



HAL
open science

Copiage rapide de formes sur machine outil à commande numérique en fraisage 5 axes positionné

Almohanad Makki

► **To cite this version:**

Almohanad Makki. Copiage rapide de formes sur machine outil à commande numérique en fraisage 5 axes positionné. Mécanique [physics.med-ph]. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2009. Français. NNT: . tel-00464285

HAL Id: tel-00464285

<https://theses.hal.science/tel-00464285>

Submitted on 16 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**DOCTORAT DE L'ECOLE NORMALE
SUPERIEURE DE CACHAN**

SPECIALITE : GENIE MECANIQUE

THESE

PRESENTEE PAR

ALMohanad MAKKI

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Copiage rapide de formes sur machine outil à commande numérique en fraisage 5 axes positionné

Thèse soutenue le 06 juillet 2009 devant le jury composé de :

<i>H. PARIS</i>	<i>PU - Université Joseph Fourier Grenoble</i>	<i>Président</i>
<i>P. MOGNOL</i>	<i>PU - ENSAM Aix-en-Provence</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>P. VERON</i>	<i>PU - IRCCyN Nantes</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>C. LARTIGUE</i>	<i>PU - Université Paris XI</i>	<i>Directeur</i>
<i>C. TOURNIER</i>	<i>MCF - ENS Cachan</i>	<i>Examineur</i>
<i>F. THIEBAUT</i>	<i>MCF - Université Paris XI</i>	<i>Examineur</i>

Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée

Ecole Normale Supérieure de CACHAN

61, Avenue du Président Wilson - 94235 CACHAN Cedex

**DOCTORAT DE L'ECOLE NORMALE
SUPERIEURE DE CACHAN**

SPECIALITE : GENIE MECANIQUE

THESE

PRESENTEE PAR

ALMohanad MAKKI

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Copiage rapide de formes sur machine outil à commande numérique en fraisage 5 axes positionné

Thèse soutenue le 06 juillet 2009 devant le jury composé de :

<i>H. PARIS</i>	<i>PU - Université Joseph Fourier Grenoble</i>	<i>Président</i>
<i>P. MOGNOL</i>	<i>PU - ENSAM Aix-en-Provence</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>P. VERON</i>	<i>PU - IRCCyN Nantes</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>C. LARTIGUE</i>	<i>PU - Université Paris XI</i>	<i>Directeur</i>
<i>C. TOURNIER</i>	<i>MCF - ENS Cachan</i>	<i>Examineur</i>
<i>F. THIEBAUT</i>	<i>MCF - Université Paris XI</i>	<i>Examineur</i>

Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée

Ecole Normale Supérieure de CACHAN

61, Avenue du Président Wilson - 94235 CACHAN Cedex

REMERCIEMENTS

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire sont le fruit d'activités de recherche qui ont été réalisés à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, au Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) au sein de l'équipe Géométrie tridimensionnelle des pièces et des mécanismes (Géo3D).

J'adresse mes remerciements au Professeur Jean-Jacques Lesage pour m'avoir accueilli dans le laboratoire.

J'adresse aussi mes remerciements au Professeur Bernard ANSELMETTI pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe GEO3D en 30 septembre 2004.

J'adresse aussi mes remerciements au Professeur Luc MATHIEU (Directeur actuel du labo) d'avoir invité mes parents pour assister à ma soutenance.

Je tiens tout d'abord à témoigner toute ma reconnaissance et à exprimer mes remerciements les plus chaleureux à Madame le professeur Claire Lartigue qui a dirigé mon travail de thèse, et de m'avoir permis de mener ce travail dans les meilleures conditions, de sa grande patience lors de la correction de ce manuscrit.

Je tiens à remercier tout chaleureusement Monsieur François THIEBAUT de m'avoir accompagné et soutenu durant la thèse. Pour ses réponses qui m'ont permis de résoudre bon nombre d'interrogations. Je lui suis reconnaissant de tous les conseils scientifiques, mais aussi pour sa qualité humaine.

Je tiens à remercier tout particulièrement et chaleureusement Monsieur Christophe Tournier, je tiens aussi à lui exprimer ma gratitude pour ses précieux conseils, sa grande disponibilité, malgré ses nombreuses responsabilités, sa grande patience lors de la correction de tous mes manuscrits, et sans oublier sa grande gentillesse et sa grande compréhension, mais aussi pour sa qualité humaine. J'espère que ces quelques mots pourront rendre un juste hommage et exprimer ma profonde gratitude.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur Henri PARIS pour avoir accepté de présider le jury, à messieurs Pascal MOGNOL, Philippe VERON pour avoir consacré du temps à rapporter mes travaux.

Un grand merci à l'ensemble des personnes du laboratoire, à Patrice et Marc pour les dépannages express.

Un grand merci aux doctorants, les étudiants, tout particulièrement à Pierre BRETEAU, Sylvain LAVERNHE, pour leurs nombreux conseils et le temps précieux qu'ils m'ont accordé, mais aussi pour leur qualité humaine.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à mes parents qui se sont déplacé pour assister à ma soutenance, à ma sœur Lamis qui soutient sa thèse le 25 septembre 2009 au Laboratoire Central des Ponts et chaussés, mon grand amour, elle m'a supporté au bout des quatre ans qu'on a passé ensemble en France, je lui serai toujours reconnaissant, à ma petite sœur Razan, à mes frères Muayad et Amyenne.

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières	iii
Liste des figures	ix
Introduction	17
Chapitre 1 : La problématique du copiage direct par usinage.	17
1. Introduction	18
2. Copiage direct de nuage de points par usinage.....	22
3. La chaîne de copiage direct par usinage.....	25
3.1. Ecart géométrique de nature matériel	27
3.1.1. Ecart géométrique de la chaîne de numérisation	27
3.1.2. Ecart géométrique de la chaîne de fabrication	29
3.2. Ecart géométrique de nature algorithmique	32
4. Synthèse : Objectif des travaux	35

Chapitre 2 : Génération de trajectoires d’usinage en fraisage sur données discrètes	39
1. Introduction	40
2. Génération des trajectoires sur données discrètes	41
2.1. Rappel sur la génération des trajectoires	41
2.2. Stratégie et génération de trajectoire en ébauche	42
2.2.1. Objectif	42
2.2.2. Calcul des trajectoires	42
2.2.3. Trajectoires d’entrée et de sortie matière	45
2.2.4. Choix des paramètres	46
2.3. Stratégie de finition	48
2.3.1. Objectif	48
2.3.2. Les paramètres d’usinage	48
2.3.3. Calcul des trajectoires	49
2.3.4. Prise en compte de la tolérance d’usinage	50
2.3.5. Prise en compte de la hauteur de crête	51
2.3.6. Prise en compte des trous de numérisation	51
2.3.7. Gestion des collisions au bord du nuage usiné	51
2.4. Synthèse sur la génération des trajectoires	52
3. Evaluation de la méthode de copiage direct en 3 axes	53
3.1. Comparaison entre les deux approches du copiage	53
3.1.1. Numérisation et traitement du nuage de points	54
3.1.2. Méthode de copiage basée sur le reverse engineering	56
3.1.3. Génération des trajectoires en copiage direct	57
3.1.4. Usinage	58
3.2. Comparaison des écarts dus à l’usinage	60
3.2.1. Simulation de l’enveloppe des trajectoires de finition	60
3.2.2. Evaluation des écarts entre l’enveloppe des trajectoires et le nuage de points	61
4. Conclusion	65

Chapitre 3 : Découpage technologique et topologique de nuages de points numérisés	67
1. Introduction	68
2. Estimation de la normale sur données discrètes	70
2.1. Introduction	70
2.2. La méthode de lancer de sphères	74
2.2.1. Concept général de la méthode proposée	74
2.2.2. Méthodologie sur données discrètes	75
2.2.3. Implémentation et validation	78
2.3. Etude des paramètres influents sur la normale	80
2.3.1. Approche par la méthode des plans d'expériences	80
2.4. Applications	82
2.5. Synthèse concernant l'estimation de la normale	84
3. Calcul de visibilité	85
3.1. Introduction	85
3.2. Quelques méthodes issues de la littérature	85
3.3. Approche envisagée	90
3.3.1. Visibilité outil (initiale)	92
3.3.2. Visibilité globale	94
3.3.3. Visibilité machine	96
3.4. Applications	97
3.5. Synthèse concernant le calcul de visibilité	99
4. Groupement	100
4.1. Approche envisagée	102
4.2. Validation de la méthode de groupement et applications	108
4.2.1. Groupement en un seul paquet	108
4.2.2. Groupement en deux paquets	109
4.3. Application	110
5. Conclusion	112

Chapitre 4 : Application au copiage direct d'une hanche	113
1. Introduction	114
2. Partitionnement du nuage points	116
2.1. Calcul de la normale (Algorithme 1, page 76)	116
2.2. Calcul de la visibilité	117
2.2.1. Visibilité machine	117
2.2.2. Visibilité outil (Algorithme 2, page 93)	117
2.2.3. Visibilité globale (Algorithme 3, page 94)	117
2.3. Découpage du nuage de points (Algorithme 4, page 106)	118
2.3.1. Découpage selon une direction	118
2.3.2. Découpage selon deux directions	119
3. Réalisation de la copie selon deux directions d'usinage	121
3.1. Génération des trajectoires d'ébauche	121
3.2. Génération des trajectoires en finition	122
3.3. Simulation des trajectoires sur CATIA	123
3.3.1. Simulation des trajectoires d'ébauche et de finition	123
3.4. Usinage sur Mikron UCP 710	125
3.4.1. Usinage en ébauche	125
3.4.2. Usinage en finition	126
3.5. Comparaison	127
4. Amélioration de la qualité de la copie	129
4.1. Calcul de la visibilité	129
4.2. Découpage du nuage de points	130
4.3. Génération des trajectoires	132
4.4. Simulation des trajectoires sur CATIA	133
5. Conclusion	134
Conclusion et perspectives	135
Références Bibliographiques	139

Liste des figures

Figure 1.1 : : Principaux domaines d'utilisation du prototypage rapide	19
Figure 1.2 : : La chaîne classique du copiage en usinage	19
Figure 1.3 : : Le copiage direct de formes en usinage	21
Figure 1.4 : : Génération de CL-net, CL trajectoire	23
Figure 1.5 : : Découpage du nuage	24
Figure 1.6 : : copyForm, chaîne du copiage direct de forme par usinage	25
Figure 1.7 : : Première pièce issue de la chaîne de copiage direct à 5 axes	27
Figure 1.8 : : Reperes utilisés durant l'etape de numerisation	28
Figure 1.9 : : Definition des differents repères	30
Figure 1.10 : : Calcul de la normale	33
Figure 1.11 : : correction de l'orientation de la normale	33
Figure 1.12 : : Problématique de correction de l'orientation des normales sur les bords ..	34
Figure 1.13 : : Partitionnement de nuage de points	34
Figure 1.14 : : Chaîne de copiage par usinage proposée	36
Figure 2.1 : : Les paramètres de fraisage par balayage	41
Figure 2.2 : : Stratégie d'ébauche et mode de balayage	42
Figure 2.3 : : Principe de voxélisation d'un nuage de points	43
Figure 2.4 : : Détection des collisions	44
Figure 2.5 : : Trajectoires d'ébauche	44
Figure 2.6 : : Les différentes étapes de l'usinage en ébauche	45
Figure 2.7 : : Trajet d'ébauche avec plongée en rampe	46
Figure 2.8 : : Collision dans les zones de rampe	46
Figure 2.9 : : Surface usinée en ébauche	47
Figure 2.10 : : Profil transversal de l'usinage d'une surface convexe	48
Figure 2.11 : : Tolérance d'usinage	49

Figure 2.12 : : Calcul de la position en z pour l'outil	50
Figure 2.13 : : Intérêt du pas longitudinal adaptatif	50
Figure 2.14 : : Evolution de la hauteur de crête en fonction de la géométrie de la surface	51
Figure 2.15 : : Gestion des collisions sur les bords de sous paquet de points	52
Figure 2.16 : : Comparaison entre les deux approches	53
Figure 2.17 : : Système de numérisation par capteur plan laser	54
Figure 2.18 : : Le Masque	54
Figure 2.19 : : Résultat de la première numérisation du masque [A0-B0]	55
Figure 2.20 : : Numérisation complète du masque	55
Figure 2.21 : : Surface reconstruite en CAO	56
Figure 2.22 : : Ecart entre le nuage de points et la surface reconstruite	57
Figure 2.23 : : Génération des trajectoires sur CATIA	57
Figure 2.24 : : Processus du copiage direct de forme	58
Figure 2.25 : : Reverse Engineering (gauche), Copiage direct (droite)	59
Figure 2.26 : : Détails des pièces usinées (RE à gauche, Copiage à droite)	60
Figure 2.27 : : Principe de simulation N-BUFFER	60
Figure 2.28 : : Méthode de comparaison des deux approches	61
Figure 2.29 : : Comparaison des simulations d'usinage (RE à gauche, Copiage à droite)	62
Figure 2.30 : : RE (gauche) ; Copiage (droite)	63
Figure 2.31 : : Comparaison au niveau de la nature des écarts, RE/Copiage direct	63
Figure 2.32 : : Problème d'accèsibilité outil	64
Figure 3.1 : : Découpage technologique et topologique	69
Figure 3.2 : : Domaine de visibilité d'un point (cône) pour un outil hémisphérique	70
Figure 3.3 : : Nuage de points numérisé, bruité, non structuré et de densité variée	71
Figure 3.4 : : Déroulement de la méthode	73
Figure 3.5 : : Méthode de lancer de sphère	74
Figure 3.6 : : Méthode de lancer de sphères sur données discrètes	75
Figure 3.7 : : Numérisation d'une partie d'une sphère par une seule orientation	78
Figure 3.8 : : Estimation de la normale réelle	78
Figure 3.9 : : Simulation des écarts sur une sphère	79
Figure 3.10 : : Paramètres influents sur la direction de la normale	80
Figure 3.11 : : Graphiques des effets moyens et histogramme des erreurs d'estimation ...	82
Figure 3.12 : : Interactions entre les différents facteurs	82

Figure 3.13 : : Ecart sur les normales estimées par lancer de sphères	83
Figure 3.14 : : Evaluation de la méthode vis-à-vis d'une approche basée sur le plan des MC	83
Figure 3.15 : : Exemples de cartes gaussiennes	86
Figure 3.16 : : Posage de la pièce sur une machine outil à 4 et 5 axes	87
Figure 3.17 : : Visibilité par carte graphique	88
Figure 3.18 : : Interférence entre l'outil et le nuage de points	90
Figure 3.19 : : a-Visibilité initiale, b-Visibilité globale, c-Visibilité réelle	90
Figure 3.20 : : Etapes de calcul de la visibilité réelle	91
Figure 3.21 : : Matrice de discrétisation de l'espace	92
Figure 3.22 : : Association d'un cône de visibilité outil	93
Figure 3.23 : : Matrice de la visibilité outil	93
Figure 3.24 : : Matrice de visibilité globale	95
Figure 3.25 : : Réduction de l'espace discrétisé	96
Figure 3.26 : : Matrice de visibilité réelle (complète)	97
Figure 3.27 : : Etapes de calcul de la visibilité réelle	98
Figure 3.28 : : Visibilité d'un point	99
Figure 3.29 : : Groupement en paquets	101
Figure 3.30 : : Préparation à l'usinage 5 axes positionné	103
Figure 3.31 : : Matrice des combinaisons, $np_{max} = 2$	105
Figure 3.32 : : Matrice de groupement	105
Figure 3.33 : : Nuage de points et normales associées	108
Figure 3.34 : : Groupement en un seul paquet	109
Figure 3.35 : : Groupement en deux paquets	109
Figure 3.36 : : Nuage de points complet et filtré	110
Figure 3.37 : : Groupement en seul paquet	111
Figure 3.38 : : Groupement en 2 paquets, avant et après la réintégration	111
Figure 4.1 : : Rotule d'une hanche à numériser	114
Figure 4.2 : : Nuage de points numérisé	115
Figure 4.3 : : Directions de lancement de la sphère	116
Figure 4.4 : : Nuage de points allégé avec les normales associées	117
Figure 4.5 : : Direction associée au groupement en un seul paquet	118
Figure 4.6 : : Groupement en deux paquets	119
Figure 4.7 : : Découpage en deux paquets, minimum de recouvrement	120

Figure 4.8 : : Zone de recouvrement pour le groupement en deux paquets	120
Figure 4.9 : : Les deux orientations d'usinage	121
Figure 4.10 : : Trajectoires d'ébauche pour les deux paquets	122
Figure 4.11 : : Trajectoires de finition pour une seule orientation	123
Figure 4.12 : : Simulation des trajectoires d'ébauche sur CATIA	124
Figure 4.13 : : Simulation des trajectoires de finition sur CATIA	124
Figure 4.14 : : Différentes étapes de l'ébauche	125
Figure 4.15 : : Pièce copiée à gauche, le modèle à droite	126
Figure 4.16 : : Comparaison entre la simulation et la copie	128
Figure 4.17 : : Evolution de l'espace discrétisée lors du calcul de la visibilité machine ...	129
Figure 4.18 : : Calcul de la visibilité globale, simulation de brut et de porte pièce	130
Figure 4.19 : : Découpage du nuage en quatre paquets	131
Figure 4.20 : : Zones de recouvrement, découpage en quatre paquets	132
Figure 4.21 : : Les quatre paquets avec les orientations associées	132
Figure 4.22 : : Simulation des trajectoires de finition sur CATIA	133
Figure A 1 : : Mesure de sphère d'étalonnage avec une seule orientation Capteur	147
Figure A 2 : : Nuages de points acquis pour plusieurs orientations de capteur	149
Figure A 3 : : Numérisation de la sphère selon plusieurs orientations	151
Figure A 4 : : Ecarts par rapport à la surface de la sphère des moindres carrés	151
Figure A 5 : : Definition des differents reperes	152
Figure A 6 : : Manipulations de l'etape 1	154
Figure A 7 : : Manipulations de l'etape 2	154
Figure A 8 : : Manipulations de l'etape 3	155
Figure A 9 : : Le pire point de contact ; cas d'un plan	156
Figure A 10 : : Le pire point de contact ; cas d'une surface convexe	157
Figure A 11 : : Corrélation entre le rayon de courbure et l'erreur de l'estimation	158
Figure A 12 : : Le pire cas de contact ; cas d'une surface convexe	158
Figure A 13 : : Corrélation entre l'erreur angulaire et la courbure d'une surface concave .	159
Figure A 14 : : Validation de l'approche de lancer de sphère	160
Figure A 15 : : Procédure d'évaluation de la méthode	161

Introduction

Ces dix dernières années ont vu l'apparition de nouvelles technologies qui ont contribué à la réduction des temps de conception et de production. Ainsi, la numérisation 3D des surfaces des pièces par des moyens optiques permet de délivrer en un temps relativement court une image des surfaces 3D sous forme d'ensembles des points. Les domaines d'utilisation de la numérisation 3D sont très variés : mécanique, visualisation, art, architecture... . En ce qui nous concerne, nous nous intéressons à son application dans le domaine du génie mécanique pour des applications de duplication de formes qui consiste à reproduire la copie d'un objet à partir de ses surfaces numérisées.

La plupart des méthodes de reproduction de forme s'appuient sur une démarche de Reverse Engineering (RE). L'objectif est alors de convertir un ensemble de données discrètes en un modèle continu qui peut servir de base à de nombreuses applications, en particulier l'usinage ou encore le prototypage rapide. La procédure peut être caractérisée par 3 étapes principales : acquisition des données ; traitement des données acquises ; modélisation CAO. Malgré les nombreuses avancées en modélisation CAO de données discrètes et les outils de plus en plus performants à disposition, l'étape de RE est rarement automatique ; elle est coûteuse en temps de calcul, fastidieuse et nécessite une très bonne maîtrise des logiciels. De plus, elle réalise le plus souvent un effet de lissage local des détails. Elle est en particulier fortement tributaire de la qualité des données initiales mais aussi de la façon dont les données sont traitées avant modélisation : partitionnement, recherche de lignes caractéristiques, extraction des lignes de bords, etc. Ainsi, une application de duplication (ou copiage) de formes qui s'affranchirait de l'étape de RE permettrait un gain de temps significatif.

Dans ce contexte, les travaux menés dans le cadre de cette thèse portent sur la mise en oeuvre d'une chaîne de copiage par usinage de formes complexes opérationnelle, depuis la numérisation 3D jusqu'à la réalisation des formes par usinage multi-axes en grande vitesse.

Le copiage direct par usinage de formes ou copiage rapide est une opération d'usinage qui permet d'élaborer un produit directement à partir de son image numérisée sous forme d'un grand nuage de points. Cette technologie permet de s'affranchir de l'étape de reconstruction de surfaces car le nuage de points, même s'il est fortement bruité et incomplet sert de support au calcul de trajectoires. De plus, l'utilisation de l'usinage grande vitesse fait du copiage direct de forme un outil que l'on peut associer au domaine du prototypage rapide.

Lors de travaux précédents, le LURPA a proposé une chaîne de copiage rapide expérimentale depuis la numérisation 3D sur Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) jusqu'à l'usinage 5 axes positionné sur Machine Outil à Commande Numérique (MOCN) (BRETEAU et al. 2006). Cette chaîne comprend quatre étapes majeures : la numérisation 3D, la préparation des données, la génération de trajectoires d'ébauche et de finition et l'usinage sur MOCN. Les premières pièces réalisées présentent des défauts que l'on peut imputer à chacune des étapes du processus. Ainsi, il apparaît que chaque étape est source d'erreurs soit de nature algorithmique, soit de nature matérielle.

Dans l'optique de réalisation d'une copie conforme du point de vue qualité géométrique visuelle nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étape de préparation du nuage de points en vue de l'usinage en 5 axes positionné. Cette étape clé du copiage rapide de forme permet de partitionner le nuage de points en paquets cohérents pouvant être usinés selon la même orientation outil en 3 axes. Outre des critères topologiques de gestion des collisions entre l'outil et le nuage de points, nous proposons de plus un découpage basé sur des critères technologiques, comme l'accessibilité machine qui faisait défaut dans la méthode précédente. Une optimisation du découpage en paquets est réalisée par minimisation des lignes de recouvrement entre les différents sous-ensembles de points.

Ainsi, le document est organisé de la façon suivante. Dans le chapitre 1 nous présentons la problématique du copiage direct par usinage. Après avoir exposé les approches de la littérature les plus représentatives concernant le copiage direct par usinage, nous présentons ce que nous appelons la chaîne du copiage rapide de formes complexe en usinage à 5 axes positionné, en mettant en évidence les différentes sources d'erreurs et les verrous technologiques associés. Nous définissons alors plus spécifiquement le cadre et les objectifs de nos travaux : valider le copiage direct par usinage comme outil de prototypage rapide et proposer une chaîne de copiage opérationnelle en 5 axes positionné assurant la conformité géométrique des formes réalisées vis à vis du modèle.

Le chapitre 2 présente la méthode de génération de trajectoires à 3 axes, à partir de données discrètes que nous proposons. Nous appuyons nos travaux sur la méthode Usipoint précédemment développée au Laboratoire pour l'usinage de données discrètes, méthode basée sur l'approche Z-buffer inverse. La difficulté est ici liée à la particularité des données discrètes issues de numérisation par capteur laser plan, selon plusieurs orientations, ce qui conduit en général à un nuage de points dense, bruité, hétérogène et non filtré. Nous nous intéressons dans ce chapitre à démontrer la faisabilité d'une démarche de copiage rapide de forme en 3 axes vis-à-vis d'une approche classique de reproduction de forme s'appuyant sur une démarche de Reverse Engineering. Pour cela nous utilisons les outils de certification de trajectoires développés au LURPA et en particulier la simulation d'usinage par N-Buffer. Nous montrons au travers d'une analyse des formes réelles et par simulation que le copiage direct par usinage est plus performant en terme de fidélité à la forme dans le cadre de l'usinage à 3 axes. L'étape de reconstruction étant supprimée, le copiage direct est beaucoup plus rapide, ce qui permet de l'associer au domaine du prototypage rapide.

Le chapitre 3 est ensuite consacré à l'étape de préparation du nuage de points en vue de l'usinage en 5 axes positionné. Cette étape appelée, découpage technologique et topologique, conduit à partitionner le nuage de points en paquets cohérents pouvant être usinés selon la même orientation outil en 3 axes. La démarche proposée s'appuie sur la définition d'une matrice de visibilité réelle. On définit en chaque point du nuage numérisé, un domaine de visibilité, appelé cône de visibilité regroupant les directions de l'espace discrétisé qui permettent d'usiner le point selon des critères donnés : la non collision entre l'outil et le nuage de points voisins lors du positionnement de l'outil sur le nuage, le champ de visibilité outil et l'accessibilité machine. Le calcul du cône de visibilité s'appuie sur l'estimation de la normale locale aux points numérisés. L'absence de continuité rend en général difficile l'estimation de la normale, en particulier de son orientation extérieure matière. En ce sens, nous proposons une méthode d'estimation de la normale par lancer de sphères qui s'inspire des méthodes de positionnement outil hémisphérique/surface. La matrice de visibilité sert de support à une étape dite de *groupement* des points, usinables selon une orientation outil. Considérant un nombre de paquets donné (soit un nombre d'orientations fixé), le choix de la meilleure combinaison est réalisé selon un critère de recouvrement minimal.

Dans le chapitre 4, la validation de la chaîne de copiage direct en 5 axes positionné est effectuée au travers d'un exemple illustrant les différentes étapes du processus. Il est en particulier mis en évidence les limites de la méthode et les pistes d'amélioration proposées.

INTRODUCTION

Chapitre 1 La problématique du copiage direct par usinage

1. Introduction

Le développement de produit, et plus généralement l'industrie manufacturière, doivent faire face à trois phénomènes a priori contradictoires. La baisse du temps de mise sur le marché d'un nouveau produit, la baisse des coûts et la maîtrise de la qualité. Ceci entraîne le plus souvent une mutation interne des entreprises, en termes d'outils, d'organisation et de processus de conception et d'industrialisation.

Dans ce contexte, les techniques de prototypage rapide, qui conduisent rapidement à des modèles permettant de valider la conception ou indirectement à des prototypes permettant des tests fonctionnels, apportent une contribution essentielle. Ces techniques s'avèrent stratégiques dans de nombreux secteurs, en particulier pour l'industrie manufacturière. La notion de «prototypage rapide» [AUBIN 1994] signifie «fabrication rapide de modèle et prototype».

Les premiers utilisateurs furent les grands groupes des secteurs automobile, aéronautique, spatial et armement, ceci en raison des difficultés inhérentes à la jeunesse de la technologie qui requiert des compétences et des moyens techniques importants. De plus, du fait des progrès intrinsèques de différentes technologies de fabrication rapide, le prototypage rapide apporte un grand renouveau à plusieurs domaines : aux métiers de la mise en forme des matériaux, puisqu'il permet de fabriquer des pièces sans moules ni matrices; en conception et en design, il permet la mise au point des concepts puis des produits ou des gammes de produits nouveaux; dans le domaine de l'architecture et fabrication des maquettes ; dans l'industrie des cosmétiques notamment en parfumerie où l'on peut lancer tous les six mois de nouveaux flacons. Le prototypage rapide intervient dans le domaine médical principalement de deux manières. L'une classique est la création rapide de modèles pour des instruments, des prothèses ou orthèses, etc. L'autre consiste à reproduire matériellement des parties du corps enregistrées par scanner sur un patient. La figure 1.1 présente les principaux domaines d'utilisation du prototypage rapide [AUBIN 1994].

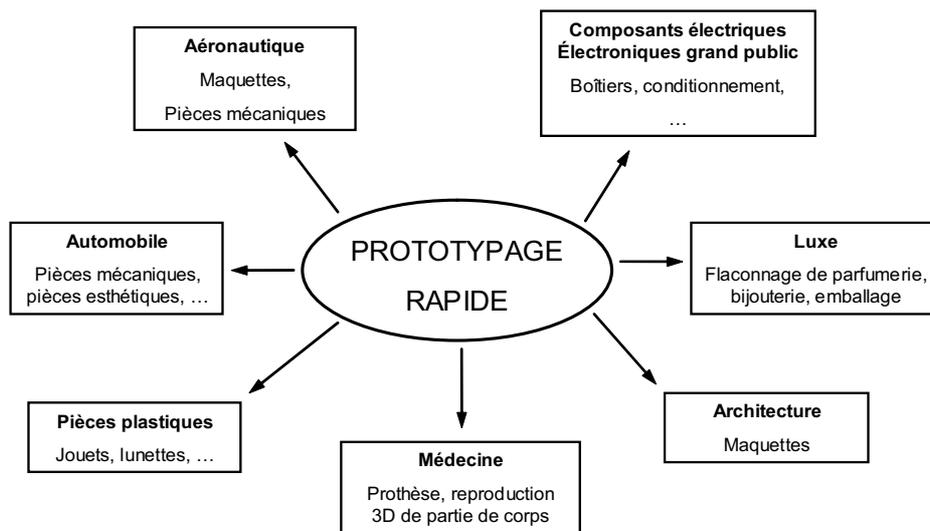


Figure 1.1 : Principaux domaines d'utilisation du prototypage rapide

Parmi les techniques de prototypage rapide, le copiage de formes est une technologie qui permet de passer d'un objet physique à sa copie. La majorité des méthodes de reproduction de forme s'appuie sur une démarche de Reverse Engineering (RE), qui permet de construire un modèle CAO à partir de l'objet physique. Le modèle CAO ainsi obtenu sert de support soit à une opération d'usinage, soit à une opération de prototypage (figure 1.2).

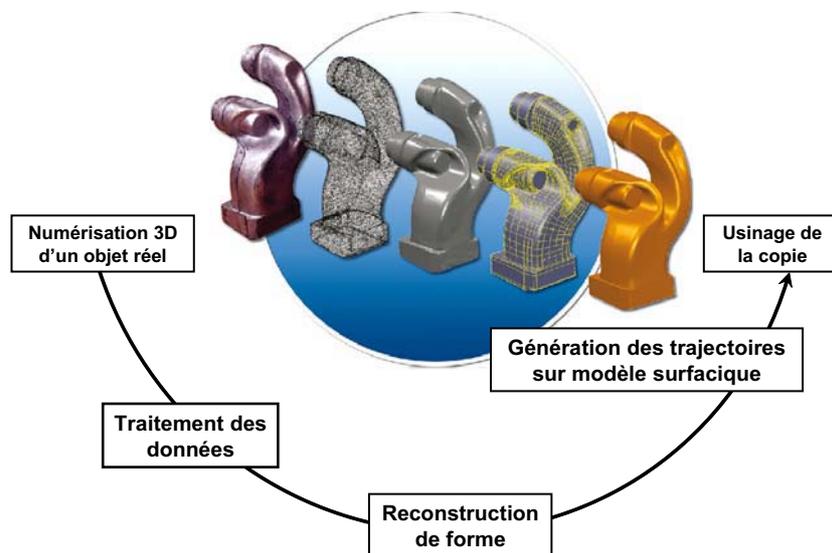


Figure 1.2 : La chaîne classique du copiage en usinage

La démarche de RE est constituée de trois étapes principales : numérisation de l'objet physique; traitement des données acquises; modélisation CAO [VARADY et al. 1997]. La numérisation 3D de l'objet est en général réalisée par des moyens de mesure optique, tels les

capteurs laser plan, la photogrammétrie ou encore la tomographie [CONTRI et al. 2002]. Cette étape fournit une image de l'objet sous forme de grands nuages de points, denses, bruités et hétérogènes [SOUZANI 2006]. L'étape de traitement des données acquises comprend un certain nombre d'opérations telles le filtrage, la segmentation des données ou le remplissage des trous de numérisation, avec pour objectif la définition d'un nuage de points pouvant être converti facilement en un modèle CAO. Dans le domaine du RE, le processus de reconstruction de surfaces ou modélisation CAO utilise deux types principaux de modèles CAO [VERON 1999]. Le premier type s'appuie sur une représentation paramétrique des surfaces (Bézier, Nurbs). Le processus de reconstruction nécessite une étape de décomposition du nuage de points en sous ensembles, chacun d'eux étant facilement modélisable par un carreau. La surface est ensuite obtenue par raccordement, selon différents ordres de continuité des carreaux. Cette étape est bien souvent longue et fastidieuse car rarement automatique. Le second type de modèles est basé sur une représentation polyédrique de la surface de l'objet. Ce polyèdre construit sur le nuage de points est en général obtenu plus rapidement et de manière robuste. Cependant, le grand nombre de faces et de sommets obtenus les rend peu efficaces pour des opérations d'usinage ou de prototypage rapide. Des traitements supplémentaires conduisant à des simplifications de modèles sont souvent nécessaires [VERON & LEON 1998].

Malgré les nombreuses avancées en modélisation CAO de données discrètes et les outils de plus en plus performants à disposition, l'étape de RE est rarement automatique et nécessite, de la part de l'utilisateur, une très bonne maîtrise des logiciels. Elle est en particulier fortement tributaire de la qualité des données initiales mais aussi de la façon dont les données sont traitées avant modélisation : partitionnement, recherche de lignes caractéristiques, extraction des lignes de bords, etc. Le modèle obtenu servant de support aux applications de fabrication, sa qualité conditionne la qualité géométrique de l'objet dupliqué.

L'opération de fabrication est soit un procédé classique de prototypage, soit une opération d'Usinage Grande Vitesse, qui est reconnue désormais comme un procédé de prototypage pour l'obtention de pièces bonne matière [MOGNOL 2005]. Dans la majorité des cas, la fabrication est traitée de manière indépendante par des logiciels spécifiques. Dans le cadre de l'UGV, la gestion des opérations d'usinage et le calcul de trajectoires permettant de réaliser la pièce finie sont réalisés par un logiciel de CFAO. Si la plupart des logiciels de CFAO proposent des solutions de RE et des solutions de fabrication indépendantes, quelques solutions logi-

ciels intégrées sont proposées dans des domaines bien particuliers (ARTCAM pour la réalisation de gravure par exemple, [DELCAM 2008]).

En usinage, la trajectoire calculée est une approximation du modèle CAO. Ainsi, la combinaison des différentes étapes du processus de copiage conduit à une accumulation d'écarts géométriques qui peuvent le rendre non performant [FENG & TENG 2005]. En ce sens, un processus de duplication de formes qui s'affranchirait de l'étape de reconstruction de surface permettrait à la fois un gain de temps et une meilleure maîtrise de la qualité géométrique de la forme réalisée.

Dans ce contexte, le LURPA s'est intéressé depuis quelques années au copiage direct d'objets de formes complexes par Usinage Grande Vitesse (UGV) 5 axes. Le copiage direct de formes permet de passer directement du nuage de points, image de l'objet à dupliquer, à la copie par une opération d'usinage (figure 1.3). L'utilisation du 5 axes permet d'augmenter la diversité des formes à usiner. Ainsi, le copiage direct par UGV 5 axes peut être assimilé à un procédé de prototypage rapide.

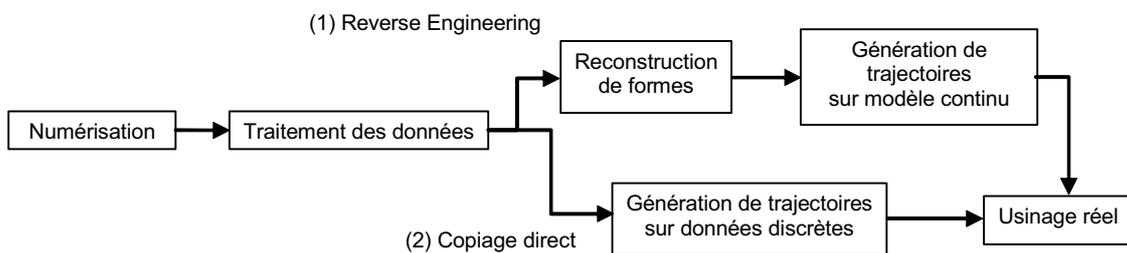


Figure 1.3 : Le copiage direct de formes en usinage

Après un rapide balayage des méthodes d'usinage direct de nuages de points, nous présentons la chaîne de copiage rapide de formes complexes qui a été élaborée au laboratoire et qui a évolué de l'usinage 3 axes vers l'usinage 5 axes positionné [CONTRI et al. 2002] [BLAT 1999] [BRETEAU 2005] [OSTY et al. 2000]. Tout l'intérêt de cette chaîne de copiage réside dans le fait qu'elle propose une démarche intégrée depuis la numérisation jusqu'à l'usinage sur MOCN, proposant ainsi un véritable outil de prototypage rapide. Les opérations d'usinage d'ébauche et de finition sont effectuées à partir de nuages de points bruts.

Nous présentons les difficultés rencontrées lors de la réalisation des premières pièces qui ont mis en avant un ensemble de problématiques associées au copiage direct dans un contexte 5 axes UGV qui font l'objet du travail doctoral proposé.

2. Copiage direct de nuage de points par usinage

L'usinage direct d'un nuage de points bruité et dense en usinage à 5 axes est peu développé. On trouve dans la littérature des travaux menés dans le cadre de la copie de forme par usinage direct d'un nuage de points en 3 axes [LIN & LIU 1998] [PARK & CHUNG 2003] [FENG & TENG 2005] [PENG & YING 2007] et également des travaux sur le choix des orientations d'outil en usinage à 5 axes à partir d'un modèle CAO [GUPTA et al. 1996].

La principale difficulté en usinage de nuage de points est l'absence de continuité et de structuration des données; la notion de voisinage n'existe plus. Ainsi, la plupart des méthodes de génération de trajectoires proposées s'appuie sur un nuage de points organisé, généralement issu d'un système de CAO. Une des premières méthodes reportée est le travail de Lin [LIN & LIU 1998] qui propose une méthode de génération automatique de trajectoire outil à partir d'un grand nuage de points en s'appuyant sur la construction d'un *Z-map model*. Ce *Z-map model* consiste en un maillage rectangulaire orienté selon la direction de numérisation. Cette construction qui suppose que le nuage de points a été obtenu selon une direction de numérisation privilégiée permet d'obtenir une représentation surfacique approximative du nuage de points. Les trajectoires de finition sont déterminées en échantillonnant le *Z-map model* de façon à avoir une erreur de corde et une hauteur de crête inférieures à des valeurs seuil données. Cependant cette méthode nécessite un nuage de points structuré et demande la construction d'un maillage. Or notre objectif étant d'usiner directement n'importe quel nuage de points (hétérogène et bruité), cette méthode comporte peu d'intérêt pour le problème posé.

Park et Chung [PARK & CHUNG 2003] ont proposé une méthode pour l'ébauche et la finition basée sur les lignes de numérisation. L'opération d'ébauche est effectuée tranche par tranche. Les auteurs définissent les trajectoires outil comme une série de courbes basées sur les lignes de numérisation. Cette démarche n'est pas applicable lorsque les nuages de points résultent d'une numérisation selon plusieurs orientations.

[FENG & TENG 2005] ont ainsi proposé une méthode de calcul en finition basée sur la définition d'un réseau de cellules 2D dont les dimensions sont liées à la tolérance d'usinage et à la hauteur de crête admissible. Chaque nœud de la cellule correspond à une position outil. En absence de continuité, les auteurs proposent d'évaluer les erreurs d'usinage à partir du calcul

de l'enveloppe du mouvement de l'outil, supposé hémisphérique, de deux trajets adjacents. Une méthode d'optimisation est proposée afin d'optimiser la position du nœud de la cellule de façon à minimiser les erreurs d'usinage (figure 1.4). Cette méthode particulièrement prometteuse nécessite cependant de nombreuses étapes et est complexe à mettre en œuvre.

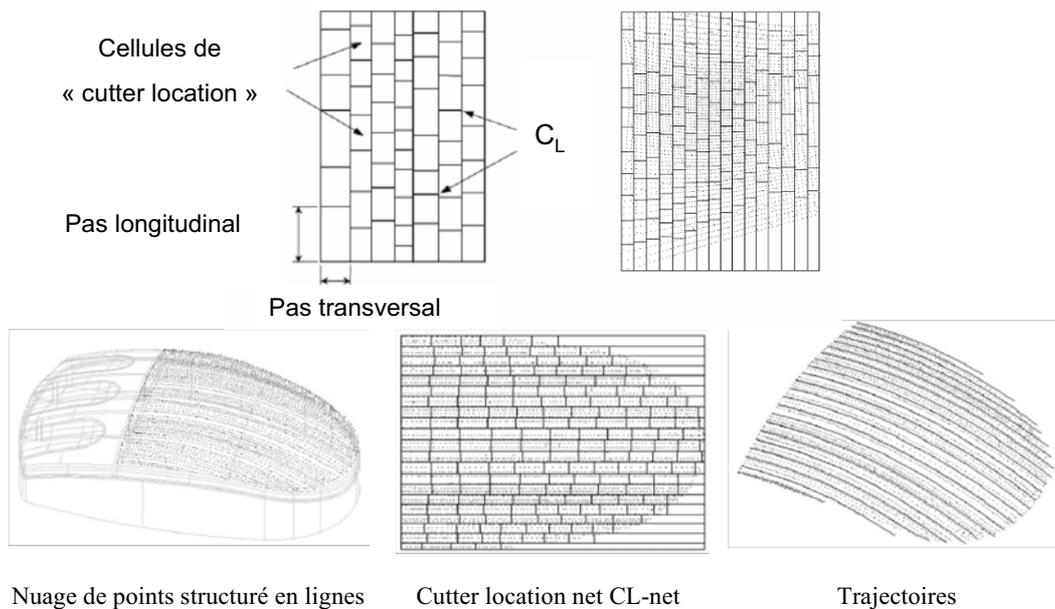


Figure 1.4 : Génération de CL-net, CL trajectoire

Plus récemment Teng et al [TENG et al. 2006] ont introduit le concept d'usinage domaine par domaine de façon à augmenter l'efficacité du procédé (figure 1.5). Le nuage de points est segmenté en fonction de la complexité géométrique des points. Cette complexité géométrique est définie à partir de la courbure locale et des interférences locales outil/surface. Les points de même complexité sont groupés ensemble pour former un domaine qui sera usiné dans une même phase selon la méthode proposée dans [FENG & TENG 2005]. Cependant, pour la seule illustration proposée par les auteurs le nuage de points est obtenu par échantillonnage du modèle CAO de la pièce à usiner.

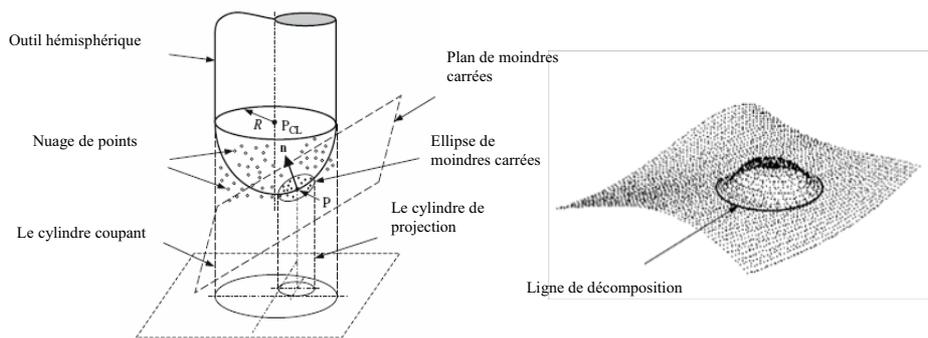


Figure 1.5 : Découpage du nuage

D'autres études concernant l'usinage de nuages de points sont plus spécifiques. Ou Yang et al [OU YANG et al. 2005] ont développé un algorithme pour définir de manière optimisée le rayon de l'outil permettant d'usiner un nuage de points. Ici encore la pertinence de l'algorithme est testée sur des nuages de points simulés. Peng et Ying [PENG & YING 2007] se sont intéressés à la régénération des trajets lorsque une modification de conception est nécessaire. L'hypothèse est que les trajets initiaux ont été générés à partir de surfaces B-splines construites après sélection de quelques points du nuage comme points de contrôle de la surface.

Ainsi, la plupart des méthodes proposées ne s'attache pas à l'usinage de grands nuages de points obtenus selon plusieurs numérisations ou configurations capteur. Dans ce cas en effet, le nuage à traiter est dense, fortement hétérogène et bruité. De plus, seulement quelques unes de ces méthodes se sont intéressées au cas de l'usinage à 5 axes. Enfin, la prise en compte des paramètres d'usinage n'est pas toujours abordée.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à la mise en place d'une méthode de copiage directe par usinage. La première étude réalisée par Contri [CONTRI 1998] avait montré la faisabilité d'une méthode de positionnement outil/nuage de points de type Z-buffer inverse [SUZUKI et al 1991] pour l'opération de finition en usinage 3 axes avec un outil hémisphérique. Cette première étude a conduit à la définition de la méthode USIPOINT, méthode de génération de trajectoires de finition en 3 axes sur nuage de points numérisés. Pour compléter la méthode Usipoint, Blat a développé les algorithmes définissant l'opération d'ébauche [BLAT 1999]. Afin d'augmenter la diversité des formes à réaliser, l'introduction des 2 axes supplémentaires s'avère nécessaire. Dans ce sens, une étude s'est attachée à proposer une chaîne de copiage par usinage 5 axes positionné. Il s'agit alors de décomposer le nuage de points en sous ensembles selon des critères d'accessibilité de l'outil, de façon à ce que chaque portion de surface ainsi définie soit usinée en 3 axes avec la méthode USIPOINT

[BRETEAU 2005]. La chaîne de copiage direct ainsi proposée met en oeuvre les différentes étapes depuis la numérisation 3D sur une Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) jusqu'à l'usinage 5 axes sur une Machine Outil à Commande Numérique (MOCN) [BRETEAU et al. 2006].

3. La chaîne de copiage direct par usinage

La chaîne de copiage direct par usinage du laboratoire, reprend les étapes classiques d'une chaîne de copiage (voir figure 1.6) : numérisation de l'objet physique, traitement des données, calcul de trajectoires sur données discrètes et usinage sur MOCN 5 axes.

