HAL
open science

Trajectoires de numérisation adaptatives en contexte in-situ

Nguyen Duy Minh Phan

To cite this version:

Nguyen Duy Minh Phan. Trajectoires de numérisation adaptatives en contexte in-situ. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLN005 . tel-02100728

HAL Id: tel-02100728

https://theses.hal.science/tel-02100728v1

Submitted on 16 Apr 2019

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.

université PARIS-SACLAY

école normale supérieure paris–saclay

NNT : 2019SACLN005

Trajectoires de numérisation adaptatives en contexte in-situ

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à École normale supérieure Paris-Saclay

Ecole doctorale n°579 Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences (SMEMAG)
Spécialité de doctorat : Génie Mécanique

Thèse présentée et soutenue à Cachan, le 20 Mars 2019, par

NGUYEN DUY MINH PHAN

Composition du Jury :

M. Jean-yves HASCOËT Professeur des Universités, École Centrale de Nantes	Président
M. Charyar MEHDI-SOUZANI Maître de conférence, Université Paris 13	Examinateur
M. Jean-Philippe PERNOT Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech, campus d'Aix en Provence	Rapporteur
M. Mehdi CHERIF Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech, campus de Bordeaux-Talence	Rapporteur
Mme. Claire LARTIGUE Professeur des Universités, Université Paris-Sud	Directeur de thèse
M. Yann QUINSAT Professeur agrégé-HDR, ENS Paris-Saclay	Co-encadrant de thèse

Thèse de doctorat

Remerciements

Mes travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisée au Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) au sein de l'équipe Géométrie tridimensionnelle des pièces et des mécanismes (Géo3D), École Normale Supérieure Paris-Saclay.

J'exprime toute ma reconnaissance envers mes encadrants qui ont énormément contribué à l'aboutissement de ce travail de thèse. Un grand merci à Mme. Claire Lartigue, ma directrice de thèse, son encadrement et son investissement m'ont beaucoup apporté. Sa relecture finale méticuleuse de chacun des chapitres m'a permis de préciser mon propos. Je remercie vivement M. Yann Quinsat, mon co-encadrant pour sa grande disponibilité et sa forte implication aussi bien sur les aspects scientifiques et techniques que sur l'aspect humain. Sa présence quotidienne durant plus de trois années de thèse est réellement indispensable.

Je tiens également à remercier M. Jean-Yves Hascoët qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse. Je remercie M. Jean-Philippe Pernot pour avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse. Je remercie M. Mehdi Cherif, également rapporteur de cette thèse, pour ses commentaires qui ont permis d'améliorer mon rapport.

Un grand merci à l'ensemble des membres du laboratoire : les permanents, les anciens et futurs docteurs pour leurs nombreux conseils, leur soutien mutuel, leurs encouragements et le temps précieux qu'ils m'ont accordé pendant ces trois années.

Je tiens également à remercier mes amis « hors labo », les amis vietnamiens qui me permettent de m'évader un peu du monde scientifique, qui m'ont apporté leur soutien moral pendant ces années d'études. Et merci Mme Tuan Anh, Mme Dung, Mme Nhu pour toute la préparation de mon pot de thèse.

Je terminerai mes remerciements par ma famille qui m'a épaulé durant toutes

ces années et un merci tout particulier à Trang, ma femme, merci de me supporter chaque jour et de prendre tant soin de moi malgré les années.

Table des matières

Table des matières iii

Table des figures vii

Liste des tableaux xiii

Introduction générale 1

1 Stratégie de numérisation en contexte on-machine : un état de l'art 5

1.1 Introduction 7

1.2 Stratégie de numérisation 10

1.2.1 Contrainte de la visibilité 11

1.2.2 Contrainte de la qualité 16

1.2.3 Synthèse 19

1.3 Démarche de mesure on-machine sur MOCN 5 axes 23

1.3.1 Position du problème 23

1.3.2 Démarche proposée 27

2 Qualification de trajectoire de numérisation 31

2.1 Introduction 33

2.2 Description des paramètres du capteur et de la trajectoire 34

2.3 Simulation des trajectoires de numérisation 36

2.3.1 Définition des paramètres 38

2.3.2 Fonction de visibilité 40

2.3.3 Fonction de qualité 42

2.3.4 Influence de la taille de maille sur la normale à la surface . . . 45

2.4 Validation du simulateur 47

2.4.1 Étude de cas 1 : numérisation d'une pièce en aluminium par le capteur KZ25 49
2.4.2 Étude de cas 2 : numérisation d'une pièce en résine polyuréthane 59
2.4.3 Synthèse sur les études de validation 63
2.5 Conclusion 64

3 Méthode de planification de trajectoire : ISOvScan 67

3.1 Introduction 69
3.2 Définition du recouvrement de numérisation 70
3.3 État de l'art sur le contrôle du recouvrement 73
3.4 Trajectoire de numérisation à recouvrement maîtrisé-ISOvScan [Phan et al., 2018] 78
3.4.1 Transformation entre l'espace 3D et l'espace paramétrique 2D en utilisant la transformation LSCM 79
3.4.2 Génération des points pilotés 83
3.4.3 Détermination du vecteur directeur de ligne laser, $\vec{V_L}$ 84
3.4.4 Détermination du vecteur d'axe du faisceau laser, $\vec{V_C}$ 85
3.5 Facteurs influençant la méthode ISOvScan 88
3.5.1 Taille de maille 89
3.5.2 Géométrie de la surface 90
3.6 Application sur une surface de test 93
3.6.1 Paramètres du capteur 95
3.6.2 Application 98
3.6.3 Résultats et discussion 99
3.7 Conclusion 103

4 Trajectoire de numérisation pour MOCN 5-axes 107

4.1 Introduction 109
4.2 Trajectoire de numérisation pour MOCN 5-axes 110
4.3 Adaptation de la trajectoire de numérisation à la machine 5-axes . . . 117

4.3.1 Trajectoire adaptée avec priorité au temps de mesure (contrôle du recouvrement) . . . 120
4.3.2 Trajectoire adaptée avec priorité au contrôle de la qualité . . . 125
4.4 Synthèse sur la génération de trajectoire sur MOCN 5-axes . . . 129
4.5 Conclusion . . . 129

5 Application **131**
5.1 Introduction . . . 133
5.2 Contexte expérimental . . . 133
5.3 Intégration du capteur dans la MOCN 5 axes . . . 136
5.3.1 Mise en place du système de numérisation . . . 136
5.3.2 Calibration du capteur laser-plan . . . 137
5.4 Mise en œuvre de la mesure . . . 142
5.4.1 Génération de la trajectoire par ISOvScan et lissage . . . 143
5.4.2 Modification de la trajectoire pour l'exécution sur MOCN . . . 144
5.4.3 Trajectoire de numérisation avec priorité au contrôle de recouvrement . . . 147
5.5 Analyse . . . 149
5.5.1 Évaluation de la qualité de mesure . . . 149
5.5.2 Évaluation de la performance de mesure . . . 152
5.6 Conclusion . . . 155

Conclusions & Perspectives **157**

Références **161**

Table des figures

1.1 Mesure in-situ [Dubreuil, 2017] 7

1.2 Diagramme d'activité avec une opération de pré-mesure [Dubreuil, 2017] 8

1.3 Intégration du capteur dans la MOCN 5 axes 9

1.4 Définition d'une trajectoire de numérisation [Lartigue et al., 2014] . . 11

1.5 Définition du champ de vision du capteur laser-plan 12

1.6 Champ de vision par rapport au profil de la surface [Xi and Shu, 1999] 12

1.7 Définition du champ de vision 3D 13

1.8 Planification de trajectoire à partir du maillage de la pièce [Wu et al., 2015] 14

1.9 Boîte englobante divisée en cubes en fonction du volume de mesure du capteur [Koutecky et al., 2016] 15

1.10 Représentation du bruit [Hoppe et al., 1992] 16

1.11 Evolution du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation [Mehdi-Souzani et al., 2016] 17

1.12 Evolution du bruit de numérisation en fonction de l'angle de numérisation [Mehdi-Souzani et al., 2016] 18

1.13 Trajectoire de numérisation suivant le contour de surface [Martins et al., 2005] 18

1.14 Qualification de voxel [Lartigue et al., 2014] 19

1.15 Recouvrement de numérisation 23

1.16 Mesure on-machine par capteur laser-plan 24

1.17 Orientation du capteur par rapport à la surface 25

1.18 Paramètres décrivant les configurations du capteur 26

1.19 Processus de planification de trajectoire sur MOCN 5 axes 27

2.1 Paramétrisation du capteur laser-plan [Audfray, 2012] 34
2.2 Paramètres décrivant les configurations du capteur 35
2.3 Paramètres du capteur laser et volume balayé entre deux configurations 36
2.4 Fonctionnement du simulateur 37
2.5 Paramètres associés au maillage et au plan laser 39
2.6 Définition de l'angle de numérisation limite α_{max} 39
2.7 Volume balayé par la nappe laser entre deux configurations successives 40
2.8 Discrétisation des orientations par interpolation 42
2.9 Représentation du bruit [Hoppe et al., 1992] 43
2.10 Définition de la qualité en fonction de distance de numérisation et de l'angle de numérisation 44
2.11 Triangle T inscrit dans une sphère de rayon R 46
2.12 Angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale 46
2.13 Influence de la taille de maille sur l'angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale 47
2.14 Système de numérisation sur MMT [Mehdi-Souzani et al., 2006] . . . 48
2.15 Trajectoires de numérisation pour le test ($A = 0°, B = 90°, z = 0\ mm$) 49
2.16 Capteur laser-plan Kréon KZ25 50
2.17 Évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation (a) et de l'angle de numérisation (b) 50
2.18 Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance et de l'angle de numérisation [Audfray, 2012] 51
2.19 Évolution de bruit en fonction de la distance de numérisation (Capteur KZ25) 52
2.20 Évolution du bruit en fonction de l'angle de numérisation (Capteur KZ25) 52
2.21 Pièce test en aluminium 53
2.22 Code de couleurs pour la représentation des facettes en simulation . . 54
2.23 Démarche de qualification du nuage de points 55

2.24 Évolution de bruit de numérisation de la surface 55
2.25 Zone rouge dans la simulation (gauche) et verte dans la numérisation réelle (droite) 58
2.26 Bruit causé par le recouvrement 58
2.27 (a) CAO de la surface (b) Pièce en résine polyuréthane à numériser . 59
2.28 Évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation (a) et de l'angle de numérisation (b) 60
2.29 Évolution du bruit en fonction de la distance de numérisation (Capteur Aquilon) 61
2.30 Évolution de bruit en fonction d'angle de numérisation (Capteur Aquilon) 61

3.1 Génération de trajectoire de numérisation 6 axes 70
3.2 Profil de nuage de points dans les zones de recouvrement 71
3.3 Définition de la zone de recouvrement 72
3.4 Évolution du bruit de numérisation sur le plan de référence 72
3.5 Histogramme des écarts géométriques dans les zones de recouvrement 73
3.6 Modèle de distribution de peinture [Andulkar et al., 2015] 75
3.7 Trajectoire de peinture [Atkar et al., 2005] 75
3.8 Trajectoire de peinture [Tang and Chen, 2015] 76
3.9 Géométrie de la trajectoire d'outil iso-crêtes [Tournier and Duc, 2002] 77
3.10 Génération de hauteurs de crête sur une surface convexe et concave [Can and Ünüvar, 2010] 77
3.11 Génération de trajectoire d'outil iso-planaire a) Surface 3D b) Maillages triangulaires planaires c) Trajectoire iso-planaire en $2D$ d) Trajectoire iso-planaire en $3D$ [Li et al., 2011] 78
3.12 Paramètres décrivant les configurations du capteur 79
3.13 Triangle défini dans une base locale 80
3.14 Une surface 3D transformée en surface 2D par LSCM 82
3.15 Génération de trajectoire de numérisation 83
3.16 Identification des facettes liées à la ligne laser 86

3.17 Représentation de la surface 86
3.18 Exemples de trajectoires de numérisation pour différents intervalles entre passes 87
3.19 Simulation de numérisation des trajectoires de numérisation pour différents intervalles entre passes 88
3.20 Position relative entre la ligne laser du capteur et la surface 89
3.21 Erreur LSCM de surface à faible variation de courbure 91
3.22 Erreur LSCM de surface à haute variation de courbure 92
3.23 Système de numérisation 94
3.24 Système de tracking externe (www.kreon3d.com) 94
3.25 Modèle CAO de la pièce test 95
3.26 Bruit de numérisation en fonction de distance de numérisation 96
3.27 Mesure d'un plan de référence avec le taux de recouvrement de 25% 96
3.28 Nombre de passes en fonction de taux de recouvrement 97
3.29 Évolution de bruit en fonction de taux de recouvrement 97
3.30 Trajectoire de numérisation calculée et simulation de numérisation . . 98
3.31 Simulation sous RoboDK© 99
3.32 Écarts géométriques entre le nuage de points et son modèle CAO . . 100
3.33 Bruit de numérisation et qualité 101
3.34 Évaluation de la qualité de numérisation dans les zones de recouvrement 102
3.35 Validation de la méthode ISOvScan 104

4.1 Adaptation de la trajectoire de numérisation pour une machine 5-axes 110
4.2 Modélisation de la Mikron et repères associés [Lavernhe et al., 2007] 111
4.3 Trajectoire de numérisation initiale 118
4.4 Simulation de numérisation de la trajectoire initiale 118
4.5 Variation de l'angle A en fonction de W 119
4.6 Trajectoire adaptée avec priorité donnée au contrôle de recouvrement 121
4.7 Variation angulaire entre $\vec{V}_C'$ et $\vec{V}_C$ 122
4.8 Simulation de numérisation 122
4.9 Surface test 2 123

4.10 Trajectoire adaptée avec priorité donnée au contrôle de recouvrement 123
4.11 Variation angulaire entre $\vec{V}_C'$ et $\vec{V}_C$ 124
4.12 Simulation de numérisation 124
4.13 Trajectoire adaptée avec une priorité donnée au contrôle de qualité . 126
4.14 Variation angulaire entre $\vec{V}_L$ et $\vec{V}_L'$ 126
4.15 Simulation de numérisation 127
4.16 Trajectoire adaptée avec une priorité donnée au contrôle de qualité . 127
4.17 Variation angulaire entre $\vec{V}_L'$ et $\vec{V}_L$ 128
4.18 Simulation de numérisation 128

5.1 Représentation du capteur et de la surface usinée 134
5.2 Calcul de la justesse de mesure sur une hauteur de marche [Audfray, 2012] 135
5.3 Mise en place technique du laser Kréon dans la machine-outil 137
5.4 Repères définis dans **Setup.exe** de Polygonia 138
5.5 Organigramme de calibration du capteur dans la MOCN 5 axes . . . 139
5.6 Positionnement 3 axes avec la sphère 141
5.7 Cercle passant par les 8 centres mesurés de la sphère 141
5.8 Configuration de l'axe C dans **Setup.exe** de Polygonia 142
5.9 Configuration de l'axe A dans **Setup.exe** de Polygonia 142
5.10 Génération de la trajectoire de numérisation 5 axes 143
5.11 Génération de la trajectoire 144
5.12 Décalage entre le repère de la broche et le repère du capteur 145
5.13 Adaptation de la trajectoire 148
5.14 Simulation de numérisation 148
5.15 Résultat de numérisation 149
5.16 Représentation d'écarts géométriques en mm 150
5.17 Numérisation de la surface en zigzag $z = 0\ mm$ 151
5.18 Numérisation de la surface en zigzag $z = 20\ mm$ 152
5.19 Bruit de numérisation sur une zone locale 152

5.20 Histogrammes des écarts par rapport à la mesure 1000 mm-mn N°1 (Toute la surface) 153

Liste des tableaux

1.1 Résumé sur les stratégies de numérisation 20

2.1 Paramètres de la surface à numériser 38

2.2 Trajectoires de numérisation 54

2.3 Résultats pour la simulation de numérisation et la numérisation réelle (A=0° ; B=90°) 56

2.4 Résultats pour la simulation de numérisation et la numérisation réelle (A=15° ; B=0°) 57

2.5 Résultats pour la simulation de numérisation et la numérisation réelle 62

3.1 Paramètres 3D et 2D 81

4.1 Domaines de solutions des angles A,C 116

4.2 Solutions en fonction de K^* 116

4.3 Domaines de solutions des angles A,C 120

4.4 Solutions en fonction de K 121

5.1 Bruit de numérisation et justesse pour les couples (Kréon+MOCN) et (Kréon+MMT) [Dubreuil, 2017] 136

5.2 Bruit de numérisation obtenu pour cinq mesures 153

5.3 Écarts par rapport à la mesure 1000 mm/mn N°1 (Toute la surface) . 154

5.4 Bruit de numérisation obtenu pour deux mesures avec la vitesse de déplacement du capteur 800 mm/min 154

5.5 Bruit de numérisation obtenu pour deux mesures avec la vitesse de déplacement du capteur 1200 mm/min 154

Introduction générale

Dans un commerce mondial de plus en plus concurrentiel avec un accroissement rapide des nouvelles technologies, la maîtrise de la qualité des produits est un facteur clé du succès des entreprises manufacturières. Cette maîtrise est nécessaire afin de garantir que les produits livrés respectent les exigences et les délais requis par le client. Le contrôle qualité est ainsi une activité indispensable au processus de fabrication.

Dans le domaine de l'inspection et du contrôle 3D des pièces mécaniques, de nombreux moyens de contrôle permettent de vérifier la conformité d'une pièce fabriquée. En particulier, les palpeurs à contact montés sur des Machine à Mesurer Tridimensionnelles (MMT) sont très utilisés car ils permettent d'obtenir des résultats de mesure avec de faibles incertitudes. Avec l'évolution des nouvelles technologies, l'utilisation des capteurs de mesure 3D sans contact est de plus en plus répandue dans l'industrie en lieu et place de ces capteurs. Ces systèmes permettent l'acquisition d'un grand nombre de données sur la représentation géométrique des surfaces en un temps relativement court.

Dans le contexte de l'automatisation des processus de production, l'intégration de la phase de mesure au sein d'un processus de fabrication ou mesure in-situ devient de plus en plus essentielle. La mesure in-situ regroupe l'ensemble des techniques permettant la réalisation de la mesure de la pièce dans la même phase que la phase de fabrication, sans démontage de la pièce usinée. La comparaison de la pièce usinée à son modèle CAO est ainsi facilitée et une analyse rapide pour des actions correctives relativement à la conformité géométrique et dimensionnelle de la pièce réalisée, est possible. Une limite principale de l'intégration de la mesure in-situ au processus de fabrication concerne la perte de disponibilité de la machine lors de la mesure de la pièce. Par conséquent, la planification de trajectoire de mesure est essentielle pour

la réussite de l'intégration de la mesure in-situ. Un élément important concerne la compromis entre le temps de mesure et la qualité attendu.

Dans ce contexte, des premiers travaux réalisés lors de la thèse de Lorène Dubreuil ont mis en évidence l'intérêt d'une phase de pré-mesure par vision [Dubreuil, 2017] relativement à l'échelle des défauts. Les macro-défauts peuvent être très rapidement localisés à l'aide d'un système de stéréo-vision, à base de caméras directement implantées dans la machine-outil. La localisation des défauts sert alors de support pour la définition d'une trajectoire de mesure à incertitude maîtrisée afin de contrôler l'erreur de mesure. Lorsque les défauts géométriques sont de nature macro-géométrique, la phase de mesure peut s'appuyer sur l'utilisation d'un capteur laser-plan. Nos travaux s'inscrivent dans la continuité de travaux de Lorène Dubreuil. Ce travail de thèse a pour objectif de mettre en œuvre une phase de mesure avec un capteur laser-plan sur une MOCN 5 axes en contexte in-situ. Dans ce cadre, le capteur laser-plan est monté à la place d'un outil dans la broche de la machine et les travaux visent à proposer des algorithmes de génération de trajectoires de mesure, intégrant les contraintes liées à la mesure in-situ (temps de numérisation), et au capteur utilisé (visibilité, qualité, recouvrement).

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographie sur la mesure en contexte in-situ et sur les stratégies de numérisation. Cela permet d'identifier les problématiques liées à la mesure in-situ et à la génération de trajectoire de numérisation. La description de l'approche de la mesure on-machine proposée sur MOCN 5 axes est présentée à la fin du chapitre.

Le deuxième chapitre présente dans sa première partie la description des paramètres du capteur et la trajectoire permettant d'intégrer le capteur dans la broche de la machine. La deuxième partie se concentre sur la réalisation d'un simulateur de trajectoire de numérisation. Basé sur des critères de visibilité et de qualité, ce simulateur permet de définir les zones de la pièce correctement numérisées. Il permet à la fois de valider la trajectoire avant l'exécution de la numérisation sur le système physique et d'aider à la génération de trajectoire de numérisation.

Pour contrôler le temps et la qualité de numérisation, une méthode de planification de trajectoire de numérisation pour une structure 6 axes, ISOvScan (ISo-Overlap

Scan), est proposée dans le troisième chapitre. Dans cette méthode, la zone de recouvrement entre deux passes consécutives est constante, l'orientation du capteur en chaque point piloté est gérée afin d'assurer la qualité de numérisation et de maximiser le taux de couverture de la surface par le capteur laser. La méthode repose sur l'utilisation de la transformation conforme au sens des moindres carrés (Least Squares Conformal Maps-LSCM) pour transformer la surface 3D en un espace 2D. Le calcul de la trajectoire de numérisation peut alors être effectué plus simplement dans cet espace 2D.

Comme la cinématique de la machine-outil 5 axes ne permet pas d'appliquer directement la trajectoire 6 axes créée par la méthode ISOvScan définie précédemment, les méthodes pour générer une trajectoire du capteur laser adaptée à la numérisation 5-axes sont détaillées au sein du chapitre 4. Afin de valider la trajectoire de numérisation 5 axes adaptée, une application de numérisation sur la machine-outil 5-axes est proposée dans le chapitre 5.

Chapitre

1

Stratégie de numérisation en contexte on-machine : un état de l'art

1.1 Introduction

La maîtrise des procédés de fabrication est un challenge important pour le contrôle du temps de production et la qualité des pièces fabriquées. Aujourd'hui, l'intégration de la phase de mesure au sein d'un processus de fabrication ou mesure in-situ devient un élément essentiel d'un système de production automatisé. La mesure in-situ est définie comme une mesure réalisée directement dans le moyen de fabrication sans démontage de la pièce. Elle permet donc une analyse rapide vis-à-vis de la conformité géométrique de la pièce fabriquée. Il convient de différentier la mesure in-process et la mesure on-machine (On-machine Measurement-OMM). Lors d'une mesure in-process, la mesure s'effectue en même temps que la réalisation de la pièce quand le procédé de fabrication n'est pas arrêté. Lors de la mesure on-machine, la mesure de la géométrie de la pièce est effectuée lorsque le processus d'usinage est arrêté (Figure 1.1). Cela facilite la comparaison de la pièce usinée à son modèle CAO et permet donc une analyse rapide, relativement à la conformité géométrique et dimensionnelle de la pièce réalisée. L'OMM permet d'envisager la mise en place d'actions correctives, soit directement sur la pièce mesurée si le défaut le permet, soit sur la pièce suivante [Quinsat, 2016].

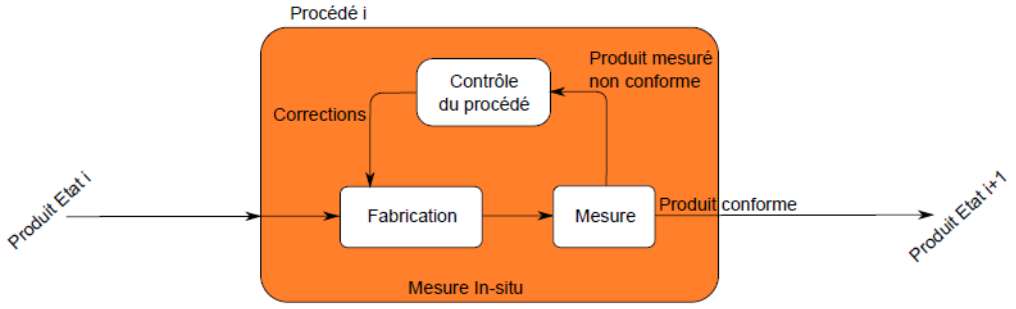


Figure 1.1: Mesure in-situ [Dubreuil, 2017]

Dans le contexte de mesure on-machine, afin d'exploiter pleinement les possibilités offertes par l'intégration de la phase de mesure dans le processus de fabrication, il est nécessaire de respecter deux contraintes principales [Dubreuil, 2017] :

- Une meilleure interopérabilité entre les données d'usinage et les données mesurées

- Une minimisation du temps alloué pour la phase de mesure

Dans la littérature, la problématique d'interopérabilité ou de gestion de données entre la gamme de fabrication et la mesure est abordée dans plusieurs travaux. Il est possible de mentionner les travaux de Cho et Seo., [Cho and Seo, 2002] qui proposent une stratégie de palpage sur machine-outil pour mesurer les pièces de formes complexes. Ils soulignent l'importance d'avoir une interaction directe entre les données de fabrication (Computer Aided Manufacturing-CAM) et les données de mesure (Computer Aided Inspection-CAI) pour aller vers un processus de fabrication totalement intégré. Lee et al., [Lee et al., 2004] définissent une approche basée sur des entités permettant de lier les opérations d'usinage et la phase de mesure avec le palpeur. Basés sur le format STEP-NC, les travaux de Zhao [Zhao et al., 2008, Zhao and Xu, 2010] proposent un modèle d'échange des données pour la mesure on-machine par palpeur à contact. Dans le contexte de l'usinage multi-axes, Zhao et al., [Zhao et al., 2017] ont démontré l'intérêt de gérer les relations entre la géométrie de la pièce à mesurer et la cinématique de la machine-outil afin de mieux contrôler la qualité de la mesure.

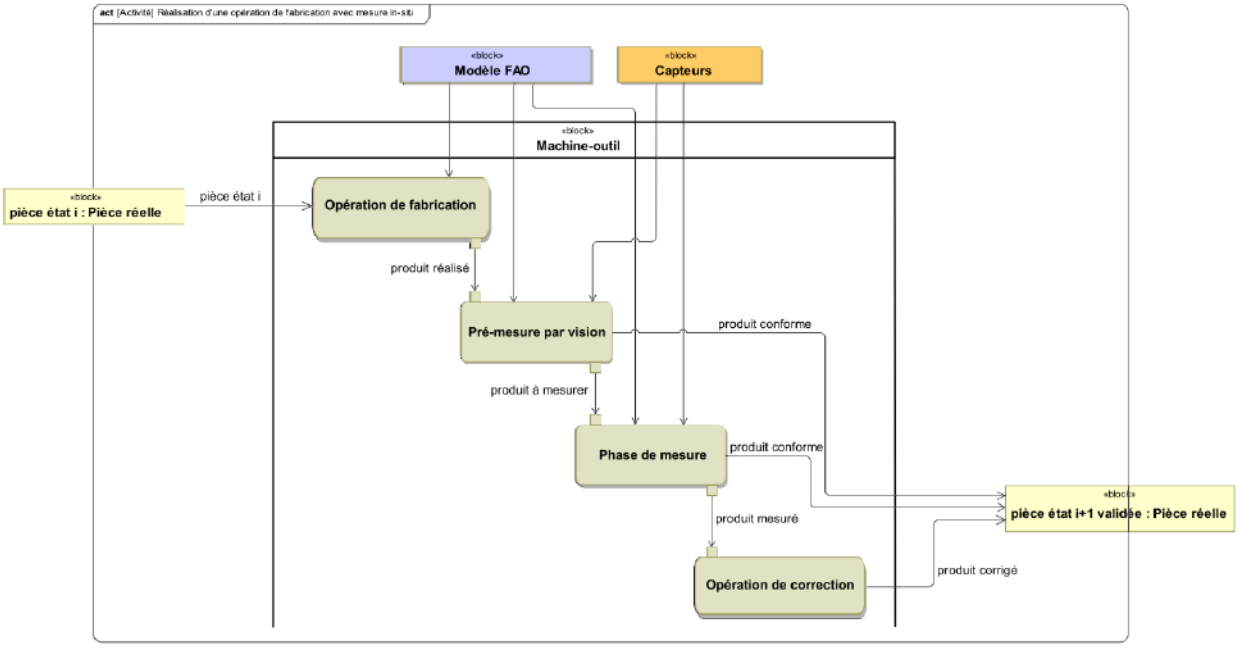


Figure 1.2: Diagramme d'activité avec une opération de pré-mesure [Dubreuil, 2017]

Dans le cadre de la surveillance du procédé d'usinage, un modèle d'échange des

données fabrication/mesure a été proposé dans le cas de mesure in-situ [Dubreuil, 2017]. Une phase de mesure est intégrée après chacune des opérations d'usinage si un défaut est détecté et peut être complétée par les actions de corrections. Ce modèle permet de modéliser les échanges de différents flux de données du système de fabrication et du système de mesure. Pour répondre à la contrainte du temps de mesure réduit, une opération de pré-mesure par vision a été développée. Elle est ajoutée après l'opération d'usinage, juste avant la phase de mesure (Figure 1.2). Cette opération permet de localiser les défauts sur la pièce et ainsi de déclencher une phase de mesure uniquement sur les zones présentant des défauts. Si des défauts géométriques de la pièce ne sont pas détectés par cette étape, l'opération d'usinage suivante pourra être effectuée.

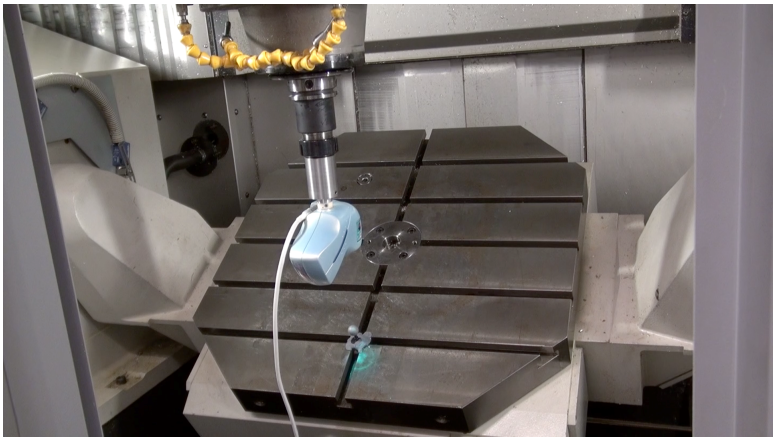


Figure 1.3: Intégration du capteur dans la MOCN 5 axes

Nos travaux s'inscrivent dans la continuité de travaux de Lorène Dubreuil. L'objectif de notre travail de thèse est de réaliser une phase de mesure faisant suite aux résultats issus de la phase de pré-mesure et en respectant les contraintes liées à la mesure-on machine et au défaut à mesurer. Lorsque les défauts géométriques sont de nature macro-géométrique, la phase de mesure peut s'appuyer sur l'utilisation d'un capteur laser-plan. Ainsi, l'objectif des travaux de thèse est d'aboutir à la génération des trajectoires de mesure d'un capteur laser-plan sur MOCN 5 axes. Dans ce cadre, le capteur laser-plan est monté à la place d'un outil dans la broche de la machine (Figure 1.3), et les travaux visent à mettre en œuvre une phase de mesure efficiente dans la machine-outil.

Il s'agit en particulier de proposer une méthode de génération de trajectoire de numérisation en 5 axes qui résulte d'un compromis entre le temps de mesure et la qualité des données acquises dans un environnement de fabrication.

L'analyse bibliographique sur les stratégies de numérisation est présentée dans le paragraphe suivant. Elle permet d'identifier les contraintes de numérisation qui influent sur l'efficacité de la trajectoire de numérisation.

1.2 Stratégie de numérisation

Dans le cadre général de la mesure des pièces fabriquées, les capteurs optiques sont de plus en plus utilisés ; ils permettent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et qualité de mesure. Cependant, quel que soit le système de déplacement, la planification de trajectoire de numérisation reste un défi majeur pour obtenir une représentation complète de la surface en un minimum de temps avec une qualité de numérisation attendue. En effet, les problèmes de gestion de la complétude de l'acquisition, des zones de recouvrement et de la qualité des données acquises ne sont pas complètement résolus.

La planification de trajectoire de numérisation d'un capteur consiste à définir un ensemble de configurations du capteur ou points de vue permettant de numériser une surface. Un point de vue est défini par un point P et une orientation $\overrightarrow{d}$ [Lartigue et al., 2014] (Figure 1.4). Il définit donc le positionnement (distance et orientation) relatif du capteur par rapport à la surface de la pièce. L'ensemble des points de vue définit la trajectoire de numérisation.

Les points de vue sont classiquement déterminés en imposant au capteur certaines contraintes par rapport à la pièce à numériser. La littérature propose de nombreuses méthodes de planification de trajectoire de numérisation pour les capteurs sans contact. Les études sur les contraintes de visibilité sont les plus dominantes dans les travaux de recherche [Xi and Shu, 1999, Lee and Park, 2000, Fernandez et al., 2008, Raffaeli et al., 2013, Wu et al., 2015, Ding et al., 2016, Koutecky et al., 2016]. La qualité des données numérisées est une autre contrainte à prendre en compte dans la planification de trajectoire [Son et al., 2002, Martins et al., 2005, Mahmud

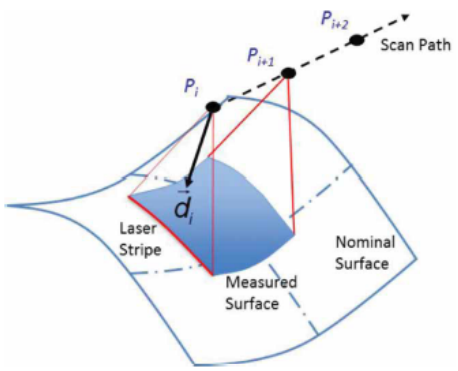


Figure 1.4: Définition d'une trajectoire de numérisation [Lartigue et al., 2014]

et al., 2011, Lartigue et al., 2014]. Dans les paragraphes suivants, nous exposons une brève revue de la littérature sur les méthodes de planification de trajectoires de numérisation de capteur sans contact selon le critère de visibilité et le critère de qualité de numérisation.

1.2.1 Contrainte de la visibilité

Dans la littérature, la plupart des méthodes de détermination de point de vue sont basées sur la notion de visibilité de la pièce. Il s'agit de déterminer si un point ou une portion de la surface est visible à partir d'un point de l'espace ou d'une configuration du capteur. Ces méthodes sont bien souvent adaptées à un capteur donné. Nous pouvons les classer en deux familles : méthodes adaptées au capteur laser-plan et méthodes adaptées au capteur à projection de franges.

Le capteur laser-plan est utilisé dans plusieurs travaux [Xi and Shu, 1999, Lee and Park, 2000, Fernandez et al., 2008, Ding et al., 2016]. Ce type de capteur a un champ de vision (Field Of View-FOV) ou fenêtre de mesure en 2D. Le FOV est la partie du faisceau laser visible par la caméra du capteur. Il est défini par la hauteur H et la largeur L (Figure 1.5).

Xi et Shu [Xi and Shu, 1999] s'appuient sur le modèle CAO pour trouver l'emplacement optimal du champ de vision par rapport au profil de la surface permettant de maximiser le balayage du capteur. La surface est divisée en plusieurs sections en découpant le modèle CAO en tranches transversales parallèles, dont chacune peut

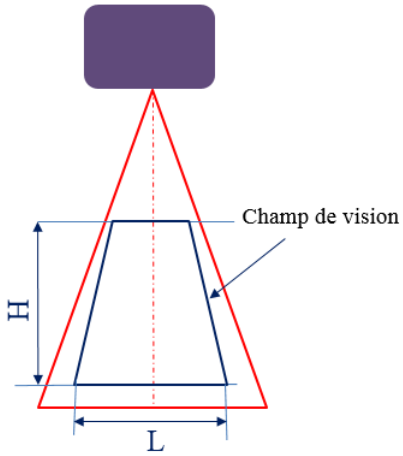
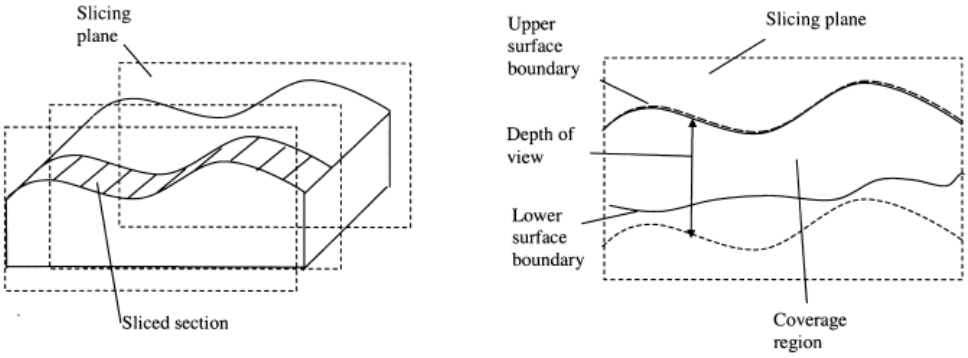


Figure 1.5: Définition du champ de vision du capteur laser-plan

être balayée par une trajectoire. Pour une section, le profil extérieur de la surface associé à chaque section est obtenu en projetant la surface sur le plan de découpe (Figure 1.6). Pour trouver la localisation optimale du FOV par rapport au profil extérieur de la surface à numériser, la frontière supérieure du FOV est alignée avec la limite supérieure de la surface. La zone de couverture est définie en décalant la hauteur du FOV de façon à ce que la frontière inférieure du FOV suive la limite inférieure de la surface. Si la limite inférieure du profil de la surface appartient à la zone de couverture, la numérisation de toute la surface de la section est assurée.



(a) Plan découpé

(b) Frontière de la surface et zone de couverture

Figure 1.6: Champ de vision par rapport au profil de la surface [Xi and Shu, 1999]

Lee et Park [Lee and Park, 2000] définissent les directions accessibles localement (Locally accessible directions-LADs) en chaque point du maillage de la surface en

respectant des contraintes de configuration capteur/pièce telles que le champ de vision et la hauteur du champ de vision. Les directions admissibles globalement sont obtenues par des opérations booléennes (Intersections) sur les LADs.

Fernandez et al., [Fernandez et al., 2008] présentent un système de planification automatique pour la numérisation de pièces en utilisant le capteur laser-plan monté sur une MMT. L'analyse de visibilité du modèle représenté sous la forme d'un maillage est réalisée en deux phases : analyse locale et analyse globale en fonction des contraintes de visibilité telles que l'angle de numérisation limite, le champ de vision et les orientations possibles de la tête laser.

Ding et al., [Ding et al., 2016] proposent une méthode de planification de trajectoire dans laquelle les directions de numérisation et les déplacements du capteur sont analysés à partir de la segmentation de la surface. La surface numérisée est divisée en mailles triangulaires. Un triangle est visible par une direction de numérisation si l'angle entre la normale au triangle et la direction de numérisation est dans le cône de visibilité.

Certains travaux proposent les trajectoires de numérisation appuyées sur la notion de visibilité pour un capteur à projection de franges. Ce capteur a un champ de vision 3D permettant une grande vitesse d'acquisition. Le FOV volumique 3D en forme de pyramide est défini par la hauteur H, la largeur L et la longueur l (Figure 1.7).

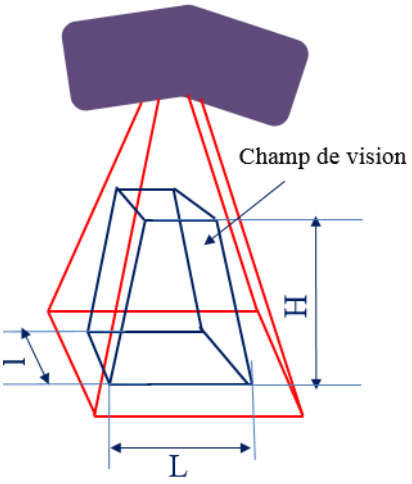
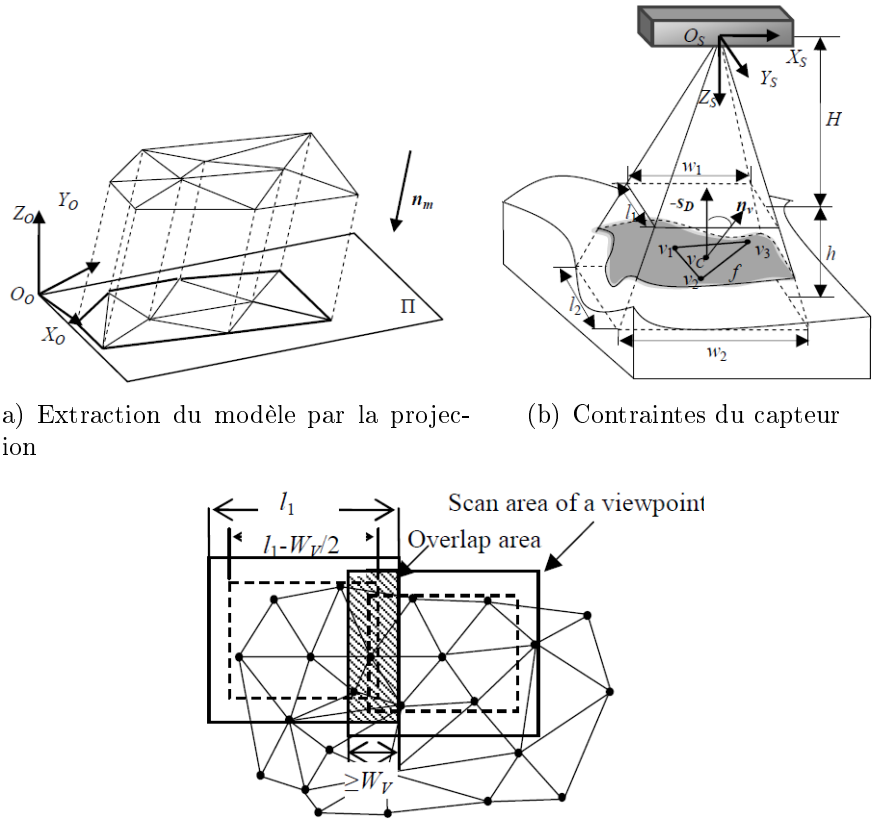


Figure 1.7: Définition du champ de vision 3D

Les travaux de [Raffaeli et al., 2013] portent sur la planification de points de vue pour un robot basée sur une surface NURBS. Le principe proposé consiste à diviser la surface en portions incluses dans le champ de vision du capteur et pour lesquelles les variations de vecteurs normaux ne dépassent pas une limite angulaire. Les points visibles par le même point de vue sont rassemblés selon deux conditions : la distance maximale entre deux points d'un même groupe doit être inférieure au champ de vision du capteur, et l'angle maximum entre les vecteurs normaux doit être inférieur à une limite angulaire.



(a) Extraction du modèle par la projection

(b) Contraintes du capteur

(c) Contrainte de recouvrement

Figure 1.8: Planification de trajectoire à partir du maillage de la pièce [Wu et al., 2015]

Wu et al., [Wu et al., 2015] proposent une méthode de planification de trajectoire d'inspection de surface sur un robot à six degrés de liberté. Cette méthode adapte automatiquement la trajectoire à la forme complexe de l'objet en changeant continuellement la direction de mesure du capteur à projection de franges. Chaque

point de vue de la trajectoire prévue doit satisfaire plusieurs contraintes : le champ de vision, la distance de numérisation, l'angle de numérisation et le recouvrement. Tout d'abord, la représentation filaire du modèle CAO est extraite de la projection du modèle dans la direction principale déterminée par la moyenne des vecteurs normaux de la surface (Figure 1.8). Ensuite, le modèle est divisé en plusieurs régions de numérisation en utilisant un rectangle dont les dimensions sont déterminées en prenant en compte le champ de vision du capteur et la contrainte de largeur minimale de recouvrement entre deux points de vue. Les points de vue satisfaisant les contraintes de numérisation sont planifiés pour chaque région de numérisation. Enfin, une trajectoire de numérisation du capteur dans le repère du robot est générée à partir des points de vue dans le repère de la pièce grâce à la transformation cinématique inverse.

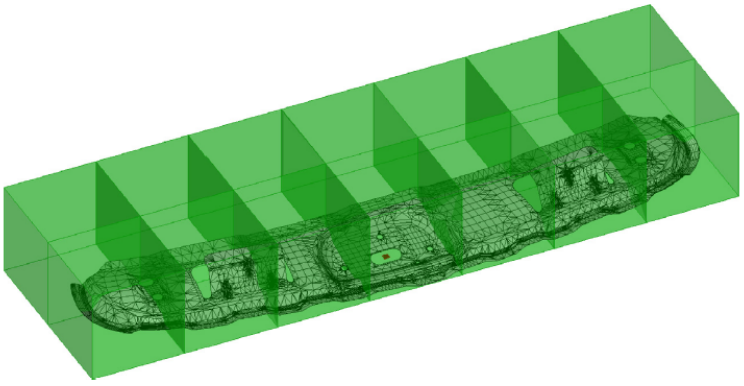


Figure 1.9: Boîte englobante divisée en cubes en fonction du volume de mesure du capteur [Koutecky et al., 2016]

L'étape de la segmentation de surface numérisée est aussi utilisée dans une approche de planification de trajectoire de numérisation par [Koutecky et al., 2016]. Les auteurs décrivent un nouveau système pour la planification de trajectoires de numérisation basé sur un modèle CAO de la pièce en tôle en utilisant un capteur à projection de franges et un robot industriel. Une surface sous la forme de maillage polygonal est divisée en cubes en fonction du champ de vision du capteur (Figure 1.9). Le calcul des orientations des caméras par rapport à un segment est ensuite effectué afin d'avoir le plus grand nombre de facettes polygonales de ce segment visibles.

1.2.2 Contrainte de la qualité

Certains travaux proposent de définir des points de vue en fonction de critères de visibilité et de critères de qualité. La qualité des données numérisées dépend du système de numérisation, mais également de la stratégie de numérisation. La qualité de numérisation est souvent abordée au travers de l'indicateur de bruit de numérisation *δ-bruit* [Hoppe et al., 1992] (Figure 1.10). Soit un ensemble de n points M_i acquis par la numérisation et les points P_i considérés comme les projections orthogonales des points M_i sur la surface idéale associée par le critère des moindres carrés, le vecteur erreur e_i est défini par $M_i = P_i + e_i$. Sur l'ensemble d'un nuage de points, il est possible de calculer l'écart-type σ de la répartition des e_i. L'indicateur *δ-bruit* est calculé par l'équation 1.1 :

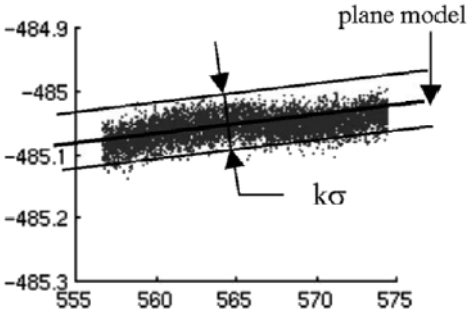


Figure 1.10: Représentation du bruit [Hoppe et al., 1992]

$$\delta = k.\sigma = k.\sqrt{\frac{1}{n}.\sum_{i=1}^{n}(e_i - \bar{e_i})^2} \tag{1.1}$$

Où k représente un facteur d'élargissement choisi le plus souvent égal à 1, $\bar{e_i}$ la moyenne des écarts.

Les travaux de [Audfray, 2012, Vukasinovic et al., 2010, Mehdi-Souzani et al., 2016] ont montré que le bruit varie en fonction de la configuration du capteur relativement à la surface, c'est-à-dire en fonction à la fois de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation. Plus généralement, la surface de référence est un plan. La distance de numérisation D représente la distance entre la source lumineuse du capteur et la surface mesurée. Pour étudier l'influence de la distance de numérisation, le capteur est placé perpendiculairement à la surface sur différentes distances

D en fonction de la hauteur L du FOV (Figure 1.11). Les résultats obtenus pour un système composé d'un capteur laser-plan monté sur une MMT montrent que le bruit augmente avec la distance de numérisation (Figure 1.11).

