau 4.6 illustre une comparaison de partitionnement de l'espace d'une pièce dense avec 28000 points en huit groupes. C1 est un paramètre justifiant la qualité de partitionnement. Pour un C1 minimal, la

qualité de partitionnement est meilleure. D'après les résultats obtenus qui sont illustrés sur la figure 4.20, il est clair qu'en comparant les deux méthodes Octree, Cellule et K-Means, la deuxième offre la meilleure partition de la pièce, car les groupes sont plus ou moins homogènes. Ensuite, le même test a été effectué en améliorant les K-Means par la méthode FGK. Cette dernière montre de meilleures performances de qualité de clustering que la méthode K-Means. Cependant les résultats en termes de temps de calcul sont liés à la densité du nuage de points pour chaque partition. La figure 4.21 montre le temps de calcul de la reconstruction de surface pour chaque partition avec les différentes méthodes. La méthode FGK est la moins coûteuse en temps de calcul, car la valeur du paramètre C1 est la plus faible, cela veut dire que les clusters sont homogènes et que les processeurs travaillent de la même manière " une charge de travail équilibrée sur les différents processeurs". C'est donc la méthode FGK qui est la plus appropriée pour partitionner l'espace des pièces en régions.

Tableau 4.8 Qualité de partitionnement [Tchantchane et al 2022]

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	C1 (Max – Min)
Octree	2859	3534	464	146	2744	7124	4598	7223	7077
Cells	3062	563	4587	2746	7054	3607	149	6924	6905
BK	3565	4087	2411	4089	1597	2368	4296	6279	4356
FGK	3694	3333	3557	4876	3713	2862	3484	3173	1703

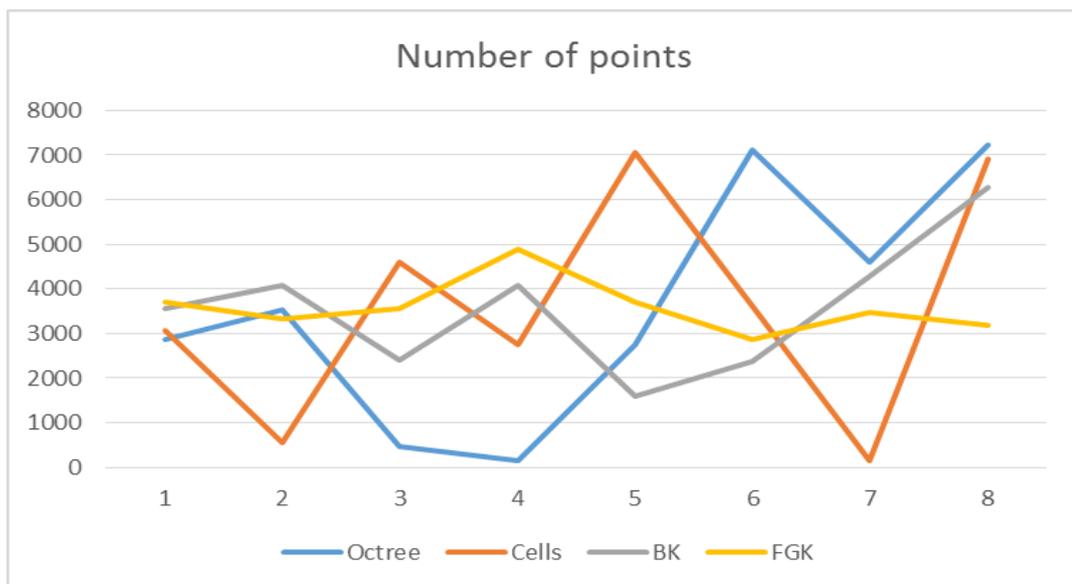


Figure 4.20 Densité de points pour chaque cluster

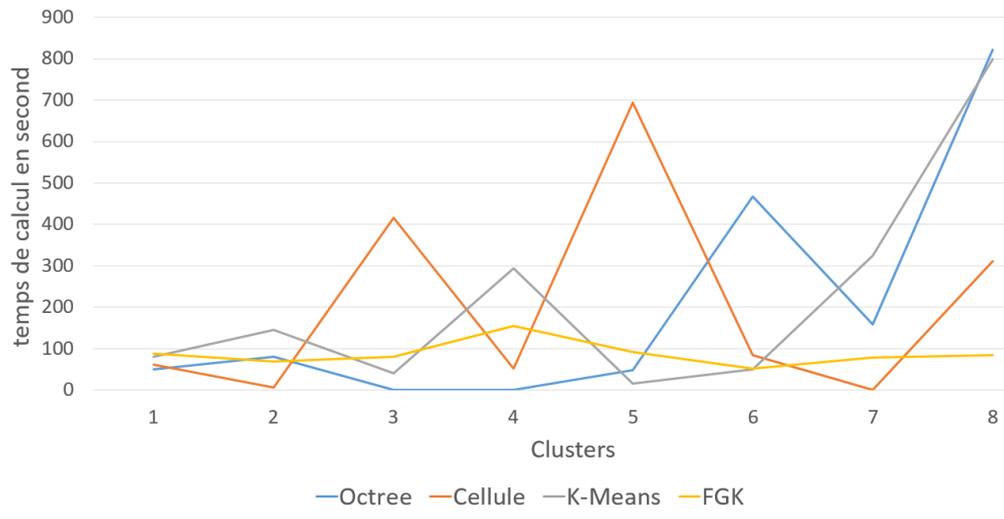


Figure 4.21 Temps de calcul de la reconstruction de surface pour chaque partition

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit, la problématique liée à la caractérisation de l'état de surface 3D d'une part, et à la numérisation d'autre part. Puis, nous avons présenté la démarche du travail élaboré partant de la numération des données géométriques de la surface (nuage de points) jusqu'à la détermination des paramètres de rugosité 2D et 3D.