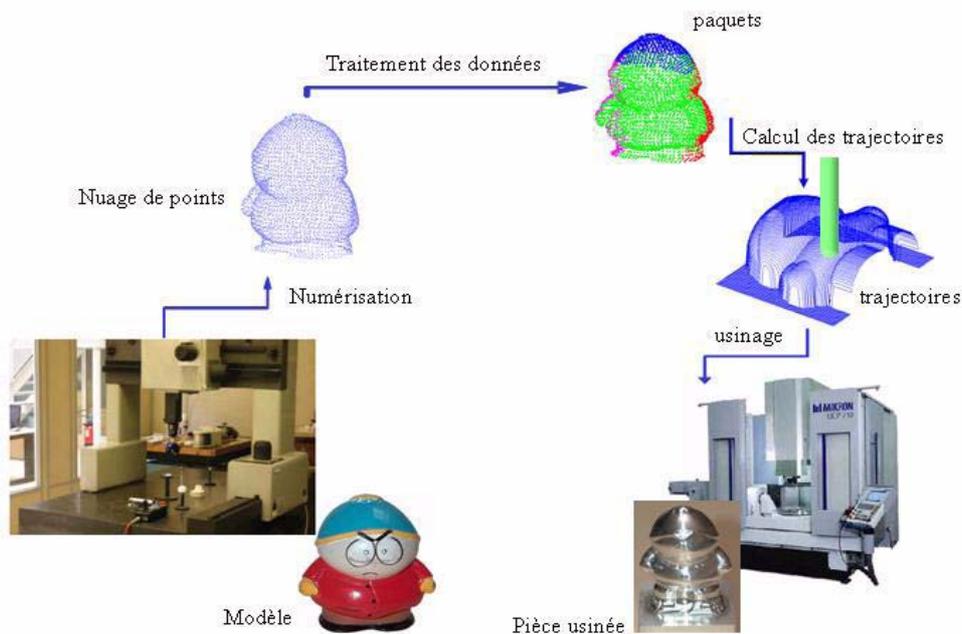


Figure 1.6 : copyForm, chaîne du copiage direct de forme par usinage

La numérisation consiste en l'acquisition d'ensembles de points représentatifs des surfaces de l'objet. Cette étape est réalisée sur une MMT équipée d'une tête motorisée pouvant être orientée selon un nombre fini d'orientations indexées. Cette tête orientable supporte le capteur optique laser plan Zephyr de la société Kreon technologie [KREON 2008]. La numérisation des surfaces de l'objet est en général réalisée à l'aide de plusieurs configurations du capteur laser, en essayant de définir une configuration relative capteur/surface qui limite le bruit de numérisation [SOUZANI et al. 2005]. Cependant, les données issues de numérisation sont de natures discrètes, souvent denses, inhomogènes et bruitées. Ainsi, il est nécessaire de réaliser

des opérations dites de pré-traitement du nuage de points obtenus : filtrage, nettoyage, partitionnement. La perte de continuité rend les traitements délicats, ce qui conduit à recréer une pseudo-continuité des données par une représentation de type occupation spatiale ou *voxel-map* qui accélère et facilite les traitements [OSTY 2002].

Dans le cadre de l'usinage 5 axes positionné, le nuage de points doit être organisé en paquets de points usinables selon un même posage de la pièce dans l'espace machine. A cet effet, l'étape de pré-traitement doit conduire à un découpage du nuage de points en paquets. Cette étape de partitionnement, qui s'appuie sur la notion de *voxel-map*, est basée sur les possibilités d'accessibilité de l'outil et la visibilité de coupe pour un posage donné [BRETEAU 2005] [BRETEAU et al. 2006].

L'étape suivante est la génération de trajectoire en 3 axes pour chaque paquet de points, selon la méthode Usipoint. Les trajectoires en 3 axes sont générées par balayage directement sur le nuage de points brut, dense, et bruité. Que ce soit en ébauche ou en finition, la méthode de calcul est basée sur la méthode du Z-BUFFER inverse [SUZUKI et al 1991]. Elle sera détaillée dans le chapitre 2. L'usinage sur centre de fraisage termine le processus de copiage direct de forme.

Les premières pièces réalisées (figure 1.7) font apparaître des défauts géométriques qui peuvent être dus à différentes causes soit de nature *algorithmique*, soit de nature *matérielle*. Ainsi, les écarts géométriques de nature *matériel* sont liés à des problèmes de remise en position relative pièce/organe terminal de la machine considérée : recalage des nuages de points numérisés, recouvrement des paquets de points isolés pour chaque posage, recalage des posages dans l'espace de la MOCN. La méthode de positionnement outil/surface étant basée sur le Z-buffer inverse, les écarts constatés de nature *algorithmique* sont quant à eux associés au découpage du nuage de points en sous ensembles selon les critères de visibilité. En ce sens, le calcul de la normale qui participe à ce découpage s'avère non robuste. De même la gestion des groupements des points en sous-ensembles ainsi que la gestion des trajets de liaison entre ces sous-ensembles est source d'erreurs.



Figure 1.7 : Première pièce issue de la chaîne de copiage direct à 5 axes

3.1. Écarts géométriques de nature *matériel*

Nous nous intéressons ici principalement à identifier et à évaluer l'importance des défauts géométriques des éléments de machine qui pourraient induire les défauts précédemment énoncés [MAKKI et al. 2006]. Ces défauts concernent :

- la géométrie des éléments de la machine elle-même, tels les défauts de justesse ou de rectitude des axes et/ou les défauts de positionnement relatif des éléments.
- la position et l'orientation des éléments terminaux tels que outil ou capteur.

Ainsi, dans les paragraphes suivants, nous nous attachons à présenter les différentes sources d'écarts géométriques de la chaîne de numérisation puis de la MOCN qui pourraient entraîner des écarts de recouvrement et affecter la qualité géométrique des pièces réalisées.

3.1.1. Écarts géométriques de la chaîne de numérisation

Pour effectuer l'étape de numérisation, un capteur laser plan est monté sur une tête automatique indexable d'une MMT. De façon à numériser l'intégralité de la pièce, plusieurs orientations du capteur par rapport à la pièce sont nécessaires. Lors de chaque numérisation, les coordonnées des points acquis par le capteur sont exprimées dans un repère R_c associé au capteur. Une étape de positionnement du capteur préalable à la numérisation permet d'exprimer les coordonnées des points acquis dans le repère de la machine R_0 .

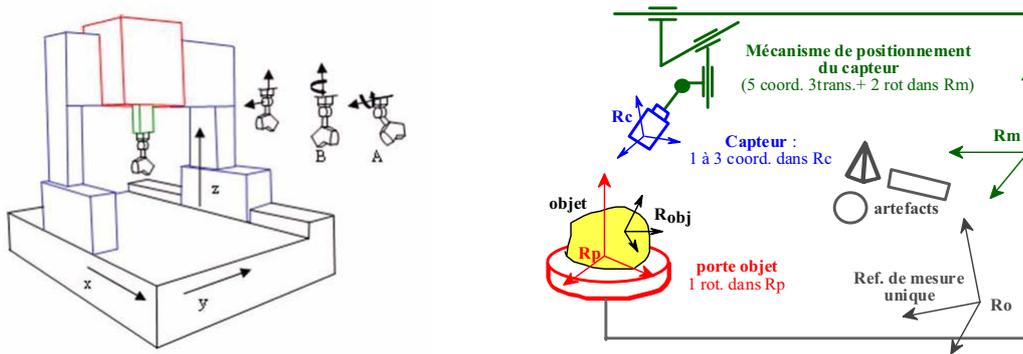


Figure 1.8 : Repères utilisés durant l'étape de numérisation

Les coordonnées acquises lors de la numérisation par capteur laser sont d'une part les coordonnées des points dans le repère lié au capteur et d'autre part les coordonnées donnant les positions relatives des organes de la MMT. Les causes d'écarts entre les coordonnées acquises et les coordonnées vraies sont donc imputables à la machine ou au capteur.

a) Ecartés considérés sur la machine

Le modèle d'écarts le plus couramment utilisé sur les MMT est le modèle des 21 défauts. [BOURDET 1987]. Cette méthode s'applique aux machines composées de trois glissières orthogonales montées en série, avec trois capteurs de position placés parallèlement aux glissières en considérant chaque solide composant la machine comme indéformable.

Les procédures d'identification des écarts correspondant au modèle des 21 défauts sont utilisées pour établir la matrice de compensation des écarts géométriques de la MMT. Les écarts de géométrie associés à la qualité de la MMT utilisée (quelques μm) sont tels qu'ils peuvent être négligés dans la recherche des causes de marques sur les pièces fabriquées.

b) Ecartés relatifs à l'utilisation d'un capteur laser plan

Les écarts relatifs à l'utilisation d'un capteur plan sont de deux types :

- les écarts relatifs à la détermination de la position et de l'orientation du capteur dans l'espace de la MMT,
- les écarts propres au capteur.

L'étude approfondie de la qualité géométrique du capteur a fait l'objet d'études précédentes et a abouti à l'écriture de procédures permettant d'identifier des écarts propres au capteur utilisé, comme en particulier [BOURDET 2005] [SOUZANI 2006].

- les relations entre le bruit de numérisation et la distance de numérisation,
- les relations entre le bruit de numérisation et l'angle de numérisation,
- les relations entre la justesse et la distance de numérisation.

Les valeurs des écarts obtenues dépendent de l'étape de calibration des paramètres internes du capteur qui n'est pas accessible à l'utilisateur.

En supplément des écarts propres au capteur utilisé, des écarts relatifs à la détermination du positionnement du capteur dans l'espace de la machine sont possibles. En effet, lors de l'utilisation d'une MMT avec un capteur laser plan, une procédure de positionnement est nécessaire afin de situer le repère lié au capteur par rapport au repère de mesure. Il faut donc connaître la matrice de rotation permettant de passer d'un repère à l'autre et la translation entre les origines des deux repères. Une procédure de positionnement non modifiable est proposée à l'utilisateur. Pour chaque orientation du capteur, cette procédure est appliquée et permet l'obtention des coordonnées des points acquis dans un repère unique.

L'écart de recalage des points issus de différentes orientations capteur est dû soit à la calibration de la caméra, soit à l'étalonnage des orientations capteur. Afin d'évaluer la qualité de l'étalonnage, (les écarts liés au positionnement du capteur) nous proposons la numérisation d'un artefact de forme connue selon différentes orientations. Ainsi, une sphère étalon est mesurée en utilisant plusieurs orientations du capteur. Les points acquis pour chaque orientation du capteur appartiennent théoriquement à une même sphère. Si ce n'est pas le cas, alors il existe des écarts liés au positionnement. L'étude menée, présentée en annexe A, a montré que les erreurs de recalage ne créent pas de défaut de recouvrement significatif dans le cadre de cette étude. Ainsi, nous concluons que le positionnement du capteur est bien effectué et la numérisation de la pièce par plusieurs orientations de capteur n'est pas une source d'erreur de recouvrement sur la pièce usinée.

3.1.2. Ecarts géométriques de la chaîne de fabrication

Une fois la pièce numérisée et les trajectoires d'usinage calculées, la pièce est usinée sur une machine à 5 axes. L'usinage est dit « positionné » car l'orientation de la pièce par rapport à l'outil n'évolue pas durant l'usinage. Ceci génère des lignes de recouvrements entre les différentes zones d'usinage sur la surface de la pièce usinée. De même que précédemment, nous considérons les écarts liés à la machine et ceux liés à l'identification de l'outil.

a) Ecart géométriques de la MOCN

Dans l'objectif de minimiser les erreurs de recouvrement, il est nécessaire d'identifier les paramètres du modèle géométrique de la machine d'usinage. Le modèle géométrique de la machine et les différents repères sont définis en annexe B. La machine Mikron du laboratoire étant une structure de type RRTTT avec les rotations affectées à la pièce sur les axes A et C de berceau et de plateau machine, la transformation géométrique consiste à déterminer les coordonnées articulaires (X_m, Y_m, Z_m, A, C) en fonction des coordonnées pièce ($X_{pr}, Y_{pr}, Z_{pr}, I, J, K$) [LAVERNHE et al. 2006].

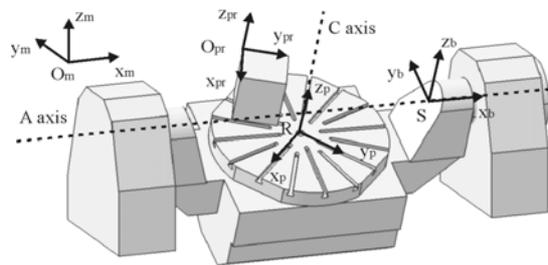


Figure 1.9 : Définition des différents repères

La situation relative de l'outil par rapport à la pièce est assurée par un assemblage de corps solides en liaison entre eux. Tout comme pour les machines à mesurer tridimensionnelles, ces liaisons possèdent des défauts. Cependant nous considérons que la justesse des axes est corrigée et que chaque liaison à un degré de liberté est parfaite. Nous faisons également l'hypothèse que les axes de translations et de rotations sont perpendiculaires entre eux et que l'axe de rotation A est parallèle à l'axe X .

Dans le cas particulier où la base de programmation est identique à celle du plateau, les huit paramètres $P_x, P_y, P_z, b_y, b_z, m_x, m_y, m_z$ définissent alors le modèle géométrique de l'usinage. Nous considérons donc que les défauts liés à l'identification de ces paramètres sont prépondérants.

Les trois paramètres P_x, P_y et P_z , définissent la position de la pièce sur le plateau. Ils sont à identifier pour chaque nouvelle production ou pour chaque pièce de la série quand l'exigence de qualité dimensionnelle l'impose. Dans ce cas on utilise un capteur à déclenchement pour machines outil à commande numérique dont la précision intrinsèque est de l'ordre du μm mais

qui peut se dégrader en quelques μm si la chaîne d'acquisition temps réel des coordonnées palpées n'est pas optimale [RENISHAW 2006].

Les cinq paramètres b_y, b_z, m_x, m_y, m_z sont les paramètres géométriques de la machine seule. Ils sont à identifier une fois pour toutes après installation de la machine. L'annexe B présente la méthode retenue pour identifier les paramètres associés à la géométrie de la machine.

Si tous ces paramètres sont correctement identifiés, nous sommes capables de minimiser les écarts dimensionnels et en particulier les écarts de recouvrement quand une phase d'usinage est composée de plusieurs orientations de la pièce avec superposition des zones usinées. Nous verrons, en particulier dans le chapitre 3 quelle méthode nous avons adoptée afin de minimiser ces écarts de recouvrement.

b) Ecarts considérés et méthode d'identification sur l'outil

Les dimensions caractéristiques de l'outil sont sa longueur et son rayon. La longueur de l'outil intervient directement dans la transformation géométrique inverse pour générer les consignes articulaires. Son identification est donc primordiale. Elle peut s'effectuer à l'aide d'un banc de pré réglage puis d'un usinage réel pour affiner sa valeur. Pour être le plus précis et éviter l'immobilisation du moyen de production, une mesure sur la machine outil et sans contact est également possible [RENISHAW 2006].

Le rayon de l'outil a aussi une influence sur les dimensions des pièces usinées. Il est possible d'utiliser la correction de rayon en trois dimensions en spécifiant le rayon réel de l'outil dans la commande numérique. Cependant, cette correction ne tient pas compte du défaut de forme de l'outil qui peut avoir un effet non négligeable sur les écarts géométriques en particulier pour l'outil boule en usinage des surfaces complexes [FEAUTRIER et al. 1998]. Seul un affûtage parfait de l'outil permet de s'affranchir de ce défaut. Enfin, la déformation de l'outil à cause des contraintes mécaniques durant la coupe n'est pas nulle mais la diminution des portes à faux et une profondeur de passe minimale permet de la minimiser.

c) Influence des différents écarts sur le recouvrement

Nous avons donc isolé neuf paramètres, en comptant la longueur de l'outil, dont la précision d'identification influence la qualité géométrique. En particulier, les nuages de points issus de la numérisation de la forme se recouvrent par endroit ce qui génère au niveau des trajectoires des zones usinées plusieurs fois avec des orientations de l'outil différentes. Aussi, comme les consignes articulaires X_m, Y_m, Z_m , et J_z et la jauge outil dépendent des angles A et C et des

neufs paramètres géométriques, les positions atteintes par l'outil pour un même point visé dans l'espace pièce ne seront pas les mêmes selon l'orientation de l'outil. Certains paramètres (m_x , m_y , m_z , j_z) sont indépendants de l'orientation de l'outil mais les paramètres p_x , p_y , p_z , b_y et b_z ont une influence sur la position de l'outil dans l'espace machine lors de la rotation des axes A et C (annexe B). On peut donc s'attendre à un effet de ces défauts dans les écarts de recouvrement observés sur les pièces usinées.

3.2. Écarts géométriques de nature *algorithmique*

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les erreurs de nature algorithmique sont essentiellement liées à l'étape de partitionnement du nuage de points dans l'optique d'un usinage en 5 axes positionné. Cette configuration d'usinage présente l'inconvénient d'introduire des défauts géométriques et des défauts d'aspect aux raccords des portions de surface usinées avec des orientations d'outils différentes.

Dans l'objectif de découpage du nuage de points en paquets, l'étape de calcul de la normale est une étape clé, car elle permet d'initialiser le posage de cône de visibilité qui sert de base au partitionnement. Il est bien évident que les données étant discrètes, l'absence de continuité et de voisinage rend difficile l'évaluation de la normale. Notons de plus, que nous avons cherché à nous affranchir de l'étape de reconstruction de modèle surfacique, même sous forme polyédrique, de façon à travailler sur les données brutes. Ainsi, dans ses travaux, Breteau propose une méthode de calcul de normale locale basée sur la voxélisation du nuage de points (définissant une voxel-map) [BRETEAU 2005]. Un plan des moindres carrés est associé au sous ensemble de points contenus dans chaque voxel, et la normale du plan définit la normale locale pour l'ensemble du nuage contenu dans le voxel concerné. Une normale moyenne est ensuite estimée à l'aide du diagramme de Voronoï construit sur les 26 voxels voisins.

Cette méthode n'est cependant pas bien adaptée aux formes complexes car la normale du plan des moindres carrés n'exprime pas la normale réelle pour les zones complexes où la courbure est assez forte. De plus cette méthode n'assure pas l'orientation correcte (extérieur ou intérieur matière). La figure 1.10 présente la qualité faible des normales calculées selon cette approche compte tenu du bruit de numérisation.

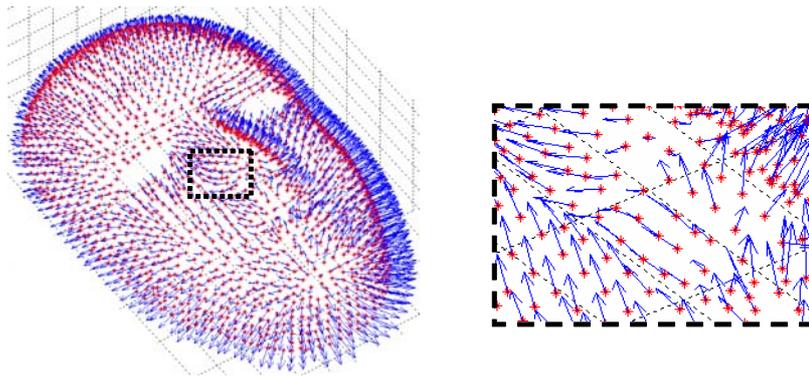


Figure 1.10 : Calcul de la normale

De plus, l'orientation de la normale est réalisée à partir du produit scalaire entre la normale calculée et la direction de numérisation effectuée sur MMT. Si le produit scalaire est positif, la normale est correctement orientée; si le produit scalaire est négatif la normale est mal orientée, on change alors son sens (figure 1.11). Donc la détermination de l'orientation extérieure matière de cette normale pose un problème, car on a toujours besoin de connaître l'orientation du capteur laser selon laquelle la numérisation de chaque point a été effectuée.

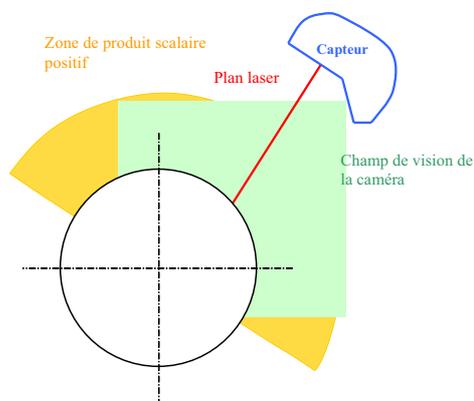


Figure 1.11 : correction de l'orientation de la normale

Cette méthode de correction de l'orientation ne donne pas toujours des résultats cohérents. Par exemple, la correction de l'orientation de la normale pour les points de bord du nuage peut conduire à des normales inversées vers l'intérieur matière (figure 1.12).

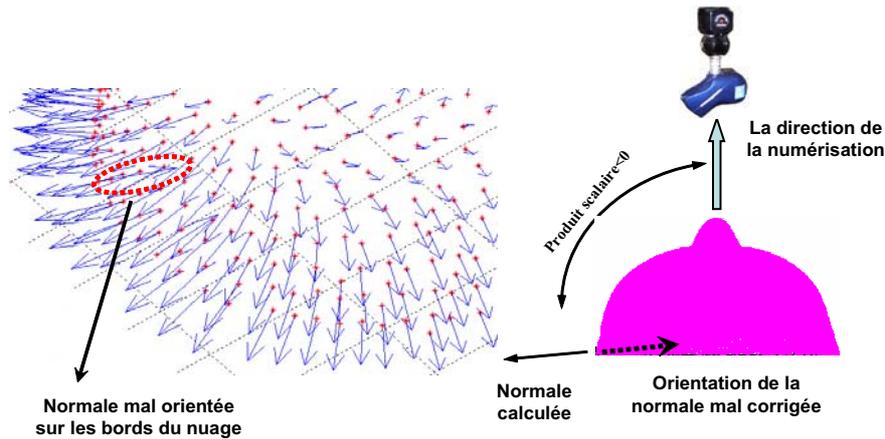


Figure 1.12 : Problématique de correction de l'orientation des normales sur les bords

Toutes ces problématiques dues au calcul de la normale conduisent à des cônes de visibilité mal initialisés, et par conséquent à un mauvais partitionnement du nuage de points. Le calcul de la visibilité est ensuite basé sur un critère d'accessibilité outil et de non collision.

En ce qui concerne le découpage du nuage de points en paquets, ce dernier est réalisé sans optimisation du choix des paquets. La méthode proposée présente une solution semi automatique du partitionnement du nuage de points, pour laquelle l'initialisation de l'étape de partitionnement se fait par le choix direct de 5 orientations de base x , $-x$, y , $-y$, z . Les points restants sont ajoutés aux paquets voisins (les paquets les plus proches). Cette méthode ne permet en aucune sorte l'optimisation du choix des orientations de partitionnement, ou encore la minimisation de la longueur des lignes de recouvrement (figure 1.13).

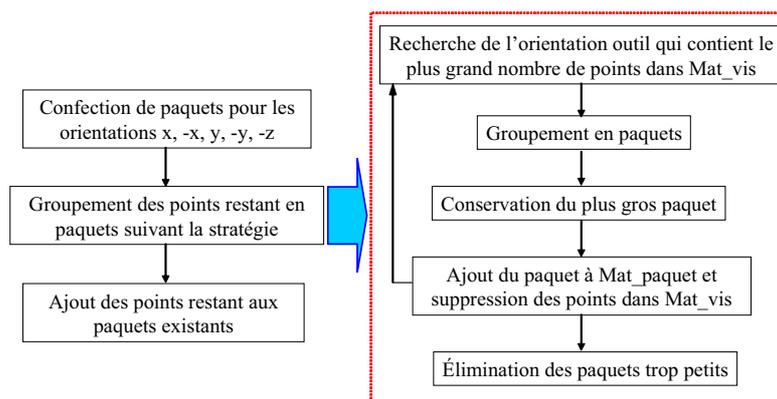


Figure 1.13 : Partitionnement de nuage de points

4. Synthèse : Objectif des travaux

Le processus de copiage direct est un processus complexe faisant intervenir des moyens de numérisation et de fabrication. Les travaux menés au LURPA dans ce domaine se sont focalisés jusqu'à présent sur l'aspect logiciel du traitement des données de numérisation pour aboutir à l'obtention des pièces [BRETEAU et al. 2006]. Les travaux présentés dans ce chapitre se focalisent d'avantage sur les aspects *matériels* de ce processus en montrant les sources d'écarts géométriques potentielles liées aux procédés et des procédures pratiques de détermination et/ou correction de ces écarts. La détermination et la correction des écarts géométriques dans le processus de copiage rapide sont des parties incontournables.

Notre objectif général est la mise en place d'une chaîne de copiage direct de forme opérationnelle permettant la réalisation de formes complexes en usinage 5 axes positionné. Plus précisément nous situons nos travaux de thèse au niveau de l'amélioration de la qualité géométrique de la copie et de la rapidité du processus de copiage.

L'étape de numérisation, si elle s'appuie sur une stratégie intelligente n'est pas une source d'erreurs prépondérantes dans la chaîne de copiage (annexe A). Cependant, le nuage restitué dans un repère unique est non homogène, dense et généralement fortement bruité. Il constitue notre donnée d'entrée.

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à évaluer les performances du copiage rapide en 3 axes vis-à-vis d'une méthode classique basée sur le Reverse Engineering d'un point de vue qualité géométrique. Ainsi il convient de valider la méthode de génération de trajectoires 3 axes développée (Usipoint) sur laquelle l'ensemble du processus repose. Cette étape de validation fait l'objet du chapitre 2.

La méthode Usipoint étant validée, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étape de la préparation du nuage de points pour l'usinage en 5 axes positionné. Nous proposons d'ajouter une étape essentielle pour la préparation de l'usinage en 5 axes positionné : le découpage technologique et topologique du nuage de points (figure 1.14).

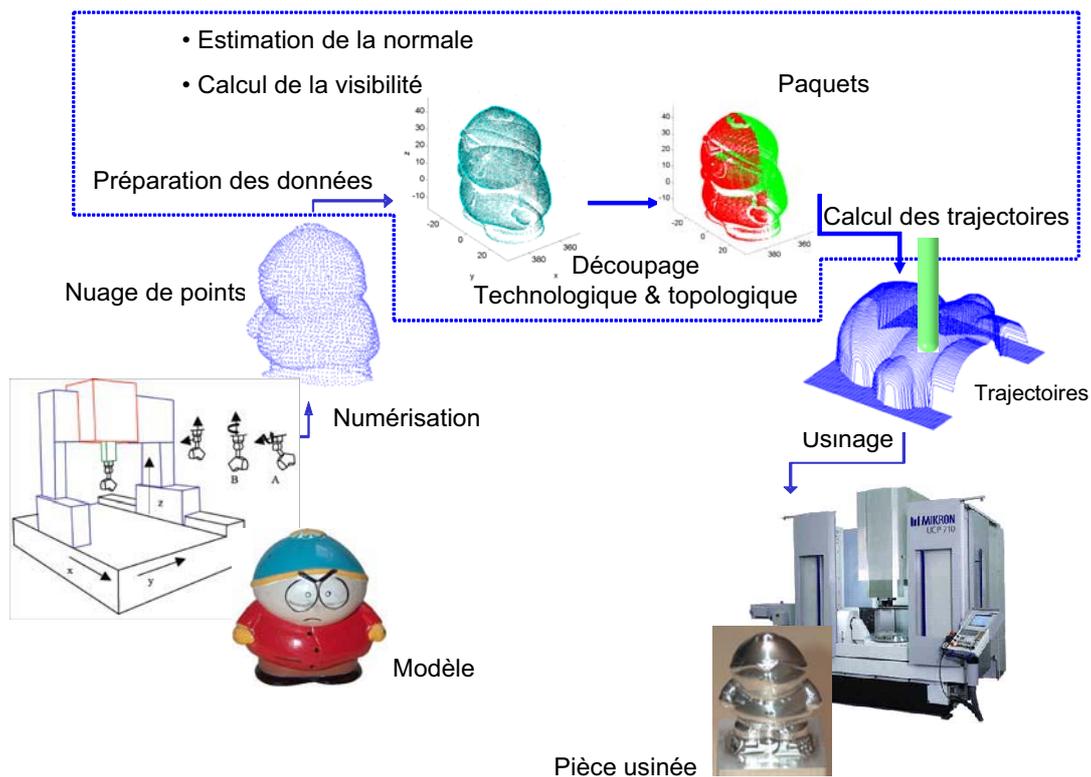


Figure 1.14 : Chaîne de copiage par usinage proposée

Cette étape de découpage (ou partitionnement) est basée sur le calcul de visibilité selon des contraintes technologiques et topologiques comme la non collision entre l’outil et le nuage de points voisins lors du positionnement de l’outil sur le nuage. Concernant les contraintes technologiques, outre le champ de visibilité de l’outil, nous considérons de plus l’accessibilité machine, définissant ainsi la notion de visibilité réelle.

Le calcul des cônes de visibilité en chaque point s’appuyant sur le calcul de la normale, il est nécessaire de mettre en place une méthode d’estimation de la normale sur données discrètes efficace, rapide et robuste. C’est pourquoi après l’analyse des limites des différentes méthodes proposées dans la littérature, nous proposons en première partie du chapitre 3 une nouvelle méthode d’estimation de la normale basée sur le lancer de sphères de rayon donné sur le nuage de points.

Nous présentons ensuite la méthode automatique de découpage topologique et technologique du nuage de points que nous avons développée. Cette méthode, basée sur le calcul de visibilité réelle d’un point permet de plus d’optimiser le découpage du nuage de points en paquets de façon à minimiser la longueur de recouvrements tout en respectant les contraintes technologiques de la machine et topologiques de l’outil et de la pièce. A l’issue de cette étape,

l'ensemble des orientations outil nécessaires à l'usinage complet de la pièce, ainsi que les paquets de points à usiner par orientation sont déterminés.

Enfin, nous validons la chaîne de copiage direct en 5 axes positionné au travers d'un exemple en montrant les différentes étapes du copiage dans le chapitre 4.

Chapitre 2 Génération de trajectoires d'usinage en fraisage sur données discrètes

1. Introduction

Nous nous intéressons ainsi dans ce chapitre à démontrer la faisabilité d'une démarche de copiage direct de forme en trois axes vis-à-vis d'une approche classique de reproduction de forme s'appuyant sur une démarche de Reverse Engineering. Comme nous l'avons évoqué en introduction, nous appuyons nos travaux sur ceux précédemment menés au LURPA pour l'usinage de données discrètes.

Ainsi, dans une première partie nous présentons les méthodes adoptées pour la génération des trajectoires d'usinage 3 axes en ébauche, demi finition, et en finition. La génération des trajectoires d'usinage se fait directement à partir du nuage de points numérisé par un capteur laser type plan, sans reconstruction de surfaces. Une des difficultés est d'obtenir à partir des données discrètes un trajet continu et ce malgré les trous de numérisation. De plus le trajet doit être sans collision avec l'environnement (outil, porte-outil, moyens de fixation) et exempt d'interférence avec la pièce.

Dans une seconde partie nous nous intéressons à l'évaluation de la méthode de copiage directe vis-à-vis d'une méthode classique. Pour cela nous utilisons les outils de certification de trajectoires développés au LURPA et en particulier la simulation d'usinage par N-BUFFER. La simulation complétée par une analyse des formes réalisées montre que le copiage direct, dans le cadre de l'usinage à 3 axes, est plus performant en terme de fidélité à la forme. De plus, le copiage direct de forme étant rapide et simple à mettre en œuvre, cela en fait un outil intéressant de prototypage rapide.

2. Génération des trajectoires sur données discrètes

2.1. Rappel sur la génération des trajectoires

Le processus de génération des trajectoires sur un modèle CAO doit assurer la réalisation d'un produit fidèle au modèle CAO. Des écarts supplémentaires sont introduits d'abord en FAO lors du calcul de la trajectoire de l'outil, puis lors de l'usinage à cause des performances de la commande numérique, du comportement dynamique de la machine outil et des déformations de l'outil [TOURNIER 2001].

La fabrication d'une pièce nécessite la construction de passes d'usinage et leurs juxtapositions en fonction d'une stratégie d'usinage. Celle-ci regroupe les choix d'un mode de guidage (Zigzag, aller simple, spirale), d'un pas de discrétisation longitudinal (tolérance d'usinage) et d'un pas de discrétisation transversal (hauteur de crête) (figure 2.1). Le choix de ces deux paramètres doit assurer la réalisation d'une surface réelle respectant des spécifications géométriques de défaut de forme et d'état de surface [LARTIGUE et al. 1999].

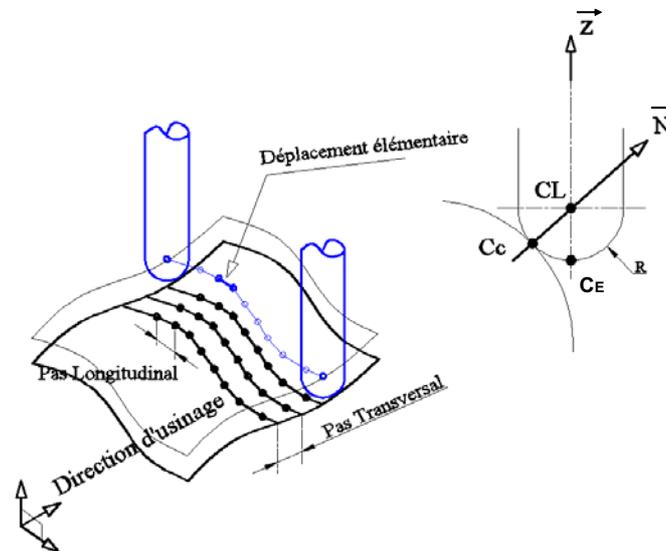


Figure 2.1 : Les paramètres de fraisage par balayage

Dans nos travaux de génération des trajectoires sur données discrètes, les trajectoires sont générées avec la même approche mais directement sur le nuage de points sans avoir reconstruit le modèle CAO. Les méthodes de génération des trajectoires proposées pour l'ébauche et la finition sont basées sur la méthode du Z-BUFFER inverse [SUZUKI et al 1991]. Considérant l'axe outil selon la direction z, cette méthode consiste à créer une grille dans le plan (x, y) dont

les paramètres de discrétisation correspondent aux pas longitudinal et au pas transversal d'usinage.

2.2. Stratégie et génération de trajectoire en ébauche

2.2.1. Objectif

Pour générer les trajectoires d'ébauche, la stratégie d'usinage adoptée est celle du z-level, c'est-à-dire que la pièce est ébauchée par couches parallèles orthogonales à l'axe d'outil z (figure 2.2).

Plusieurs problèmes sont à résoudre pour réaliser cette opération d'ébauche :

- Déterminer les points définissant la trajectoire T_i usinant la couche Z_i , tout en assurant la gestion des collisions entre l'outil et le nuage de points.
- Définir les paramètres d'ébauche comme le pas longitudinal, le pas transversal, et la profondeur de passe.
- Définir les mouvements d'approche et de retrait de l'outil.

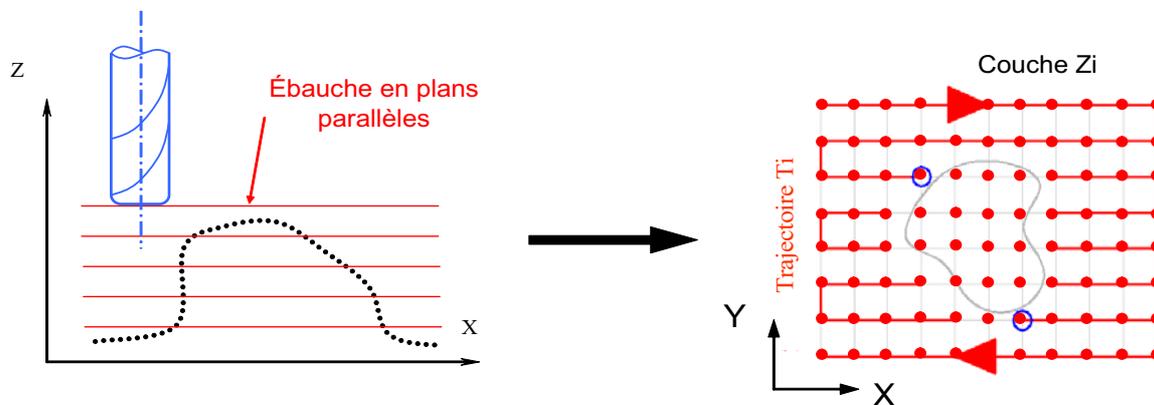


Figure 2.2 : Stratégie d'ébauche et mode de balayage

2.2.2. Calcul des trajectoires

Le mode de balayage adopté dans chaque couche Z_i est le mode zigzag, ce mode permet de gagner du temps d'usinage par rapport à un mode de balayage simple.

Afin de diminuer la quantité de données à traiter lors la génération des trajectoires et accélérer le calcul des trajectoires, il a été décidé de placer une étape dite de voxelisation du nuage de points conduisant à une représentation du nuage de points sous forme d'une voxel-map [OSTY et al. 1999]. Le nuage de points est ainsi découpé en cubes élémentaires de dimension

donnée et constante, appelés voxels. Chaque voxel est considéré non vide ou vide selon qu'il contient ou non des points. La représentation par voxel-map que nous adoptons permet de plus de définir des attributs au voxel en fonction des points contenus dans chaque voxel non vide. Ainsi, on associe à chaque voxel non vide un barycentre et une normale. Le barycentre est le barycentre des points contenus dans le voxel ; la normale est définie comme la normale du plan des moindres carrés associé au sous-ensemble de points contenus dans le voxel (figure 2.3) [SOUZANI et al. 2006]. La voxélisation permet de diminuer le nombre des données à traiter lors du calcul de la collision entre l'outil et le nuage, la vérification de collision se faisant entre l'outil et les barycentres des voxels.

De plus la voxélisation donne une pseudo continuité aux données discrètes introduisant la notion de voisinage par connaissance des voxels voisins. Les traitements s'en trouvent facilités et accélérés par allègement des données. A titre d'exemple, il est possible de passer de 248148 points numérisés à 2317 voxels. Le choix de la dimension du voxel est en général motivé par la donnée des paramètres d'usinage et le nombre de points minimal requis par voxel (20 points) afin d'estimer au mieux le plan des moindres carrés et la normale associée.

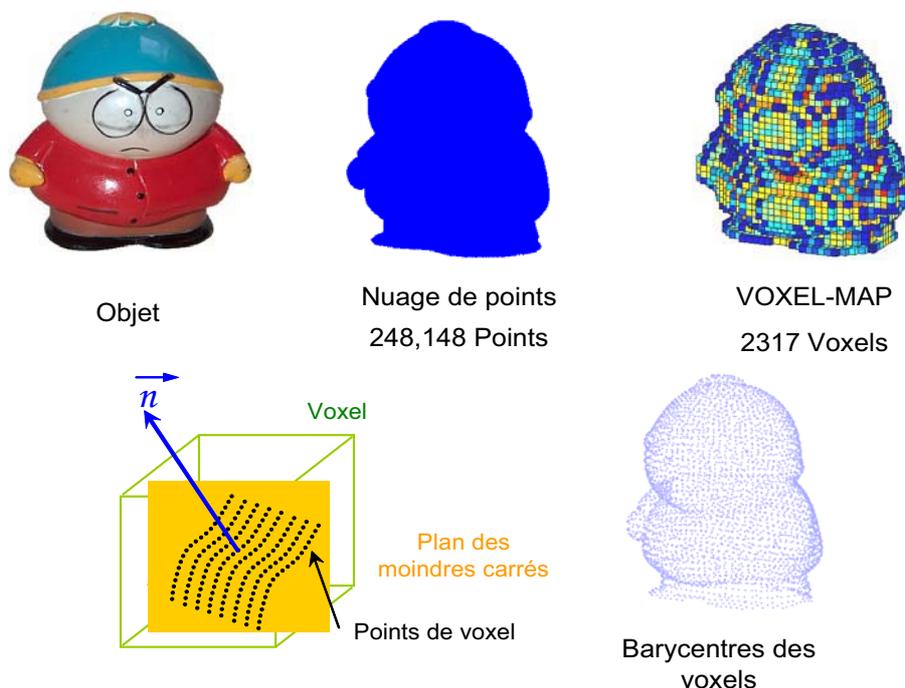


Figure 2.3 : Principe de voxélisation d'un nuage de points

La définition des paramètres d'ébauche est liée à la voxélisation du nuage de points et à la construction d'une grille dans le plan (x, y). La définition de la taille des voxels est réalisée en fonction des trois paramètres, que sont le pas longitudinal, le pas transversal et la profondeur

de passe. Une grille de points est construite dans le plan (x, y) , pour chaque couche perpendiculaire à l'axe z , notée Z_i . Le pas longitudinal est défini dans la direction de déplacement de l'outil et le pas transversal correspond à l'engagement radial de l'outil. La hauteur du voxel est définie par la profondeur de passe. Ces paramètres déterminent la qualité de la surface ébauchée vis-à-vis du temps d'usinage en ébauche. Chaque point de la grille définit un nœud et l'organisation de ces nœuds est effectuée selon le mode de balayage adopté.

Dans chaque couche Z_i , les points définissant la trajectoire sont déterminés selon la direction de déplacement de l'outil. Pour chaque nœud considéré, un point appartient à la trajectoire si l'outil usinant ce point n'est pas en collision avec les barycentres des voxels environnant (figure 2.4).

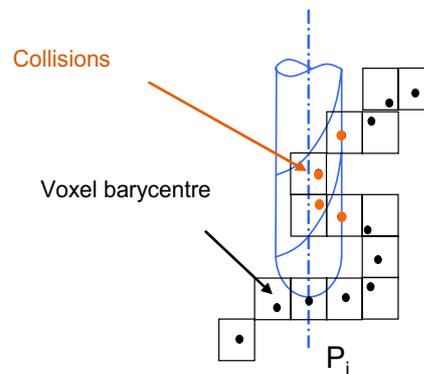


Figure 2.4 : Détection des collisions

Ainsi, les nœuds pour lesquels l'outil n'est pas en contact avec les barycentres des voxels voisins définissent les points de passage de la couche Z_i . Pour les points de la grille en collision, il faut définir un trajet à une altitude de dégagement telle qu'il n'y ait pas de collision avec la pièce (figure 2.5).

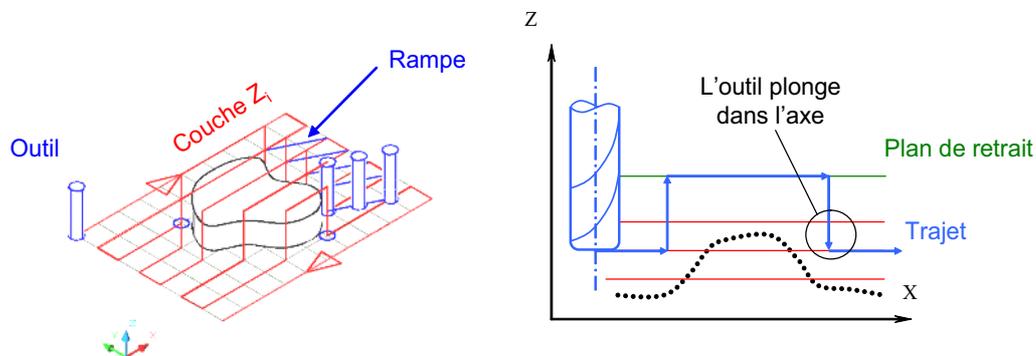


Figure 2.5 : Trajectoires d'ébauche

La figure 2.6 présente le déroulement de l'opération d'ébauche :

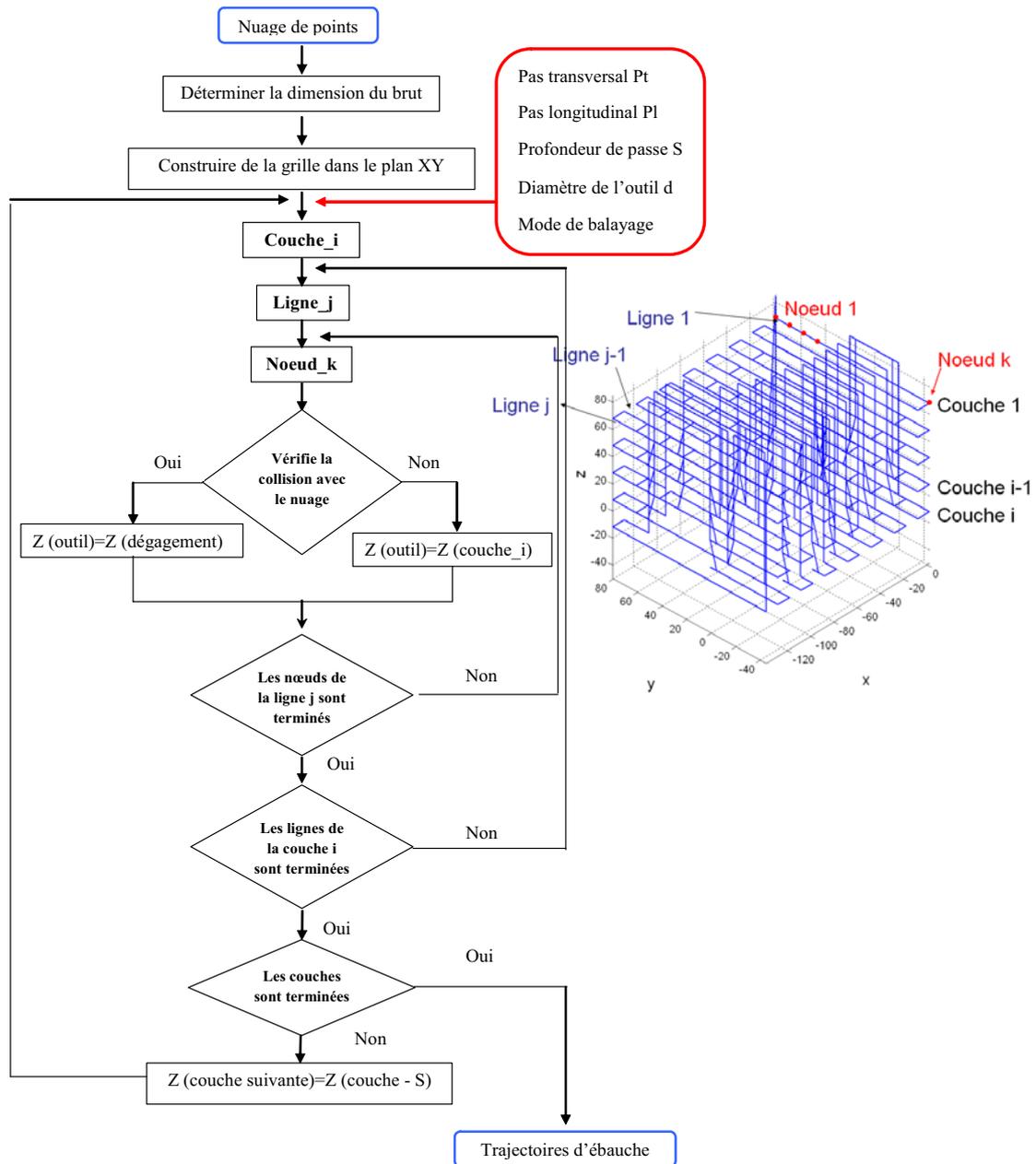


Figure 2.6 : Les différentes étapes de l'usinage en ébauche

2.2.3. Trajectoires d'entrée et de sortie matière

On s'intéresse ici au calcul des trajectoires d'entrée et de sortie de l'outil dans la matière lors de l'usinage du nuage de points. Concernant les trajectoires d'approche, les plongées axiales de l'outil sont interdites car elles exposent l'outil à un risque de casse important. C'est pourquoi, il est nécessaire d'utiliser des plongées de l'outil en rampe afin de faire varier de manière continue la section de copeau. Ainsi l'outil descend jusqu'à l'altitude de la couche précédemment usinée, puis il plonge en rampe selon un angle qui permet d'éviter le talonnage jusqu'à l'altitude de la couche qu'il est en train d'usiner (figure 2.7)

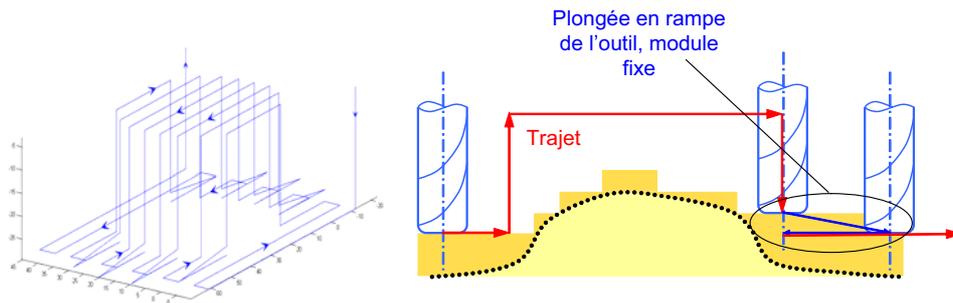


Figure 2.7 : Trajet d'ébauche avec plongée en rampe

Pour le moment, la gestion des collisions entre l'outil et le nuage n'est pas assurée durant les approches en rampe (figure 2.8). La plongée en rampe est placée au bon endroit sur la trajectoire lorsque l'outil doit plonger. Cela implique que lorsque l'outil parcourt cette trajectoire, les collisions possibles avec le nuage ne sont pas gérées car l'angle de rampe est un angle fixe déterminé par l'utilisateur. Cette solution permet donc uniquement l'usinage de pièces dépourvues de poche. Enfin, lorsque l'outil est parvenu à la bonne altitude d'usinage, il revient en arrière pour usiner la partie non ébauchée par la descente en rampe. Cependant, il est possible d'adapter la descente de l'outil en utilisant la grille pour traiter les collisions avec le nuage, ou effectuer une plongée axiale de l'outil.