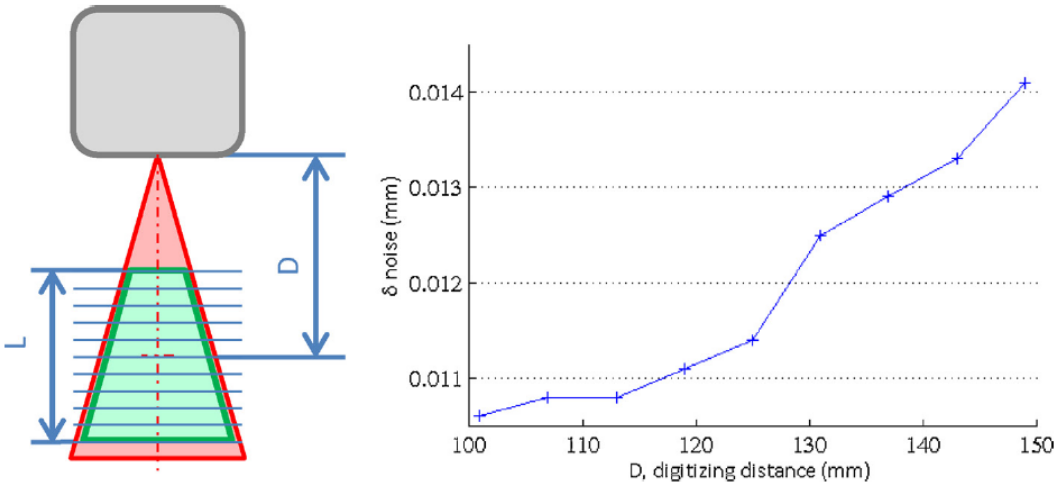


Figure 1.11: Evolution du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation [Mehdi-Souzani et al., 2016]

L'influence des angles de numérisation sur le bruit de numérisation a également été étudiée. Pour le capteur laser-plan, l'angle de numérisation α est défini comme un angle entre le vecteur normal $\overrightarrow{n}$ au point mesuré et le plan du laser (Figure 1.12). Pour le capteur testé, les résultats présentés sur la figure 1.12 mettent en évidence que le bruit diminue avec l'angle de numérisation, avec un bruit maximal pour α=10°. Cette évolution est liée au capteur évalué, et par conséquent, pour chaque capteur utilisé, une qualification est nécessaire pour identifier l'influence de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation sur l'évolution du bruit.

Un certain nombre de méthodes de planification de trajectoire ont permis de définir les configurations capteur/pièce permettant de satisfaire la qualité des données numérisées [Prieto et al., 1999, Son et al., 2002, Martins et al., 2005, Mahmud et al., 2011, Lartigue et al., 2014]. Son et al., [Son et al., 2002] proposent une approche qui définit la trajectoire pour une numérisation automatique de pièces en prenant en compte les paramètres tels que la direction de numérisation relative du capteur par rapport à la surface, et le nombre de numérisations nécessaires.

Martins et al., [Martins et al., 2005] proposent une approche basée sur le modèle

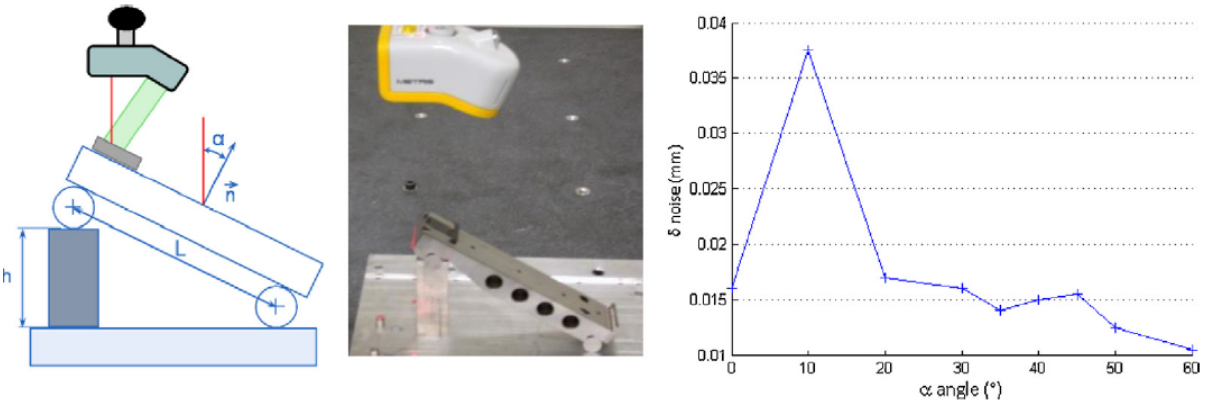


Figure 1.12: Evolution du bruit de numérisation en fonction de l'angle de numérisation [Mehdi-Souzani et al., 2016]

CAO pour un capteur laser-plan. Un volume de numérisation est divisé en tranches selon la largeur de la ligne laser. La trajectoire qui suit les formes de l'objet est générée pour chaque tranche (Figure 1.13). La détermination de points de vue prend en compte les critères suivants : configuration du système de numérisation, qualité de numérisation et longueur de trajectoire. La qualité des données numérisées est déterminée en associant à chaque point à mesurer une fonction tenant compte de l'angle entre la direction d'incidence du laser et le vecteur normal à la surface contenant ce point. Ainsi, la surface à numériser appartient toujours à la zone optimale du champ de vision du capteur, ce qui garantit la qualité de numérisation.

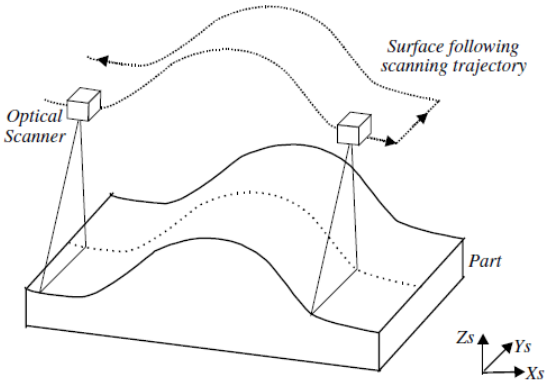


Figure 1.13: Trajectoire de numérisation suivant le contour de surface [Martins et al., 2005]

Mahmud et al., [Mahmud et al., 2011] déterminent les trajectoires de numé-

risation avec un capteur laser-plan pour minimiser l'incertitude de mesure. Pour avoir une trajectoire optimale, les positions et orientations du capteur sont prises en compte. Chaque changement d'orientation du capteur augmente l'incertitude de mesure globale, la trajectoire est donc créée en limitant le nombre d'orientations du capteur. La distance entre la surface considérée et le capteur est la distance optimale pour que la surface soit au milieu du champ de vision du capteur.

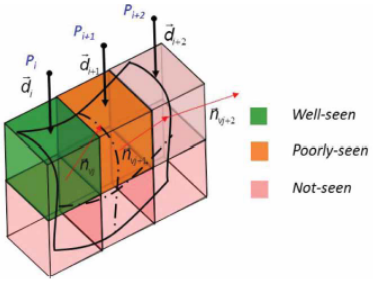


Figure 1.14: Qualification de voxel [Lartigue et al., 2014]

L'approche développée dans l'étude de Lartigue et al., [Lartigue et al., 2014] repose sur la représentation de la surface de la pièce par une voxel map, pour laquelle la taille de chaque voxel est définie en fonction de la largeur du champ de vision du capteur. Pour chaque voxel, un point de vue unique est associé en fonction de la visibilité et de la qualité conduisant à un ensemble de points de vue admissibles pour assurer la numérisation de surface avec une qualité donnée. L'angle de numérisation ϕ est défini par l'angle entre la direction de la numérisation et le vecteur normal au voxel. En définissant α_{adm}, l'angle de numérisation admissible selon les critères de qualité, un voxel peut être qualifié de la façon suivante :

- $0 \leq \phi \leq \alpha_{adm}/2$ le voxel est qualifié de bien vu
- $\alpha_{adm}/2 \leq \phi \leq \alpha_{adm}$ le voxel est qualifié de mal vu
- $\alpha_{adm} \leq \phi$ le voxel est qualifié de non vu

1.2.3 Synthèse

Une synthèse des travaux sur les stratégies de numérisation proposées dans la littérature est présentée sur le tableau 1.1.

Tableau 1.1: Résumé sur les stratégies de numérisation

Publications	Système de numérisation				Contraintes de numérisation		
	Porteur		Capteur				
	MMT	Robot	Laser-plan	Autres	Visibilité	Qualité	Recouvrement
[Xi and Shu, 1999] [Lee and Park, 2000] [Fernandez et al., 2008] [Ding et al., 2016]	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
[Wu et al., 2015]	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓
[Raffaeli et al., 2013] [Koutecky et al., 2016]	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗
[Son et al., 2002] [Martins et al., 2005] [Mahmud et al., 2011] [Lartigue et al., 2014]	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗

La littérature propose des méthodes de planification de trajectoire pour la numérisation d'objets par des systèmes de déplacement pilotables tels que les MMT et les bras robotisés. La plupart des travaux autour de la planification de trajectoire de numérisation utilise la MMT comme système de déplacement [Xi and Shu, 1999, Son et al., 2002, Martins et al., 2005, Fernandez et al., 2008, Lartigue et al., 2014, Ding et al., 2016].

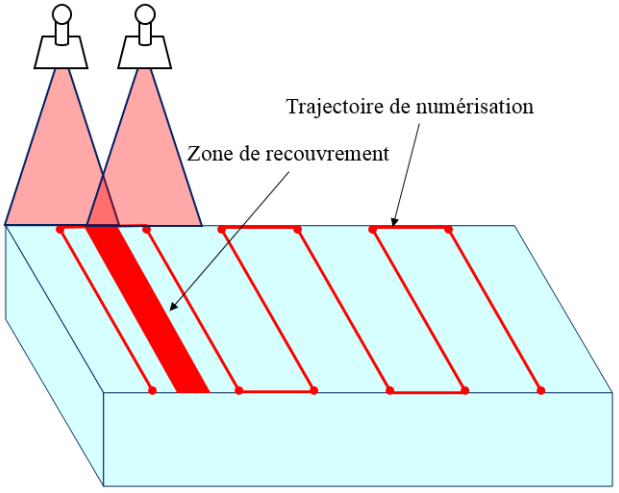
Les méthodes de planification de trajectoire de numérisation peuvent être classées en fonction des types de capteurs sans contact choisis. Les capteurs optiques les plus utilisés dans le domaine de l'inspection sont les capteurs laser à triangulation car ils offrent une grande précision et un coût relativement faible par rapport à d'autres systèmes [Gerbino et al., 2016]. Ce type de capteur utilise un émetteur qui projette une source lumineuse sur la surface et une caméra qui reçoit la lumière réfléchie par la surface. Parmi les capteurs laser à triangulation, le capteur laser-plan est utilisé dans plusieurs études de planification de trajectoire pour la numérisation de la surface [Xi and Shu, 1999, Lee and Park, 2000, Martins et al., 2005, Fernandez et al., 2008, Lartigue et al., 2014, Ding et al., 2016]. Contrairement au capteur laser-plan qui possède un champ de vision ou fenêtre de mesure 2D, le capteur à projection de franges possède une fenêtre de mesure 3D qui lui permet une grande vitesse d'acquisition. Il est plus souvent utilisé pour l'inspection sur robot industriel [Raffaeli et al., 2013, Wu et al., 2015, Koutecky et al., 2016].

La trajectoire de numérisation est décrite dans la littérature comme un ensemble de points de passage avec la direction de numérisation définie par la direction de l'axe du faisceau laser [Martins et al., 2005, Mahmud et al., 2011, Lartigue et al., 2014, Ding et al., 2016]. Les méthodes détaillées considèrent la trajectoire de numérisation comme un ensemble de points de vue définis en fonction des contraintes, majoritairement des contraintes de qualité et de visibilité de numérisation. De nombreuses études [Mahmud et al., 2011, Lartigue et al., 2014] soulignent que la distance de numérisation ainsi que l'orientation du capteur par rapport à la surface sont des facteurs qui influencent fortement la visibilité, mais également la qualité de numérisation. La qualité des données acquises dépend aussi d'autres facteurs comme le recouvrement. La zone de recouvrement représente la partie de la surface numérisée

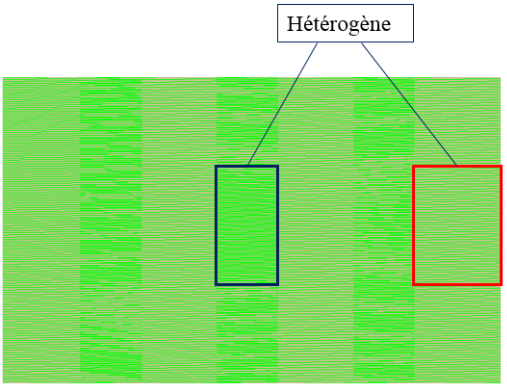
par deux acquisitions différentes (Figure 1.15(a)). En effet, pour éviter les trous de numérisation, il est nécessaire d'avoir un recouvrement entre différentes acquisitions réalisées par une ou plusieurs orientations du capteur par rapport à la pièce. Le recalage entre différents nuages de points crée des zones de recouvrement de densité de points variable [Guarato, 2013]. Cela conduit à une qualité de numérisation hétérogène sur la surface (Figure 1.15(b)). De plus, l'augmentation du taux de recouvrement conduit à l'augmentation de la longueur de trajectoire. Par conséquent, le recouvrement de numérisation, s'il n'est pas contrôlé, peut affecter à la fois la qualité de mesure et le temps de numérisation. Il y a très peu d'étude proposant une trajectoire gérant le recouvrement (cf. tableau1.1). Seuls Wu et al., [Wu et al., 2015] proposent la prise en compte du recouvrement dans la détermination des points de vue, mais cette étude est adaptée uniquement pour les capteurs à projection de franges.

Si quelques études existent traitant de la planification de trajectoires de numérisation pour les systèmes de déplacement offrant plus de degrés de liberté tels que les robots [Raffaeli et al., 2013, Wu et al., 2015, Koutecky et al., 2016], il n'existe en revanche pas de travaux concernant la planification de trajectoire de numérisation sur MOCN 5 axes. Une machine-outil 5 axes est un porteur non conventionnel, dont les caractéristiques géométriques et les erreurs volumétriques ne sont pas équivalentes à une MMT [Quinsat, 2016]. Cependant, l'intégration d'un capteur dans la broche de la machine-outil permet d'augmenter son accessibilité, et pourrait permettre de numériser selon des orientations variées de manière continue. Ainsi, il serait possible de numériser en choisissant des configurations capteur/pièce qui assureraient une bonne qualité, tout en minimisant les temps de numérisation. Si l'on s'intéresse plus particulièrement à la numérisation avec un capteur laser-plan, il n'y a pas de travaux qui proposent une trajectoire continue définissant l'ensemble des configurations capteur/pièce permettant de gérer l'orientation de la nappe laser par rapport à la trajectoire. La planification de trajectoire de numérisation dans une machine-outil 5 axes est un enjeu majeur pour la mesure on-machine.

Dans ce contexte, les travaux proposés dans cette thèse s'attachent à la génération de trajectoire de numérisation pour un capteur laser-plan monté dans la broche



(a) Définition de la zone de recouvrement



(b) Nuage de points hétérogène

Figure 1.15: Recouvrement de numérisation

d'une machine-outil 5 axes, avec deux objectifs majeurs : le contrôle de la qualité de numérisation, et le contrôle du temps de mesure afin de limiter les temps d'immobilisation de la machine. La démarche proposée est détaillée dans le paragraphe suivant.

1.3 Démarche de mesure on-machine sur MOCN 5 axes

1.3.1 Position du problème

Le contexte des travaux présentés concerne la mesure on-machine, le processus d'usinage est arrêté lors de la mesure impliquant une perte de disponibilité de la

machine. Dans ce cadre, il convient de proposer une méthode de planification de trajectoires de mesure qui résulte d'un compromis entre le temps de mesure et la qualité des données acquises. Nous proposons une approche de mesure on-machine sur MOCN 5 axes avec un capteur sans contact de type laser plan monté dans la broche de la machine, comme un outil (Figure 1.16). L'intégration du capteur dans la MOCN 5 axes permet de gérer l'orientation du laser par rapport à la pièce et la direction de déplacement. Notre objectif est de générer une trajectoire de numérisation en 5 axes continue en assurant la qualité de numérisation avec un temps de numérisation optimal.

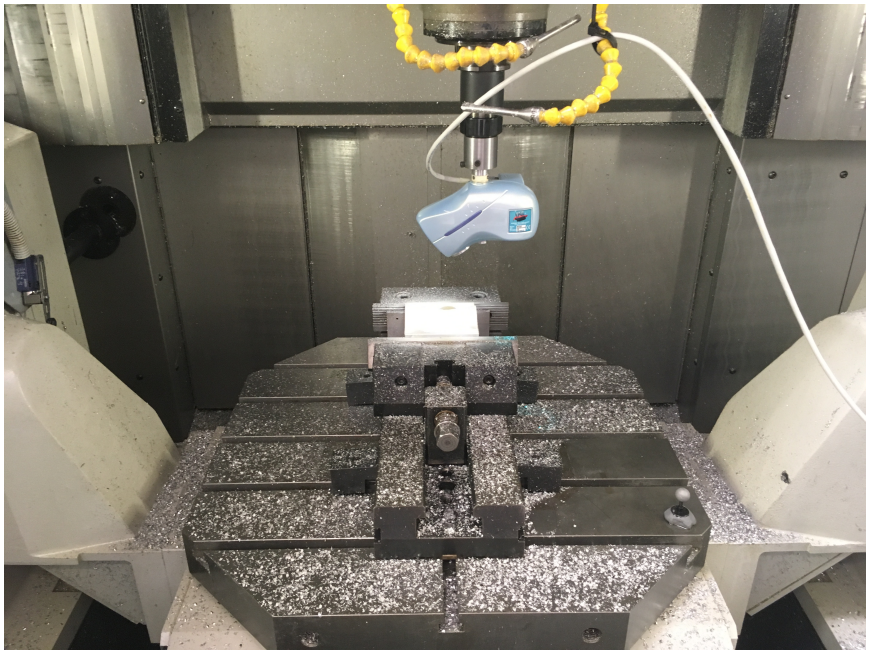


Figure 1.16: Mesure on-machine par capteur laser-plan

Le problème de recherche de points de vue de la trajectoire en respectant les contraintes de visibilité et de qualité de numérisation peut être traité par la gestion des distances de numérisation et des orientations du capteur par rapport à la surface à numériser. La distance de numérisation doit ainsi appartenir à un intervalle de distances admissibles déterminées par la qualification du capteur laser-plan. Cette distance assure qu'un point de la surface est visible par le capteur, et assure également la qualité de numérisation. La qualité de numérisation est ici envisagée au travers du bruit de numérisation. A partir de la qualification du capteur (QualiPSO-[Audfray,

2012]), il est possible de mettre en avant un intervalle de distances de numérisation, dites admissibles, pour lesquelles le bruit reste inférieur à une valeur seuil δ_{ad}. Il en est de même au niveau des angles de numérisation. Le capteur étant positionné dans la broche de la MOCN, il est possible de gérer son orientation par rapport à la surface à mesurer de manière continue, et ainsi maintenir une orientation qui assure la qualité de numérisation attendue, soit un bruit inférieur à δ_{ad}. De ce fait, dans notre approche, l'orientation du capteur est gérée de façon à ce que l'axe du faisceau laser soit toujours selon une orientation fixe par rapport à la surface (Figure 1.17). Nous verrons que pour le capteur choisi, cela assure également que le bruit de numérisation reste inférieur à δ_{ad}.

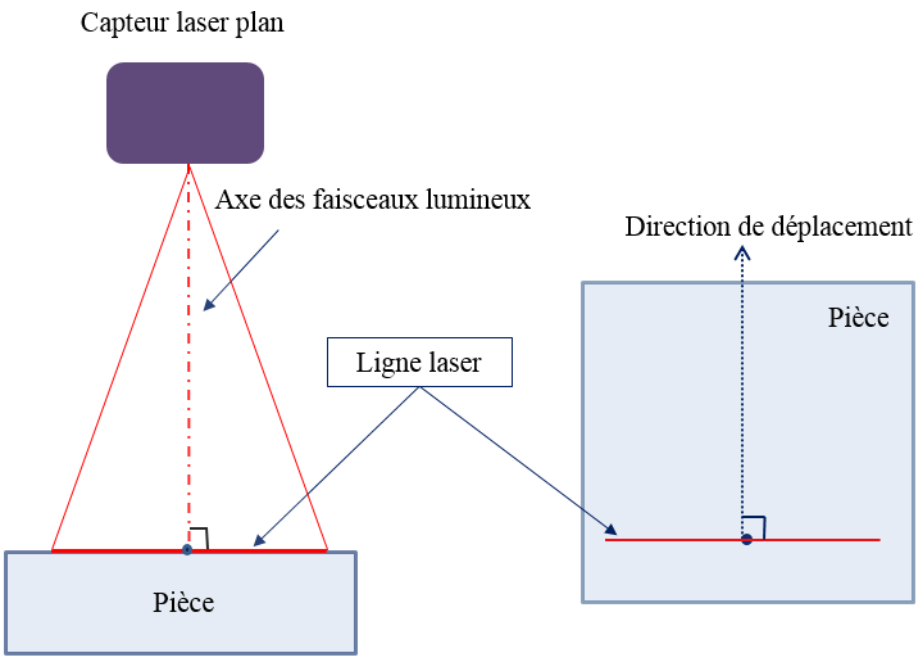


Figure 1.17: Orientation du capteur par rapport à la surface

Le problème de réduction du temps de numérisation peut être traité en maximisant le taux de couverture de la nappe laser et en optimisant la taille de la zone de recouvrement. Afin de maximiser le taux de couverture, et donc limiter la taille de la zone de recouvrement, la ligne laser de numérisation doit être toujours perpendiculaire à la direction de déplacement de la trajectoire (Figure 1.17). De plus, comme présenté précédemment, le contrôle du recouvrement entre deux passes consécutives permet de contrôler la qualité de numérisation.

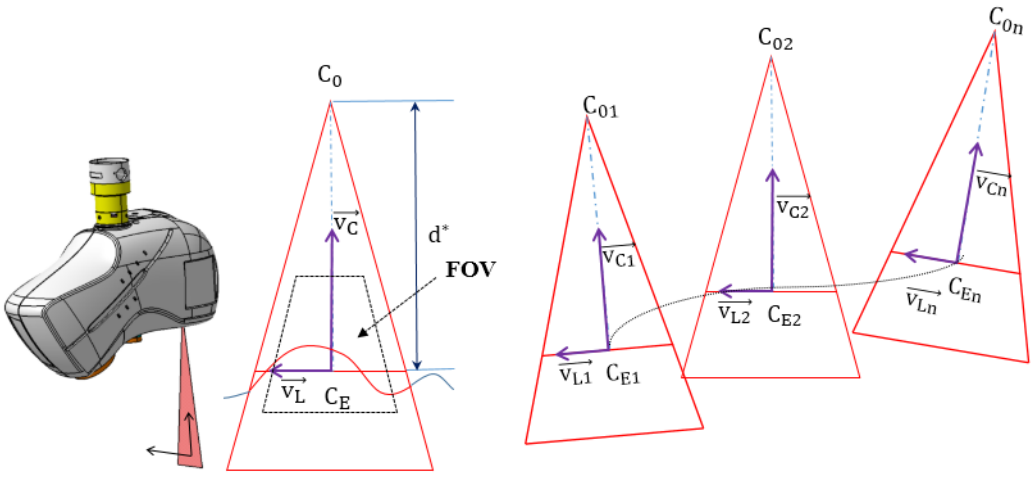


Figure 1.18: Paramètres décrivant les configurations du capteur

Pour gérer l'orientation continue du capteur, il est nécessaire de proposer une trajectoire de numérisation d'un capteur laser-plan pour une structure 6 axes. Nous nous intéressons à définir un format de description de la trajectoire du capteur en 6 axes décrite par un ensemble des configurations $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ permettant d'intégrer l'orientation de la broche dans la machine (Figure 1.18). Le point piloté C_E positionne la ligne laser de numérisation dans le champ de vision de la nappe laser, $\overrightarrow{C_0C_E} = d^*.\overrightarrow{V_C}$, avec d^* la distance du centre de la source de lumineuse au point piloté C_E. Le couple de vecteurs $(\overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ oriente le capteur, avec $\overrightarrow{V_L}$ le vecteur directeur de la ligne laser, et $\overrightarrow{V_C}$ le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser. Ainsi, définir une trajectoire de numérisation continue revient à définir l'évolution continue des configurations capteur $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ qui respectent les critères de performance énoncés plus haut. Nous proposons dans un premier temps une trajectoire adaptée à une structure à 6 axes, afin de tester les concepts de performance retenus, et en particulier la gestion du taux de recouvrement. Pour ce faire, la méthode retenue à taux de recouvrement constant s'inspire des méthodes de génération de trajectoires d'usinage à hauteur de crête constante. Le choix de tester la méthode à recouvrement constant à l'aide d'un robot est motivé par l'intégration simple et généralement maîtrisée des capteurs sans contact sur les robots industriels. Une fois la méthode validée expérimentalement sur un robot industriel, nous proposons de l'adapter pour

une machine-outil 5 axes. En effet, la gestion de l'indexation de broche, qui pourrait donner un degré de liberté supplémentaire par rapport aux 5 degrés de la machine n'est pas aisée entre deux configurations capteur successives. Il est donc nécessaire d'adapter la trajectoire, en imposant une indexation de broche constante, tout en ne dégradant pas les performances initiales. La validation expérimentale requiert l'intégration du capteur laser-plan sur la machine-outil. Cette intégration nécessite d'identifier les paramètres associés au capteur dans l'espace de la machine, et donc de proposer des méthodes de calibration pertinentes et simples à mettre en œuvre. Enfin, l'exécution sur MOCN 5 axes d'une trajectoire de numérisation pose les mêmes difficultés que l'exécution de trajectoire d'usinage 5 axes, quant au choix des méthodes de transformations et de post-processing. S'y ajoute une difficulté supplémentaire liée à la géométrie de "l'outil" qui n'est pas celle d'un outil classique de forme cylindrique.

1.3.2 Démarche proposée

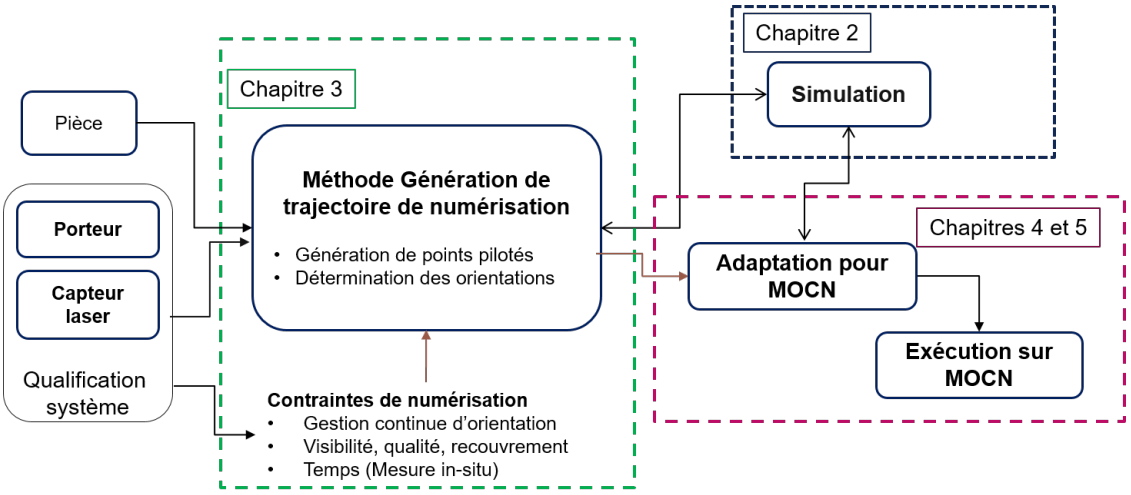


Figure 1.19: Processus de planification de trajectoire sur MOCN 5 axes

Le processus de génération de trajectoires de numérisation sur MOCN 5 axes que nous avons retenu est présenté sur la figure 1.19. La planification de trajectoire est réalisée à partir du modèle CAO de la pièce à numériser en respectant les contraintes liées à la mesure on-machine (minimisation du temps de mesure) et au

capteur laser-plan (visibilité, qualité, recouvrement). Afin d'intégrer les contraintes de numérisation à la génération de trajectoire, il est nécessaire de qualifier la système de numérisation constitué ici de la machine-outil et du capteur, ou du robot et du capteur. Cette qualification conduit à définir, et ainsi maîtriser, les paramètres du système de numérisation en termes de visibilité et de qualité de données acquises. La qualité des données est essentiellement appréhendée en terme de bruit de numérisation. Une méthode de génération de trajectoire de numérisation à 6 axes, intégrant le contrôle du recouvrement comme un critère supplémentaire pour contrôler le temps et la qualité de numérisation est proposée. Dans cette méthode, détaillée au chapitre 3, le recouvrement entre deux passes consécutives est constant. L'orientation du capteur en chaque point piloté est gérée afin d'assurer la qualité de numérisation et de contrôler le taux de couverture de la surface par le capteur laser.

Pour la mesure on-machine dans une MOCN 5 axes, les déplacements du capteur sont réalisés grâce à une structure à 5 degrés de liberté plus la rotation de la broche. La trajectoire $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ exprimée dans le repère de la pièce doit être exprimée dans l'espace articulaire de la machine-outil par la Transformation Géométrique Inverse (TGI). Dans le cas d'une machine 5 axes RRTTT, la TGI conduit à (X, Y, Z, A, C, W) dans l'espace articulaire de la machine où A et C sont respectivement les angles de rotation du berceau et du plateau, et où W correspond à l'indexation de la broche. Comme l'indexation de broche de la machine-outil 5 axes ne peut pas être contrôlée en continu entre deux configurations du capteur, il est nécessaire de fixer l'indexation de la broche à une valeur constante W_{cst} pour toutes les configurations du capteur. La trajectoire initiale donc doit être modifiée pour être adaptée à la numérisation sur MOCN 5-axes. Les méthodes d'adaptation de la trajectoire sont proposées dans le chapitre 4. Une application permettant de valider la trajectoire adaptée à la MOCN 5 axes est présentée dans le chapitre 5.

Les méthodes de génération de trajectoires que nous proposons doivent être validées à chaque étape. Or, s'il existe de nombreuses méthodes de génération de trajectoires, la littérature ne présente pas de méthodes permettant de validation de trajectoires de numérisation. Ainsi, nous avons développé un outil de simulation de numérisation à partir d'une trajectoire calculée. Ce simulateur nous permet

d'identifier les zones de la pièce correctement numérisées en termes de critères de visibilité et de qualité, et permet ainsi de valider les trajectoires avant l'exécution de la numérisation. Cet outil de simulation est détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre

2

Qualification de trajectoire de numérisation

2.1 Introduction

L'objectif de la planification de trajectoires de numérisation est de définir un ensemble de déplacements et de configurations du capteur permettant d'acquérir la surface d'une pièce. Il s'agit aussi de maîtriser le passage d'un ensemble des configurations du capteur à une trajectoire tout en contrôlant la qualité de numérisation et la surface couverte. Dans le processus de planification de trajectoire, il est nécessaire de disposer d'un outil permettant de valider les trajectoires générées en fonction des contraintes à satisfaire avant l'exécution de la numérisation. Cet outil permet d'aider à la planification de trajectoire en identifiant a priori les zones qui ne seront pas numérisées avec la qualité requise.

Dans la littérature, les trajectoires de numérisation proposées sont en général validées par leurs exécutions sur un système physique. Par exemple [Martins et al., 2005, Lartigue et al., 2014, Ding et al., 2016] ont validé les trajectoires de numérisation proposées en exécutant la numérisation sur la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), tandis que [Wu et al., 2015] ont validé la trajectoire par la numérisation d'une surface sur un robot industriel. Pour une trajectoire de numérisation donnée et pour un modèle CAO de la pièce, un simulateur a été développé dans notre étude permettant de valider les trajectoires avant de l'exécution de la numérisation. Ce simulateur valide la trajectoire selon un ensemble de contraintes telles la visibilité et la qualité de numérisation qui sont les contraintes les plus courantes dans la littérature.

Nous présentons dans une première partie la description des paramètres du capteur et de la trajectoire, puis nous détaillons la démarche que nous proposons pour la simulation des trajectoires de numérisation. Dans la suite de ce chapitre nous présentons la validation du simulateur en comparant la numérisation obtenue en utilisant notre outil de simulation à la numérisation réelle réalisée par les capteurs laser-plan montés sur une MMT.

2.2 Description des paramètres du capteur et de la trajectoire

Nous définissons les paramètres du capteur laser-plan et les paramètres de la trajectoire de numérisation qui sont utilisés pour développer le simulateur. Soit un point A appartenant à la ligne laser, définie par l'intersection du plan laser avec la surface à numériser, les paramètres qui définissent la configuration relative entre le capteur et la surface sont définis par (Figure 2.1) :

- d, la distance de numérisation définie comme la distance entre la source lumineuse du capteur et le point mesuré de la surface

- $\overrightarrow{n}$, le vecteur normal à la surface au point mesuré

- α, l'angle de numérisation, angle entre le vecteur normal $\overrightarrow{n}$ au point mesuré et le plan du laser

- β, l'angle de numérisation secondaire, angle entre le rayon émis par la source lumineuse et la normale à la surface mesurée dans le plan orthogonal au plan du laser passant par le rayon émis de la source lumineuse.

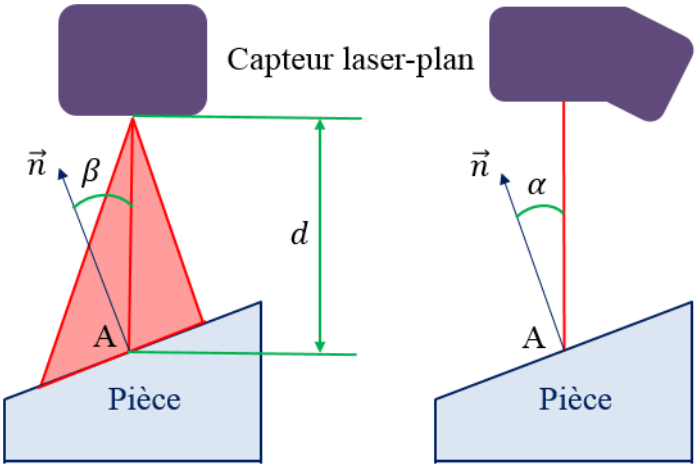


Figure 2.1: Paramétrisation du capteur laser-plan [Audfray, 2012]

La trajectoire de numérisation peut être définie comme un ensemble de configurations du capteur (ou points de vue), c'est-à-dire un ensemble de positions C_E et d' orientations $(\overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$, avec $\overrightarrow{V_L}$ le vecteur directeur de la ligne laser, et $\overrightarrow{V_C}$ le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser. Le point C_E, point piloté, positionne la ligne

laser de numérisation dans la nappe laser : $\overrightarrow{C_0C_E} = d^*.\overrightarrow{V_C}$, avec d^* la distance du centre de la source de lumineuse au point piloté C_E (Figure 2.2).

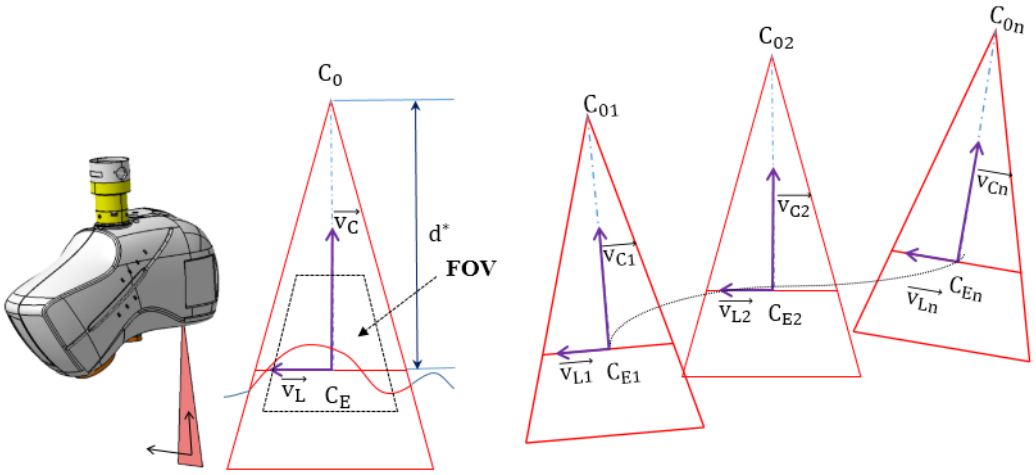


Figure 2.2: Paramètres décrivant les configurations du capteur

La ligne laser doit appartenir au champ de vision pour qu'elle soit visible par la caméra. Le capteur laser est caractérisé par son champ de vision (Field of view-FOV) correspondant à la zone du plan laser qui est visible par la caméra en l'absence de toute obstruction. Le FOV est défini par la hauteur H, les largeurs L_{min} et L_{max} ce qui correspond à la largeur minimale et à la largeur maximale de la ligne laser (Figure 2.3). Par conséquent, une portion de surface de la pièce est visible si elle appartient au FOV. Cependant, lorsque le capteur se déplace d'une configuration $(C_{Ei}, \overrightarrow{V_{Li}}, \overrightarrow{V_{Ci}})$ à une autre configuration $(C_{Ei+1}, \overrightarrow{V_{Li+1}}, \overrightarrow{V_{Ci+1}})$, une portion de surface est numérisée si elle appartient au volume balayé créé par le déplacement du plan laser de la première configuration à la seconde comme indiqué sur la figure 2.3.

De plus, l'orientation du capteur par rapport à la surface et la distance de numérisation sont les éléments qui influent sur la qualité des données acquises. La qualité de numérisation est en général évaluée en fonction de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation α comme dans les travaux de [Prieto et al., 1999][Mehdi-Souzani et al., 2016]. Les résultats dans le travail de Mehdi-Souzani [Mehdi-Souzani, 2007] nous montrent que le bruit de numérisation varie peu avec l'angle de numérisation secondaire β. L'angle secondaire β n'est donc pas utilisé dans notre étude

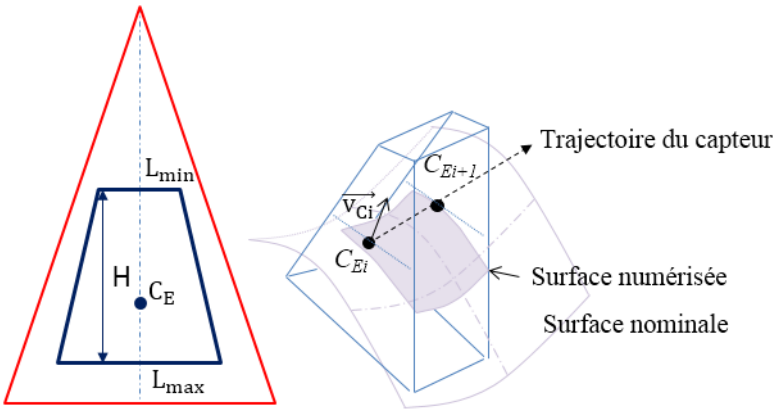


Figure 2.3: Paramètres du capteur laser et volume balayé entre deux configurations

comme facteur d'évaluation du capteur. Quand il est question de l'angle de numérisation, il s'agit alors de l'angle α entre la normale $\overrightarrow{n}$ au point mesuré et le plan laser.

Nous allons décrire dans le paragraphe suivant la démarche que nous proposons pour la simulation des trajectoires de numérisation.

2.3 Simulation des trajectoires de numérisation

À partir d'une trajectoire de numérisation calculée et du modèle CAO de la pièce, la simulation de numérisation permet de valider si la trajectoire calculée répond aux contraintes imposées, visibilité et qualité dans nos travaux. Il est également un outil prédictif intéressant pour aider à la planification de trajectoire de numérisation du capteur laser-plan.

Pour développer notre approche, nous tirons profit du formalisme proposé dans [Mavrinac et al., 2015, Wu et al., 2015], dans lequel les contraintes à vérifier sont exprimées en une combinaison de fonctions. Un tel formalisme est assez souple, car il permet d'ajouter ou de supprimer des contraintes en fonction de la complexité que nous voulons introduire dans la génération de trajectoire. Dans leurs approches, les auteurs utilisent la notion de fonctions pour planifier la trajectoire. Chaque fonction est représentative d'une contrainte. Par exemple, [Mavrinac et al., 2015] vérifie la visibilité de la surface basée sur deux fonctions : la fonction de *laser coverage* et la

fonction de *camera coverage*. La fonction de *laser coverage* est composée de trois sous-fonctions : la fonction de projection, la fonction de l'angle de numérisation et la fonction d'occultation. La fonction de *camera coverage* dépend de facteurs comme le champ de vision, la résolution de la caméra et la distance focale de la caméra. Tandis que [Wu et al., 2015] utilisent une fonction caractérisant les états de la facette numérisée ou non-numérisée. Cette fonction est égale à 1 si la facette est numérisée par un point de vue du capteur.

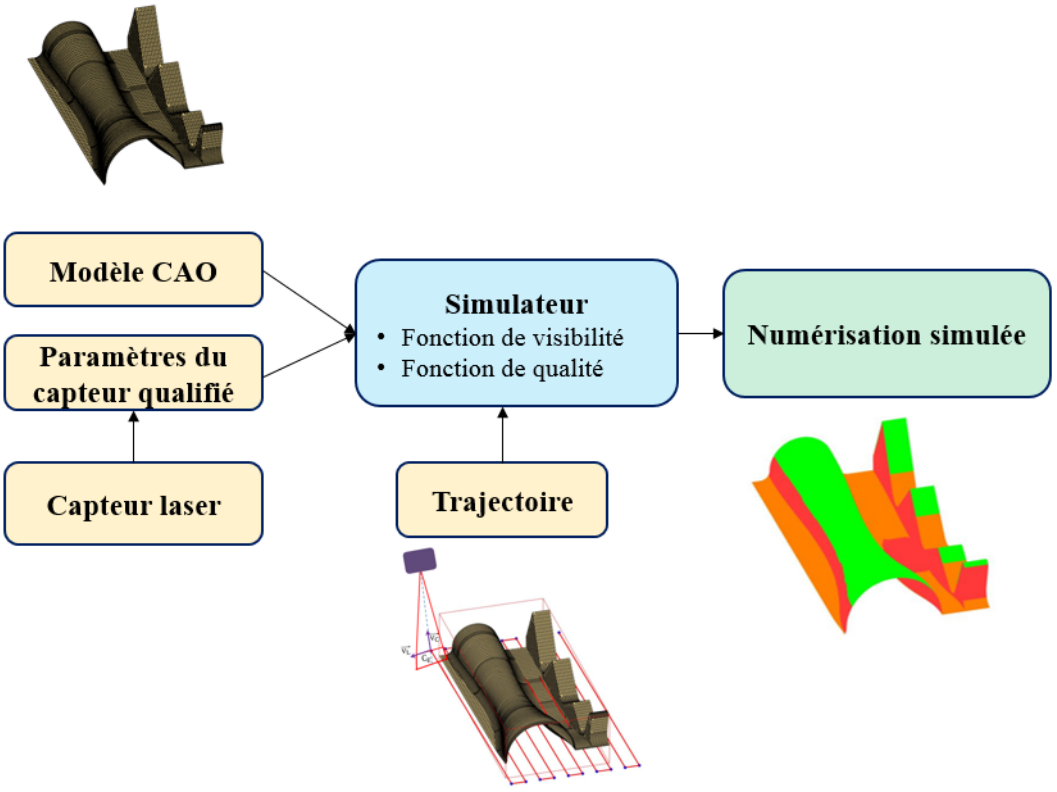


Figure 2.4: Fonctionnement du simulateur

Dans notre travail, le simulateur n'est pas utilisé pour générer directement la trajectoire mais pour vérifer les contraintes attendues. Nous validons simplement que les fonctions (ou la fonction composée) sont vérifiées considérant un modèle CAO et une trajectoire définie sous forme d'un ensemble de configurations du capteur. De plus, afin de vérifier les contraintes de visibilité et de qualité de numérisation, il est nécessaire de connaître les paramètres du capteur qui sont obtenus par la qualification du système de numérisation. En effet comme des travaux [Mehdi-Souzani

et al., 2006, Lartigue et al., 2002] l'ont montré, la qualité de numérisation s'appuie sur la qualification du capteur, réalisée par l'évaluation d'indicateurs de qualité en fonction des configurations du capteur vis à vis de la surface. Le fonctionnement du simulateur est présenté dans le schéma de la figure 2.4. Les entrées du simulateur sont le modèle CAO de la surface à numériser, la trajectoire de numérisation et les paramètres du capteur qualifié. La sortie du simulateur est la numérisation simulée de la surface en fonction de visibilité et de la qualité.

2.3.1 Définition des paramètres

Dans notre approche nous ne considérons que les 2 contraintes de numérisation les plus courantes : la visibilité et la qualité de numérisation. Deux fonctions associées à chacune des contraintes pour qualifier la trajectoire sont donc définies à partir du volume balayé entre deux configurations : la fonction de visibilité ${F_V}^*(T_j)$ et la fonction de qualité $F_{WS}(T_j)$. Pour ce faire, le modèle CAO de la pièce est discrétisé en un maillage stl. Cela conduit à un maillage défini par un ensemble S_T de n facettes triangulaires T_j. Chaque facette T_j est définie par 3 sommets V_j^k, et le vecteur normal à la facette $\overrightarrow{n_j}$ (voir le tableau 2.1 et la figure 2.5).

Tableau 2.1: Paramètres de la surface à numériser

	Paramètres de maillage		*Paramètres de numérisation*
S_T	ensemble de n facettes triangulaires	$V_{C_{Ei}C_{Ei+1}}$	volume balayé entre 2 configurations consécutives
T_j	facette j, $T_j \in S_T,\ j \in [1, n]$	H	hauteur du champ de vision
V_j^k	sommet d'une facette $T_j,\ k \in [1, 3]$	$d_{V_j{}^k}$	distance du bas du champ de vision au sommet V_j^k
$\overrightarrow{n_j}$	normale à une facette T_j	α_{max}	angle de numérisation limite

La distance $d_{V_j{}^k}$ est définie comme la distance du bas du FOV au sommet V_j^k dans la direction du vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$. L'angle de numérisation limite α_{max} est défini comme l'angle maximum entre l'axe du faisceau laser et la normale au point mesuré comme montré sur la figure 2.6(b). Le capteur laser ne peut détecter un point mesuré de la surface que si l'angle de numérisation en ce point est inférieur à l'angle de numérisation limite α_{max}. L'angle de numérisation limite est mentionné dans plusieurs études comme un facteur important pour valider

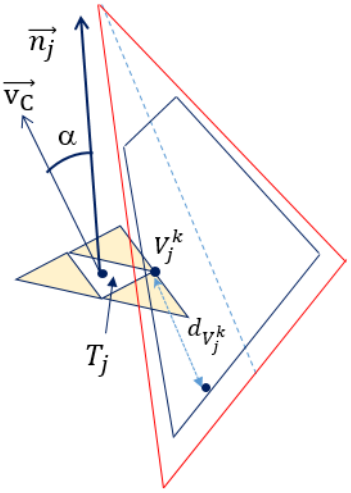
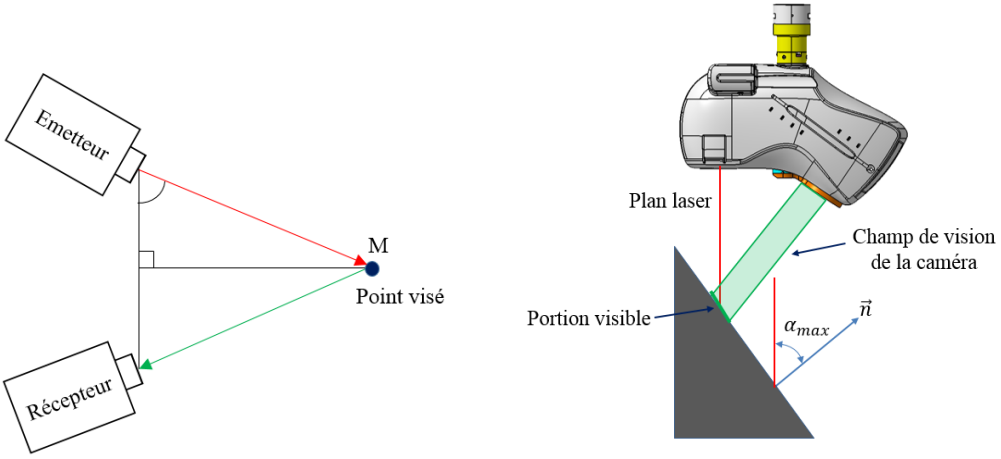


Figure 2.5: Paramètres associés au maillage et au plan laser



(a) Principe de la triangulation (b) Angle de numérisation limite α_{max}

Figure 2.6: Définition de l'angle de numérisation limite α_{max}

l'orientation du capteur par rapport à la surface [Bernard and Véron, 2000, Lee and Park, 2000, ElMaraghy and Yang, 2003, Fernandez et al., 2008, Derigent et al., 2007]. La valeur de α_{max} est généralement imposée par les caractéristiques techniques du capteur laser utilisé. Le capteur laser-plan utilise le principe de la triangulation qui comprend un émetteur qui projette une source lumineuse sur le point visé (M) de la surface à numériser, et un récepteur (une caméra CCD) qui observe les rayons réfléchis par la surface. La caméra CCD, de l'anglais *Charge-Coupled Device* est un

récepteur qui assure la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique. Le principe de triangulation est montré sur la figure 2.6(a). Le principe de la fonction de visibilité $F_V{}^*(T_j)$ est de vérifier si la facette T_j est vue par la nappe laser lors du déplacement entre deux configurations successives de trajectoire. Tandis que la fonction de qualité $F_{WS}(T_j)$ assure la qualité de numérisation pour chaque facette en fonction de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation.

Nous décrivons plus en détail la fonction de visibilité puis la fonction de qualité dans les paragraphes suivants.