En effet, nous avons développé une application logicielle pour la mesure de rugosité 2D et 3D des surfaces de différentes formes (planes, cylindrique, gauche), nous avons centralisé l'étude sur la topographie 3D selon la norme « ISO 25178-2 :2012, Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface : Surfamique — Partie 2 : Termes, définitions et paramètres d'états de surface ». La validation a été faite par l'analyse des graphes représentatifs de la variation de l'état de surface en fonction de quelques paramètres qui l'influencent. Nous pouvons dire que l'application développée a permis d'avoir des résultats satisfaisants.

En finalité, nous avons pu exploiter la technique de classification K-Means utilisée dans la problématique de prédiction de l'état de surface par la simulation d'usinage dans la problématique de mesure par analyse de l'état de surface 3D. Cette technique peut être étendue à d'autres domaines nécessitant la numérisation et le traitement des modèles utilisant des éléments géométriques de discrétisation.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objet de cette thèse est d'étudier la topographie 3D des surfaces gauches usinées sur des machines 5 axes. L'étude est menée suivant deux axes, le premier porte sur le développement des applications logicielles, le deuxième porte sur l'optimisation des techniques utilisées dans ces applications.

✓ *Développement des applications logicielles* : La première application logicielle développée est dédiée à la prédiction de la topographie 3D des surfaces gauches en phase de finition usinées par des outils hémisphériques. L'étude est basée sur la simulation géométrique d'enlèvement de matière à l'échelle macroscopique. La deuxième application est consacrée à l'analyse de l'état de surface 3D à partir d'un nuage de points relevé à l'aide d'appareils et machines de numérisation 3D (bras de mesure, MMT). L'analyse est effectuée selon la norme 25178-2 de 2012.

✓ *Optimisation des techniques utilisées dans ces applications* : Le principal apport de ce travail est la prise en compte du problème de la complexité des pièces mécaniques de forme gauche. La géométrie de ces pièces est décrite par des modèles continus ou discrets. L'utilisation de modèles discrets (STL, Dexels, etc...) est simple à mettre en œuvre par rapport aux modèles continus, mais nécessite une discrétisation serrée pour représenter fidèlement les formes théoriques. Ceci est nécessaire pour une grande précision, mais augmente le temps de traitement. Pour pallier à cette difficulté, une approche est proposée qui consiste à regrouper les centres des éléments géométriques (segments, triangles) en clusters par la méthode de classification K-Means. Celle-ci est introduite pour la première fois à la CFAO. Le problème d'initialisation des clusters rencontré dans cette méthode est résolu par la méthode « Fast Global K-Means ». Celle-ci a pu être appliquée pour la première fois dans l'accélération du processus de traitement d'un nuage de points dans la reconstruction de surface 3D.

L'approche a été développée, mise en œuvre et validée au moyen des tests élaborés de deux manières, à savoir :

- 1) Validation des applications développées en montrant l'efficacité du simulateur qualitativement et non pas quantitativement. Cela est dû au nombre de paramètres importants influents sur le phénomène de coupe et qui n'ont pas été pris en considération dans notre modélisation. Les résultats obtenus ont été présentés sous forme de courbes et des graphes et discutés par rapport à des évidences techniques existantes dans l'usinage des pièces mécaniques.
- 2) Validation de l'efficacité de l'optimisation des techniques utilisées dans ces applications en augmentant le nombre d'éléments géométrique classés en utilisant deux critères :
 - ✓ La qualité du partitionnement de la pièce de forme gauche.
 - ✓ Le temps d'exécution de la simulation

Deux études comparatives ont été élaborées pour cette validation :

- La première est une comparaison entre la méthode classique de partitionnement (méthode de cellules) et la méthode K. Means.

- La deuxième est une comparaison entre les trois méthodes de clustering (BK, FGK et IK). Les résultats obtenus ont démontré les performances de la méthode K. Means par rapport à la méthode des cellules, que ce soit dans la simulation de l'enlèvement de matière ou dans la reconstruction de surface 3D (surface optimale). Par ailleurs, les performances de la FGK en fonction du temps de calcul, de l'uniformité des régions, de la réduction des zones de chevauchement des enveloppes des clusters sont importantes comparativement aux méthodes BK et IK. Les résultats obtenus ont fait apparaître les performances de notre contribution dans l'amélioration de la qualité de partitionnement et dans l'optimisation de temps d'exécution des deux applications proposées

Perspective

La possibilité de standardiser les techniques proposées à tout type de logiciels traitant des modèles géométriques discrets (maillage) permet à ce travail d'être étendu dans les directions suivantes :

- Application dans la génération de parcours d'outils.
- Les éléments géométriques considérés dans ce travail (points, segments et triangles) sont manipulés par leurs centres. Ce travail pourrait être appliqué à toute forme géométrique caractérisée par son centre. Ainsi, cette approche de clustering peut être appliquée au modèle Voxel, par conséquent, l'objet à classifier est un cube réduit en son centre.
- Intégration de la méthode de clustering FGK dans la subdivision spatiale selon des régions spécifiques dans la représentation de pièces complexes.
- Application dans les méthodes d'analyse de structure par éléments finis pour les trois modèles de maillage : linéaire, surfacique et volumique.
- Utilisation des techniques de l'intelligence artificielle pour déterminer le nombre de partitionnement K afin d'obtenir le partitionnement optimal d'une pièce gauche.