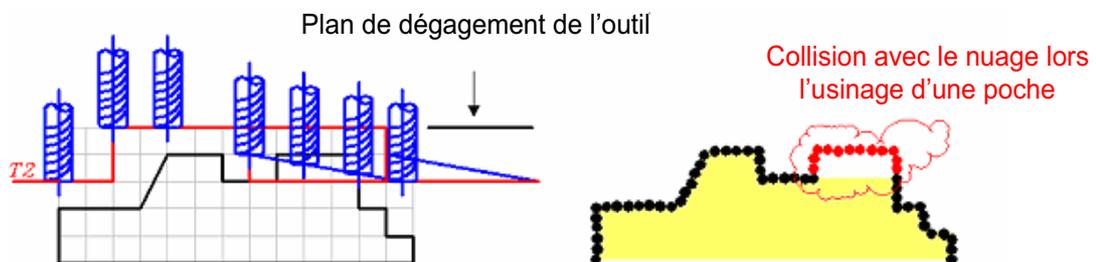


Figure 2.8 : Collision dans les zones de rampe

2.2.4. Choix des paramètres

Comme nous avons vu, les paramètres d'usinage sont le pas longitudinal, le pas transversal, et la profondeur de passe. Un des problèmes importants qui se pose est celui de la distance entre les couches d'ébauche. Cette distance est limitée par l'engagement axial maximum que peut tolérer l'outil, par la précision de l'ébauche souhaitée et par le temps d'ébauche. En effet, si on veut minimiser le temps d'ébauche, l'engagement axial doit être le plus grand possible. Selon les préconisations des constructeurs d'outil, en UGV et en rainurage, l'engagement axial de la fraise doit être inférieur ou égal au rayon de l'outil. Dans ce cas on risque d'avoir des surépaisseurs d'usinage importantes lors de l'usinage en finition et donc de s'exposer à un

risque de casse de l'outil de finition. Par contre, si on impose une bonne précision de l'ébauche, on obtient rapidement un temps d'usinage conséquent. Il y a donc un compromis à trouver.

Dans la méthode développée pour la génération des trajectoires en ébauche, nous n'évaluons pas le volume de copeaux enlevé lors de l'usinage, ce qui ne nous permet pas d'optimiser le choix des paramètres d'ébauche. De plus la stratégie d'ébauche en couches parallèles conduit à une surface festonnée (figure 2.9), ce qui, lors de l'usinage sur une machine UGV peut provoquer des vibrations de l'outil et des mouvements de flexion lors des variations brusques de la section de copeau, risquant de dégrader l'état de la surface de la pièce usinée.



Figure 2.9 : Surface usinée en ébauche

Nous proposons comme solution à cet inconvénient d'ajouter une phase intermédiaire d'usinage, la demi finition, pour laquelle la stratégie adoptée est une stratégie par plans parallèles. Cette phase permet ainsi, d'une part d'alléger la quantité de copeaux à enlever lors de l'usinage en finition, et d'autre part d'améliorer l'état de surface.

2.3. Stratégie de finition

2.3.1. Objectif

Quelle que soit la méthode, la génération de trajectoires s'appuie sur une structuration des données. Dans l'objectif d'usiner en finition un nuage de points dense, bruité, hétérogène et incomplet, nous avons proposé une méthode basée sur le principe du Z-BUFFER inverse, [SUZUKI et al 1991], qui s'appuie également sur une grille dont les pas longitudinaux et transversaux sont directement liés aux paramètres d'usinage, la tolérance d'usinage et la hauteur de crête.

2.3.2. Les paramètres d'usinage

Comme en usinage classique de surfaces continues, l'usinage du nuage de points en finition est réalisé par une succession de passes adjacentes. La stratégie retenue est un usinage par plans parallèles. Entre deux passes successives apparaît une crête dont la hauteur dépend des pas transversaux et longitudinaux, choisis de façon à respecter les spécifications géométriques portées sur les dessins de définition des pièces. Dans le cas de l'usinage de pièces prototypes, ces paramètres sont à mettre en relation avec la qualité géométrique attendue. Le pas longitudinal est calculé en fonction d'une tolérance d'usinage admissible (T_u); le pas transversal est lié à une hauteur de crête à ne pas dépasser (h_c). La figure 2.10 présente le profil transversal de l'usinage d'une surface convexe mettant en avant l'influence des paramètres sur la topographie de surface obtenue [LARTIGUE et al. 1999].

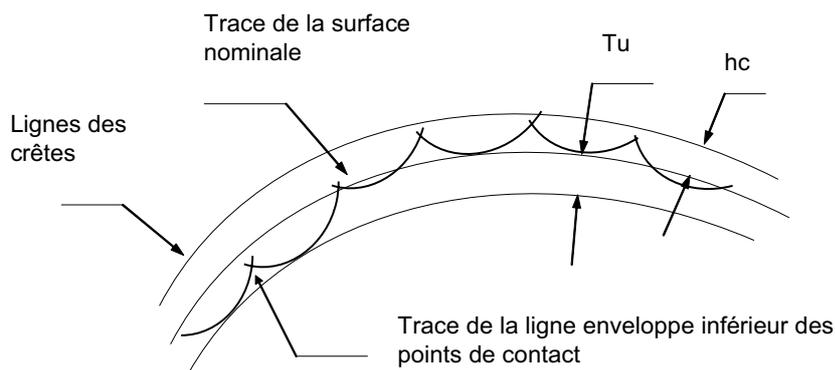


Figure 2.10 : Profil transversal de l'usinage d'une surface convexe

Afin d'augmenter la qualité de l'usinage, il est préférable d'utiliser un petit pas transversal, mais dans ce cas là le temps de l'usinage augmente ainsi que le temps de calcul des trajectoires. L'influence du pas longitudinal se manifeste lors du déplacement de l'outil entre deux nœuds consécutifs en interpolation linéaire. En fonction de la géométrie locale, l'outil plonge dans le

nuage (over-cut) en cas de géométrie locale convexe, ou passe au dessus (under-cut) en cas de géométrie locale concave (figure 2.11).

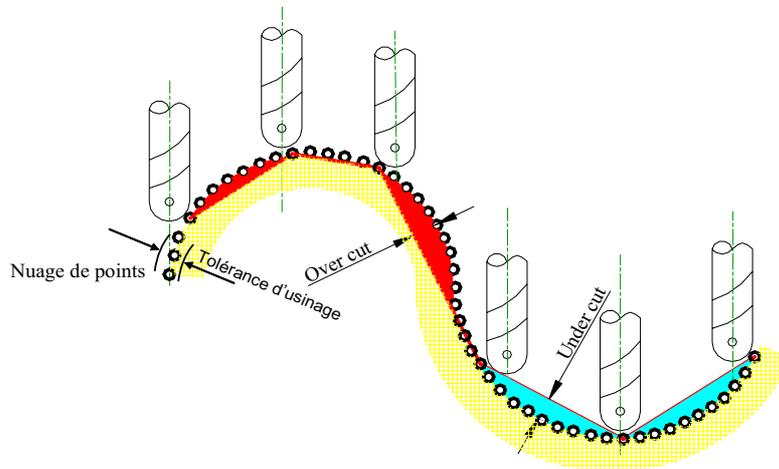


Figure 2.11 : Tolérance d'usinage

2.3.3. Calcul des trajectoires

La méthode déjà développée au LURPA consiste à créer une grille dans le plan (x, y) dont les paramètres (pas longitudinal et pas transversal) sont fixés par l'opérateur. Les nœuds de cette grille sont ensuite organisés de façon à obtenir le type de trajet souhaité (trajectoire en zigzag, en spirale...). A ce stade il ne reste plus qu'à déterminer l'altitude z des positions de l'outil.

Pour chaque point de la grille, il est nécessaire de déterminer l'altitude z_{max} du point de contact C_C entre l'outil et le nuage de points. Dans un premier temps, pour limiter le nombre de calculs à faire, on ne considère que les points qui participent au posage de l'outil pour cette position sur la grille. Ces points sont les points contenus dans un cylindre d'axe z de section circulaire dont le rayon est égal au rayon de l'outil (R) et dont l'axe passe par le nœud considéré de la grille. Parmi les points contenus dans le cylindre seuls les points dont l'altitude est comprise entre Z_{max} et $Z_{min}-R$ sont conservés afin de minimiser le temps de calcul. En effet, il est inutile de conserver les autres points car ils ne seront jamais atteints par l'outil pour cette position sur la grille.

Dans une seconde étape, nous construisons pour chaque point une sphère de rayon R centrée sur le point et nous calculons l'intersection entre ces sphères et l'axe de l'outil au nœud concerné. L'intersection qui a l'altitude maximale donne la position de l'outil hors collision avec le nuage de points (figure 2.12).

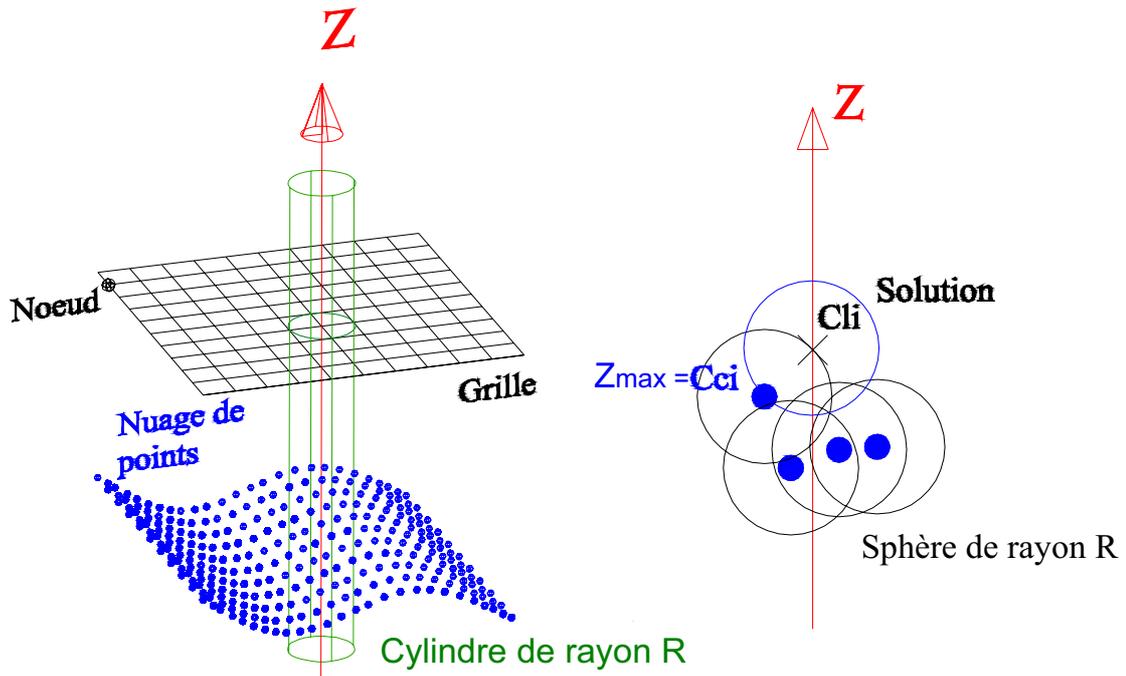


Figure 2.12 : Calcul de la position en z pour l'outil

2.3.4. Prise en compte de la tolérance d'usinage

Comme nous l'avons présenté dans l'introduction, le pas longitudinal doit être choisi de façon à respecter la tolérance d'usinage. Pour respecter la tolérance d'usinage, il est parfois nécessaire de diminuer le pas longitudinal de la grille afin de limiter la distance entre deux points successifs de la trajectoire. Cependant, en procédant ainsi, on augmente la taille du programme et le temps de calcul. Une des solutions est la définition d'un pas longitudinal adaptatif (figure 2.13).

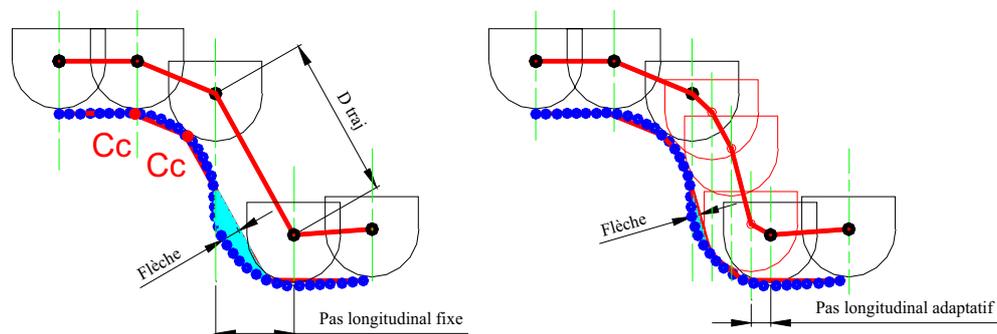


Figure 2.13 : Intérêt du pas longitudinal adaptatif

La solution consiste à calculer pour chaque déplacement de l'outil (D_{traj}) la distance maximale entre la droite qui connecte les deux points de contact C_C de deux positions consécutives

et l'ensemble du sous nuage contenu dans une zone restreinte. Si la distance maximale (ou flèche) est plus grande que la tolérance d'usinage, on crée alors un nœud intermédiaire sur la grille. L'opération est répétée jusqu'à ce que la flèche soit inférieure à la tolérance d'usinage.

2.3.5. Prise en compte de la hauteur de crête

L'usinage du nuage de points en finition est réalisé par une succession de passes adjacentes qui génèrent une crête dont la hauteur dépend du pas transversal effectif sur la pièce (figure 2.14). Actuellement, le logiciel développé pour la finition utilise un pas transversal fixe calculé pour respecter une hauteur de crête donnée sur une surface plane inclinée à 45° par rapport au plan de guidage de l'outil (figure 2.14). Ainsi on évite de se retrouver dans le pire des cas, à savoir, calculer un pas transversal pour une zone horizontale et usiner une zone plutôt verticale.

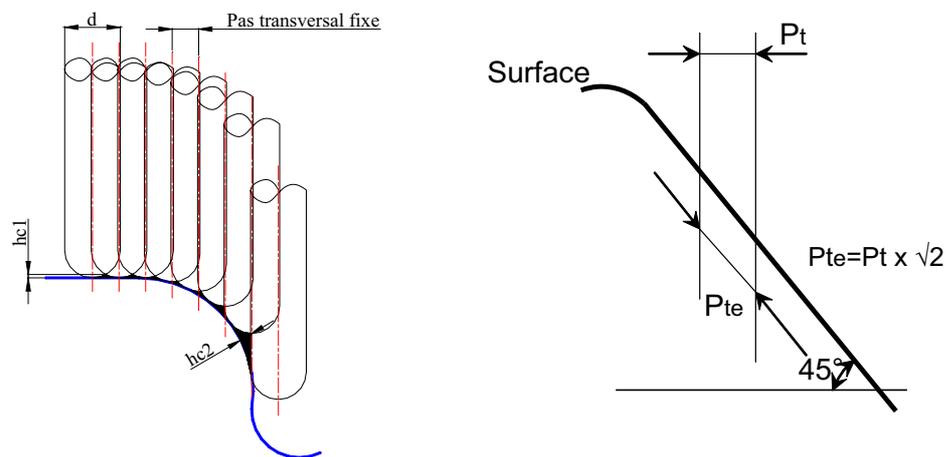


Figure 2.14 : Evolution de la hauteur de crête en fonction de la géométrie de la surface

2.3.6. Prise en compte des trous de numérisation

Un autre problème à gérer lors de l'usinage en finition d'un nuage de points est le traitement des trous de numérisation dans le nuage. En effet, l'outil plonge dans ces trous jusqu'au plan Z_{mini} autorisé quand le diamètre de l'outil le permet. Dans la mesure où ce cas n'est pas apparu dans nos expérimentations, nous n'avons pas pour le moment développé de solutions à ce problème.

2.3.7. Gestion des collisions au bord du nuage usiné

Lors de l'usinage d'une portion (ou d'un paquet) d'un nuage de points, un risque de collision existe avec les paquets voisins lorsque l'outil arrive sur le bord du sous nuage (figure

2.15). Pour pallier ce problème, on propose de générer les trajectoires pour le sous nuage en prenant en compte l'ensemble du nuage de points lors des tests de collisions (figure 2.15).

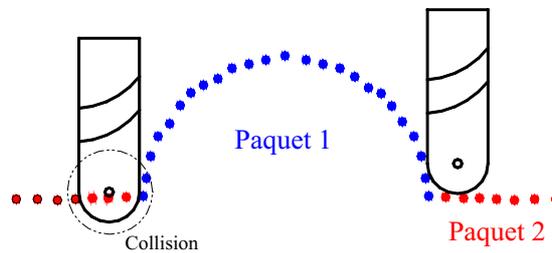


Figure 2.15 : Gestion des collisions sur les bords de sous paquet de points

2.4. Synthèse sur la génération des trajectoires

Le travail effectué permet d'usiner un nuage de points en ébauche et en finition directement sans avoir recours à la reconstruction de la surface. Nous avons abordé les différents points faibles de la méthode et des solutions adoptées pour pallier certains problèmes identifiés. L'ensemble des logiciels de génération des trajectoires en ébauche et en finition ont été développés dans Matlab.

Dans les travaux suivants, nous allons valider cette méthode par l'usinage d'un masque. La méthode de génération des trajectoires directement sur le nuage de points en finition sera évaluée vis-à-vis d'une méthode classique de génération des trajectoires sur une surface reconstruite à partir du nuage de points sur CATIA.

3. Evaluation de la méthode de copiage direct en 3 axes

Dans cette partie nous nous intéressons à comparer l'intérêt d'une démarche de copiage rapide de forme vis-à-vis d'une approche classique de duplication de forme s'appuyant sur une démarche de Reverse Engineering (RE) [MAKKI et al. 2007]. Nous montrons au travers d'une analyse des formes usinées sur une MOCN en 3 axes et par simulation que le copiage direct est plus performant en terme de fidélité à la forme. De même, le copiage direct de forme permettant de s'affranchir de l'étape de reconstruction de la surface est également beaucoup plus rapide et simple à mettre en œuvre.

3.1. Comparaison entre les deux approches du copiage

La comparaison de l'approche basée sur le reverse engineering (RE) et le copiage direct de points s'effectue sur un masque dont le modèle CAO est inconnu. Pour cela nous mettrons en œuvre les différentes étapes pour chacune des démarches depuis la numérisation jusqu'à l'usinage à 3 axes sur MOCN (figure 2.16). Ces étapes sont détaillées dans la suite.

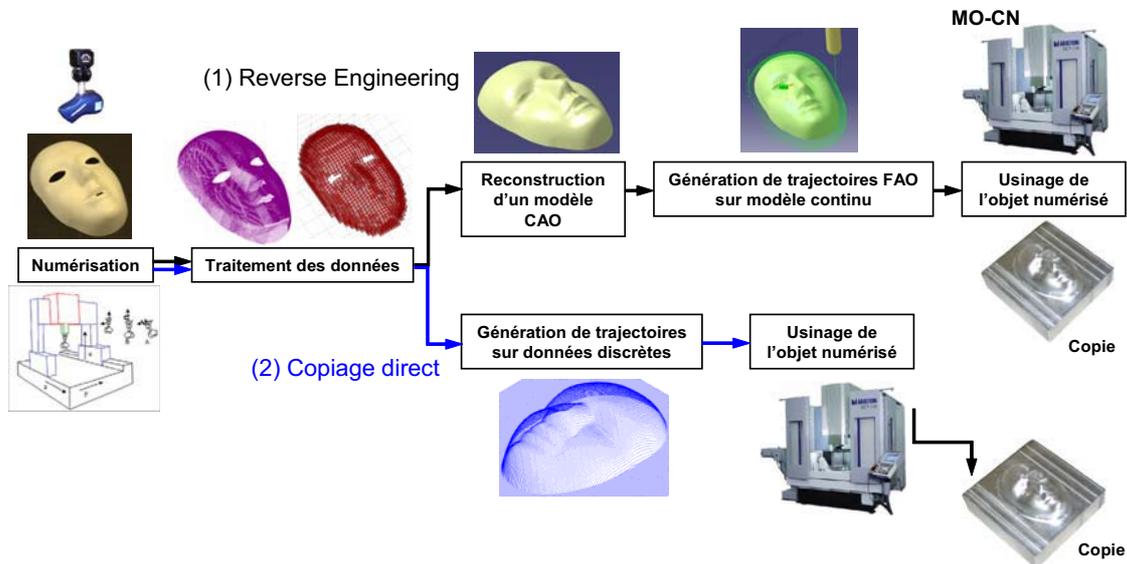


Figure 2.16 : Comparaison entre les deux approches

Après avoir présenté l'étape de numérisation, nous détaillons les étapes de l'approche Reverse Engineering (RE), puis celles de l'approche de copiage direct avant de comparer ces deux approches.

3.1.1. Numérisation et traitement du nuage de points

Le système de numérisation utilisé est une Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT), DEA Brown&Sharpe, équipée d'une tête orientable selon deux angles A et B, Renishaw PH10, supportant un capteur de type laser-plan (figure 2.17). Le capteur utilisé pour effectuer les expérimentations est un capteur Zephyr de type laser plan de la société Kréon technologie, ([KREON 2008]).

Nous avons testé l'approche du copiage direct sur un masque (figure 2.18). Cet objet présente l'intérêt d'être usinable en fraisage 3 axes tout en présentant des formes complexes avec des courbures variables. Il est de plus blanc mat ce qui évite de le poudrer avant numérisation, limitant de ce fait le bruit de numérisation.

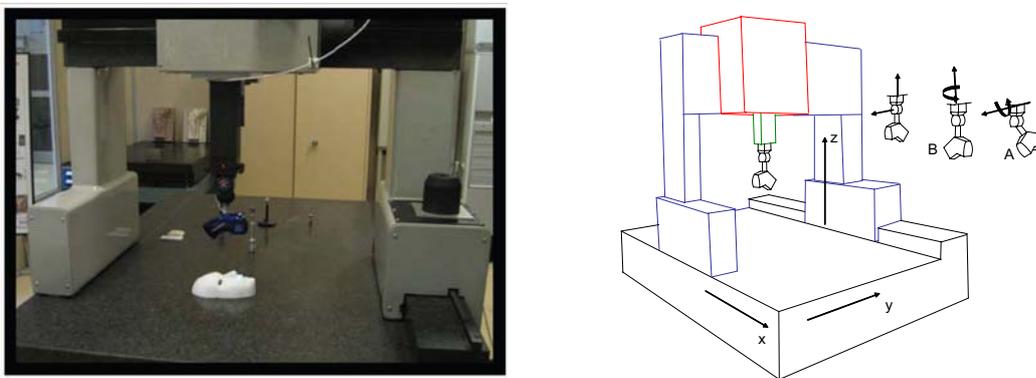


Figure 2.17 : Système de numérisation par capteur plan laser



Figure 2.18 : Le Masque

La numérisation a été réalisée selon trois orientations du capteur de manière à assurer la numérisation complète du masque. L'orientation retenue pour la première numérisation est celle définie par : $A = 0^\circ$, $B = 0^\circ$, soit une direction de balayage selon la direction Y (figure 2.19). Compte tenu des dimensions de l'objet (volume englobant $l \times xp$: 230x130x80 mm), et

de la largeur de la fenêtre de mesure du capteur, nous avons effectué huit passes pour balayer toute la surface. Le pas de numérisation est de 0.1 mm et la fréquence d'émission est de 35 Hz.

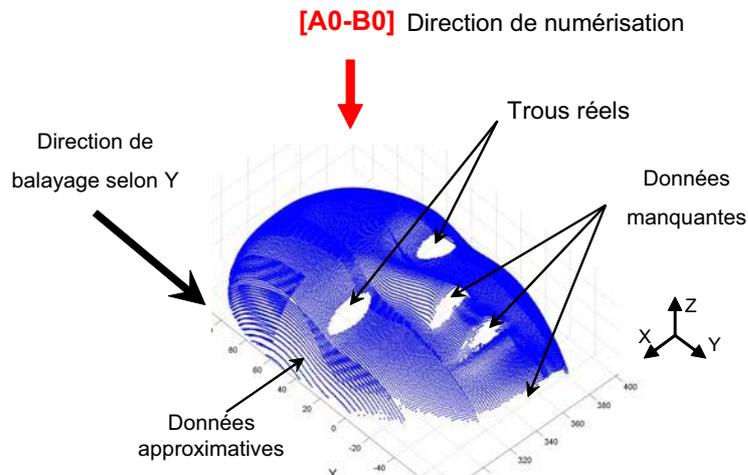


Figure 2.19 : Résultat de la première numérisation du masque [A0-B0]

Pour assurer la complétude de la numérisation vis à vis de l'objet, nous déterminons deux orientations supplémentaires, ce qui conduit au nuage présenté sur la figure 2.20 [SOUZANI et al. 2006].

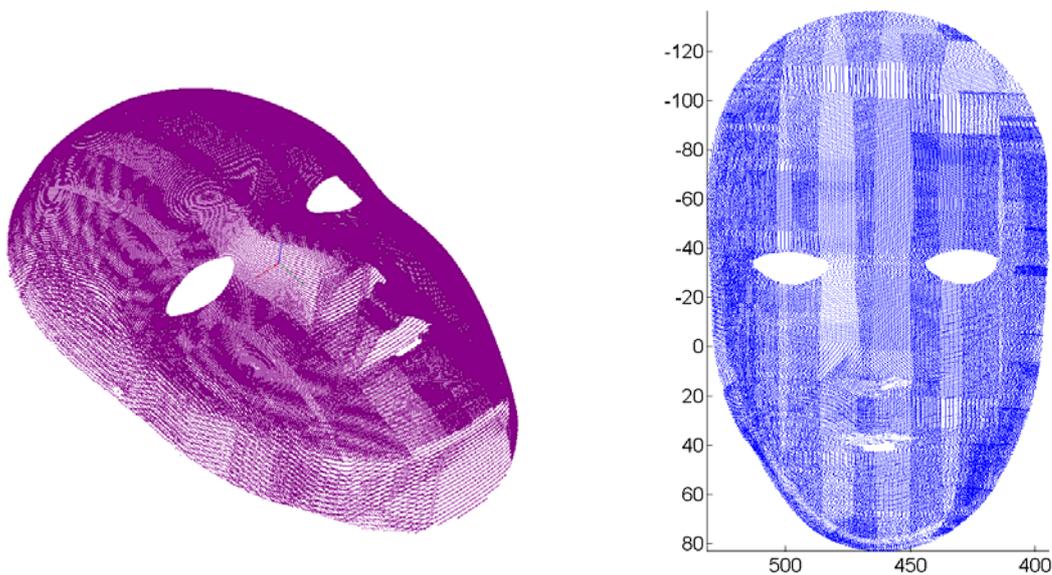


Figure 2.20 : Numérisation complète du masque

Le nuage de points initial obtenu est constitué de 470 000 points. Afin d'accélérer les calculs le nuage de points est allégé à l'aide du logiciel Polygonia fourni avec le capteur. Le nuage, allégé à 170 000 points, reste cependant bruité de +/- 0.05 mm et inhomogène.

3.1.2. Méthode de copiage basée sur le reverse engineering

Dans la démarche classique, basée sur le RE, une surface est associée au nuage de points. La reconstruction est réalisée à l'aide des outils de l'atelier Quick Surface Reconstruction du logiciel CATIA V5®. Elle est basée sur le découpage du nuage de points en sous-ensembles auxquels une surface est associée. En particulier, nous avons effectué la construction d'un réseau de courbes qui sert de support à la conception de surfaces multi-sections. Les surfaces ainsi associées sont ensuite assemblées et les trous sont comblés de façon à obtenir une surface au minimum continue C0. Le résultat obtenu, peu satisfaisant (présence de coutures, lissage non optimal dans certaines zones, etc.), est cependant obtenu après plusieurs heures de travail (figure 2.21) pour un utilisateur qui maîtrise bien CATIA, mais n'utilise pas souvent l'atelier de Quick Surface Reconstruction [DEWAILLY 2006]. Afin de tester nos algorithmes dans le cadre d'un changement d'échelle, un facteur d'échelle de 7/20 est appliqué à la surface reconstruite.



Figure 2.21 : Surface reconstruite en CAO

Nous proposons maintenant d'évaluer les écarts produits lors la reconstruction de la surface entre le nuage de points et la surface reconstruite notamment dans la zone la plus complexe du visage, autour du nez et de la bouche. Pour cela, nous réalisons une cartographie d'écarts basée sur les fonctions d'analyse de distances de CATIA. Les écarts ainsi calculés varient entre -0,75 mm et +0,75 mm (figure 2.22). De plus la surface montre un aspect ondulatoire de +/- 0,1 mm visible grâce à l'alternance des couleurs (vert foncé, vert clair). La nature des écarts met en avant les problèmes de reconstruction de surfaces au niveau de la lèvre inférieure par exemple. Il apparait nettement que la courbure n'est pas respectée ; la lèvre est aplatie. De même la reconstruction lisse et comble l'espace entre les lèvres.

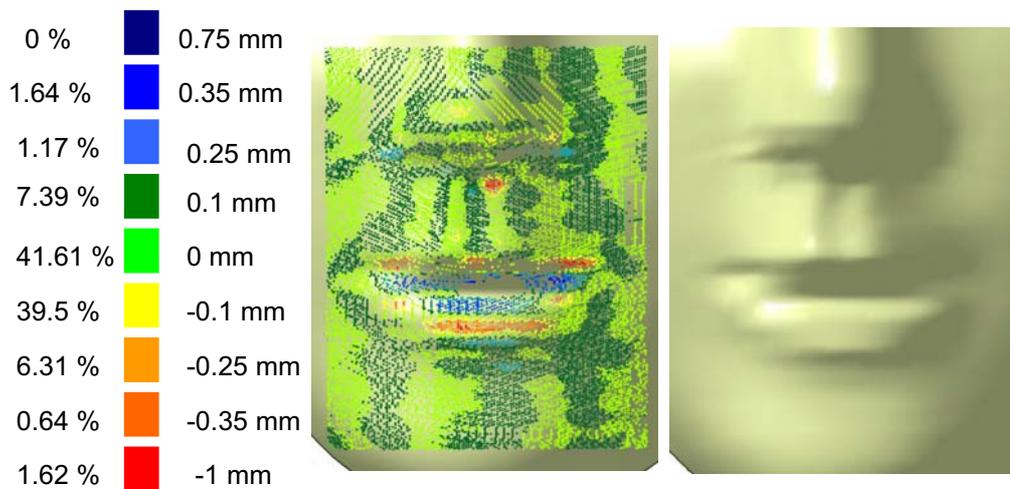


Figure 2.22 : Ecart entre le nuage de points et la surface reconstruite

La génération des trajectoires d'usinage en ébauche et en finition est faite sur CATIA. Le mode de balayage choisi est zigzag ; la stratégie d'usinage en finition est effectuée en plans parallèles. La tolérance d'usinage et la hauteur de crête sont fixées égales à 0,01 mm (figure 2.23). Les paramètres d'usinage utilisés sont donnés dans le tableau (tableau 1).

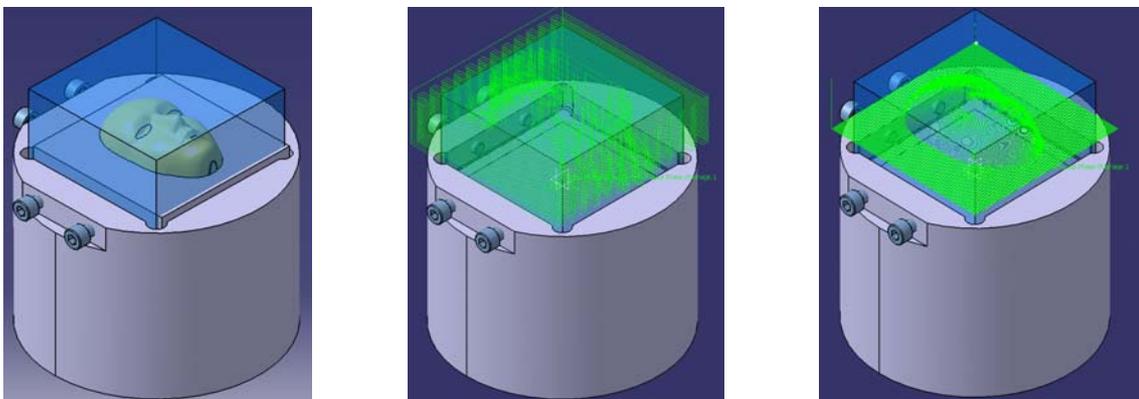


Figure 2.23 : Génération des trajectoires sur CATIA

3.1.3. Génération des trajectoires en copiage direct

Nous calculons les trajectoires d'usinage en ébauche à partir d'un nuage de points traité (allégé, filtré par la voxélisation). La génération des trajectoires en ébauche est effectuée pour un outil cylindrique de diamètre $D = 10$ mm, avec un pas longitudinal de 2 mm, un pas transversal de 5 mm et une profondeur de passe de 2 mm.

La génération des trajectoires en finition se fait directement à partir du nuage de points numérisés sans aucun traitement car nous cherchons ici à vérifier la fidélité de notre approche

à la forme. L'outil utilisé pour générer les trajectoires est un outil hémisphérique de diamètre $D = 8$ mm, avec un pas longitudinal de 0,1 mm et transversal de 0,1 mm également.

Enfin, nous usinons la pièce sur une fraiseuse MIKRON UCP710 en 3 axes. La figure 2.24 illustre le processus du copiage direct de forme.

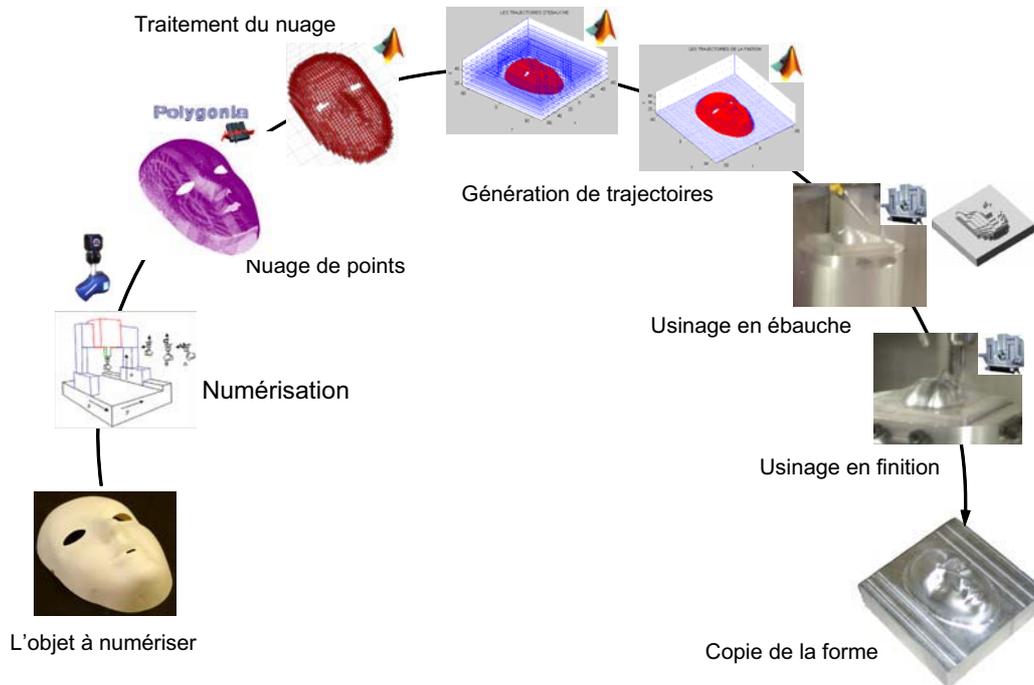


Figure 2.24 : Processus du copiage direct de forme

3.1.4. Usinage

L'usinage a été réalisé sur le centre d'usinage MIKRON UCP710 du laboratoire dans un bloc d'aluminium de $100 \times 100 \times 60$ mm³. La vitesse d'avance programmée est de 5 m/min. Lors de l'usinage du nuage de points en copiage direct, nous avons usiné la moitié droite du masque en interpolation linéaire ce qui nécessite beaucoup de temps (environ 1h30). La moitié gauche du masque a été usinée en appliquant une interpolation polynomiale en temps réel dans la commande numérique Siemens 840D (tolérance = 0,01 mm).

Le suivant tableau présente les différents paramètres associés au processus de reproduction de forme pour les deux approches.

Paramètre	Copiage direct	Copiage en RE
Taille du brut	100x100x60 mm	
Outil d'ébauche	Outil cylindrique D =10 mm	
Outil de finition	Outil hemispherique D =8 mm	
Tolérance d'usinage et hauteur de crête	liées à la taille de la grille : 0.1x0.1 mm	Tu= 0.01 mm hc=0.01 mm
Vitesse d'avance programmée	5 m/min	
Interpolation polynomiale	Temps reel dans la CN (tolerance = 0.01 mm)	
Temps du copiage	Temps total = 2h	Temps de reconstruction de surface = une journée Temps de calcul des trajectoires = 1h

Tableau 1: Comparaison entre les parametres de copiage



Figure 2.25 : Reverse Engineering (gauche), Copiage direct (droite)

La figure 2.25 présente les deux masques. La figure 2.26 présente les deux masques usinés en concentrant l'image sur les détails des zones les plus complexes du masque : la bouche et les lèvres, le nez, les yeux, et les contours qui les séparent.

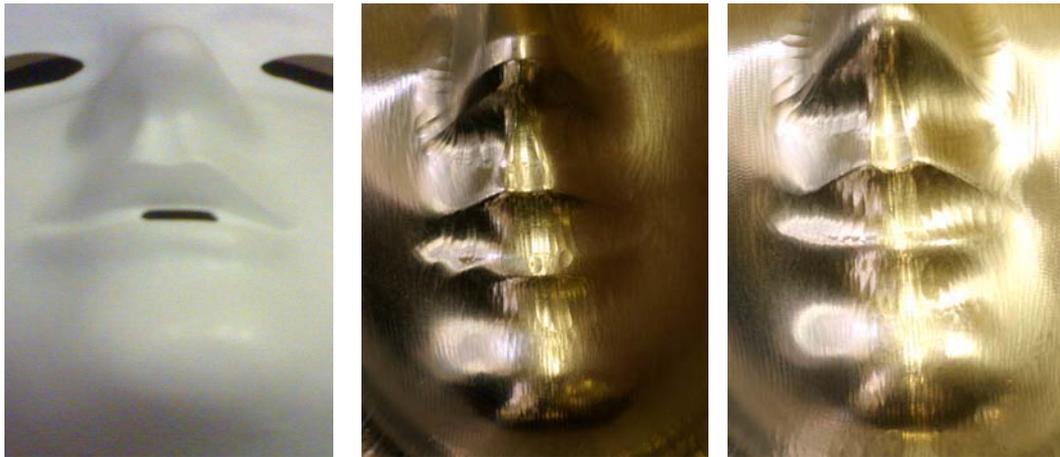


Figure 2.26 : Détails des pièces usinées (RE à gauche, Copiage à droite)

3.2. Comparaison des écarts dus à l'usinage

L'objectif est de valider la pertinence de l'approche de copiage direct vis-à-vis de l'approche classique de RE d'un point de vue de la fidélité géométrique de la copie. La base de la comparaison pour vérifier la fidélité à la forme est le nuage de points numérisé. L'évaluation des écarts géométriques est réalisée à partir de la simulation numérique de l'usinage par une méthode de type N-Buffer. Cette étape nécessite le calcul des normales à la surface reconstruite en chacun des points du nuage.

3.2.1. Simulation de l'enveloppe des trajectoires de finition

La méthode consiste à simuler l'enveloppe du trajet de l'outil pour les deux opérations de finitions et d'évaluer les écarts géométriques avec le nuage de points. Pour cela nous utilisons les outils de certification de trajectoires développés au LURPA et en particulier la simulation d'usinage par N-BUFFER, [JERARD et al. 1989] (figure 2.27).

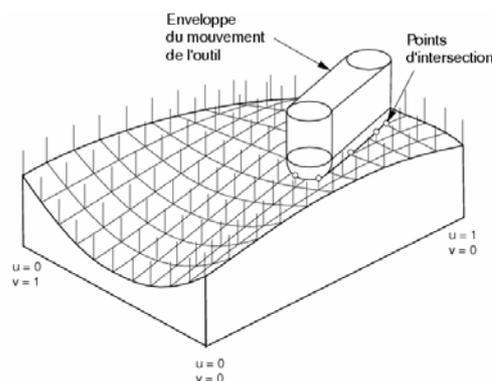


Figure 2.27 : Principe de simulation N-BUFFER

Ce type de simulation s'appuie sur une représentation point/normale de la surface à usiner. Dans notre cas, à chaque point du nuage il faut donc associer une normale. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser la représentation surfacique établie dans l'approche reverse engineering pour déterminer ces normales. Malgré les imperfections introduites lors la construction de la surface, nous supposons que le défaut d'orientation des normales n'a que peu d'influence sur le critère de fidélité à la forme recherché.

La simulation s'effectue en plusieurs étapes : extraction des normales du modèle surfacique dans logiciel CAO utilisé, construction du modèle point/normale de l'objet, simulation de l'usinage par intersection entre le modèle point/normale et les trajectoires d'usinage. Afin de minimiser les temps de calcul, nous avons appliqué cette simulation sur 20 000 des 170 000 points du nuage (figure 2.28).

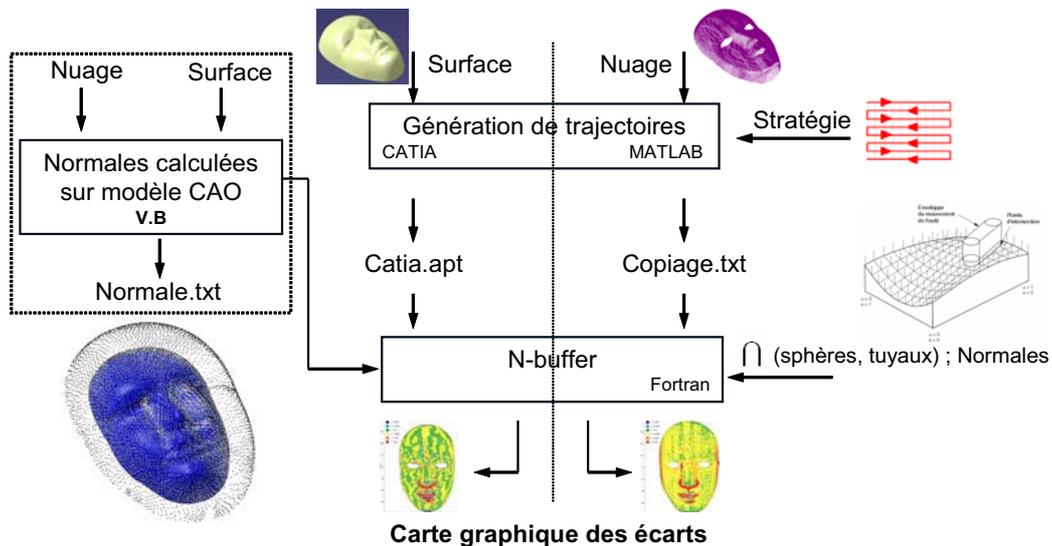


Figure 2.28 : Méthode de comparaison des deux approches

3.2.2. Evaluation des écarts entre l'enveloppe des trajectoires et le nuage de points

En appliquant la simulation N-BUFFER sur les deux approches nous pouvons représenter graphiquement les écarts entre le nuage de points, comme base de comparaison, et l'enveloppe des trajectoires d'usinage en finition (figure 2.29).