2.3.2 Fonction de visibilité

Concernant la notion de visibilité, il s'agit de déterminer les portions de surface vues par une configuration du capteur ou l'appartenance de la surface au FOV du capteur. La fonction de visibilité est donc développée pour déterminer les facettes visibles par le capteur laser. Comme la trajectoire est un ensemble de configurations du capteur, la fonction de visibilité est définie pour chaque segment de trajectoire. Cela signifie que la fonction de visibilité vérifie si les facettes sont vues par la nappe laser lors du déplacement entre deux configurations successives de trajectoires (Figure 2.7).

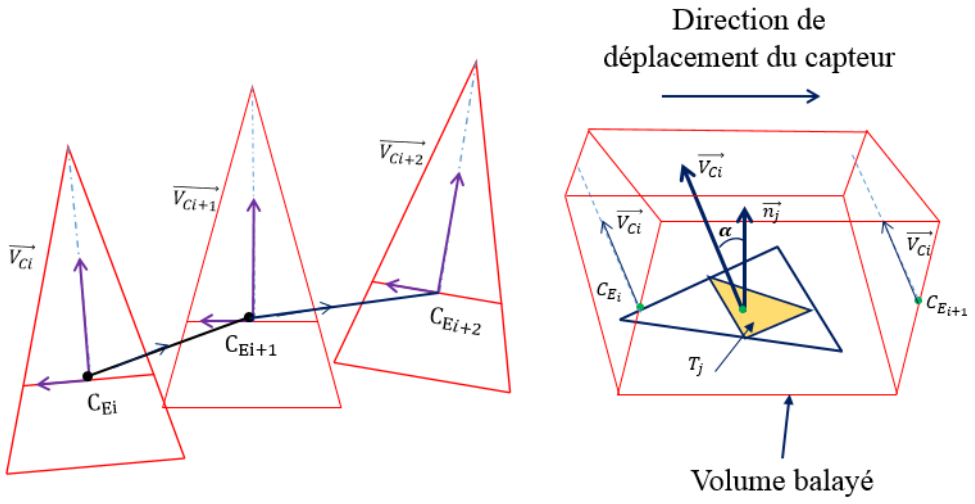


Figure 2.7: Volume balayé par la nappe laser entre deux configurations successives

Une facette T_j du modèle CAO est vue par la nappe laser entre deux configura-

tions successives de trajectoire si elle satisfait deux contraintes : la facette appartient au volume balayé $V_{C_{Ei}C_{Ei+1}}$ et l'angle de numérisation du capteur sur cette facette est inférieur ou égal à l'angle de numérisation limite α_{max}. Par conséquent, la fonction de visibilité est définie comme le produit de deux fonctions $F_V(T_j)$ et $F_{s\alpha}(T_j)$, exprimées dans l'équation 2.1.

$$F_V{}^*(T_j) = F_V(T_j).F_{s\alpha}(T_j) \tag{2.1}$$

La fonction de facette balayée $F_V(T_j)$ vérifie que la facette appartient au volume balayé $V_{C_{Ei}C_{Ei+1}}$ par la nappe laser entre 2 configurations. Une facette appartient au volume balayé si tous ses sommets appartiennent au volume balayé :

$$F_V(T_j) = \begin{cases} 1, & si\ \forall\ k \in [1,3], V_j{}^k \in V_{C_{Ei}C_{Ei+1}} \\ 0, & sinon \end{cases} \tag{2.2}$$

La fonction $F_{s\alpha}(T_j)$ vérifie que l'angle entre le vecteur normal unitaire à la facette $\overrightarrow{n_j}$ et le vecteur unitaire $\overrightarrow{V_C}$ est inférieur ou égal à l'angle de numérisation limite α_{max} :

$$F_{s\alpha}(T_j) = \begin{cases} 1, & si\ \overrightarrow{n_j}.\overrightarrow{V_C} \geq cos(\alpha_{max}) \\ 0, & sinon \end{cases} \tag{2.3}$$

Dans notre étude, l'angle de numérisation est l'angle entre le vecteur normal de facette considéré $\overrightarrow{n_j}$ au barycentre de la facette de la surface maillée et le vecteur d'orientation du capteur ou le vecteur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_{Ci}}$. Lorsque le capteur se déplace de la première configuration $(C_{Ei}, \overrightarrow{V_{Li}}, \overrightarrow{V_{Ci}})$ à la deuxième configuration $(C_{Ei+1}, \overrightarrow{V_{Li+1}}, \overrightarrow{V_{Ci+1}})$, si $\overrightarrow{V_{Ci+1}}$ est très peu différent de $\overrightarrow{V_{Ci}}$, nous proposons d'utiliser le vecteur d'orientation du capteur associé à la première configuration $\overrightarrow{V_{Ci}}$ pour calculer l'angle de numérisation pour toutes les facettes du volume balayé (Figure 2.7). En revanche, dans le cas où il y a une différence significative entre deux orientations consécutives du capteur (l'angle entre des deux orientations $\overrightarrow{V_{Ci}}$ et $\overrightarrow{V_{Ci+1}}$ est supérieur à l'angle de numérisation limite $\alpha_{max}/2$), la première configuration $\overrightarrow{V_{Ci}}$ ne représente pas bien l'orientation du capteur pour le volume balayé. Une discrétisation des orientations par interpolation peut être réalisée avant d'utiliser le simulateur (Figure 2.8). m configurations $\overrightarrow{V_{Ci}^k}, k \in [1, m]$ du capteur sont ajoutées

entre deux orientations $\overrightarrow{V}_{Ci}$ et $\overrightarrow{V_{Ci+1}}$. Ces nouvelles configurations sont calculées par interpolation linéaire des deux orientations $\overrightarrow{V_{Ci}}$ et $\overrightarrow{V_{Ci+1}}$ ainsi que les positions C_{Ei} et C_{Ei+1}. Un grand volume balayé entre deux orientations $\overrightarrow{V_{Ci}}$ et $\overrightarrow{V_{Ci+1}}$ est ainsi divisé en $m+1$ volumes balayés plus petits où la variation entre les deux configurations est faible ($< \alpha_{max}/2$) .

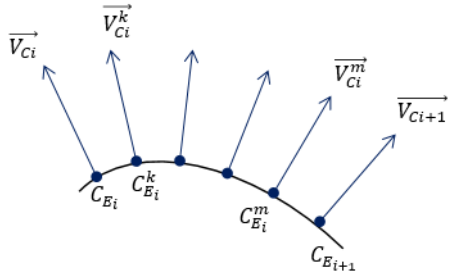


Figure 2.8: Discrétisation des orientations par interpolation

Toutes les facettes vérifiant ${F_V}^*(T_j) = 1$ sont caractérisées comme *vues* et définissent un ensemble $S_T^S = \{T_j \ \in S_T, {F_V}^*(T_j) = 1\}$.

La fonction de visibilité n'est utilisée que pour vérifier si la surface mesurée est visible par le capteur laser. Afin d'évaluer la qualité de numérisation, nous décrivons ensuite la fonction de qualité.

2.3.3 Fonction de qualité

La visibilité de la facette ne garantit pas nécessairement la qualité de numérisation. La qualité de numérisation est souvent abordée au travers de l'indicateur de bruit de numérisation *δ-bruit* qui est proposé dans la littérature [Hoppe et al., 1992]. Soit un point M_i acquis par la numérisation et P_i le point théorique qu'il représente, le vecteur erreur e_i est défini par $M_i = P_i + e_i$. Sur l'ensemble d'un nuage de points, il est possible de calculer l'écart-type σ de la répartition des e_i. Afin d'évaluer le bruit, *δ-bruit*, les points P_i étant inconnus, ils sont considérés comme les projections orthogonales des points M_i sur la surface idéale associée par le critère des moindres carrés (Figure 2.9). L'indicateur *δ-bruit* est calculé par l'équation 2.4.

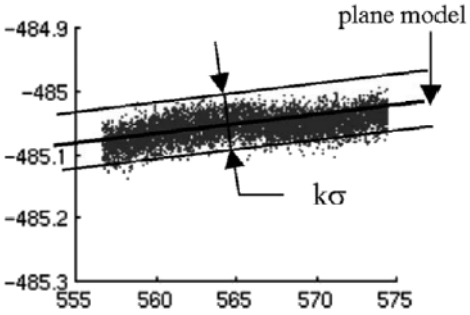


Figure 2.9: Représentation du bruit [Hoppe et al., 1992]

$$\delta = k.\sigma = k.\sqrt{\frac{1}{n}.\sum_{i=1}^{n}(e_i - \bar{e}_i)^2} \tag{2.4}$$

Où

- k représente un facteur d'élargissement choisi ici égal à 1 ;

- n nombre de points du nuage ;

- $\bar{e}_i$ la moyenne des écarts.

De nombreuses études soulignent l'importance de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation sur le bruit de numérisation, facteurs qui influencent fortement la qualité de la numérisation [Lartigue et al., 2014, Mahmud et al., 2011, Mehdi-Souzani et al., 2016]. En pratique, le bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation est déterminé par la qualification du capteur [Audfray, 2012].

La qualité de numérisation est assurée lorsque le bruit de numérisation est inférieur à un seuil [Lartigue et al., 2014, Mehdi-Souzani et al., 2006]. En général, ce seuil est donné par l'utilisateur en fonction de l'application considérée [Lartigue et al., 2002, Mehdi-Souzani et al., 2016] et conduit à des plages admissibles pour la distance de numérisation et l'angle de numérisation.

De façon à prendre en compte la qualité, nous introduisons la fonction de qualité $F_{WS}(T_j)$ qui est définie de la manière suivante pour les facettes satisfaisant la fonction de visibilité ${F_V}^*(T_j) = 1$.

$$F_{WS}(T_j) = {F_V}^*(T_j).F_{WSd}(T_j).F_{WS\alpha}(T_j) \tag{2.5}$$

Dans l'équation 2.5, $F_{WSd}(T_j)$ et $F_{WS\alpha}(T_j)$ définissent la qualité en fonction de la distance de numérisation et l'angle de numérisation respectivement.

Une facette est dite *bien vue* en termes de distance de numérisation si tous ses sommets appartiennent à la plage des distances de numérisation admissibles I_{ad} (Figure 2.10).

$$F_{WSd}(T_j) = \begin{cases} 1, & si\ \forall\ k \in [1,3], d_{V_j{}^k} \in I_{ad} \\ 0, & sinon \end{cases} \tag{2.6}$$

Une facette est dite *bien vue* en termes d'angle de numérisation si l'angle entre le vecteur normal de la facette $\overrightarrow{n_j}$ et $\overrightarrow{V_C}$ appartient à la plage des angles admissibles définie par α_1 et α_2.

$$F_{WS\alpha}(T_j) = \begin{cases} 1, & si\ cos(\alpha_1) \leq\ \overrightarrow{n_j}.\overrightarrow{V_C} \leq cos(\alpha_2) \\ 0, & sinon \end{cases} \tag{2.7}$$

Nous verrons dans le paragraphe 2.4 comment I_{ad}, α_1 et α_2 sont définis grâce à la qualification du capteur.

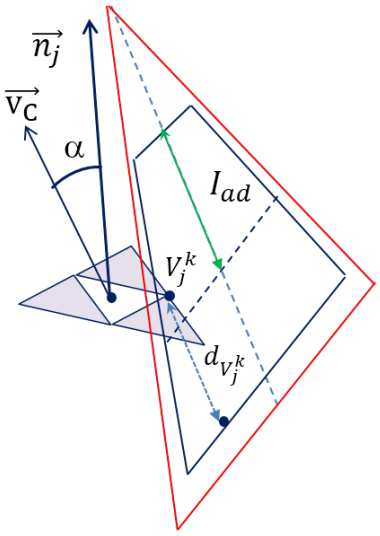


Figure 2.10: Définition de la qualité en fonction de distance de numérisation et de l'angle de numérisation

Toutes les facettes *vues* sont marquées comme *bien vues* si $F_{WS}(T_j) = 1$. Elles définissent un ensemble $S_T^{WS} = \{T_j\ \in S_T^S, F_{WS}(T_j) = 1\}$. Toutes les autres facettes *vues* sont étiquetées comme *mal vues* et définissent un ensemble $S_T^{PS} = \{T_j\ \in S_T^S, F_{WS}(T_j) = 0\}$ avec $S_T^S = S_T^{WS} \cup S_T^{PS}$.

Lors du déplacement de la ligne laser du capteur entre deux configurations de la trajectoire, il y a des facettes qui ne sont balayées que partiellement. En effet, dans certains cas un ou deux sommets d'une facette appartiennent au volume balayé. Cependant, ces facettes peuvent être balayées lors du déplacement suivant. Une facette partiellement balayée est localisée dans deux volumes balayés différents avec un vecteur d'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ propre pour chacun d'eux. Pour calculer l'angle de numérisation α correspondant à la facette partiellement balayée, nous devons déterminer dans quel volume balayé se trouve le barycentre de la facette. Le processus d'évaluation de la qualité de numérisation avec ces facettes partiellement balayées reste le même comme indiqué dans la fonction de qualité.

Le simulateur a été implémenté dans Matlab©. À partir d'une trajectoire de numérisation et d'une présentation facétisée (format stl) de la surface à numériser, le simulateur donne la numérisation attendue en vérifiant la visibilité et la qualité de numérisation pour chaque facette de la surface.

Dans le fonctionnement du simulateur, le maillage de la surface à numériser sous format stl stocke plusieurs types d'éléments :tels que les sommets, les arêtes et les facettes. Nous pouvons donc obtenir les propriétés additionnelles du maillage comme la normale à la facette et le barycentre qui sont utilisées pour le simulateur. La taille de la maille peut avoir une conséquence sur l'évaluation de la normale à la facette et sur la position du barycentre, et donc sur l'évaluation de la visibilité et de la qualité de numérisation. Une étude est menée dans le paragraphe suivant sur l'étude de l'influence de la taille de maille sur l'évaluation de la normale à la facette.

2.3.4 Influence de la taille de maille sur la normale à la surface

L'angle de numérisation α étant déterminé par l'angle entre le vecteur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ et la normale à la facette, l'influence de la taille de maille sur la normale à la surface doit être étudiée.

Afin d'illustrer l'influence relative des différents paramètres du maillage sur la normale à la surface nominale, nous approximons la surface S localement par une sphère de rayon R (Figure 2.11). Nous considérons une facette du maillage dont les 3 sommets sont sur cette sphère. Nous définissons deux paramètres pour analyser la

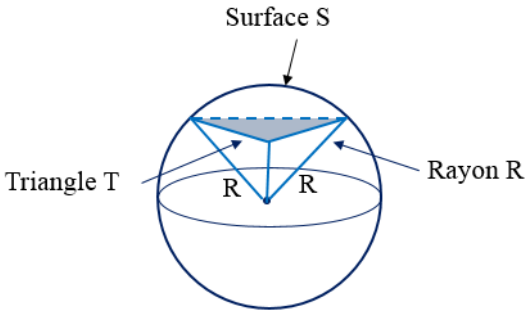


Figure 2.11: Triangle T inscrit dans une sphère de rayon R

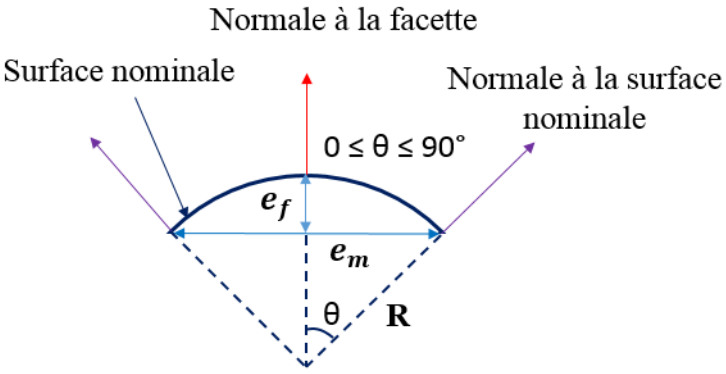


Figure 2.12: Angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale

qualité du maillage : l'erreur de corde e_f qui est exprimée par la distance entre la facette et la surface nominale issue de la CAO, et la longueur d'arête e_m de maille. L'angle θ est défini comme l'angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale (Figure 2.12). Nous calculons ainsi l'angle θ en fonction de la taille de maille à partir de l'équation 2.10.

$$R^2 = (\frac{e_m}{2})^2 + (R - e_f)^2 \tag{2.8}$$

$$R = \frac{e_m^2}{8e_f} + \frac{e_f}{2} \tag{2.9}$$

$$Sin\ \theta = \frac{e_m}{2R} = \frac{4e_m e_f}{e_m^2 + 4e_f^2} = \frac{4(\frac{e_m}{e_f})}{(\frac{e_m}{e_f})^2 + 4} = \frac{4p}{p^2 + 4} \tag{2.10}$$

où $p = \frac{e_m}{e_f}$

L'évolution de l'angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale en fonction de la taille de la maille est montrée dans la figure 2.13. Quand le rapport e_m/e_f augmente, nous remarquons que l'angle θ diminue. Le choix de la taille

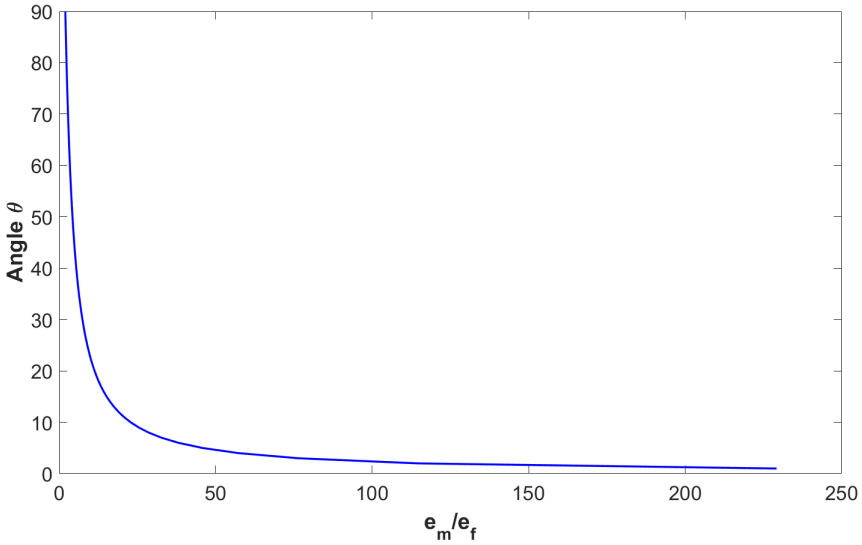


Figure 2.13: Influence de la taille de maille sur l'angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale

de maille est un compromis entre l'angle θ et le rapport e_m/e_f. Afin de bien présenter les résultats de simulation et préserver la forme de la surface, particulièrement dans les zones de forte courbure, nous choisissons l'erreur de corde $e_f = 0,01\ mm$ et $\theta = 2°$. À partir de la figure 2.13, la longueur d'arête e_m de la maille est donc égale 1 mm ($e_m/e_f = 100$). Nous choisissons la taille de maille avec $e_f = 0,01\ mm$ et $e_m = 1\ mm$ pour représenter la surface à numériser dans la simulation.

2.4 Validation du simulateur

Nous allons valider notre simulateur en comparant la numérisation obtenue avec le simulateur à la numérisation réelle. Les trajectoires de capteur utilisées pour tester notre simulateur sont des trajectoires en zigzag. La numérisation réelle a été réalisée à l'aide d'une MMT équipée d'une tête de mesure orientable motorisée ce qui permet au capteur d'être orienté selon des orientations angulaires discrètes (Figure 2.14). Nous choisissons de valider notre simulateur à l'aide d'une MMT cartésienne 3 axes, car c'est une machine présentant peu de défauts géométriques par rapport à d'autres systèmes de déplacements comme une machine-outil ou un robot.

Pour les premiers tests, l'orientation du capteur est choisie constante, et la tra-

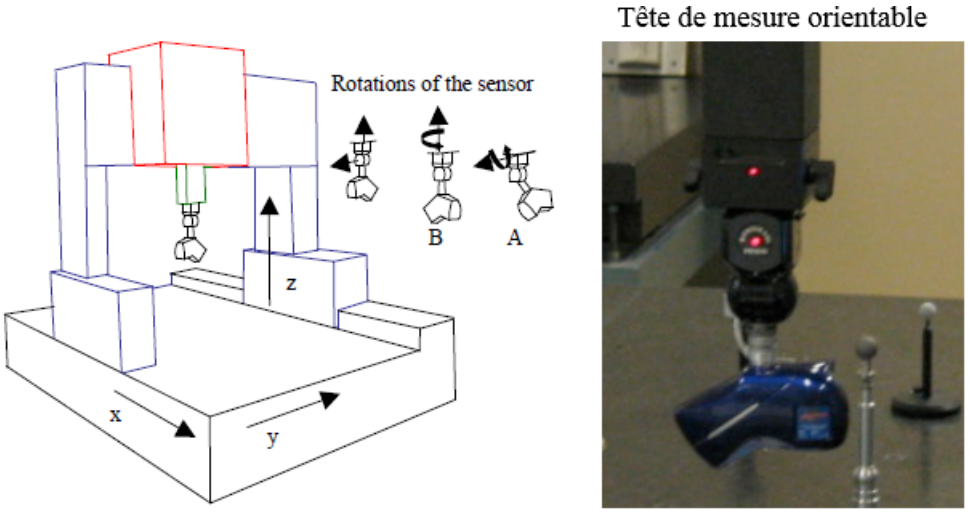
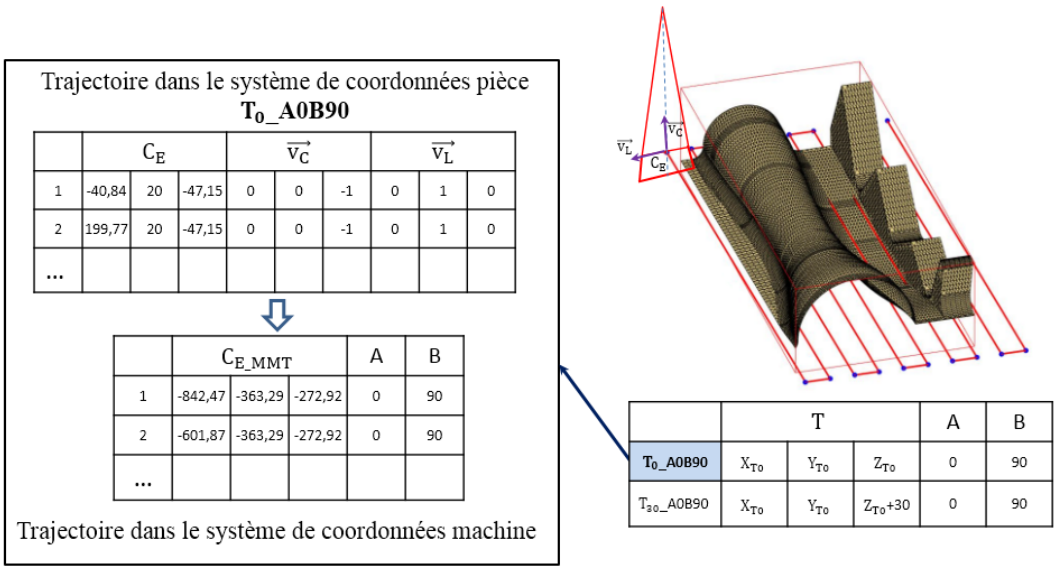


Figure 2.14: Système de numérisation sur MMT [Mehdi-Souzani et al., 2006]

jectoire consiste en un ensemble de points C_E définis à une altitude constante z, permettant à la MMT ne pas de changer les orientations en continu. La validation du simulateur dans le cas de trajectoire avec les orientations variables entre les points pilotés sera montrée au chapitre 3. Sur la MMT, les orientations du capteur sont indiquées par les deux angles de rotation A et B (Figure 2.14). Par conséquent, les trajectoires exprimées dans le repère de la pièce (pour le simulateur) avec le format $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ doivent être exprimées dans le système de coordonnées de la MMT sous le format $(C_{E_{MMT}}, A, B)$ (Figure 2.15) où le point $C_{E_{MMT}}$ est la transformation du point C_E dans le repère de la MMT.

Le simulateur est testé pour 2 capteur différents : le Kréon Zephyr KZ25 et l'Aquilon de la société Kréon Technologies [1]. Nous avons effectué deux études de cas. La numérisation d'une pièce en aluminium par le capteur Zephyr KZ25 et la numérisation d'une pièce en résine polyuréthane par le capteur Aquilon dans le but de valider la simulation de numérisation de différents types de capteurs et de différents types de matériaux. Le protocole de qualification de capteur QualiPSO [Audfray, 2012] a été utilisé pour identifier les paramètres du capteur tels que les dimensions du FOV, l'angle de numérisation limite α_{max}, mais aussi pour identifier les paramètres de qualité qui définissent les plages admissibles de la distance de

1. www.kreon3d.com



	C_E			$\overrightarrow{V_C}$			$\overrightarrow{V_L}$		
1	-40,84	20	-47,15	0	0	-1	0	1	0
2	199,77	20	-47,15	0	0	-1	0	1	0
...									

	C_{E_MMT}			A	B
1	-842,47	-363,29	-272,92	0	90
2	-601,87	-363,29	-272,92	0	90
...					

	T			A	B
T_0_A0B90	X_{T0}	Y_{T0}	Z_{T0}	0	90
T_{30}_A0B90	X_{T0}	Y_{T0}	Z_{T0}+30	0	90

Figure 2.15: Trajectoires de numérisation pour le test $(A = 0°, B = 90°, z = 0\ mm)$

numérisation I_{ad} et de l'angle de numérisation α_1 et α_2.

2.4.1 Étude de cas 1 : numérisation d'une pièce en aluminium par le capteur KZ25

2.4.1.a Qualification du capteur laser-plan KZ25

Pour cette étude, le capteur de numérisation que nous utilisons est un capteur à nappe laser Zephyr KZ25. Il est constitué d'une part d'une source laser qui projette une nappe laser sur la surface à numériser, et d'autre part d'une caméra CCD qui observe la nappe du laser (Figure 2.16). Les coordonnées de chaque point 3D de la ligne laser sont exprimées dans le repère de mesure grâce à la calibration externe.

La qualification du capteur consiste en l'évaluation du FOV, l'évaluation des distances de numérisation admissibles définissant I_{ad}, et des angles admissibles α_1 et α_2. Les dimensions du champ de vision sont identifiées par la mesure d'un plan de référence. L'intersection du plan de référence et de la nappe laser est une ligne laser. La hauteur H du champ de vision est identifiée en observant si la ligne laser est visible dans la CCD du capteur quand le capteur avec une orientation fixe est déplacé uniquement sur Z avec les différentes distances de numérisation. L'expérience donne

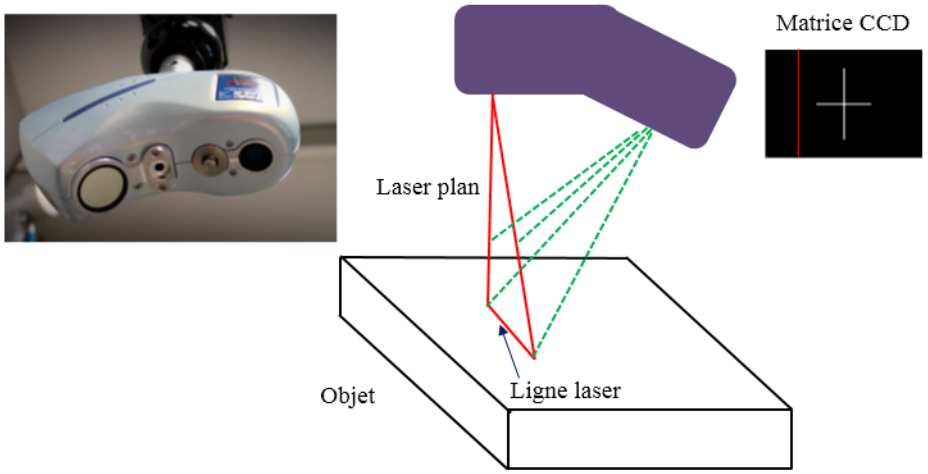


Figure 2.16: Capteur laser-plan Kréon KZ25

H=50 mm.

Le bruit de numérisation représente la dispersion des points mesurés par rapport à un élément de référence qui est un plan des moindres carrés associé au nuage de points [Audfray, 2012]. Il est généralement évalué en mesurant un plan référence de planéité (Figure 2.17). Selon le protocole QualiPSO défini dans [Audfray, 2012], l'évolution du bruit de numérisation, noté δ, est identifié en fonction de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation (Figure 2.17).

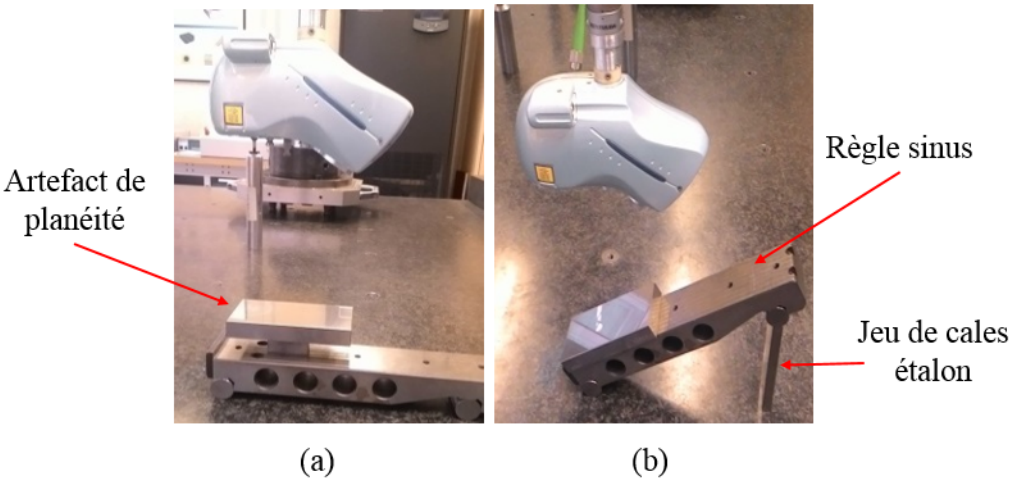
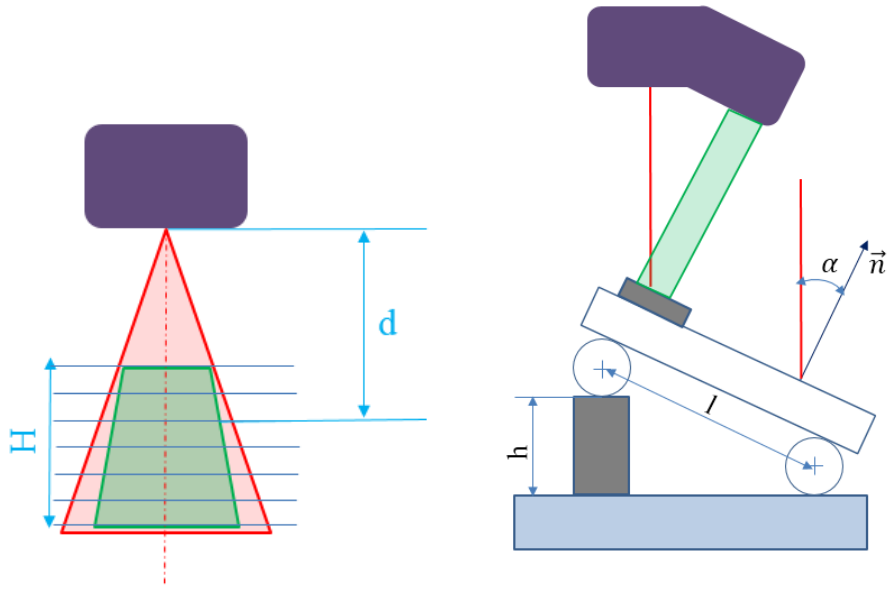


Figure 2.17: Évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation (a) et de l'angle de numérisation (b)



(a) Évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation

(b) Évaluation du bruit en fonction de l'angle de numérisation α

Figure 2.18: Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance et de l'angle de numérisation [Audfray, 2012]

Le bruit de numérisation est évalué pour différentes distances de numérisation et des angles de numérisation variés comme montré sur la figure 2.18. L'évaluation du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation est réalisée sur l'artefact référence de planéité, ce qui permet de maîtriser la distance de numérisation en déplaçant le capteur normal à la surface sur la plage du FOV. Le bruit de numérisation correspondant à chaque hauteur est calculé à partir du nuage de points obtenu.

L'influence de l'angle de numérisation est évalué en numérisant à distance constante et en faisant varier l'angle de numérisation α. La distance de numérisation choisie correspond à une distance minimisant le bruit d_{opt}. Elle est obtenue à partir du protocole précédemment présenté. Une règle sinus est utilisée pour faire varier les angles de numérisation (Figure 2.18(b)). Le bruit de numérisation correspondant à chaque angle de numérisation est calculé à partir du nuage de points obtenu.

L'évolution du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation montre une diminution significative du bruit de la position basse vers la position

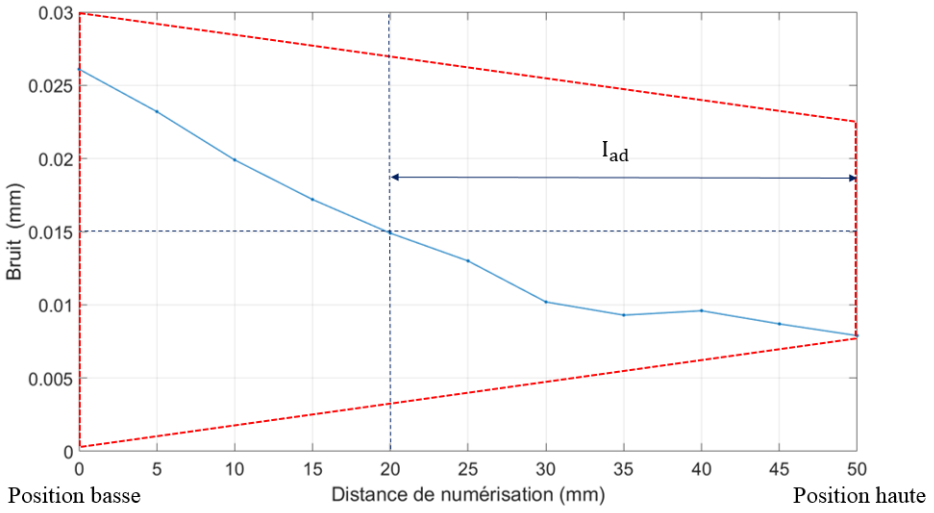


Figure 2.19: Évolution de bruit en fonction de la distance de numérisation (Capteur KZ25)

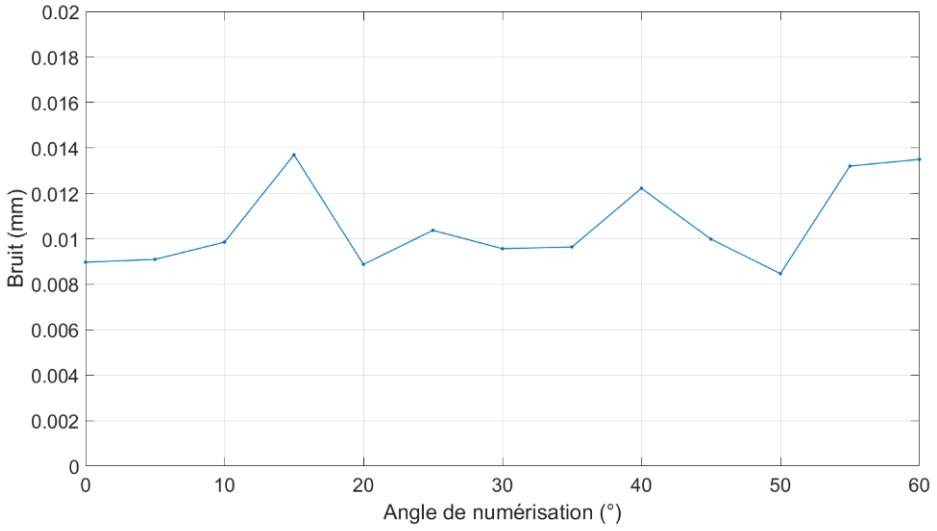


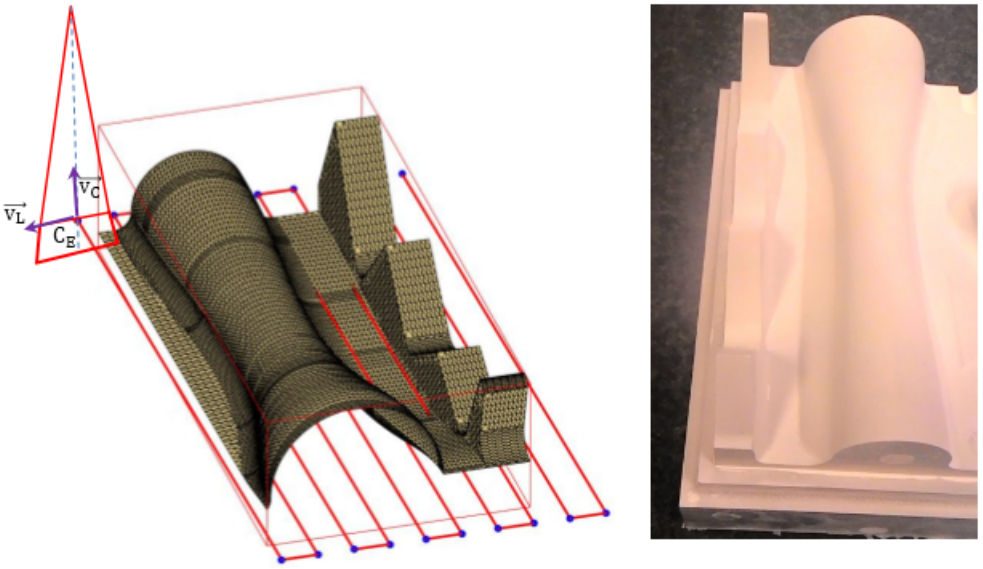
Figure 2.20: Évolution du bruit en fonction de l'angle de numérisation (Capteur KZ25)

haute dans le champ de vision (Figure 2.19). D'autre part, l'évolution du bruit en fonction de l'angle de numérisation ne montre pas de tendance significative (Figure 2.20). Cependant, il peut être souligné que l'angle de numérisation limite α_{max} est égal à 60°. La surface est donc visible par le capteur si l'angle de numérisation α est inférieur à $\alpha_{max} = 60°$. Pour la plage des angles de numérisation [0° ; 60°], le bruit est inférieur à 0,015 mm. Considérant que la valeur de 0,015 mm en tant que seuil

de bruit δ_{ad} pour la qualité, la plage admissible des distances de numérisation I_{ad} est définie par [20 ; 50] mm dans le champ de vision (Figure 2.19). Ces deux intervalles garantissent une numérisation avec un bruit inférieur à $\delta_{ad} = 0{,}015$ mm.

2.4.1.b Numérisation d'une pièce en aluminium

Une pièce usinée en aluminum est numérisée par le capteur laser-plan KZ25 pour valider le simulateur. La pièce en aluminium utilisée avec une surface très brillante affecte la saturation de la lumière capturée par le capteur CCD. L'étude de [Martínez et al., 2010] indique qu'un bruit important est ajouté aux mesures et des points n'appartenant pas à la surface réelle peuvent être générés avec les surfaces très brillantes. Pour cette raison, la surface test est recouverte d'une fine couche de poudre blanche qui matifie la surface afin de faciliter l'acquisition des données du capteur (Figure 2.21(b)).



(a) CAO de la pièce

(b) Pièce en aluminium à numériser

Figure 2.21: Pièce test en aluminium

Le tableau 2.2 présente les trajectoires testées avec les différentes orientations et les différentes distances de numérisation. L'orientation ($A = 0°; B = 90°$) du capteur correspond à l'axe du faisceau laser dans la direction perpendiculaire au

plan horizontal. La trajectoire $z = 0\ mm$ correspond à l'altitude de la trajectoire en zigzag montrée dans la figure 2.21(a). Ensuite, la trajectoire $z = 15\ mm$ est générée en décalant la trajectoire $z = 0\ mm$ verticalement de 15 mm. De manière similaire, la trajectoire $z = 30\ mm$ est générée en décalant la trajectoire $z = 0\ mm$ verticalement de 30 mm. Le simulateur est ensuite validé par les trajectoires avec une autre d'orientation du capteur ($A = 15°; B = 0°$) et deux différentes distances ($z = 0\ mm$ et $z = 30\ mm$).

Tableau 2.2: Trajectoires de numérisation

Orientations du capteur	Distance de numérisation	
A=0° ; B=90°	z=0 ; 15 ; 30 mm	Trajectoires décalées de 0, 15 et 30 mm selon z
A=15° ; B=0°	z=0 ; 30 mm	Trajectoires décalées de 0 et 30 mm selon z

Pour simplifier la représentation, un code de couleurs est adopté : les facettes *bien vues* sont vertes, les facettes *mal vues* sont oranges, et des facettes *non vues* sont affectées de la couleur rouge (Figure 2.22).

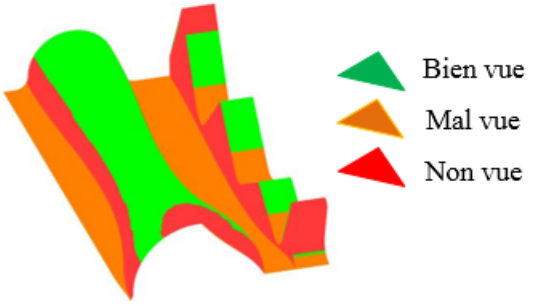


Figure 2.22: Code de couleurs pour la représentation des facettes en simulation

D'autre part, la numérisation réelle donne un nuage de points qui est enregistré sous forme d'un maillage. Pour chaque facette, un cylindre est créé, dont la base est le triangle définissant la facette de la surface. L'ensemble des points numérisés appartenant au prisme avec une hauteur infinie ainsi défini correspond à la facette numérisée réelle. Les écarts géométriques entre les points numérisés et la facette sont alors calculés pour toutes les facettes. L'écart-type associé σ représentant le bruit

de numérisation est calculé pour chaque facette (Figure 2.23). L'évolution du bruit de numérisation de la surface est présenté sur la cartographique dans la figure 2.24.

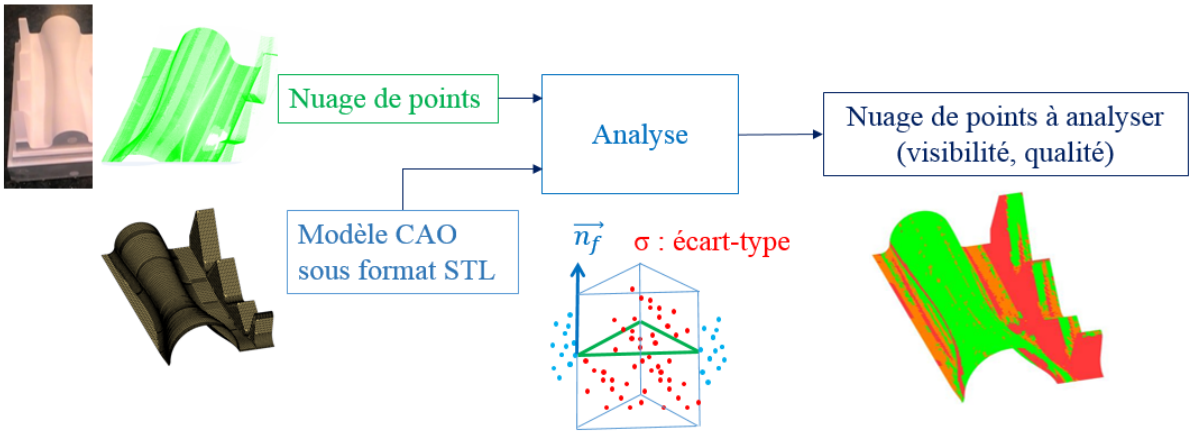


Figure 2.23: Démarche de qualification du nuage de points

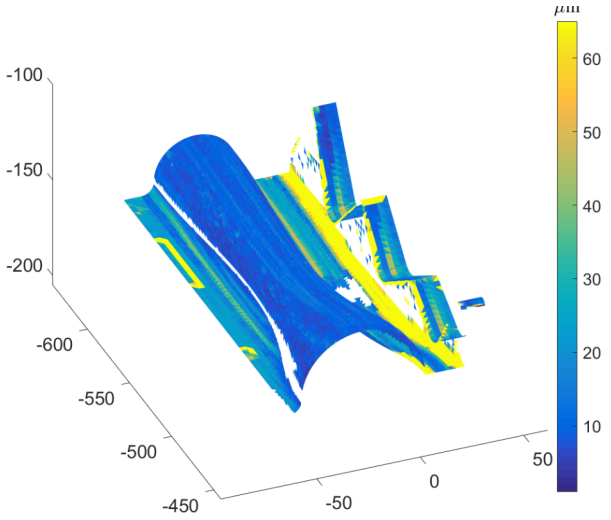
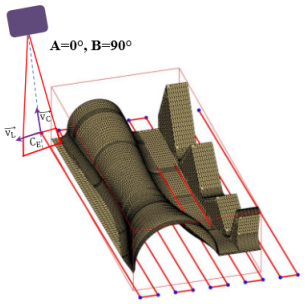
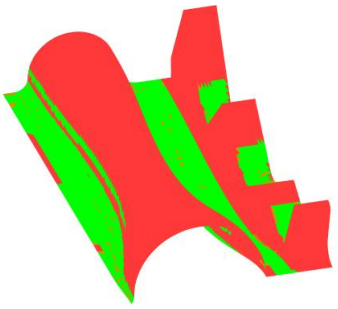
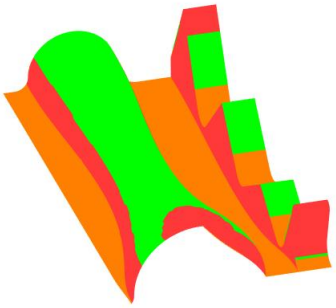
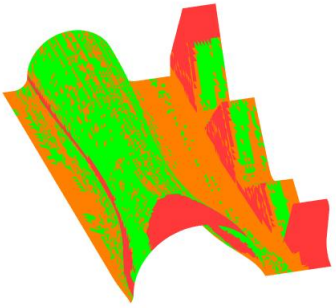
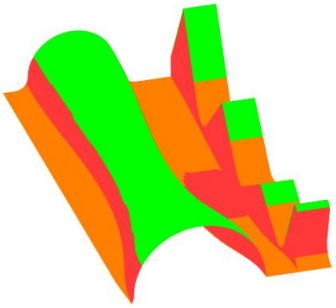
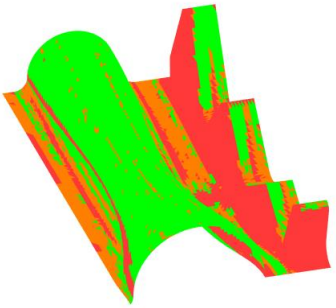


Figure 2.24: Évolution de bruit de numérisation de la surface

Afin de comparer la numérisation réelle à sa simulation, nous devons caractériser chaque facette selon les fonctions de visibilité et de qualité de la même manière. Pour cela, une facette *non vue* est marquée par la couleur rouge. Si le bruit est supérieur au seuil δ_{ad}= 0,015 mm, la facette est marquée comme *mal vue*, et sa couleur est orange. À l'inverse, si le bruit est inférieur à δ_{ad}, la facette vue est marquée comme

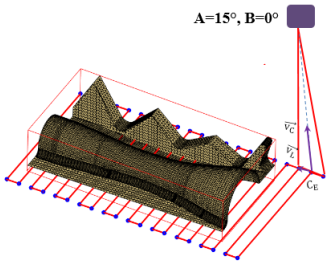
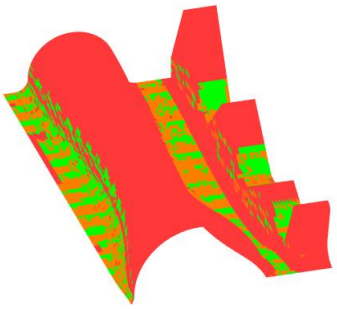
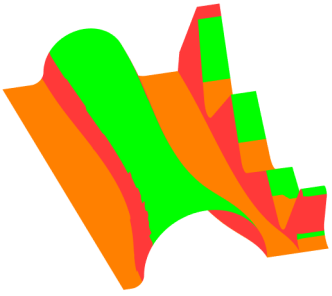
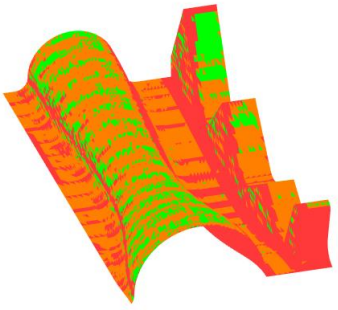
bien vue, et sa couleur est verte. Les plages de distances et d'angles de numérisation correspondants à ce seuil de bruit δ_{ad} sont utilisées pour la simulation.