Références

Références bibliographiques

- Assouline 2005 : S.C Assouline « Simulation numérique de l'usinage à l'échelle macroscopique : Prise en compte d'une pièce deformable », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale d'arts et metiers Centre de Paris, 2005.
- Audfray 2012 : Nicolas Audfray, « Métrologie 3D automatique multi-systèmes basée sur l'utilisation de systèmes de mesure sans contact », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 17 décembre 2012.
- Audfray, et Mehdi-Souzani 2012 b : Nicolas Audfray, Charyar Mehdi-Souzani, Claire Lartigue, « Qualification et Performances des Systèmes de mesure Optiques QualiPSO », Journée 3DSC 2012, Cachan.
- Azzam 2015 : N. Azzam, « Contribution à l'amélioration de la qualité des états de surfaces des prothèses orthopédiques », Thèse de doctorat, Diss. Aix-Marseille, 2015.
- Bassiere et Gaignebet 1966 : M. Bassiere et E.Gaignebet, « Métrologie générale, Théorie de la mesure », Les instruments et leurs emploi Editions : Dunod 1966, France.
- Benardos et Vosniakos 2003: P.G. Benardos, G.C. Vosniakos, « Predictiong surface roughness in machining: a review », International Journal of machine Tools & Manufacture, 43(8):833-844, (2003).
- Blateyron 2006 : F. Blateyron « États de surface : la norme ISO 25178 », qui va tout changer in Mesures, no 787, septembre 2006, p. 44-47.
- Blunt et Jiang 2003: L. Blunt, X. Jiang « Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand" ». Kogan Page, London, ISBN 1903996112.
- Bouchareine 1999 : P. Bouchareine « Métrologie des surfaces, Technique d'ingénieur, R1390, 1999 », France.
- Bouhadja et al. 2015: K. Bouhadja, M. Bey, « Survey on Simulation Methods in Multi-Axis Machining, in Transactions on Engineering Technologies », ed. by G.-C.Yang (Springer, Berlin, 2015), pp. 367–382.
- Bouhadja et al. 2016 : K. Bouhadja, M. Bey, K. Sebti, H. Moulay, M. Bouaziz, « Volume modeling of complex mechanical parts via triple Dixel, in Proceedings of the World Congress on Engineering », vol. 2016(2) (2016), pp. 796–801.
- Bouhadja et al. 2019: Bouhadja K., Boubekour A. Bouaziz M. « Complex Parts Partitioning by Elementary Geometric Objects Clustering in CAD/CAM Process ». J. Inst. Eng. India Ser. C 101, 229–240 (2020).
- Bouhadja et al. 2020 : K. Bouhadja, M. Bouaziz, F. Remli , « 2D and 3D roughness measurement according to ISO standards », of 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics 16-18 December, 2019, Hammamet, Tunisia.
- Bouhadja et Bey 2014: K. Bouhadja, M. Bey, « Classification of Simulation Methods in Machining on Multi-axis Machines ». Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 Vol II, WCE 2014, July 2 - 4, 2014, London, U.K.
- Bradley et al. 1998 : S.P. Bradley, U.M. Fayyad, C. Reina, « Scaling clustering algorithms to large databases , in Knowledge Discovery and Data Mining », (1998), pp. 9–15.

- Bui 2011 : M. H. Bui, « Identification et simulation des incertitudes de fabrication », Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble, 2011.
- Chailie 1997 : A. CHailie, « Spécification Géométrique des Produits (GPS), Etats de surface, Etat de l'art », Revue pratique de contrôle industriel, Avril 1997, no 204, p 32-38.
- Chen et Qiang 2007 : ZC. Chen, Fu. Qiang, « A Practical Approach to Generating Steepest Ascent Tool-Paths for Three-Axis Finish Milling of Compound NURBS Surfaces ». Computer-Aided Design 39: 964-974, 2007.
- Choi et Jerard 1998: B.K. Choi, R.B. Jerard, « Sculptured Surface Machining », Kluwer Academic Publishers, 1998.
- Contri 2002 : A. Contri, « Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 28 novembre 2002.
- Denkena et Böß 2015 : B. Denkena, V. Böß, D. Nespör, P. Gilge, S. Hohenstein, J. Seume, « Prediction of the 3D Surface Topography after Ball End Milling and its Influence on Aerodynamic », Procedia CIRP 31: 221–227, 2015.
- DIN 1982 : DIN 4760, « Form deviations; concepts; classification system ». Deutsches Institut fuer Normung, e.V., 1982.
- Dong et al 1993 : W.P. Dong, P.J. Sullivan, K.J. Stout, « Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography II », Statistical properties of parameter variation, Wear, Volume 167, Issue 1, 1993, Pages 9-21,
- Duc 1998 : E. Duc, « Usinage de formes gauches ; contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage ». Thèse de doctorat à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France 1998.
- Duc 1999: E. Duc, « Machining of free-form surfaces and geometrical specifications ». Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, volume: 213, numéro: 1 , page: 21-27.
- Dugas 2002 : A. Dugas, « Simulation d'usinage de formes complexes », 2002, Thèse de doctorat, IRCCyN - Mo2P Ecole Centrale de Nantes.
- Ericsson et Christer 2004 : Ericson, Christer, « Real-time collision detection ». CRC Press, 2004.
- Farin 1992: G. Farin, « From conics to NURBS: a tutorial and survey », IEEE Computer Graphics and Applications, 12 (5):78-86, 1992.
- Fussell et al 2001: Fussell, B.K., Jerard, R.B., Hemmett, J.G. « Robust feedrate selection for 3-axis NC machining using discrete models ». J. Manuf. Sci. Eng. 123(2), 214–224 (2001) 38.
- Fussell et al 2003: Fussell, B.K., Jerard, R.B., Hemmett, J.G: « Modeling of cutting geometry and forces for 5-Axis sculptured surface machining ». Comput. Aided Des. 35(4), 333–346 (2003).
- Ganti et Bhushan 1995: S. Ganti, B. Bhushan, « Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces ». Wear 180:17–34, (1995).