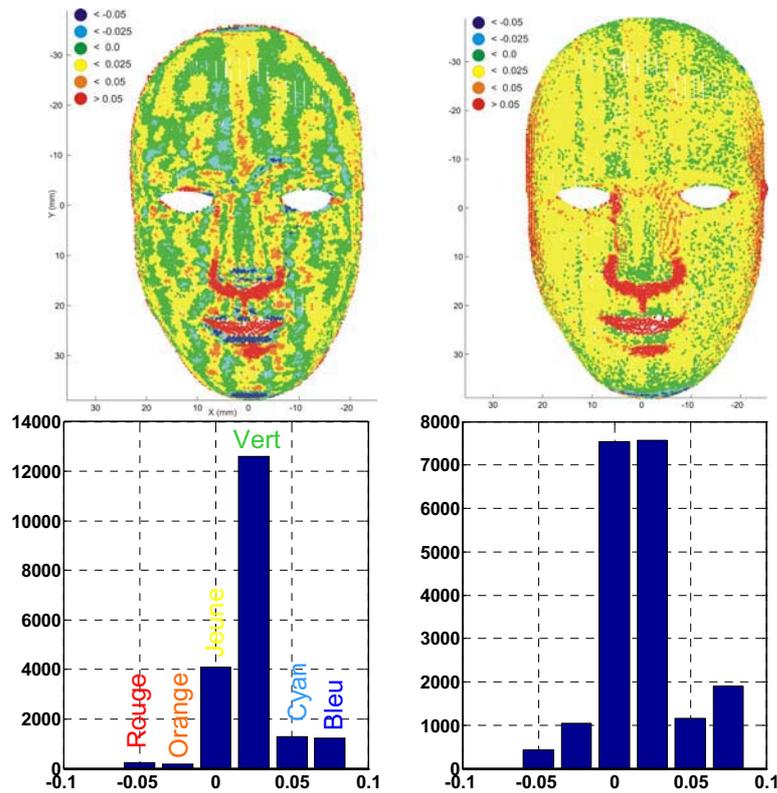


Figure 2.29 : Comparaison des simulations d'usinage (RE à gauche, Copiage à droite)

La comparaison des deux approches est faite d'un point de vue géométrique. Rappelons que l'objectif du copiage est de respecter la forme initiale, en minimisant les écarts géométriques et en respectant les concavités. Il est ainsi important de mettre en avant les zones non accessibles à l'outil qui conduisent à des zones non usinées. Nous comparerons les deux approches au niveau de la nature des écarts, de l'accessibilité de l'outil, de la hauteur de crête, de la tolérance d'usinage et du respect de la forme.

Concernant les écarts géométriques, une ondulation de la surface usinée obtenue par la méthode de RE apparait; les écarts sont positifs (undercut) puis négatifs (overcut) (figure 2.30). Cet aspect d'ondulation de la surface est lié à la méthode de construction de la surface comme nous l'avons exposé précédemment (figure 2.21) .

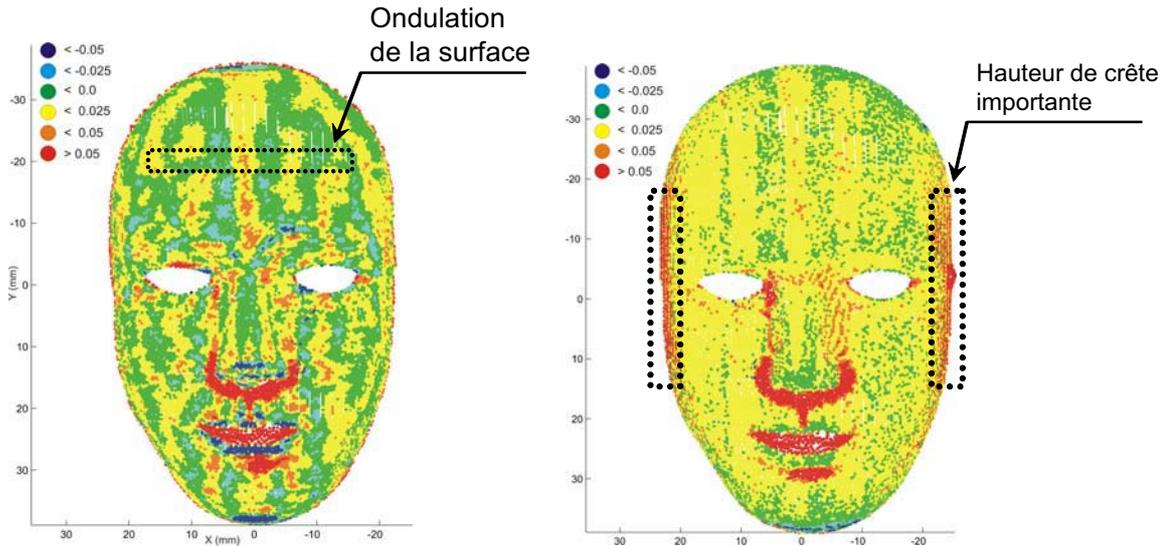


Figure 2.30 : RE (gauche) ; Copiage (droite)

Par contre concernant la surface obtenue par copiage direct, les écarts sont majoritairement positifs, ce qui est cohérent avec la méthode de positionnement de l'outil sur le nuage de points en finition. Malgré l'existence d'écarts négatifs, la plupart de ces écarts se situe entre 0 et 5 μm seulement. L'existence de tels écarts est due à l'interférence entre l'outil et le nuage de points lors du passage entre deux nœuds consécutifs dans les zones tendues (figure 2.31) (tolérance d'usinage).

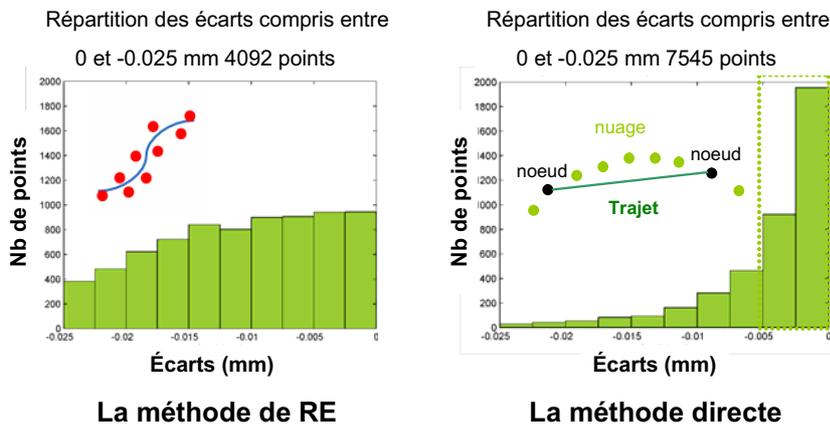


Figure 2.31 : Comparaison au niveau de la nature des écarts, RE/Copiage direct

Au niveau de la hauteur de crête, nous remarquons que CATIA gère mieux les trajectoires qu'en copiage direct dans les zones verticales (à côté des tempes) sur le masque (figure 2.30). Pour traiter ce problème nous pourrions générer un pas transversal adaptatif en fonction de la géométrie de la forme.

L'influence de l'accessibilité de l'outil se voit dans les zones complexes pour les deux approches au dessous du nez, à l'intérieur des lèvres et au dessous des lèvres. En effet, le diamètre de l'outil est plus grand que la courbure locale de ces zones. Donc la qualité du copiage est essentiellement liée à l'accessibilité du diamètre de l'outil aux zones complexes (figure 2.32).

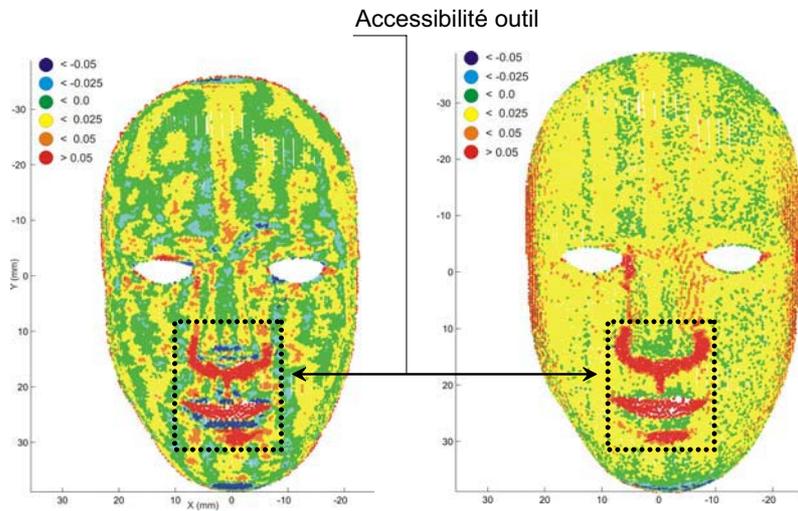


Figure 2.32 : Problème d'accessibilité outil

On observe que la tolérance d'usinage (0.01 mm) est Plutôt bien respectée en RE car on retrouve les défauts de la reconstruction de surface : plusieurs zones avec un écart maxi (en bleu), par exemple sur le nez, entre les yeux, en dessous et au dessus des lèvres, et en dessous du menton. Par contre on trouve que la méthode du copiage direct respecte mieux la tolérance d'usinage partout, sauf la zone en dessous du menton (figure 2.32) à gauche.

4. Conclusion

Dans le cadre du copiage de formes complexes en fraisage à 3 axes, nous avons présenté le processus que nous avons développé au laboratoire et l'avons comparé à la méthode classique de Reverse Engineering. Les résultats visuels et simulés montrent que le copiage direct est plus performant en terme de fidélité à la forme et également rapide, car nous pouvons constater qu'il y a un problème de fidélité à la forme (nez, bouche, les yeux) pour la méthode de RE. Par contre l'usinage direct est plus fidèle à la forme sauf dans les zones inaccessibles de l'outil. De plus, nous avons vu selon le tableau 1 que l'usinage direct est rapide. L'étape fastidieuse de reconstruction de surfaces, qui tend à lisser les formes, gommant les changements de courbure prononcés, est évitée.

Selon les résultats obtenus au niveau de la qualité et du temps d'usinage, nous constatons que l'utilisation de l'usinage grande vitesse fait du copiage direct de forme un outil que l'on peut associer au domaine du prototypage rapide.

Enfin nous constatons visuellement que le copiage direct est plus fidèle à la forme (nez, bouche, menton) (figure 2.26).

Comme perspectives, nous proposons d'améliorer notre méthode de génération des trajectoires en finition afin de mieux respecter la hauteur de crête et la tolérance d'usinage. La méthode de copiage rapide sera étendue à l'usinage en 5 axes positionné afin de déterminer la meilleure orientation de l'outil pour chaque point du nuage et d'éviter le démontage de la pièce. Nous devons donc régler divers problèmes : calcul de la normale et calcul de visibilité pour trouver les orientations outil hors interférence ; minimisation du nombre d'orientations de l'outil afin d'éviter les zones de recouvrement, et intégration des erreurs machine afin de minimiser les écarts géométriques de recouvrement.

Chapitre 3 Découpage technologique et topologique de nuages de points numérisés

1. Introduction

L'objectif final de nos travaux est la mise en place d'une chaîne du copiage direct de formes complexes en fraisage 5 axes. L'usinage à 5 axes continu permet d'améliorer les conditions d'accessibilité de l'outil, de maximiser la largeur coupée et d'éviter les interférences locales. Cependant, la génération de trajectoires en fraisage 5 axes continu d'une forme complexe dans son ensemble est une application peu développée. On la retrouve par exemple pour l'usinage en continu des aubes de turbines et des tubulures d'échappement. Par contre la génération des trajectoires d'usinage en fraisage 3 axes est plus facile et beaucoup mieux maîtrisée. Les mouvements relatifs entre l'outil et la pièce sont plus simples à programmer ce qui permet de simplifier et d'accélérer les temps de préparation.

Aussi pour exploiter les algorithmes déjà développés en fraisage 3 axes et profiter des avantages de l'usinage sur centre de fraisage 5 axes, le fraisage en 5 axes positionné nous paraît intéressant. Il permet de gagner du temps d'usinage tout en minimisant le nombre de posages de la pièce sur la table de la machine et donc de diminuer les écarts systématiques de remise en position. La problématique du copiage direct réside donc à la fois dans le positionnement de l'outil sur le nuage hors collision mais également dans le découpage du nuage en sous ensembles cohérents pouvant être usinés selon un même posage de la pièce dans l'espace machine (soit une même orientation de l'outil).

Lors de l'usinage en 5 axes positionné nous aurons donc besoin de déterminer les différentes orientations de l'axe de l'outil issues du partitionnement le nuage de points en paquets à usiner. En supposant le posage de la pièce donné, différentes problématiques apparaissent ainsi :

- définition d'une méthode de découpage du nuage de points,
- définition des meilleures orientations qui assurent l'usinabilité complète du nuage,
- minimisation du nombre d'orientations.

La figure 3.1 présente les étapes de préparation à l'usinage en fraisage à 5 axes positionné qui conduisent au découpage technologique et topologique du nuage de points.

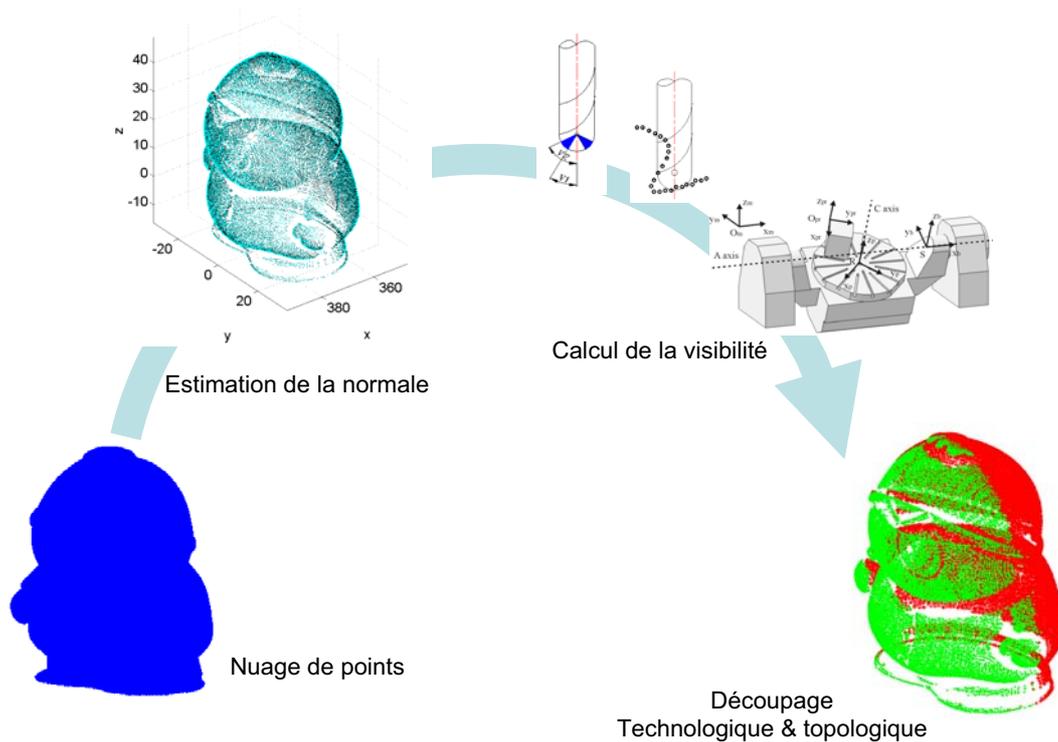


Figure 3.1 : Découpage technologique et topologique

La méthode de découpage que nous proposons est basée sur le calcul du cône de visibilité en chaque point du nuage. L'approche permettant de calculer le cône de visibilité est basée sur le calcul de la normale locale au nuage de points en direction et en orientation. Le nuage de points constitue par définition un espace séparé, ce qui rend délicat le calcul de propriétés différentielles associées aux surfaces, telle la normale.

Dans une première partie, nous présentons une méthode de calcul de la normale, robuste et rapide qui s'applique aux données discrètes issues de numérisation 3D par capteur optique à triangulation. La particularité de cette approche est qu'elle porte sur des formes complexes, numérisées par plusieurs orientations et par balayage, ce qui conduit en général à un nuage de points bruité et non homogène. Après avoir détaillé les étapes de notre approche d'estimation de la normale sur données discrètes, nous mettons en avant les paramètres influents puis nous évaluons les performances de la méthode au travers de divers exemples.

Dans une deuxième partie la démarche de calcul de visibilité sur nuage de points basée sur le calcul de normale précédent que nous proposons est exposée. Le calcul de la visibilité se fait selon trois étapes : calcul de visibilité initiale (visibilité outil), accessibilité de l'outil (visibilité globale), et enfin visibilité réelle (accessibilité machine). Le calcul de visibilité conduit à

établir une matrice de visibilité réelle qui sert de support au découpage technologique et topologique du nuage de points.

Dans la dernière partie, nous présentons la méthode de découpage (ou partitionnement). Celle-ci se fait par la recherche des directions communes entre les différents cônes de visibilité. Le choix de ces directions est effectué afin de minimiser la longueur des lignes de recouvrement entre les paquets et de minimiser le nombre de paquets (ou configurations d'usinage). Dans l'objectif de faciliter le calcul et de minimiser le temps nécessaire, le recouvrement est évalué en analysant les matrices de visibilité plutôt qu'en calculant les longueurs des lignes de recouvrement effective sur le nuage de points. Ainsi la méthode est plus robuste car le seul paramètre influent sur le calcul des paquets est le pas de la discrétisation de l'espace.

2. Estimation de la normale sur données discrètes

2.1. Introduction

Le problème majeur du copiage direct des formes complexes par usinage cinq axes réside dans le positionnement de l'outil et la gestion des collisions. L'estimation de la normale à partir des données discrètes est une étape essentielle et indispensable pour le processus. En effet, pour chaque point à usiner, il existe une infinité de directions pour poser un outil hémisphérique. Le calcul de la normale permet d'initialiser le posage de l'outil sur le nuage. A partir de ce positionnement initial, il devient possible de construire un domaine de visibilité appelé cône de visibilité, regroupant l'ensemble des possibilités de positionnement respectant différentes contraintes de collision et d'accessibilité (figure 3.2).

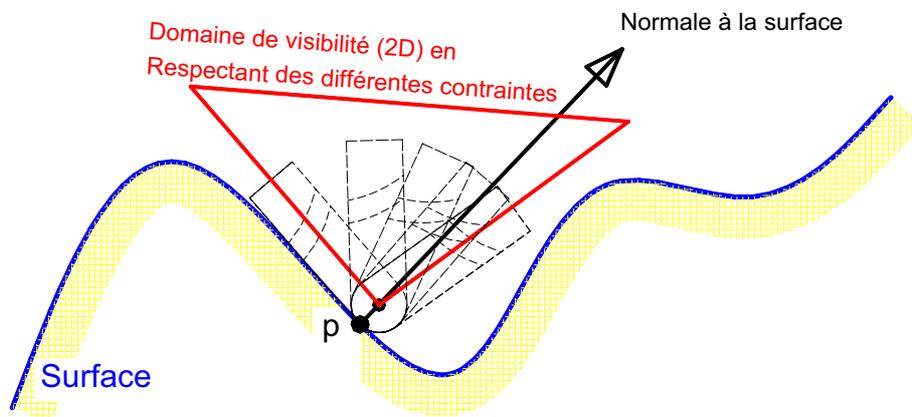


Figure 3.2 : Domaine de visibilité d'un point (cône) pour un outil hémisphérique

Dans le cas du copiage d'un nuage de points par usinage, les données sont en général acquises selon plusieurs orientations capteur, conduisant à un nuage de points bruité, non homogène et non filtré (figure 3.3).

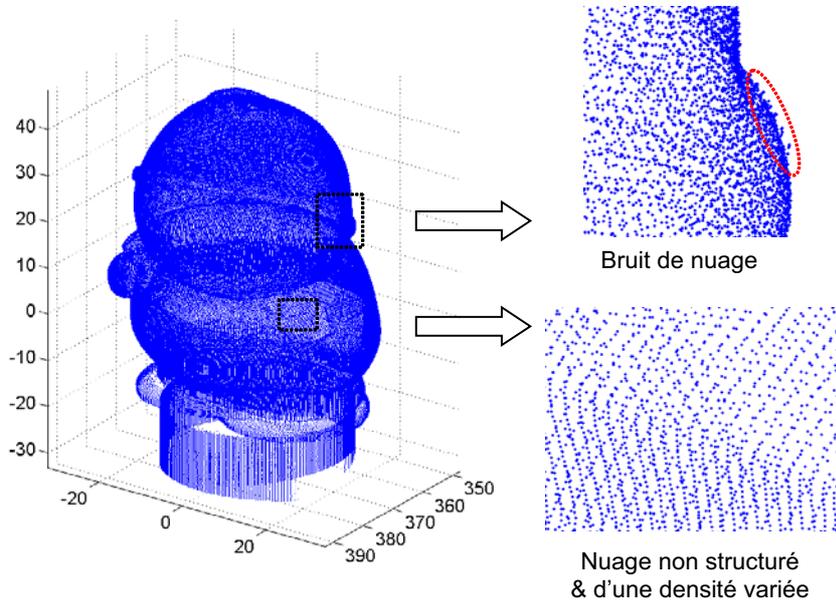


Figure 3.3 : Nuage de points numérisé, bruité, non structuré et de densité variée

Dans le contexte du calcul de la normale à partir de données discrètes, denses, non structurées et bruitées, nous pouvons regrouper les différentes méthodes issues de la littérature en trois grandes familles.

La première famille regroupe les méthodes qui associent des plans des moindres carrés à des groupes de points avant d'en extraire la normale. Dans [MITRA & NGUYEN 2003] par exemple, on associe pour chaque point une sphère optimale à partir des points voisins, le plan des moindres carrés est calculé ainsi que sa normale. Dans [BRETEAU et al. 2006], on utilise la voxélisation, afin de calculer le plan des moindres carrés pour chaque voxel et donc une normale. Ensuite, une normale moyenne est estimée à l'aide du diagramme de voronoï s'appuyant sur les 26 voxels voisins. Cependant, ces méthodes ne s'adaptent pas bien aux formes complexes car le calcul du plan des moindres carrés n'exprime pas la normale réelle pour les zones complexes où le rayon de la courbure est assez petite (plus petite que la dimension d'un voxel). De plus ces méthodes n'assurent pas l'orientation correcte (extérieur ou intérieur matière).

La deuxième famille regroupe les méthodes qui associent soit des courbes [OU YANG et al. 2005] soit des quadriques locales [YANG & LEE 1999] à des groupes de points avant d'en

extraire la normale. Ces approches ne sont pas bien adaptées quand le nuage est non homogène et bruité. De même que précédemment, ces méthodes n'assurent pas l'orientation correcte de la normale.

La troisième famille regroupe les méthodes qui associent un polyèdre soit directement à partir du nuage de points après filtrage, soit en appliquant la méthode des *marching cubes*. Dans [LORENSEN et al. 1987], l'auteur divise l'espace en cubes élémentaires. Ensuite il fixe un seuil de densité et il va parcourir l'espace cube par cube. Pour chaque cube, il compte le nombre de sommets au dessus du seuil. Ensuite, suivant ce nombre, une table permet de recenser l'ensemble des topologies possibles de triangles affichés à l'intérieur du cube. Chaque configuration correspond à un ensemble de facettes tracées à l'intérieur du volume. Ces triangles permettent donc la représentation de la surface du volume à déterminer. Enfin la normale est calculée pour chaque facette de la triangulation.

La méthode que nous avons développée précédemment s'appuyait sur une voxelisation du nuage de points. Pour chaque voxel, un plan des moindres carrés est associé au sous ensemble de points contenus dans le voxel. Comme nous l'avons évoqué au chapitre 1, cette méthode présente trois inconvénients majeurs :

- la méthode de calcul n'est pas robuste, le nombre de points minimal n'assure pas nécessairement le calcul d'un plan cohérent avec la forme locale,
- le moyennage des normales entraîne des erreurs sur l'estimation de la normale pour les zones à forte courbure,
- l'estimation du sens de la normale est basée sur la connaissance a priori de l'orientation du capteur utilisée pour la numérisation du voxel considéré.

Concernant ce dernier point, il est important de souligner que la simple connaissance de la direction de la normale est insuffisante pour pouvoir poser l'outil sur le nuage de points. Il faut savoir où est la matière, c'est-à-dire l'orientation de la normale vers l'extérieur matière. Dans le contexte de calcul de l'orientation de la normale à partir de données discrètes peu de méthodes proposent le calcul de l'orientation. Dans la méthode développée par [HOPPE 1992], (figure 3.4), la normale est calculée sur des données discrètes générées mathématiquement à partir d'une surface continue en tangence. La direction de la normale a été calculée pour chaque point du nuage de points selon le principe du plan des moindres carrés. Ensuite, on choisit le plan qui a une normale unitaire avec $Z_{\max i}$ et on l'oriente vers Z^+ . L'objectif de cette étape est d'avoir une normale orientée vers l'extérieur. Comme on a supposé que le nuage est

assez dense et la surface lisse, le produit scalaire entre cette normale (la normale d'initialisation) et sa voisine doit être positif. Sinon il faut inverser l'orientation de la normale voisine. En suivant l'ordre de la génération de l'arbre de MST (Minimal Spanning Tree) nous pouvons réorienter toutes les normales correctement vers l'extérieur matière.

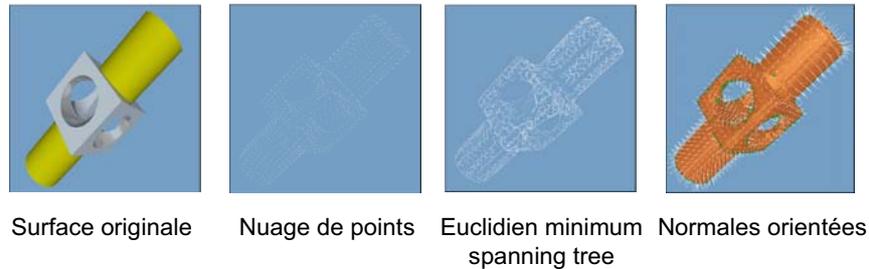


Figure 3.4 : Déroulement de la méthode

En synthèse, nous pouvons regrouper les différentes méthodes de calcul de la normale sur données discrètes dans un tableau (tableau 1). Nous constatons que peu de méthodes utilisent le nuage numérisé. De plus il y a des difficultés pour déterminer l'orientation de la normale.

	Group.1		Group.2		Group.3
	Méthodes basées sur les plans de moindres carrés		Méthodes basées sur l'association des courbes et des quadriques locales		Association des polyèdres
Auteurs	[MITRA & NGUYEN 2003]	[BRETEAU et al. 2006]	[OU YANG et al. 2005]	[YANG & LEE 1999]	[LORENSEN et al. 1987]
Complexité de la méthode (Nb de paramètres)	complexe	Pas complexe	Assez complexe	Assez complexe	Assez complexe
Le nuage utilisé	Nuage généré mathématiquement avec un bruit de [-0.0005 0.0005]	Nuage réel	Nuage généré mathématiquement sans bruit	Nuage généré mathématiquement sans bruit	3D médical data
Qualité de la normale calculée	Erreur de 1,6° maximum	Erreur de 20° maximum	Erreur de 10° maxi	N'est pas évalué	N'est pas évalué, mais la qualité est assez faible
Calcul de l'orientation	non	non	non	non	oui

Tableau 1: Synthèse des méthodes de calcul de normale sur données discrètes

Dans la suite, nous proposons une méthode de calcul de la normale sur données discrètes obtenues par numérisation 3D [MAKKI et al. 2008a], rapide et facile à mettre en oeuvre. Elle permet en particulier d'estimer la direction et l'orientation de la normale locale sans approximation locale de surface ni filtrage des données. Cette méthode s'appuie sur les concepts classiques de positionnement d'un outil de forme hémisphérique sur une surface.

2.2. La méthode de lancer de sphères

2.2.1. Concept général de la méthode proposée

Soit une surface continue S , suffisamment régulière pour laquelle on cherche à estimer en tout point sa normale. Considérons Z une direction quelconque de l'espace, et imaginons de faire glisser une sphère de rayon R non nul, le long de Z , jusqu'à ce qu'elle entre en contact avec la surface S en C_C (figure 3.5).

Le contact sphère/surface est ponctuel et la normale à la surface en C_C passe par le centre de la sphère C_L .

Ainsi, pour déterminer la normale en tout point de la surface, il suffit de définir un ensemble de droites Z parallèles, chacune représentant une direction de guidage ou de lancer de sphère. Ce concept simple défini à partir d'une surface continue peut être étendu à un ensemble discret de points.

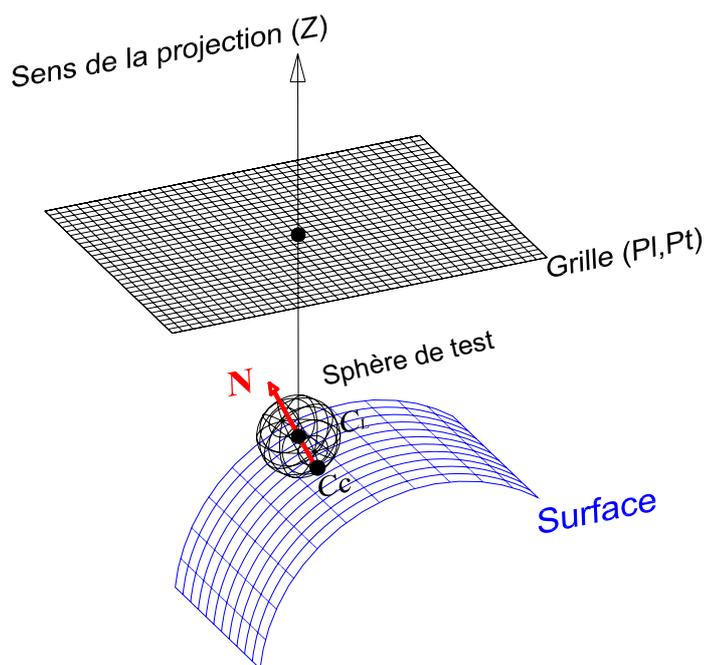


Figure 3.5 : Méthode de lancer de sphère

2.2.2. Méthodologie sur données discrètes

Considérons un nuage de points et une direction Z donnée (figure 3.6). A partir du plan (x, y) perpendiculaire à Z , on construit une grille de droites pour laquelle les noeuds correspondent aux positions en x et y des sphères à lancer le long de Z . Soit R le rayon des sphères, pour chaque noeud de la grille $N_{di}(x_{di}, y_{di})$ nous ne considérons que les points du nuage qui participent au positionnement de la sphère, c'est-à-dire ceux inclus dans un cylindre, d'axe Z passant par N_{di} et de diamètre $D = 2R$. Nous cherchons alors les intersections entre les sphères centrées sur chacun des points du nuage restreints au cylindre et l'axe Z considéré. L'intersection dont l'altitude est maximale donne l'altitude Z_i de la sphère définie par son centre $C_{li}(x_{di}, y_{di}, Z_i)$ et on repère la position $C_{ci}(x, y, z)$ du point de contact. A partir du point précédemment déterminé, nous considérons la normale au point de contact définie par :

$$\vec{n}_i = \overrightarrow{C_{ci}C_{li}}$$

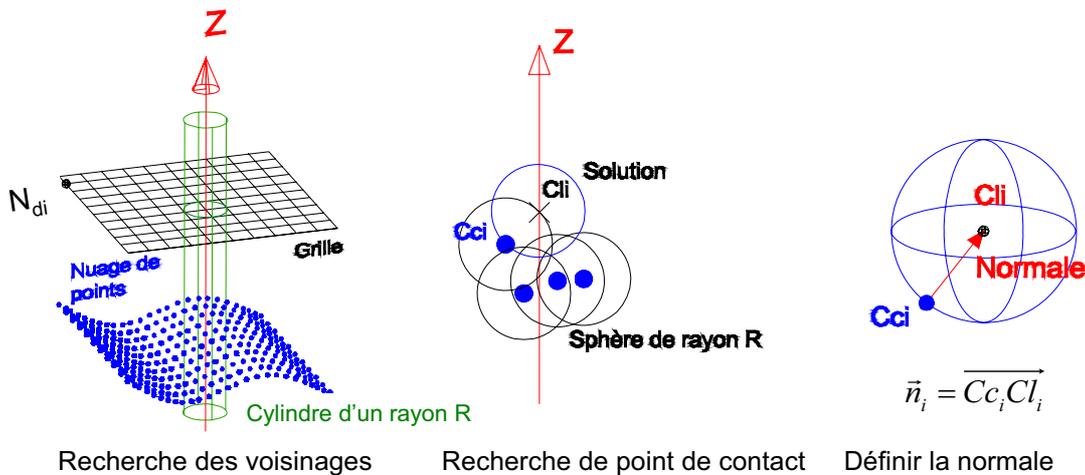


Figure 3.6 : Méthode de lancer de sphères sur données discrètes

Si nous lançons la sphère selon plusieurs directions, il arrive de calculer la normale plusieurs fois au même point du nuage. Cette redondance est résolue par le calcul de la normale moyenne au point concerné.

Nous pouvons noter que la normale est toujours orientée vers l'extérieur matière. De par son mode d'estimation, elle est orientée vers le centre de la sphère de test qui touche le nuage de l'extérieur. Notons également que les paramètres de la grille doivent être choisis en fonction de la géométrie de surface (la complexité de la surface et la densité du nuage), et de la résolution souhaitée (nombre de points pour lesquels la normale est estimée).

La méthode proposée est simple à mettre en oeuvre. Elle a déjà fait ses preuves en génération de trajectoires d'usinage sur des formes complexes usinées avec un outil hémisphérique. C'est ce qu'on appelle le positionnement de l'outil sur la surface ou posage de l'outil. De plus la méthode n'introduit pas d'approximation puisqu'il s'agit simplement d'effectuer des intersections entre des droites et des sphères. La méthode a été implémentée sous MATLAB et l'algorithme est proposé ci dessous.

Afin de valider la méthode, nous la testons sur un élément géométrique pour lequel nous connaissons la normale, une sphère étalon. Nous étudions ensuite l'influence des caractéristiques du nuage sur l'estimation de la normale, d'un point de vue qualitatif puis quantitatif.

Algorithme 1 : Calcul de la normale par la méthode de lancement d'une sphère

Entrées :

Nuage de n points numérisé ; Diamètre de la sphère à lancer D ; Pas transversal Pt et pas longitudinal Pl de la grille de lancement ; Directions de lancement di

Sortie :

Points et normales associées $norm_data$: $[Xi Yi Zi Nxi Nyi Nzi]$

Algorithme :

Pour chaque orientation de lancement di

Orienter le nuage tel que $di // Z$: Z est la direction du lancement de la sphère}

Pour pour chaque nœud N_{di} de la grille

Chercher les points contenus dans le voisinage grossier (cylindre de base carrée de côté égal au diamètre D de la sphère, d'axe $// Z$ et passant par N_{di}

Si voisinage grossier vide

Il n'existe pas de contact et pas de normale au nœud N_{di}

Sinon

Chercher les points contenus dans le voisinage fin (portion de cylindre de diamètre D entre l'altitude z du point le plus haut z_{max} et $(z_{max} - D/2)$)

Si voisinage fin vide

Chercher le centre de la sphère : intersection d'altitude maxi entre les sphères centrées aux points trouvés et l'axe du lancement

$ni = C_{ci} \cdot C_{li}$

Sinon

Il n'existe pas de point de contact

Fin si

Fin si

Fin pour

Fin pour

Pour chaque point de la matrice $norm_data$

Chercher les points redondants et éliminer la redondance en calculant la normale résultante

Fin Pour

2.2.3. Implémentation et validation

Afin de valider formellement notre approche, nous nous proposons de numériser des formes simples permettant de comparer les normales calculées par la méthode par lancer de sphère avec celles du modèle paramétrique. A l'aide du système de mesure par capteur laser monté sur MMT dont nous disposons nous avons numérisé une sphère de diamètre $D = 76,5$ mm selon une seule direction du capteur et 7 passages du capteur (figure 3.7).

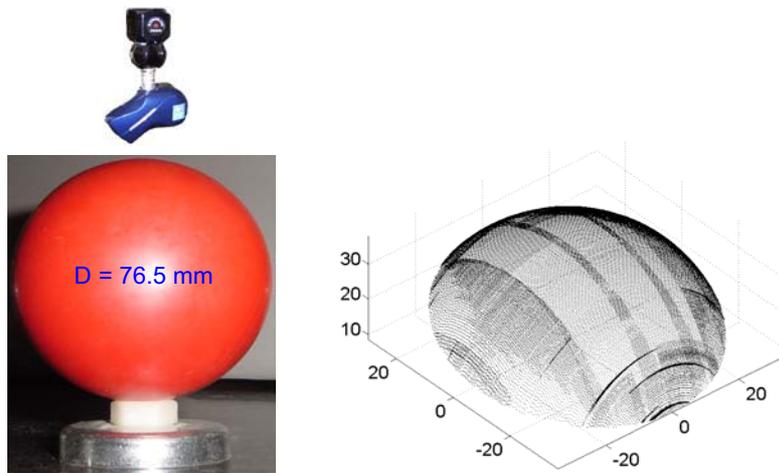


Figure 3.7 : Numérisation d'une partie d'une sphère par une seule orientation

A partir du nuage de points obtenu (237925 points), nous calculons une sphère des moindres carrés par la méthode [SHAKARJI 1998], (figure 3.8). Le calcul de la sphère des moindres carrés nous permet de calculer une normale que nous qualifierons de réelle en chaque point du nuage. Ainsi, la normale au point P_i est définie par le vecteur \vec{OP}_i , où O est le centre de la sphère des moindres carrés.

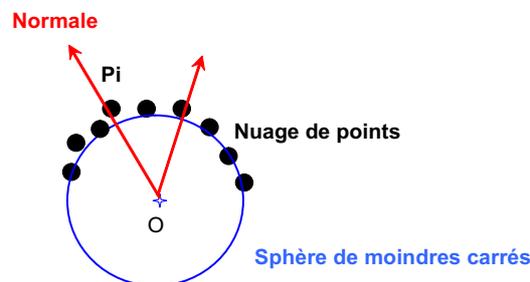


Figure 3.8 : Estimation de la normale réelle

Nous appliquons la méthode de lancer de sphères avec les paramètres suivants : taille de la grille de 1 mm x 1 mm, rayon de sphère, $R = 10$ mm.

Pour estimer la performance de la méthode du lancer de sphères, nous calculons l'angle d'erreur entre la normale réelle et la normale calculée par lancer de sphère au point considéré.

$$\text{angle} = \text{angle}(\overrightarrow{N_{\text{réelle}}}, \overrightarrow{N_{\text{calculée}}})$$

Sur la figure 3.9, nous présentons une cartographie de l'angle d'erreur calculé entre les deux vecteurs, ainsi qu'un histogramme des erreurs (figure 3.9). On note que la plupart des écarts se situent entre 1° et 4°.

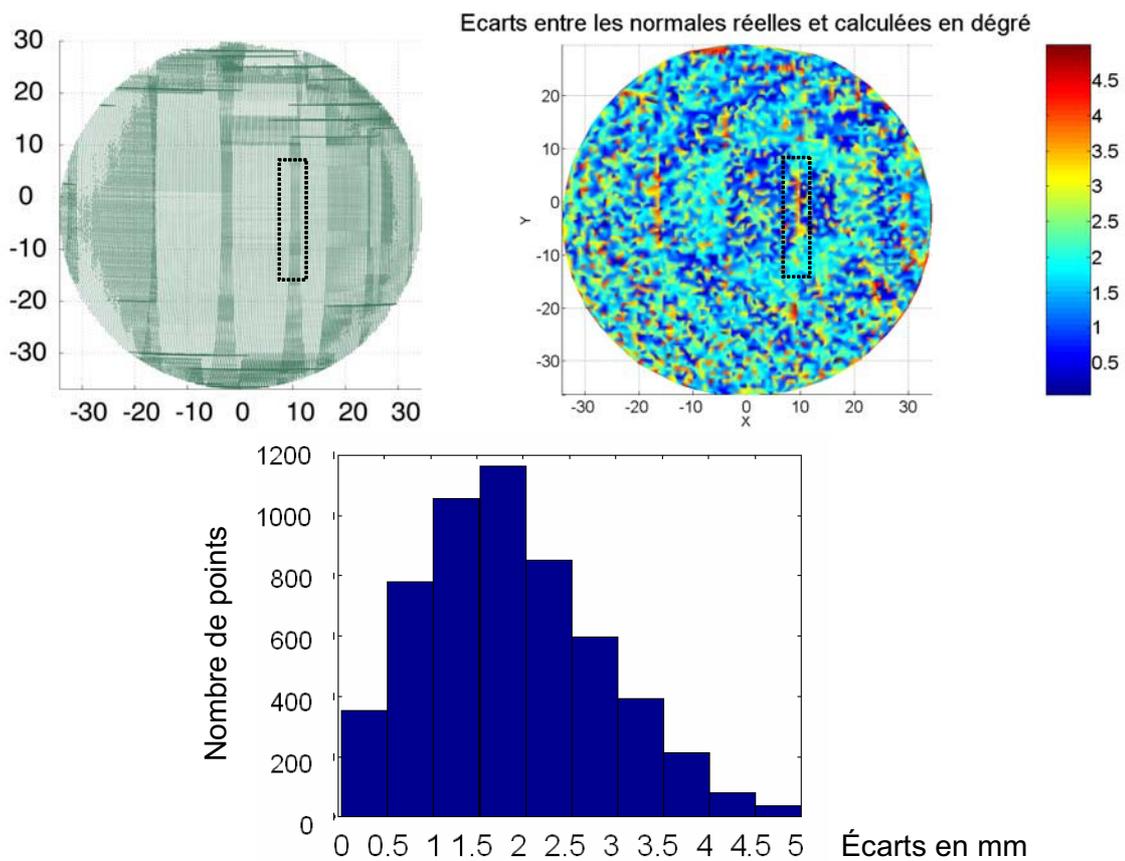


Figure 3.9 : Simulation des écarts sur une sphère

La plupart des remarques que nous pouvons faire sont d'ordre qualitatif. Cette application sur la sphère montre que la densité et le bruit de numérisation sont des paramètres importants. En effet, les écarts maxima sont situés à l'interface entre les différentes bandes de numérisation et là où il y a une variation brusque de la densité du nuage. Ces zones représentent la superposition de deux bandes de numérisation successives, là où le bruit est maximal. Cependant, la méthode montre ses limites pour la détermination des normales sur le bord du nuage de points. En effet, pour un point extrémité, il y aura autant de directions de normales calculées que de directions de lancer de sphères.

Enfin, l'erreur d'estimation de la direction de la normale paraît faible, mais nous n'avons pas d'éléments de comparaison. C'est pourquoi nous la confronterons avec la méthode initiale sur une forme complexe afin d'apprécier ses performances pour notre application spécifique de copiage direct par usinage.

2.3. Etude des paramètres influents sur la normale

Dans cette partie, nous nous attachons à dégager quels sont les paramètres influents sur la méthode au travers d'une approche basée sur des plans d'expérience.

2.3.1. Approche par la méthode des plans d'expériences

Dans le cas d'un plan, la normale obtenue par lancer de sphère passe par le point de contact et le centre de la sphère. Dans le cas d'un plan issu de numérisation, le point de contact peut varier selon 3 facteurs essentiellement : la densité locale du nuage de points numérisé ρ , le bruit du nuage δ , ou encore le diamètre de la sphère D (figure 3.10).

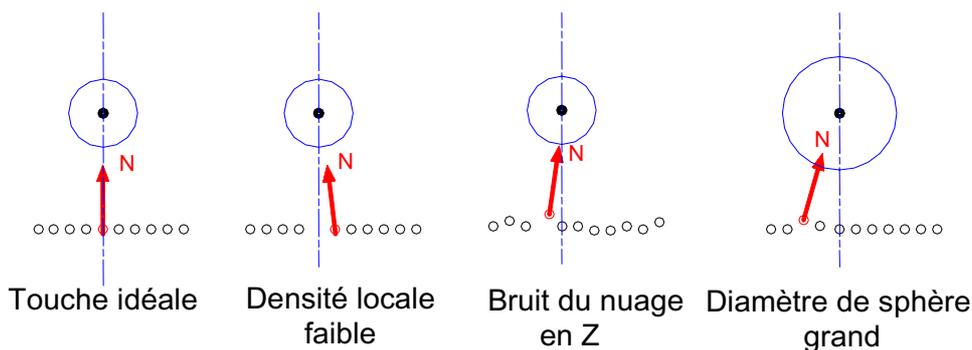


Figure 3.10 : Paramètres influents sur la direction de la normale

En utilisant la méthode des plans d'expérience de TAGUCHI, nous espérons trouver un modèle qui nous permettrait d'estimer l'influence de ces trois paramètres sur l'erreur moyenne entre la normale réelle sur un plan idéal et celle estimée par notre approche. Nous avons choisi la table L_8 qui permet d'étudier l'effet des facteurs et les interactions entre eux, en considérant trois paramètres à deux niveaux :

- le diamètre φ de la sphère de test en mm : [5, 20]
- la densité ρ du nuage de points en pts/mm : [2, 8]
- le bruit δ du nuage de points selon Z en mm : [0, $\mp(0, 1)$]

Le diamètre de la sphère lancée est choisi de façon à assurer une accessibilité maximale des zones complexes. Autrement dit, le choix d'un grand diamètre améliore la qualité de la

normale estimée, mais ne permet pas d'estimer la normale dans les zones concaves de petits rayons. Concernant la densité et le bruit, les valeurs ont été choisies en rapport avec les résultats standards de numérisation sur MMT [SOUZANI 2006].

Le pas de lancement est de 1 mm, le nuage de points du plan est généré mathématiquement, dans le plan XY de façon aléatoire, nous organisons ainsi le tableau 2.

N° d'essai	Diamètre D	Densité ρ	Bruit δ	La réponse l'angle moyenne d'erreur θ_{moy}
1	5	2	0	4,4617°
2	5	2	0.1	7,2701°
3	20	8	0	0,2723°
4	20	8	0.1	1,5532°
5	5	8	0	1,0894°
6	5	8	0.1	4,2884°
7	20	2	0	1,1140°
8	20	2	0.1	2,0186°

Tableau 2: Tableau TAGUCHI L8

Le modèle du plan d'expérience résultant est le suivant :

$$\hat{\theta}_{moy} = 2.758 + [1.5185 \quad -1.5185][\varphi] + [0.9575 \quad -0.9575][\rho] + [1.024 \quad -1.024][\delta]$$

Nous constatons que l'erreur angulaire moyenne est de 2.758°, l'erreur mini égale à 1° avec D_{maxi} , ρ_{maxi} et δ_{mini} et l'erreur maxi 5° avec D_{mini} , ρ_{mini} et δ_{maxi} .

Selon les graphiques des trois effets principaux (figure 3.11), nous pouvons dire que :

- l'augmentation du diamètre D de la sphère diminue l'erreur moyenne,
- l'augmentation de la densité ρ du nuage de points diminue l'erreur moyenne,
- l'augmentation du bruit δ augmente l'erreur moyenne.

Ces résultats sont conformes à nos attentes. De plus ils montrent (figure 3.12) qu'il n'existe pas d'interactions entre les trois paramètres retenus.