Tableau 2.3: Résultats pour la simulation de numérisation et la numérisation réelle (A=0°; B=90°)

	Simulation de numérisation	*Numérisation réelle*
		
A=0°; B=90°; z=0 mm		
A=0°; B=90°; z=15 mm		
A=0°; B=90°; z=30 mm		

À partir des résultats des tableaux 2.3 et 2.4, nous constatons une bonne similitude entre la simulation et la numérisation réelle selon les fonctions de visibilité et de qualité. Par exemple, dans le tableau 2.3, le simulateur identifie bien le changement

Tableau 2.4: Résultats pour la simulation de numérisation et la numérisation réelle (A=15° ; B=0°)

	Simulation de numérisation	*Numérisation réelle*
		
A=15° ; B=0° ; z=0 mm		
A=15° ; B=0° ; z=30 mm		

des zones de numérisation en fonction de la visibilité et de la qualité correspondant au changement d'altitude de la trajectoire de z=0 mm à z=30 mm. Certaines zones de la surface ne sont visibles que pour la trajectoire $z = 0\ mm$ mais pas pour la trajectoire $z = 30\ mm$. A l'inverse, certaines ne sont visibles que pour la trajectoire $z = 30\ mm$. Le simulateur peut donc être utilisé pour optimiser la trajectoire de numérisation en respectant les contraintes de visibilité et de la qualité. Par exemple, nous pouvons étudier une trajectoire permettant de numériser la surface avec une distance de numérisation variable entre le capteur et la surface pour que la surface numérisée appartienne à la plage admissible des distances de numérisation.

Cependant, quelques différences existent pour lesquelles le simulateur sous-estime

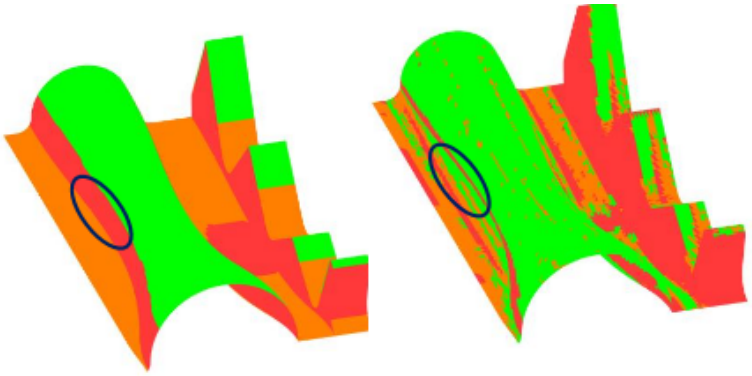


Figure 2.25: Zone rouge dans la simulation (gauche) et verte dans la numérisation réelle (droite)

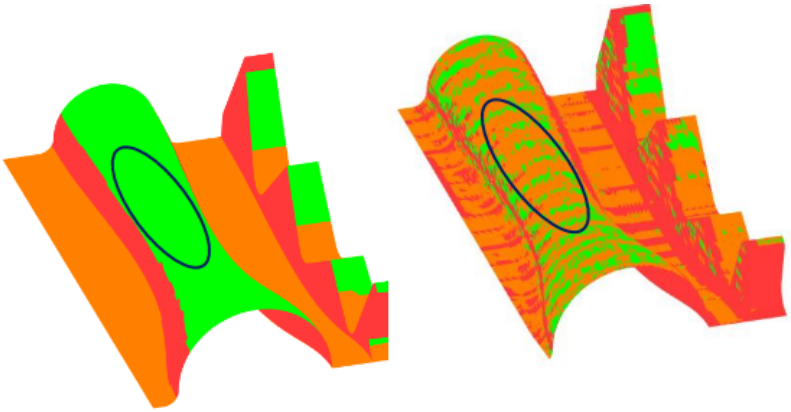


Figure 2.26: Bruit causé par le recouvrement

la numérisation. Toute une zone rouge qui apparaît dans la simulation est verte dans la numérisation réelle comme montré dans la figure 2.25 (sur la gauche de la pièce de la trajectoire $z = 30\ mm$, par exemple). Cela est probablement dû au fait que le bruit de numérisation est évalué au moyen d'un artefact avec un traitement de surface spécifique qui rend la surface absorbante, tandis que la pièce est recouverte d'une poudre blanche qui matifie la surface. De plus, pour les résultats de numérisation réelle avec l'orientation (A=15° ; B=0°), il est facile d'observer que les rayures des facettes oranges dans la direction de déplacement du capteur se situent dans les zones vertes (Figure 2.26). Ceci provient du recouvrement de la nappe laser. En effet, le recouvrement entre deux passes consécutives de la trajectoire a créé une densité de points hétérogène sur la surface. La densité de points des zones

de recouvrement est toujours plus élevée que pour les autres zones, par conséquent, le bruit de numérisation dans les zones de recouvrement est supérieur à celui des zones de non-recouvrement. Ceci sera confirmé dans le chapitre suivant. C'est la raison pour laquelle, dans la numérisation réelle, il y les facettes oranges au lieu des facettes vertes dans les zones de bonne qualité de numérisation.

2.4.2 Étude de cas 2 : numérisation d'une pièce en résine polyuréthane

Les caractéristiques du matériau pouvant influer sur la qualité de numérisation, le simulateur est également testé dans une deuxième étude en simulation de numérisation d'une pièce en résine polyuréthane par le capteur Aquilon (Figure 2.27). Nous avons également utilisé un autre capteur pour illustrer le bon fonctionnement du simulateur vis à vis des paramètres du capteur. Dans cette étude, les trajectoires de numérisation utilisées sont des trajectoires en zigzag comme précédemment mais avec une seule de l'orientation du capteur ($A = 0°; B = 0°$) et les altitudes différentes $z = 0\ mm$ et $z = 20\ mm$.

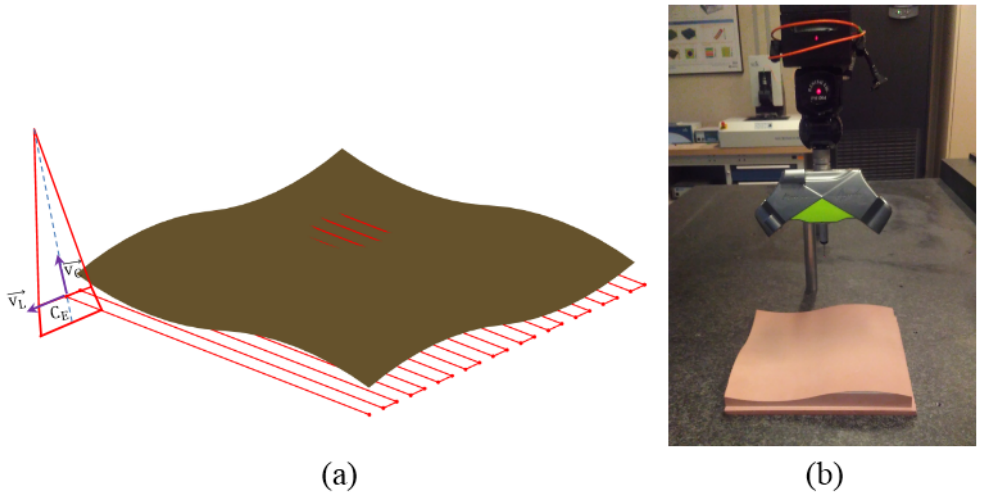


Figure 2.27: (a) CAO de la surface (b) Pièce en résine polyuréthane à numériser

Tous les paramètres du capteur doivent être identifiés par la qualification du capteur.

2.4.2.a Qualification du capteur laser-plan Aquilon

L'Aquilon est le capteur 3D le plus performant de la gamme Kreon avec deux caméras et une vitesse d'acquisition de 1.000.000 points/s (www.kreon3d.com). Pour la qualification du capteur, nous utilisons un artefact de planéité comme montré dans la figure 2.28 de même matériau que la pièce à mesurer, afin que le bruit évalué soit bien représentatif du couple capteur/surface.

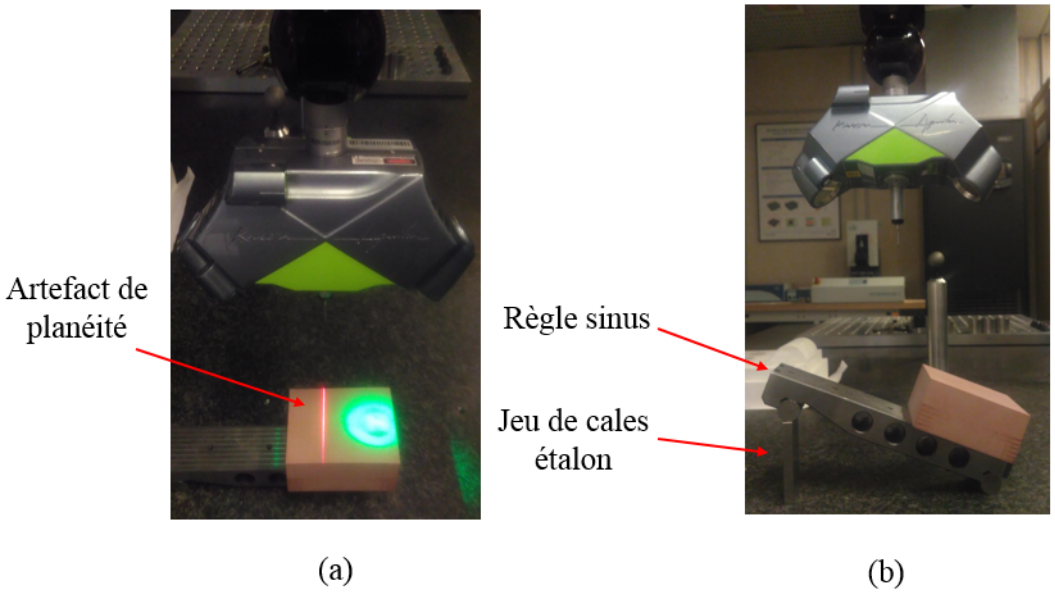


Figure 2.28: Évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation (a) et de l'angle de numérisation (b)

L'expérience de la qualification du capteur Aquilon donne la hauteur du champ de vision H=35 mm. L'évolution du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation présentée dans la figure 2.29 est obtenue en changeant la distance de numérisation tous les 5 mm de la position basse vers la position haute du FOV. La figure montre une augmentation du bruit à la position basse dans le champ de vision. En outre, la figure souligne que la valeur minimale du bruit correspond à la distance de numérisation d_{opt}=20 mm de la position basse du FOV.

D'autre part, l'évolution du bruit en fonction de l'angle de numérisation montre une augmentation significative (Figure 2.30) de 0° à 45°. Cependant, il peut être souligné que l'angle de numérisation limite α_{max} est égal à 75°. La surface est donc visible par le capteur si l'angle de numérisation α est inférieur à $\alpha_{max} = 75°$.

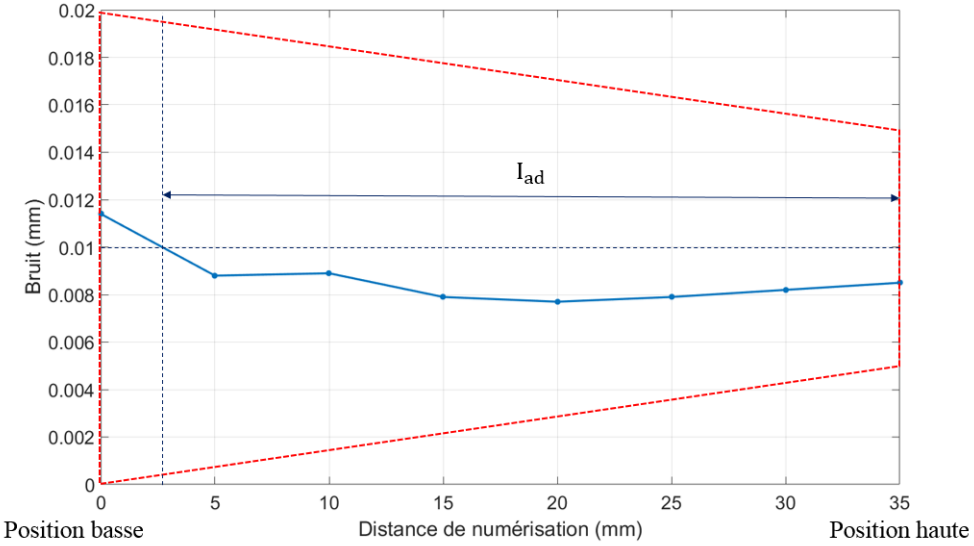


Figure 2.29: Évolution du bruit en fonction de la distance de numérisation (Capteur Aquilon)

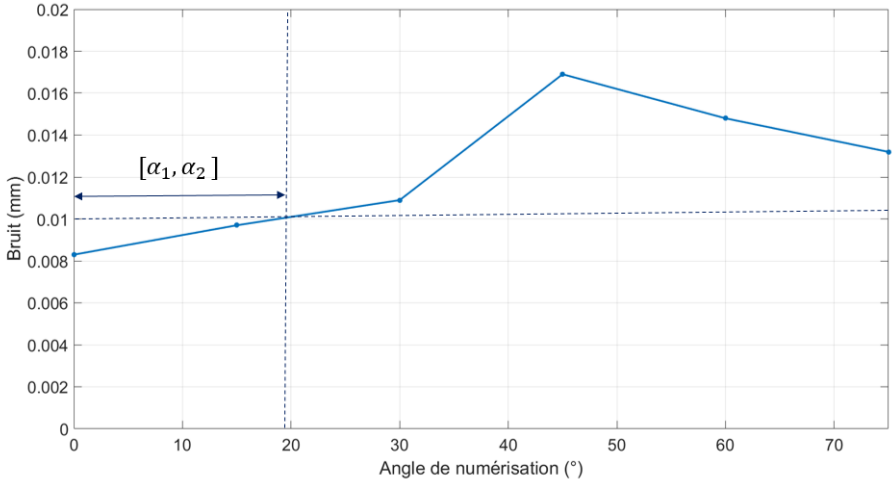


Figure 2.30: Évolution de bruit en fonction d'angle de numérisation (Capteur Aquilon)

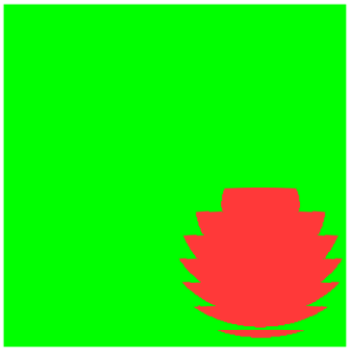
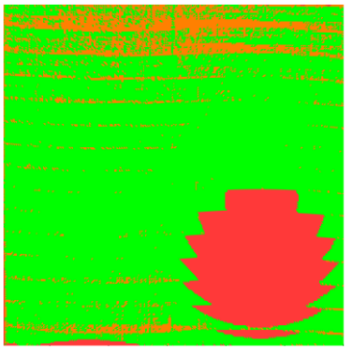
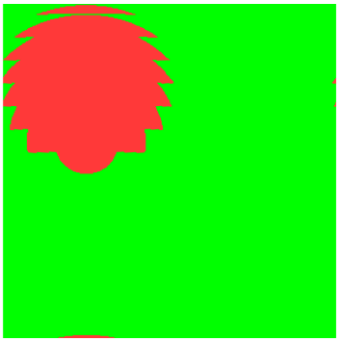
La détermination du seuil de bruit doit résulter d'un compromis entre l'évolution du bruit en fonction de la distance de numérisation et l'évolution du bruit en fonction de l'angle de numérisation. Considérant que la valeur de 0,01 mm en tant que seuil de bruit δ_{ad} pour la qualité avec le capteur Aquilon, la plage admissible des distances de numérisation I_{ad} est définie par [3 ; 35] mm dans le champ de vision (Figure 2.29). Ces deux intervalles garantissent une numérisation avec un bruit inférieur à $\delta_{ad} =$

0,01 mm. Pour la plage des angles de numérisation [0° ; 19°], le bruit est inférieur au seuil de bruit δ_{ad} =0,01 mm (Figure 2.30). Les plages de distances et d'angles de numérisation correspondants à ce seuil de bruit δ_{ad} sont utilisées pour caractériser les facettes du maillage dans la simulation et la numérisation réelle.

2.4.2.b Numérisation d'une pièce en résine polyuréthane

Les résultats de la numérisation réelle et du simulateur sont illustrés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5: Résultats pour la simulation de numérisation et la numérisation réelle

	Simulation de numérisation	*Numérisation réelle*
A=0° ; B=0° ; z=0 mm		
A=0° ; B=0° ; z=20 mm		

Les résultats de numérisation réelle montrés dans le tableau 2.5 présentent une bonne similitude avec les résultats obtenus par simulation. Les positions des zones en rouge de la surface (les facettes *non vues* par le capteur) se situent aux mêmes endroits dans la simulation et la numérisation réelle pour les deux trajectoires. Par exemple, nous remarquons que la trajectoire (A=0° ; B=0° ; z=0 mm) ne peut pas numériser la zone haute de la surface. Les facettes sont donc affichées en rouge dans la simulation et la numérisation réelle. Au contraire, toutes les zones de la surface

sont numérisées par la trajectoire (A=0° ; B=0° ; z=20 mm) sauf la zone plus basse de la surface. Cette zone n'est pas visible par le capteur, car elle ne se situe pas dans le champ de vision du capteur à cette distance de numérisation. Cependant, il y a des différences entre la simulation et la numérisation réelle. Dans les résultats de numérisation réelle pour les trajectoires (A=0° ; B=0° ; z=0 mm) et (A=0° ; B=0° ; z=20 mm) , nous remarquons que les rayures oranges horizontales se situent dans les zones vertes. Comme expliqué dans l'étude de cas 1, ceci provient du recouvrement de nappe laser entre deux passes consécutives de la trajectoire de numérisation. Le recouvrement contribue à augmenter le bruit de numérisation. C'est la raison pour laquelle on retrouve des facettes oranges représentant une mauvaise qualité de numérisation dans des zones où l'on devrait avoir une bonne qualité.

2.4.3 Synthèse sur les études de validation

Le simulateur a été validé dans deux études de cas : numérisation d'une pièce en aluminium par le capteur KZ25 et numérisation d'une pièce résine polyuréthane par le capteur Aquilon. La qualification du capteur est réalisée pour chaque capteur afin de connaître les paramètres du capteur tels que le champ de vision (FOV), les plages des distances de numérisation admissibles et l'angle de numérisation limite. Les informations obtenues par la qualification du capteur sont utilisées dans la simulation de numérisation du capteur. À partir des résultats de la comparaison entre la numérisation réelle et la simulation, nous pouvons constater que le simulateur a bien fonctionné en simulation de numérisation avec un capteur laser-plan en fonction de contraintes de visibilité et de qualité. Par ailleurs, il y a encore quelque différences entre la simulation et la numérisation réelle en estimant le bruit de numérisation sur certaines zones de la surface. C'est notamment le bruit indésirable causé par le recouvrement entre les passes consécutives de la trajectoire. De plus, afin d'améliorer la performance du simulateur et de réduire les différences entre la simulation et la numérisation réelle, le matériau utilisé pour la qualification du capteur doit être le même que celui utilisé pour la numérisation comme cela a été fait dans l'étude de cas 2.

2.5 Conclusion

Nous avons présenté au cours de ce chapitre un simulateur permettant de valider la trajectoire de numérisation avant l'exécution de la numérisation sur un système physique. Ce simulateur permet également d'aider à la planification de trajectoire en identifiant a priori les zones qui ne seront pas numérisées avec la qualité requise. Premièrement, nous définissons les paramètres du capteur laser-plan et les paramètres de la trajectoire de numérisation. Pour développer le simulateur, un formalisme de simulation de numérisation du capteur laser-plan en respectant la contrainte de visibilité et la qualité de numérisation est proposé. Ce formalisme se compose de deux fonctions associées aux 2 contraintes : la fonction de visibilité et la fonction de qualité. La fonction de visibilité vérifie si les facettes de la surface sont vues par la nappe laser entre deux configurations successives de trajectoires. Les facettes qui satisfont la fonction de visibilité sont vérifiées par la fonction de qualité qui définit la qualité de numérisation en fonction de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation.

La validation du simulateur est réalisée en deux études de cas : numérisation d'une pièce en aluminium par le capteur KZ25 et numérisation d'une pièce résine polyuréthane par le capteur Aquilon. Les études de cas réalisées sous des conditions de mesure différentes (la topologie de surface, les caractéristiques du matériau de la pièce numérisée, les différents capteurs) ont permis de mettre en exergue l'intérêt du simulateur dans la simulation de la numérisation avec la qualité requise. En effet, les résultats obtenus ont montré une bonne similitude entre la simulation et la numérisation réelle. Néanmoins, le simulateur ne prend en compte que deux facteurs qui influent sur la qualité : la distance de numérisation et l'angle de numérisation. Il ignore les autres facteurs comme les caractéristiques du matériau de surface, le recouvrement de numérisation, etc. Or le recouvrement de numérisation entre les passes consécutives de la trajectoire génère du bruit de numérisation qui est indésirable sur les zones de recouvrement. C'est pourquoi il existe encore quelques différences entre la simulation et la numérisation réelle sur certaines zones de la surface.

Le chapitre suivant est consacré à la proposition d'une méthode de planification

de trajectoire de numérisation, qui gère le recouvrement.

Chapitre

3

Méthode de planification de trajectoire : ISOvScan

3.1 Introduction

La planification de trajectoire de numérisation reste un défi majeur pour obtenir une représentation complète de la surface à mesure en un minimum de temps avec une qualité de numérisation donnée. Comme mentionné précédemment au paragraphe 1.2.3 du chapitre 1, la plupart des méthodes de planification de trajectoire de numérisation ont décrit la trajectoire de numérisation comme un ensemble de points de vue discrets, qui sont définis en fonction des contraintes de qualité et de visibilité. Initialement dédiés aux capteurs montés sur des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), les méthodes ont évolué pour s'adapter à des robots équipés de capteurs optiques. Dans ce cas, les degrés de liberté supplémentaires donnent une plus grande accessibilité aux surfaces à mesurer. Il est ainsi possible de générer des trajectoires de numérisation plus complexes, continues et en particulier, des trajectoires qui laissent l'orientation du capteur fixe par rapport à la surface. Les contraintes supplémentaires, telles que le contrôle du recouvrement de numérisation, peuvent ainsi être intégrées dans le calcul de la trajectoire. En effet, le recouvrement de numérisation, s'il n'est pas contrôlé, peut affecter à la fois le temps de mesure et la qualité de mesure. Dans ce contexte, l'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode de planification de la trajectoire de numérisation en intégrant le contrôle du recouvrement comme un critère supplémentaire pour contrôler le temps et la qualité de numérisation.

Dans notre approche, la pièce à numériser est représentée par son modèle CAO (Figure 3.1). La trajectoire de numérisation est la succession des positions et orientations du capteur décrites par $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ (cf. chapitre 1, figure 1.18). Pour contrôler la qualité de numérisation et contrôler le temps de numérisation, nous proposons la méthode ISOvScan (ISo-Overlap Scan) permettant de générer une trajectoire de numérisation continue avec le contrôle du recouvrement. Cette trajectoire continue est adaptée aux structures ayant 6 degrés de liberté. Cela permet de gérer à la fois l'orientation et le taux de couverture de la nappe laser.

La première partie du chapitre est consacrée à la définition du recouvrement de numérisation. L'état de l'art sur le contrôle du recouvrement est présenté dans la

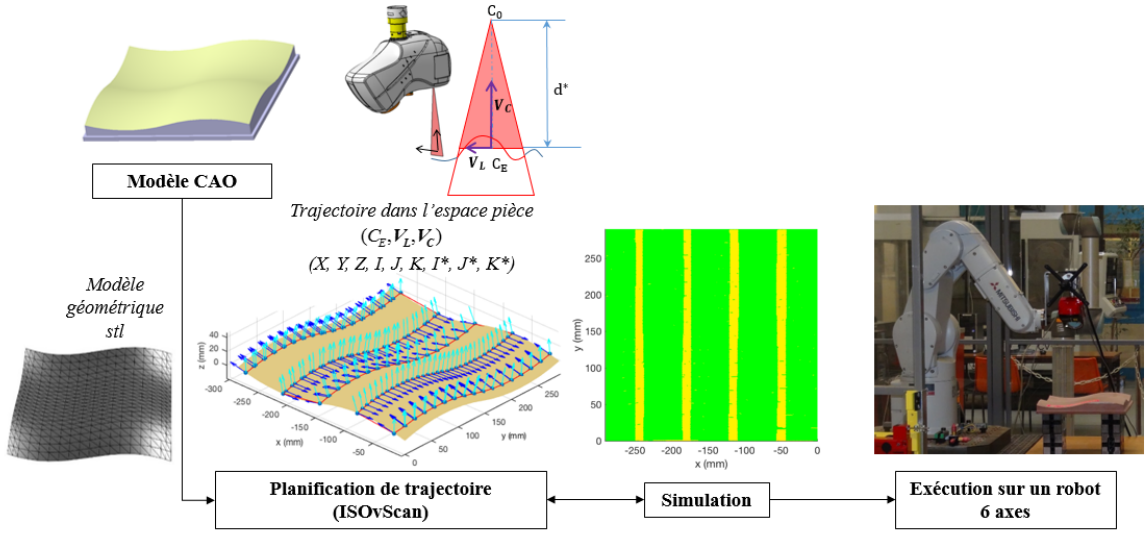


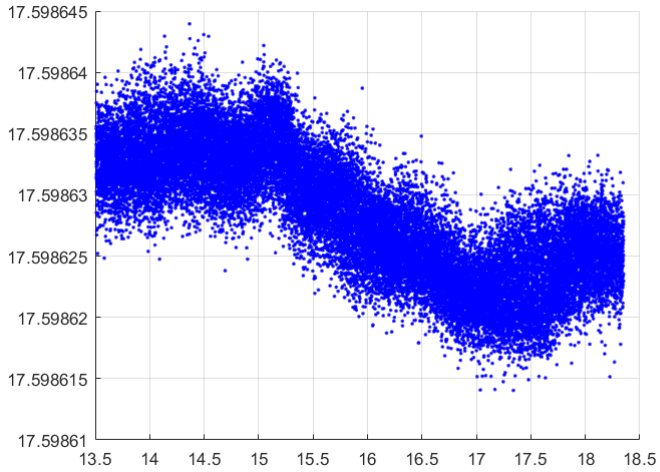
Figure 3.1: Génération de trajectoire de numérisation 6 axes

partie suivante. Par la suite, la description de la méthode de planification de trajectoire ISOvScan est détaillée. Enfin, cette description est suivie d'une application sur un système de numérisation constitué d'un capteur laser-plan monté sur un robot 6 axes.

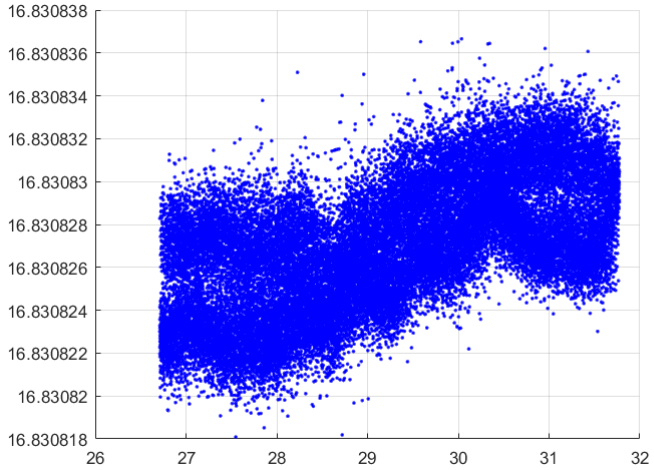
3.2 Définition du recouvrement de numérisation

La zone de recouvrement représente la partie de la surface numérisée par deux passes consécutives, et peut modifier le temps et la qualité de numérisation (Figure 3.3). Pour illustrer l'influence du recouvrement de numérisation sur la qualité, un plan de référence a été numérisé selon une stratégie zig-zag pour laquelle le pourcentage de recouvrement est fixé à 25% de la largeur de la ligne laser (Figure 3.3). Deux types différents de recouvrement sont étudiés. Le premier, (recouvrement 1 sur la figure 3.4), résulte de deux passes consécutives numérisées avec la même orientation du capteur. Pour la deuxième zone de recouvrement, (recouvrement 2 sur la figure 3.4), deux orientations différentes du capteur sont utilisées. Les profils de nuage de points dans ces zones de recouvrement sont montrées dans la figure 3.2. La qualité de numérisation est ici évaluée en termes de bruit de numérisation.

Pour ce faire, les nuages de points numérisés sont recalés sur la surface nomi-



(a) Profil de nuage de points dans la zone de recouvrement 1



(b) Profil de nuage de points dans la zone de recouvrement 2

Figure 3.2: Profil de nuage de points dans les zones de recouvrement

nale, considérant un maillage du modèle CAO du plan de référence. Pour chaque facette, le bruit est évalué de la même façon qu'au chapitre précédent (cf. paragraphe 2.4.1). Pour chaque zone de recouvrement, l'évolution du bruit de numérisation de la surface est présenté sur la cartographique de la figure 3.4. La densité de points pour les zones de recouvrement est toujours plus élevée que dans les autres zones et, par conséquent, le bruit de numérisation est plus grand que dans les zones sans recouvrement. Cependant, il est facile d'observer que le bruit de la zone de recouvrement 2 diffère du bruit de la zone de recouvrement 1. La figure 3.5(a) montre

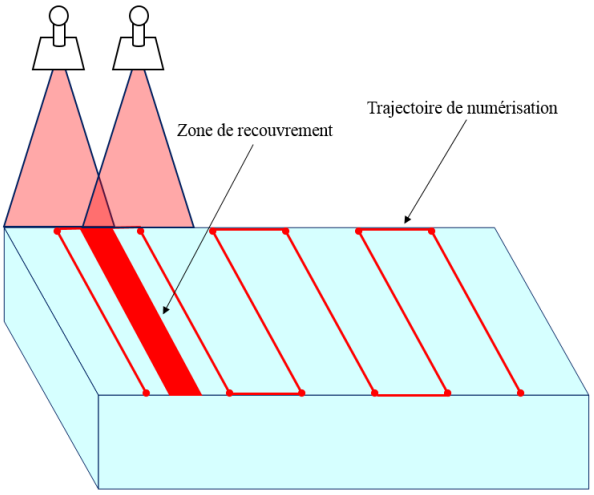


Figure 3.3: Définition de la zone de recouvrement

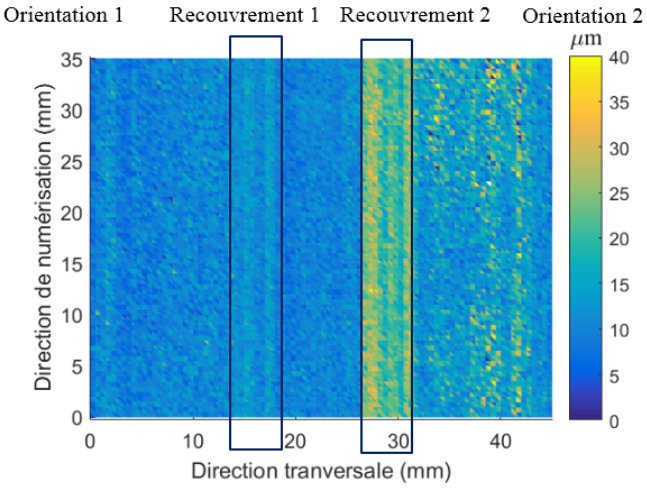
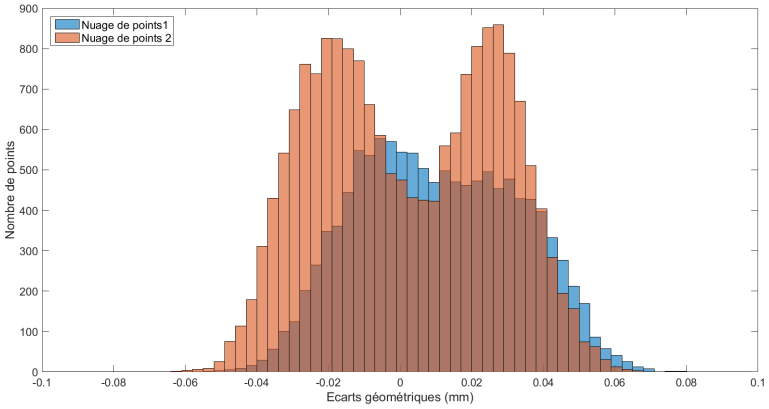
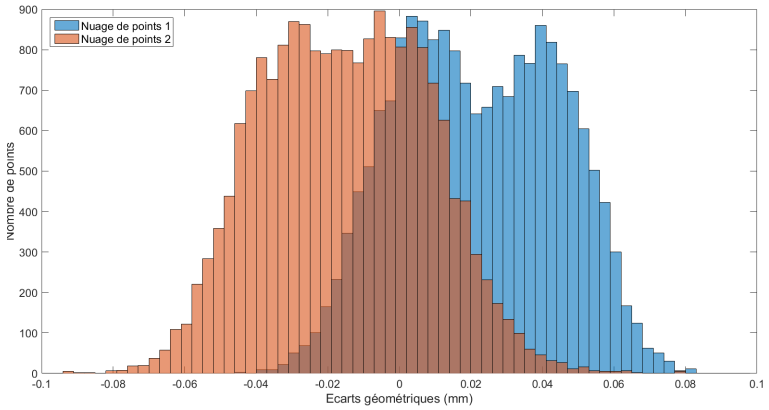


Figure 3.4: Évolution du bruit de numérisation sur le plan de référence

une petite dispersion entre deux nuages de points obtenus par deux passes consécutives numérisées avec la même orientation du capteur tandis que la figure 3.5(b) met clairement en évidence l'effet de superposition des deux nuages de points conduisant à une plus grand dispersion et, par conséquent, à une valeur de bruit de numérisation plus élevée. En conséquence, le contrôle du recouvrement de numérisation est nécessaire pour le contrôle de la qualité de numérisation en plus du temps de numérisation. Cependant, seules quelques études abordent la question du recouvrement de numérisation entre deux passes consécutives [Wu et al., 2015]. Wu et al., déter-



(a) Histogramme des écarts géométriques dans la zone de recouvrement 1



(b) Histogramme des écarts géométriques dans la zone de recouvrement 2

Figure 3.5: Histogramme des écarts géométriques dans les zones de recouvrement

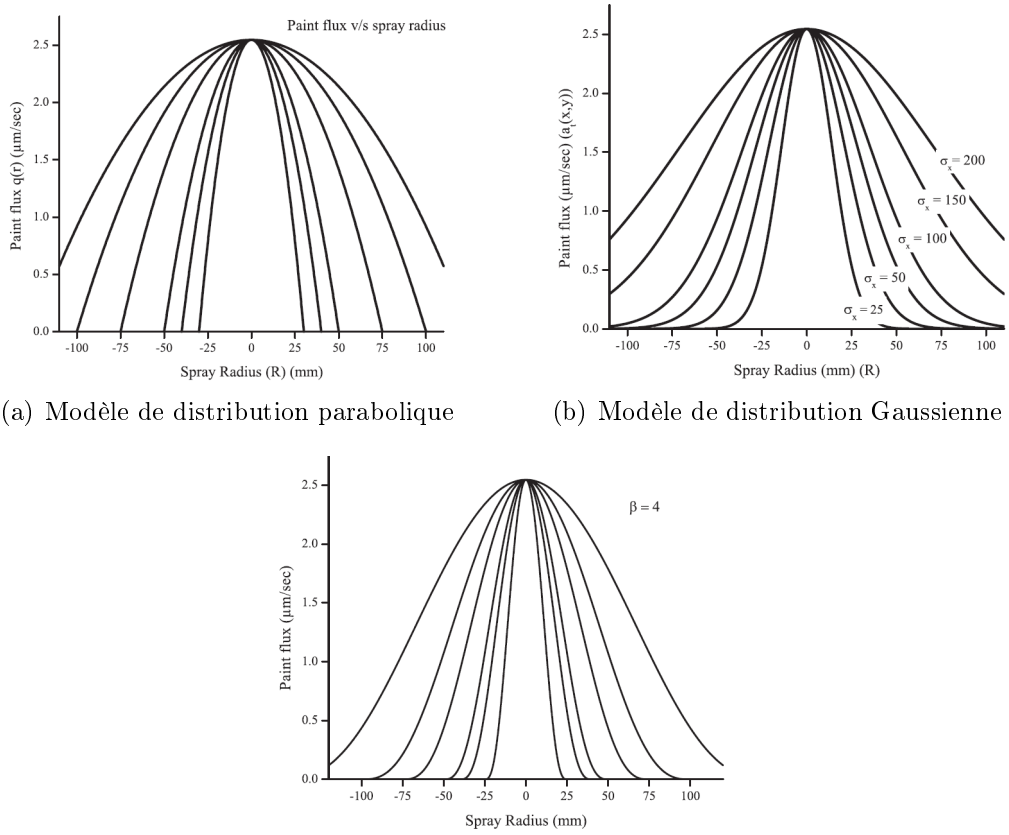
minent la largeur minimum acceptable de recouvrement en fonction des dimensions du champ de vision du capteur de lumière structurée. Par contre, le contrôle de recouvrement est plus abordé dans la planification de trajectoire d'outil en usinage ou la planification de trajectoire de pistolet à peinture sur un robot industriel.

3.3 État de l'art sur le contrôle du recouvrement

Dans la littérature, le contrôle du recouvrement a été surtout étudié en relation avec la planification de la trajectoire de robot de peinture industriel [Andulkar et al., 2015, Chen and Zhao, 2013, Atkar et al., 2005, Vivekanandhan et al., 1994]. L'étude de [Norberto Pires et al., 2009] met en avant que la planification de trajectoire de

pistolet avec le contrôle de recouvrement implique la prise en compte de nombreux paramètres tels que la géométrie de la pièce, le modèle de pistolet, la vitesse du pistolet et les contraintes telles que le temps de cycle, et la variation de l'épaisseur de la peinture. Afin de minimiser le temps de cycle ainsi que pour contrôler l'uniformité de l'épaisseur de la peinture, des stratégies de trajectoire de peinture conçues pour contrôler le recouvrement de la peinture ont été proposées dans certaines études. Dans ce cas, le contrôle du recouvrement est essentiel pour obtenir l'épaisseur de peinture et l'uniformité souhaitées. La distance optimale de recouvrement entre deux trajets consécutifs de pistolet à peinture est calculée pour optimiser le temps de cycle et l'épaisseur de peinture. Cette distance est déterminée à partir du modèle de distribution de peinture (distribution circulaire, distribution parabolique, distribution gaussienne, distribution bêta) [Andulkar et al., 2015]. Atkar et al., présentent une méthode de planification de trajectoire de peinture en sélectionnant une courbe initiale et en la décalant d'une distance optimale de la surface pour générer de nouvelles passes [Atkar et al., 2005] (Figure 3.7). L'objectif est de sélectionner les largeurs telles que les profils de peinture des passes adjacentes se chevauchent de manière appropriée et produisent une uniformité acceptable orthogonalement à la direction des passages. La distance optimale choisie entre deux passes consécutives est la plus grande distance qui assure que l'uniformité du dépôt de peinture sur la surface n'est pas sensible aux petits changements de distance. Dans [Andulkar et al., 2015], les auteurs ont montré que la génération d'une trajectoire de pistolet de peinture qui recouvre uniformément la surface repose non seulement sur la définition des orientations du pistolet et la distance entre passes, mais également sur la vitesse le long des passes. Dans l'étude de Tang et Cheng [Tang and Chen, 2015], une surface de forme libre est approximée par un ensemble de morceaux contenant les grilles connectées. La trajectoire est générée en utilisant les courbes de Bézier (Figure 3.8).

Le recouvrement entre les passes de trajectoire de numérisation représente également des similitudes avec les méthodes de génération de trajectoire d'outil iso-crêtes en usinage. La stratégie de planification de la trajectoire d'outil iso-crêtes peut être utilisée en usinage pour améliorer la qualité de surface usinée et minimiser le temps d'usinage en ordonnant les trajectoires de coupe de sorte que la hauteur de crêtes



(a) Modèle de distribution parabolique

(b) Modèle de distribution Gaussienne

(c) Modèle de distribution Bêta

Figure 3.6: Modèle de distribution de peinture [Andulkar et al., 2015]

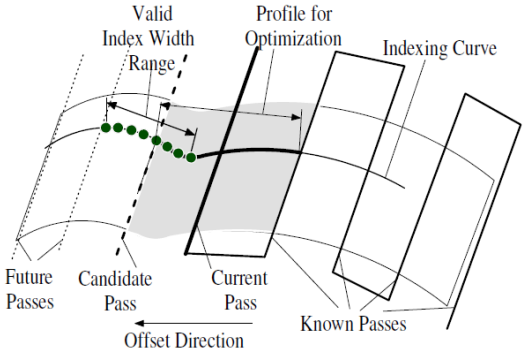


Figure 3.7: Trajectoire de peinture [Atkar et al., 2005]

laissée par l'outil entre deux trajectoires consécutives soit constante. Dans la littérature, la génération de trajectoires iso-crêtes en fraisage a été proposée initialement dans [Suresh and Yang, 1994]. Cette méthode s'intéresse aux surfaces paramétriques et résout le problème dans l'espace paramétrique de la surface. Tournier et Duc

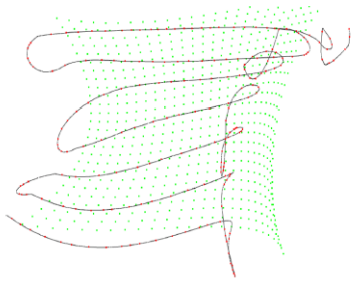


Figure 3.8: Trajectoire de peinture [Tang and Chen, 2015]

[Tournier and Duc, 2002] ont proposé une méthode basée sur le concept de surface d'usinage S_M, qui est la surface décalée de R de la surface nominale S_D, avec R le rayon d'outil. Chaque trajet de la trajectoire C_i appartient à S_M. La surface enveloppe du mouvement d'outil associé à C_i définit une surface de tuyau P_i dont le rayon est égal à R. Les auteurs définissent la surface iso-crêtes S_{Sh} qui est la surface décalée de Sh, où Sh est la hauteur de crête attendue de la surface nominale. Ensuite, pour assurer une hauteur de crête constante, deux trajets d'outil adjacents C_i et C_{i+1} sont construits de sorte que la courbe d'intersection (courbe de crête) entre les deux surfaces de tuyau P_i et P_{i+1} appartient à la surface S_{Sh} (Figure 3.9). Can et Ünüvar [Can and Ünüvar, 2010] ont développé un algorithme de génération de trajectoire d'outil iso-crêtes qui calcule les points de contact de l'outil iso-crêtes à partir de l'analyse de la surface B-spline. Le rayon de l'outil de coupe est ajusté à la courbure de la surface, puis la distance entre passes est calculée pour une hauteur de crêtes constante (Figure 3.10). Une procédure d'analyse de courbure de surface est appliquée sur toute de la surface pour déterminer le rayon de courbure minimum le long de la direction du trajet et la direction transversale. Cela donne le rayon maximal admissible d'un outil à utiliser pour l'usinage de la surface donnée.

Certains travaux proposent une approche intéressante plus dédiée aux surfaces maillées basée sur une transformation conforme [Li et al., 2011, Zhao et al., 2015]. Dans [Li et al., 2011], la surface maillée 3D est dépliée sur un plan 2D en utilisant la transformation conforme. L'intérêt de la transformation conforme est de conserver localement les angles ainsi que la forme, les distances et les aires sont modifiées par un facteur d'échelle [Haker et al., 2000]. Ensuite, les passes équidistantes calculées

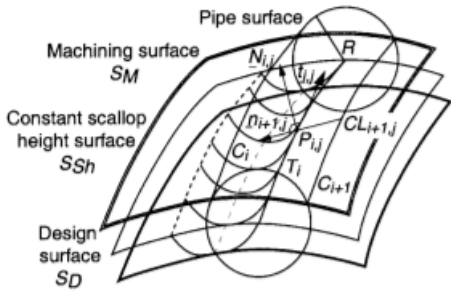


Figure 3.9: Géométrie de la trajectoire d'outil iso-crêtes [Tournier and Duc, 2002]

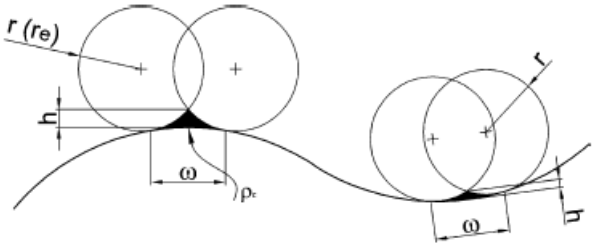


Figure 3.10: Génération de hauteurs de crête sur une surface convexe et concave [Can and Ünüvar, 2010]

dans l'espace $2D$ peuvent être transformées en trajectoires dans l'espace $3D$ par la transformation conforme inverse. Le grand avantage ici est la simplification du calcul pour contrôler le recouvrement, car la génération de la trajectoire d'outil est réalisée dans l'espace $2D$.

Dans ce chapitre, nous proposons une approche pour générer la trajectoire de numérisation pour un capteur laser-plan qui utilise la transformation conforme pour contrôler le recouvrement entre deux passes consécutives. Une trajectoire de numérisation avec le contrôle de recouvrement de numérisation permet la gestion à la fois de l'orientation et du taux de couverture du faisceau laser. La suite du chapitre est consacrée à la description de la méthode. Cette approche est ensuite validée à l'aide du système de numérisation constitué par un capteur laser-plan monté sur un robot industriel.

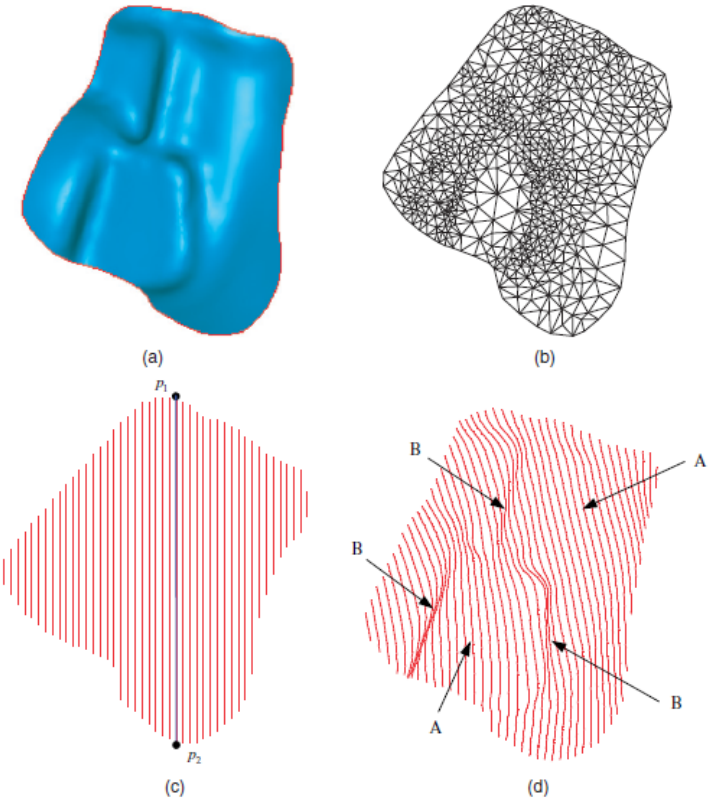


Figure 3.11: Génération de trajectoire d'outil iso-planaire a) Surface 3D b) Maillages triangulaires planaires c) Trajectoire iso-planaire en $2D$ d) Trajectoire iso-planaire en $3D$ [Li et al., 2011]

3.4 Trajectoire de numérisation à recouvrement maîtrisé-ISOvScan [Phan et al., 2018]

La planification de trajectoire de numérisation consiste à définir un ensemble de configurations du capteur permettant de numériser une surface de la pièce. La trajectoire du capteur laser-plan est la succession des positions et des orientations du capteur décrites par $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ (Figure 3.12).