- Guarato 2013 : A. Z Guarato « Métrologie 3d de pièces de formes complexes par moyens optiques : une application à l'équilibrage de vilebrequins » Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, 2013.
- Guellil et Zaoui 2009 : Z. Guellil, L. Zaoui, « Proposition d'une solution au problème d'initialisation cas du K-means, in Proceedings », of the 2nd Conférence Internationale sur l'Informatique et ses Applications (CIIA'09) (2009).
- Halkidi et al. 2001: M. Halkidi, Y. Batistakis, M. Vazirgiannis, « Clustering algorithms and validity measures », in IEEE (2001).
- Hong et Chang 2003 : Hong Y.S., Chang T.-C., « Tolerancing algebra : a building block for handling tolerance interactions in design manufacturing Part 2 : Tolerance interaction», 2003, International Journal of Production Research, Vol. 41, N°1, pages 47-63
- Jerard et al. 1989: Jerard, R.B., Drysdale, R.L., Hauck, K.E., Schaudt, B., Magewick, J. « Methods for detecting errors in numerically controlled machining of sculptured surfaces ». IEEE Comput. Gr. Appl. 9(1), 26–39 (1989).
- Karunakaran et Shringi 2008: Karunakaran, K.P., Shringi, R. « A solid modelbased off-line adaptive controller for feed rate scheduling for milling process ». J. Mater. Process. Technol. 204(1–3), 384–396 (2008).
- Karunakaran et al. 2010: Karunakaran, K.P., Shringi, R., Ramamurthi, D., Hariharan, C. « Octree-based NC simulation system for optimization of feed rate in milling using instantaneous force model ». Manuf. Technol. 46, 465–490 (2010).
- Kawashima et al. 1991: Kawashima, Y., Kawashima, Y., Itoh, K., Ishida, T., Nonaka, S. « A flexible quantitative method for NC machining verification using a space-division based solid model ». Vis. Comput. 7(2–3), 149–157 (1991)
- Kim et Ko 2005: Kim, Y.H., Ko, S.L. « Development of a machining simulation system using the Octree algorithm ». Lect. Notes Comput. Sci. 3482(III), 1089–1098 (2005).
- Kim et Ko 2008: Kim, Y.H., Ko, S.L. « Improvement of cutting simulation using the Octree method ». Int. J. Adv. Manuf. Technol. 28(11–12), 1152–1160 (2008).
- Kogan 2007: J. Kogan, « Introduction to Clustering Large and High-Dimensional Data », (University Press, Cambridge, 2007).
- Lartigue 2004 : C. Lartigue, P. Bourdet, « Qualité des données issues de numérisation 3D : sources d'imprécision et qualification », 10èmes Assises Européennes de Prototypage Rapide, 14 & 15 septembre 2004.
- Larue et Anselmetti 2003: Larue A., Anselmetti B., « Deviation of a machined surface in flank milling », 2003, International Journal of Machine tools and Manufacture, Vol. 43, pages 129-138.
- Lasemi et al 2010: A. Lasemi, D. Xue, P. Gu, « Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review ». Comput.-Aided Des. 42: 641–654, 2010.
- Lavernhe 2006 : S. Lavernhe, «Prise en compte de contraintes associées au couple MO-CN en génération de trajectoire 5 axes UGV», Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2006