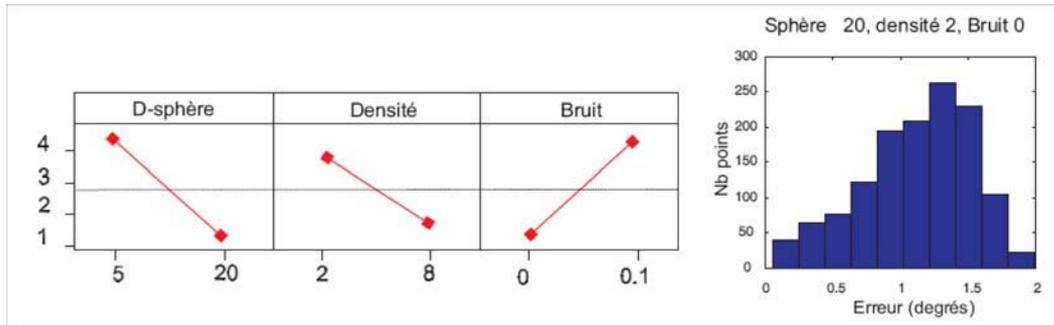


Figure 3.11 : Graphiques des effets moyens et histogramme des erreurs d'estimation

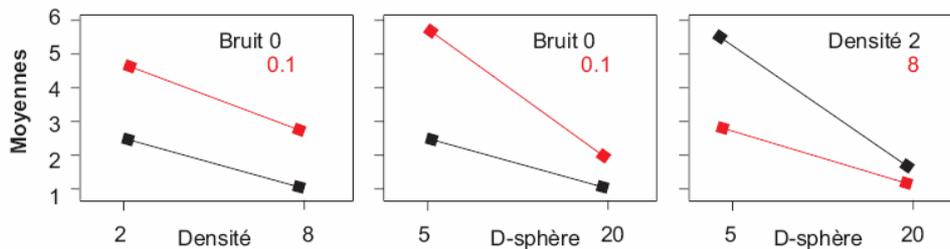


Figure 3.12 : Interactions entre les différents facteurs

Comparativement aux autres méthodes issues de l'état de l'art, la méthode proposée permet d'obtenir des normales de bonne qualité, avec peu de paramètres, sur un nuage réel assez bruité (0.1 mm). A partir de la connaissance du bruit et du diamètre de la sphère on pourrait estimer les paramètres de numérisation (pas de la numérisation et la densité linéique) pour une erreur d'estimation de la normale donnée.

2.4. Applications

Afin de valider l'approche par lancer de sphères de façon plus générale, nous proposons de calculer les normales sur le nuage de points issu de la numérisation du masque étudié au chapitre précédent. Le modèle CAO ayant été reconstruit sur CATIA, nous pourrions comparer les normales calculées selon notre approche avec celles du modèle CAO aux points concernés.

Après numérisation, le nuage de points obtenus comporte 160000 points. Afin d'accélérer les calculs nous avons appliqué un facteur d'échelle sur le nuage de points de 1/3. Pour cet essai nous avons pris comme pas de grille 1x1 mm et une sphère de diamètre 10 mm. Après calcul, nous avons trouvé que l'écart moyen des erreurs angulaires entre les normales calculées

sur CATIA (considérées comme parfaites) et l'approche par lancer de sphères est de $2,56^\circ$. Nous constatons que les écarts maxi sont groupés aux bords des trous comme les yeux et des zones complexes comme le contour de lèvres (figure 3.13).

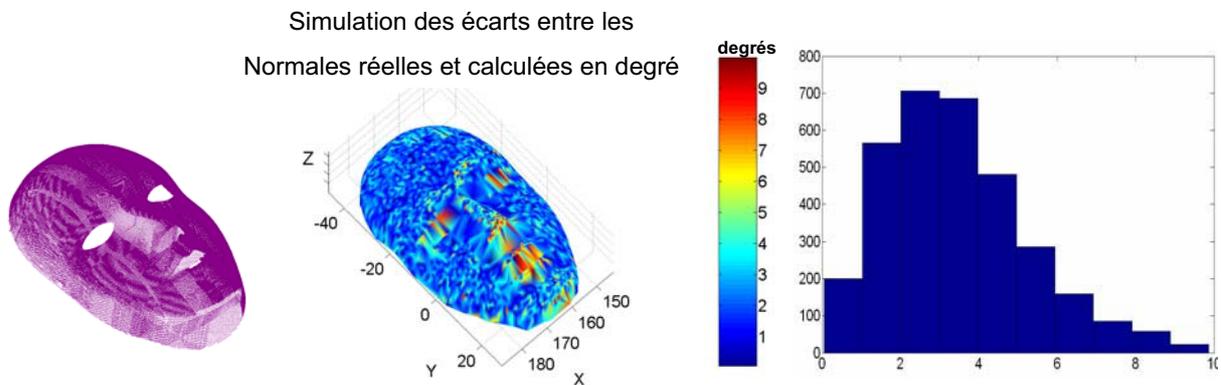


Figure 3.13 : Ecart sur les normales estimées par lancer de sphères

Nous avons également utilisé l'algorithme basé sur la voxelisation et les plans des moindres carrés sur cet exemple (figure 3.14). Le résultat montre un écart moyen plus grand ($3,13^\circ$ pour $2,56^\circ$) et des écarts plus grands dans les zones à forte courbure telles que les yeux, le nez et la bouche. Nous constatons que l'approche des moindres carrés est plus efficace dans les zones tendues où le bruit du nuage et l'hétérogénéité ont été lissés par l'association des plans des moindres carrés alors que notre approche est simplement basée sur le calcul local du contact entre une sphère et un point. Nous notons cependant que l'approche par lancer de sphères est plus adaptée aux formes complexes.

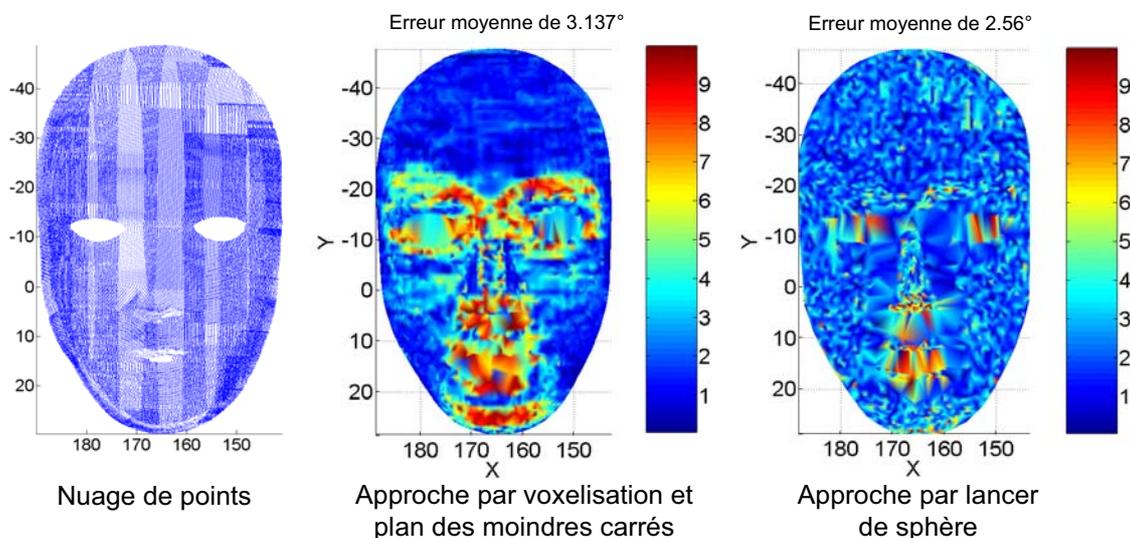


Figure 3.14 : Evaluation de la méthode vis-à-vis d'une approche basée sur le plan des MC

2.5. Synthèse concernant l'estimation de la normale

Nous avons présenté une méthode de calcul de la normale, robuste et rapide qui s'applique aux données discrètes issues de numérisation 3D par capteur optique à triangulation. La problématique de l'orientation de la normale a été réglée par le choix de la direction du lancer de la sphère. Ainsi nous avons évalué notre méthode en calculant l'erreur maximum d'une normale estimée et pour un nuage de points réel en fonction du bruit du nuage, de la densité et du diamètre de la sphère. Les applications ont montré que l'erreur moyenne est d'environ $2,5^\circ$. La méthode, comparée à une approche basée sur la voxélisation s'est montrée plus efficace sur une forme quelconque.

Cependant la méthode par lancer de sphères montre ses limites car la sphère de test ne touche jamais tous les points du nuage. C'est pourquoi nous avons constaté un effet de filtrage qui dépend du diamètre de la sphère, de la complexité du nuage, du pas de la grille ainsi que du niveau de bruit du nuage.

Pour aller plus loin, un travail a été réalisé sur l'analyse du choix du diamètre de la sphère de lancement en fonction de la densité locale du nuage de points et de la courbure locale (annexe C). Une telle optimisation permettrait de minimiser l'erreur sur la normale estimée.

Cette méthode sera utilisée dans la suite des travaux compte tenu de son efficacité vis à vis de la bonne évaluation de la normale et de son orientation dans les zones complexes.

3. Calcul de visibilité

3.1. Introduction

L'idée générale de la visibilité est de déterminer si un point de l'objet est visible à partir d'un point de l'espace ou non, mais la visibilité d'un point ne signifie pas qu'on puisse physiquement l'atteindre. Dans le cas de l'usinage par exemple, la visibilité est une condition nécessaire mais pas suffisante.

D'un point de vue géométrique le travail algorithmique le plus important est de vérifier la faisabilité de l'usinage d'une forme complexe sur une machine outil. La question qui se pose est la suivante : comment faut-il initialiser le posage d'une pièce dans l'espace d'une machine afin d'assurer l'usinabilité complète de la pièce sans démontage si possible. D'une part, il faut tenir compte des courses de la machine adoptée. Et d'autre part, les collisions doivent être évitées : collision locale, pour assurer la qualité de la surface usinée; collision globale entre l'outil et les moyens de fixation; ou encore collision entre la pièce et l'ensemble (outil/porte-outil).

La problématique actuelle est de définir une méthode de calcul de la visibilité d'un nuage de points bruité non homogène et non structuré, étape clé du copiage direct de formes par usinage 5 axes positionné. C'est elle qui va nous permettre de lancer le partitionnement du nuage en paquets. Nous proposons dans la suite une méthode de calcul de visibilité réelle en 3 étapes qui prend en compte la géométrie de l'outil (visibilité initiale), la collision avec le nuage de points (visibilité globale), et l'accessibilité machine (visibilité réelle).

3.2. Quelques méthodes issues de la littérature

De manière générale, la question de la visibilité peut être traitée selon deux points de vue : comment voir au mieux l'objet à usiner (point de vue extérieur à l'objet) ou comment être vu par l'outil (point de vue intégré à l'objet). Quel que soit le point de vue, les démarches proposées dans la littérature s'appuient sur trois étapes :

- modéliser et discrétiser l'espace englobant l'objet et/ou l'objet même,
- définir et choisir les outils mathématiques d'analyse des éléments,
- intégrer les contraintes : collision, géométrie outil, accessibilité de la machine.

Selon la littérature du point de vue usinabilité, nous sommes capables de définir deux types de visibilité :

- la visibilité locale, qui traite tout ce qui concerne l'interférence entre la partie coupante de l'outil et de la zone concernée,
- la visibilité globale, qui vérifie la collision et la possibilité d'accessibilité entre l'outil, la pièce et l'environnement d'usinage.

Nous avons classé les différentes méthodes de la littérature en trois familles. La première famille regroupe les approches dites continues qui ne s'appuient pas sur la discrétisation de l'espace. L'outil de base le plus utilisé pour calculer la visibilité est la carte gaussienne (Gmap). Le concept de la carte gaussienne trouve ses origines en géométrie différentielle [DOC 1976]. L'idée est de représenter la normale d'un point sur une surface par un autre point sur la surface d'une sphère unitaire. Ce point est le résultat de l'intersection entre la normale unitaire considérée et la surface de la sphère unitaire. Dans [WOO 1994] l'auteur propose un enrichissement de la carte gaussienne qui prend en compte l'influence de la géométrie de l'outil avec lequel la surface est usinée. La construction de la carte de la visibilité (Vmap) se fait par l'intégration du champ de visibilité de l'outil pour chaque point de la carte gaussienne construite (Gmap). Par exemple, la carte de la visibilité d'un point (sur la carte gaussienne) pour un outil hémisphérique est une demie-sphère. Pour un outil hémisphérique la carte de la visibilité (Vmap) est le résultat de l'intersection entre l'ensemble des hémisphères associés aux points p_i de la carte gaussienne (Gmap) (figure 3.15).

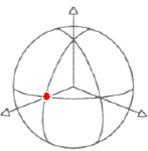
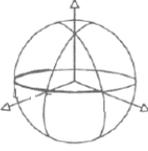
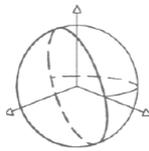
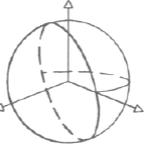
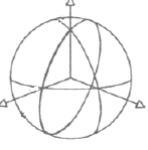
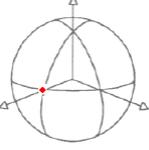
Type de surface	 Plan	 ½ cylindre	 Demi sphère
Carte gaussienne	 Point	 Demi cercle	 Demi sphère
Carte de Visibilité	 Demi sphère	 Demi cercle	 point

Figure 3.15 : Exemples de cartes gaussiennes

[TANG & WOO 1989], proposent une méthode de posage optimal d'une pièce (composée des surfaces paramétriques) dans l'espace de la machine dans objectif d'assurer une visibilité maximale de la pièce pour un seul posage. Pour des machines outils à 4 axes (XYZB), pour lesquelles le quatrième axe est le mouvement rotatif de la table, ce mouvement rotatif peut être tracé sur la sphère unitaire de visibilité par un grand cercle. Le posage optimal dans ce cas est déterminé par la recherche de l'intersection maximale entre l'ensemble des polygones sphériques dus au calcul de visibilité de l'ensemble des surfaces paramétriques et le grand cercle (eigen cercle). La normale à ce cercle exprime le posage candidat de la pièce dans l'espace machine pour lequel une aire maximum de la surface est usinée (figure 3.16). De la même manière pour une machine outil à 5 axes (XYZAB), les auteurs cherchent l'intersection entre une bande surfacique (eigen bande) sur la sphère de visibilité et l'ensemble des polygones sphériques dus au calcul de la visibilité de l'ensemble des surfaces de la pièce (figure 3.16).

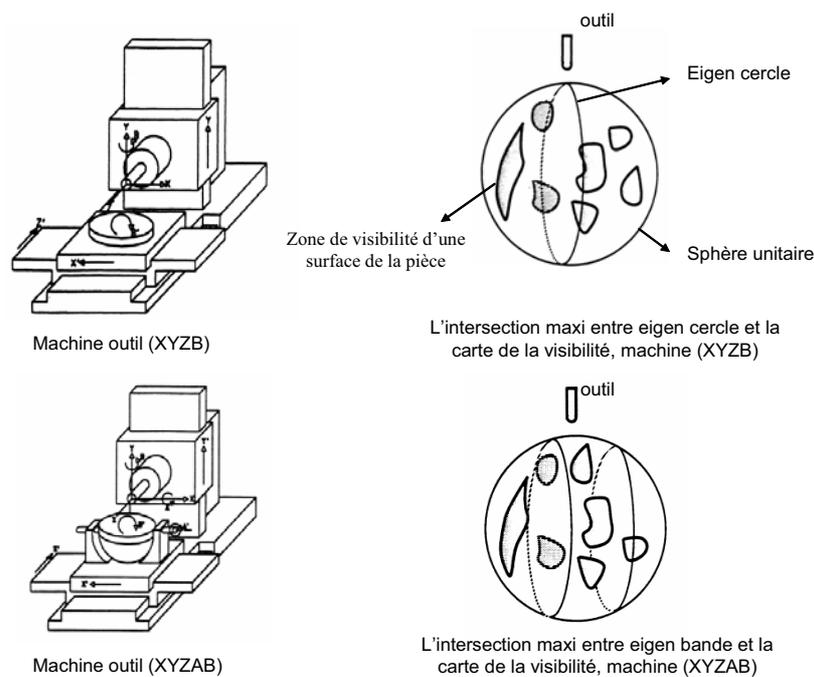


Figure 3.16 : Posage de la pièce sur une machine outil à 4 et 5 axes

Les méthodes basées sur une démarche continue traitent la visibilité de manière globale sans discrétisation des surfaces. Elles sont appliquées aux formes paramétriques et aux surfaces de type Bézier. Elles atteignent leurs limites lorsque les surfaces deviennent très complexes.

La deuxième famille regroupe les méthodes qui dépendent de la capacité de la carte graphique. Dans [BALSUBRAMANIAN 2000] l'auteur propose une méthode de calcul de visibilité (afin de calculer les trajectoires d'ébauche) d'une pièce complexe de modèle CAO connu et triangulé, en utilisant la capacité de la carte graphique de l'ordinateur. Les cartes graphiques fonctionnent en général sur la base d'un calcul de type Z-BUFFER, il consiste à calculer les éléments d'une scène non visible à partir de différents points d'observation donnés et arrangés autour de la sphère gaussienne. Cette méthode est rapide car elle permet d'analyser environ un million de triangles par seconde.

On affecte à chaque triangle une couleur différente ($2^8 \times 2^8 \times 2^8$ couleurs possibles). L'auteur modélise l'espace englobant de la pièce par une sphère de Gauss triangulée, qui définit les orientations de vérification de la visibilité. Ensuite la carte graphique lance le calcul de la visibilité pour tous les triangles et pour chaque orientation (image) associée à la sphère gaussienne discrétisée (figure 3.17).

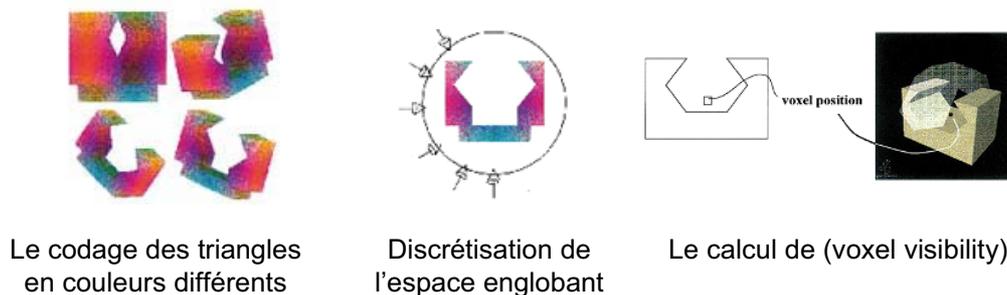


Figure 3.17 : Visibilité par carte graphique

Cette méthode basée sur les capacités des cartes graphiques permet la minimisation du temps de calcul. Cependant elle n'est pas adaptée au nuage de points compte tenu de l'absence de la triangulation qui sert de base de codage par couleurs.

La dernière famille regroupe les méthodes basées sur la discrétisation de l'espace ou/et l'approximation polyédrique de la surface à usiner. Dans [KANG & SUH 1997], les auteurs présentent un algorithme pour vérifier l'usinabilité d'une surface continue sur une machine outil 5 axes type A/B et A/C, ainsi qu'une méthode pour le posage optimal d'une forme complexe. Ils utilisent la notion de cône de visibilité calculé au barycentre de chaque triangle de la surface triangulée. La translation du sommet de chaque cône de visibilité associé à chaque point de la surface triangulée vers le centre d'une sphère unitaire donne une carte sur la surface de la sphère. Dans le cas d'une forme complexe, la cartographie resultante comporte

des zones sphériques séparées les unes des autres. Enfin, pour optimiser le posage de la pièce dans la machine, les auteurs étudient l'interférence maximale entre la zone de faisabilité de mouvement de l'outil et l'ensemble des zones sphériques de visibilité discrétisées.

Dans [REMY et al. 2002], les auteurs proposent un algorithme pour générer des trajectoires lors de la numérisation automatiquement sur MMT par capteur laser d'une pièce déjà définie en CAO. La visibilité est étudiée pour un nombre fini de directions de vue, car l'espace englobant est modélisé par une sphère unitaire discrétisée sous forme d'un modèle STL, et les directions de vue sont les normales des facettes. La surface S de la pièce est aussi discrétisée par un modèle STL. La démarche proposée pour calculer la visibilité se compose de trois étapes :

- calcul des visibilités locales : un triangle i de la surface triangulée est visible par rapport à un triangle j de la sphère unitaire si l'angle entre les deux normales aux deux triangles est inférieur à θ , angle défini expérimentalement et inférieur à 90° .
- calcul de la visibilité globale : pour chaque cône de visibilité de chaque triangle de la pièce, où les directions pour lesquelles le triangle considéré n'est pas caché par d'autres parties de la pièce.
- calcul de la visibilité réelle : dans cette dernière phase, des contraintes additionnelles comme la géométrie du capteur sont prises en compte.

Les méthodes basées sur une discrétisation des surfaces et/ou de l'espace semblent mieux adaptées aux surfaces complexes et plus proches de notre cas puisque nous disposons d'un nuage de points. Toutefois cet avantage peut être limité par le temps de calcul qui s'allonge rapidement avec la finesse de discrétisation.

Dans nos précédents travaux [BRETEAU et al. 2006], le calcul de visibilité s'appuyait sur une voxelisation de nuage de points. A partir d'une voxel-map, la méthode consiste à déterminer un cône de visibilité discrétisé orienté selon la normale en chaque barycentre de voxel. Ce cône de visibilité est calculé en intégrant la géométrie du corps de l'outil, la collision avec la partie coupante de l'outil étant déjà prise en compte par l'algorithme de génération de trajectoires de finition (figure 3.18).

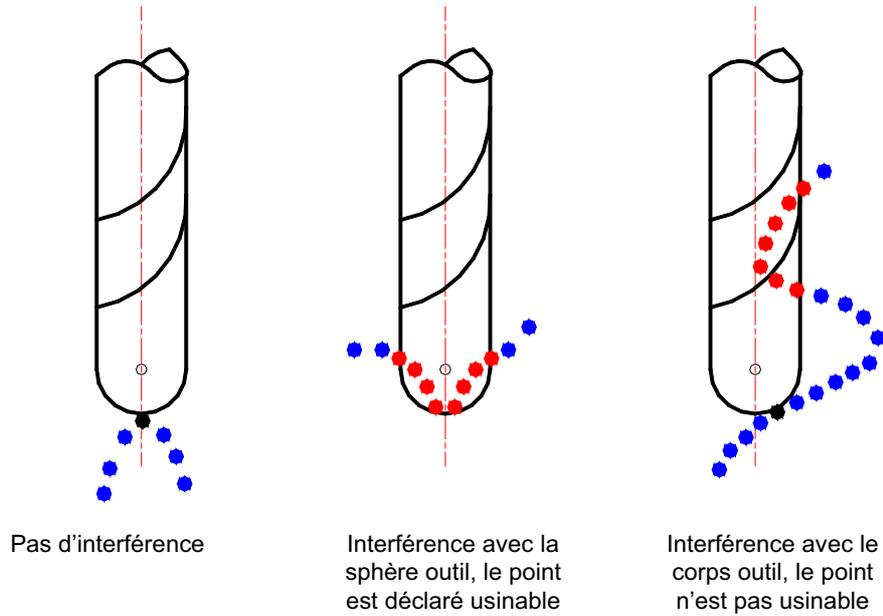


Figure 3.18 : Interférence entre l'outil et le nuage de points

Cette méthode de calcul de visibilité discrète sera adoptée dans nos travaux, mais on ajoutera l'accessibilité de la machine utilisée au calcul de visibilité, ce qui nous permettra de calculer une visibilité complète dite visibilité réelle. Nous améliorons aussi le calcul de visibilité globale en prenant en compte la collision entre le porte outil et le nuage de points, la matière brute, et les moyens de fixation.

3.3. Approche envisagée

L'objectif que nous souhaitons atteindre étant le découpage du nuage de points pour son usinage direct en 5 axes positionné sur MOCN, nous proposons une méthode de calcul de visibilité réelle en trois étapes qui prend en compte la géométrie de l'outil (visibilité initiale), la collision avec le nuage de points (visibilité globale), et l'accessibilité machine (visibilité réelle) [MAKKI et al. 2008b] (figure 3.19).

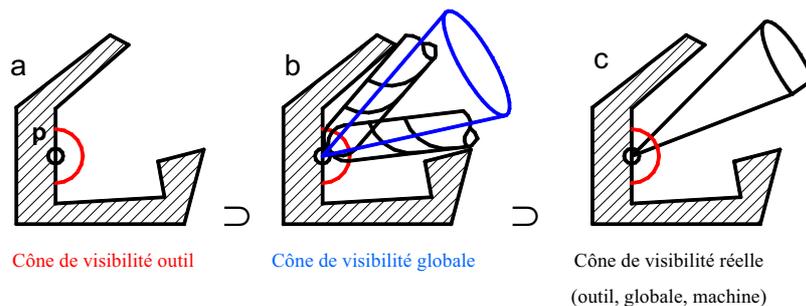


Figure 3.19 : a-Visibilité initiale, b-Visibilité globale, c-Visibilité réelle

Nous basons notre travail sur la méthode proposée précédemment au LURPA. Il s'agit d'une méthode de calcul de la visibilité basée sur la discrétisation de l'espace. Selon cette approche, la visibilité est calculée selon les étapes suivantes :

- calcul de la visibilité outil d'un outil hémisphérique pour lequel on choisit un angle de visibilité $v \in [0, v_1]$ (figure 3.22) considérant que l'usinage pour $v = 0^\circ$ dégrade l'état de la surface (vitesse de coupe égale 0).
- calcul de la visibilité globale permettant de contrôler les collisions entre la partie cylindrique du corps de l'outil et le nuage de points.

Dans cette méthode l'accessibilité de la machine n'est pas prise en compte, ni la collision entre le porte outil et le nuage de points, le brut et les moyens de fixation. Nous proposons d'ajouter cette étape indispensable au découpage technologique et topologique du nuage pour l'usinage en 5 axes positionné. La figure 3.20 présente les différentes étapes de l'approche que nous proposons :

- Calcul de la visibilité outil (initiale),
- Calcul de la visibilité globale (gestion des collisions avec le nuage, le brut, les moyens de fixation),
- Calcul de la visibilité réelle (accessibilité machine).

A l'issue de cette étape, une matrice de visibilité est construite (figure 3.20).

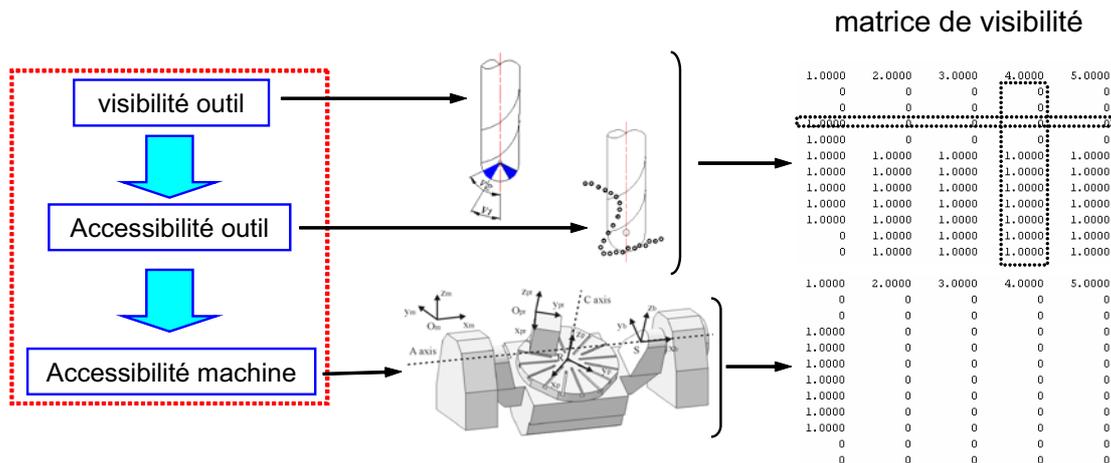


Figure 3.20 : Etapes de calcul de la visibilité réelle

3.3.1. Visibilité outil (initiale)

Après avoir calculé la normale pour un nombre n de points du nuage ($n \ll N$), compte tenu de l'effet de filtrage de la méthode de calcul de la normale par lancer de sphère, nous discrétisons l'espace. La sphère unitaire est discrétisée selon les coordonnées sphériques ϕ et θ . La valeur du pas de discrétisation de ces deux angles détermine la finesse de la discrétisation. Le résultat de cette étape est une matrice de discrétisation (Mat_disc) de l'espace qui contient les coordonnées sphériques et les cosinus directeurs des directions associées (Dir_disc) (figure 3.21).

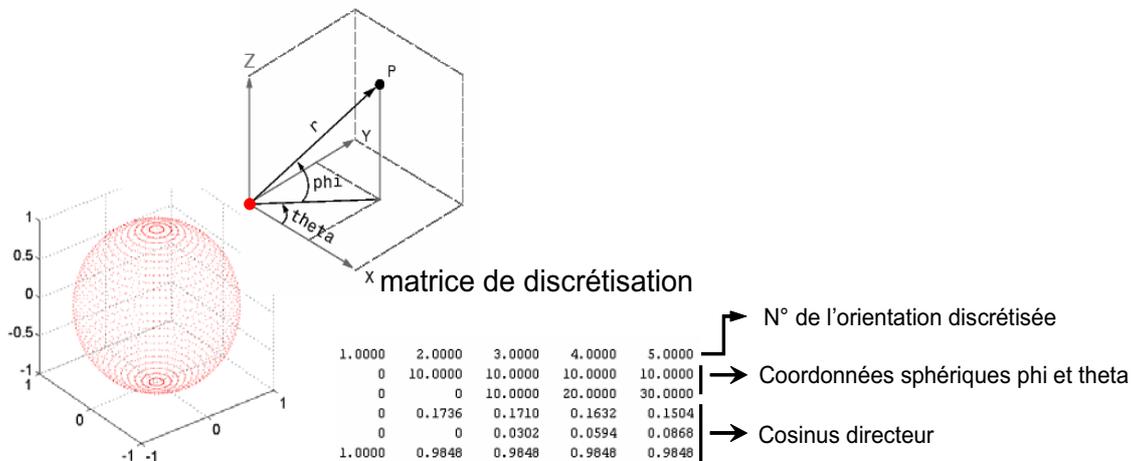


Figure 3.21 : Matrice de discrétisation de l'espace

Pour chaque point P_i , un cône de visibilité dit initial est construit dont le sommet est le point concerné, l'axe est la normale au point concerné et l'angle du cône est directement lié à la géométrie de l'outil adopté pour l'usinage.

L'angle v de visibilité maximum d'un outil est donné pour un outil cylindrique par $v_{max} = 0^\circ$, pour un outil hémisphérique $v_{max} = 90^\circ$, et pour un outil torique $0^\circ < v_{max} < 90^\circ$.

Afin d'assurer la qualité de l'usinage, nous posons des critères technologiques concernant le champ de visibilité outil. Nous usinons en finition en utilisant un outil hémisphérique pour lequel la zone coupante est réduite de façon à éviter l'usinage avec un angle $v = 0^\circ$ car la vitesse de coupe est nulle dans ce cas. De façon à éviter l'usinage des zones verticales latéralement par l'outil ce qui laisse des traces sur la surface usinée, nous évitons également l'usinage avec un angle $v = 90^\circ$ (figure 3.22). Ainsi nous définissons un intervalle d'angles admissibles $[v_1, v_2]$ tel que $(v_1 \geq 0^\circ)$ et $(v_2 \leq 90^\circ)$. La figure 3.22 présente les différentes étapes de l'association d'un cône de visibilité pour le point P_i .

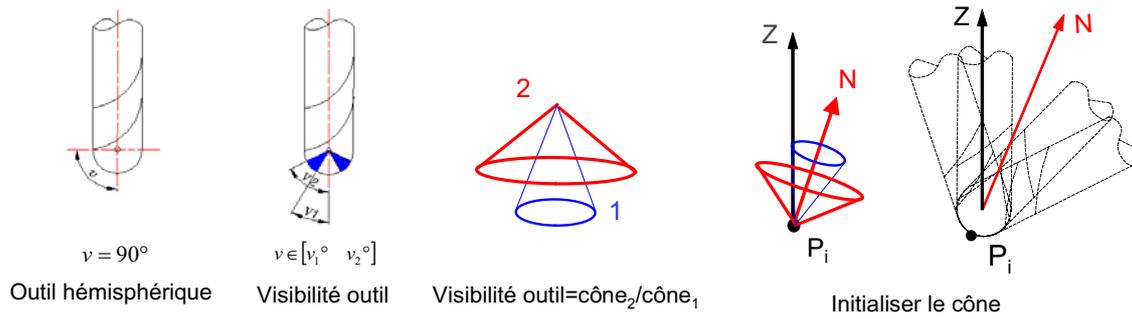


Figure 3.22 : Association d'un cône de visibilité outil

Ainsi un cône de visibilité outil pour un point P_i est l'ensemble des orientations de l'espace discrétisé contenues dans l'intervalle angulaire $[v_1, v_2]$ associé au point concerné.

A partir de ces informations, nous construisons une matrice de visibilité outil (figure 3.23). Elle est structurée de manière à ce que chaque ligne de la matrice corresponde à un cône de visibilité d'un point et que chaque colonne définisse si un point est visible ou non selon l'orientation associée. Un point visible est codé par 1 et un point non visible est codé par 0.

						N° de l'orientation				
0	0	0	0	0	0	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000
4.1948	0.0488	37.7563	0.1104	0.0013	0.9939	0	0	0	0	0
8.8963	-0.0186	36.9112	0.2343	-0.0005	0.9722	0	0	0	0	0
13.4224	0.0023	35.5658	0.3531	0.0001	0.9356	1.0000	0	0	0	0
17.8251	-0.0362	33.5619	0.4691	-0.0010	0.8832	1.0000	0	0	0	0
21.8703	0.0315	31.0459	0.5759	0.0008	0.8175	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
25.5650	0.0285	28.0928	0.6730	0.0008	0.7396	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
28.8756	-0.0153	24.6606	0.7604	-0.0004	0.6494	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
31.7647	-0.0241	20.9043	0.8353	-0.0006	0.5497	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
34.1112	-0.0100	16.6697	0.8985	-0.0003	0.4391	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
35.9768	-0.0129	12.3230	0.9460	-0.0003	0.3240	0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
37.2129	0.0466	7.7543	0.9790	0.0012	0.2040	0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Les coordonnées de points **Les composants des normales** • une ligne → un cône de visibilité d'un point
 • un colonne → un paquet d'une orientation

Figure 3.23 : Matrice de la visibilité outil

Algorithme 2 : Calcul de visibilité outil

Entrées :

Nuage de points avec les normales associées *norm_data* : $[X_i Y_i Z_i N_{xi} N_{yi} N_{zi}]$

Les deux pas sphériques de la discrétisation de l'espace ϕ et θ

L'intervalle de visibilité outil hémisphérique $v=[v_1 v_2]$

Sortie :

La matrice de visibilité initiale (visibilité outil)

Algorithme :

Générer la matrice de discrétisation de l'espace *Mat_disc*

Pour chaque point de la matrice *norm_data*

Pour toutes les directions discrétisées

 Chercher toutes les directions discrétisées comprises dans l'intervalle de visibilité outil, (l'axe du cône est la normale au point concerné)

Fin Pour

Fin Pour

3.3.2. Visibilité globale

Après avoir calculé la visibilité outil de chaque point, nous ajoutons maintenant une deuxième contrainte essentielle, qui concerne la collision entre le corps de l'outil et le nuage de points voisins pour chaque orientation discrétisée de chaque cône. On ne cherche pas dans cette étape à tester l'interférence entre la partie coupante de l'outil (demi sphère dans notre cas) et le nuage de points, car nous allons l'éviter grâce à la méthode de posage de l'outil sur le nuage lors la génération des trajectoires en finition, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2.

Dans cette étape on vérifie pour chaque orientation discrétisée contenue dans chaque cône discrétisé de visibilité outil et pour chaque point, s'il y a de collision entre le corps de l'outil et le nuage de points. Si, pour une orientation donnée, un point du nuage voisin au point considéré appartient au cylindre de diamètre D , diamètre de l'outil, alors l'orientation associée dans le cône de visibilité en question est éliminée ; nous remplaçons le 1 par 0. La matrice de la visibilité associée est présentée sur la figure 3.24.

Algorithme 3 : Calcul de visibilité globale

Entrées :

Matrice de la visibilité outil **MAT_VIS_OUT**

Nuage de points avec les normales associées, matrice norm_data : **[Xi Yi Zi Nxi Nyi Nzi]**

Diamètre de l'outil hémisphérique utilisé en finition **D_OUT**

Sortie :

Matrice de visibilité globale

Algorithme :

Pour chaque point de la matrice **norm_data**

Pour toutes les directions discrétisées du cône concerné

Vérifier la collision entre le corps outil et le nuage et enregistrer les résultats dans la matrice MAT

Si la matrice MAT est vide

Le point concerné est visible selon la direction discrétisée en question

Sinon

Le point concerné n'est pas visible selon la direction discrétisée en question, on remplace alors 1 par 0

Fin Si

Fin Pour

Fin Pour

0	0	0	0	0	0	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000
4.1948	0.0488	37.7563	0.1104	0.0013	0.9939	0	0	0	0	0	0
8.8963	-0.0186	36.9112	0.2343	-0.0005	0.9722	0	0	0	0	0	0
13.4224	0.0023	35.5658	0.3531	0.0001	0.9356	1.0000	0	0	0	0	0
17.8251	-0.0362	33.5619	0.4691	-0.0010	0.8832	1.0000	0	0	0	0	0
21.8703	0.0315	31.0459	0.5759	0.0008	0.8175	1.0000	0	0	0	0	0
25.5650	0.0285	28.0928	0.6730	0.0008	0.7396	1.0000	0	0	0	0	0
28.8756	-0.0153	24.6606	0.7604	-0.0004	0.6494	1.0000	0	0	0	0	0
31.7647	-0.0241	20.9043	0.8353	-0.0006	0.5497	1.0000	0	0	0	0	0
34.1112	-0.0100	16.6697	0.8985	-0.0003	0.4391	1.0000	0	0	0	0	0
35.9768	-0.0129	12.3230	0.9460	-0.0003	0.3240	0	0	0	0	0	0
37.2129	0.0466	7.7543	0.9790	0.0012	0.2040	0	0	0	0	0	0

• un paquet de points visible globalement selon l'orientation associée N°1.

• un cône de visibilité globale et discrétisé

Figure 3.24 : Matrice de visibilité globale

3.3.3. Visibilité machine

Après avoir calculé la visibilité globale, nous calculons la visibilité réelle. Dans cette étape nous intégrons l'influence du modèle géométrique de la machine (l'accessibilité machine) sur la faisabilité de la pièce sur la machine. La faisabilité d'une pièce ou d'un nuage de points sur une machine signifie la possibilité d'accessibilité de l'axe de l'outil au point concerné en respectant les contraintes dues à la visibilité outil et à la visibilité globale.

Pour réaliser cette étape et à partir du modèle géométrique de la machine adoptée, nous allons vérifier pour chaque direction de l'espace discrétisé si elle appartient au champ de visibilité de la machine ou non. L'espace étant discrétisé selon les deux angles phi et teta, la figure 3.25 montre l'espace discrétisé réduit selon le modèle géométrique de la machine dont nous disposons : A compris entre -30° et 120° et C entre 0° et 360° .

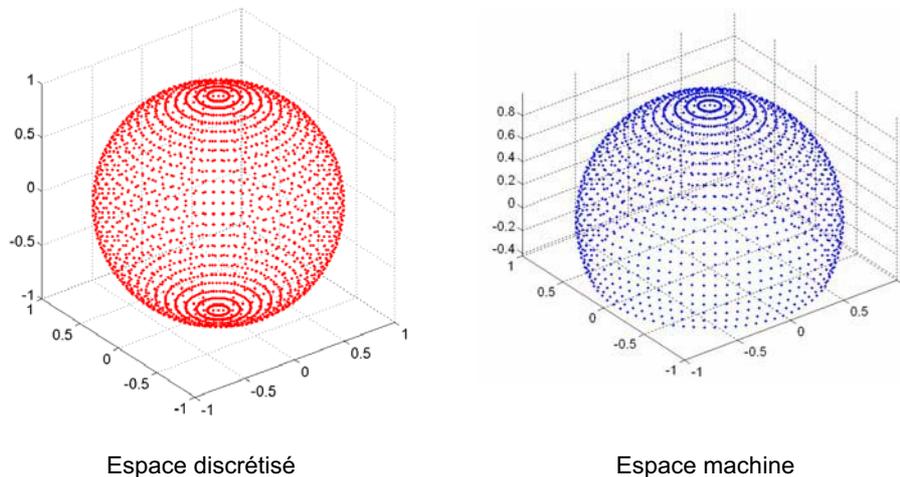


Figure 3.25 : Réduction de l'espace discrétisé

Après l'élimination des orientations non accessibles par la machine pour une pièce posée, nous allons avoir pour chaque point un cône de visibilité réelle. La matrice de visibilité réelle associée possède la structure suivante (figure 3.26).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	→ Numéro de l'orientation
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

↓ Numéro de point

• une ligne → un cône de visibilité réelle d'un point
• un colonne → un paquet d'une orientation

Figure 3.26 : Matrice de visibilité réelle (complète)

3.4. Applications

La méthode de calcul de visibilité réelle a été implémentée sous MATLAB. Le modèle géométrique utilisé pour vérifier l'accessibilité de la machine est celui de la machine d'usinage MIKRON UCP 710 du laboratoire. La figure 3.27 résume les différentes étapes de calcul de la visibilité réelle ainsi que les différents paramètres et informations nécessaires au calcul : le nuage de points avec les cosinus directeurs de la normale de chaque point, les deux pas angulaires pour la discrétisation de l'espace, le diamètre de l'outil hémisphérique avec le champ de visibilité outil souhaité $[v_1, v_2]$, le modèle géométrique de la machine outil utilisé.

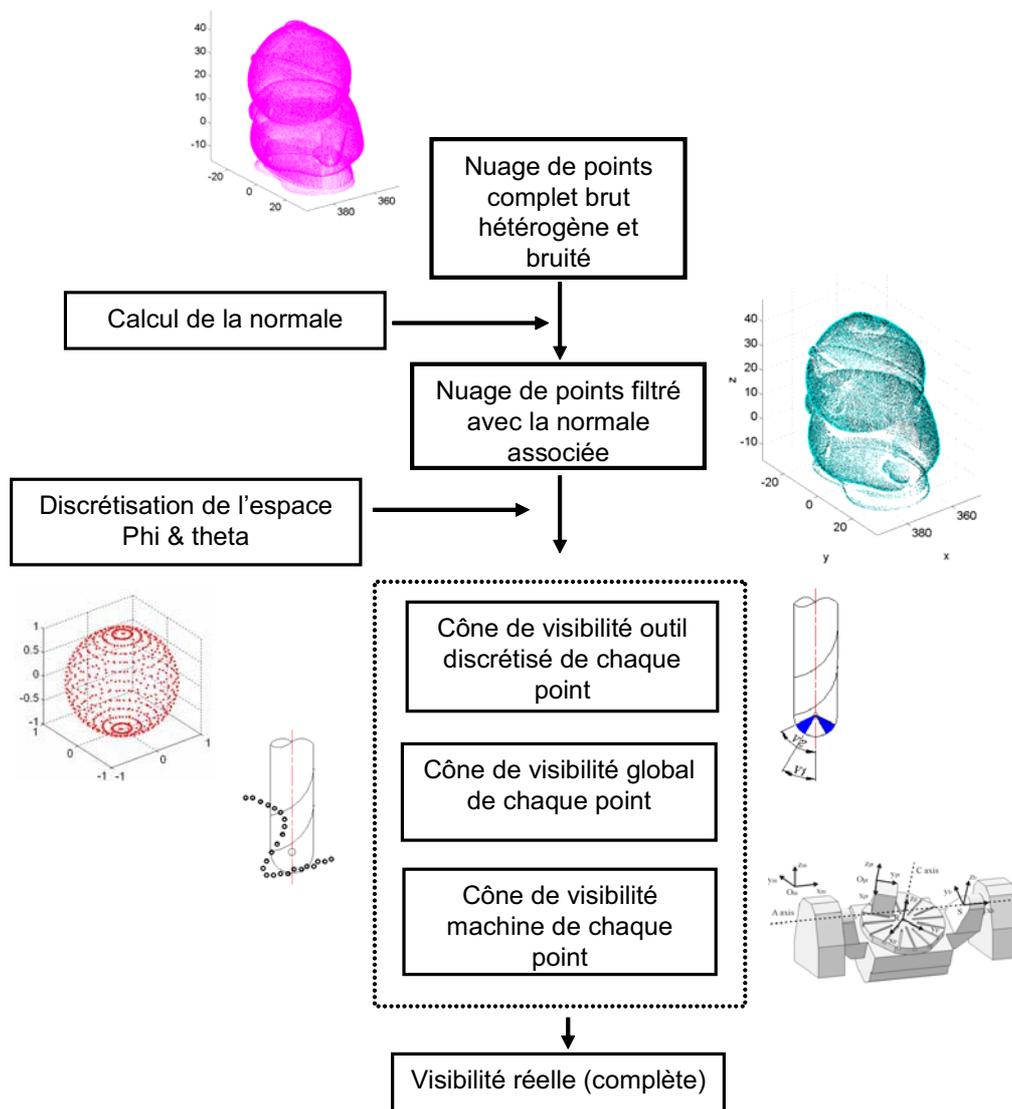


Figure 3.27 : Etapes de calcul de la visibilité réelle

A titre d'exemple, la figure 3.28 présente l'évolution de la sphère de visibilité outil vers une sphère réduite de visibilité réelle pour un point P_1 , situé entre la bouche et le nez du nuage de points du masque. Le champ de visibilité outil est pris entre 10° et 80° ; la discrétisation de l'espace est effectuée selon deux pas 10° et 20° ; l'outil utilisé lors du calcul de la visibilité globale est un outil boule de diamètre $d = 8$ mm.