La méthode que nous avons développée, appelée ISOvScan pour Iso-Overlap Scan path est une méthode pour générer une trajectoire de numérisation avec le contrôle du recouvrement entre deux passes consécutives. Elle est inspirée des méthodes de génération de trajectoire d'outil iso-crêtes qui sont plus couramment utilisées pour l'usinage. Pour simplifier le calcul, la trajectoire du capteur est calculée dans l'espace 2D de la surface, comme proposé dans [Li et al., 2011]. Néanmoins,

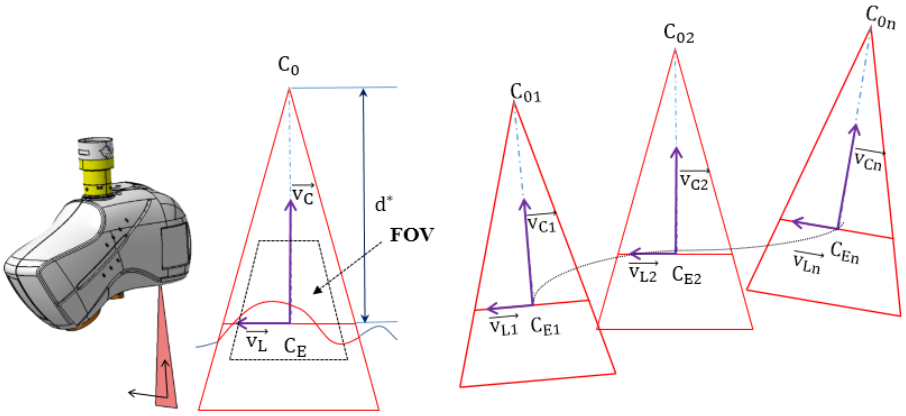


Figure 3.12: Paramètres décrivant les configurations du capteur

comme le modèle CAO de la surface n'est pas un modèle de surface continu, mais un maillage $3D$, il est nécessaire de transformer la surface maillée $3D$ en un espace paramétrique $2D$ en utilisant la transformation conforme au sens des moindres carrés (Least Squares Conformal Maps-LSCM). Avec cette méthode, l'intervalle entre deux passes est maintenu constant, les orientations du capteur en chaque point piloté sont contrôlées pour maximiser le taux de couverture de la nappe laser et assurer la visibilité et la qualité de numérisation. La méthode se compose de trois étapes principales :

- Transformation de la surface maillée 3D sur une surface paramétrique 2D à l'aide de la méthode LSCM.

- Génération des points pilotés c_e dans l'espace 2D, et transformation de c_e en C_E dans l'espace 3D par la transformation LSCM inverse.

- Détermination des orientations du capteur pour chaque point piloté en fonction des contraintes de visibilité et de qualité.

Chaque étape de la méthode ISOvScan est détaillée ci-après.

3.4.1 Transformation entre l'espace 3D et l'espace paramétrique 2D en utilisant la transformation LSCM

Dans un premier temps, nous allons introduire la notion de transformation conforme au sens de moindres carrés. La démarche s'appuie sur les notations proposées dans

le tableau 3.1. En analyse complexe, une transformation conforme est définie comme une bijection qui conserve localement les angles [Lévy et al., 2002].

La transformation d'une surface triangulée 3D vers un espace 2D (u, v) peut être considérée comme une fonction complexe :

$$\psi(s) = u(x, y) + iv(x, y) \tag{3.1}$$

avec la variable $s = x + iy$ et (x, y) les coordonnées dans une base locale xy (Figure 3.13).

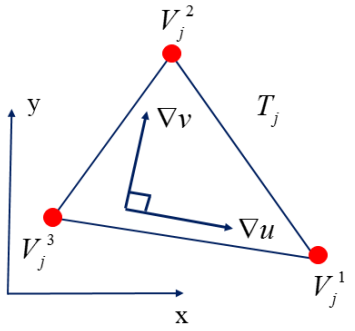


Figure 3.13: Triangle défini dans une base locale

Une fonction est conforme si elle satisfait aux conditions de Cauchy-Riemann :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \tag{3.2}$$

Ces conditions peuvent se reformuler en utilisant les gradients de deux paramètres u et v [Hormann et al., 2007] :

$$\nabla v = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \nabla u \tag{3.3}$$

où

$$\nabla u = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix} \text{ et } \nabla v = \begin{pmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Considérons un triangle de facette T_j dans la base (x, y) défini sur la figure 3.13, la fonction qui met un point (x, y) du triangle en correspondance avec un point (u, v) de l'espace paramétrique, s'écrit :

Tableau 3.1: Paramètres 3D et 2D

	Paramètres du maillage en 3D		*Paramètres du maillage en 2D*
S_T	ensemble de n facettes triangulaires	s_t	ensemble de n facettes triangulaires
T_j	facette j avec $T_j \in S_T,\ j \in [1, n]$	t_j	facette j avec $t_j \in s_t,\ j \in [1, n]$
S_v	ensemble de sommets en 3D	s_v	ensemble de sommets en 2D
V_j^k	un sommet de facette T_j avec $k \in [1, 3]$	a_j^k	un sommet de facette t_j avec $k \in [1, 3]$
(x_j^k, y_j^k)	coordonnées du sommet V_j^k	(u_j^k, v_j^k)	coordonnées du sommet a_j^k
A_{T_j}	aire de facette T_j	a_{t_j}	aire de facette t_j
$\mathbf{n_j}$	normale à la facette T_j		

$$\begin{cases} u(x,y) &= \lambda_1.u_j^1 + \lambda_2.u_j^2 + \lambda_3.u_j^3 \\ v(x,y) &= \lambda_1.v_j^1 + \lambda_2.v_j^2 + \lambda_3.v_j^3 \end{cases} \tag{3.4}$$

où λ_1, λ_2, et λ_3 représentent les coordonnées barycentriques du point (x, y) qui est calculé comme suit :

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2.A_j} \cdot \begin{pmatrix} y_j^2 - y_j^3 & x_j^3 - x_j^2 & y_j^3 x_j^2 - y_j^2 x_j^3 \\ y_j^3 - y_j^1 & x_j^1 - x_j^3 & y_j^1 x_j^3 - y_j^3 x_j^1 \\ y_j^1 - y_j^2 & x_j^2 - x_j^1 & y_j^2 x_j^1 - y_j^1 x_j^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

∇u s'exprime en fonction des coordonnées barycentriques par :

$$\nabla u = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix} = M_{T_j} \cdot \begin{pmatrix} u_j^1 \\ u_j^2 \\ u_j^3 \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

avec :

$$M_{T_j} = \frac{1}{2.A_j} \cdot \begin{pmatrix} y_j^2 - y_j^3 & y_j^3 - y_j^1 & y_j^1 - y_j^2 \\ x_j^3 - x_j^2 & x_j^1 - x_j^3 & x_j^2 - x_j^1 \end{pmatrix} \tag{3.7}$$

La condition de l'équation 3.3 conduit à :

$$M_{T_j} \cdot \begin{pmatrix} v_j^1 \\ v_j^2 \\ v_j^3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot M_{T_j} \begin{pmatrix} u_j^1 \\ u_j^2 \\ u_j^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

Comme l'équation 3.8 ne peut être respectée que pour les surfaces développables, pour une surface générale, l'équation est vérifiée par une approximation au sens des

moindres carrés. On note la fonction E_{LSCM} qui mesure le caractère non conforme de la paramétrisation. La solution au sens des moindres carrés consiste à rechercher les valeurs des paramètres (u_j^k, v_j^k) qui minimisent la fonction E_{LSCM} :

$$E_{LSCM} = \sum_{T_j \in S_T} A_{T_j} \cdot \left\| M_{T_j} \cdot \begin{pmatrix} v_j^1 \\ v_j^2 \\ v_j^3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot M_{T_j} \begin{pmatrix} u_j^1 \\ u_j^2 \\ u_j^3 \end{pmatrix} \right\|^2 \tag{3.9}$$

Après la mise en œuvre de l'algorithme LSCM, une facette T_j de la surface 3D est transformée en la facette t_j dans l'espace paramétrique 2D, et un ensemble S_T de n facettes triangulaires dans l'espace 3D est alors transformé en un ensemble s_t de n facettes triangulaires dans l'espace 2D (Figure 3.14).

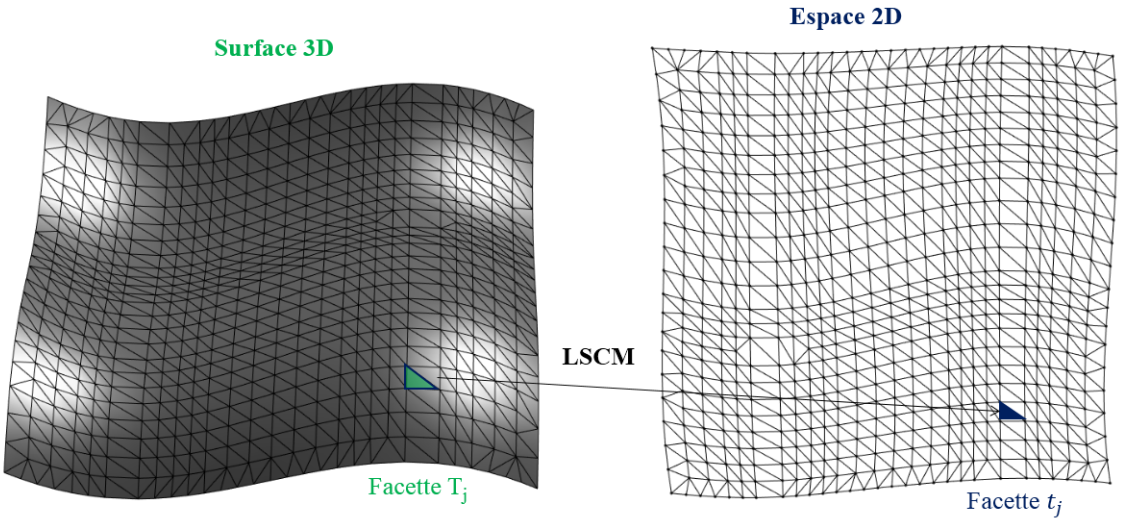


Figure 3.14: Une surface 3D transformée en surface 2D par LSCM

Dans notre approche, la transformation de la surface maillée 3D en une surface paramétrique 2D est réalisable que dans le cas d'une surface dépliable. Une surface est dite dépliable si elle peut être mise à plat sur un plan sans la déchirer. L'étape suivante est la génération des points pilotés, c_e dans l'espace 2D, suivie par la transformation du point c_e en un point C_E dans l'espace 3D par la transformation LSCM inverse.

3.4.2 Génération des points pilotés

La trajectoire de numérisation est générée en 2D en s'inspirant d'un mode classique de génération par plans parallèles. La longueur du rectangle qui délimite la surface 2D définit la direction du plan, et les points pilotés sont déterminés par l'intersection entre les plans parallèles et la surface paramétrique. Pour contrôler le recouvrement, les plans parallèles sont équidistants, avec I_{2D} la distance entre deux plans parallèles correspondant à la distance entre deux passes successives dans l'espace 2D. Cependant, c'est la distance I_{3D} entre deux passes dans l'espace 3D qui contrôle le recouvrement. Par conséquent, une relation entre I_{2D} et I_{3D} est établie en considérant que le rapport des deux valeurs est égal au coefficient de proportionnalité des triangles similaires T_j et t_j :

$$\frac{I_{3D}}{I_{2D}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sqrt{\frac{A_{T_j}}{a_{t_j}}} \tag{3.10}$$

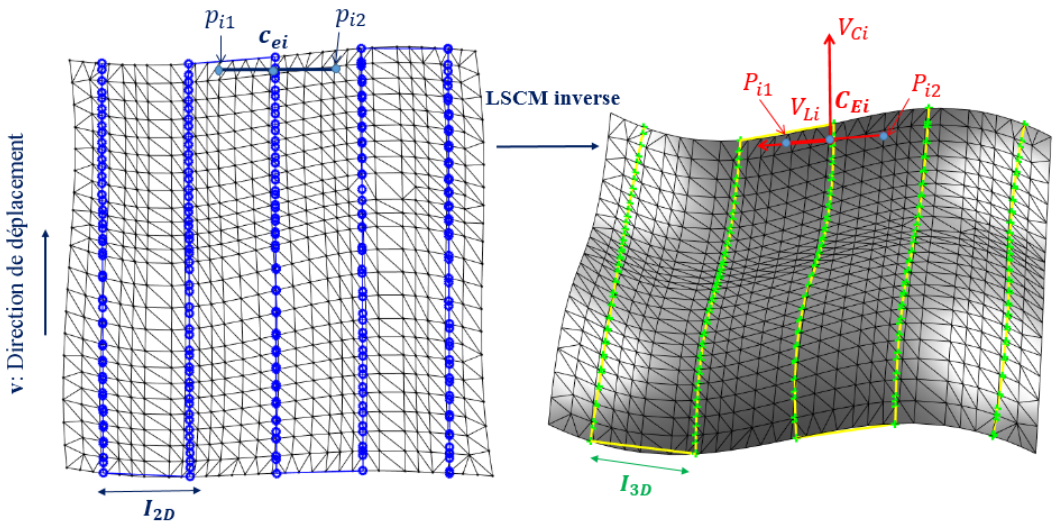


Figure 3.15: Génération de trajectoire de numérisation

Les coordonnées des points pilotés c_{ei} (c_{e1},c_{e2},.. ,c_{en}) dans l'espace 2D sont ainsi obtenus (Figure 3.15). Un point piloté c_{ei} est transformé en son point correspondant C_{Ei} par la transformation inverse (Figure 3.15). L'algorithme LSCM étant une application bijective, il est donc possible d'appliquer la transformation inverse qui transforme un point de l'espace paramétrique en un point correspondant dans l'es-

pace 3D. Pour un triangle T_j sur la surface S_T, la transformation entre la surface triangulée 3D et la surface paramétrique peut être représentée par une matrice de transformation linéaire M_j [Li et al., 2011] :

$$M_j \left[V_j^1, V_j^2, V_j^3\right] = \left[a_j^1, a_j^2, a_j^3\right] \tag{3.11}$$

$$M_j = \left[a_j^1, a_j^2, a_j^3\right] \left[V_j^1, V_j^2, V_j^3\right]^{-1} \tag{3.12}$$

où V_j^k k=1,2,3, représente les trois sommets du triangle T_j dans l'espace 3D et a_j^k k=1,2,3, représente les trois sommets du triangle t_j dans l'espace 2D

Nous pouvons donc calculer la matrice inverse M_j^{-1} qui transforme un triangle t_j de l'espace paramétrique vers le triangle correspondant T_j dans l'espace 3D. Pour chaque facette (j=1...n), nous trouvons un ensemble de matrices M_j^{-1} (M_1^{-1}, M_2^{-1} ,...,M_n^{-1}). Un point piloté c_{ei} $(u_i, v_i, 1)$ appartenant au triangle t_i dans l'espace paramétrique est transformé en C_{Ei} dans l'espace 3D par l'équation :

$$C_{Ei} = M_j^{-1} \begin{bmatrix} u_i & v_i & 1 \end{bmatrix}^T \tag{3.13}$$

À partir de l'équation 3.13, les points pilotés (C_{E1}, C_{E2},..., C_{En}) dans l'espace 3D sont calculés à partir de l'ensemble des points correspondants dans l'espace paramétrique (c_{e1}, c_{e2},..., c_{en}).

Une fois que tous les points pilotés sont calculés, l'étape suivante consiste à déterminer les orientations du capteur pour chacun d'eux. Ceci se fait en deux étapes : tout d'abord le vecteur de la ligne laser $\overrightarrow{V_L}$ est déterminé avant la détermination du vecteur d'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ du capteur laser-plan.

3.4.3 Détermination du vecteur directeur de ligne laser, $\vec{V_L}$

Pour obtenir une bonne qualité de numérisation sur l'ensemble de la surface, la distance de numérisation doit appartenir à l'intervalle de distances admissibles (cf. paragraphe 2.4.1 du chapitre 2). Une distance de numérisation constante d_{opt} est d'abord imposée pour tous les points pilotés de la trajectoire. La distance d_{opt} assure que la surface numérisée au point piloté est bien visible dans le champ de

vision (FOV) du capteur, et assure également la qualité de numérisation attendue. La largeur de la ligne laser du capteur notée L_{opt} correspondant à cette distance de numérisation est constante par rapport à la surface balayée (voir la détermination de d_{opt} dans la partie de qualification du capteur dans le paragraphe 2.4.1 du chapitre 2). Afin de maximiser la surface balayée, la ligne laser doit être perpendiculaire à la direction de déplacement des points pilotés de la trajectoire dans l'espace 3D. Pour cela, la ligne laser doit également être perpendiculaire à la direction de déplacement de la trajectoire dans l'espace 2D, notée v (Figure 3.15). La largeur de ligne laser l_{opt} dans l'espace 2D est définie en utilisant le coefficient de proportionnalité : $l_{opt} = L_{opt}.I_{2D}/I_{3D}$. Au chaque point c_{ei}, la ligne laser est positionnée perpendiculairement à la trajectoire et centrée sur c_{ei}. La largeur l_{opt} définit deux points à l'extrémité p_{i1} et p_{i2} de la ligne laser (Figure 3.15). Les coordonnées de points correspondants P_{i1}, P_{i2} de la ligne laser dans l'espace 3D à partir de points p_{i1}, p_{i2} dans l'espace 2D sont calculées grâce à la transformation LSCM inverse. Ensuite, le vecteur de la ligne laser $\overrightarrow{V_{Li}}$ au point piloté C_{Ei} est défini par :

$$\overrightarrow{V_{Li}} = \frac{\overrightarrow{P_{i1}P_{i2}}}{\left\|\overrightarrow{P_{i1}P_{i2}}\right\|} \tag{3.14}$$

3.4.4 Détermination du vecteur d'axe du faisceau laser, $\vec{V_C}$

Le vecteur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ est déterminé afin que la direction de numérisation soit toujours perpendiculaire à la surface. Nous devons donc calculer le vecteur normal local à la surface à chaque point piloté C_{Ei}. Celui-ci est calculé comme la valeur moyenne de tous les vecteurs normaux aux facettes liées à la ligne laser au point C_{Ei}. Il est intéressant de noter qu'en raison de la transformation conforme au sens des moindres carrés LSCM, les facettes liées à la ligne laser dans l'espace 2D sont également les facettes liées à la ligne laser au point piloté dans l'espace 3D. Ces facettes intersectent avec la ligne laser dans l'espace 2D, et les points d'intersection sont faciles à identifier (Figure 3.16). Par conséquent, après la

transformation dans l'espace 3D, le vecteur normal local est donné par :

$$\overrightarrow{n_{C_{Ei}}} = \frac{\sum_{j=1}^{mi} \frac{\overrightarrow{n_j}}{A_{T_j}}}{\left\| \sum_{j=1}^{mi} \frac{\overrightarrow{n_j}}{A_{T_j}} \right\|} \tag{3.15}$$

Où mi est le nombre de facettes liées à la ligne laser au point piloté C_{Ei}, et $\overrightarrow{n_j}$, le vecteur normal à la facette T_j avec ($j = 1$ à mi). Finalement, le vecteur directeur d'axe du faisceau laser est défini en chaque point piloté C_{Ei} par : $\overrightarrow{V_{Ci}} = \overrightarrow{n_{C_{Ei}}}$.

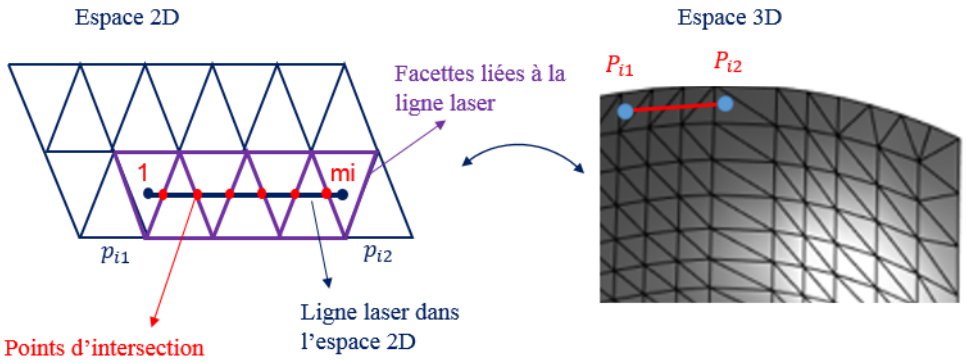
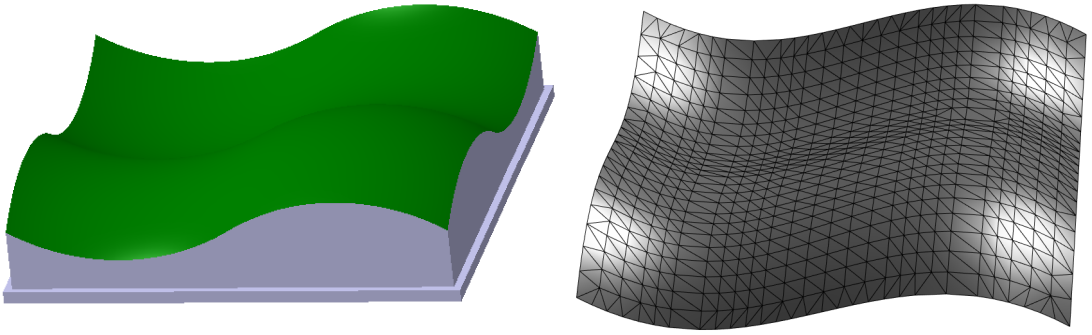


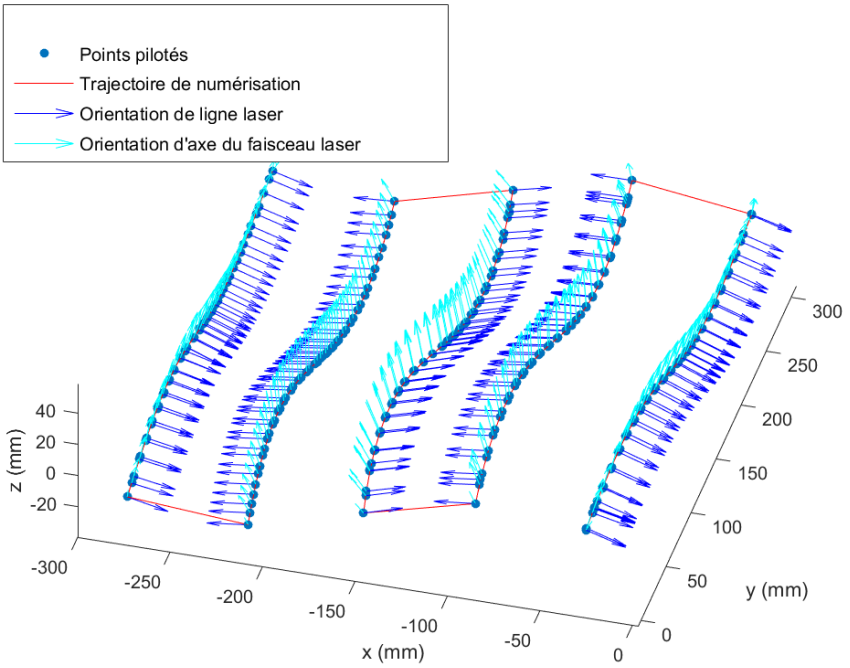
Figure 3.16: Identification des facettes liées à la ligne laser



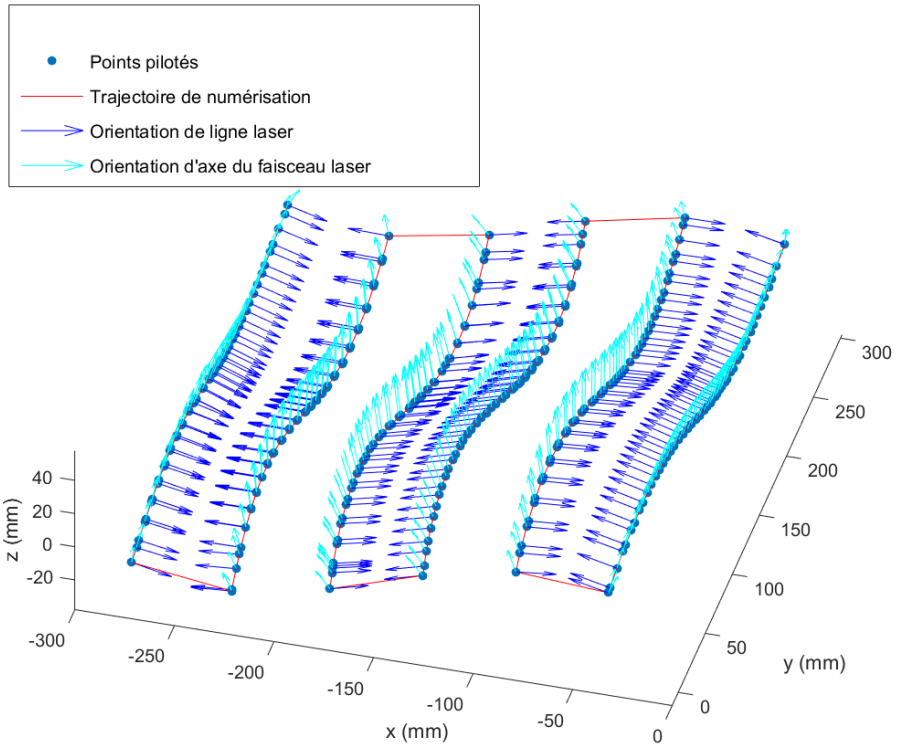
(a) CAO de la pièce (b) Surface maillée

Figure 3.17: Représentation de la surface

Toute la trajectoire est ainsi obtenue avec un ensemble de positions et d'orientations (C_{Ei} ; $\overrightarrow{V_{Li}}$; $\overrightarrow{V_{Ci}}$). La méthode de planification de trajectoire de numérisation avec le contrôle du recouvrement ISOvScan est implémentée sous Matlab ©. En utilisant une surface de test montrée dans la figure 3.17, deux exemples sont propo-



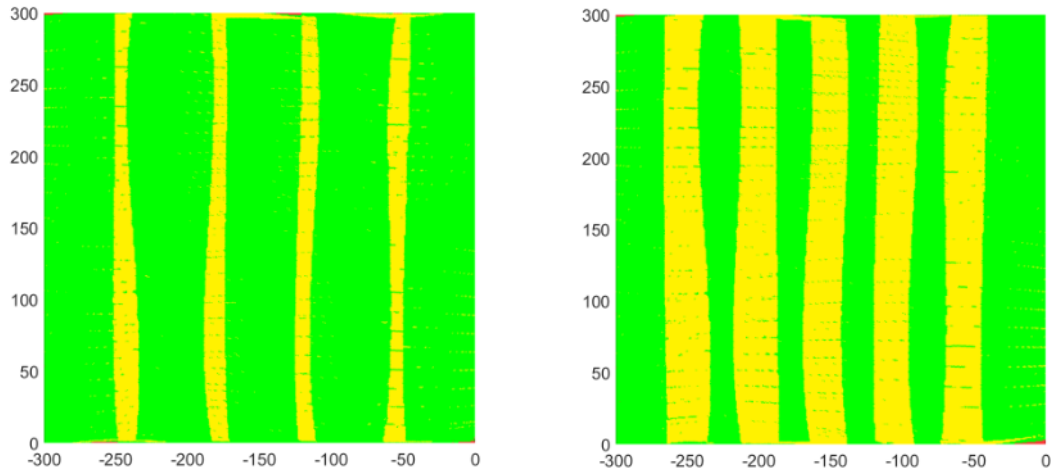
(a) Intervalle entre passes $I_{3D} = 65$ mm



(b) Intervalle entre passes $I_{3D} = 50$ mm

Figure 3.18: Exemples de trajectoires de numérisation pour différents intervalles entre passes

sés dans la figure 3.18 pour démontrer le fonctionnement d'ISOvScan. À partir de la surface maillée, en donnant la valeur de l'intervalle I_{3D} et la largeur de la ligne laser L, ISOvScan génère la trajectoire (C_{Ei} ; $\overrightarrow{V_{Li}}$; $\overrightarrow{V_{Ci}}$). Dans cet exemple, la largeur de la ligne laser L est choisie égale à 77 mm (L_{opt} du capteur Zephyr II cf. section 3.6) pour deux valeurs de I_{3D}= 65 mm (15 % de recouvrement) et I_{3D}=50 mm (35 % de recouvrement). En modifiant la valeur de l'intervalle entre passes I_{3D}, la largeur de la zone de recouvrement peut être contrôlée (Figure 3.19). La zone verte représente la zone de numérisation avec une bonne qualité de numérisation tandis que la zone jaune représente la zone de recouvrement. Il est facile de remarquer que la largeur de zone de recouvrement (en jaune) de la trajectoire avec I_{3D}= 65 mm est plus petite que celle de la trajectoire avec I_{3D}= 50 mm. Cela confirme l'intérêt du simulateur dans l'analyse des trajectoires de numérisation.



(a) Intervalle entre passes I_{3D} = 65 mm

(b) Intervalle entre passes I_{3D} = 50 mm

Figure 3.19: Simulation de numérisation des trajectoires de numérisation pour différents intervalles entre passes

3.5 Facteurs influençant la méthode ISOvScan

La trajectoire de numérisation ISOvScan est calculée à partir de la surface maillée de la pièce à numériser. L'influence de qualité de maille et de la géométrie de la surface sur le résultat est donc nécessaire à étudier.

3.5.1 Taille de maille

La méthode de planification de trajectoire de numérisation ISOvScan est basée sur le modèle CAO sous la forme d'une surface maillée. L'influence de la taille de maille sur la position relative entre le capteur et la surface et sur le vecteur normal à la surface est étudiée dans cette partie.

Afin illustrer l'influence relative des différents paramètres du maillage sur la position relative entre le capteur et la surface, nous approximons la surface S localement par une sphère de rayon R (voir figure 2.11, paragraphe 2.3.4, chapitre 2). Comme précédemment, nous analysons la qualité du maillage à l'aide de 2 paramètres e_f, l'erreur de corde et e_m, la longueur d'arête (Figure 2.12 chapitre 2). La position entre le capteur et la surface nominale est représentée par la position de la ligne laser du capteur à la surface comme présenté sur la figure 3.20 avec :

I_{ad}, la plage de distances de numérisation admissibles dans le champ de vision qui donne une bonne qualité de numérisation

I_m, la plage de distances de numérisation dans le champ de vision qui donne une mauvaise qualité de numérisation

L_n, la largeur de la ligne laser sur la surface nominale

L_f, la largeur de la ligne laser sur la surface maillée

d_n, la distance de numérisation sur la surface nominale

H, la hauteur du champ de vision

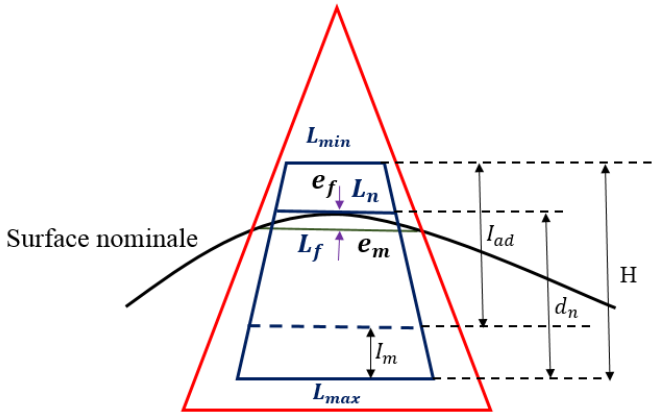


Figure 3.20: Position relative entre la ligne laser du capteur et la surface

L'erreur de corde est calculée selon l'équation suivante :

$$e_f = \frac{L_f - L_n}{L_{max} - L_{min}}.H \tag{3.16}$$

Pour obtenir une bonne qualité de numérisation, l'erreur de corde doit satisfaire les conditions suivantes :

$$\begin{cases} 0 \leq e_f \leq d_n - I_m \\ I_m \leq d_n \leqslant H \end{cases} \tag{3.17}$$

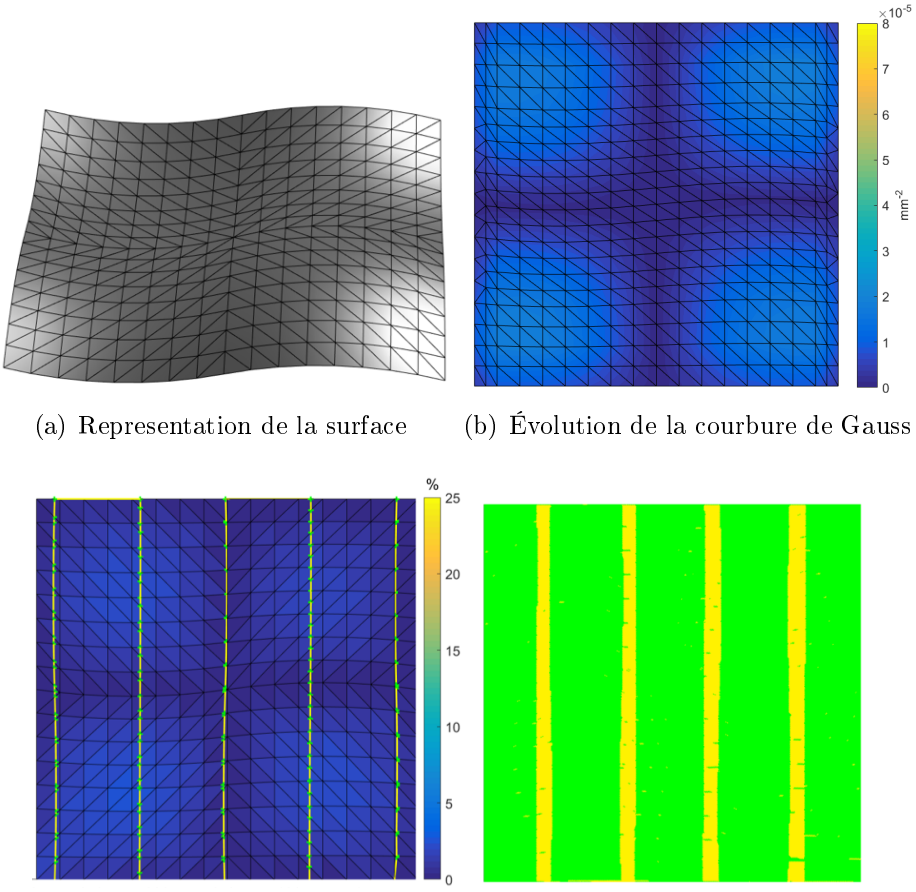
Dans la méthode ISOvScan, le vecteur d'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ du capteur est déterminé grâce à la normale à la facette. L'influence de la taille du maillage sur la normale à la surface doit être étudiée. Comme présenté dans la partie 2.3.4 du chapitre 2, nous définissons l'angle θ comme l'angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale (cf. figure 2.12 du chapitre 2).

L'évolution de l'angle entre la normale à la facette et la normale à la surface nominale en fonction de la taille de la maille est celle de la figure 2.13 du chapitre 2. Afin de réduire le nombre de points pilotés mais aussi assurer le critère de qualité de numérisation, nous choisissons l'erreur de corde $e_f = 0,1$ mm et θ=1,53°. Nous choisissons la taille de maille avec e_f=0,1 mm ce qui donne e_m=15 mm pour représenter la surface pour calculer la trajectoire de numérisation ISOvScan.

3.5.2 Géométrie de la surface

La géométrie de la surface est aussi un facteur qui influence le résultat. Ainsi, elle influence la qualité de la transformation conforme de l'espace 3D vers l'espace 2D. La méthode fonctionne sur des surfaces complexes mais si la surface présente des variations de courbure trop importantes, la qualité de l'approximation utilisée pour calculer la transformation conforme devient moins bonne. Nous pouvons montrer qu'une limitation de la méthode ISOvScan est que l'intervalle entre les passes de la trajectoire de numérisation dans l'espace 3D ne peut pas être maintenu constant pour toute la trajectoire de numérisation pour les surfaces à haute variation de courbure. Dans ce cas, la taille des zones de recouvrement entre les passes n'est pas

uniforme. Ceci est dû aux erreurs commises dans l'approximation de la transformation conforme.



(a) Representation de la surface (b) Évolution de la courbure de Gauss

(c) Évolution de l'erreur LSCM $\overline{e_{LSCM}} = 1.04\%$ (d) Simulation du recouvrement (Jaune)

Figure 3.21: Erreur LSCM de surface à faible variation de courbure

En effet, l'intervalle entre deux passes consécutives est établi selon l'équation 3.10. La transformation de l'espace 3D en espace 2D est réalisée pour chaque facette de la surface, alors que le rapport $\frac{I_{3D}}{I_{2D}}$ est calculé comme une valeur moyenne du coefficient de proportionnalité de triangles similaires T_j et t_j. Du fait de l'approximation réalisée par la LSCM, il existe certaines erreurs notamment en ce qui concerne le coefficient de proportionnalité. Notons e^j_{LSCM}, l'erreur LSCM qui représente la différence entre le coefficient de proportionnalité de deux triangles similaires T_j et t_j et le rapport $\frac{I_{3D}}{I_{2D}}$, e^j_{LSCM} est donnée par :

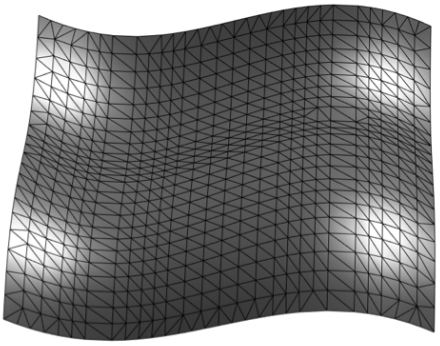
$$e^j_{LSCM} = \left| \frac{k_j - \bar{k}}{\bar{k}} \right| \tag{3.18}$$

où

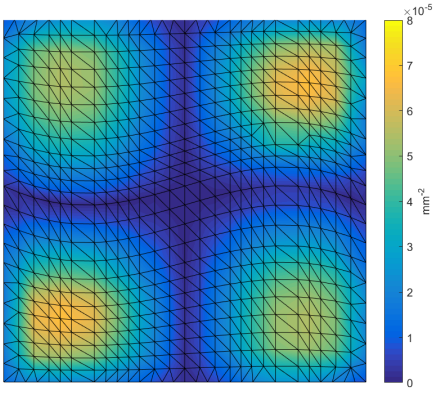
$$\begin{cases} k_j &= \sqrt{\frac{A_{T_j}}{a_{t_j}}} \\ \bar{k} &= \frac{I_{3D}}{I_{2D}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \sqrt{\frac{A_{T_j}}{a_{t_j}}} \end{cases} \tag{3.19}$$

Pour toute la surface maillée :

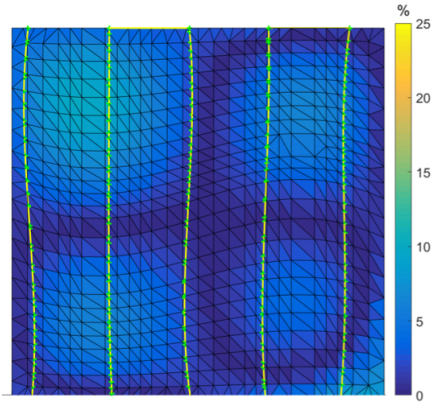
$$\overline{e_{LSCM}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} e^j_{LSCM} \tag{3.20}$$



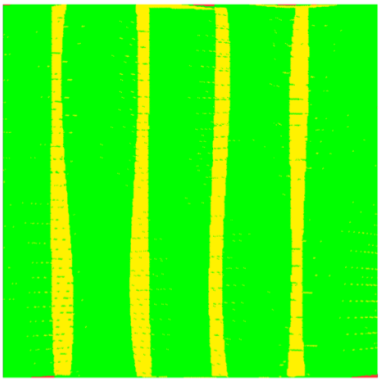
(a) Representation de la surface



(b) Évolution de la courbure de Gauss



(c) Évolution de l'erreur LSCM $\overline{e_{LSCM}} = 3.14\%$



(d) Simulation du recouvrement (Jaune)

Figure 3.22: Erreur LSCM de surface à haute variation de courbure

L'erreur LSCM est calculée pour deux exemples de surfaces présentant des variations de niveau de courbure différentes. Avec une surface à faible variation de cour-

bure (valeur maximum de courbure de Gauss de $1,87.10^{-5}mm^{-2}$) (Figure 3.21(b)), l'intervalle entre deux passes consécutives est presque le même pour toutes les passes (Figure 3.21(d)).

Dans le cas d'une surface à haute variation de courbure (valeur maximum de courbure de Gauss de $6,77.10^{-5}mm^{-2}$) (Figure 3.22(b)), l'intervalle ne peut pas être maintenu uniformément dans certaines zones de la surface (Figure 3.22(d)). L'erreur LSCM correspondant à la surface de courbure élevée (3,14 %) est supérieure à celle de la surface à faible courbure (1,04 %). Il est ainsi possible de prédire si la méthode fournira ou non des zones de recouvrement uniformes en évaluant l'erreur LSCM.

Malgré sa limitation dans le cas de surfaces à haute variation de courbure, ISOvScan peut contrôler les zones de recouvrement dans de nombreux cas en combinant en conséquence l'intervalle entre les passes et la largeur du laser du capteur. Néanmoins, il convient de noter que notre méthode est plus efficace lorsque la longueur d'onde des défauts géométriques est supérieure à la largeur du laser. Sinon, le positionnement de la ligne laser sur la surface devient non cohérent et peut causer des problèmes de visibilité ou entraver le contrôle du recouvrement car la visibilité n'est analysée que pour les points pilotés, et non pour toute la ligne laser.

3.6 Application sur une surface de test

Afin de valider la méthode ISOvScan, une application est proposée à l'aide d'un système de numérisation constitué d'un capteur plan Zephyr II [1], monté sur un robot industriel Mitsubishi 6 axes et un tracking optique AirTrack Robot de Kréon (Figure 3.23). Pour éviter les écarts de la position effective du laser par rapport à la position nominale lors de l'exécution de la trajectoire, le système de tracking optique fournit une mesure indépendante des positions du robot. En effet, ce système de tracking externe est constitué d'une cible fixée au capteur (Figure 3.24(a)) et d'un tracker optique (Figure 3.24(b)) qui peut suivre les mouvements de la cible. Une pièce de test sous forme d'une surface de dimension de 290x290 mm^2 proposée pour cette application est représentée sur la figure 3.25.

1. www.kreon3d.com

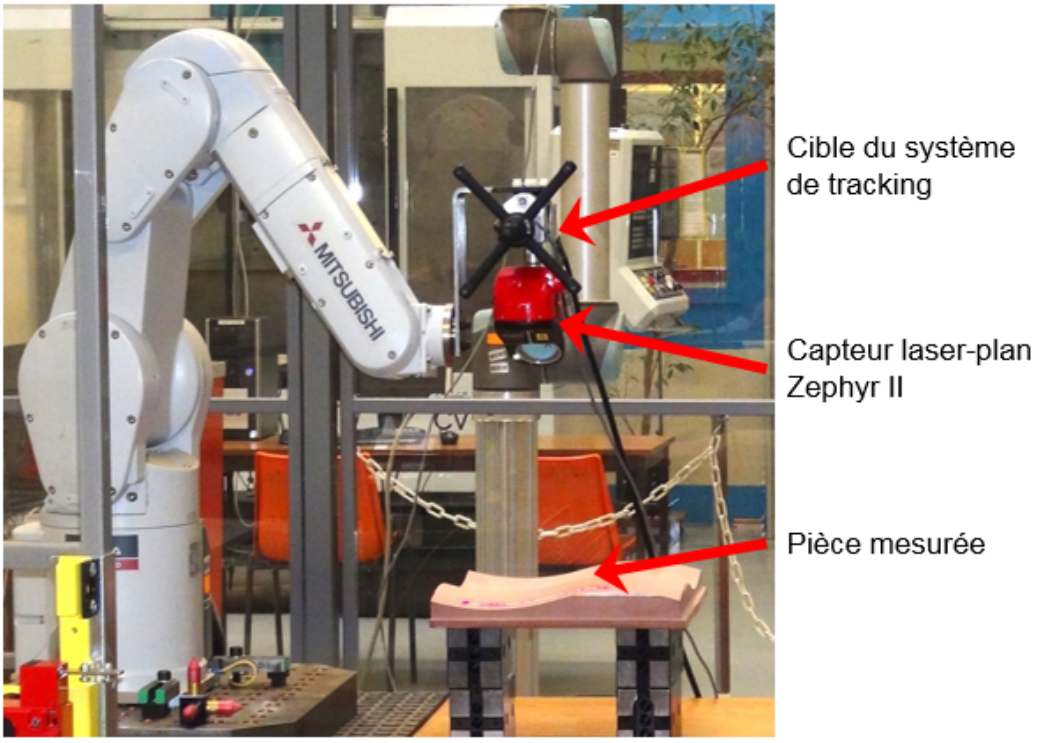


Figure 3.23: Système de numérisation

(a) La cible (b) Tracker optique

Figure 3.24: Système de tracking externe (www.kreon3d.com)

La méthode ISOvScan nécessite la connaissance de paramètres du capteur : les dimensions du champ de vision et plage admissible des distances de numérisation qui déterminent la qualité de la numérisation, identifiés par qualification.

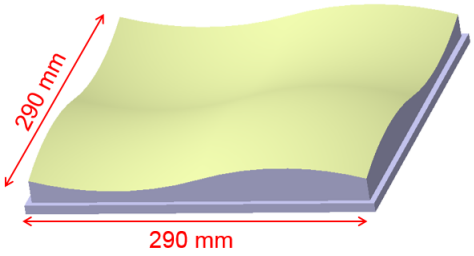


Figure 3.25: Modèle CAO de la pièce test

3.6.1 Paramètres du capteur

Comme vu au chapitre 2 (cf. section 2.4.1), nous devons évaluer la plage de distances de numérisation assurant une bonne qualité de numérisation. Le FOV est représenté par les lignes en pointillés rouges sur la figure (Figure 3.26). La valeur de H donnée par le résultat expérimental est de 115 mm. L'évolution du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation affichée sur la figure 3.26 est obtenue en changeant la distance de numérisation tous les 15 mm du haut vers le bas du FOV. La figure montre une augmentation significative du bruit à la position basse et à la position haute par rapport à la position médiane. La plage de distances de numérisation admissibles est établie en considérant un seuil pour le bruit. Pour notre expérience, nous fixons ce seuil à 0.015 mm, ce qui conduit à la plage des distances de numérisation admissibles de [35 mm ; 79 mm]. Si la surface numérisée appartient à cette plage, cela garantit une numérisation avec un bruit inférieur à δ_{ad} = 0.015 mm. En outre, la figure souligne que la valeur minimale du bruit correspond à la distance de numérisation d^*=60 mm du haut du FOV, donnant la largeur de la ligne laser L_{opt}= 77 mm. Cette distance de numérisation est donc adoptée pour l'application.

Le choix du taux de recouvrement doit résulter d'un compromis entre le nombre de passes et le bruit de numérisation. Les expérimentations pour choisir le taux de recouvrement sont effectuées en mesurant un plan de référence avec différents taux de recouvrement (Figure 3.27). Les résultats sur la figure 3.28 mettent en évidence que le taux de recouvrement devrait être inférieur à 25% pour optimiser le nombre de passes. Les expérimentations révèlent également que le bruit de numérisation

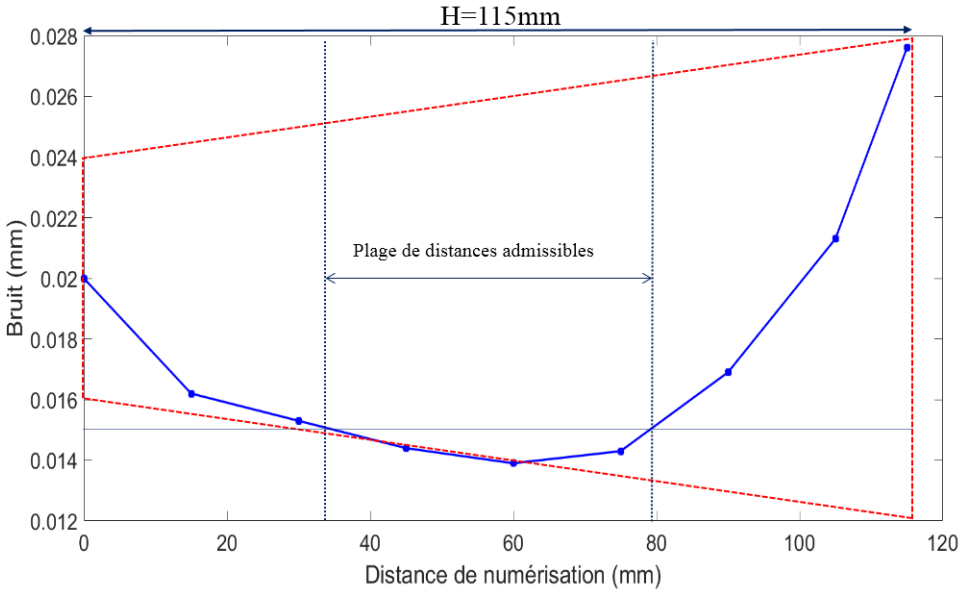


Figure 3.26: Bruit de numérisation en fonction de distance de numérisation

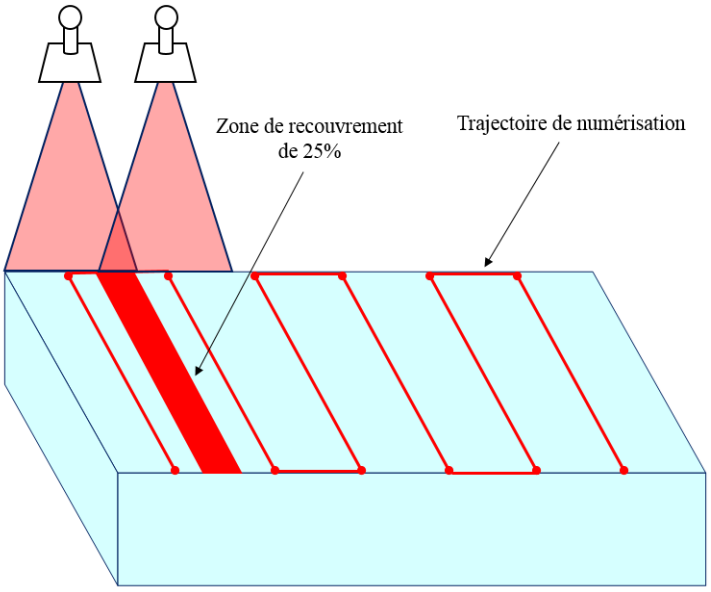


Figure 3.27: Mesure d'un plan de référence avec le taux de recouvrement de 25%

augmente fortement lorsque le recouvrement est supérieur à 15% (Figure 3.29). Par conséquent, la valeur sélectionnée pour le recouvrement est de 15%, ce qui impose $I_{3D} = 65$ mm (voir l'équation 3.10) en considérant $L_{opt} = 77$ mm.