- Lavernhe et al. 2010: S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Lartigue, « Model for the prediction of 3D surface topography in 5-axis milling », *Int J Adv Manuf Technol* 51:915-924, (2010).
- Lee et Nestler 2008 : S.W. Lee, A. Nestler, « 5 Axis milling simulation using a swept volume via Gauss map, in 16th WSCG International Conference in Central Europe on Computer Graphics », *Visualization and Computer Vision* (2008), pp. 4–7.
- Lee et Nestler 2012: S.W. Lee, A. Nestler, « Virtual workpiece: workpiece representation for material removal process ». *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*58, 443–463 (2012)
- Lezoray et Charrier 2004 : O. Lezoray, C. Charrier, « Segmentation d'images couleur par coalescence non supervisée d'histogrammes 2D et fusion de régions selon la théorie de Dempster-Shafer ». *Traitement du signal* 21, 605–621 (2004).
- Likas et al.2003: A., M. Vlassis, J. Verbeek, « The global k-means clustering algorithm ». *Pattern Recogn.* 36, 451–461 (2003).
- Liu, Z.; Pan, M.; Yang, Z.; Deng, J. « Recovery of sharp features in mesh models », *Communications in Mathematics and Statistics*, 3(2), 2015, 263-283.
- Lu 2008: C. Lu, « Study on prediction of surface quality in machining process » *journal of materials processing technology* 205: 439–450, (2008).
- Macqueen 1967: J. Macqueen, « Some methods for classification and analysis of multivariate observations », in *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*,
- Mehdi-Souzani 2006 : C. Mehdi-Souzani, « Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité », Thèse de Doctorat, ENS Cachan, 30 juin 2006.
- Milojevic et al. 2015: Z. Milosevic', S. Tabakovic', M. Bojanic' et al., « Multi axis NC code simulation based on three-dexel model representation and GPU ». *J. Prod. Eng.* 18, 73–76 (2015).
- Mokhtari et al. 2014 : B. Mokhtari, K. E. Melkemi, D. Michelucci et al., « Dynamic clustering-based method for shape recognition and retrieval », in *Proceedings of TMCE 2014* (2014), pp. 1–12.
- Mus et al 2004: Musa Rami A.,Huang S. H., Shultes B. C., « Simulation-based manufacturing error synthesis: input analysis and validation », 2004, *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 32, pages 311-318.
- Novovic et al. 2004 : Novovic D, Dewes RC, Aspinwall DK, Voice W, Bowen P « The effect of machined topography and integrity on fatigue life ». *Int J Mach Tools Manuf* 44:125–134, (2004).
- Padilla et al 1986 : P.Padilla, B, Anselmetti, L. Mathieu et M. Raboyeau, « Production mécanique », Dunod, 1986, Paris, France.
- Peng et Zhang 2009: Peng, X., Zhang, W. « A virtual sculpting system based on triple Dixel models with haptics ». *Comput. Aided Des. Appl.* 01/2009 6(5), 645–659 (2009).
- Piegl et Tiller 1995 : L. Piegl, W. Tiller, « The NURBS », Springer, 1995.
- Prat 2014 : D. Prat, « Développement et modélisation de stratégies de fraisage 5 axes de finition- Application à l'usinage de veines fermées », thèse Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2014.

-
- Prevost 2011 : D. Prevost, « Modélisation avancée du couple Machine-Outil / Commande Numérique dans un contexte UGV pour l'optimisation du calcul de trajectoires multi axes », thèse Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2011.
- Raphet 2005 : B. Raphet, « États de surface Caractérisation, Technique de l'Ingénieur, R1230 », 2005, France.
- Ren et al. 2008: Y., W. Zhu, Y.S. Lee, « Tri-Dexel volumetric modeling for haptic sculpting and virtual prototyping of complex surfaces ». *Trans. N. Am. Manuf. Res. Inst. SME* 36, 97–104 (2008).
- Roques Carmes et al 2001 : C. Roques-Carmes, N. Bodin, G. Monteil, JF. Quiniou, «Description of rough surface using conformal equivalent structure concept. Part 1: stereological approach ». *Wear* 248:82–91, (2001).
- Salomon 2006: D. Salomon, « Curves and Surfaces for Computer Graphics », Springer, 2006.
- Saravanakumar et al. 2009 : P. Saravanakumar, KK. Manesh, M. Singaperumal, B. Ramamoorthy « Modelling of fluid continuum considering 3D surface parameters in hydraulic assemblies ». *Precis Eng* 33:99–106, (2009).
- Sarazin 2010 : A. Sarazin. « Les solutions Sandvik Coromant aux problématiques d'états de surface », (2010).
- Segonds et al 2001: S. Segonds, P. Lagarrigue, J. M. Redonnet, W. Rubio, « Compensation for machining defects due to spindle dilatation », 2001, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pages 439-1454.
- Seo 1998 : T.E Seo, « Intégration des effets de déformation d'outil en génération de trajectoires d'usinage », Thèse de doctorat, IRCCyN - Ecole Centrale de Nantes, 1998.
- Sullivan et al. 2012 : A. Sullivan, H. Erdim, R. Perry, N. Ronald et al., « High accuracy NC milling simulation using composite adaptively sampled distance fields ». *Comput. Aided Des.* 44, 522–536 (2012).
- Szalek 1993 : A. Szalek, « Modélisation de formes complexes, proposition d'une méthode de raccordement par déformation de carreaux jointifs », Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I, 1993.
- Tchantchane et al 2022 : Z. Tchantchane, K. Bouhadja, O. Azouaoui, et al « Enhanced unstructured points cloud subdivision applied for parallel Delaunay triangulation », *Cluster Comput* (2022).
- Terrier et al 2004 : Terrier M., Dugas A., Hascoët J.Y., « Qualification of Parallel Kinematics Machines In High Speed Milling on Free Form Surfaces », 2004, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, N°44/7-8, pages 865-877.
- Tichadou 2005 : S. Tichadou, « Modélisation et quantification tridimensionnelles des écarts de fabrication pour la simulation d'usinage », thèse Doctorat, Université de Nantes, 2005.
- Tichadou et al 2007: S. Tichadou, M. Kamali Nejad, F. Vignat, O. Legoff, « 3D manufacturing dispersions: two experimental applications ». *Proceedings of the 10th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing*, France. (2007).
- Tomas et al 1999: TR. Thomas, BG. Rosen, N. Amini, « Fractal characterization of the anisotropy of rough surfaces ». *Wear* 232:41–50, (1999).
-