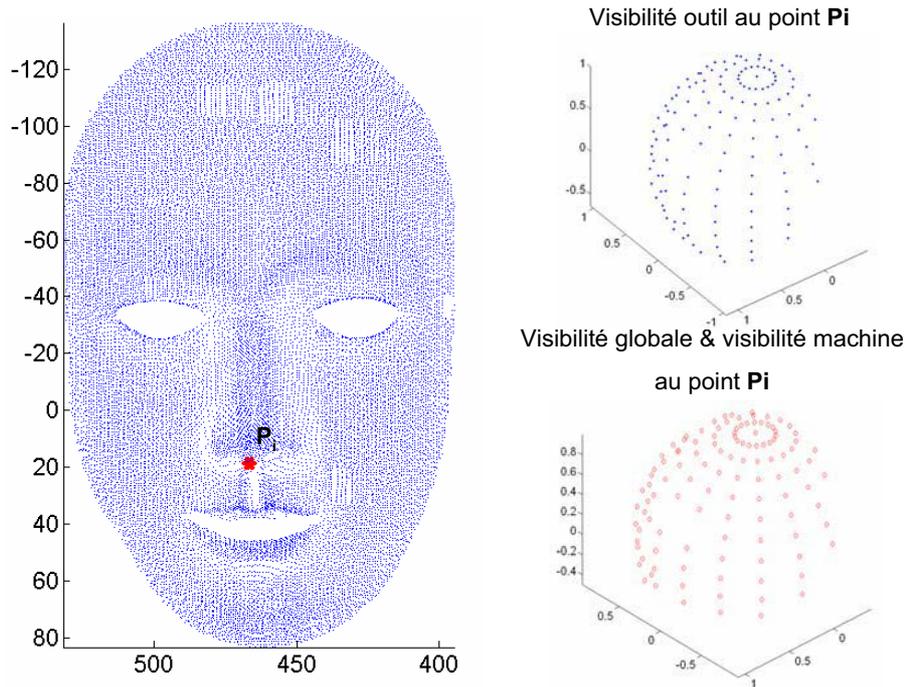


Figure 3.28 : Visibilité d'un point

3.5. Synthèse concernant le calcul de visibilité

Le calcul du cône de visibilité a été effectué pour chaque point du nuage pour lequel la normale a été déterminée par la méthode de lancer de sphère. Ainsi, la visibilité n'est pas été calculée pour les points non accessibles par la sphère utilisée pour la méthode de calcul de la normale. Le cône de la visibilité calculé est discrétisé, il prend en compte la visibilité de l'outil, la collision avec le nuage de points (la visibilité globale), et la visibilité machine.

Comme nous allons le voir dans la suite, la stratégie de la construction de la matrice de visibilité réelle facilite et accélère la recherche des paquets de groupement lors du partitionnement du nuage. Les paramètres influents sur la rapidité de la méthode sont les deux pas de la discrétisation de l'espace phi et theta.

4. Groupement

Dans la méthode que nous avons proposée précédemment, le cône de visibilité discrétisé, composé de plusieurs orientations candidates, permettait de déterminer l'orientation commune d'outil usinant un maximum de points voisins. A partir de cette orientation, les points voisins candidats étaient groupés en un paquet jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de points usinables par cette orientation. On recommence ensuite avec les autres orientations candidates jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de points à usiner, conduisant ainsi à des paquets de points usinables suivant un nombre limité d'orientations de l'outil. Seuls les paquets les plus conséquents sont conservés. Cette méthode de groupement a été appliquée sur des surfaces tendues avec réussite, mais elle est moins efficace sur les surfaces complexes, car l'orientation qui regroupe le plus grand nombre de points n'est pas forcément celle qui conduit à l'obtention d'un ou deux paquets contenant un grand nombre de points.

A partir de cette approche [BRETEAU et al. 2006] proposent une méthode qui se compose de trois étapes principales :

- détermination des paquets pour les directions d'outil suivant z , x , $-x$, y et $-y$ (sans optimisation du posage de la pièce dans l'espace machine et sans optimisation de choix des orientations), en utilisant les cônes de visibilité discrétisés,
- définition de paquets avec les points restant selon la méthode précédente à partir d'un nombre minimal de points pour la constitution d'un paquet,
- ajout des points isolés restants aux paquets déjà existants.

L'objet de cette troisième étape est de traiter les points isolés. La solution retenue consiste à ajouter chaque point restant au paquet qui contient le plus grand nombre de ses voisins. Ce choix ne pose pas de problème majeur car la différence d'orientation entre la normale à ce point et celle de ses voisins appartenant au paquet est en général suffisamment faible pour que le point puisse être usiné suivant cette direction (figure 3.29).

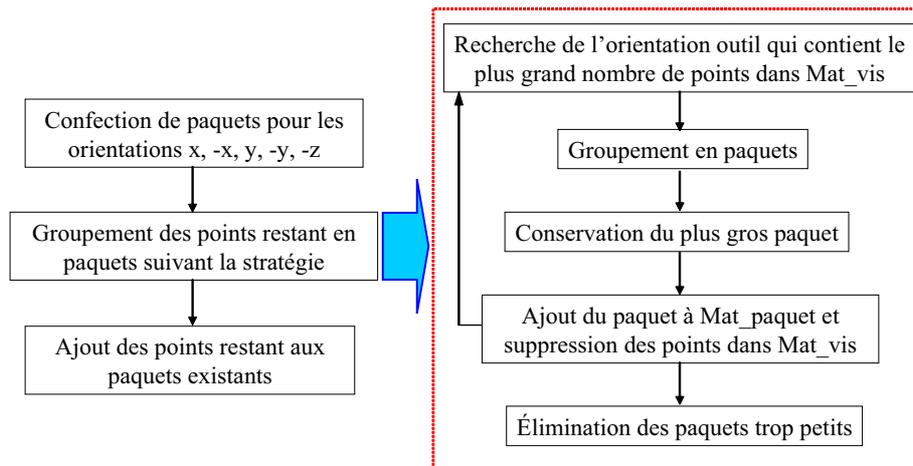


Figure 3.29 : Groupement en paquets

Dans cette méthode, le choix des 5 orientations x , $-x$, y , $-y$, z est en fait lié à l'étape de numérisation. En effet, ces orientations correspondent aux orientations qui ont permis de numériser entièrement la pièce, l'hypothèse sous-jacente étant que si les points sont accessibles par le capteur laser ils doivent l'être par l'outil. Cette étape n'est qu'une initialisation et devrait être complétée par une optimisation soit du choix des orientations de découpage, soit de la minimisation de la longueur des lignes de recouvrement.

Dans le paragraphe suivant nous présentons une méthode de groupement automatique et simple à mettre en œuvre, basée sur le traitement et l'analyse de la matrice de visibilité réelle.

4.1. Approche envisagée

Nous pouvons structurer le contexte de notre problématique de partitionnement automatique de nuage de points comme suit : comment peut-on partitionner un nuage de points en paquets afin que la longueur des lignes de recouvrements lors de l'usinage en 5 axes positionné soit minimum pour garantir la qualité visuelle et géométrique de la copie ?

Afin de répondre à cette question nous considérons la fonctionnelle à optimiser (minimiser) suivante :

La fonctionnelle à optimiser (minimiser) :

- Longueur des lignes de recouvrements.

Respecter les contraintes :

- visibilité outil (faible),
- non interférence (élevée),
- visibilité machine (élevée),
- taille minimum de points pour une orientation donnée formant un paquet,
- nombre maximum de paquets,
- Zones de recouvrements interdits (dans les zones fonctionnelles).

Quelles sont les variables :

- la direction des posages,
- le nombre de posages (on cherche toujours à le minimiser).

La méthode proposée de découpage est détaillée sur la figure 3.30 où nous présentons l'ensemble des étapes nécessaires pour la préparation de l'usinage en 5 axes positionné.

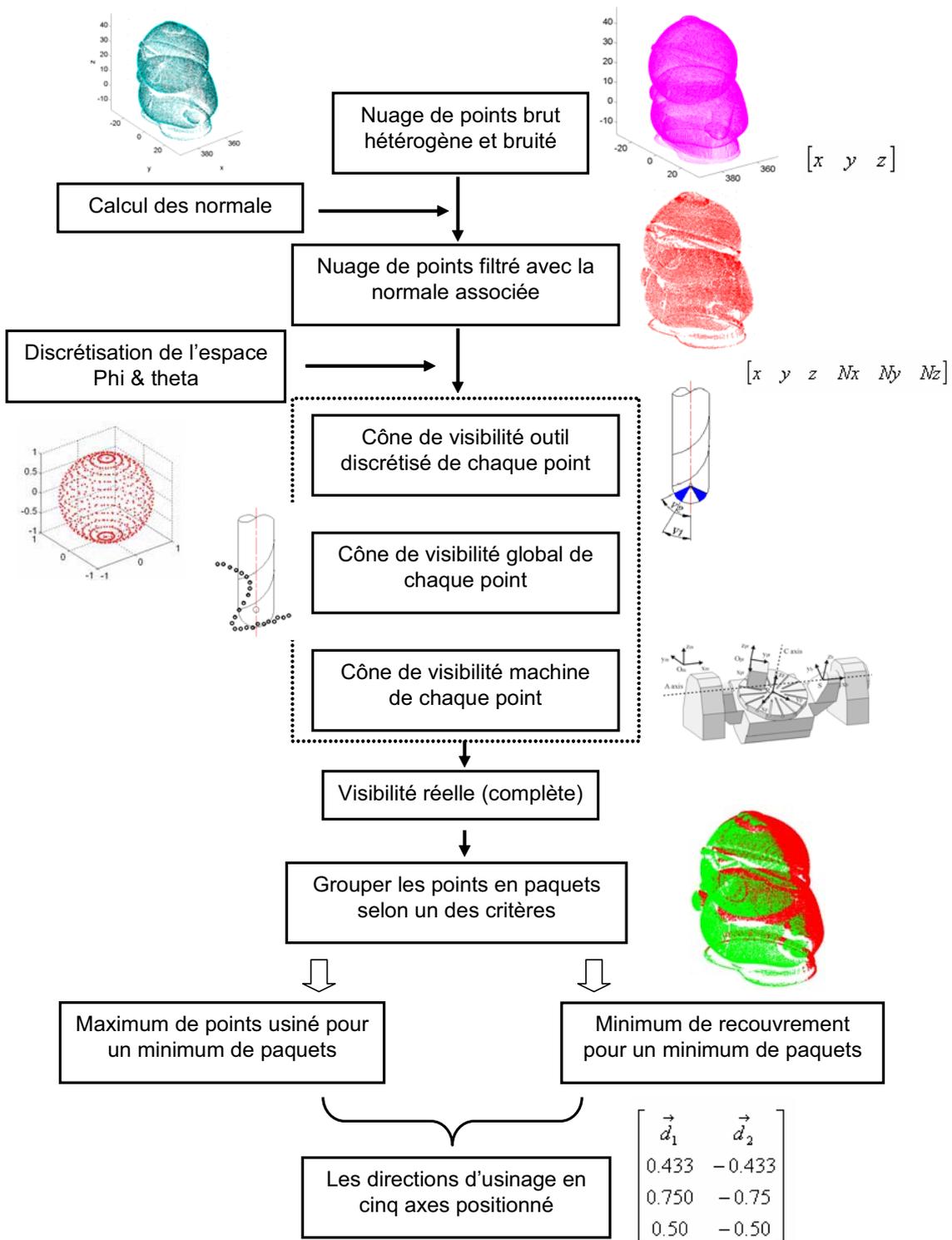


Figure 3.30 : Préparation à l'usinage 5 axes positionné

A partir de la matrice de visibilité réelle, nous proposons de regrouper les points en paquets en respectant les critères suivants :

- la taille des paquets est la plus grand possible,
- le nombre de paquets est minimal,
- le recouvrement est minimal.

Concernant la première contrainte, on fixe un nombre minimal autorisé de points visibles pouvant constituer un paquet, nv_{mini} . On élimine ainsi dans la matrice de visibilité toutes les orientations discrétisées qui n'assurent pas un minimum de points visibles sur l'ensemble du nuage de points, ce qui conduit à une matrice de visibilité filtrée (figure 3.32).

Pour ce qui est de la minimisation du nombre de paquets d'usinage, un nombre maximal peut être donné par l'utilisateur, np_{max} . A partir de la matrice, nous proposons de générer les possibilités de groupement entre les différents paquets. Pour cela nous calculons les combinaisons entre toutes les orientations à partir du nombre maximal de paquets. Soit n_{comb} , le nombre de combinaisons possibles, et n_{ori} , le nombre d'orientations discrétisées, le nombre de combi-

naisons n_{comb} est donné par $C_{np_{\text{max}}}^{n_{\text{ori}}}$.

Le nombre maximal de paquets est un nombre qui peut évoluer jusqu'à avoir le nombre de paquets qui assure l'usinabilité complète du nuage de points. Par exemple pour 12 orientations discrétisées de l'espace, et $np_{\text{max}} = 1$, nous trouvons $n_{\text{comb}} = 12$. Ces combinaisons sont les orientations selon lesquelles nous cherchons à usiner le nuage en un seul paquet (dans la limite de la discrétisation effectuée). Dans ce cas là nous cherchons l'orientation unique qui assure l'usinabilité complète du nuage de points. Autrement dit, la colonne de la matrice qui a le maximum de 1. Si nous arrivons à trouver cette orientation, nous pouvons dire que le nuage de points est usinable selon une seule orientation. Sinon nous augmentons le nombre de paquets, $np_{\text{max}} = 2$ et $n_{\text{comb}} = 66$. Nous cherchons parmi les 66 combinaisons la combinaison (le couple de 2 orientations) qui assure l'usinabilité complète du nuage et tout en minimisant le nombre de points de recouvrement. Autrement dit, nous cherchons au début la combinaison qui assure un minimum de recouvrement. Ensuite, nous vérifions si cette combinaison assure l'usinabilité quasi complète du nuage de points. Si nous la trouvons, nous arrêtons l'augmentation de nombre des paquets. La figure 3.31 présente la matrice des combinaisons dans le cas de 2 paquets et 12 orientations discrétisées de l'espace.

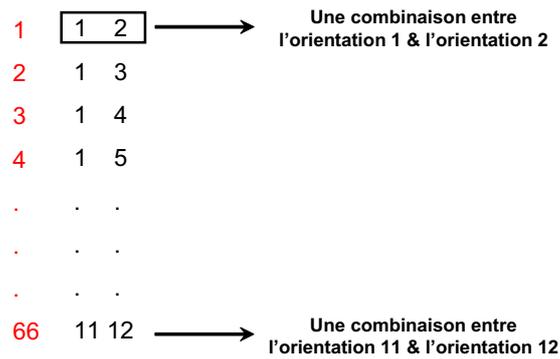


Figure 3.31 : Matrice des combinaisons, $np_{max} = 2$

La figure 3.32 présente une structuration d'une matrice de groupement. Cette matrice donne sur chaque colonne une proposition de combinaison. Par exemple, pour le cas de deux paquets nous trouvons pour chaque colonne (combinaison) le résultat de la somme des colonnes associées aux deux orientations. Nous pouvons dire que la valeur 0 signifie que le point n'est pas visible selon cette combinaison, puisque non visible selon la première orientation et selon la deuxième orientation. La valeur 1 signifie que le point est visible selon une des deux orientations de la combinaison. La valeur 2 signifie que le point associé est visible selon les deux orientations de la combinaison et il définit un point de recouvrement.

		Les combinaisons																
		1	1	1	1	1	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	11	
		2	3	4	5	6	7	8	9	.	.	.	.	.	.	.	12	
Point.1		0	0	1	0	1	0	0	1		1							0
Point.2		2	1	0	0	1	0	1	1	1	1							0
		1	1	2	1	2	2	1	1	1	1							1
		2	1	2	0	1	0	0	2	0	2							0
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							1
		2	2	1	0	0	1	1	1	1	1							2
		1	2	1	1	1	2	1	2	1	2							1
Point.n		2	2	1	2	1	1	1	2	1	2							1

Figure 3.32 : Matrice de groupement

Selon cette matrice nous pouvons dire que la combinaison qui assure un maximum de points usinés par exemple est la huitième combinaison $\{1, 9\}$. Pour cette combinaison on ne trouve pas de zéros. Par contre il y a trois points de recouvrement. La septième combinaison qui regroupe les orientations $\{1, 8\}$ assure un minimum de recouvrement mais n'assure pas l'usinabilité complète du nuage de points car nous avons deux zéros. A partir de cette matrice

de groupement, nous sommes capables de trouver une combinaison d'orientations avec un minimum de recouvrement ou une combinaison qui inclut le maximum de points usinés par paquet.

Compte tenu de la discrétisation de l'espace, de la complexité de la forme numérisée et du bruit de numérisation, on n'arrivera jamais à regrouper tous les points dans un nombre limité de paquets. Il restera toujours des points ou des petits paquets qui ne font pas partie des grands paquets trouvés. C'est pourquoi nous proposons un critère supplémentaire de réintégration de ces points avec les paquets les plus proches.

Après avoir trouvé les paquets d'usinage en fonction d'un pourcentage admissible p_a de points groupés selon la combinaison des directions d'usinage, nous ré-intégrons les points non groupés selon la démarche suivante :

1. Détermination du paquet auquel le point est ajouté par calcul de la plus petite distance de Hausdorff (distance entre le point non groupé et le point le plus proche dans chaque paquet).

2. Vérification de la visibilité globale. Après avoir tester la possibilité de l'intégration on distingue deux cas : soit le point est intégrable dans le paquet le plus proche, soit il ne l'est pas. Dans ce cas là le point ne sera pas usiné correctement (il restera une sur épaisseur).

Il faut noter aussi que l'intégration de ce point avec le paquet le plus proche est toujours possible et n'est pas strictement interdit, car la collision entre le nuage et l'outil hémisphérique est gérée lors la génération des trajectoires en finition. La seule conséquence est la baisse de fidélité à la forme à cause de l'accessibilité réduite de l'outil.

La description de l'algorithme de groupement de nuage de points est présentée ci-dessous.

Algorithme 4 : Groupement de points en paquets

Entrées :

Matrice de visibilité réelle **MAT_VIS_MAC** ; Nombre maxi des paquets **np_{max}** ; Pourcentage de points groupés pour arrêter le calcul **pa**

Sortie :

Nombre maxi de paquets **np** ; Les paquets **paquet_i** ; Directions d'usinage **d_i**

Algorithme :

Pour toutes les colonnes de la matrice de visibilité réelle

Si il existe une direction qui assure l'usinabilité du pourcentage **pa**

 Sortir cette direction **d_i** comme une direction unique d'usinage

 Arrêter les calculs

Fin Si

Pour **np = 2** jusqu'à **np_{max}**

 Calculer toutes les combinaisons pour **np** paquets

Pour toutes les combinaisons trouvées

Si il existe une combinaison qui assure l'usinabilité du pourcentage **pa** avec minimum de recouvrement

Pour tous les points non groupés

 Vérifier la possibilité d'intégration de chaque point non groupé avec le paquet le plus proche en calculant la distance de Hausdorff

Si le point est intégrable (pas de collision)

 Le point est ajouté au paquet

Si non

 Le point n'est pas intégrable (on ne l'ajoute pas)

Fin Si

Fin Pour

 Sortir les paquets avec les directions d'usinage

Si non

 Continuer

Fin Si

Fin Pour

Fin Pour

4.2. Validation de la méthode de groupement et applications

Afin de valider notre approche formellement nous proposons de l'appliquer sur un nuage de points simple, généré mathématiquement et sans bruit à partir d'une demi sphère. Le nuage est composé de 2537 points et la densité surfacique du nuage n'est pas uniforme. Nous calculons la normale sur tout le nuage, par $\overrightarrow{C_0P_i}$, C_0 est le centre de la sphère et P_i est le point en question (figure 3.33).

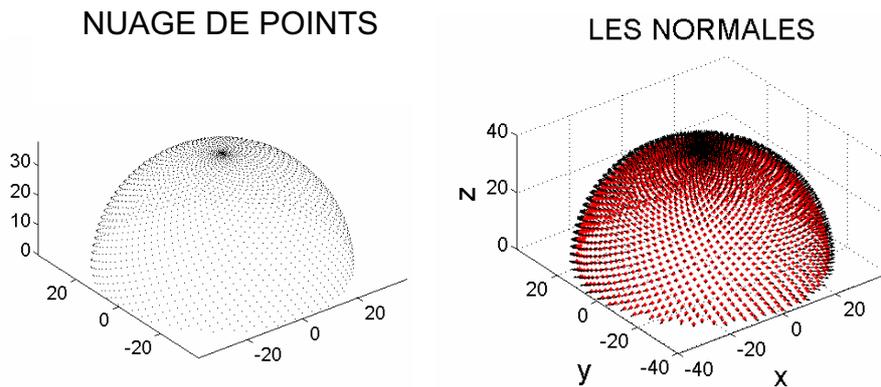


Figure 3.33 : Nuage de points et normales associées

Ensuite, nous calculons la matrice de la visibilité réelle avec des pas de discrétisation $\phi = 10^\circ$ et $\theta = 10^\circ$. Le champ de visibilité outil hémisphérique déclaré est compris entre 10° et 80° , le diamètre de l'outil hémisphérique est de 10 mm, et la machine outil adoptée est celle du laboratoire décrite précédemment.

Les pas de discrétisation de l'espace conduisent à 648 orientations de discrétisation, orientations candidates pour l'usinage en 5 axes positionné. A partir des orientations discrétisés, nous calculons toutes les combinaisons de groupement possibles en déterminant à chaque fois un nombre de paquets souhaité pour effectuer le groupement.

4.2.1. Groupement en un seul paquet

Si nous testons la possibilité de groupement en un seul paquet, nous obtenons 648 possibilités de groupement selon chaque orientation de discrétisation. L'analyse des combinaisons montre que le paquet le plus grand usinable selon une orientation est le paquet associé à l'orientation $[0\ 0\ 1]$.

Selon les résultats nous trouvons que les points du contour du nuage et le sommet de la demi sphère ne sont pas visibles selon l'orientation $[0\ 0\ 1]$, compte tenu du champ réduit de la visibilité outil (figure 3.34).

Les points non groupés sont ré-intégrés dans le paquet selon la démarche décrite précédemment, ce qui revient à usiner ces points avec un champ de visibilité outil complet de 0° à 90° .

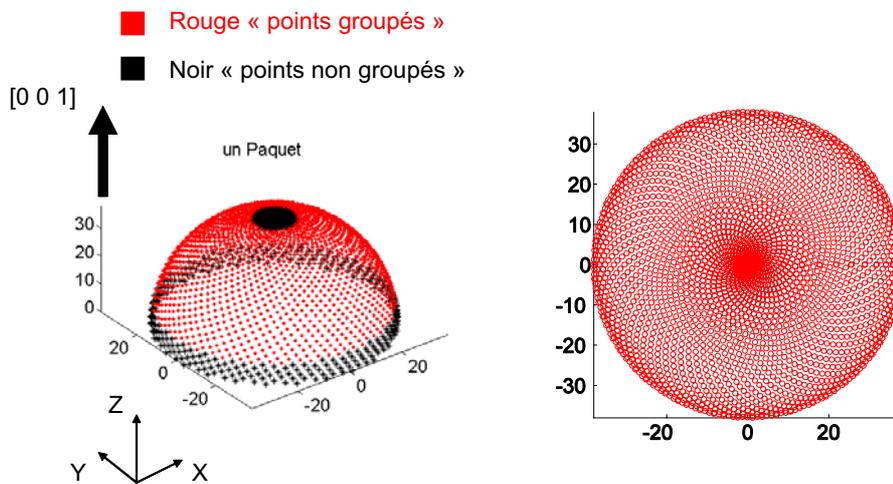


Figure 3.34 : Groupement en un seul paquet

4.2.2. Groupement en deux paquets

Si $np_{\max} = 2$, alors $n_{\text{comb}} = 152076$. La combinaison qui assure un minimum de recouvrement (nb_{mini} de 2 dans la matrice de regroupement) avec $p_a = 95\%$ est la combinaison suivante : $[0.5 \ 0 \ 0.866 ; -0.5 \ 0 \ 0.866]$.

Les points en vert forment le paquet N°1, en rouge forment le paquet N°2, et en noir les points non groupés. Ces points non groupés peuvent être regroupés avec les deux autres paquets en appliquant la notion de la distance de Hausdorff. Nous trouvons finalement deux paquets qui rassemblent tous les points du nuage (figure 3.35).

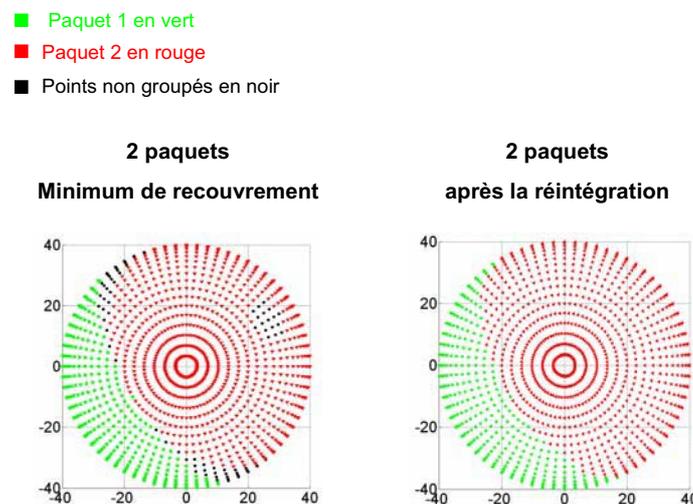


Figure 3.35 : Groupement en deux paquets

4.3. Application

Pour cette application nous utilisons un nuage de points numérisé sur la machine MMT par un capteur laser selon 5 orientations d'une petite figurine de CARTMAN (figure 3.36). Le nombre de points obtenu est de 221746 points. A partir de ce nuage brut et bruité nous calculons la normale par la méthode de lancer de sphère avec trois directions de lancement $[0\ 0\ 1 ; 0\ 1\ 0 ; 0\ -1\ 0]$, en utilisant une sphère de diamètre 7 mm et un pas de la grille 2x2 mm. Nous trouvons la normale sur 24110 des points de l'ensemble du nuage (environ 10%).

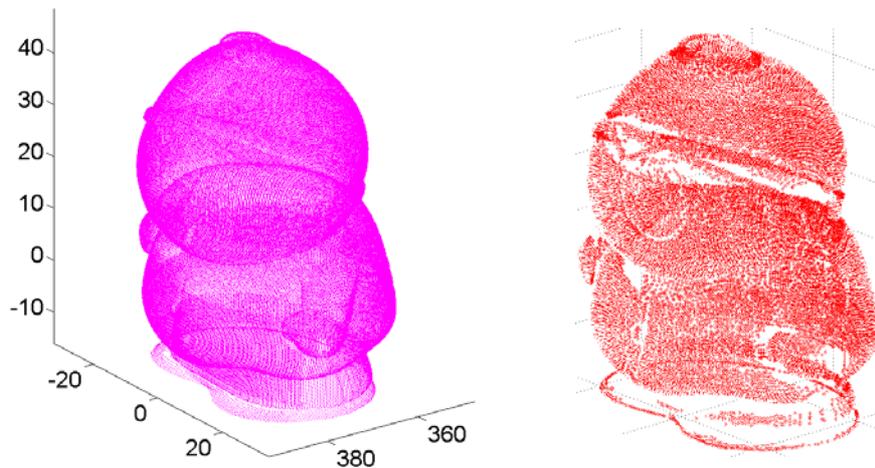


Figure 3.36 : Nuage de points complet et filtré

Ensuite, nous calculons la visibilité réelle de chaque point du nuage de points filtré, avec le pas de la discrétisation de l'espace $\phi = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$, le champ de la visibilité outil étant compris entre 10° et 80° , le diamètre de l'outil hémisphérique lors de l'usinage en finition $D = 8\text{ mm}$.

En essayant de regrouper le nuage en un seul paquet on trouve $n_{\text{comb}} = 43$. La direction optimale trouvée est $[0\ 0\ 1]$. Le nombre de points groupés selon cette orientation est de 9689 sur 24110 points, et le nombre de points non groupés est 14421 (figure 3.37).

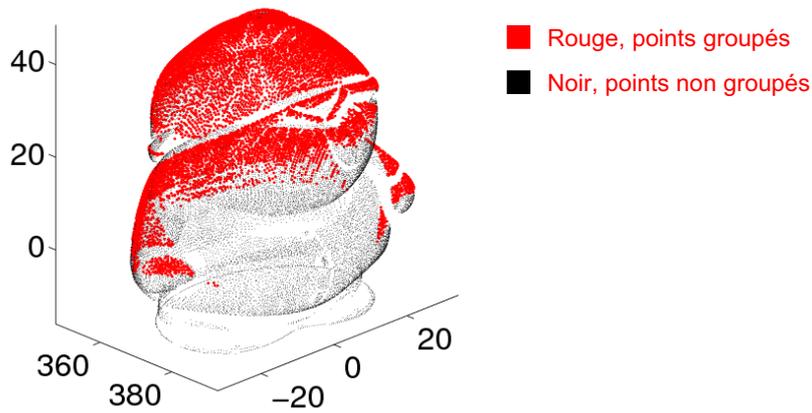


Figure 3.37 : Groupement en seul paquet

En essayant de regrouper le nuage en deux paquets on trouve $n_{\text{comb}} = 666$. En cherchant la combinaison qui regroupe les points avec un minimum de recouvrement avec $P_a = 95\%$, on trouve la combinaison $[-0.433 \ -0.75 \ 0.5 ; 0.433 \ 0.75 \ 0.5]$. La figure 3.38 présente les résultats. Les points en rouge forment le premier paquet, en vert le deuxième paquet, et en noir les points non groupés.

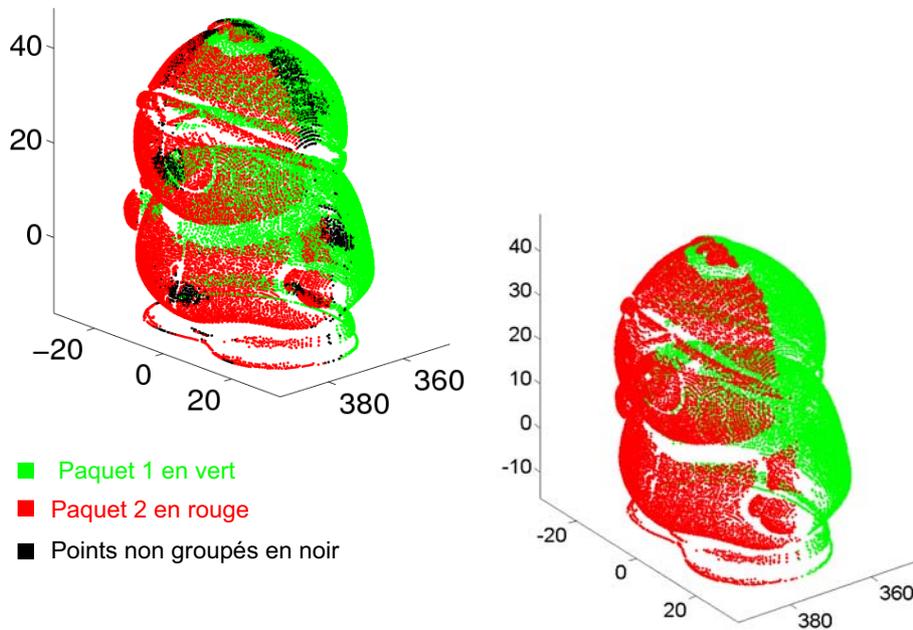


Figure 3.38 : Groupement en 2 paquets, avant et après la réintégration

5. Conclusion

Le découpage automatique d'un nuage de points issu de la numérisation 3D d'objets de formes inconnues est un problème complexe auquel nous avons apporté une solution dans le cadre du copiage en 5 axes positionné. La démarche se décompose en trois étapes :

- calcul de la normale,
- calcul de la matrice de visibilité réelle,
- groupement des points en paquets usinables.

La méthode d'estimation de la normale sur un nuage de points bruité, hétérogène, et de densité variée s'appuie sur le lancer d'une sphère sur le nuage de points. La particularité de notre approche est qu'elle porte sur des formes complexes, numérisées par plusieurs orientations et par balayage. Nous avons évalué les différents paramètres influents ainsi que les performances de la méthode sur divers exemples. Nous avons montré que l'approche est robuste, précise et rapide car elle s'appuie simplement sur le calcul des intersections entre des droites et des sphères. Cette méthode, si elle s'adapte mieux aux formes complexes et fonctionne mieux que l'approche basée sur la voxélisation, est cependant limitée par l'accessibilité de la sphère aux petits détails. De plus la sphère lancée ne touche jamais tous les points de nuage, c'est pourquoi nous avons constaté un effet de filtrage du nuage. Cet effet de filtrage dépend du diamètre de la sphère, de la complexité du nuage, du pas de la grille ainsi que du niveau de bruit du nuage.

Après avoir exposé les approches développées dans la littérature, nous avons présenté une méthode de calcul de la matrice de visibilité réelle d'un nuage de points. Cette méthode est basée sur le calcul de la normale par lancer de sphères. Le calcul du cône de visibilité a été effectué pour chaque point du nuage où la normale est trouvée. Le cône de visibilité calculé est discrétisé et prend en compte la visibilité de l'outil, la collision avec le nuage de points (la visibilité globale), la collision entre la porte outil et le brut, les moyens de fixation, et l'accessibilité machine.

Ensuite, un calcul de différentes combinaisons de découpage est réalisé grâce à la matrice de visibilité réelle calculée précédemment. L'optimisation du choix d'une combinaison est effectué afin de minimiser la longueur des lignes de recouvrement entre les différents paquets

en respectant toujours un nombre minimum de paquets. La méthode proposée ne nécessite pas une modélisation de la surface par des modèles paramétriques ou par une représentation polyédrique du nuage de points. Elle est cependant limitée par le choix des deux pas de discrétisation de l'espace lors de calcul de la visibilité.

Les premières expérimentations de la méthode sur des formes complexes ont conduit à des résultats satisfaisants. Dans le chapitre 4 nous testons la méthode de découpage technologique et topologique pour l'usinage direct en 5 axes positionné d'une rotule de hanche.

Chapitre 4

Application au copiage direct d'une hanche

1. Introduction

Afin de tester la chaîne de copiage direct que nous avons développée, nous avons choisi de l'appliquer sur la partie supérieure d'un fémur humain participant avec le bassin à l'articulation de la hanche (figure 4.1). Le choix de cet objet a été fait pour la complexité géométrique de la surface qui nécessite d'être usinée selon plusieurs orientations, ce qui permet d'évaluer le partitionnement du nuage de points.

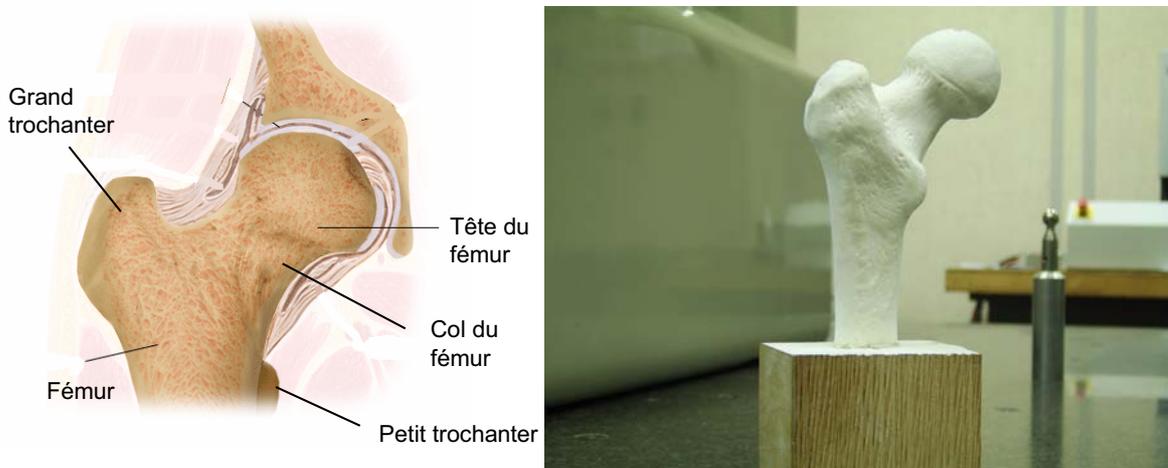


Figure 4.1 : Rotule d'une hanche à numériser

Nous avons numérisé le fémur sur la MMT du laboratoire équipée du capteur Kreon. La numérisation a été effectuée selon 8 orientations différentes du capteur laser (tableau 1).

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
ORIENTATION	A0 B0	A45 B0	A90 B-90	A105 B-180	A90 B-180	A90 B90	A45 B90	A90 B135

Tableau 1: Les orientations de la numérisation

Le nuage de points brut obtenu contient 1033760 points, d'une densité moyenne de 45 points/mm². Il ne contient à priori pas de trous de numérisation. Pour l'application de copiage nous ne retenons que 175000 points et d'une densité moyenne de 7 points/mm² (figure 4.2).

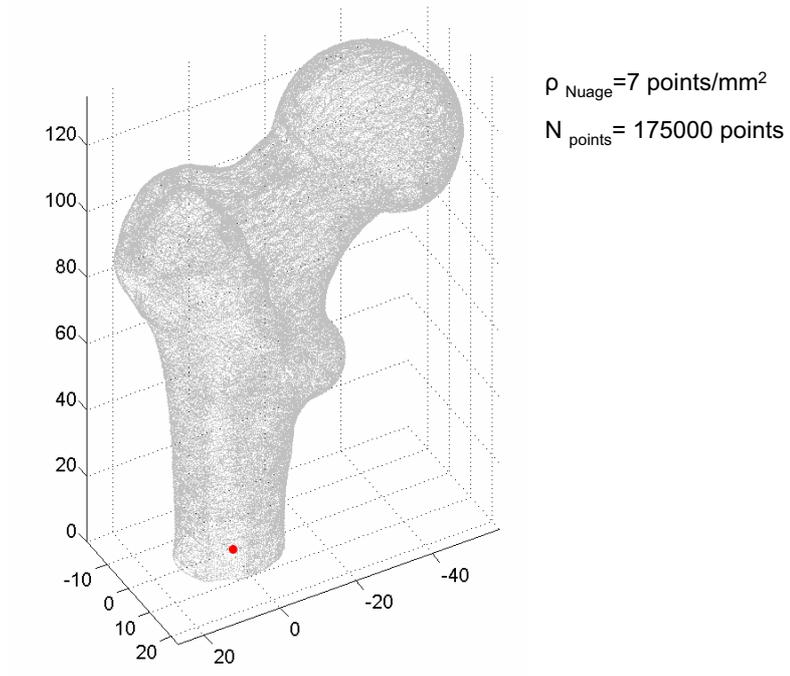


Figure 4.2 : Nuage de points numérisé

2. Partionnement du nuage points

2.1. Calcul de la normale (Algorithme 1, page 76)

La normale est calculée selon l'approche du lancer d'une sphère. La sphère a été lancée selon 3 directions différentes pour assurer un couverture maximale du nuage de points afin de calculer la normale en un nombre maximum de points (figure 4.3). Les deux pas de la grille sont $P_t = 0.5$ mm et $P_l = 0.5$ mm. Le diamètre de la sphère de lancement est de 7 mm, la sphère a été lancée suivant trois directions $[0 \ 0 \ 1; 0 \ 1 \ 0; 0 \ -1 \ 0]$. Le temps de calcul total sur Matlab est d'environ 10 minutes¹.

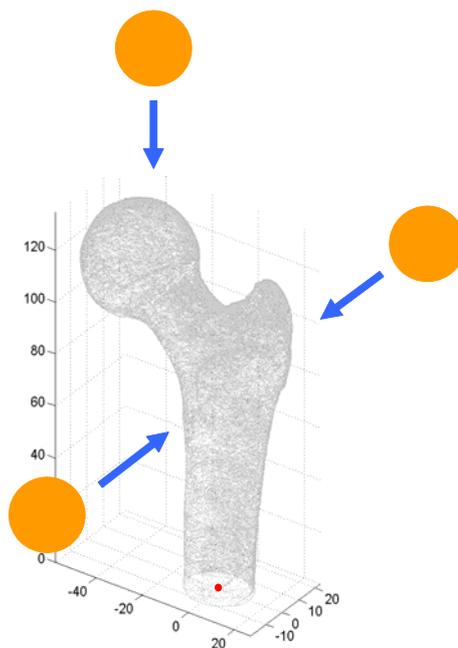


Figure 4.3 : Directions de lancement de la sphère

Comme la sphère lancée ne touche jamais tous les points du nuage, seules 20263 normales sont calculées et arrangées dans une matrice $[X \ Y \ Z \ N_x \ N_y \ N_z]$. Nous obtenons donc un nouveau nuage de points allégé par le filtrage lors du calcul de la normale qui sert de support au calcul de la visibilité réelle. La figure 4.4 présente le nuage de points allégé avec les normales associées.

1. Intel core 2 duo 2.8 Ghz, Windows XP Professional x64, 8Go de RAM.

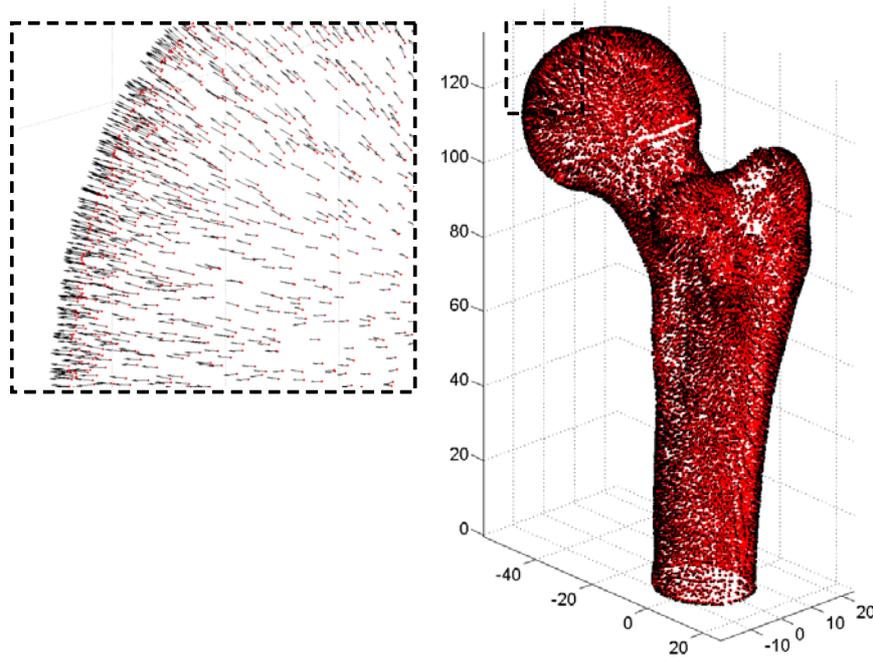


Figure 4.4 : Nuage de points allégé avec les normales associées

2.2. Calcul de la visibilité

Afin d'accélérer les calculs et d'éliminer les directions d'usinage inaccessibles par la machine, le calcul de la visibilité réelle débute en pratique par la visibilité machine.

2.2.1. Visibilité machine

L'espace est discrétisé selon les deux angles $\phi = 10^\circ$, $\theta = 30^\circ$ ce qui génère 216 directions. La machine utilisée est le centre de fraisage 5 axes Mikron UCP710 du laboratoire qui possède une structure de type plateau berceau RRTTT.

2.2.2. Visibilité outil (Algorithme 2, page 93)

Le calcul de la visibilité outil est effectué pour un outil hémisphérique de diamètre $D = 6$ mm, et d'un angle de visibilité outil $\nu = [5^\circ \ 85^\circ]$. Dans cette étape nous avons construit un cône de visibilité discrétisé pour chaque point du nuage. Chaque cône prend en compte toutes les directions possibles de l'accessibilité de l'outil au point considéré. La construction du cône de visibilité outil de chaque point est initialisée en prenant en compte la direction de la normale au point concerné.

2.2.3. Visibilité globale (Algorithme 3, page 94)

Dans cette étape nous avons testé seulement la collision entre le corps d'outil (partie cylindrique) et le nuage de points, pour chaque orientation discrétisée dans chaque cône de visibilité

outil. Le diamètre du corps de l'outil est de 6 mm. Le temps de calcul total de la visibilité réelle (machine, outil, globale) est d'environ 40 minutes sous Matlab.

2.3. Découpage du nuage de points (Algorithme 4, page 106)

Comme nous avons vu dans le chapitre 3, l'objectif du découpage automatique du nuage de points est de l'usiner en 5 axes positionné avec un minimum de directions d'usinage, et avec un seul montage du brut sur la table de la machine si possible.

L'optimisation d'un tel découpage se fait par le choix de la combinaison de directions qui assure le minimum de recouvrement entre les différents paquets trouvés. Le choix du nombre mini de paquets nécessaires se fait par l'évaluation du nombre de points usinés, en commençant toujours par un paquet unique.

2.3.1. Découpage selon une direction

Selon la démarche présentée, nous trouvons que le nuage de points considéré n'est pas usinable totalement en une seule direction. La direction de l'usinage qui assure un maximum de points usinés est donnée sur la figure 4.5. Dans ce cas, nous sommes capable d'usiner 55% des points du nuage. Le temps de calcul nécessaire à la détermination du plus grand paquet selon une direction est inférieur à 1 seconde.

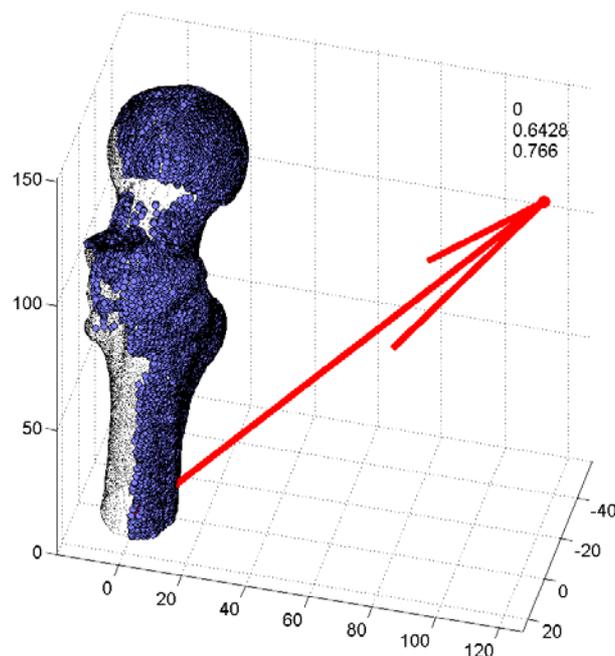


Figure 4.5 : Direction associée au groupement en un seul paquet

2.3.2. Découpage selon deux directions

Pour un découpage du nuage en deux paquets nous trouvons $n_{\text{comb}} = 8778$. L'optimisation d'une combinaison qui assure un minimum de recouvrement nous conduit à deux paquets regroupant 20106 points sur les 20263 points que contient le nuage allégé, le pourcentage accepté de points groupés $P_a = 95\%$. Seuls 0.8% de points se retrouvent non groupés (figure 4.6). Le temps de calcul des paquets est d'environ 30 secondes.