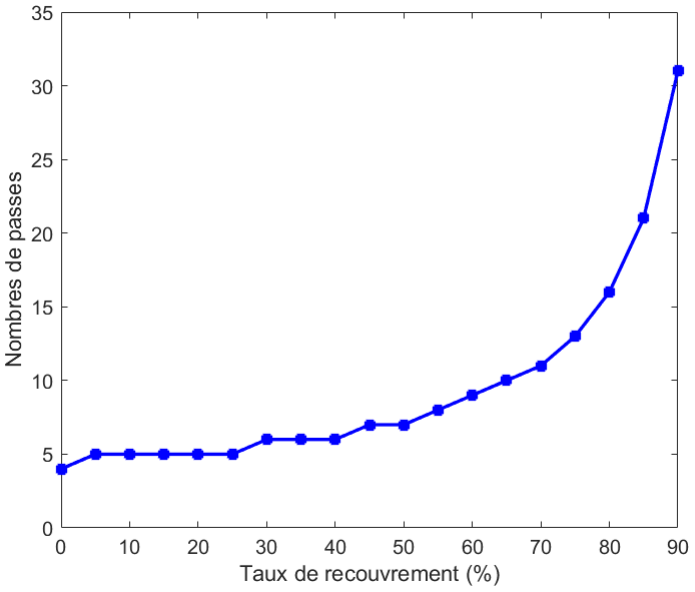


Figure 3.28: Nombre de passes en fonction de taux de recouvrement

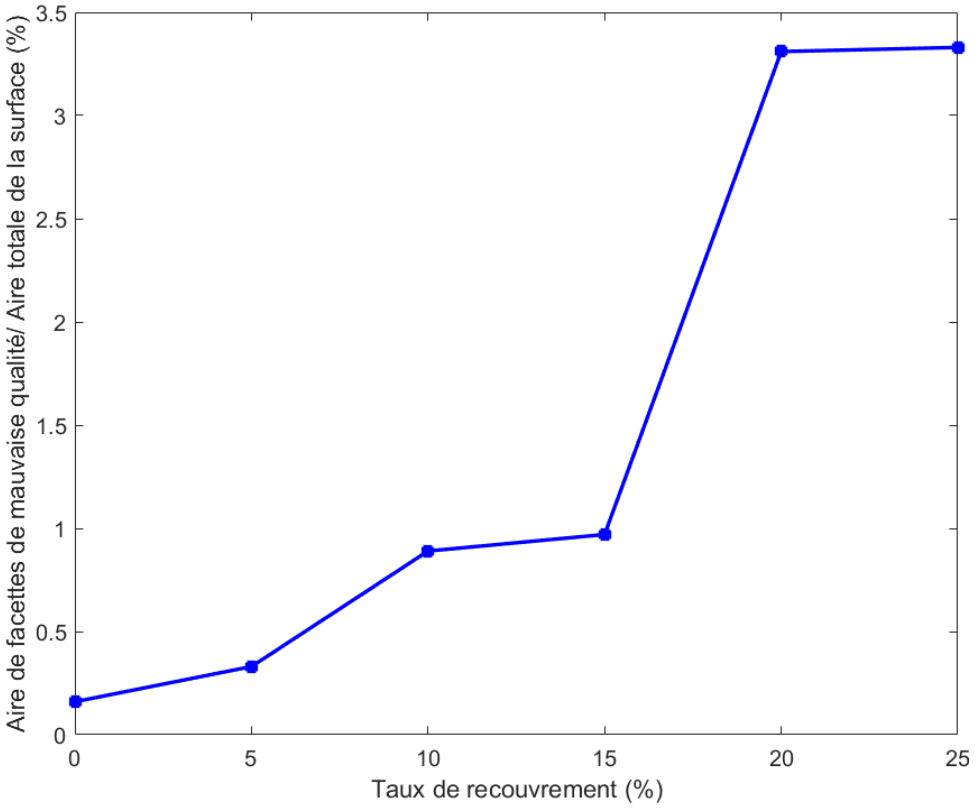
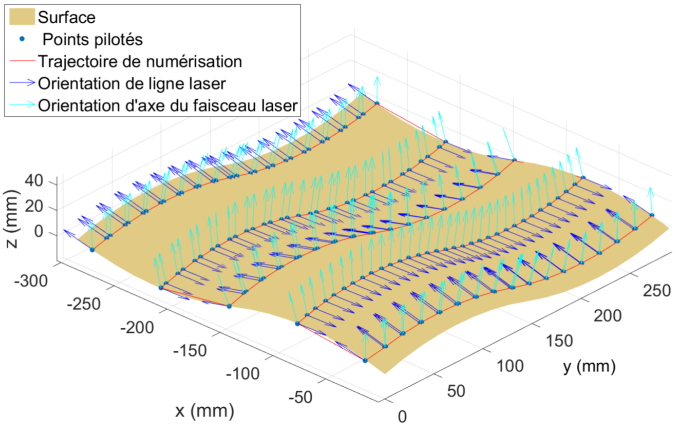


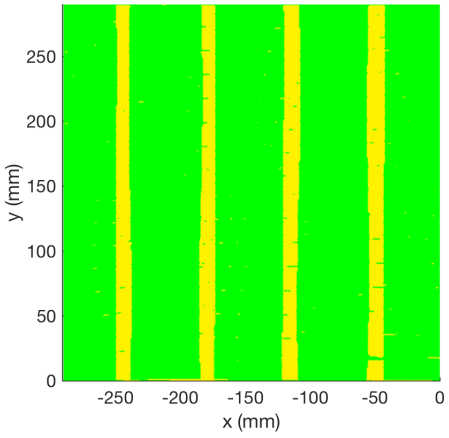
Figure 3.29: Évolution de bruit en fonction de taux de recouvrement

3.6.2 Application

La méthode proposée est appliquée à la pièce définie sur la figure 3.25 en utilisant les paramètres définis dans la section 3.6.1. La trajectoire de numérisation calculée est reportée sur la figure 3.30(a). Cette trajectoire de numérisation est d'abord évaluée par le simulateur. La simulation montre un résultat de numérisation attendu pour lequel la plupart des facettes sur la surface sont numérisées avec une bonne qualité de numérisation (en vert) et la dimension des zones de recouvrement entre les passes consécutives est relativement constante (en jaune) 3.30(b).



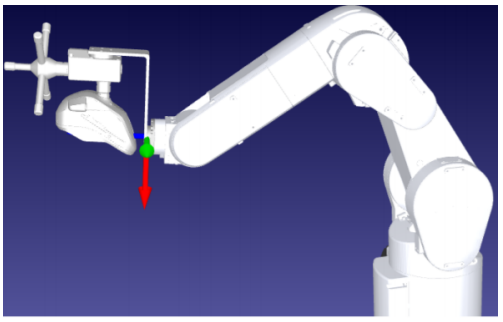
(a) Trajectoire de numérisation générée par ISOvScan



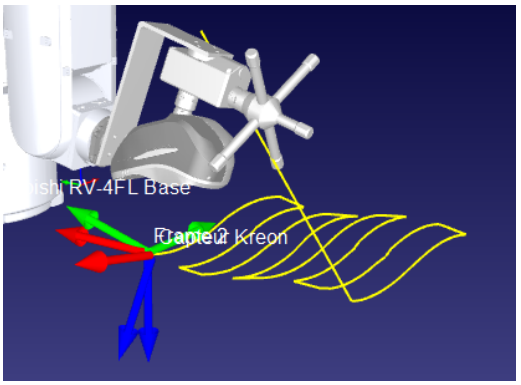
(b) Simulation du recouvrement [Phan et al., 2017]

Figure 3.30: Trajectoire de numérisation calculée et simulation de numérisation

La trajectoire de numérisation calculée est transmise au robot industriel qui supporte le capteur. Avant l'exécution, les mouvements du robot sont simulés à l'aide



(a) Simulation du montage sous RoboDK



(b) Simulation de la trajectoire sous RoboDK

Figure 3.31: Simulation sous RoboDK©

de RoboDK ©(Figure 3.31(a)). Cette simulation nous permet de vérifier l'absence de collisions ainsi que la capacité articulaire du robot à suivre la trajectoire souhaitée. Grâce à la simulation, nous pouvons proposer le montage du capteur sur le robot de manière à diminuer les mouvements de l'ensemble du robot et conserver la cible visible par le tracker optique tout le long de l'exécution de la trajectoire (Figure 3.31).

3.6.3 Résultats et discussion

La numérisation donne un ensemble de plus de $1,6.10^6$ points. Après le recalage du nuage de points sur le modèle CAO, une cartographie des écarts géométriques est obtenue (Figure 3.32). Les deux étapes (recalage et calcul de l'écart géométrique) sont effectuées en utilisant le logiciel open source CloudCompare [2]. La cartographie présentée sur la figure 3.32 montre clairement que les principaux écarts sont situés en bordure de la surface, ce qui est probablement dû aux conditions de mesure. Certains trous de numérisation sont également présents sur le nuage de points en raison de l'émission instable du faisceau laser pendant le processus de numérisation (le laser clignote pour des raisons technologiques inexpliquées). Puisque les points pilotés dans l'espace $2D$ sont générés à partir de l'intersection entre les plans équidistants et les facettes, la trajectoire de numérisation est définie par un ensemble de points,

2. www.cloudcompare.org

dont certains sont proches, et d'autre espacés (cf. figure 3.15). Par conséquent, il peut y avoir un changement brusque de l'orientation du capteur lorsque le capteur se déplace d'un point à un autre, ce qui peut provoquer un bruit indésirable.

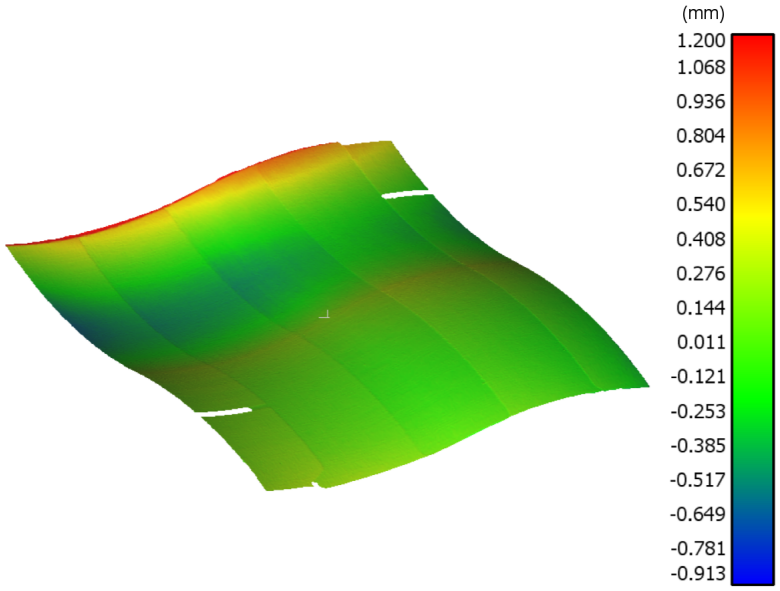
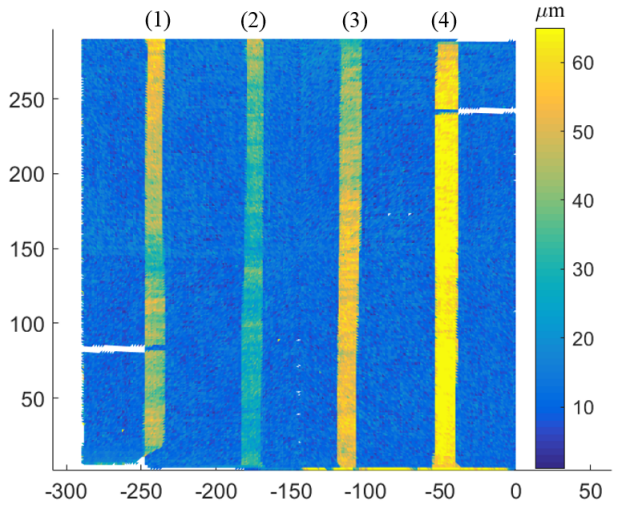


Figure 3.32: Écarts géométriques entre le nuage de points et son modèle CAO

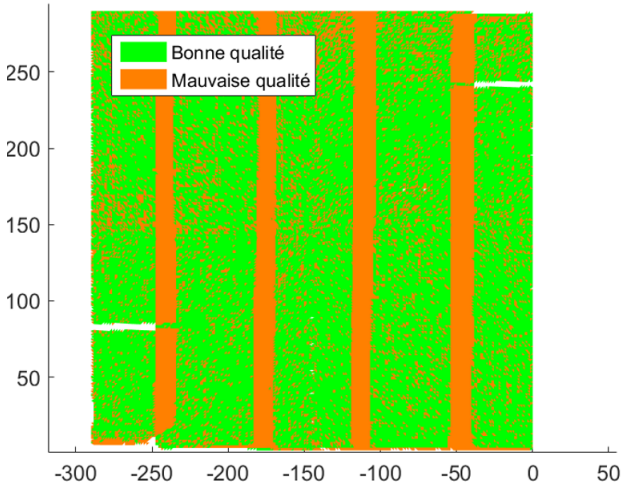
L'évolution du bruit de numérisation réel est proposée à la figure 3.33(a). Comme attendu, les résultats montrent que le bruit de numérisation dans les zones de recouvrement (zones jaunes) est plus élevé que pour les zones sans recouvrement.

De plus, puisque nous avons considéré que la valeur du bruit $\delta_{ad} = 0,015$ mm était le seuil de qualité, les données numérisées peuvent être évaluées en termes de qualité (Figure 3.33(b)). Si le bruit est supérieur au seuil $\delta_{ad} = 0,015$ mm, la facette est étiquetée comme étant numérisée avec une mauvaise qualité, et sa couleur est orange. Inversement, si le bruit est inférieur à δ_{ad}, la facette est étiquetée comme étant bien numérisée et sa couleur est verte. Comme prévu, les facettes oranges, causées par la mauvaise qualité de numérisation, sont situées dans des zones de recouvrement. Le résultat de la numérisation réelle dans la figure 3.33(a) présente une bonne similarité avec les résultats obtenus par simulation de la figure 3.30(b). Les zones de recouvrement sont clairement des zones de mauvaise qualité de numérisation.

Il est intéressant de remarquer que le bruit de numérisation n'est pas uniforme



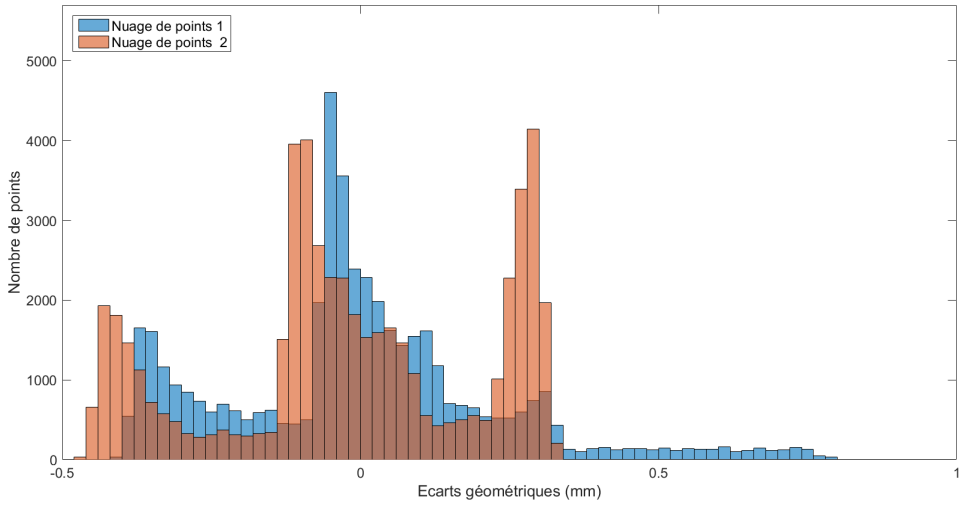
(a) Évolution du bruit de numérisation à la surface



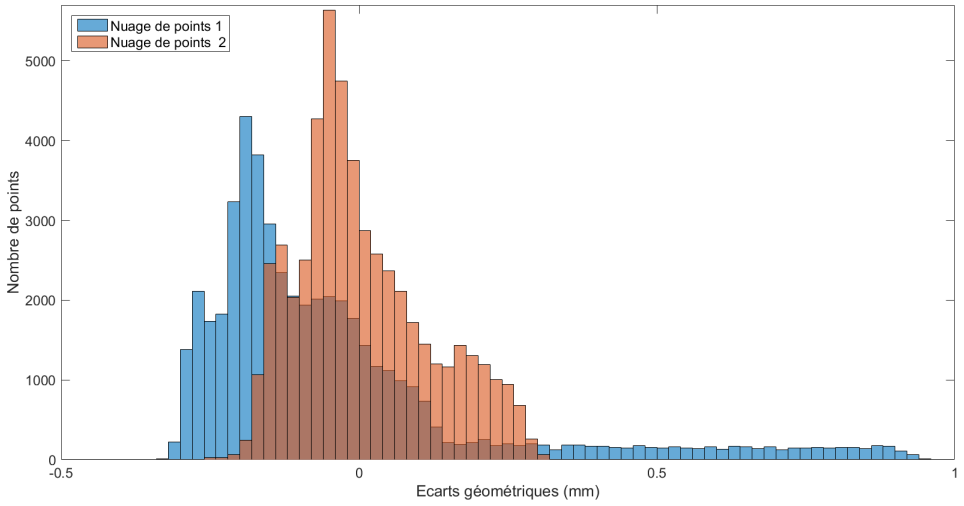
(b) Bruit de numérisation en termes de qualité

Figure 3.33: Bruit de numérisation et qualité

pour toutes les zones de recouvrement. Par exemple, le bruit de numérisation dans la zone (4) est le plus élevé. Comme précédemment évoqué, il est très probable que les changements d'orientation du capteur entre les passes consécutives ont conduit à des bruits de numérisation différents pour les différentes zones de recouvrement. Pour fournir une explication de ce problème, nous proposons d'analyser la distribution de l'écart géométrique dans les zones de recouvrement. Le nuage de points acquis dans une zone de recouvrement résulte de la combinaison de deux nuages de points acquis par deux passes de numérisation consécutives. La zone (2) et la zone (4) de la figure



(a) Zone de recouvrement (2)



(b) Zone de recouvrement (4)

Figure 3.34: Évaluation de la qualité de numérisation dans les zones de recouvrement

3.33(a) présentent les zones qui ont été analysées. La zone (2) correspond à la zone de recouvrement avec un bruit le plus faible et la zone (4) présente la zone avec un bruit le plus élevé.

Les résultats affichés sur la figure 3.34(a) font ressortir que la dispersion des écarts géométriques dans la zone de recouvrement (2) est inférieure à celle de la zone de recouvrement (4) de la figure 3.34(b). L'analyse confirme l'impact de la zone de recouvrement sur la qualité de numérisation lorsque les orientations du cap-

teur varient. Le bruit dans la zone de recouvrement (2) est de $\delta = 0,030$ mm, alors qu'il est égal à $\delta = 0,061$ mm dans la zone (4). Différents phénomènes peuvent expliquer cette augmentation de la dispersion. La première raison est liée à l'erreur de suivi du capteur du système de tracking lorsqu'il passe d'une position à une autre. La seconde peut être liée à la position de la surface mesurée dans le FOV. En effet, bien que la distance de numérisation soit constante, la partie visible n'est pas nécessairement située au milieu du FOV, et peut être à la frontière du FOV ce qui conduit à une dispersion plus importante. Enfin, comme déjà discuté, les variations d'orientations affectent clairement la qualité de numérisation. Ce résultat souligne l'importance du contrôle du recouvrement dans la génération de la trajectoire de numérisation. En effet, le bruit de numérisation dans les zones de recouvrement est toujours plus important que dans les zones sans recouvrement. La qualité de numérisation et le temps de numérisation peuvent être contrôlés en gardant une distance de numérisation constante et en exécutant un contrôle continu de l'orientation du capteur pour tous les points pilotés de la trajectoire de numérisation. Cependant, cette expérience valide l'efficacité de la méthode ISOvScan pour la planification de la trajectoire de numérisation avec le contrôle du recouvrement. La largeur de zone de recouvrement est relativement constante. La qualité de numérisation dans les zones de non-recouvrement est contrôlée en gérant la distance de numérisation constante et l'orientation du capteur perpendiculaire à la surface.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle méthode de planification de la trajectoire de numérisation, ISOvScan, pour l'inspection automatisée de pièces fabriquées. L'originalité de la méthode est le contrôle du recouvrement entre deux passes de numérisation consécutives. En fait, une trajectoire de numérisation avec le contrôle du recouvrement peut contrôler l'orientation et le taux de couverture du faisceau laser. Par conséquent, la qualité de numérisation, ainsi que le temps de numérisation, peuvent être gérés. La méthode repose sur l'utilisation de la transformation conforme au sens des moindres carrés (LSCM) pour transformer la surface

3D en un espace 2D. Le calcul de la trajectoire de numérisation peut être effectué plus simplement dans l'espace 2D. Les avantages de la méthode ISOvScan ont été évalués par des résultats obtenus à partir d'une expérimentation réelle à l'aide d'un robot industriel équipé d'un capteur laser Zephyr. Néanmoins, la méthode a trois limitations principales. La première limite est que la transformation entre l'espace 3D et l'espace 2D ne fonctionne que pour les surfaces dépliables. La deuxième concerne la géométrie de la surface en particulier avec la surface à forte variation de courbure pour lesquelles le contrôle du recouvrement s'avère difficile à cause de la gestion de la transformation conforme. La troisième limite est liée à la manière dont les points pilotés sont calculés dans l'espace 2D. Comme les points pilotés sont générés à partir de l'intersection entre les plans équidistants et les facettes, ils ne sont pas régulièrement espacés, ce qui peut provoquer des changements brusques d'orientation du capteur lorsque le capteur se déplace d'un point à un autre. La solution à ce problème pourrait être d'effectuer un lissage de la trajectoire de numérisation en utilisant une approximation B-spline comme proposé dans le chapitre 5.

À partir du modèle CAO de la pièce, une trajectoire de numérisation en respectant les contraintes de numérisation a été générée par la méthode ISOvScan (Figure 3.35). Cette trajectoire a été validée ensuite par l'exécution sur un robot industriel 6 axes.

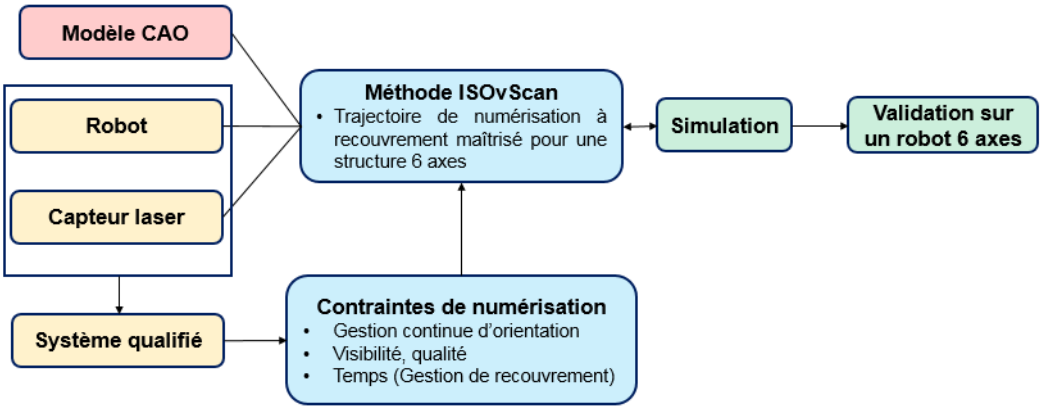


Figure 3.35: Validation de la méthode ISOvScan

Pour la mesure in-situ, lorsque le capteur prend la place de l'outil dans la broche

de la machine-outil, les déplacements du capteur sont réalisés grâce à une structure à 5 degrés de liberté plus la rotation de la broche. La trajectoire précédemment calculée par ISOvScan pour une structure à 6 degrés de liberté doit être adaptée à une machine-outil 5-axes. Le chapitre suivant présente la méthode d'adaptation de la trajectoire ISOvScan pour une MOCN 5 axes.

Chapitre

4

Trajectoire de numérisation pour MOCN 5-axes

4.1 Introduction

Comme nous l'avons montré au chapitre 3, la méthode ISOvScan est une méthode qui s'est avérée efficace pour la planification de trajectoire de numérisation du capteur à recouvrement contrôlé sur des robots industriels à 6 degrés de liberté. Pour la mesure in-situ, lorsque le capteur prend la place de l'outil dans la broche de la machine-outil, les déplacements du capteur sont réalisés grâce à une structure à 5 degrés de liberté plus la rotation de la broche. La trajectoire précédemment calculée pour une structure à 6 degrés de liberté doit être adaptée à une machine-outil 5-axes. En effet, la trajectoire $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ exprimée dans le repère de la pièce sous la forme d'un ensemble de coordonnées $(X, Y, Z, I, J, K, I^*, J^*, K^*)$ doit être exprimée dans le repère de la machine-outil grâce à la Transformation Géométrique Inverse (TGI). Dans le cas d'une machine-outil RRTTT, la TGI conduit à (X, Y, Z, A, C, W) dans l'espace articulaire où A et C sont les angles classiques, et où W permet l'indexation de la broche. La principale difficulté que nous pouvons souligner ici est que l'indexation de la broche pour la plupart des machines outils avec un directeur de commande numérique industriel ne peut pas être contrôlée en continu entre deux configurations de capteur. Il est donc nécessaire de fixer l'indexation de la broche à une valeur constante W_{cst} pour toutes les configurations du capteur. La trajectoire initiale donc doit être modifiée. Mais cette modification ne pourra pas être réalisée tout en respectant l'ensemble des critères de qualité et de performance utilisés par la méthode ISOvScan. Ainsi, nous proposons dans ce chapitre deux façons de modifier la trajectoire : la priorité est donnée soit au temps de mesure, par le contrôle du recouvrement entre deux trajets consécutifs , soit à la qualité par le contrôle de l'orientation du capteur. La démarche de génération de trajectoire de numérisation sur MOCN 5-axes adaptée de la trajectoire calculée pour robot 6 axes est résumée sur la figure 4.1. La trajectoire calculée par ISOvScan est modifiée selon l'une ou l'autre des méthodes choisies avant la TGI puis l'exécution dans la machine.

La première partie de ce chapitre est consacrée au calcul de trajectoire de numérisation sur une machine 5-axes. Partant d'une trajectoire calculée par la méthode ISOvScan pour un robot 6 axes la seconde partie du chapitre est dédiée à la présen-

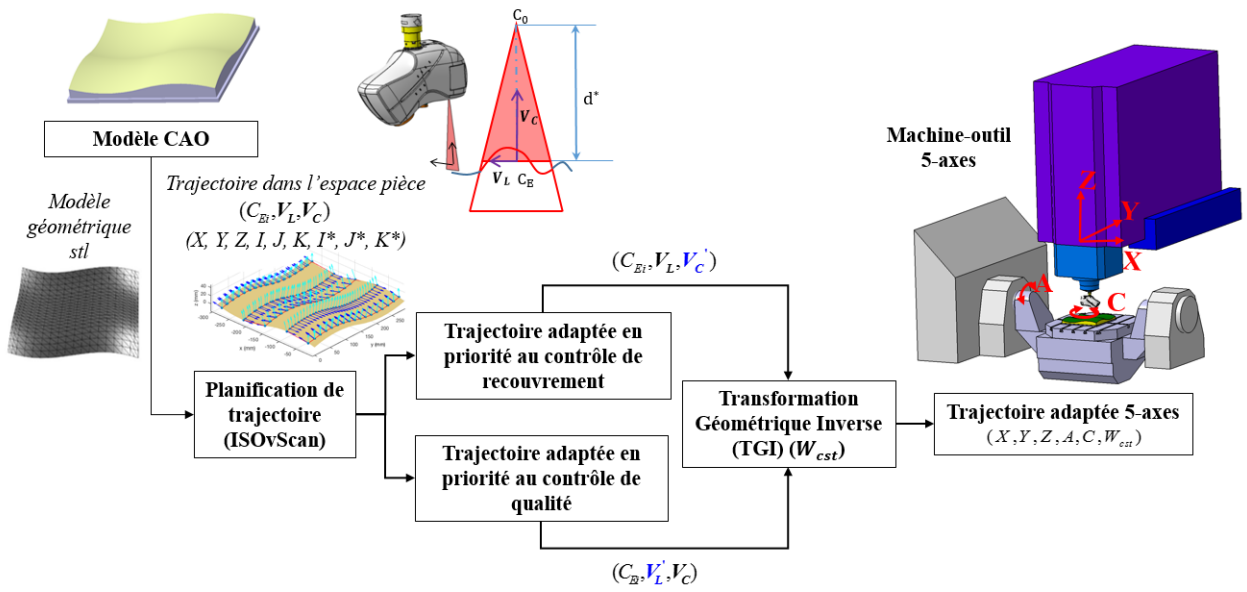


Figure 4.1: Adaptation de la trajectoire de numérisation pour une machine 5-axes

tation de la méthode d'adaptation de cette trajectoire pour une MOCN 5 axes.

4.2 Trajectoire de numérisation pour MOCN 5-axes

La trajectoire du capteur calculée de façon à répondre à un ensemble de contraintes est en général définie comme un ensemble de configurations du capteur (positions et orientations) exprimé dans le repère de la pièce. Dans ce paragraphe, nous présentons le lien entre la configuration du capteur par rapport à la pièce exprimée dans le repère de la pièce et les configurations articulaires de la machine correspondantes.

Tout d'abord, nous présentons la structure de la machine outil utilisée. La Mikron UCP 710 est un centre de fraisage 5-axes avec un contrôleur numérique industriel Siemens 840D. L'architecture de cette machine du type CAXYZ (RRTTT) est constituée d'un plateau tournant autour de l'axe C et d'un berceau en rotation autour de l'axe A. La modélisation géométrique de la Mikron, ainsi que les différents repères associés sont représentés sur la figure 4.2. La liste suivante explicite chacun des repères.

- Le repère de la broche $(O_{br}, x_{br}, y_{br}, z_{br})$ est lié à la broche,
- Le repère du capteur (O_c, x_c, y_c, z_c) est lié au capteur,

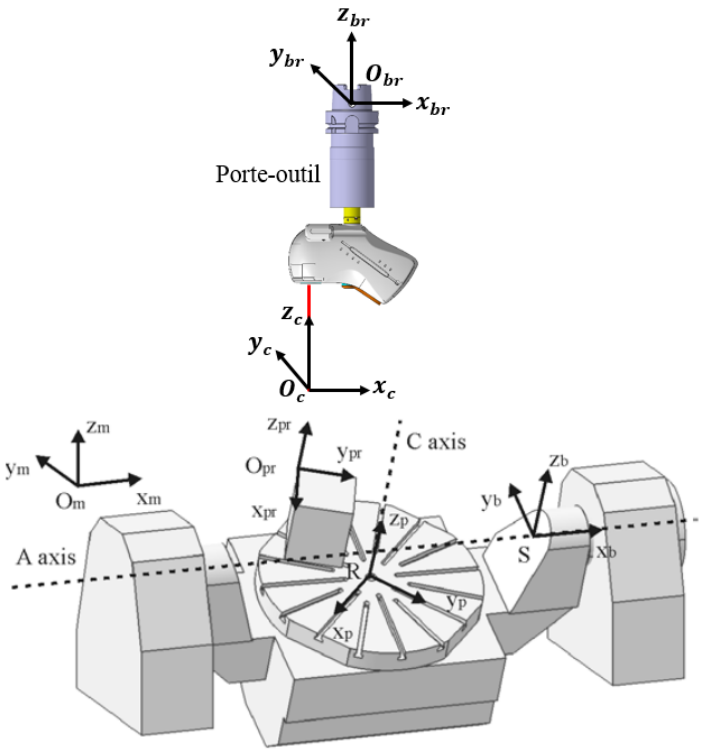


Figure 4.2: Modélisation de la Mikron et repères associés [Lavernhe et al., 2007]

- Le repère de la machine (O_m, x_m, y_m, z_m) est lié à la structure de la machine ; ses axes sont parallèles aux axes XYZ ; z_m est parallèle à l'axe de l'outil,

- Le repère (S, x_b, y_b, z_b) est lié au berceau ; x_b est parallèle à x_m, S est situé sur l'axe A,

- Le repère (R, x_p, y_p, z_p) est lié au plateau ; z_p est parallèle à z_b, R est situé sur l'intersection entre l'axe C et la face supérieure du plateau,

- Le repère de programmation ou le repère de la pièce $(O_{pr}, x_{pr}, y_{pr}, z_{pr})$ est fixe par rapport à la pièce, et représente le repère utilisé pour la planification de trajectoire de numérisation.

Pour passer d'un repère à l'autre, nous définissons la matrice de passage qui convertit un vecteur exprimé dans un repère, dans un autre repère :

$$P_{cbr} = \begin{bmatrix} cos(W+W_0) & sin(W+W_0) & 0 & x_{O_cO_{br}} \\ -sin(W+W_0) & cos(W+W_0) & 0 & y_{O_cO_{br}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{O_cO_{br}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{4.1}$$

P_{cbr} est la matrice de passage entre le repère du capteur et le repère de la broche où W_0, l'indexation originale de la broche autour l'axe z dans le repère de la machine et W, est l'indexation de la broche autour l'axe z dans le repère du capteur. Pour simplifier les expressions et le calcul, nous choisissons $W_0 = 0$. L'équation 4.1 devient :

$$P_{cbr} = \begin{bmatrix} cos(W) & sin(W) & 0 & x_{O_cO_{br}} \\ -sin(W) & cos(W) & 0 & y_{O_cO_{br}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{O_cO_{br}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{4.2}$$

$$P_{brm} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{O_{br}O_m} \\ 0 & 1 & 0 & y_{O_{br}O_m} \\ 0 & 0 & 1 & z_{O_{br}O_m} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; P_{mb} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{O_mO_S} \\ 0 & cos(A) & sin(A) & y_{O_mO_S} \\ 0 & -sin(A) & cos(A) & z_{O_mO_S} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

P_{brm} est la matrice de passage entre le repère de la broche et le repère de la machine ; P_{mb} est la matrice de passage entre le repère de la machine et le repère du berceau.

$$P_{bp} = \begin{bmatrix} cos(C) & sin(C) & 0 & x_{SR} \\ -sin(C) & cos(C) & 0 & y_{SR} \\ 0 & 0 & 1 & z_{SR} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; P_{ppr} = \begin{bmatrix} a & d & g & x_{RO_{br}} \\ b & e & h & y_{RO_{br}} \\ c & f & i & z_{RO_{br}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

P_{bp} est la matrice de passage entre le repère du berceau et le repère du plateau tournant. P_{ppr} est définie comme la matrice de passage entre le repère du plateau tournant et le repère de la pièce où les paramètres a, b, c, d, e, f, g, h et i définissent l'orientation de la pièce sur le plateau.

La matrice de passage M du repère du capteur au repère de la pièce est alors définie comme suit :

$$M = P_{ppr}^{-1}.P_{bp}^{-1}.P_{mb}^{-1}.P_{brm}^{-1}.P_{cbr}^{-1} \tag{4.5}$$

La matrice M^{-1} est définie comme la matrice de passage du repère de la pièce au repère du capteur :

$$M^{-1} = P_{cbr}.P_{brm}.P_{mb}.P_{bp}.P_{ppr} \tag{4.6}$$

La Transformation Géométrique Directe (TGD) consiste à exprimer la configuration du capteur $(X, Y, Z, I, J, K, I^*, J^*, K^*)$ à partir des valeurs de position des axes de la machine (X_m, Y_m, Z_m, A, C, W). Le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ (I^*, J^*, K^*) s'exprime par l'équation 4.7 :

$$\begin{bmatrix} I^* \\ J^* \\ K^* \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} = M. \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} \tag{4.7}$$

$$P_{ppr}. \begin{bmatrix} I^* \\ J^* \\ K^* \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} = P_{bp}^{-1}.P_{mb}^{-1}.P_{brm}^{-1}.P_{cbr}^{-1}. \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} . \tag{4.8}$$

$$\begin{cases} aI^* + dJ^* + gK^* = sin(C).sin(A) \\ bI^* + eJ^* + hK^* = -cos(C).sin(A) \\ cI^* + fJ^* + iK^* = cos(A) \end{cases} \tag{4.9}$$

Dans ce cas, le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ (I^*, J^*, K^*) dans le repère de la pièce est recalculé en prenant en compte les paramètres définissant l'orientation de la pièce sur le plateau comme suit :

$$\overrightarrow{V_{C_R}} = \begin{cases} I_n^* = aI^* + dJ^* + gK^* \\ J_n^* = bI^* + eJ^* + hK^* \\ K_n^* = cI^* + fJ^* + iK^* \end{cases} \tag{4.10}$$

Le vecteur directeur de la ligne laser $\overrightarrow{V_L}$ dans le repère pièce est donné par l'équation :

$$\begin{bmatrix} I \\ J \\ K \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} = M. \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} \tag{4.11}$$

$$\begin{cases} aI + dJ + gK = cos(C).cos(W) - cos(A).sin(C).sin(W) \\ bI + eJ + hK = sin(C).cos(W) + cos(A).cos(C).sin(W) \\ cI + fJ + iK = sin(A).sin(W) \end{cases} \tag{4.12}$$

De la même façon, le vecteur directeur de la ligne laser $\overrightarrow{V_L}$ (I, J, K) dans le repère de la pièce est recalculé en prenant en compte les paramètres définissant l'orientation de la pièce sur le plateau comme suit :

$$\overrightarrow{V_{L_R}} = \begin{cases} I_n = aI + dJ + gK \\ J_n = bI + eJ + hK \\ K_n = cI + fJ + iK \end{cases} \tag{4.13}$$

Les équations 4.10 et 4.13 sont utilisées pour identifier l'orientation du capteur dans le repère pièce par rapport au repère plateau. En remplaçant les vecteurs $\overrightarrow{V_L}$ et $\overrightarrow{V_C}$ par les vecteurs $\overrightarrow{V_{L_R}}$ et $\overrightarrow{V_{C_R}}$, la démarche de calcul reste identique au cas traité dans la suite quand nous considérons que les axes du repère de la pièce et du repère du plateau sont parallèles ($a = e = i = 1, b = c = d = f = g = h = 0$). Dans ce cas, la matrice P_{ppr} est définie comme suit :

$$P_{ppr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{RO_{br}} \\ 0 & 1 & 0 & y_{RO_{br}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{RO_{br}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

Les équations 4.9 et 4.12 se réduisent aux systèmes suivants :

$$\begin{cases} I^* = sin(C).sin(A) \\ J^* = -cos(C).sin(A) \\ K^* = cos(A) \end{cases} \tag{4.15}$$

$$\begin{cases} I = cos(C).cos(W) - cos(A).sin(C).sin(W) \\ J = sin(C).cos(W) + cos(A).cos(C).sin(W) \\ K = sin(A).sin(W) \end{cases} \tag{4.16}$$

La position du point piloté dans le repère pièce est donnée par l'équation :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} = M. \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} \tag{4.17}$$

Pour exécuter la mesure dans la machine-outil 5-axes, la trajectoire $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ exprimée dans le repère de la pièce sous la forme d'un ensemble de coordonnées $(X, Y, Z, I, J, K, I^*, J^*, K^*)$ doit être exprimée dans le repère de la machine-outil. Cette transformation est réalisée grâce à la Transformation Géométrique Inverse (TGI). L'orientation de l'axe du faisceau laser du capteur est exprimée dans le repère capteur par l'équation 4.18 :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} = M^{-1}. \begin{bmatrix} I^* \\ J^* \\ K^* \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} \tag{4.18}$$

Dans le cas où le repère de la pièce est identique au repère du plateau, l'équation 4.18 se réduit au système suivant, où A et C sont les inconnues :

$$\begin{cases} I^* = sin(C).sin(A) \\ J^* = -cos(C).sin(A) \\ K^* = cos(A) \end{cases} \tag{4.19}$$

Les solutions du système 4.19 sont résumées dans le tableau 4.1 en fonction des valeurs de (I^*, J^*, K^*).

La rotation de l'axe A est limitée à la plage angulaire $[-30°, +120°]$. Il existe donc des solutions qui ne sont pas physiquement réalisables. Nous pouvons donc résumer

Tableau 4.1: Domaines de solutions des angles A,C

	$I^* < 0$	$I^* = 0$	$I^* > 0$
$J^* < 0$	$A_1 = acos(K^*)$ $C_1 = -atan(I^*/J^*)$ $A_2 = -acos(K^*)$ $C_2 = -atan(I^*/J^*) + \pi$		
$J^* = 0$	$A_1 = acos(K^*)$ $C_1 = -\pi/2$ $A_2 = -acos(K^*)$ $C_2 = \pi/2$	$A = 0$ C non défini	$A_1 = acos(K^*)$ $C_1 = \pi/2$ $A_2 = -acos(K^*)$ $C_2 = -\pi/2$
$J^* > 0$	$A_1 = acos(K^*)$ $C_1 = -atan(I^*/J^*) + \pi$ $A_2 = -acos(K^*)$ $C_2 = -atan(I^*/J^*)$		

toutes les solutions possibles selon les valeurs de K^* (Tableau 4.2).

Tableau 4.2: Solutions en fonction de K^*

Valeur de K^*	[-1, -0.5[	[-0.5, 0.866[	[0.866,1[	1
Nombre de solutions	0	1	2	∞
Solutions	$\varnothing$	(A_1, C_1)	(A_1, C_1) où (A_2, C_2)	A=0° et C quelconque

La valeur de l'angle de rotation de broche W est déterminée à partir de $\overrightarrow{V_L}$ (I, J, K) et des angles A, C dans l'équation 4.21 :

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} = M^{-1}.\begin{bmatrix} I \\ J \\ K \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} \tag{4.20}$$

$$\begin{cases} I = cos(C).cos(W) - cos(A).sin(C).sin(W) \\ J = sin(C).cos(W) + cos(A).cos(C).sin(W) \\ K = sin(A).sin(W) \end{cases} \tag{4.21}$$

Les solutions possibles de l'équation 4.21 sont : $W_1 = asin(K/sin(A))$ ou $W_2 = \pi - asin(K/sin(A))$.

L'indexation de broche W joue un rôle majeur dans l'orientation de la ligne de numérisation par rapport à la surface à mesurer. Néanmoins, comme mentionné précédemment, l'indexation de la broche ne peut pas être contrôlée en continu entre deux configurations de capteur successives. La trajectoire du capteur doit être transformée en $(X_m, Y_m, Z_m, A, C, W_{cst})$ où W_{cst} représente une valeur constante de l'indexation de la broche pour toutes les configurations du capteur.

En fixant une valeur constante de l'indexation de broche W_{cst}, selon les équations 4.19 et 4.21, il ne sera pas possible de transformer la trajectoire exprimée dans le repère de la pièce à une trajectoire dans le repère de la machine respectant les orientations du capteur $(\overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ utilisées par la méthode ISOvScan. Rappelons que l'orientation du capteur est déterminée par le couple de vecteurs $(\overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$, le vecteur directeur de la ligne laser $\overrightarrow{V_L}$ oriente la ligne laser par rapport à la surface à mesurer. Dans la trajectoire initiale, le vecteur $\overrightarrow{V_L}$ est perpendiculaire à la direction de déplacement le long de la trajectoire du capteur. La modification du vecteur $\overrightarrow{V_L}$ exerce une influence sur le contrôle du recouvrement entre 2 passes de numérisation consécutives de la trajectoire. Le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ est déterminé de sorte que la direction de la numérisation soit toujours perpendiculaire à la surface. En gardant le capteur normal à la surface, l'angle de numérisation appartient toujours à la plage d'angles de numérisation admissibles pour une qualité de numérisation donnée [Phan et al., 2018]. Le fait de fixer $W = W_{cst}$ entraine donc une possible perte de qualité ou un recouvrement non maitrisé. Il est donc nécessaire de proposer une démarche d'adaptation de la trajectoire. Celle-ci est réalisée de 2 façons. Dans une première approche, la trajectoire de numérisation adaptée est calculée en donnant la priorité au temps de mesure, avec un contrôle du recouvrement (vecteur directeur de la ligne laser $\overrightarrow{V_L}$), alors que dans la seconde approche, la priorité est donnée à la qualité, avec un contrôle d'orientation du capteur (vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$).

4.3 Adaptation de la trajectoire de numérisation à la machine 5-axes

Dans cette partie nous détaillons notre démarche d'adaptation de la trajectoire. Pour ce faire, nous illustrons notre approche grâce à la surface de la pièce utilisée au chapitre 3. Pour cette surface, la trajectoire est calculée par la méthode ISOvScan avec une distance entre passe $I_{3D} = 65\ mm$ et la largeur de ligne laser optimale $L_{opt} = 77\ mm$ (Figure 4.3). Le taux de recouvrement choisi pour cette trajectoire est de 15%.

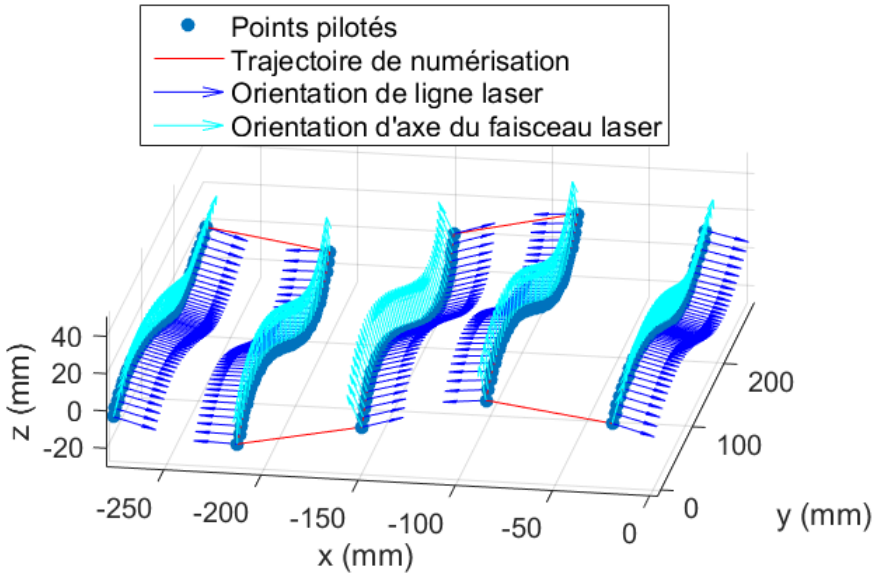


Figure 4.3: Trajectoire de numérisation initiale

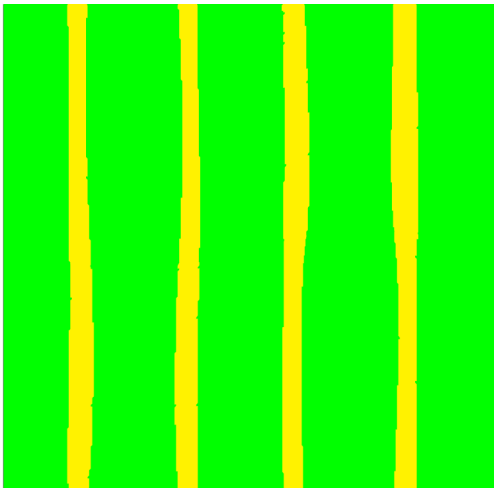


Figure 4.4: Simulation de numérisation de la trajectoire initiale

Cette trajectoire calculée (Figure 4.3) est évaluée par le simulateur développé au chapitre 2. Nous considérons à nouveau la valeur de bruit de numérisation de δ_{ad}= 0,015 mm est le seuil pour la qualité de numérisation. Comme prévu, la simulation de numérisation de la trajectoire obtenue par ISOvScan nous donne les facettes vertes correspondent aux facettes bien numérisées avec la qualité de numérisation attendue

et les facettes jaunes appartiennent aux zones de recouvrement (Figure 4.4).

La valeur de W_{cst} est définie comme un angle entre la ligne laser du capteur et l'axe X dans le repère de la machine. Nous proposons que W_{cst} appartienne à la plage $(0°; 180°)$. À partir de l'équation 4.21, nous remarquons qu'il y a plusieurs valeurs possibles de W satisfaisant l'équation $sin(A) = K/sin(W)$ pour trouver l'angle A avec la valeur de K connue.