- Tournier 2001 : C. Tournier, « Contribution à la conception des formes complexes – La surface d'usinage en fraisage 5 axes isocrête », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2001.
- Tournier et al 2006 : C. Tournier, C. Castagnetti, S. Lavernhe, F. Avelland, « Tool path generation and post-processor issues in five-axis high speed machining of hydro turbine blades », 5th International Conference on High Speed Machining, CD-Rom paper, pp:500-510, 2006.
- Villeneuve et Vignat 2007 : F. Villeneuve, F. Vignat, « Simulation de fabrication avec incertitudes, le modèle MMP (Model of Manufactured Part) ». In : Proceedings of the 18ième Congrès Français de Mécanique, Grenoble. (2007).
- Voelcker et Hunt 1981: Voelcker, H.B, Hunt, W.A. « The role of solid modeling in machining process modeling and NC verification ». SAE Technical Paper 810195 (1981).
- Weinert et Zabel 2004: Weinert, K., Zabel, A. « Simulation based tool wear prediction in milling of sculptured surfaces ». Ann. CIRP 53, 217–223 (2004)
- Whitehouse 2002: Whitehouse, David. « Surfaces and their measurement ». London: Hermes Penton science, 2002.
- Yau et al.2005 : H.T. Yau, L.S. Tsou, Y.C. Tong, « Adaptive NC simulation for multi-axis solid machining ». Comput. Aided Des. Appl. 2(1–4), 95–104 (2005).
- Yun et al. 2002: Yun, W.S., Ko, J.H., Lee, H.U., Cho, D.W., Ehmann, K.F. « Development of a virtual machining system, part 3: cutting process simulation in transient cuts ». Int. J. Mach. Tool Manuf. 42(15), 1617–1626 (2002).
- Zani 2003 : Marie-Line Zani, « La mesure de rugosité, Quelques normes...et plusieurs dizaines de paramètres », octobre 2003.
- Zhang 2008: 40. Zhang, W. « Virtual Prototyping with Surface Reconstruction and Freeform Geometric Modeling Using Level-Set Method ». Missouri University of Science and Technology, pp. 98–99 (2008).
- Zhang et Leu 2009: Zhang, W., Leu, M.C. « Surface reconstruction using Dixel data from three sets of orthogonal rays ». Faculty Research & Creative Works. Paper 3678. http://mst.bepress.com/faculty_work/367 (2009).
- Zhang et al. 2011: Zhang, Y., Xu, X., Liu, Y. « Numerical control machining simulation: a comprehensive survey ». Int. J. Comput. Integr. Manuf. 24(7), 593–609 (2011)
- Ziroudi 2006 : N. Zeroudi, « Elaboration d'un système pour la génération de chemins d'outils en usinage 3 axes de surfaces gauches. Analyse des performances des trajectoires iso paramétriques », Mémoire de magister à l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2006.
- Ziroudi 2011 : N. Zeroudi, « Prédiction des efforts de coupe en fraisage 3 axes à partir de trajectoires issues de FAO », Thèse de doctorat, Ecole Militaire Polytechnique, 2011.

ANNEXES

Annexe 1**Algorithmes des méthodes K-Means****1.1 Global K-Means**

Algorithm 1 Global k-means

Entrée :*x* : Ensemble de *N* données.*k* : Nombre de groupes souhaité.**Sortie :***C1, C2,...Ck* : Une partition de *K* groupes.**Ensure:***C1* = Centre de gravité de l'ensemble des données.**repeat***Initialiser les centres $i = 1$ par le résultat de l'étape précédente. Trouver l' i ème centre.***for** chaque donnée *x* **do***Considère x comme étant le $i^{\text{ème}}$ centre;**Affecter les données aux plus proche centre**Calculer l'erreur quadratique pour $C_i = x$* **end for***Garder le centre $C_i = x$ qui minimise l'erreur quadratique; Appliquer le K-means jusqu'à la convergence.***until** obtenir une partition en *k* groupes.

1.2 Fast Global K-Means

Algorithm 2 Fast Global k-means

Entrée :

x : Ensemble de N données.

k : Nombre de groupes souhaité.

Sortie :

$C1, C2, \dots, Ck$: Une partition de K groupes.

Ensure:

$C1$ = Centre de gravité de l'ensemble des données. Initialisation aléatoire des centres Ck .

repeat

Initialiser les centres $i - 1$ par le résultat de l'étape précédente. Trouver l' i ème centre.

for chaque donnée x **do**

Considère x comme étant le i ème centre;

Calculer b_n pour $Ci = x$ tel que

$$b_n = \sum_{i=1}^N \max(d_{k-1}^i - \|x_n - x_i\|^2, 0)$$

Avec d_{k-1}^i la distance entre x_i et son plus proche centre parmi les $k - 1$ centres.

end for

Garder le centre $Ci = x$ qui minimise l'erreur quadratique;

until obtenir une partition en k groupes. Appliquer le

K - means jusqu'à la convergence.

1.3 K-Means incrémental

Algorithm 3 K-means Incrémental

Entrée :

x : Ensemble de N données.

k : Nombre de groupes souhaité.