Sur la figure 4.6 (vue 1), nous notons une interférence inhomogène entre les deux paquets trouvés. Cette interférence est due à la mauvaise estimation de la normale dans ces zones qui produit des erreurs lors du calcul des cônes de visibilité. Sur la vue 2, nous notons une interruption du nuage de points entre les deux paquets trouvés. Cette discontinuité est due à la méthode de l'estimation de la normale pour laquelle la sphère lancée ne touche pas les points dans cette zone. Nous rappelons que la sphère est lancée selon les deux directions $-y$ et $+y$ (à droite et à gauche) et selon z .

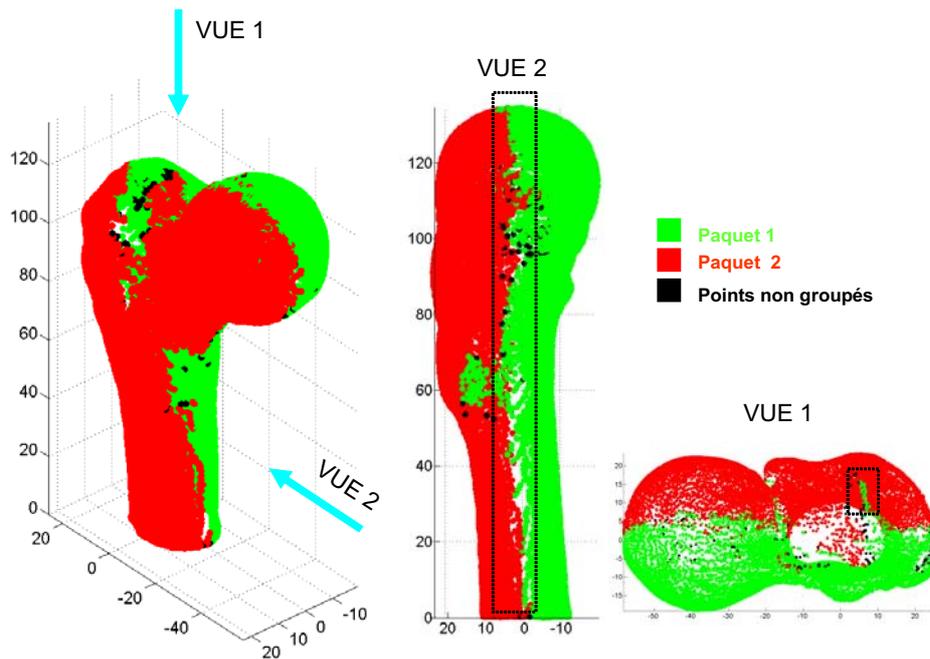


Figure 4.6 : Groupement en deux paquets

Nous détectons aussi des points non usinés (en noir) dans le milieu de chaque paquet, ce qui traduit une mauvaise estimation de la normale aux points concernés. Cette mauvaise estimation de la normale est peut être due au bruit significatif de ces points par rapport aux points voisins. L'intégration de ces points avec les autres points voisins (soit le paquet 1, soit le paquet 2) se fait par le calcul de la distance de Hausdorff (figure 4.7).

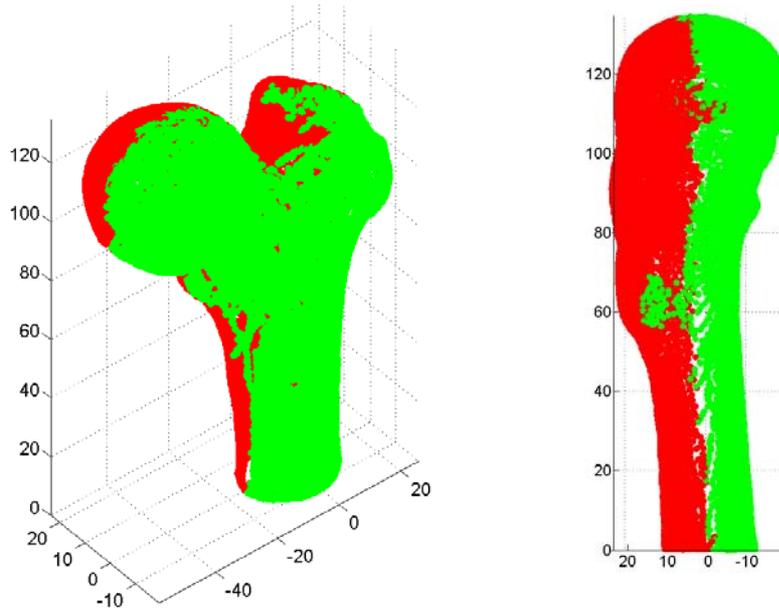


Figure 4.7 : Découpage en deux paquets, minimum de recouvrement

La zone de recouvrement est présentée sur la figure 4.8. Le nombre de points de recouvrement qui caractérise cette zone est de 327 points. Nous pouvons observer que la zone de recouvrement n'est pas détectée complètement puisque qu'il n'y a pas de ligne complète de séparation entre les deux paquets. Cette absence de ligne de recouvrement s'explique par l'absence de points entre les deux paquets consécutivement au filtrage de l'étape de calcul de la normale et de la discrétisation de l'espace.

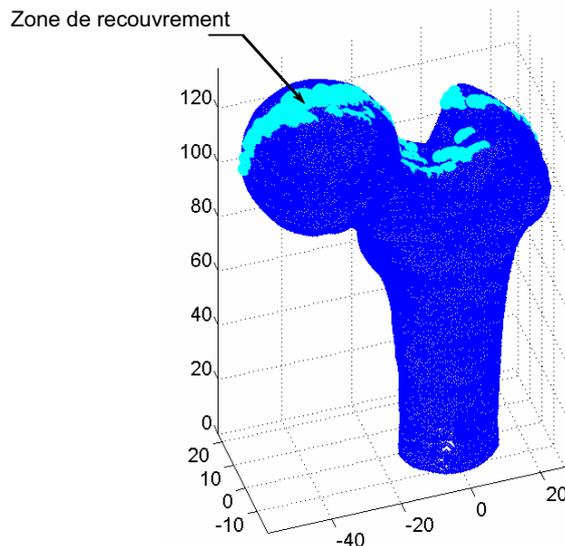


Figure 4.8 : Zone de recouvrement pour le groupement en deux paquets

Le découpage automatique du nuage de points est effectué afin de minimiser la longueur des lignes de recouvrement entre les différents paquets tout en essayant de minimiser le nombre de paquets. Nous ne prenons donc pas en compte l'existence des zones fonctionnelles dans la pièce à copier. Dans notre application la zone fonctionnelle se situe au niveau de la tête du fémur pour assurer le bon fonctionnement de la hanche (figure 4.1). Dans l'idéal, cette partie devrait donc être usinée selon une unique direction d'usinage afin d'éviter les marques au niveau des lignes de recouvrement.

3. Réalisation de la copie selon deux directions d'usinage

La figure 4.9 présente le nuage de points positionné selon les deux orientations d'usinage sur la table de la machine.

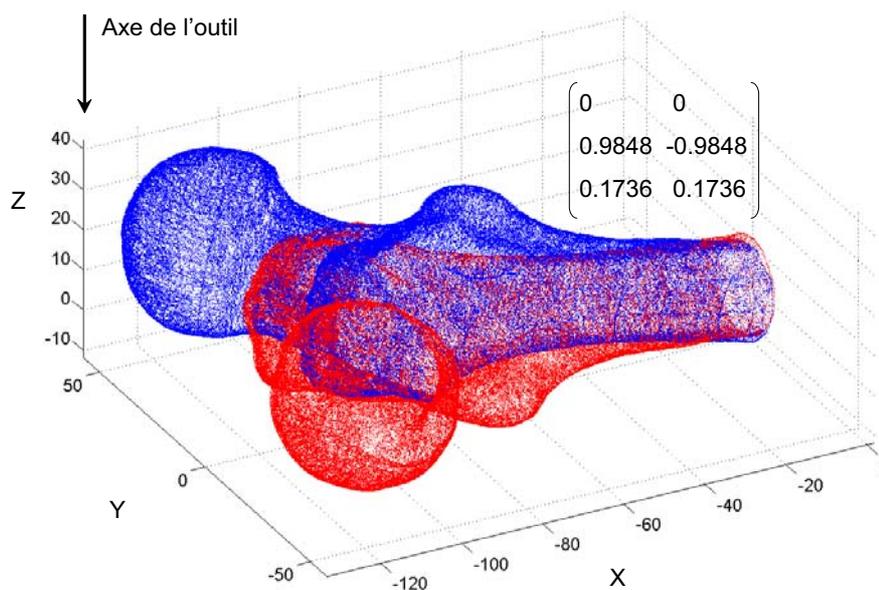


Figure 4.9 : Les deux orientations d'usinage

3.1. Génération des trajectoires d'ébauche

La génération des trajectoires d'ébauche est effectuée sur le nuage de points numérisé (nuage de 175000 points) pour assurer la précision du copiage. On génère les trajectoires d'ébauche pour chaque paquet du nuage de points concerné en respectant les limites de chaque paquet sur le nuage de points, mais toujours en évitant la collision avec le nuage de points de l'autre paquet.

Les paramètres adoptés pour l'usinage en ébauche pour les deux paquets sont les suivants :

Les trajectoires sont générées en zigzag selon la direction Y et par couches, pour un outil cylindrique de diamètre égal à 10 mm, le pas longitudinal est de 3 mm, le pas transversal est de 3 mm et la profondeur de passe est de 2 mm.

La taille de la grille pour le premier paquet est de 135x85x55 mm. La taille de la grille pour le deuxième paquet est de 136x85x50 mm. Le temps de calcul des trajectoires d'ébauche est d'environ 1 minute. La figure 4.10 présente les trajectoires d'ébauche pour les deux directions d'usinage.

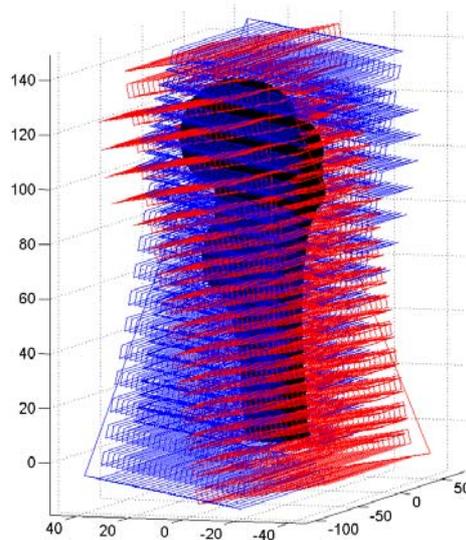


Figure 4.10 : Trajectoires d'ébauche pour les deux paquets

3.2. Génération des trajectoires en finition

Nous avons généré les trajectoires de finition pour un pas de 0.2x0.2 mm, en utilisant un outil hémisphérique de diamètre $d = 6$ mm. La génération des trajectoires est effectuée chaque fois pour tout le nuage de points numérisé (figure 4.11). Le temps de calcul des trajectoires est de 50 minutes.

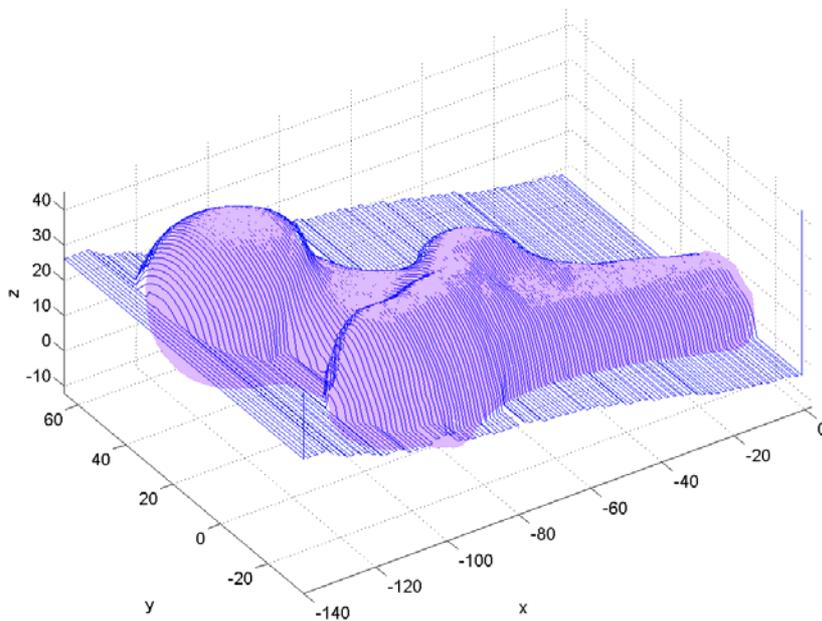


Figure 4.11 : Trajectoires de finition pour une seule orientation

3.3. Simulation des trajectoires sur CATIA

La simulation des trajectoires permet de valider à la fois la faisabilité de la pièce sur la machine au niveau des courses machine et les moyens de fixation utilisés, et de vérifier l'exactitude de l'opération de génération des trajectoires d'ébauche et de finition effectuée sur MATLAB avant l'usinage réel sur la machine.

3.3.1. Simulation des trajectoires d'ébauche et de finition

Pour simuler les trajectoires d'ébauche, nous avons défini un processus d'usinage dans l'environnement de CATIA, dans laquelle nous avons téléchargé les deux fichiers d'ébauche en format aptsource. Nous avons aussi défini l'outil cylindrique de diamètre 10 mm et la taille du brut 100x100x170 mm. La figure 4.12 présente le résultat de la simulation.



Figure 4.12 : Simulation des trajectoires d'ébauche sur CATIA

De la même manière nous avons simulé les trajectoires de la finition (figure 4.13).

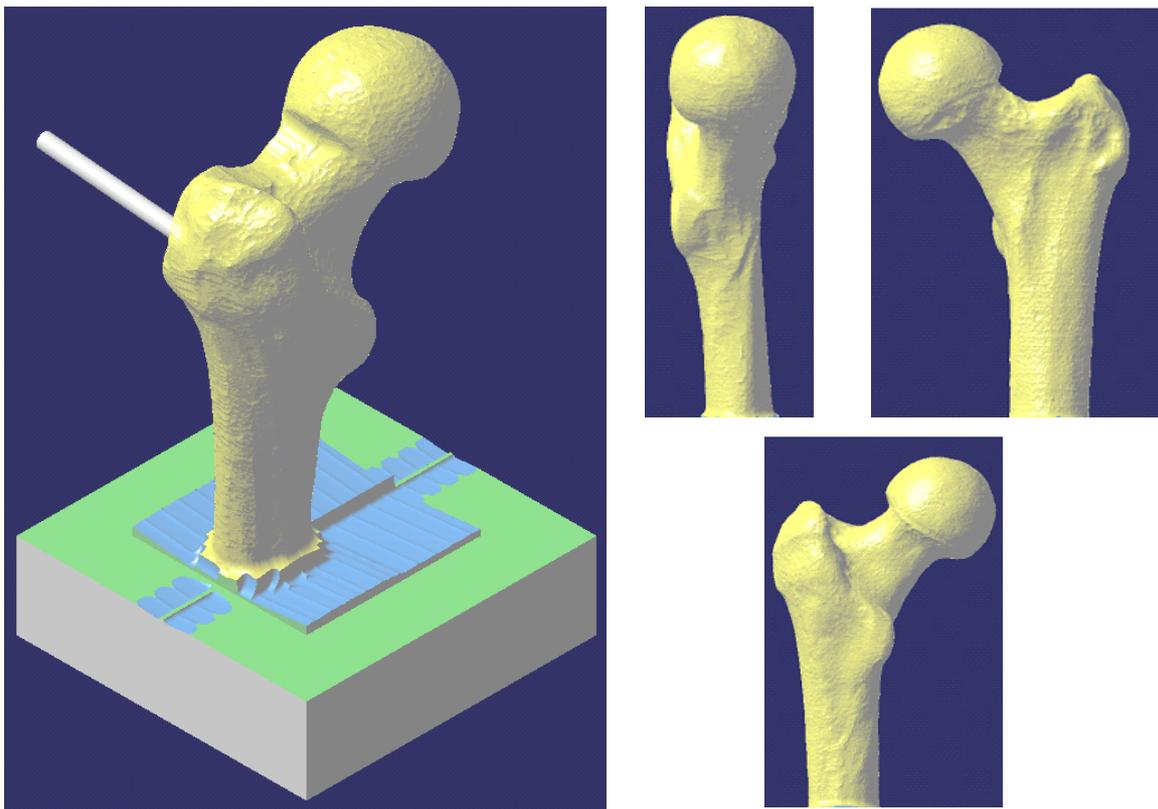


Figure 4.13 : Simulation des trajectoires de finition sur CATIA

3.4. Usinage sur Mikron UCP 710

3.4.1. Usinage en ébauche

L'usinage de la copie a été effectué à partir d'un brut en alliage d'aluminium A-U4G 100x100x170 mm.

La vitesse de rotation de l'outil est fixée à 15000 tr/min, la vitesse d'avance $v_f = 5$ m/min, le diamètre de l'outil torique utilisé est de 10 mm, le temps total de l'ébauche est de 2 heures.

Le choix d'un outil d'ébauche d'un petit diamètre nous a permis d'alléger la matière brute à enlever lors de l'usinage en finition avec un outil hémisphérique de diamètre 6 mm.

La figure 4.14 présente le montage du brut sur un rehausse, l'opération de rainurage qui permet d'éviter la collision entre le porte outil et le brut lors l'usinage en finition, la première phase d'ébauche selon la direction [0 0.9848 0.1736], et finalement la pièce ébauchée selon les deux orientations [0 0.9848 0.1736 ; 0 -0.9848 0.1736].

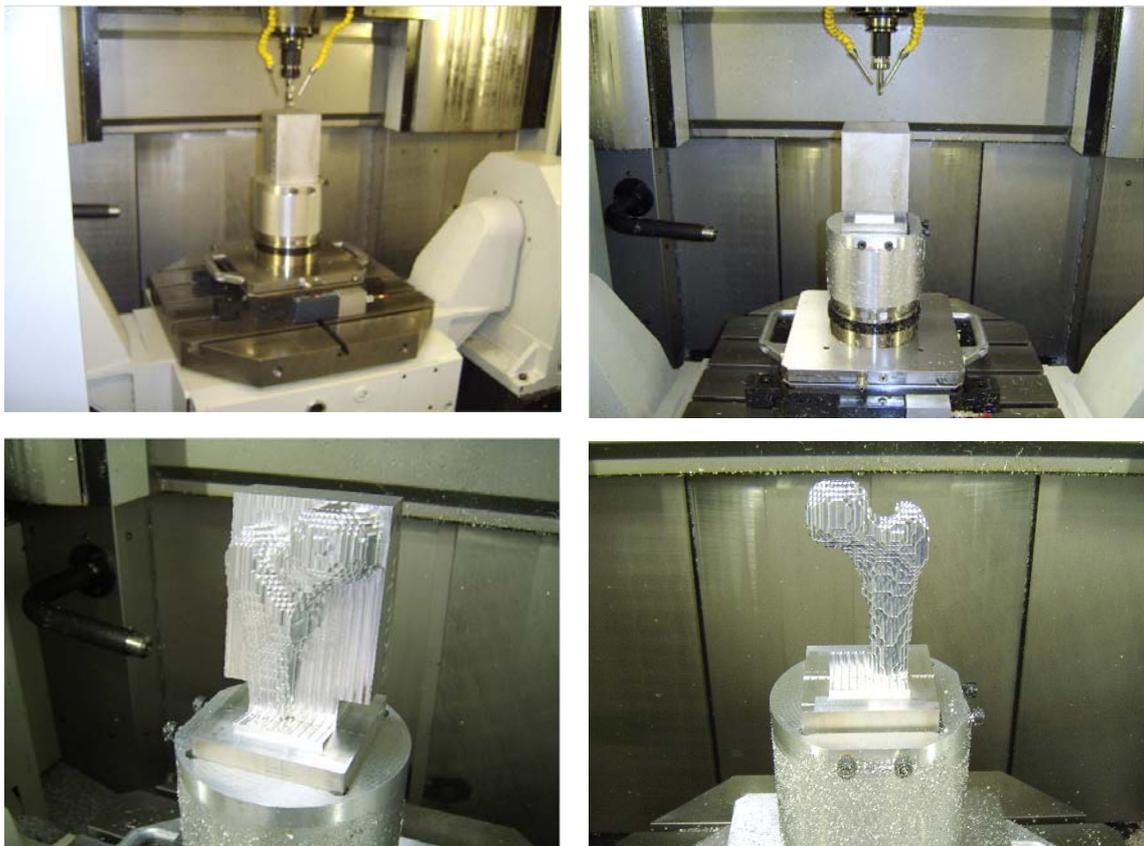


Figure 4.14 : Différentes étapes de l'ébauche

Lors de l'usinage en ébauche nous avons noté quelques points faibles concernant l'algorithme de génération des trajectoires d'ébauche, en particulier la gestion des collisions et des parcours hors matière. Une optimisation de génération des trajectoires d'ébauche peut minimiser le temps d'usinage par l'augmentation des vitesses d'approche et de retrait et l'élimination des morceaux des trajectoires où l'outil n'usine pas dans le brut.

3.4.2. Usinage en finition

Comme nous avons vu dans la partie groupement, l'usinage en finition est réalisé suivant deux directions en utilisant un outil hémisphérique de diamètre $d = 6$ mm. La vitesse d'avance programmée est de 2 m/min, la vitesse de rotation de l'outil $S = 15000$ tr/min. L'usinage de la copie est effectué pour un nuage de points allégé de 175000 points seulement, où le nombre de points réel est de 1033760 points. La génération des trajectoires sur un nuage de points allégé nous a permis de minimiser le temps de calcul des trajectoires et de traitement du nuage. Par contre nous avons perdu au niveau de la qualité géométrique de la surface. La figure 4.15 présente la copie et le modèle.



Figure 4.15 : Pièce copiée à gauche, le modèle à droit

Le temps d'usinage total en finition est de 6 heures. La faible qualité de la surface est due à la faible densité du nuage de points qui a conduit à des plongées excessives de l'outil en finition dans le nuage de points. L'usinage de la copie en utilisant la totalité des 1033760 points du nuage de points pourrait améliorer les résultats de façon significative.

Lors de l'usinage en finition nous avons rencontré des difficultés dans la gestion des collisions entre l'ensemble outil et porte-outil et le porte pièce. Ce problème de collision a été évité manuellement en suivant toujours le parcours de l'outil pendant l'usinage. Une modélisation du porte pièce et du porte outil lors du calcul de la visibilité globale devrait permettre d'éviter ce type de collision.

3.5. Comparaison

A partir d'une comparaison entre la simulation des trajectoires de finition sur CATIA et la copie (figure 4.16), nous pouvons dire que :

- le résultat de l'usinage ressemble au résultat de la simulation,
- l'existence des traces entre les deux paquets usinés est due à la faible visibilité de ces zones, c'est-à-dire que ces zones ne sont pas totalement usinables selon les deux orientations proposées.
- les lignes de recouvrement entre les deux paquets sont bien présentes sur la simulation et sur la copie. L'usinage de la copie avec un champ de visibilité réduit de l'outil $v = [10^\circ \ 60^\circ]$ par exemple, pourrait diminuer les traces au niveau des lignes de recouvrement.



Figure 4.16 : Comparaison entre la simulation et la copie

Grâce à ce premier essai, nous avons pu montrer l'efficacité et les limites de calcul liées aux différentes étapes de la chaîne de copiage direct proposée.

4. Amélioration de la qualité de la copie

Nous proposons maintenant d'étudier le copiage de la pièce en changeant les paramètres de chaque étape de la chaîne de copiage direct à partir du nuage de points complet donc plus dense de 1033760 points au lieu de 175000 points pour la première application. Nous utilisons un champ de visibilité réduit de l'outil afin d'améliorer les conditions de visibilité lors de l'usinage en finition et la qualité de la surface dans les zones de recouvrement. Ainsi nous prenons en compte la collision entre les moyens de fixation, la collision avec le porte outil, et la course machine en Z. Ce qui conduira à un nombre de paquets différent.

4.1. Calcul de la visibilité

Le calcul de la normale est effectué avec la même sphère de diamètre 7 mm selon cinq orientations $[0\ 0\ 1; 1\ 0\ 0; -1\ 0\ 0; 0\ 1\ 0; 0\ -1\ 0]$ au lieu des trois précédentes. Le temps de calcul total sur Matlab est d'environ 126 minutes. Le lancement de la sphère a conduit à un nuage de points allégé de 97448 points.

Nous avons pris en compte l'influence de la course machine sur l'axe Z lors du calcul de la visibilité machine. Cette nouvelle contrainte devrait nous permettre d'éliminer toutes les orientations discrétisées selon lesquelles l'usinage n'est pas faisable au niveau de la course machine en z. La figure 4.17 présente l'évolution de l'espace discrétisée en prenant en compte le modèle géométrique de la machine et la course machine en Z.

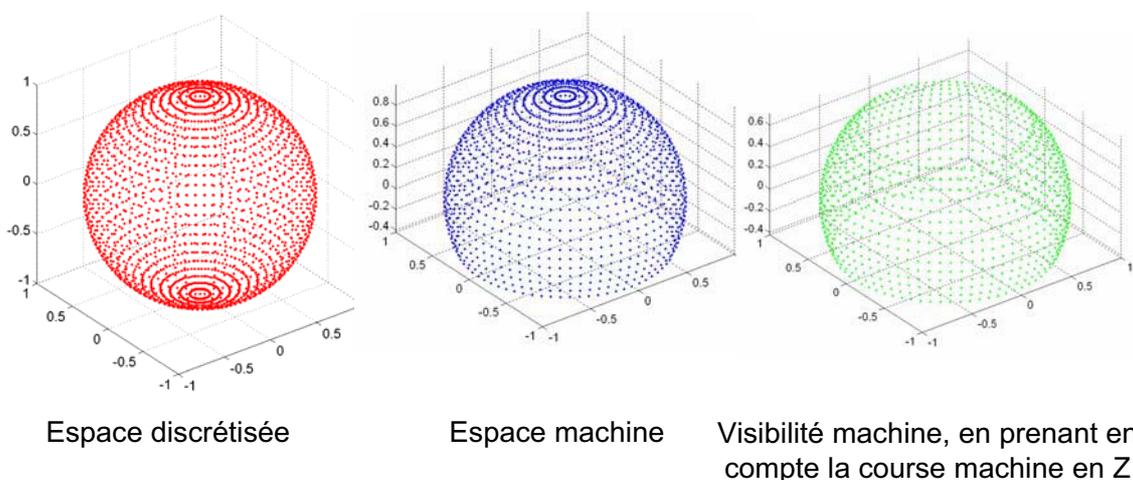


Figure 4.17 : Evolution de l'espace discrétisée lors du calcul de la visibilité machine

L'angle de visibilité de l'outil a été réduit de sorte que $v = [10^\circ \ 60^\circ]$.

La visibilité globale intègre cette fois-ci la gestion des collisions entre le corps de l'outil et le porte outil avec le nuage de points, le brut, le porte pièce. L'influence de la longueur ($L = 40 \text{ mm}$) de l'outil et du diamètre du porte outil ($D = 53 \text{ mm}$) a été prise en compte. La figure 4.18 présente la simulation du brut et du porte pièce avec le nuage de points.

Le temps de calcul de la visibilité réelle (visibilité outil, visibilité globale et visibilité machine) est d'environ 240 minutes.

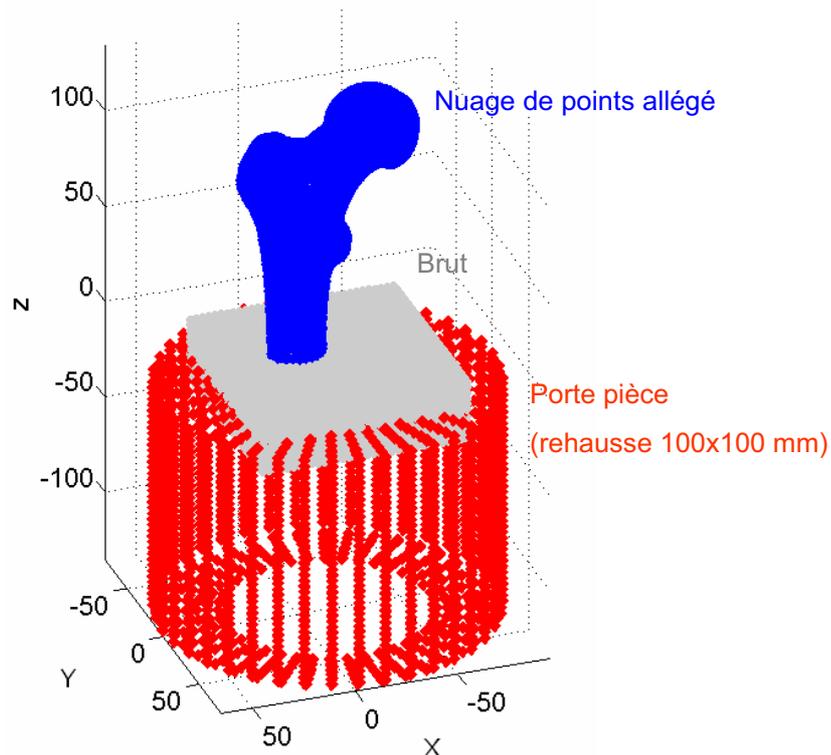


Figure 4.18 : Calcul de la visibilité globale, simulation de brut et de porte pièce

4.2. Découpage du nuage de points

Le découpage automatique du nuage de points avec les nouveaux paramètres a conduit à découper le nuage de points en quatre paquets. Chaque paquet est usinable selon une direction différente. Cette direction assure la faisabilité de l'usinage sur la machine et sans aucune collision. L'optimisation d'un tel découpage s'est fait par le choix de la combinaison qui assure le minimum de recouvrement entre les différents paquets trouvés (figure 4.19).

Les zones de recouvrement sont présentées sur la figure 4.20. Le nombre de points de recouvrement qui expriment les zones de recouvrement lors de l'usinage est de 18700 points.

Les points non groupés sont réintégrés avec les autres paquets. La figure 4.21 présente les paquets après l'opération d'intégration.

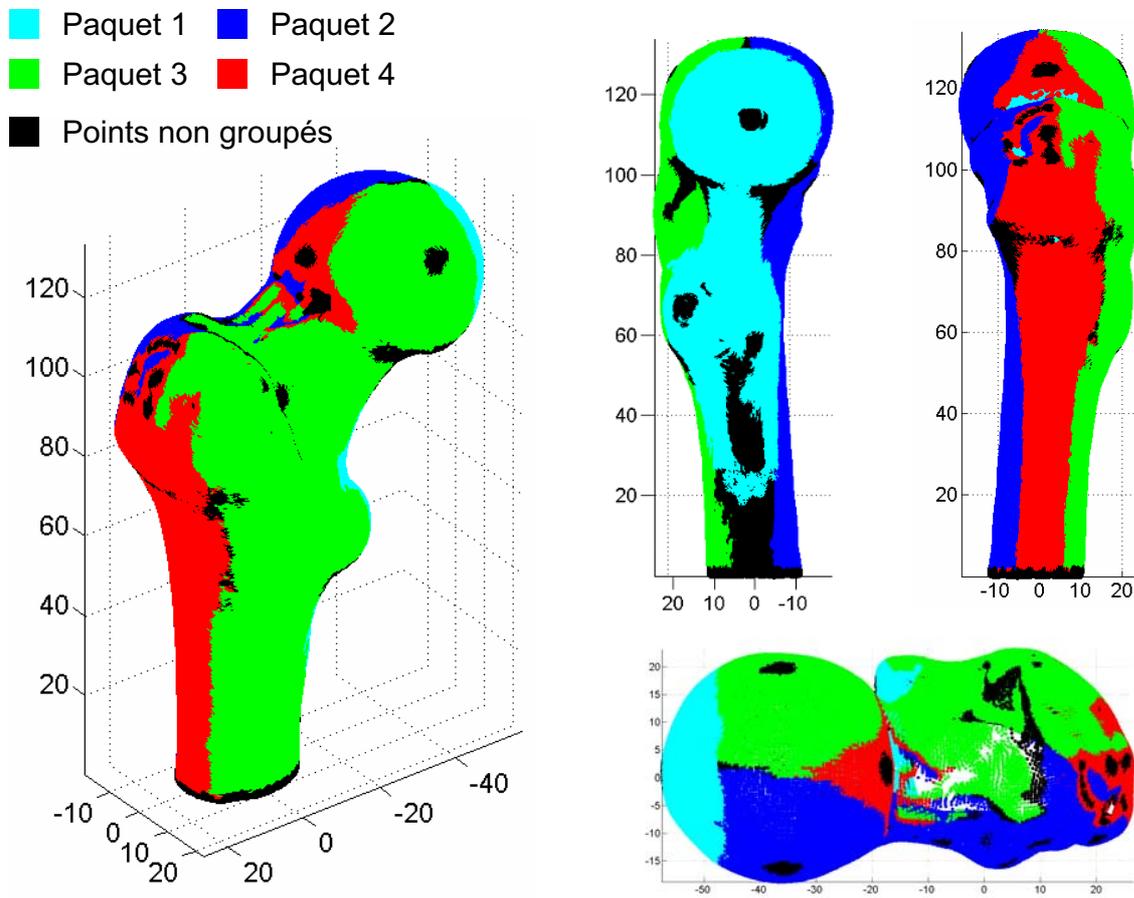


Figure 4.19 : Découpage du nuage en quatre paquets

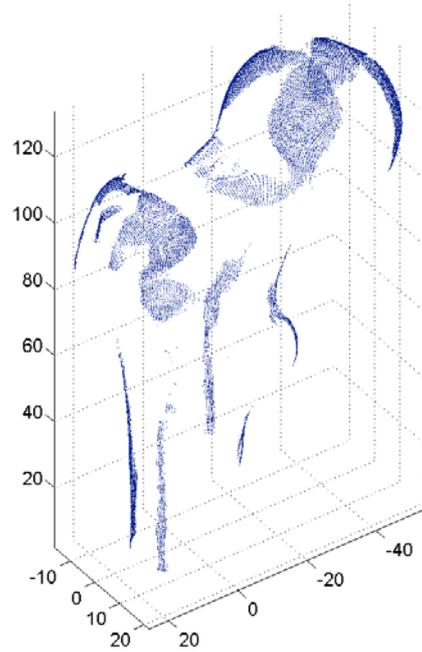


Figure 4.20 : Zones de recouvrement, découpage en quatre paquets

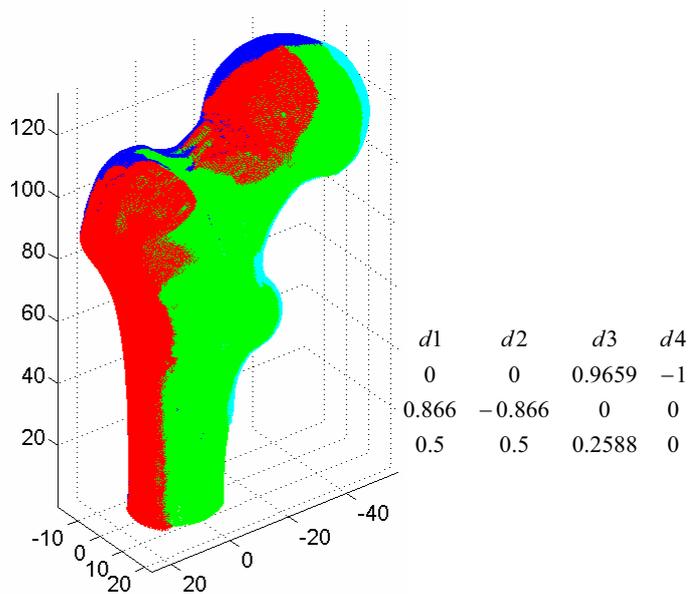


Figure 4.21 : Les quatre paquets avec les orientations associées

4.3. Génération des trajectoires

La génération des trajectoires d'ébauche est effectuée selon deux orientations tout en gardant les paramètres de la première application.

Nous avons généré les trajectoires de finition pour un pas de 0.2x0.2 mm, en utilisant un outil hémisphérique de diamètre $d=6$ mm. La génération des trajectoires est effectuée chaque

fois pour tout le nuage de points numérisés. Le temps de calcul des trajectoires est de 250 minutes.

4.4. Simulation des trajectoires sur CATIA

La figure 4.22 présente le résultat de la simulation des trajectoires de finition sur CATIA et selon les quatre orientations. Sur la figure 4.22 nous notons que la qualité géométrique de la surface est supérieure à la première application. De plus nous notons une absence des traces entre les lignes de recouvrements qui séparent les quatre paquets (au moins sur la simulation).

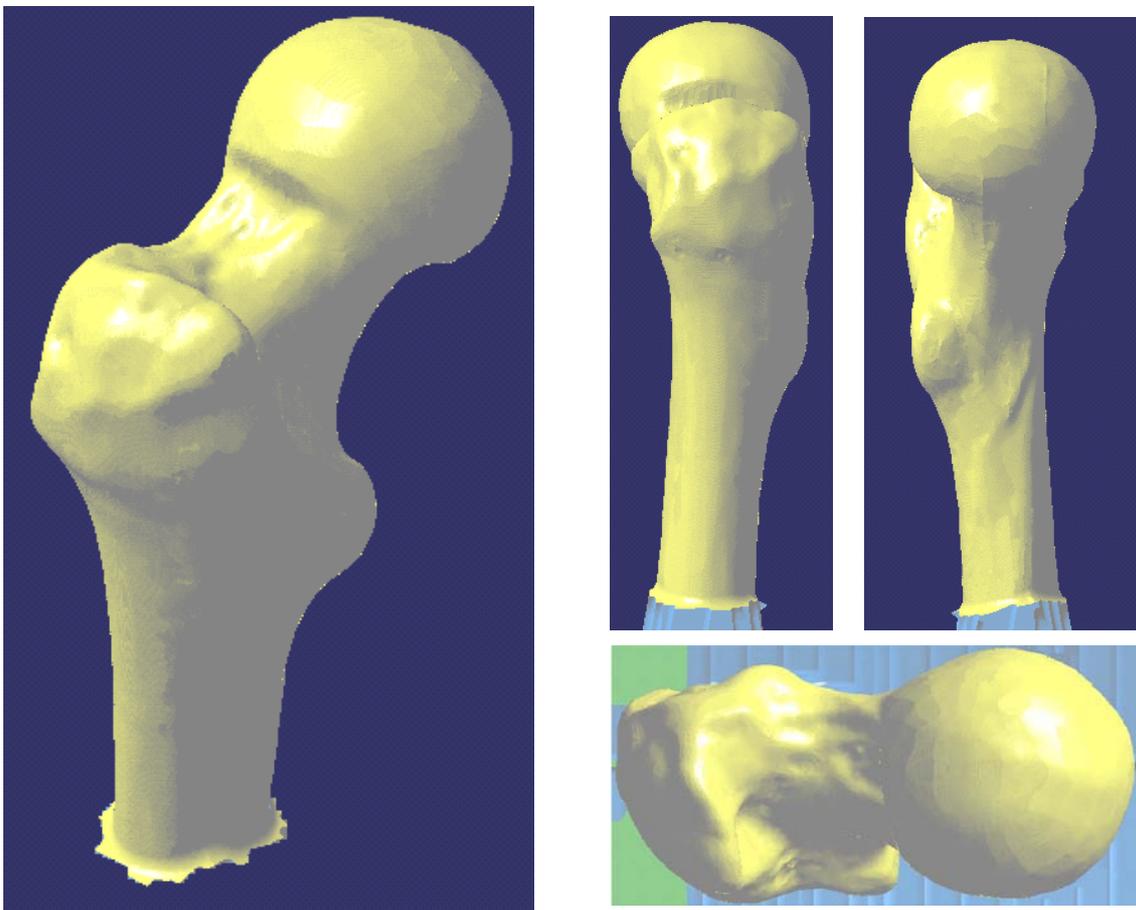


Figure 4.22 : Simulation des trajectoires de finition sur CATIA

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué la mise en œuvre de la chaîne complète de copiage direct par usinage 5 axes positionné pour dupliquer un fémur. Les résultats sont satisfaisants dans la mesure où nous avons obtenu un résultat probant en termes de qualité de copiage et temps d'usinage. Nous sommes capables de proposer des orientations d'usinage qui minimisent les lignes de recouvrement ou qui les positionnent dans des endroits non fonctionnels.

En ce qui concerne la qualité du copiage, le manque de densité du nuage de points utilisé n'a pas permis de reproduire la même texture de la surface. Cependant, nous avons capitalisé cette information et avons pu reproduire par simulation une copie dont la texture est plus proche du modèle réel. La mise en œuvre de l'usinage n'a pas été effectuée avec le nuage plus dense mais le bon déroulement de l'usinage avec le nuage allégé selon deux directions nous permet d'espérer un résultat positif.

Cette application permet d'évaluer à nouveau les algorithmes qui ont été développés montrant ainsi leurs points forts et leurs points faibles. En particulier, cela valide la phase de préparation de l'usinage qui se compose du calcul de la normale, de la visibilité réelle, et du groupement automatique du nuage en paquets. Elle valide également la génération des trajectoires d'ébauche et de finition.

Nous avons aussi observé les points faibles de la méthode. Ainsi le découpage automatique est limité par le choix des deux pas de discrétisation de l'espace lors du calcul de la visibilité. La qualité est également fortement liée aux résultats du calcul de la normale qui conduit à un filtrage du nuage surtout dans les zones non accessibles par la sphère de lancer.

Le temps nécessaire pour la génération des trajectoires de finition très fines est assez élevé, l'utilisation de pas longitudinaux et transversaux adaptatifs peut accélérer le calcul et améliorer les résultats. Enfin, l'expérience a une nouvelle fois montré qu'en fraisage à 5 axes la gestion des collisions est un réel problème. Nous avons ainsi mis le doigt sur des faiblesses de l'algorithme de génération des trajectoires d'ébauche et de finition.

Les différentes voies d'amélioration seront développées dans les perspectives.

Conclusion et perspectives

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont pour l'objectif de la mise en place d'une chaîne de copiage direct de formes complexes en fraisage 5 axes positionné.

Le processus de copiage direct est un processus complexe faisant intervenir des moyens de numérisation et de fabrication. Les travaux menés au LURPA dans ce domaine se focalisent sur l'aspect logiciel du traitement des données de numérisation pour aboutir à l'obtention des pièces en usinage. Les travaux présentés dans le chapitre 1 se sont focalisés sur les erreurs d'aspects *algorithmique*, et *matériel* de la chaîne, montrant les sources d'écart géométriques potentielles liées aux différentes étapes. L'analyse de sources d'erreurs nous a conduit à proposer une nouvelle version de la chaîne de copiage qui intègre désormais une étape de découpage technologique et topologique des données. Cette nouvelle étape permet, pour un posage de la pièce dans l'espace machine, de décomposer le nuage de points en paquets usinables par une même orientation outil. Ainsi, l'objectif majeur est d'amener une amélioration de la qualité visuelle et géométrique de la pièce usinée en essayant d'optimiser le découpage technologique et topologique de façon à permettre la minimisation de la longueur des lignes de recouvrement.

Dans le cadre du copiage de formes complexes en 3 axes, nous avons présenté dans le chapitre 2 la méthode de copiage développée au laboratoire (Usipoint) et l'avons comparée à la méthode classique de Reverse Engineering basée sur la reconstruction de surface. Les résultats réels et simulés ont montré que le copiage direct en 3 axes est plus rapide et performant en terme de fidélité à la forme. La méthode de copiage direct permet ainsi de s'affranchir de l'étape fastidieuse de reconstruction de surfaces.

Dans le chapitre 3 nous avons présenté la méthode de découpage technologique et topologique mise au point. Cette méthode s'appuie sur le calcul de visibilité réelle discrétisée en chaque point du nuage qui prend en compte l'accessibilité de la machine, la visibilité de l'outil, et la collision avec le nuage de points. Le calcul de visibilité réelle est basé sur une méthode

originale d'estimation de normale (en orientation et en direction) sur données discrètes : la méthode par lancer de sphères selon plusieurs directions. La particularité de notre approche est qu'elle est bien adaptée aux formes complexes numérisées selon plusieurs orientations. Nous avons montré aussi que l'approche est robuste car elle s'appuie simplement sur le calcul des intersections entre des droites et des sphères, et rapide car les calculs sont simples. A partir de la visibilité réelle en chaque point, un calcul de différentes possibilités de découpage en paquets a été réalisé. A partir d'un nombre d'orientations outil fixé, que l'on veut le plus petit possible, on cherche la combinaison d'orientations discrétisées qui permet d'usiner un maximum de points les points du nuage. Le choix d'une combinaison est fait de façon à minimiser la longueur des lignes de recouvrement entre les différents paquets. Les premières expérimentations de la méthode sur des formes complexes ont donné de bons résultats, en particulier concernant l'usinage complet de la copie.

Le dernier chapitre présente une application à une rotule de hanche de la chaîne de copiage direct par usinage 5 axes positionné d'objet inconnu. Cette application nous a permis de tester les algorithmes montrant leur bon fonctionnement, et les points faibles aussi. La méthode est cependant limitée par le choix des deux pas de discrétisation de l'espace lors de calcul de la visibilité. De même, elle est fortement tributaire du calcul de la normale par lancer de sphères, qui conduit à un filtrage du nuage de points qui se trouve ainsi parfois trop allégé. Pour aller plus loin, une étude pourrait être effectuée sur l'influence du posage initial du nuage de points dans l'espace machine.

Les résultats obtenus au niveau de la qualité et du temps d'usinage, font du copiage direct de forme un outil que l'on peut associer au domaine du prototypage rapide. Néanmoins, nous avons mis en avant un certain nombre de limites et difficultés qui constituent des pistes d'amélioration.

Concernant les aspects génération de trajectoires en 3 axes, nous pouvons envisager quelques améliorations qui permettraient d'accroître la qualité de la copie et de diminuer le temps d'usinage :

- amélioration de la génération de trajectoire pour les poches en ébauche,
- gestion des trajectoires hors matière avec adaptation des vitesses en ébauche et en finition,
- actualisation de la définition géométrique du brut lors de l'opération d'ébauche,
- intégration de pas adaptatifs (longitudinal et transversal) pour un meilleur respect des spécifications géométriques lors de la génération des trajectoires en finition,

- pré-traitement du nuage de points afin d'éliminer les points parasites, lisser le bruit de numérisation et densifier le nuage localement si nécessaire.