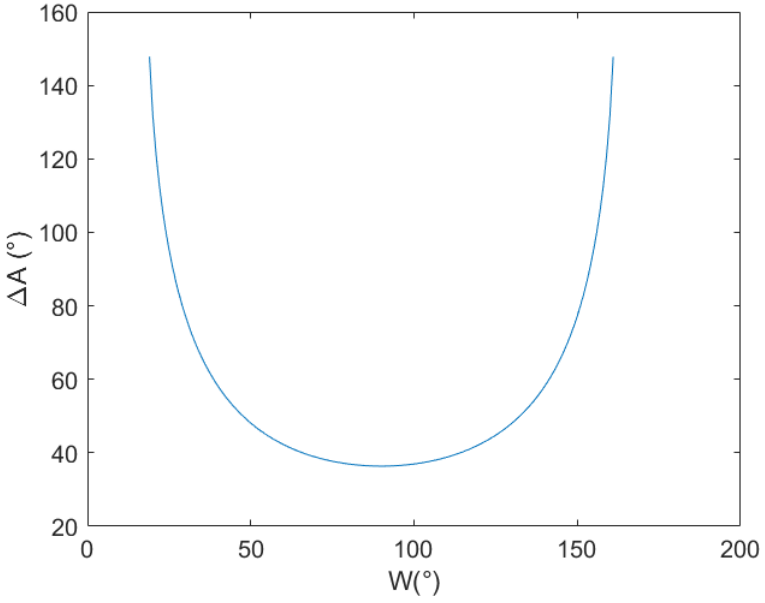


Figure 4.5: Variation de l'angle A en fonction de W

W_{cst} est choisi pour que la variation de l'angle de la rotation du berceau selon l'axe A soit minimum. Ce critère vise à diminuer le risque de collision entre le capteur et le plateau en exécutant la mesure. La variation de l'angle $\Delta A = A_{max} - A_{min}$, avec A_{max}, l'angle de rotation maximal et A_{min}, l'angle de rotation minimal du berceau de la machine. Il est facile de se rendre compte que ΔA est minimum pour $W_{cst} = 90°$ ($sin(W_{cst})$=1). La variation de l'angle $\Delta A = A_{max} - A_{min}$ montrée sur la figure 4.5 confirme ce fait pour W_{cst}. La valeur minimale de $\Delta A = 36°$ correspond à $W_{cst} = 90°$.

Ainsi dans la suite de notre étude, nous choisissons pour W_{cst} la valeur 90°.

4.3.1 Trajectoire adaptée avec priorité au temps de mesure (contrôle du recouvrement)

Dans cette approche, la trajectoire de numérisation adaptée respectant le contrôle de recouvrement est obtenue en conservant le vecteur directeur de la ligne de numérisation $\overrightarrow{V_L}$ de la trajectoire de numérisation initiale, et en ne transformant que le vecteur $\overrightarrow{V_C}$ en un vecteur adapté $\overrightarrow{V_C}'$. Les angles A et C sont obtenus à partir de l'équation 4.22 en considérant le vecteur original $\overrightarrow{V_L}$ et avec la valeur constante W_{cst}. Les solutions du système 4.22 sont résumées dans le tableau 4.3 en fonction des valeurs de (I^*, J^*, K^*, W_{cst}) où $a_{ov} = asin(K/sin(W_{cst}))$, $c_{ov} = acos(cos(W_{cst})/\sqrt{1-K^2})$.

$$\begin{cases} I = cos(C_{ov}).cos(W_{cst}) - cos(A_{ov}).sin(C_{ov}).sin(W_{cst}) \\ J = sin(C_{ov}).cos(W_{cst}) + cos(A_{ov}).cos(C_{ov}).sin(W_{cst}) \\ K = sin(A_{ov}).sin(W_{cst}) \end{cases} \tag{4.22}$$

$$\begin{cases} I^{*\prime} = sin(C_{ov}).sin(A_{ov}) \\ J^{*\prime} = -cos(C_{ov}).sin(A_{ov}) \\ K^{*\prime} = cos(A_{ov}) \end{cases} \tag{4.23}$$

Tableau 4.3: Domaines de solutions des angles A,C

	$J < 0$	$J = 0$	$J > 0$
$I < 0$	$A_{ov_1} = a_{ov}$ $C_{ov_1} = atan(J/I) + c_{ov}$ $A_{ov_2} = \pi - a_{ov}$ $C_{ov_2} = \pi + atan(J/I) + c_{ov}$		
$I = 0$	$A_{ov_1} = a_{ov}$ $C_{ov_1} = \pi/2 + c_{ov}$ $A_{ov_2} = \pi - a_{ov}$ $C_{ov_2} = -\pi/2 + c_{ov}$	$A = 90°$ C non défini	$A_{ov_1} = a_{ov}$ $C_{ov_1} = -\pi/2 + c_{ov}$ $A_{ov_2} = \pi - a_{ov}$ $C_{ov_2} = \pi/2 + c_{ov}$
$I > 0$	$A_{ov_1} = a_{ov}$ $C_{ov_1} = atan(J/I) - c_{ov}$ $A_{ov_2} = \pi - a_{ov}$ $C_{ov_2} = \pi + atan(J/I) - c_{ov}$		

La rotation de l'axe A est limitée à la plage angulaire $[-30°, +120°]$. Il existe donc des solutions qui ne sont pas physiquement réalisables. Nous pouvons donc résumer toutes les solutions possibles selon les valeurs de K (Tableau 4.4).

Le vecteur adapté $\overrightarrow{V_C}'$ est ainsi simplement calculé grâce à l'équation 4.23 avec les angles A_{ov} et C_{ov} trouvés par les équations du système 4.22. La trajectoire de numérisation adaptée respectant le contrôle du recouvrement définie par $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C}')$

Tableau 4.4: Solutions en fonction de K

Valeur de K	[-1, -0.5[	[-0.5, 0.866[	[0.866,1[	1
Nombre de solutions	0	1	2	∞
Solutions	$\varnothing$	(A_{ov_1}, C_{ov_1})	(A_{ov_1}, C_{ov_1}) où (A_{ov_2}, C_{ov_2})	A=90° et C quelconque

est alors calculée (Figure 4.6).

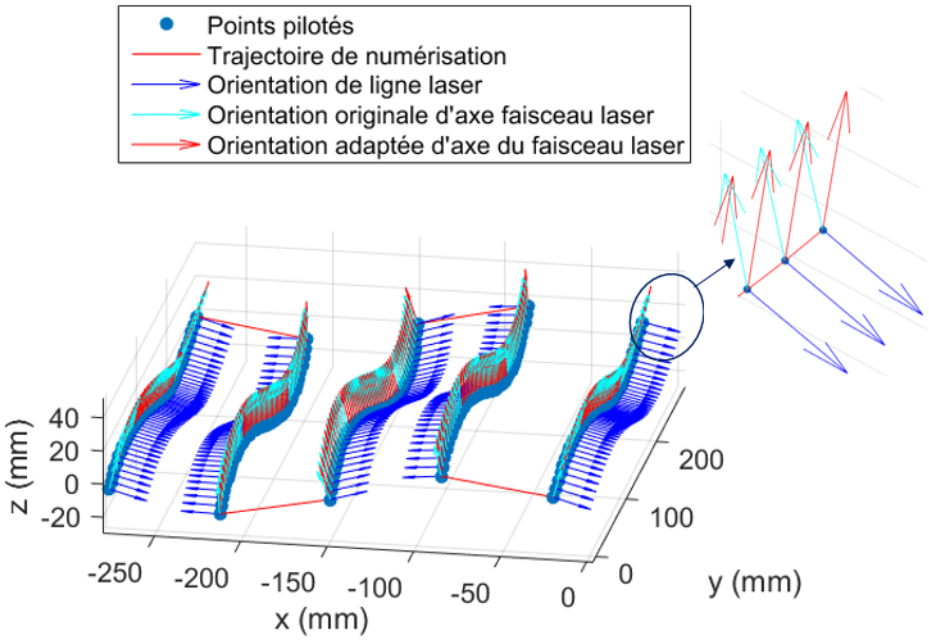


Figure 4.6: Trajectoire adaptée avec priorité donnée au contrôle de recouvrement

Le calcul de la variation angulaire entre $\overrightarrow{V_C}'$ et $\overrightarrow{V_C}$ est présenté sur la figure 4.7 en fonction des passes de numérisation. Le résultat met en évidence que cette variation reste inférieure à 22° en valeur absolue. Cela garantit que l'angle de numérisation est toujours inférieur à l'angle de numérisation limite (60° pour un tel capteur) lié aux critères de visibilité et de qualité (voir figure 2.20, section 2.4.1 du chapitre 2).

Les résultats de simulation de numérisation présentés sur la figure 4.8 mettent en évidence la bonne similarité entre la trajectoire initiale calculée avec ISOvScan et la trajectoire adaptée pour laquelle la priorité est donnée au contrôle du recouvrement en termes de qualité de numérisation et de zones de recouvrement. Nous remarquons que les dimensions des zones de recouvrement (en jaune) entre les passes successives sont similaires dans la simulation de numérisation des deux trajectoires.

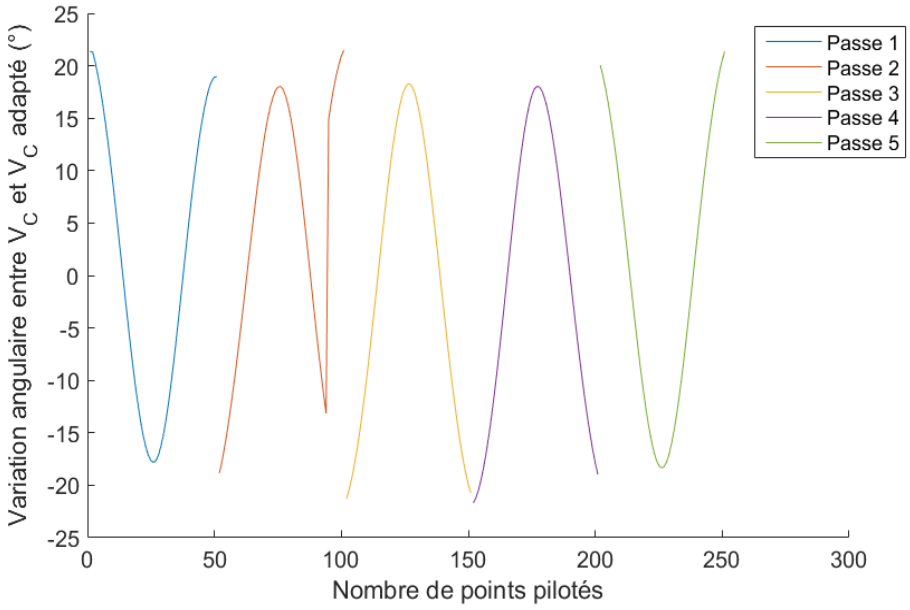
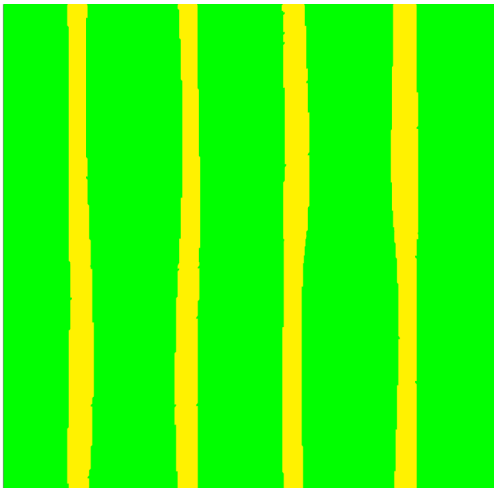
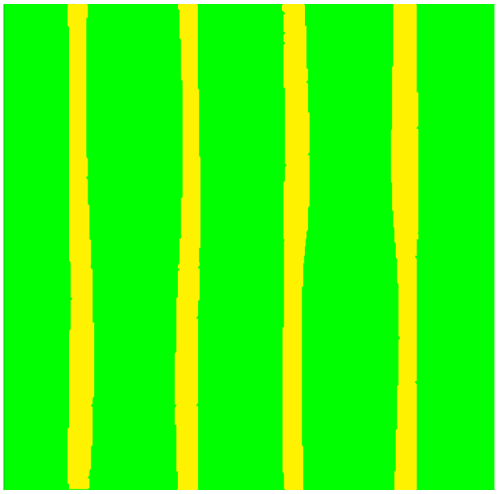


Figure 4.7: Variation angulaire entre $\vec{V}_C'$ et $\vec{V}_C$



(a) Simulation de numérisation de la trajectoire initiale



(b) Simulation de numérisation de la trajectoire adaptée avec priorité au contrôle du recouvrement

Figure 4.8: Simulation de numérisation

Nous allons ensuite calculer la trajectoire adaptée avec priorité au contrôle du recouvrement à partir de la trajectoire initiale pour une autre surface. Cette surface a des rayons de courbure plus grands que la surface utilisée précédemment (Figure 4.9).

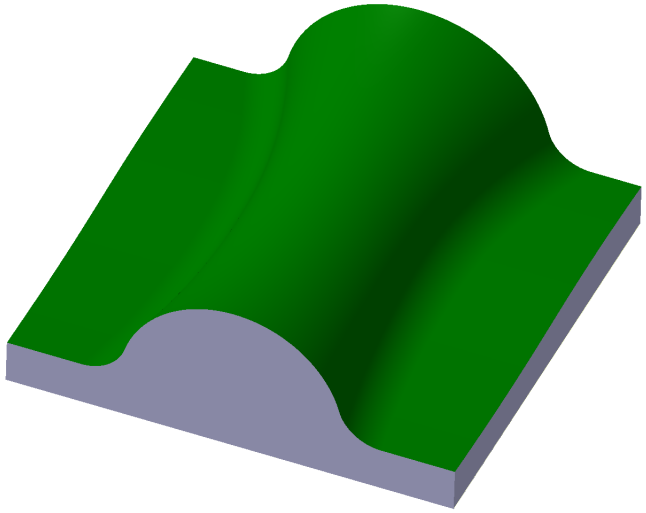


Figure 4.9: Surface test 2

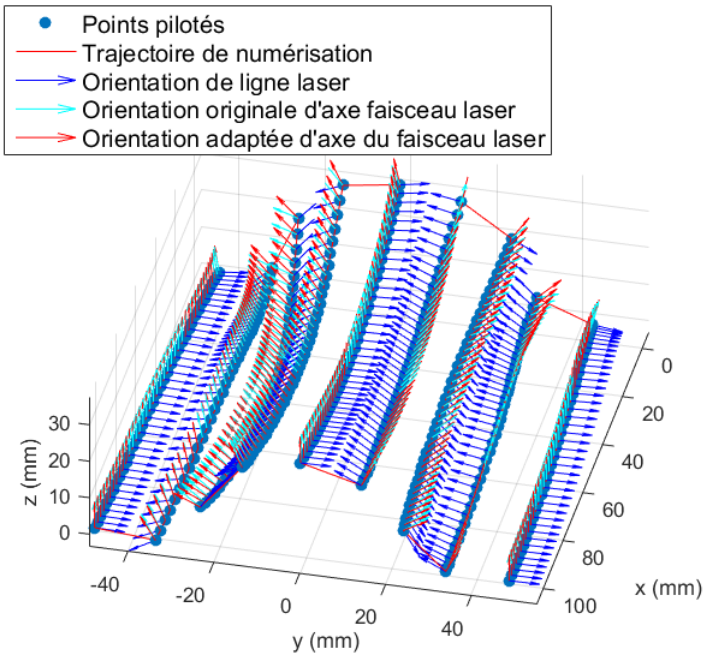


Figure 4.10: Trajectoire adaptée avec priorité donnée au contrôle de recouvrement

Le calcul de la variation angulaire entre $\overrightarrow{V_C}'$ et $\overrightarrow{V_C}$ est présenté sur la figure 4.11 en fonction des passes de numérisation. Nous remarquons que cette variation reste inférieure à 37° en valeur absolue. Cela garantit que l'angle de numérisation est encore inférieur à l'angle de numérisation limite. Pour cette raison, les résultats

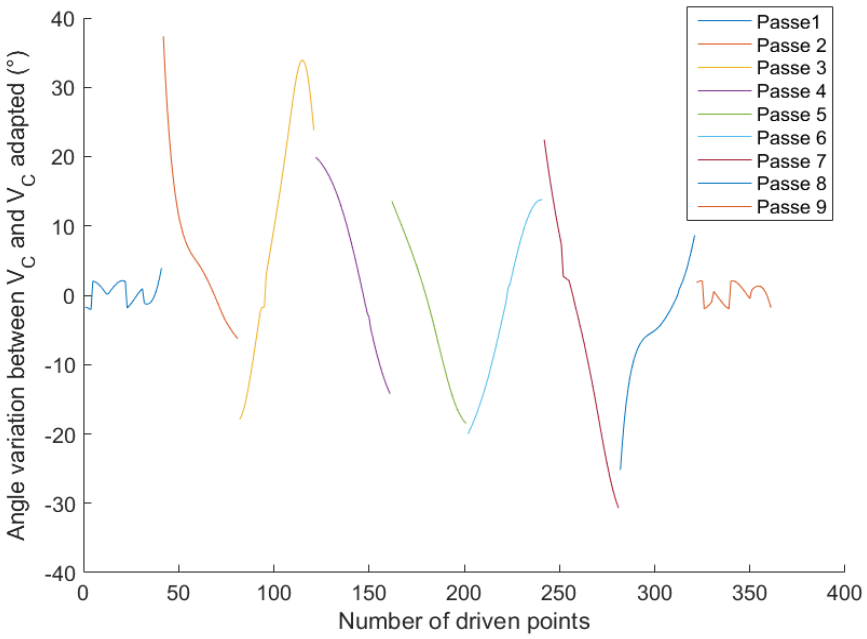
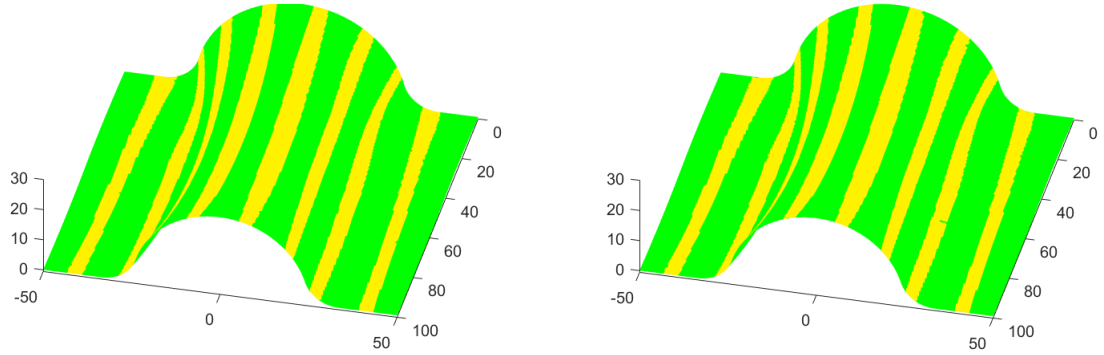


Figure 4.11: Variation angulaire entre $\vec{V_C}'$ et $\vec{V_C}$



(a) Simulation de numérisation de la trajectoire initiale

(b) Simulation de numérisation de la trajectoire adaptée avec priorité au contrôle du recouvrement

Figure 4.12: Simulation de numérisation

de simulation de numérisation dans la figure 4.12 montrent une bonne similarité entre la trajectoire initiale calculée avec ISOvScan et la trajectoire adaptée pour laquelle la priorité est donnée au contrôle du recouvrement en termes de qualité de numérisation et de zones de recouvrement. Cependant, la variation angulaire pour cette surface est supérieure à celle de la surface précédente (22°). Cela implique que la géométrie de la surface peut influencer sur cette approche en termes de variation

angulaire entre le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser initial $\overrightarrow{V_C}$, et le vecteur directeur adapté $\overrightarrow{V_C}'$.

Ces résultats obtenus dans les deux exemples suggèrent que la trajectoire adaptée pour laquelle la priorité est donnée au contrôle du recouvrement peut être utilisée comme une trajectoire de numérisation appropriée pour la machine-outil à 5-axes.

4.3.2 Trajectoire adaptée avec priorité au contrôle de la qualité

La trajectoire de numérisation adaptée avec priorité à la qualité de numérisation est effectuée en conservant l'orientation du vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$, et en calculant le vecteur directeur adapté $\overrightarrow{V_L}'$ représentant la ligne laser de numérisation. Les angles A et C sont calculés à partir du vecteur $\overrightarrow{V_C}$ original par l'équation 4.24. Les solutions du système 4.24 sont résumées dans le tableau 4.1 en fonction des valeurs de (I^*, J^*, K^*). Le vecteur adapté $\overrightarrow{V_L}'$ est ensuite calculé par 4.25 avec $W = W_{cst}$ et les valeurs trouvées (A_q, C_q). La trajectoire adaptée est présentée sur la figure 4.13.

$$\begin{cases} I^* = sin(C_q).sin(A_q) \\ J^* = -cos(C_q).sin(A_q) \\ K^* = cos(A_q) \end{cases} \tag{4.24}$$

$$\begin{cases} I' = cos(C_q).cos(W_{cst}) - cos(A_q).sin(C_q).sin(W_{cst}) \\ J' = sin(C_q).cos(W_{cst}) + cos(A_q).cos(C_q).sin(W_{cst}) \\ K' = sin(A_q).sin(W_{cst}) \end{cases} \tag{4.25}$$

Bien que le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$ reste inchangé par rapport à la trajectoire de numérisation initiale, il est facile d'observer qu'il y a des grandes variations entre $\overrightarrow{V_L}'$ et $\overrightarrow{V_L}$ dans la figure 4.13. Le calcul de variation angulaire entre $\overrightarrow{V_L}'$ et $\overrightarrow{V_L}$ sur la figure 4.14 a montré que la variation maximale est 89° en valeur absolue. Ces grandes variations influent fortement sur le recouvrement lors de la numérisation et entrainent de nombreuses zones non numérisées (zones de couleur rouge) sur la surface comme indiqué dans la figure 4.15. Ceci est dû au fait que $\overrightarrow{V_L}$ est calculé à partir de trois variables A, C, W alors que $\overrightarrow{V_C}$ dépend

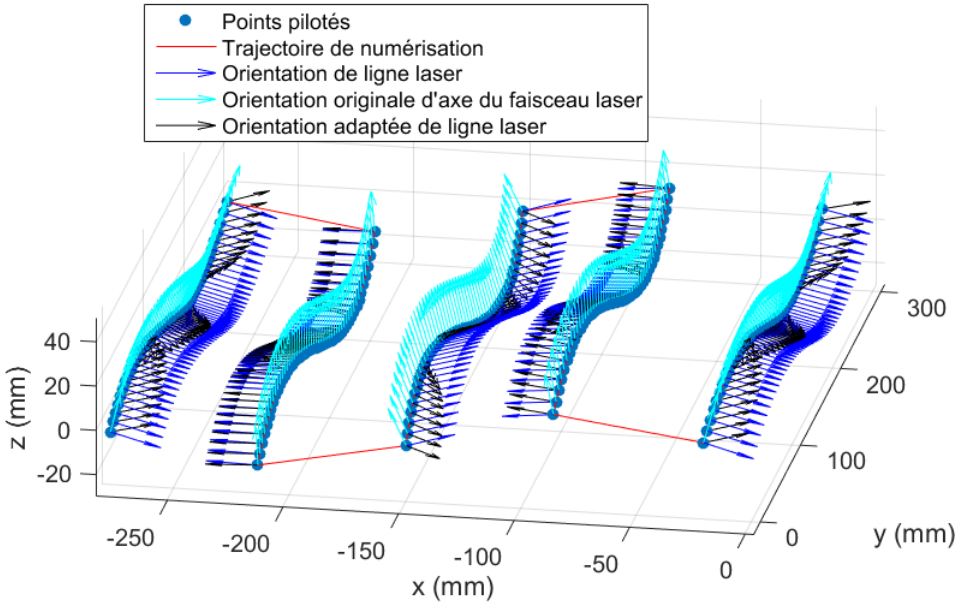


Figure 4.13: Trajectoire adaptée avec une priorité donnée au contrôle de qualité

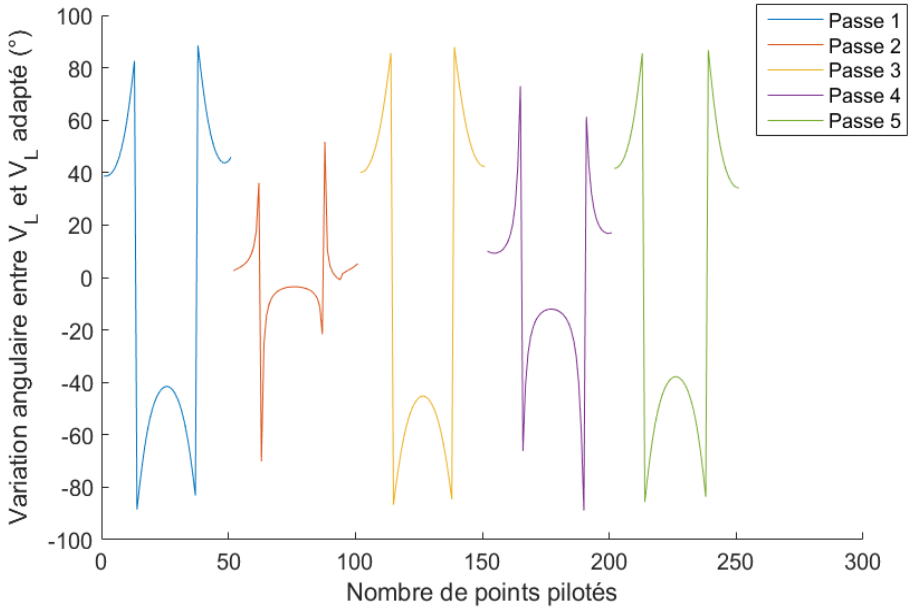
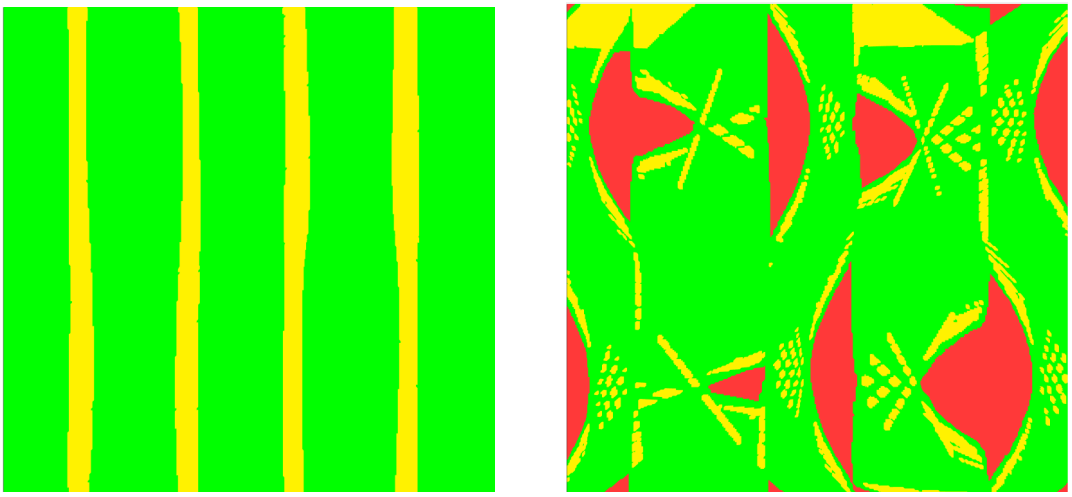


Figure 4.14: Variation angulaire entre $\vec{V_L}$ et $\vec{V_L'}$

uniquement de deux variables A et C.

Nous avons également testé l'approche de calcul de la trajectoire adaptée avec priorité au contrôle du qualité avec la surface dans la figure 4.9. Pour cette surface, le



(a) Simulation de numérisation de la trajectoire initiale

(b) Simulation de numérisation de la trajectoire adaptée avec priorité au contrôle de qualité

Figure 4.15: Simulation de numérisation

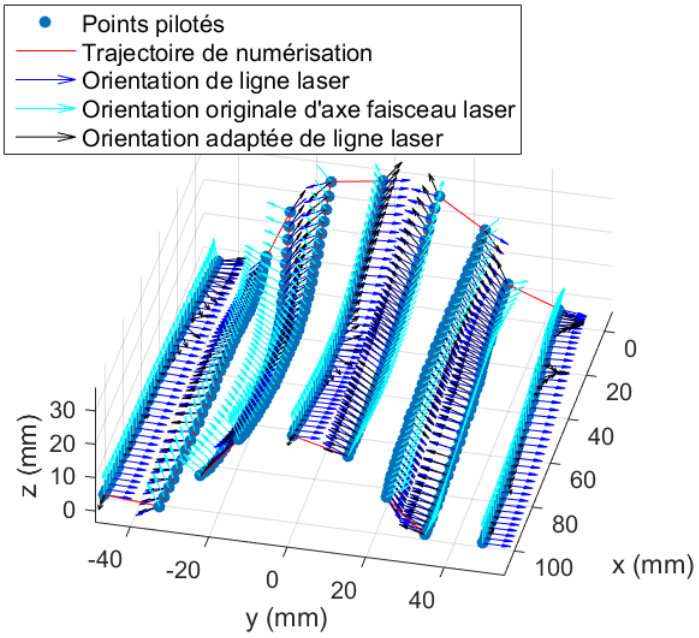


Figure 4.16: Trajectoire adaptée avec une priorité donnée au contrôle de qualité

calcul de variation angulaire entre $\overrightarrow{V_L}'$ et $\overrightarrow{V_L}$ sur la figure 4.17 montre que la variation maximale est 90° en valeur absolue. Ces grandes variations entrainent de nombreuses zones non numérisées (zones de couleur rouge) sur la surface comme indiqué dans la

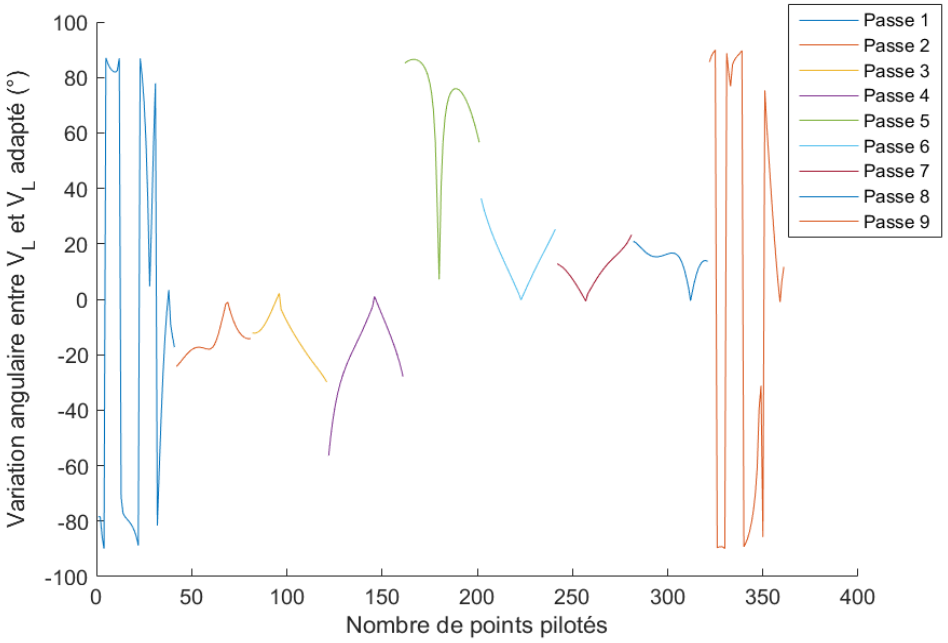
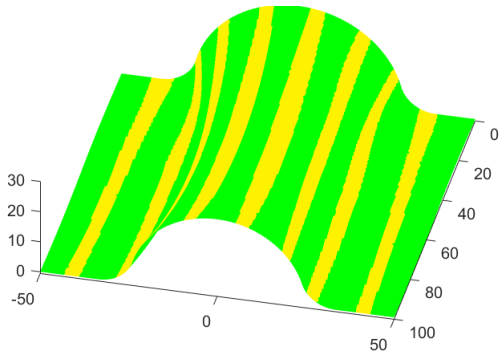
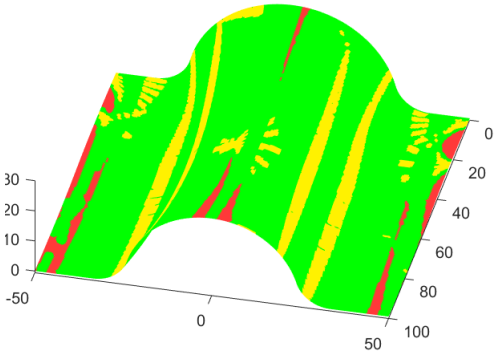


Figure 4.17: Variation angulaire entre $\vec{V_L}'$ et $\vec{V_L}$



(a) Simulation de numérisation de la trajectoire initiale



(b) Simulation de numérisation de la trajectoire adaptée avec priorité au contrôle de qualité

Figure 4.18: Simulation de numérisation

figure 4.18.

À partir de deux exemples, nous concluons que la trajectoire adaptée avec la priorité donnée à la qualité produit de nombreuses zones non numérisées, cette approche est donc peu adaptée à la génération de trajectoire de numérisation sur une MOCN 5-axes.

4.4 Synthèse sur la génération de trajectoire sur MOCN 5-axes

La génération de la trajectoire de numérisation sur MOCN 5-axes est réalisée par l'adaptation d'une trajectoire initiale dédiée à un robot à 6 degrés de liberté. La trajectoire initiale est modifiée de deux manières différentes. La priorité peut être donnée au temps de mesure avec contrôle du recouvrement ou la priorité peut être donnée à la qualité, avec contrôle d'orientation du capteur. Ces premiers résultats suggèrent que la trajectoire de numérisation adaptée avec une priorité donnée au contrôle de recouvrement peut être utilisée comme la trajectoire de numérisation appropriée pour la mesure in-situ dans la machine-outil 5 axes. Cette approche assure le taux de recouvrement inchangé par rapport à la trajectoire initiale. De plus, la variation angulaire de l'orientation du capteur est faible, l'angle de numérisation garantit donc les critères de visibilité et de qualité.

Néanmoins, il est important de noter que la géométrie de la surface peut influencer sur cette approche en termes de variation angulaire entre le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser initial $\overrightarrow{V_C}$, et le vecteur directeur adapté $\overrightarrow{V_C}'$. Par exemple, dans le cas d'une surface avec une variation de courbure plus grande que la surface utilisée (figure 4.9), la variation angulaire maximale entre $\overrightarrow{V_C}'$ et $\overrightarrow{V_C}$ présentée sur la figure 4.11 est égale à 37°. Cette variation angulaire pour cette surface est supérieure à celle de la surface précédente. Il est donc nécessaire de prendre en compte la géométrie de la surface à numériser pour que la variation angulaire entre $\overrightarrow{V_C}'$ et $\overrightarrow{V_C}$ appartienne la plage de l'angle de numérisation admissible.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode pour générer une trajectoire du capteur laser adaptée à la numérisation 5-axes dans une machine-outil. Nous avons adapté avec succès la méthode précédente qui a été développée pour la numérisation par un capteur laser monté sur un robot industriel, garantissant ainsi la qualité de numérisation et le contrôle du recouvrement entre deux passes adja-

centes de la trajectoire. Comme la cinématique de la machine-outil ne permet pas d'appliquer directement la trajectoire initiale, il faut adapter la trajectoire en fixant la valeur de l'indexation de broche W. Dans ce but, deux façons différentes sont explorées : l'adaptation de la trajectoire avec la priorité donnée au temps de mesure avec un contrôle du recouvrement, ou l'adaptation de la trajectoire avec la priorité donnée à la qualité avec le contrôle d'orientation du capteur. La valeur $W_{cst} = 90°$ est choisie pour que la variation angulaire de la rotation du berceau selon l'axe A soit minimale. Ceci permet de diminuer le risque de collision entre le capteur et le plateau en exécutant la mesure. Selon une première approche, la trajectoire de numérisation adaptée respectant le contrôle de recouvrement est obtenue en conservant le vecteur directeur de la ligne de numérisation $\overrightarrow{V_L}$ de la trajectoire de numérisation initiale, et en ne transformant que le vecteur $\overrightarrow{V_C}$ en un vecteur adapté $\overrightarrow{V_C}'$. Au contraire, la trajectoire de numérisation adaptée avec priorité à la qualité de numérisation est effectuée en conservant le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser $\overrightarrow{V_C}$, et en calculant le vecteur directeur adapté de la ligne de numérisation $\overrightarrow{V_L}'$. Les résultats ont démontré la pertinence de l'adaptation de trajectoire, avec de meilleurs résultats pour la trajectoire de numérisation adaptée qui donne la priorité au contrôle de recouvrement. Néanmoins, cette approche est également dépendante de la variation de la courbure de la surface. Une grande variation de la courbure de la surface peut créer une grande variation angulaire entre le vecteur $\overrightarrow{V_C}$ et le vecteur adapté $\overrightarrow{V_C}'$ qui ne garantit pas les critères de visibilité et de qualité de numérisation. Le chapitre suivant présente la validation de notre méthode pour la mesure in-situ en utilisant un capteur laser-plan dans la machine-outil à 5-axes.

Chapitre 5
Application

5.1 Introduction

Dans le chapitre 4, nous avons proposé une méthode de génération de trajectoire pour capteur laser-plan adaptée à la numérisation 5 axes sur une machine-outil. La méthode proposée s'appuie sur la méthode ISOvScan présentée au chapitre 3 et développée pour la génération de trajectoire de numérisation du capteur laser-plan sur un robot. La méthode garantit la qualité de la numérisation et le contrôle du recouvrement entre deux passes consécutives. La cinématique de la machine-outil ne permettant pas d'appliquer directement la trajectoire de numérisation initiale, celle-ci doit être adaptée en fixant la valeur de l'indexation de broche W. Dans ce but, deux approches différentes ont été proposées : une adaptation avec priorité donnée au contrôle de recouvrement, ou avec priorité donnée à la qualité avec contrôle d'orientation du capteur. Afin de vérifier la validité de cette méthode en contexte réel, nous proposons une application de numérisation sur la machine-outil 5-axes.

Dans ce chapitre, nous décrivons le contexte expérimental de cette application. Dans la seconde partie de ce chapitre, la procédure d'intégration du capteur laser dans une structure 5 axes est proposée. Par la suite la mise en œuvre de la mesure permettant effectuer l'exécution la trajectoire de numérisation est mentionnée. Enfin, les analyses des résultats de numérisation obtenus sont présentées à la fin de ce chapitre.

5.2 Contexte expérimental

Pour cette application, les mesures sont effectuées dans la machine-outil Mikron UCP 710. Les mesures sont réalisées avec les erreurs géométriques de la structure de la machine-outil non compensées. L'erreur géométrique est définie comme l'ensemble des erreurs de la géométrie des liaisons cinématiques élémentaires à un degré de liberté, telles que les liaisons glissières et pivots [Viprey, 2016]. La norme ISO 230 définit deux catégories d'erreurs géométriques : les erreurs de mouvement d'axe et les erreurs de position et d'orientation d'axe. Fabien Viprey [Viprey, 2016] a développé les procédures d'étalonnage permettant l'identification des erreurs de mouvement ainsi que des erreurs de position et d'orientation d'axe. Cependant, de part l'inté-

gration du capteur laser-plan avec une acquisition directe des règles de mesure, cette compensation n'est pas utilisée.

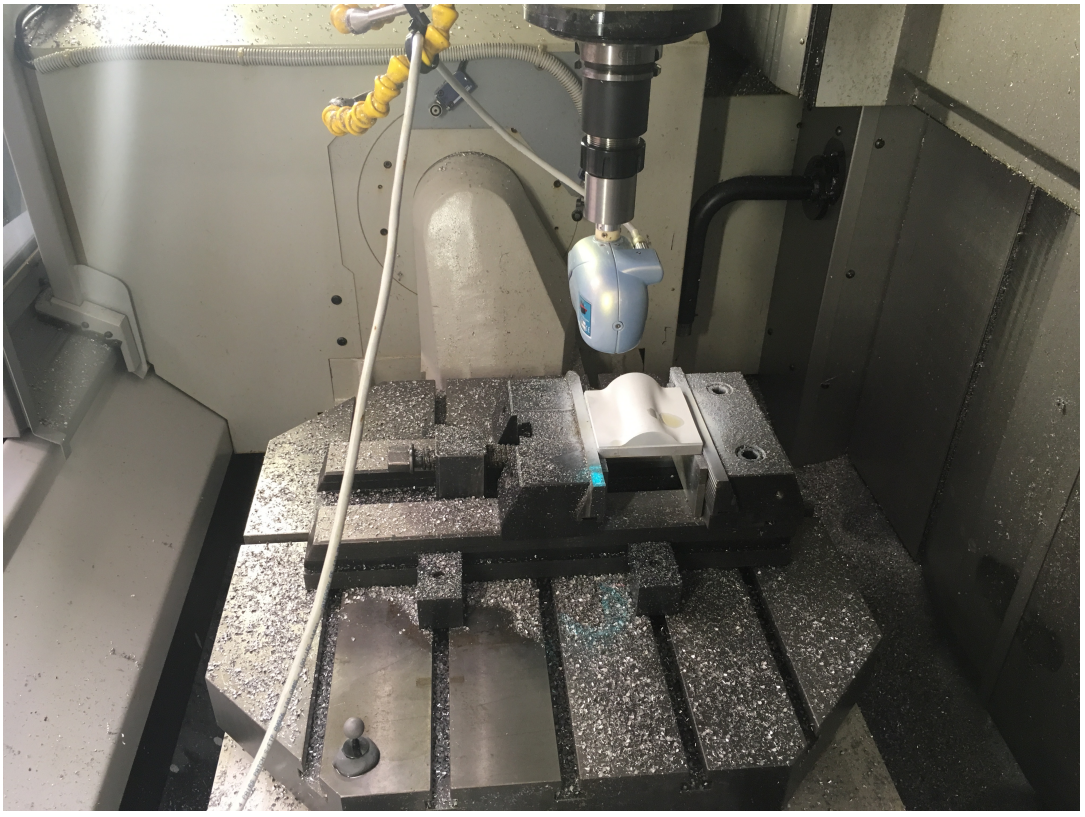


Figure 5.1: Représentation du capteur et de la surface usinée

Le système de mesure on-machine utilisé est constitué du capteur laser-plan Zephyr KZ25 [1] monté dans la broche de la machine-outil avec un montage dédié et une fixation porte-outil standard HSK 63A (Figure 5.1). Une numérisation 3 axes sur cette machine a été réalisée dans la thèse de Lorène Dubreuil [Dubreuil, 2017]. La qualification du capteur laser-plan Kréon en 3 axes a été réalisée sur un plan étalon de 100 mm x 50 mm et sur un ensemble de hauteurs de marche étalon dans la Mikron. Cela permet d'évaluer la qualité des données acquises au travers du bruit de numérisation et de la justesse de mesure. Le bruit de numérisation moyen de 5 mesures à une distance de numérisation constante (milieu de la fenêtre de mesure) est de 12 μm.

La justesse de mesure est évaluée grâce à une distance connue entre 2 plans.

1. www.kreon3d.com

L'erreur de justesse j_a est donnée par la différence entre la valeur mesurée et la valeur considérée comme vraie de la marche. Afin de l'évaluer, le nuage de points numérisé est tout d'abord divisé en 2 nuages (représenter par les deux marches). La figure 5.2 représente un artefact de référence avec deux plans distants de $h0$, ainsi que le nuage issu de l'acquisition de ces deux plans. Des plans sont associés aux deux nuages par le critère des moindres carrés. La première distance mesurée $h1$ est celle entre le barycentre du nuage supérieur et le plan associé du nuage inférieur. La seconde distance $h2$ est celle entre le barycentre du nuage de points inférieur et le plan associé au nuage supérieur. La distance finale h est la moyenne entre ces 2 distances. On obtient l'erreur de justesse de mesure j_a grâce à l'équation 5.1.

$$j_a = h - h0 = \frac{h1 + h2}{2} - h0 \tag{5.1}$$

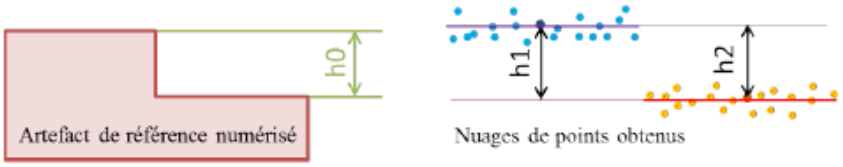


Figure 5.2: Calcul de la justesse de mesure sur une hauteur de marche [Audfray, 2012]

La justesse est évaluée avec une orientation de la tête du capteur fixe, tout comme le bruit de mesure. L'artefact de numérisation est scanné 2 fois (2 distances de numérisation d différentes). L'erreur de justesse moyenne est de 1 μm/mm (cf. tableau 5.1). Suite à la qualification du système de mesure (Kréon+ MOCN), le Kréon est aussi qualifié sur la MMT. Avec la MMT, le bruit moyen est d'environ 13 μm (cf. tableau 5.1) du même ordre de grandeur que celui obtenu dans la MOCN (12 μm) et l'erreur de justesse moyenne d'environ 1,3 μm/mm . Ces résultats permettent de conclure que le bruit et la justesse de mesure sont similaires pour les couples (Kréon+ MOCN) et (Kréon+ MMT). Compte tenu de l'artefact utilisé, cette conclusion n'est valide que sur un petit volume de mesure. L'utilisation de pièces à mesurer de plus grandes dimensions dans tout l'espace de mesure pourrait mettre en avant des résultats de mesure moins bons avec l'utilisation de la machine-outil.

Tableau 5.1: Bruit de numérisation et justesse pour les couples (Kréon+MOCN) et (Kréon+MMT) [Dubreuil, 2017]

	MOCN (3 axes)	MMT
Bruit (mm)	0,012	0,013
Erreur de justesse /mm	0,001	0,0013

L'application de notre approche comprend les étapes suivantes :

1. Usinage de la pièce nominale
2. Calibration du capteur laser-plan
3. Mesure de la pièce à l'aide du capteur laser-plan

La pièce usinée est incluse dans un bloc de 100x100x30 mm^3. La forme de la surface de la pièce est similaire à celle utilisée pour l'exemple du chapitre 4. Nous avons cependant réduit le rayon de courbure de la surface pour diminuer le risque de collision entre le capteur et le plateau lors de l'exécution de la mesure. La pièce est usinée en deux opérations : une opération d'ébauche avec un outil torique de diamètre 10 mm, avec une vitesse d'avance de 3500 mm/min et ensuite une opération de finition avec un outil hémisphérique de diamètre 10 mm, et une vitesse d'avance de 3183 mm/min. Les trajectoires d'usinage des opérations de finition sont calculées avec une tolérance d'usinage de 5 μm et une hauteur de crête de 5 μm. Afin de faciliter l'acquisition des données du capteur, la surface de la pièce usinée est recouverte d'une couche de poudre blanche qui matifie la surface.

5.3 Intégration du capteur dans la MOCN 5 axes

5.3.1 Mise en place du système de numérisation

Ce paragraphe explique les flux de données nécessaires au fonctionnement du capteur Kréon sur la machine-outil 5 axes. Les positions du capteur et les images CCD de la ligne laser sont analysées par une interface de contrôle (ECU Kréon) (Figure 5.3). L'ECU Kréon accepte uniquement un signal d'impulsion TTL (Transistor-Transistor logic) pour la lecture des signaux de position. Le logiciel Polygonia traite les informations provenant du capteur. Ces informations seront ensuite converties en coordonnées des points. Le logiciel permet de gérer la calibration du capteur et

également de visualiser les nuages de points mesurés.

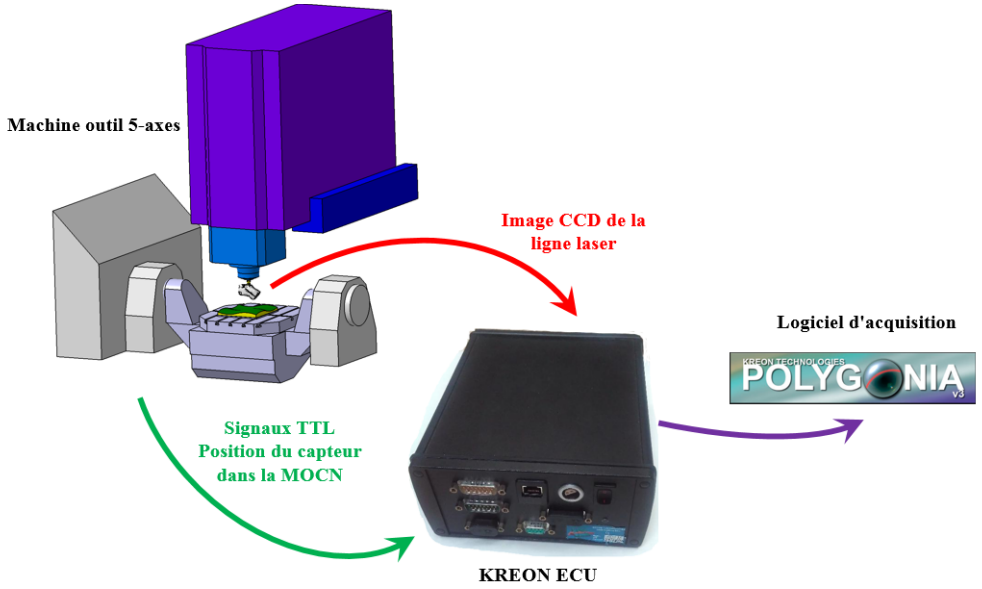


Figure 5.3: Mise en place technique du laser Kréon dans la machine-outil

Pour la mesure on-machine sur une machine 5 axes, il est nécessaire de réaliser une calibration 5 axes du capteur laser-plan dans la machine-outil.