Sortie :

C_1, C_2, \dots, C_k : Une partition de K groupes.

Ensure:

$C_1 =$ Centre de gravité de l'ensemble des données.

$C_1 = x_1, C_2 = x_2$ avec

$$d(x_1, x_2) = \max_{i, j \in [1..N], i \neq j} (d(X_j, X_i))$$

repeat

Initialiser les centres $i - 1$ par le résultat de l'étape précédente; Trouver l' i ème centre C_i :

$$C_i = x \text{ tel que } x = \max_{i \in [1..N]} (d_{k-1}^i)$$

Avec d_{k-1}^i la distance entre x_i et son plus proche centre parmi les $k - 1$ centres

Appliquer le $k -$ means jusqu'à la convergence;

until obtenir une partition en k groupes.

Annexe 2

Algorithme d'intersection Triangle-droite

Algorithm 4 Intersection droite-Triangle

Entree :

p,q : Point début et point fin de la droite

a,b,c : les 3 sommet de triangle

Sortie : le point d'intersection entre la droite et le triangle.

Ensure:

$pq = q - p;$

$pa = a - p;$

$pb = b - p;$

$pc = c - p;$

calcul de **u** le triple scalaire du (pq, pc, pb)

if ($u < 0.0f$) **thenreturn** 0

end if

calculer **v** le triple scalaire du (pq, pa, pc)

if ($v < 0.0f$) **thenreturn** 0

end if

calculer **w** le triple scalaire du (pq, pb, pa)

if ($w < 0.0f$) **thenreturn** 0

end if

if $u = v = w = 0$ **then**

return 0

end if

calculer **det** le determinant du u, v et w

$u = u * det;$

$v = v * det;$

$w = w * det;$

return Point3D(u, v, w)

Annexe 3

Algorithme de création des Dexels

Algorithm 5 Création des dexels d'une droite

Entrée :

droite : une droite selon le plan XY

triangles : liste des triangles du modèle STL

Sortie :

dexels : liste des dexels créés dans la droite données;

Ensure:

recupérer les points d'intersection entre la droite et la liste des triangles trié les points d'intersection

initialiser les dexels de la droite

for chaque dixel **d** initialiser dans la droite **do**

u = la normale du triangle qu'intersect la droite dans le point d.fin

v = la normale du triangle qu'intersect la droite dans le point d.debut

if $u.z > droite.ep$ and $v.z < -droite.ep$ **then**

d.matiere = TRUE

end if

end

Annexe 4

Algorithme de calcul de chevauchement sphère-cellule

Algorithm 6 Chevauchement "outil,(cluster/cellule)"

Entrer :

brutOutil : le brut de l'outil.

brutCluster : le brute de cluster.

Sortie :

resultat : résultat de chevauchement vrai ou faux.

Ensure:

resultat = vrai

if *brutOutil.xmax* < *brutCluster.xmin* ou *brutOutil.xmin* > *brutCluster.xmax*

then

resultat = faux

end if

if *brutOutil.ymax* < *brutOutil.ymin* ou *brutOutil.ymin* > *brutOutil.ymax* **then**

resultat = faux

end if

if *brutOutil.zmax* < *brutOutil.zmin* ou *brutOutil.zmin* > *brutOutil.zmax* **then**

resultat = faux

end if

return *resultat*

Annexe 5
Algorithme d'intersection segment-sphère

Algorithm 7 Intersection segment sphère

Entrer :
s : le segment

p : Point de trajectoire

r : Rayon d'outil

Sortier :
s : liste des points d'intersection

Ensure:
 $m = p - s.c;$
 $b = \text{Dot}(m, d);$
 $c = \text{Dot}(m, m) - s.r * s.r;$
if ($c > 0.0f$ et $b > 0.0f$)

 thenreturn 0

end if

 calculer le discriminant **discr** = $b * b - c;$
if ($\text{discr} < 0.0f$) **thenreturn** 0

end if
 $t = -b - \text{Sqrt}(\text{discr})$
if $t \geq \text{fin.distance}(\text{debut})$ ou $t \leq 0$ **then**0

end if

 calculer **p1** le premier point d'intersction

ajouter p1 au liste des solutions

 $t = -b + \text{Sqrt}(\text{discr})$
if t est entre 0 et la distance entre debut et fin de segment

 then calculer **p2** le premier point d'intersction

ajouter p2 au liste des points d'ntersections

s trouvé

end if
return s

Annexe 6

Surface optimale et calcul des écarts

1. L'équation de la surface optimale

À l'aide de la méthode des moindres carrés qui permet l'obtention d'un modèle mathématique à partir d'un ensemble de données expérimentales, on a déterminé les paramètres θ de la fonction $z(x, y, \theta)$, où x et y sont des variables muettes.

On dispose de N points définis par les coordonnées $(x_i, y_i, z_i)_{i=1\dots N}$, on a affaire à ajuster les paramètres θ afin de minimiser la somme quadratique des écarts entre les points expérimentaux et la fonction prédite $z(x, y, \theta)$, c-à-d. minimiser la quantité.