Dans le cadre de l'usinage en 5 axes, le calcul de visibilité est fortement tributaire du calcul de la normale. En effet, la sphère lancée ne touche jamais tous les points de nuage, c'est pourquoi nous avons constaté un effet de filtrage du nuage. Cet effet de filtrage dépend du diamètre de la sphère, de la complexité du nuage, du pas de la grille ainsi que du niveau de bruit du nuage. Nous pourrions envisager une étude du choix automatique du diamètre de sphère à lancer en fonction de la complexité de la zone et du bruit de numérisation. Ainsi, sur les zones de faible courbure, on pourrait lancer une sphère de gros diamètre alors que sur les petits détails ou zones de forte courbure, la sphère lancée serait de petit diamètre.

Pour aller plus loin au niveau de groupement du nuage en paquets, une étude devrait être effectuée sur l'influence du posage initial du nuage de points dans l'espace machine sur la faisabilité de l'usinage avec un minimum de paquets. Ce posage peut être la clef dans l'objectif de minimisation de longueur des lignes de recouvrement lors de l'usinage en 5 axes positionné tout en minimisant le nombre de paquets.

Enfin, la structuration de la méthode de préparation de nuage à l'usinage (le calcul de la normale), devrait permettre de faire évoluer la méthode de génération des trajectoires en finition du 5 axes positionné au 5 axes continu.

Références Bibliographiques

[AUBIN 1994]

AUBIN R., A world wide assessment of rapid prototyping technologies, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin 1994.

[BALSUBRAMANIAN 2000]

BALASUBRAMANIAM M., Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation, Computer-Aided Design, 32(4), pp.261-277, 2000.

[BERNARD & TAILLANDIER 1998]

BERNARD A., TAILLANDIER G., Le prototypage rapide, Editions HERMES, Paris (1998).

[BLAT 1999]

BLAT B., Numérisation & copiage des formes complexes, Mémoire de DEA de Production Automatisée, LURPA Ecole Normale Supérieure de Cachan, juillet 1999.

[BOURDET 2005]

BOURDET P., Evaluation des performances de la mesure par capteur optique sur machine à mesurer tridimensionnelle, 12^{ème} Congrès international de métrologie, Lyon, 2005.

[BOURDET 1987]

BOURDET P., Contribution à la mesure tridimensionnelle : Modèle d'identification géométrique des surfaces, Métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, Correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles, thèse Présentée à l'université de NANCY1 pour obtenir le grade de docteur ES-SCIENCES, 23 juin 1987.

[BRETEAU 2005]

BRETEAU P., Copie de forme par usinage 5 axes positionné ; usinage direct d'un nuage de points, mémoire de master 2, Lurpa, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Juillet 2005.

[BRETEAU et al. 2006]

BRETEAU P., THIEBAUT F., BOURDET P., LARTIGUE C., Towards an approach for rapid copying of free-form surfaces in 5-axis machining, 6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Grenoble (France) 2006.

[CONTRI 1998]

CONTRI A., Numérisation et usinage de surfaces complexes, mémoire de DEA de Production Automatisée, LURPA, Ecole Normale Supérieure de Cachan, juillet 1998.

[CONTRI et al. 2002]

CONTRI A., LARTIGUE C., OSTY G., Copying of free-forms from digitized data : the voxel-space representation, 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont-Ferrand (France), 2002.

[DEWAILLY 2006]

DEWAILLY C., Numérisation et rétroconception de formes en CAO, mémoire de stage, LURPA, IUT de Cachan, juin 2006.

[DOC 1976]

DOCARMO M.P., Differential Geometry of Curves and Surfaces, Prentice-Hall, 1976.

[FEAUTRIER et al. 1998]

FEAUTRIER D., THIEBAUT F., TIMON G., LARTIGUE C., Certification of free-form machining: a comprehensive approach from CAD/CAM to measurement, 2nd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Compigne (France), 1998.

[FENG & TENG 2005]

FENG H.Y., TENG Z., Iso-planar piecewise linear NC tool path generation from discrete measured data points, Computer-Aided Design, 37(1), pp. 55-64, 2005.

[GUPTA et al. 1996]

GUPTA P., JANARDAN R., MAJHI J., WOO T., Efficient geometric algorithms for workpiece orientation in 4 and 5-axis NC machining, Computer-Aided Design, 28(8), pp.577-587, 1996.

[HOPPE 1992]

HOPPE H., DEROSE T., DUCHAMP T., MCDONALD J., STUETZLE W., Surface reconstruction from unorganized Points, Computer Graphics, 26(2), pp.71-77, 1992.

[JERARD et al. 1989]

JERARD R., HUSSAINI S., DRYSDALE R., SCHAUDT B., Approximate methods for simulation and verification of numerically controlled machining programs, The Visual Computer, 5(6), pp.329-348, 1989.

[KANG & SUH 1997]

KANG J., SUH J-K., Machinability and Set-up Orientation for Five-axis Numerically Controlled Machining of Free Surfaces, Advanced Manufacturing Technology, vol. 13, pp 311-325, 1997, Springer-Verlag London Limited.

[LARTIGUE et al. 1999]

LARTIGUE C., DUC E., TOURNIER C., Machining of free-form surfaces and geometrical specifications, Journal of Engineering Manufacture, vol. 213, p.21-27, 1999.

[LAVERNHE et al. 2006]

LAVERNHE S., TOURNIER C., LARTIGUE C., Kinematical Performances in 5-axis machining, 6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Grenoble (France) 2006.

[LIN & LIU 1998]

LIN A., LIU H.-T., Automatic generation of NC cutter path from massive data points, *Computer-Aided Design*, 30(1), pp.77-90, 1998.

[LORENSEN et al. 1987]

LORENSEN W.E., CLINE H.E., Marching cubes : A high resolution 3D surface reconstruction algorithm, *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1987.

[MAKKI et al. 2006]

MAKKI, M., LAVERNHE S., THIEBAUT F., TOURNIER C., LARTIGUE C., Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts, 1er Congrès International Francophone de Mécanique Avancée, Faculté de Génie Mécanique, Université d'Alep, Syrie, 02-04 mai 2006.

[MAKKI et al. 2007]

MAKKI, M., TOURNIER C., THIEBAUT F., LARTIGUE C., Reverse Engineering et Copiage rapide de nuages de points numérisés, 18ème Congrès français de mécanique, Domaine Universitaire de Grenoble, CDRom paper N°0198, 6 p., 27-31 août 2007.

[MAKKI et al. 2008a]

MAKKI, M., TOURNIER C., THIEBAUT F., LARTIGUE C., Une approche pour estimer la normale sur données discrètes et bruitées issues d'une numérisation 3D par capteur laser plan, Groupe de Travail Animation et Simulation GTMG2008, Mulhouse (France), pp.63-72, mars 2008.

[MAKKI et al. 2008b]

MAKKI, M., LARTIGUE C., TOURNIER C., THIEBAUT F., Direct duplication of physical models in discrete 5-axis machining, *Virtual and Physical Prototyping*, Volume 3, pp. 93-103, Issue 2 June 2008.

[MITRA & NGUYEN 2003]

MITRA N., NGUYEN A., Estimating surface normal in noisy point cloud data, *Proceedings of the 19th annual symposium on Computational geometry*, San Diego (USA), pp.322-328, 2003.

[MOGNOL 2005]

MOGNOL P., Réalisation de pièces unitaires et petites séries de l'utilisation performante et raisonnée des process de production, HDR préparée à l'Institut de recherche et Cybernétique de Nantes 05 decembre, 2005.

[OSTY et al. 1999]

OSTY G., CONTRI A., LARTIGUE C., Traitements numériques et partitionnement de grands nuages de points : Préparation de la reconstruction de surface et de l'usinage, *Numérisation 3D*, Paris (France), 1999.

[OSTY et al. 2000]

OSTY G., CONTRI A., DUC E., Free-form copying from point clouds; A tool-path calculation method using B-Spline interpolation, *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 15(2-4), pp.367-382, 2000.

[OSTY 2002]

OSTY G., Extraction de particularités sur données discrètes issues de numérisation 3D : partitionnement de grands nuage de points, Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.

[OU YANG et al. 2005]

OU YANG D., VAN NEST B.A., FENG H-Y, Determining gouge-free ball-end mills for 3D surface machining from point cloud data, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(5-4), pp.338-345, 2005.

[PARK & CHUNG 2003]

PARK S-C., CHUNG Y-C., Tool-path generation from measured data, *Computer-Aided Design*, 35(5), pp.467-475, 2003.

[PENG & YING 2007]

PENG Y.H., YIN Z.W., Direct tool path regeneration for physical object modification from digitized points in reverse engineering, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(11-12), pp.1204-1211, 2007.

[REMY et al. 2002]

REMY S., BERNARD A., RIS G., numérisation automatique basée sur le concept de visibilité, 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont-Ferrand (France), 2002.

[SOUZANI et al. 2006]

MEHDI-SOUZANI C., THIEBAUT F., LARTIGUE C., Scan planning strategy for a general digitized surface, *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, International*, 6(4), pp.331-339, 2006.

[SHAKARJI 1998]

SHAKARJI C-M., Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 103(6), pp.633-641, 1998.

[SUZUKI et al 1991]

SUZUKI H., KURODA Y., SAKAMOTO M., HARAMAKI S., VAN BRUSSEL H., Development of the CAD/CAM System based on parallel processing and inverse offset method, *Transputing 91 Proceeding of the world Transputer user Group (WOTUG) conference*, 1991.

[SOUZANI et al. 2005]

MEHDI-SOUZANI C., LARTIGUE C., THIEBAUT F., BOURDET P., Evaluation de la performance des systèmes optiques de numérisation 3D - Application à la numérisation automatique intelligente, *3D Modelling*, Paris (France), 2005.

[SOUZANI 2006]

MEHDI-SOUZANI C., Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité, Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2006.

[TANG & WOO 1989]

TANG K., WOO T., Maximum Intersection of Spherical Polygons and Work piece Orientation for 4 and 5-axis Machining, ASME Journal of Mechanical Design, 114(3), pp.477-485, 1989.

[TENG et al. 2006]

TENG Z., FENG H-S, AZEEM A., Generating tool paths from point cloud data via machining area segmentation, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30(3-4), pp.254-260, 2006.

[TOURNIER 2001]

TOURNIER C., Contribution à la conception des formes complexes : la surface d'usinage en fraisage 5 axes isocrêtes, Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2001.

[VARADY et al. 1997]

VARADY T., MARTIN R., COXT J., Reverse engineering of geometric models : an introduction, Computer-Aided Design, 29(4), pp.255-268, 1997.

[VERON 1999]

VERON P., Polyhedral models for reverse engineering and rapid prototyping, Technologic Systems and Materials in the Machine Building Fields, vol. 5, Romanian Academy of Science, 1999.

[VERON & LEON 1998]

VERON P., LEON J.C., Shape preserving polyhedral simplification with bounded error, Computer & Graphics, 22(5), pp 565-585, 1998.

[WOO & VON TURKOVICH 1990]

WOO T.C., VON TURKOVICH B.F., Visibility Map and its Application to Numerical Control, Annals of the CIRP, 39(01), pp.451-454, 1990.

[WOO 1994]

WOO T, Visibility Maps and Spherical algorithms, Computer-Aided design, vol.26(01), january 1994.

[YANG & LEE 1999]

YANG M., LEE E., Segmentation of measured point data using a parametric quadric surface approximation, Computer-Aided Design, 31(7), pp. 449-457, 1999.

[DELCAM 2008]

<http://www.copycad.com/>

[KREON 2008]

<http://www.kreon3d.com/>

[RENISHAW 2006]

Renishaw, <http://www.renishaw.com/client/product/UKEnglish/PGP-138.shtml>, 2006.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Annexe A. Etude de la répétabilité et du recalage des orientations capteur

Nous nous intéressons dans cette étude à évaluer l'influence de la méthode de recalage des nuages de points proposée par le constructeur lors de l'utilisation du capteur Kréon. Cette étude est réalisée par la mesure d'un artefact, une sphère de référence de défaut de forme inférieur à 2 μm . Une première étude est tout d'abord consacrée à l'étude de la répétabilité de mesure de l'artefact selon une même orientation capteur, complétée par l'évaluation du recalage.

A.1. Etude de la répétabilité de mesure selon une orientation

Afin d'évaluer la répétabilité de la mesure par le capteur laser, nous proposons de numériser une sphère dans les mêmes conditions plusieurs fois avec une seule orientation du capteur, l'orientation [A0-B0], et pour une seule calibration (figure 1).



Figure A 1 : Mesure de sphère d'étalonnage avec une seule orientation Capteur

Une sphère théorique, de rayon $r = 12.491$ mm correspondant au rayon théorique est associée suivant le critère des moindres carrés [SHAKARJI 1998] à chacun des nuages de points. Les résultats de l'association d'une sphère aux nuages de points (tableau 1) montrent que les centres des sphères associées aux nuages de points sont confondus, ce qui confirme la répétabilité de la mesure par le capteur laser (tableau 1).

Orientation	X _{centre} mm	Y _{centre} mm	Z _{centre} mm	Nb de points	écart type
A0_B0	0.0016	0.0155	-0.0031	7472	0.016
	0.0014	0.0152	-0.0033	7348	0.0164
	0.00033	0.0169	-0.0028	7082	0.0153
	0.001	0.0172	-0.0021	9459	0.0159
	0.00014	0.0169	-0.00039	12387	0.0162
	-0.00021	0.0169	-0.00022	12704	0.0165

Tableau 1: Résultats associées au test de répétabilité

A.2. Etude du recalage des nuages de points

Pour évaluer l'erreur du recouvrement entre les différentes orientations du capteur on propose de numériser une sphère de référence selon quatre orientations différentes. Nous avons essayé de faire la numérisation chaque fois à la même distance de la sphère pour éviter l'influence de la relation entre la justesse et la distance de numérisation et l'influence de la relation entre le bruit de numérisation et la distance de numérisation [BOURDET 2005]. Les orientations sont les suivantes (tableau 2) :

A	B
0°	0°
45°	0°
45°	90°
45°	180°
45°	-90°

Tableau 2: Les orientations de la numérisation

Pour quantifier l'influence du recouvrement, deux analyses ont été réalisées. La première s'attache à associer à chaque nuage de points la sphère des moindres carrés conduisant à définir pour chaque nuage, la position du centre et le rayon de la sphère associée (figure 2).

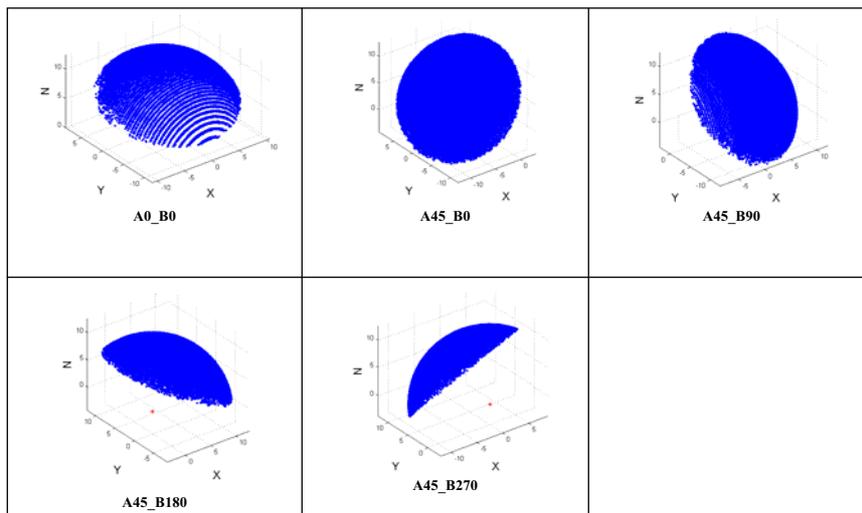


Figure A 2 : Nuages de points acquis pour plusieurs orientations de capteur

Les résultats de l'association d'une sphère aux nuages de points (tableau 3) montrent que les centres des sphères associées aux nuages de points ne sont pas confondus pour les différentes orientations de numérisation.

Orientation	Essai N°	X _{centre} mm	Y _{centre} mm	Z _{centre} mm	Nb de points	Ecart Type
A0-B0	Essai 1	0.0016	0.0155	-0.0031	7472	0.0160
	Essai 2	0.0014	0.0152	-0.0033	7348	0.0164
	Essai 3	0.00033	0.0169	-0.0028	7082	0.0153
	Moyenne	0.00111	0.0158	-0.0030	7300	0.0159
A45-B0	Essai 1	0.006	0.0167	0.0014	24994	0.016
	Essai 2	0.0062	0.0161	0.0015	14591	0.0159
	Essai 3	0.058	0.0171	0.0012	17463	0.01416
	Moyenne	0.006	0.0166	0.0013	19016	0.0153
A45-B90	Essai 1	-0.0144	0.0094	0.0046	12928	0.0159
	Essai 2	-0.0121	0.0110	0.0041	12834	0.0165
	Essai 3	-0.0117	0.0108	0.0043	12682	0.0163
	Moyenne	-0.0127	0.0104	0.00433	12814	0.0162
A45-B180	Essai 1	-0.0079	0.0045	-0.0015	25022	0.0159
	Essai 2	-0.0079	0.0033	-0.0014	16219	0.0158
	Essai 3	-0.0078	0.0038	-0.0014	16374	0.0158
	Moyenne	-0.0078	0.0038	-0.0014	192205	0.0158
A45-B270	Essai 1	0.0141	-0.0066	0.0029	14022	0.0164
	Essai 2	0.0161	-0.0060	0.0036	13989	0.0164
	Essai 3	0.0149	-0.0055	0.0037	20406	0.0167
	Moyenne	0.0150	-0.006	0.0034	16139	0.0165

Tableau 3: Résultats issus de l'association d'une sphère

Dans un deuxième temps, les nuages de points, représentant la sphère sont assemblés (figure 3). Nous pouvons visualiser les zones de recouvrement par l'analyse des couleurs des différents nuages de points. Afin d'analyser les erreurs de recouvrement, nous calculons la sphère des moindres carrés pour l'ensemble du nuage de points reconstitué, nous calculons les écarts des points au modèle.

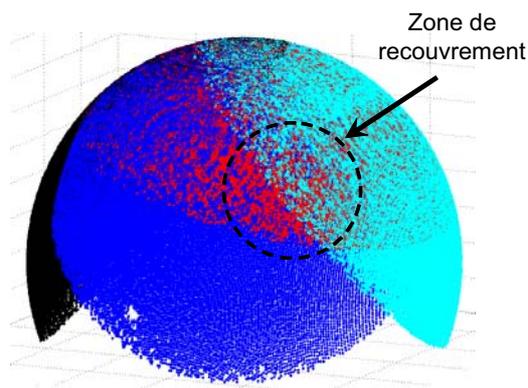


Figure A 3 : Numérisation de la sphère selon plusieurs orientations

La figure 4 présente les écarts de tous les points issus des 4 orientations.

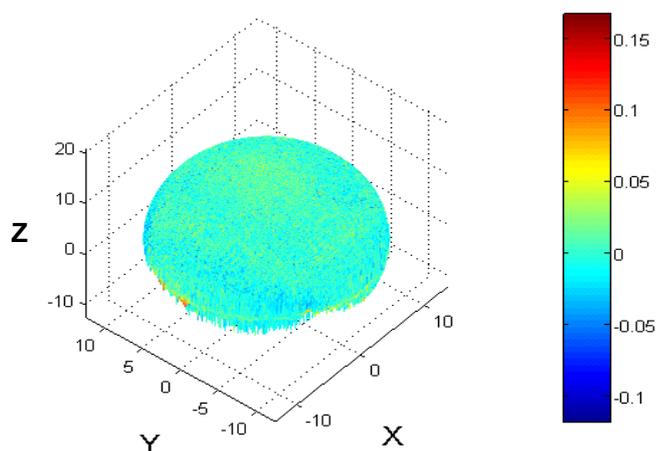


Figure A 4 : Ecarts par rapport à la surface de la sphère des moindres carrés

Selon cette figure nous trouvons que les écarts varient principalement entre -0.05 mm et $+0.05$ mm. De plus nous ne détectons pas des lignes de recouvrement (changement brusque de couleur) entre les différents paquets numérisés. Nous pouvons dire que le positionnement du capteur est bien effectué et la numérisation de la pièce selon plusieurs orientations de capteur n'est pas une source d'erreur de recouvrement significative sur la pièce usinée.

Annexe B. Modèle géométrique idéal du centre de fraisage 5 axes

Dans le processus de copiage rapide, les trajectoires d'usinage calculées sur les nuages de points sont décrites dans le repère associé à la pièce indépendamment de la structure de la machine qui usinera la pièce. Le programme contient les coordonnées des points à atteindre, X_{pr} , Y_{pr} , Z_{pr} et l'orientation de l'axe de l'outil par ses cosinus directeurs I , J et K . Un post-processeur dédié à la machine utilisée effectue la transformation de coordonnées pour passer du repère pièce au repère machine, s'appuyant sur le modèle géométrique de la machine. La machine Mikron du laboratoire étant une structure de type RRTTT avec les rotations affectées à la pièce sur les axes A et C (figure 5), la transformation géométrique consiste à déterminer les coordonnées articulaires (X_m , Y_m , Z_m , A, C) en fonction des coordonnées pièce (X_{pr} , Y_{pr} , Z_{pr} , I , J , K) [LAVERNHE et al. 2006].

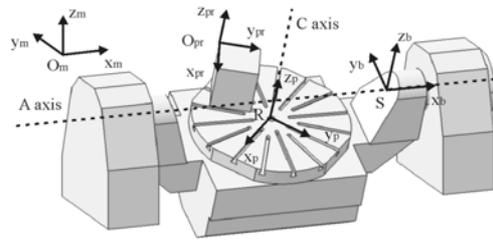


Figure A 5 : Définition des différents repères

Les différents repères (figure 5) sont les suivants :

- Le repère machine (O_m , x_m , y_m , z_m) qui s'appuie sur la structure de la machine. Ses axes sont parallèles aux axes de translation X , Y et Z de la machine. L'axe Z_m est parallèle à l'axe de l'outil,
- Le repère berceau (S , x_b , y_b , z_b) est lié au berceau de la machine : x_b est parallèle à x_m , S est sur l'axe A et est donné par l'équation suivante :

$$\vec{Oms} = m_x \cdot \vec{x}_m + m_y \cdot \vec{y}_m + m_z \cdot \vec{z}_m \quad (1)$$

- Le repère plateau (R , x_p , y_p , z_p) est lié au plateau tournant : z_p est parallèle à z_b , R est défini comme l'intersection entre l'axe C et la face supérieure de la table :

$$\vec{SR} = b_y \cdot \vec{y}_b + b_z \cdot \vec{z}_b \quad (2)$$

- Le repère de programmation (O_{pr} x_{pr} y_{pr} z_{pr}) est lié à la pièce : c'est le repère utilisé pour générer les trajectoires d'usinage. Son origine O_{pr} est donné par l'équation suivante :

$$\vec{RO}_{pr} = P_x \cdot \vec{X}_p + P_y \cdot \vec{Y}_p + P_z \cdot \vec{Z}_p \quad (3)$$

Les paramètres m_x, m_y, m_z, b_y et b_z sont fixes, identifiés sur la machine outil. La position de la pièce sur la table est définie par les paramètres p_x, p_y et p_z . Pour passer d'un repère à l'autre, on utilise généralement la matrice P_{ij} qui permet d'exprimer un vecteur initialement dans le repère j dans le repère i . Voici l'ensemble de ces matrices (tableau 4) :

$P_{mb} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m_x \\ 0 & \cos(A) & \sin(A) & m_y \\ 0 & -\sin(A) & \cos(A) & m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$P_{bp} = \begin{bmatrix} \cos(C) & \sin(C) & 0 & 0 \\ -\sin(C) & \cos(C) & 0 & b_y \\ 0 & 0 & 1 & b_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$P_{ppr} = \begin{bmatrix} a & d & g & p_x \\ b & e & h & p_y \\ c & f & i & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
--	--	--

Tableau 4: Matrices de changement de repères

Les paramètres $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ définissent l'orientation de la pièce sur la table. L'orientation de l'axe de l'outil par rapport à la pièce est obtenue par les deux rotations sur la pièce. Ensuite, une fois que les angles A et C sont calculés, les axes de translation X, Y et Z se déplacent pour atteindre le point programmé tout en compensant l'effet des rotations sur la position de la pièce.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{(xm,ym,zm)} = P_{mb} \times P_{bp} \times P_{ppr} \times \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 0 \end{bmatrix}_{(xpr,ypr,zpr)}$$

Les consignes à appliquer aux axes de translation sont obtenues par l'équation suivante. Il s'agit de la transformation géométrique inverse.

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix}_{(Om,xm,ym,zm)} = P_{mb} \times P_{bp} \times P_{ppr} \times \begin{bmatrix} X_{pr} \\ Y_{pr} \\ Z_{pr} \\ 1 \end{bmatrix}_{(Opr,xpr,ypr,zpr)}$$

Nous proposons maintenant d'identifier les « paramètres réels » associés à la géométrie de la machine. Nous détaillons en particulier une méthode basée sur la mesure directe à l'aide d'un palpeur pour déterminer la distance entre les deux axes de rotation définie par les paramètres b_y et b_z .

Etape 1 : se centrer sur l'axe de rotation C dans la direction Y ; pour cela, on vient accoster selon Y un plan dégauchi selon X . Effectuer un demi-tour du plateau C , puis accoster le plan selon $-Y$ (figure 6). La position de l'axe C selon Y est donnée par :

$$Y_{axeC} = Y_1 + (Y_2 - Y_1)/2 \quad (4)$$

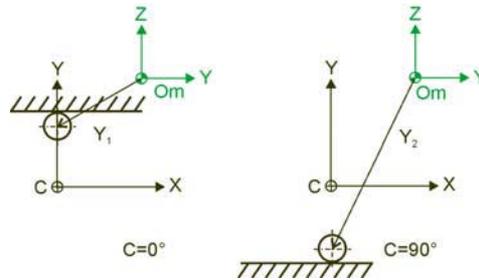


Figure A 6 : Manipulations de l'étape 1

Etape 2 : effectuer un quart de tour sur A ($A=+90^\circ$) pour mettre la table verticale. Accoster la face supérieure de la table (figure 7). Cette mesure nous donne l'équation :

$$Y_3 - R = Y_{axeC} - b_y - b_z \quad (5)$$

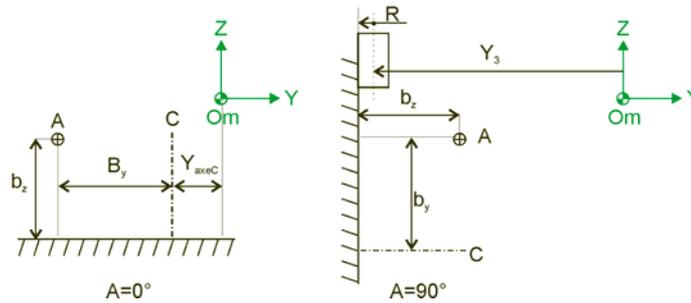


Figure A 7 : Manipulations de l'étape 2

Etape 3 : accoster selon Y une face verticale à l'aide du palpeur. Nous obtenons la relation suivante :

$$Y_4 = Y_{axeC} - L - R \quad (6)$$

Monter un outil en broche ; le choix de l'outil et de sa jauge n'intervient pas. Venir accoster la cale étalon de hauteur E posée sur la table selon $-Z$, comme pour faire la jauge outil. Nous obtenons la relation suivante :

$$Z_{axeA} = Z_1 - E + b_z \quad (7)$$

Pivoter l'axe A de 90° , puis refaire la même mesure sur la face accostée précédemment (figure 8). Nous obtenons la relation suivante :

$$Z_{axeA} = Z_2 - E - L + b_y \quad (8)$$

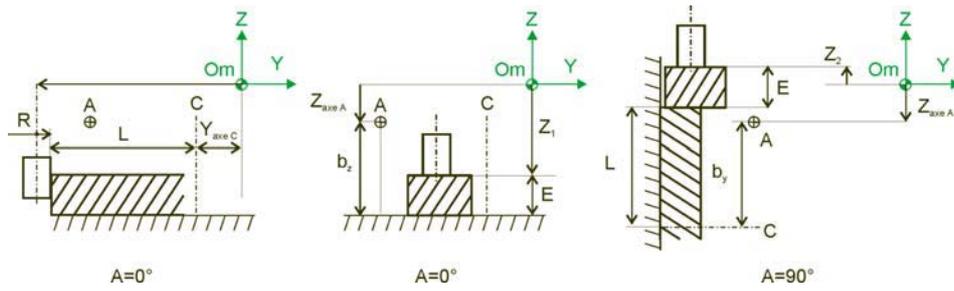


Figure A 8 : Manipulations de l'étape 3

Résolution : En éliminant Z_{axeA} entre les équations (7) et (8) puis en éliminant L avec l'équation (9), nous obtenons :

$$b_y - b_z = Z_1 - Z_2 - Y_{axeC} - Y_3 + Y_4 \quad (9)$$

Nous pouvons réécrire l'équation (8) sous la forme :

$$b_y + b_z = Y_{axeC} - Y_3 + R \quad (10)$$

Les équations (9) et (10) permettent d'obtenir facilement (tableau 5) :

b_y	50.0020	49.999
b_z	119.9965	119.995

Tableau 5: Les valeurs de b_y et b_z

Annexe C. Justification analytique de l'erreur d'estimation de la normale pour un nuage réel

C.1. Cas d'un nuage de points numérisé d'un plan

Nous avons mis en place l'équation qui permet d'évaluer l'erreur maxi de la normale estimée en fonction de la densité ρ , du bruit δ , du rayon de la sphère R (figure 9).

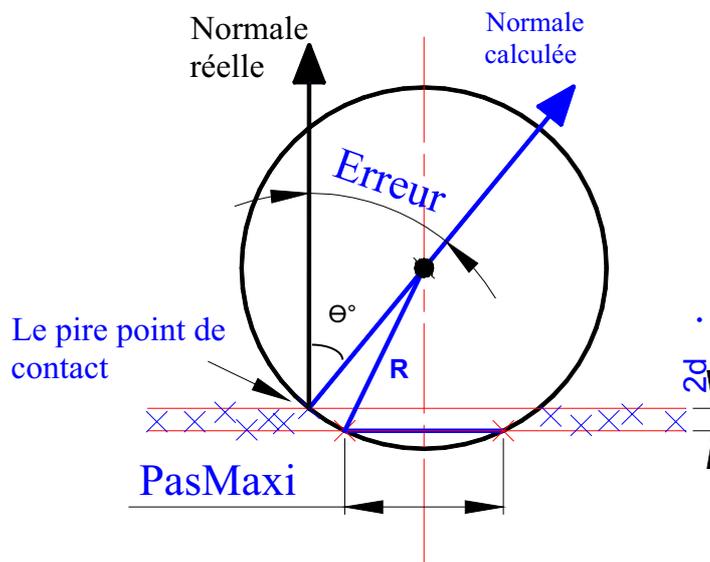


Figure A 9 : Le pire point de contact ; cas d'un plan

La formule qui donne l'erreur angulaire maximale entre les deux normales est la suivante :

$$\theta^\circ = \text{acos} \left[\frac{\sqrt{\left(R^2 - \frac{P^2}{4}\right) - 2\delta}}{R} \right]$$

Où : δ est le bruit, P est la distance maxi entre deux points voisins le plus écartés, R le rayon de la sphère utilisée.

Selon cette formule nous constatons que le rayon de la sphère R a l'influence la plus importante sur l'erreur angulaire de la normale estimée, par contre l'influence de la densité du nuage est moins forte.

C.2. Cas d'un nuage de points numérisé d'une surface convexe

Nous avons mis en place l'équation qui permet d'évaluer l'erreur maxi de la normale estimée en fonction de la densité ρ , du bruit δ , du rayon de la sphère R et du rayon de courbure locale du nuage K (figure 10).

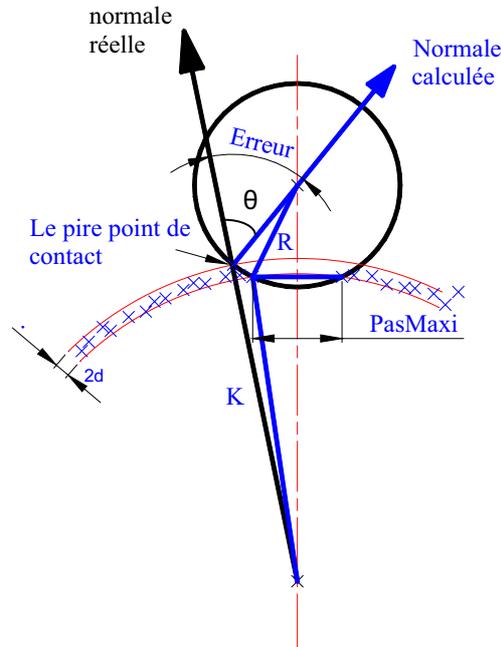


Figure A 10 : Le pire point de contact ; cas d'une surface convexe

La formule qui donne l'erreur angulaire maximale entre les deux normales est la suivante :

$$\text{erreur}^{\circ} = 180^{\circ} - \left[\frac{R^2 + K^2 - \lambda^2}{2 \times R \times K} \right]$$

Où le facteur λ est donné par :

$$\lambda = \left[\left(\sqrt{\left(R^2 - \frac{P^2}{4} \right)} \right) + \sqrt{\left[\left(K - 2 \times \delta \right)^2 - \frac{P^2}{4} \right]} \right]$$

P : est la distance maxi entre les deux points voisins les plus écartés.

K : la courbure locale du sous nuage de points autour du point de contact, la courbure peut être calculée en calculant la sphère des moindres carrés du sous nuage autour du point de contact.

Si nous traçons la fonction $\theta = f(K)$, en changeant à la fois le rayon de la sphère, la densité, et enfin le bruit, nous trouvons la figure 11.

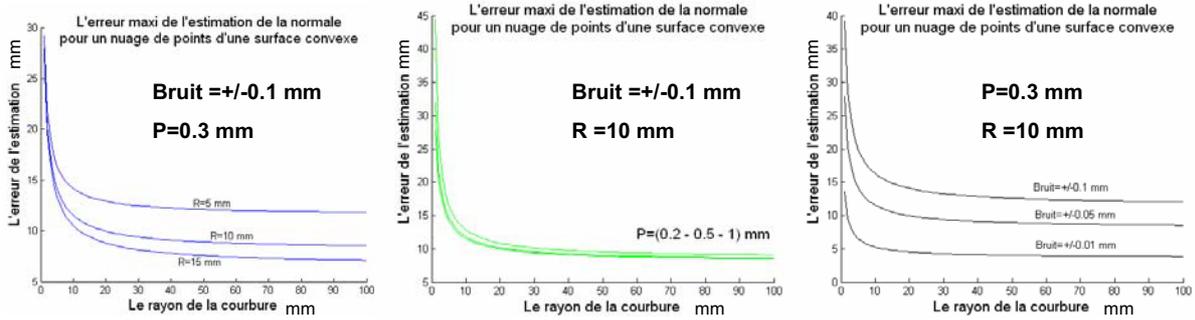


Figure A 11 : Corrélation entre le rayon de courbure et l'erreur de l'estimation

Selon ces graphes nous pouvons dire :

- le niveau du bruit a l'influence la plus importante sur la valeur de l'erreur maxi de la normale estimée,
- la faible densité locale du nuage de points ne perturbe pas beaucoup les résultats de la normale calculée,
- L'utilisation d'une sphère de lancement de grand diamètre améliore les résultats,
- nous constatons que l'augmentation du rayon de courbure locale du nuage minimise l'erreur maxi de la normale estimée pour les zones convexes.

Il faut noter que la probabilité d'avoir une erreur maxi de la normale est très faible, car la sphère de lancement doit tomber au milieu de deux points les plus écartés et le bruit doit être aussi maxi en même temps.

C.3. Cas d'un nuage de points numérisé d'une surface concave

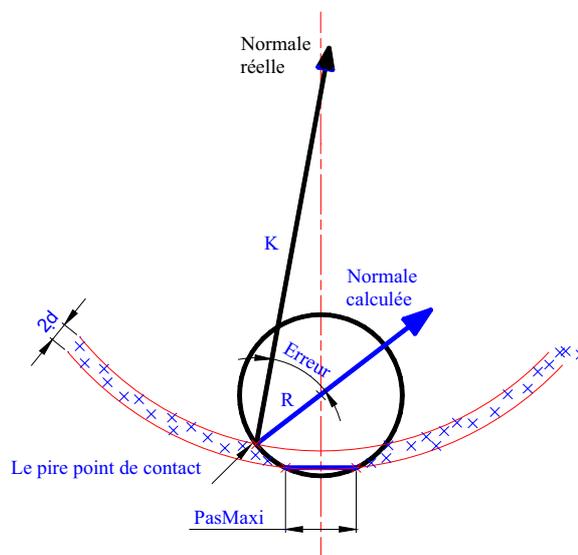


Figure A 12 : Le pire cas de contact ; cas d'une surface convexe

De la même manière (figure 12), nous trouvons la formule qui lie les différents paramètres influents sur l'erreur angulaire :

$$\text{erreur}^\circ = \text{acos} \left[\frac{K^2 - \lambda^2 + R^2}{2 \times R \times K} \right]$$

Où le facteur λ est donné comme la suite :

$$\lambda = \left[\sqrt{\left[(K + 2\delta)^2 - \frac{P^2}{4} \right]} - \sqrt{\left[R^2 - \frac{P^2}{4} \right]} \right]$$

Si nous traçons la fonction $\theta = f(K)$, en changeant à la fois le rayon de la sphère, la densité, et en fin le bruit. Nous trouvons la figure 13 suivante :

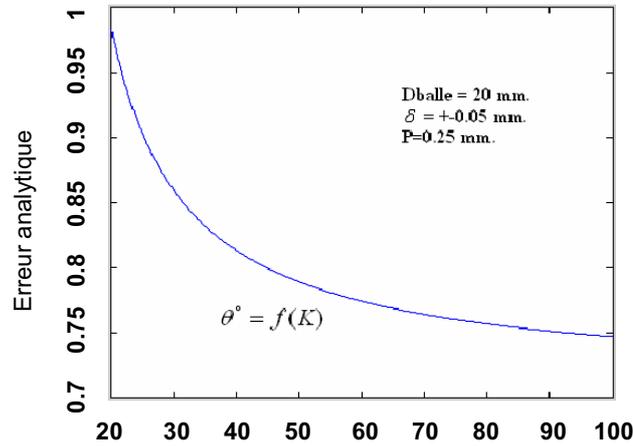


Figure A 13 : Corrélation entre l'erreur angulaire et la courbure d'une surface concave

C.4. Application de la méthode de calcul de la normale par lancer de sphère sur un nuage de points issu d'une forme d'un modèle CAO connu

Dans l'objectif de valider l'approche par lancer de sphère de façon plus générale, nous avons proposé de calculer les normales sur un nuage de points issu d'un modèle connu en CAO (exemple de la pièce plan/tore/sphère). Ainsi nous pourrions comparer les normales calculées selon notre approche avec celles du modèle CAO aux points concernés.

Il s'agit d'une pièce modélisée sur CATIA et usinée sur machine outil à commande numérique. Cette pièce se compose de trois formes primitives, une portion de sphère, un plan et une portion de cône raccordant la sphère au plan. La procédure d'évaluation est structurée dans la figure 15.

On numérise la pièce usinée sur la MMT, le nombre de points trouvé $N = 223227$ points, le pas de la grille est 0.5×0.5 mm, le diamètre de la sphère 10 mm. Selon la simulation effectuée des erreurs angulaires entre les normales calculées sur le modèle CAO et les normales calculées par l'approche de lancer d'une sphère nous constatons que la distribution des écarts est aléatoire et liée directement au bruit du nuage de points qui a une influence directe sur la densité locale du nuage. Nous constatons aussi que le plupart des écarts sont entre 0° et 2° , et l'écart moyen est de $2,3^\circ$ (figure 14).

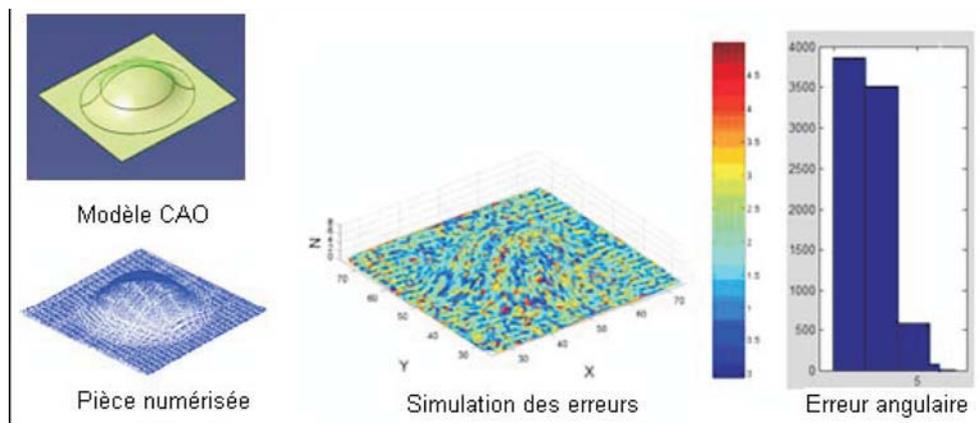


Figure A 14 : Validation de l'approche de lancer de sphère

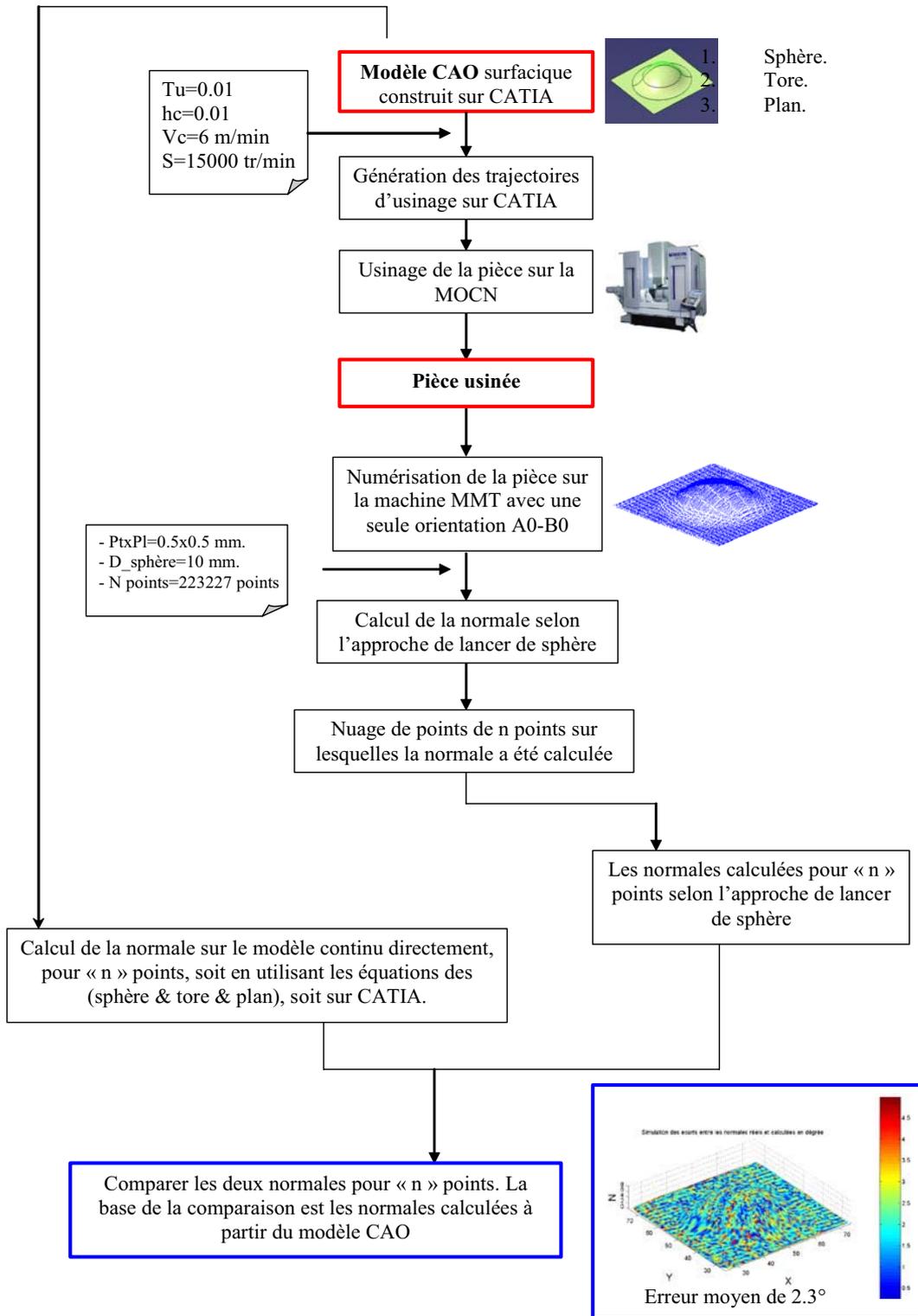


Figure A 15 : Procédure d'évaluation de la méthode

Résumé en français :

Les travaux de recherche exposés dans cette thèse sont consacrés à la mise au point d'une chaîne opérationnelle de copiage direct d'objet de formes complexes permettant, à partir de la numérisation 3D de l'objet par un capteur laser plan, d'obtenir une copie par usinage à 5 axes. Dans l'optique de réalisation d'une copie conforme du point de vue qualité géométrique visuelle nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étape de préparation du nuage de points en vue de l'usinage en 5 axes positionné. Nous proposons une nouvelle approche de découpage automatique du nuage de points en paquets basée sur la minimisation de la longueur des lignes de recouvrements entre paquets. Le découpage proposé s'appuie sur le Nous démontrons au travers d'applications diverses la faisabilité de la démarche développée ainsi que sa pertinence pour des applications de prototypage rapide.

Mots clés : Nuage de points, données discrètes, visibilité, partitionnement, copiage direct, numérisation 3D, usinage 5 axes, prototypage rapide, génération des trajectoires.

Abstract

The research works described in this thesis deals with the development of an operational direct copying chain of complex object. From 3D scanned data, the duplication chain leads to a copy obtained by NC discrete five axes machining. With a view to optimize the geometric visual quality, we are particularly interested in the preparation stage of the data for discrete 5-axis machining. In particular, a novel automatic method for data segmentation into sub-sets is proposed based on the minimization of the length of overlapping areas between sub-sets. The segmentation method relies on the calculation of the visibility, which is based on technological and topological criteria. The feasibility of direct duplication of physical objects is illustrated through various examples showing the relevance of the approach for rapid prototyping applications.

Key words : 3D digitized data, visibility, segmentation, direct duplication, 5 axis machining, rapid prototyping, tool path generation.