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^N [Z_i - Z(x_i, y_i, \theta)]^2 \quad (6.1)$$

Les paramètres optimaux θ sont obtenus en résolvant le système d'équations décrit par :

$$\text{grad } S(\theta) = 0 \Rightarrow \forall_j, \frac{\partial s(\theta)}{\partial \theta_j} = 0 \quad (6.2)$$

1.1 Optimisation d'un plan

L'équation d'un plan est définie comme suit :

$$Z(x, y, a, b, c) = ax + by + c \quad (6.3)$$

Ainsi l'équation (6.1) devient :

$$S(a, b, c) = \sum_{i=1}^N [Z_i - (ax_i + by_i + c)]^2 \quad (6.4)$$

On applique l'équation (6.2) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial a} = 0 &\Rightarrow \sum_{i=1}^N 2(-x_i) [Z_i - (ax_i + by_i + c)] = 0 \\ &\Rightarrow \sum x_i z_i - a \sum x_i^2 - b \sum x_i y_i - c \sum x_i = 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial b} = 0 &\Rightarrow \sum_{i=1}^N 2(-y_i) [Z_i - (ax_i + by_i + c)] = 0 \\ &\Rightarrow \sum y_i z_i - a \sum x_i y_i - b \sum y_i^2 - c \sum y_i = 0 \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial c} = 0 &\Rightarrow \sum_{i=1}^N (-2) [Z_i - (ax_i + by_i + c)] = 0 \Rightarrow \sum z_i - a \sum x_i - b \sum y_i - c * N \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6.7)$$

Le système d'équations à résoudre est donc :

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i z_i \\ \sum_{i=1}^N y_i z_i \\ \sum_{i=1}^N z_i \end{Bmatrix} \quad (6.8)$$

1.2 Optimisation d'un cylindre

L'équation d'un cylindre avec un axe de révolution suivant l'axe (OZ) est donnée par :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (6.9)$$

L'équation à optimiser sera :

$$S(a, b, R) = \sum_{i=1}^N [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2]^2 \quad (6.10)$$

On applique l'équation (6.2), et on aboutit au système suivant :

$$\sum_{i=1}^N (x_i - a) [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2] = 0 \quad (6.11)$$

$$\sum_{i=1}^N (y_i - b) [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2] = 0 \quad (6.12)$$

$$\sum_{i=1}^N [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2] = 0 \quad (6.13)$$

1.3 Optimisation d'une surface de forme libre

Dans notre cas, la surface à optimiser est la surface d'une ailette dont son équation est inconnue. Dans le but d'approcher la forme de l'ailette, on fait une approximation par un modèle polynomial de 5ème degré.

L'équation de la surface est :

$$z(z, y, P_{ij}) = P_{00} + P_{10}x + P_{01}y + P_{20}x^2 + P_{11}xy + P_{02}y^2 + P_{30}x^3 + P_{21}x^2y + P_{12}xy^2 + P_{03}y^3 + P_{40}x^4 + P_{31}x^3y + P_{22}x^2y^2 + P_{13}xy^3 + P_{04}y^4 + P_{50}x^5 + P_{41}x^4y + P_{32}x^3y^2 + P_{23}x^2y^3 + P_{14}xy^4 + P_{05}y^5 \quad (6.14)$$

Il est possible de trouver le système d'équations permettant de déterminer les paramètres P_{ij} , comme dans le cas d'équation d'un plan. Mais, en profitant de l'outil numérique MATLAB et la fonction intégrée « *Curve Fitting* » pour obtenir les coefficients optimaux.

2. Distance entre un point et une surface

Afin de calculer les paramètres de rugosité, il est nécessaire d'avoir les hauteurs des points par rapport à la surface moyenne.

2.1 Distance d'un point par rapport à un plan

Soit l'équation du plan :

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (6.15)$$

A est un point de coordonnées (x_a, y_a, z_a) .

A' est la projection orthogonale de A sur le plan P.

La normale perpendiculaire au plan est :

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

Les vecteurs $\overrightarrow{A'A}$ et \vec{n} sont colinéaire.

Soit M un point quelconque du plan.

La projection du vecteur \overrightarrow{MA} sur le vecteur $\overrightarrow{A'A}$ représente la distance du point A par rapport au plan.

D'après ce qui est énoncé ci-dessus, la distance s'écrit :

$$d = \frac{\left| \frac{\vec{n} \cdot \overrightarrow{MA}}{\|\vec{n}\|} \right|}{\|\vec{n}\|} = \frac{|Ax_a + By_a + Cz_a + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (6.17)$$

2.2 Distance d'un point par rapport à un cylindre

Soit l'équation du cylindre :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (6.18)$$

Pour un point $A(x_a, y_a, z_a)$, la distance par rapport au cylindre est donnée par :

$$d = \sqrt{(x_a - a)^2 + (y_a - b)^2} - R \quad (6.19)$$

2.3 Distance d'un point par rapport à une surface de forme libre

Soit l'équation de la surface

$$Z = f(x, y) \quad (6.20)$$

A est un point de coordonnées (x_a, y_a, z_a)

M est un point quelconque appartenant à la surface.

La distance au carré entre les deux points A et M est :

$$d^2 = (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + (z - z_a)^2 \quad (6.21)$$

Ou encore :

$$d^2(x, y) = (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + (z - f(x, y))^2 \quad (6.22)$$

La distance orthogonale entre le point A et la surface est équivalente à la valeur minimale de d .

d_{min} peut être retrouvée en optimisant la fonction de deux (02) variables d^2 .

Il est possible d'effectuer le calcul numériquement à l'aide de la fonction *Optimisation* intégrée dans MATLAB.