5.3.2 Calibration du capteur laser-plan

La procédure de calibration externe implique la numérisation d'un artefact, classiquement une sphère. L'objectif de la calibration est de déterminer l'orientation et la position du capteur par rapport au repère de la machine, et de définir l'origine du repère du capteur dans lequel les points numérisés seront exprimés. L'origine du repère de mesure est définie par le centre calculé de la sphère numérisée. La calibration permet ainsi de définir la matrice de transformation du repère du capteur vers celui de la machine-outil. Pour cela, il est nécessaire de définir la cinématique du système de numérisation en partant de l'artefact de calibration pour aller vers le capteur. Cette définition est réalisée dans le fichier d'installation **Setup.exe** de Polygonia.

5.3.2.a Cinématique du système de numérisation

Les repères correspondants aux axes de la machine dans **Setup.exe** de Polygonia sont définis dans la figure 5.4. L'ordre de ces axes est CAXYZ.

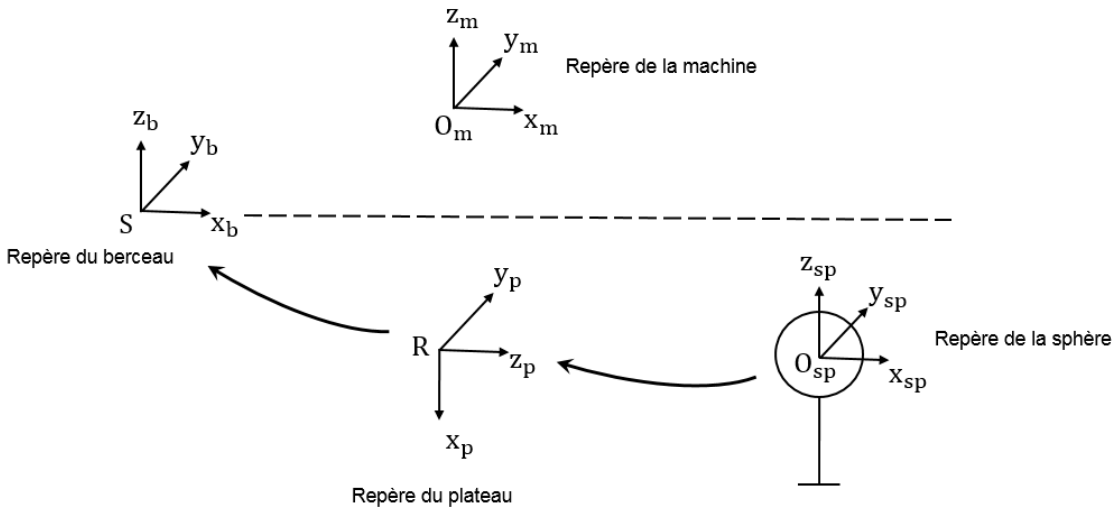


Figure 5.4: Repères définis dans **Setup.exe** de Polygonia

Le centre de la sphère O_{sp} est l'origine du repère de mesure. Le repère du plateau (R, x_p, y_p, z_p) est lié au plateau de la machine. Le repère du plateau est obtenu à partir de la rotation autour de y_{sp} du repère de la sphère de 90°. La matrice de transformation du repère de la sphère au repère du plateau est définie par l'équation 5.2 :

$$M_{setup}(C) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & x_{O_{sp}R} \\ 0 & 1 & 0 & y_{O_{sp}R} \\ -1 & 0 & 0 & z_{O_{sp}R} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

où $(x_{O_{sp}R}, y_{O_{sp}R}, y_{O_{sp}R})$ sont les coordonnées du vecteur de translation $\overrightarrow{O_{sp}R}$ entre le repère de la sphère et le repère du plateau.

Le vecteur de translation $\overrightarrow{O_{sp}R}$ est déterminé en calculant la position du centre de rotation R dans le repère de la sphère. Le repère du berceau de la machine (S, x_b, y_b, z_b) est lié au berceau. Il est obtenu à partir de la rotation autour de y_p du repère du plateau de $-90°$. La matrice de transformation du repère du plateau au repère du berceau est définie par :

$$M_{setup}(A) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & x_{RS} \\ 0 & 1 & 0 & y_{RS} \\ 1 & 0 & 0 & z_{RS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

où (x_{RS}, y_{RS}, z_{RS}) sont les coordonnées du vecteur de translation $\overrightarrow{RS}$ entre le repère du plateau et le repère du berceau.

Le vecteur de translation $\overrightarrow{RS}$ est identifié par les paramètres fixes de la machine-outil. Pour la Mikron UCP 710 : x_{RS}=-119.995 mm, y_{RS}=-49.994 mm, z_{RS}=0 mm. Les trois matrices de transformation X, Y, Z sont les matrices identité :

$$M_{setup}(X) = M_{setup}(Y) = M_{setup}(Z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

5.3.2.b Calibration du capteur dans la MOCN 5 axes

Les étapes de calibration du capteur dans la MOCN 5 axes sont présentées dans la figure 5.5.

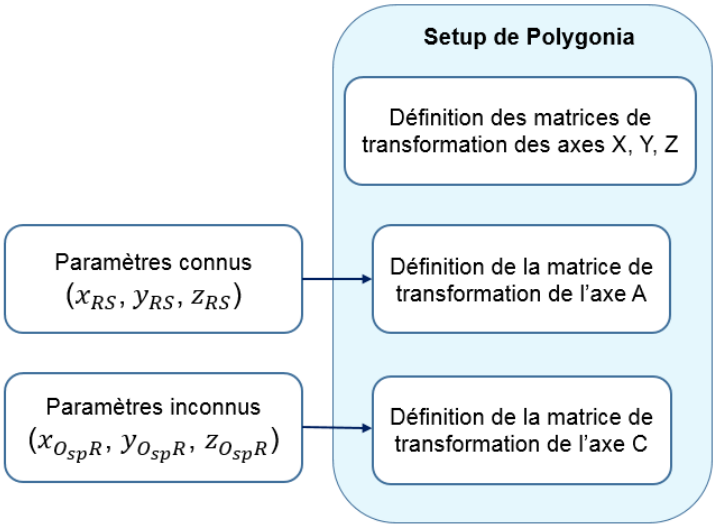


Figure 5.5: Organigramme de calibration du capteur dans la MOCN 5 axes

En effet, nous connaissons les valeurs de (x_{RS}, y_{RS}, z_{RS}) qui sont identifiées par les paramètres fixes de la machine-outil et les trois matrices de transformation X, Y, Z sont les matrices identité. Il est donc nécessaire de déterminer les coordonnées de la position du centre de rotation dans le repère de la sphère définie par $(x_{O_{sp}R}, y_{O_{sp}R}, z_{O_{sp}R})$. La position du centre de rotation du plateau dans le repère de la sphère peut être obtenue en utilisant un palpeur à contact monté sur broche. Cependant, dans le contexte de mesure on-machine par capteur laser-plan, nous souhaitons proposer une méthode de détermination de la position du centre de rotation du plateau seulement avec un capteur laser-plan. Pour cela il est nécessaire de réaliser une calibration en définissant une machine 3 axes.

• Calibration sur 3 axes XYZ de la machine-outil

- Définition de la matrice de rotation et le vecteur de translation pour l'axe X, Y, Z dans **Setup.exe** de Polygonia en utilisant l'équation 5.4.

- Selon la procédure de Kréon, la calibration en 3 axes du capteur est réalisée à partir de la numérisation d'une sphère de diamètre 15,988 mm avec une configuration (A=0°, C=0°) de la machine. Chaque nouveau balayage sur la sphère est effectué avec la même position de la machine, mais à des distances de numérisation différentes $d_{variable}$ (Figure 5.6). Cela permet de changer la position relative du centre de la sphère dans le champ de vision du plan laser. Ce résultat de calibration 3 axes est utilisé pour déterminer le centre de rotation du plateau R dans le repère de la sphère.

• Détermination de la position du centre de rotation du plateau dans le repère de la sphère.

Grâce au résultat de la calibration 3 axes, il est possible de numériser la sphère avec 8 positions du plateau : (A=0°, C=0°), (A=0°, C=45°), (A=0°, C=90°), (A=0°, C=135°), (A=0°, C=180°), (A=0°, C=225°), (A=0°, C=270°), (A=0°, C=315°). Nous obtenons alors 8 nuages de points représentant la sphère pour les 8 positions du plateau (Figure 5.7). À partir des nuages de points, et en renseignant le rayon de la sphère, nous pouvons retrouver les 8 centres de la sphère pour ces 8 positions. Nous déterminons le cercle passant par les 8 centres de la sphère trouvés en appliquant la méthode des moindres carrés. Les coordonnées du centre du plateau (C_x, C_y, C_z) dans le repère de la sphère représentent les coordonnées du centre de ce cercle. Les

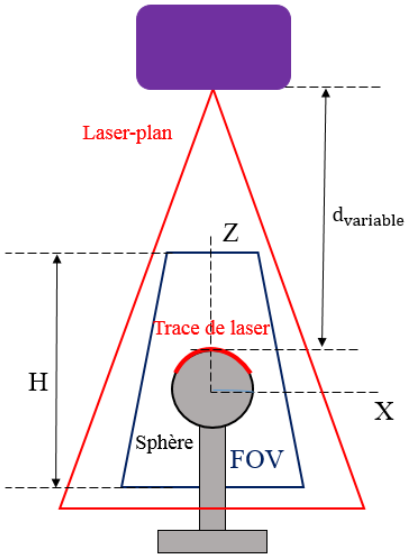


Figure 5.6: Positionnement 3 axes avec la sphère

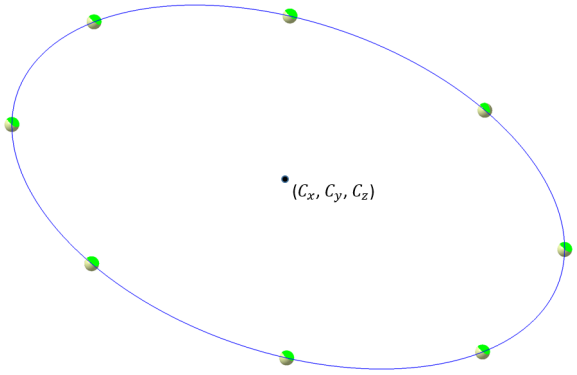


Figure 5.7: Cercle passant par les 8 centres mesurés de la sphère

coordonnées $(x_{O_{sp}R}, y_{O_{sp}R}, z_{O_{sp}R})$ du vecteur de translation $\overrightarrow{O_{sp}R}$ dans le repère de la sphère sont alors définies par $(C_x, C_y, -d_{sp-p})$ où d_{sp-p} est la distance du centre de la sphère au plan supérieur du plateau. Pour trouver cette distance, nous numérisons le plan supérieur du plateau, d_{sp-p} est l'écart selon Z entre le plan des moindres carrés passant par le nuage de points du plan supérieur du plateau et le centre de la sphère.

• Définition des paramètres dans le **Setup.exe** de Polygonia pour 5 axes CAXYZ

- Définition de la matrice de rotation et du vecteur de translation pour l'axe X, Y, Z dans **Setup.exe** de Polygonia.

- Définition de la matrice de rotation et du vecteur de translation pour l'axe C, A. Ces données sont décrites aux figures 5.8 et 5.9.

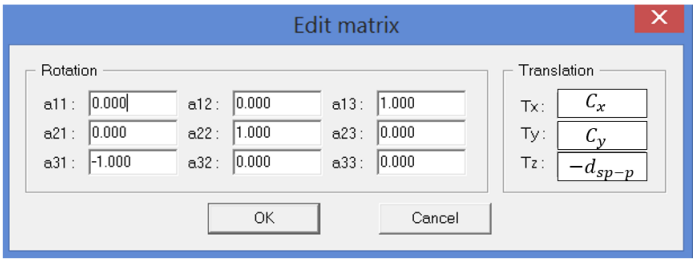


Figure 5.8: Configuration de l'axe C dans **Setup.exe** de Polygonia

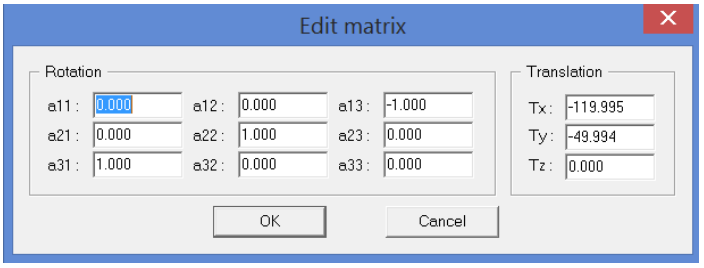


Figure 5.9: Configuration de l'axe A dans **Setup.exe** de Polygonia

5.4 Mise en œuvre de la mesure

Après la réalisation de calibration 5 axes du capteur dans la machine-outil, nous pouvons effectuer l'exécution de la trajectoire de numérisation précédemment calculée.

La génération de trajectoire 5 axes pour cette application est réalisée par les étapes présentées à la figure 5.10 :

- Génération de la trajectoire par la méthode ISOvScan et lissage de la trajectoire en utilisant une approximation B-spline

- Modification de la trajectoire pour l'exécution sur MOCN

- Génération de trajectoire adaptée avec priorité au contrôle du recouvrement pour la machine-outil 5 axes

Les étapes sont détaillées par la suite.

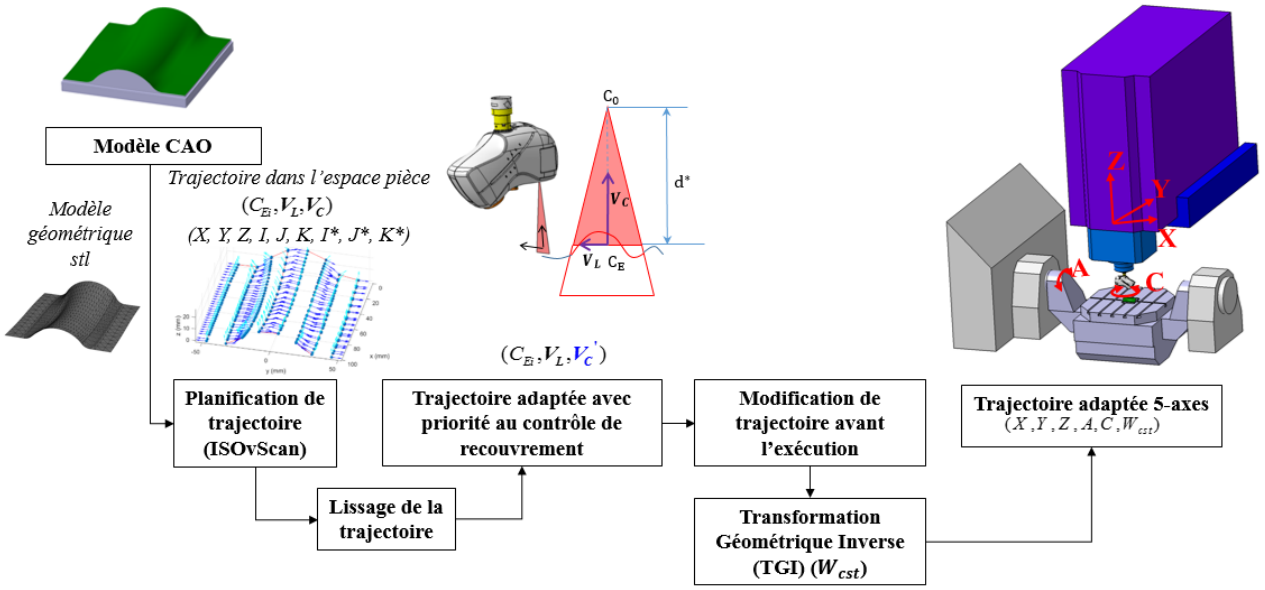


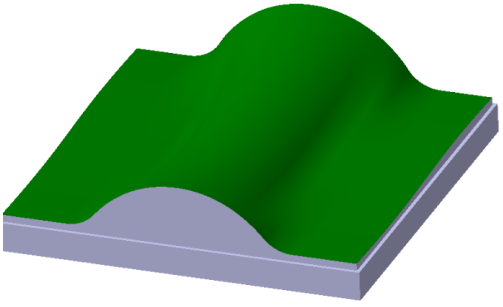
Figure 5.10: Génération de la trajectoire de numérisation 5 axes

5.4.1 Génération de la trajectoire par ISOvScan et lissage

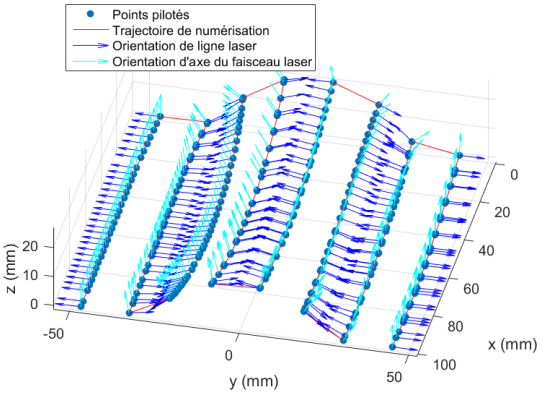
La trajectoire de numérisation est calculée par la méthode ISOvScan avec une distance entre passes de I_{3D}=15 mm et une largeur de la ligne laser optimale L_{opt}=18 mm (Figure 5.11(b)).

Comme les points pilotés sont générés à partir de l'intersection entre les plans équidistants et les facettes, ils ne sont pas régulièrement espacés, ce qui peut provoquer des changements brusques d'orientation du capteur lorsque le capteur se déplace d'un point à un autre. Nous proposons donc un lissage de la trajectoire de numérisation en utilisant une approximation B-spline cubique. Les points pilotés de la trajectoire ISOvScan sont approximés en un ensemble de points espacés uniformément le long de chaque trajet. L'orientation du capteur est également réechantillonnée grâce à une approximation du même type.

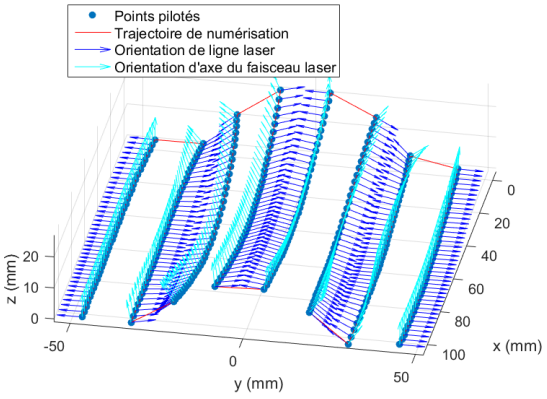
La trajectoire obtenue après lissage par une approximation B-spline est représentée dans la figure 5.11(c).



(a) Représentation de la surface



(b) Trajectoire d'ISOvScan



(c) Trajectoire de numérisation d'ISOvScan après le lissage

Figure 5.11: Génération de la trajectoire

5.4.2 Modification de la trajectoire pour l'exécution sur MOCN

L'exécution d'une trajectoire 5 axes sur une machine-outil peut être relativement complexe. Un moyen pour faciliter la programmation est d'utiliser les fonctions permettant de donner la trajectoire d'usinage directement dans le repère de la pièce. Ces fonctions dépendent directement de la commande numérique (CN) utilisée. Pour ce faire, il est nécessaire de définir la position du repère de programmation dans l'espace de travail de la machine ainsi que la jauge d'outil. Néanmoins, l'outil est toujours considéré comme ayant une géométrie de révolution et n'est défini que par une longueur et un rayon ce qui n'est pas le cas de notre capteur (Figure 5.12). Afin de tirer parti des possibilités offertes par la CN de la machine, il est alors nécessaire de modifier la trajectoire précédemment calculée.

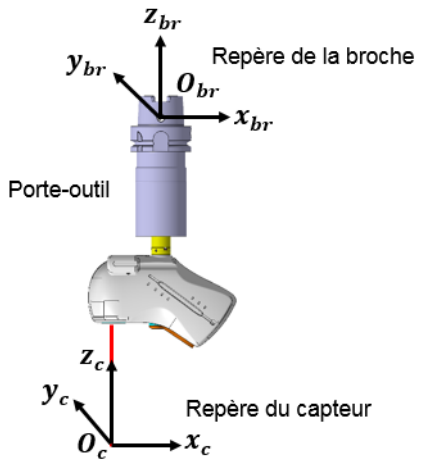


Figure 5.12: Décalage entre le repère de la broche et le repère du capteur

À partir de la définition des repères associés à la modélisation géométrique de la machine (cf. section 4.2 du chapitre 4). La matrice de passage N du repère de la broche au repère de la pièce a été définie comme suit :

$$N = P_{ppr}^{-1}.P_{bp}^{-1}.P_{mb}^{-1}.P_{brm}^{-1} \tag{5.5}$$

Nous introduisons la matrice de transformation N^* telle que :

$$N = P_{ppr}^{-1}.P_{bp}^{-1}.P_{mb}^{-1}.P_{brm}^{-1} = N^*.P_{brm}^{-1}. \tag{5.6}$$

avec

$$N^* = \begin{bmatrix} R_{N^*} & T_{N^*} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

Nous rappelons que l'orientation de l'axe du faisceau laser du capteur est exprimée dans le repère capteur par :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} = P_{cbr}.P_{brm}.P_{mb}.P_{bp}.P_{ppr}. \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} \tag{5.8}$$

On peut donc en déduire :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(O_c,x_c,y_c,z_c)} = P_{cbr}.P_{brm}.(N^*)^{-1}.\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{(O_{pr},x_{pr},y_{pr},z_{pr})} \tag{5.9}$$

Nous notons :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{pr} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

Après simplification, l'équation 5.9 devient :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_{cbr}.\left(\left({R_{N^*}}^t.T_{pr} - R_{N^*} * T_{N^*}\right) + T_{brm}\right) + T_{cbr} \tag{5.11}$$

$$T_{brm} = -{R_{N^*}}^t.T_{pr} + {R_{N^*}}^t * T_{N^*} - {R_{cbr}}^t.T_{cbr} \tag{5.12}$$

Comme R_{cbr} est une rotation autour de l'axe z_c, l'équation précédente peut être écrite sous la forme suivante :

$$T_{brm} = -{R_{N^*}}^t.T_{pr} + {R_{N^*}}^t * T_{N^*} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{O_cO_{br}} \end{bmatrix} - {R_{cbr}}^t.\begin{bmatrix} x_{O_cO_{br}} \\ y_{O_cO_{br}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

La fonction TRAORI [Sinumerik, 2004] présentée dans la CN Siemens 840D permet de réaliser la correction spatiale lors de l'usinage continu 5 axes. Cela ne fonctionne que pour une géométrie d'outil axisymétrique (Figure 5.12). Si elle est utilisée dans ce cas, en raison de la géométrie du capteur et de son intégration dans la broche, il est nécessaire de décaler les coordonnées des points pilotés dans le repère de programmation par une valeur de décalage δ.

$$T_{brm} = -{R_{N^*}}^t.(T_{pr} + \delta) + {R_{N^*}}^t * T_{N^*} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{O_cO_{br}} \end{bmatrix} - {R_{cbr}}^t. \begin{bmatrix} x_{O_cO_{br}} \\ y_{O_cO_{br}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

$$T_{brm} = -{R_{N^*}}^t.T_{pr} + {R_{N^*}}^t * T_{N^*} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{O_cO_{br}} \end{bmatrix} - {R_{N^*}}^t.\delta - {R_{cbr}}^t. \begin{bmatrix} x_{O_cO_{br}} \\ y_{O_cO_{br}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

Cette définition suggère que :

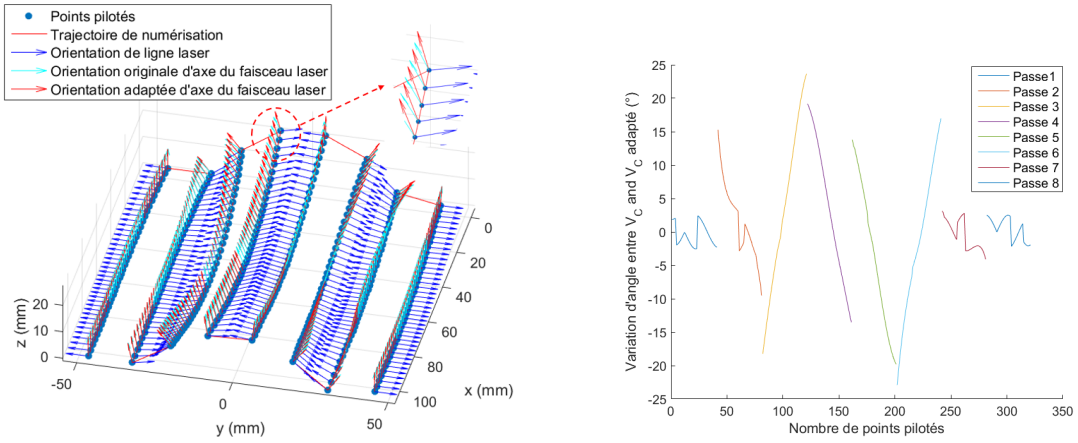
$$\delta = -R_{N^*}.{R_{cbr}}^t. \begin{bmatrix} x_{O_cO_{br}} \\ y_{O_cO_{br}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

En appliquant cette transformation à tous les points de la trajectoire de numérisation, il est alors possible de l'exécuter sur le centre d'usinage à l'aide des fonctions d'usinage 5 axes. Cependant, il y a encore une autre solution pour exécuter directement la trajectoire calculée dans le repère pièce sans la modification de la trajectoire. Nous pouvons concevoir un porte capteur permettant de mettre l'axe z du repère du capteur en position coaxiale avec l'axe z du repère de la broche. Cette nouvelle pièce nous permet d'utiliser directement la fonction TRAORI présentée dans la CN Siemens 840D.

5.4.3 Trajectoire de numérisation avec priorité au contrôle de recouvrement

La trajectoire adaptée avec priorité au contrôle du recouvrement (détaillée dans la section 4.3.1 du chapitre 4) est ensuite calculée en sélectionnant l'indexation de la broche $W_{cst} = 90°$ à partir de la trajectoire lissée (Figure 5.13(a)). Avec cette adaptation, nous ne pouvons pas obtenir la trajectoire optimale en ce qui concerne l'orientation du capteur relativement à la surface. La variation angulaire entre $\vec{V_C}$ et $\vec{V_C}'$ est illustrée à la figure 5.13(b). Cette variation reste inférieure à une valeur

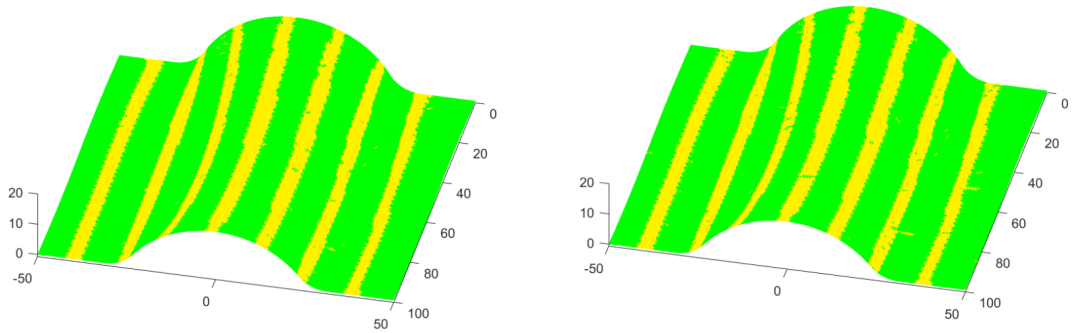
de 22°. Cela garantit que l'angle de numérisation est toujours inférieur à l'angle de numérisation limite (60°pour le capteur Zéphyr KZ25) en fonction des critères de visibilité et de qualité. La simulation de numérisation pour cette trajectoire montre une bonne similarité entre la trajectoire initiale calculée avec ISOvScan et la trajectoire adaptée en termes de qualité de numérisation et de zones de recouvrement (Figure 5.14).



(a) Trajectoire de numérisation avec priorité au contrôle de recouvrement

(b) Variation angulaire entre $\vec{V_C}$ et $\vec{V_C}'$

Figure 5.13: Adaptation de la trajectoire



(a) Simulation de numérisation avec la trajectoire initiale

(b) Simulation de numérisation avec la trajectoire adaptée

Figure 5.14: Simulation de numérisation

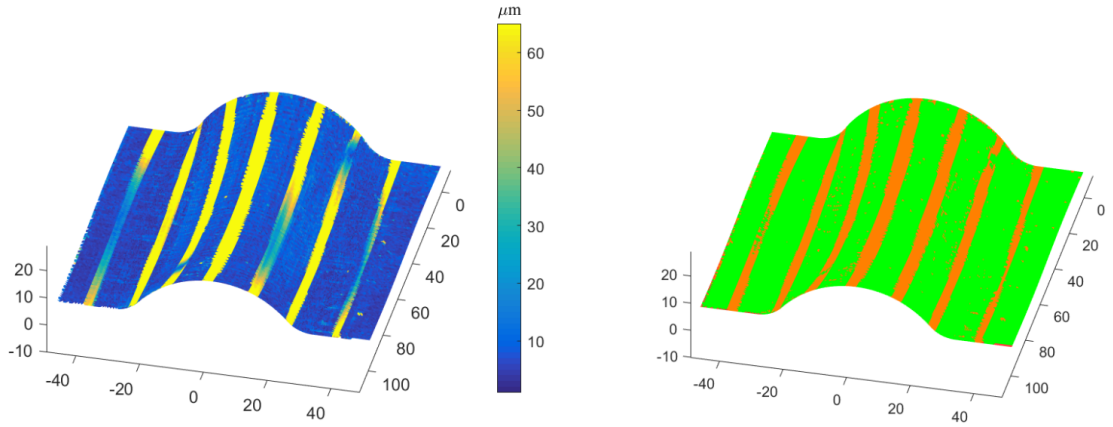
La trajectoire de numérisation adaptée avec priorité à la contrainte de recouvrement est exécutée sur le centre d'usinage à 5 axes Mikron UCP710. Afin que l'ECU puisse recevoir correctement les signaux de déplacement de la machine, nous réglons

la vitesse de déplacement de l'axe de la machine à environ 1000 mm/min. Le nuage de points obtenu est ensuite aligné sur la définition nominale de la pièce afin que les résultats puissent être analysés.

5.5 Analyse

5.5.1 Évaluation de la qualité de mesure

L'évolution du bruit de numérisation réel est présentée sur la figure 5.15(a), où l'échelle des couleurs représente l'évolution du bruit de numérisation. La méthode de calcul du bruit de numérisation pour chaque facette du maillage est la même que celle présentée dans les applications des chapitres 2 (cf. section 2.4.1) et chapitre 3 (cf. section 3.6.3). Il est facile de remarquer que le bruit de numérisation dans les zones de recouvrement (zones jaunes) est supérieur à celui des zones sans recouvrement. Pour illustrer la contribution de la méthode proposée, les facettes sont caractérisées en termes de qualité de numérisation. Nous avons considéré que la valeur du bruit de 0,015 mm était un seuil de qualité (Figure 5.15(b)). Si le bruit est supérieur au seuil δ_{ad}=0,015 mm, la facette est marquée comme numérisée avec une mauvaise qualité de numérisation, et sa couleur est orange (les zones de recouvrement). La facette est marquée comme numérisée avec une bonne qualité si le bruit est inférieur δ_{ad}, et sa couleur est verte (les zones de non-recouvrement).



(a) Évolution de bruit de numérisation (b) Qualité de numérisation

Figure 5.15: Résultat de numérisation

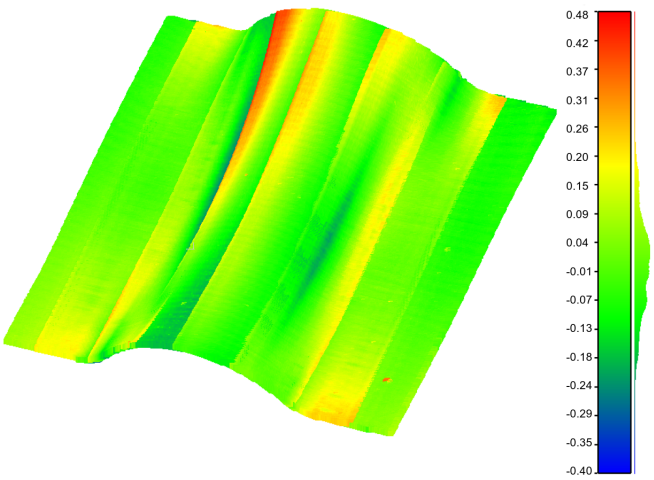
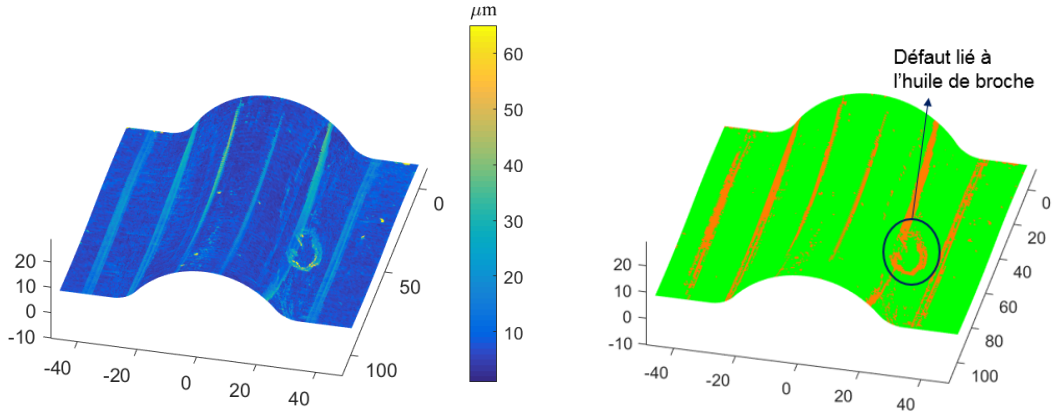


Figure 5.16: Représentation d'écarts géométriques en mm

La qualité de numérisation de la pièce mise en évidence dans la figure 5.15(a) montre un résultat attendu avec une bonne qualité de numérisation présente dans les zones de non-recouvrement en bleu. Les zones de recouvrement en jaune sont relativement constantes et similaires au résultat obtenu par la simulation. Cela valide l'approche utilisée pour la génération de trajectoire de numérisation avec le contrôle du recouvrement, mais aussi de la qualité.

Cependant, une analyse des écarts géométriques des données numérisées avec le modèle nominal (Figure 5.16) met en évidence certaines erreurs lors de numérisation. Celles-ci proviennent principalement d'erreurs de calibration dans le système de numérisation. En effet, les trajectoires de numérisation sont réalisées avec des configurations machine très variées (C=0°et C=180°) par exemple). Les erreurs de calibration sont amplifiées et peuvent provoquer des différences significatives sur les données acquises (zones en rouge sur la surface). Ces erreurs géométriques peuvent résulter de la détermination de la position de la sphère liée au repère de la machine dans le processus de calibration. De plus, les variations d'orientation du capteur entre les passages ont une influence sur la qualité de numérisation comme présenté dans l'application du chapitre 3 (cf. section 3.2). Il est important de noter que la matrice de compensation des erreurs géométriques de la machine-outil 5 axes n'est pas intégrée dans la mesure. Cela peut être une source d'erreur supplémentaire lors des mesures.

Le résultat de numérisation 5 axes est ensuite comparé avec la numérisation de la surface en 3 axes. La position de la surface est fixée au plateau dans la position A=0° et C=0° avec l'orientation du capteur correspondant à l'axe du faisceau laser dans la direction perpendiculaire au plan horizontal. La trajectoire $z = 0\ mm$ correspond à l'altitude de la trajectoire en zigzag en fixant l'altitude du premier point de la trajectoire en 5 axes. Ensuite, la trajectoire $z = 20\ mm$ est générée en décalant la trajectoire $z = 0\ mm$ verticalement de 20 mm. Les résultats de numérisation sont montrés dans les figures 5.17 et 5.18. Les zones de numérisation avec une mauvaise qualité se situent principalement dans les zones de recouvrement. Il y a "un cercle orange" présenté sur la figure 5.17(b) et sur la figure 5.18(b) causé par l'huile de broche tombée sur la surface lors de la mesure.

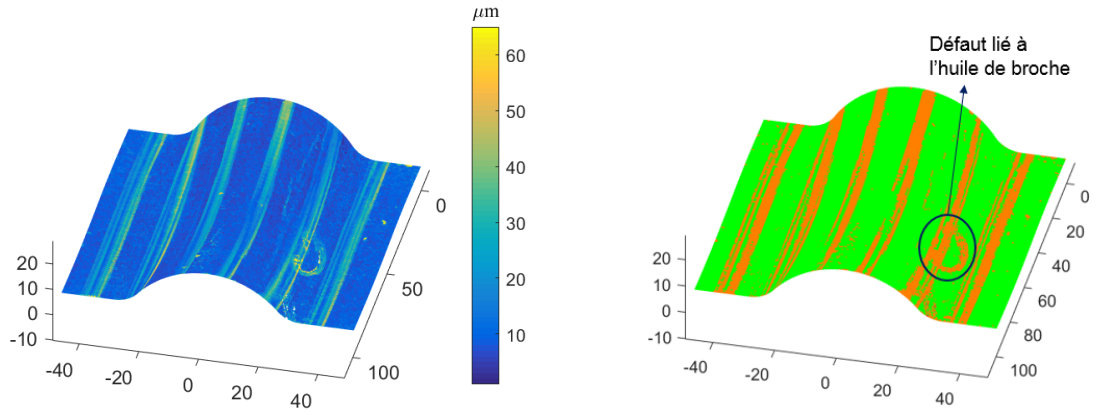


(a) Évolution du bruit de numérisation

(b) Qualité de numérisation

Figure 5.17: Numérisation de la surface en zigzag $z = 0\ mm$

Nous remarquons que le bruit de numérisation dans les zones de recouvrement dans les figures 5.17 et 5.18 est plus faible que celui de la figure 5.15(a). En utilisant une seule orientation pour la numérisation 3 axes, nous pouvons réduire le bruit dans les zones de recouvrement causé par les variations d'orientation du capteur entre les passes, mais la qualité de numérisation n'est pas contrôlée pour toutes les zones de non-recouvrement. Pour illustrer ce point, le bruit de numérisation sur une zone locale du bord de la surface (*Zone analysée*) est analysé (Figure 5.19). Le bruit dans cette zone est de 8,1 μm avec la trajectoire zigzag Z=0 mm et de 10,3 μm avec la trajectoire zigzag Z=20 mm. Nous remarquons que le bruit dans la



(a) Évolution du bruit de numérisation (b) Qualité de numérisation

Figure 5.18: Numérisation de la surface en zigzag $z = 20\ mm$

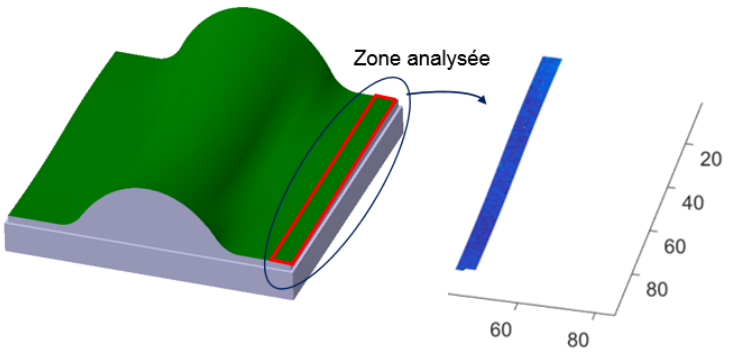


Figure 5.19: Bruit de numérisation sur une zone locale

zone de non-recouvrement avec la trajectoire zigzag est plus grand que celui de la numérisation 5 axes car nous ne pouvons pas gérer ni l'orientation du capteur ni la distance de numérisation en chaque point piloté avec la trajectoire en zigzag 3 axes. Cela entraine une qualité de numérisation non-homogène sur la surface. De plus, la largeur de la zone du recouvrement n'est pas la même pour toute la surface avec les trajectoires en zigzag.

5.5.2 Évaluation de la performance de mesure

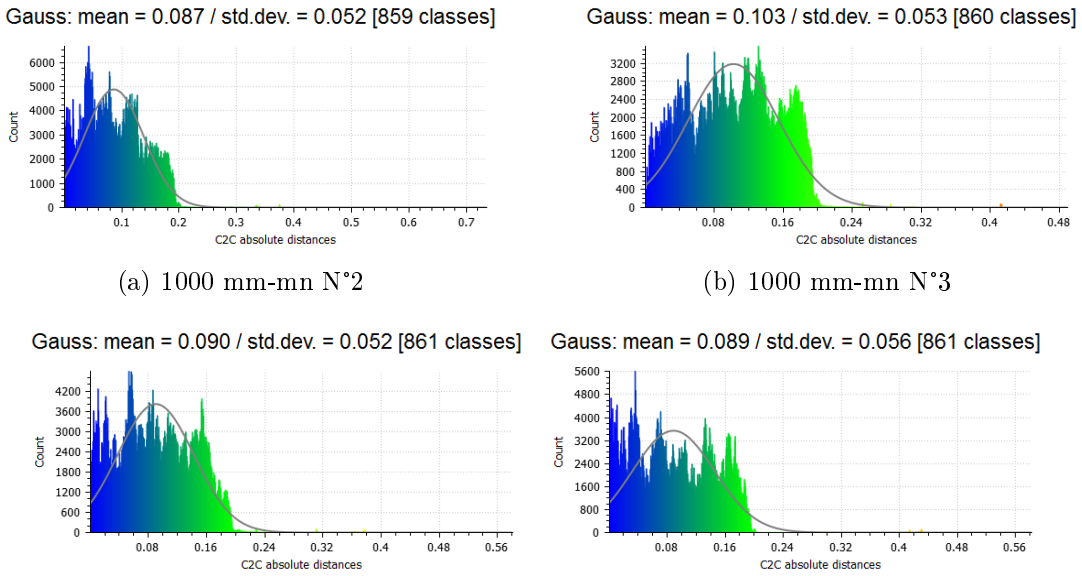
5.5.2.a Étude de répétabilité de la mesure

Pour évaluer la répétabilité de la mesure du système (Capteur+ MOCN), nous effectuons la numérisation de la surface plusieurs fois avec la même vitesse de dé-

placement du capteur 1000 mm/min. Afin de faciliter l'analyse de résultat de numérisation, le bruit de numérisation moyen sur la *Zone analysée* est présenté dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2: Bruit de numérisation obtenu pour cinq mesures

Mesures	Bruit (mm)
1000 mm/mn N°1	0,0065
1000 mm/mn N°2	0,0066
1000 mm/mn N°3	0,0064
1000 mm/mn N°4	0,0064
1000 mm/mn N°5	0,0064
Moyenne	0,00646



(a) 1000 mm-mn N°2

(b) 1000 mm-mn N°3

(c) 1000 mm-mn N°4

(d) 1000 mm-mn N°5

Figure 5.20: Histogrammes des écarts par rapport à la mesure 1000 mm-mn N°1 (Toute la surface)

(par CloudCompare [2])

Les résultats montrent que le système a une bonne répétabilité en termes de bruit lorsque l'on numérise cinq fois (Tableau 5.2). Le bruit de numérisation dans cette zone de non-recouvrement est faible (le bruit moyen est environ 6,5 μm).

En prenant la mesure N°1 comme référence, nous calculons l'écart entre cette référence et les autres mesures pour toute la surface (Tableau 5.3). La figure 5.20 montre les histogrammes des écarts entre les mesures par rapport la mesure N°1. Les

écarts entre les nuages de points pour les 5 mesures confirment une bonne répétabilité du système de numérisation.

Tableau 5.3: Écarts par rapport à la mesure 1000 mm/mn N°1 (Toute la surface)

Mesures	Écart moyen (mm)
1000 mm/mn N°2	0,0868
1000 mm/mn N°3	0,1027
1000 mm/mn N°4	0,0904
1000 mm/mn N°5	0,0890

5.5.2.b Impact de la vitesse de déplacement sur la qualité de numérisation

La surface est également numérisée avec les vitesses de déplacement du capteur différentes de 800 mm/min et de 1200 mm/min. Les résultats sont décrits dans les tableaux 5.4 et 5.5. À partir des résultats, nous remarquons que le bruit de numérisation est légèrement plus faible dans le cas où la vitesse de déplacement du capteur est de 1200 mm/min (le bruit moyen de 6,15 μm). Ce phénomène est facile à expliquer : augmenter la vitesse de déplacement du capteur réduit la densité du nuage de points.

Tableau 5.4: Bruit de numérisation obtenu pour deux mesures avec la vitesse de déplacement du capteur 800 mm/min

Mesures	Bruit (mm)
800 mm/mn N°1	0,0068
800 mm/mn N°2	0,0071
Moyenne	0,00695

Tableau 5.5: Bruit de numérisation obtenu pour deux mesures avec la vitesse de déplacement du capteur 1200 mm/min

Mesures	Bruit (mm)
1200 mm/mn N° 1	0,0062
1200 mm/mn N° 2	0,0061
Moyenne	0,00615

5.5.2.c Impact de la distance de numérisation choisie sur la qualité de numérisation

Pour montrer l'impact du champ de vision du capteur sur le bruit de numérisation, nous avons effectué les numérisations de la surface en décalant la trajectoire originale verticalement de 10 mm et 20 mm respectivement (vitesse de déplacement du capteur 1000 mm/min). Nous obtenons le bruit de 7,3 μm pour la trajectoire décalée de 10 mm et le bruit de 8,2 μm pour la trajectoire décalée de 20 mm. Cela confirme les résultats de qualification du capteur présentés dans le chapitre 2 (cf. section 2.4.1) où nous montrons que l'évolution du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation montre une augmentation du bruit de la position haute vers la position basse dans le champ de vision.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une application qui valide la méthode de planification de la trajectoire de numérisation pour le capteur laser-plan sur une MOCN 5 axes. Cette trajectoire 5-axes est adaptée de la trajectoire obtenue par la méthode ISOvScan développée pour la numérisation avec le robot 6 axes. Nous avons réussi à réaliser les différentes étapes pour assurer la mesure on-machine : génération de trajectoire de numérisation, mise en place du système de mesure, calibration du capteur, et exécution de la mesure dans la machine-outil 5 axes. Le résultat de la numérisation montre que la qualité de numérisation est assurée pour les zones de non-recouvrement. La largeur de zone de recouvrement est relativement constante et similaire au résultat obtenu par la simulation. Les résultats de mesure ont permis de mettre en évidence une bonne répétabilité du système de mesure 5 axes. Il existe encore certaines erreurs lors de numérisation causées par les erreurs de calibration du système de numérisation et l'absence de matrice de compensation pour la compensation des erreurs géométriques de la MOCN 5 axes. Cependant, la trajectoire de numérisation adaptée pour la machine-outil à 5 axes a été validée par cette application. Ce travail a permis de valider la faisabilité de la mesure on-machine à l'aide d'un capteur laser-plan dans la MOCN 5 axes.

Conclusions & Perspectives

Dans le contexte d'inspection du procédé d'usinage, l'intégration des opérations de mesure au processus de fabrication permet de réaliser les actions correctives à appliquer aux opérations de fabrication et ainsi de diminuer le temps de cycle de fabrication. Nous nous sommes intéressés dans ces travaux à l'étude de la mesure on-machine par capteur laser-plan avec une MOCN 5 axes. La problématique traitée dans ces travaux concerne la génération de trajectoire de numérisation du capteur laser-plan.

Nous avons proposé dans un premier chapitre de définir un format de description de la trajectoire du capteur permettant d'intégrer l'orientation de la broche de la machine. La trajectoire du capteur laser-plan est la succession des positions et des orientations du capteur décrites par $(C_E, \overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$. Le point piloté C_E positionne la ligne laser de numérisation dans le champ de vision de la nappe laser, $\overrightarrow{C_0C_E} = d^*.\overrightarrow{V_C}$, avec d^* la distance du centre de la source de lumineuse au point piloté C_E. Le couple de vecteurs $(\overrightarrow{V_L}, \overrightarrow{V_C})$ oriente le capteur, avec $\overrightarrow{V_L}$ le vecteur directeur de la ligne laser, et $\overrightarrow{V_C}$ le vecteur directeur de l'axe du faisceau laser.

La première contribution des travaux de cette thèse porte sur la réalisation d'un simulateur de trajectoires de numérisation. Ce simulateur permet de valider si la trajectoire répond aux contraintes imposées, visibilité et qualité de numérisation. Il est également un outil prédictif pour aider à la planification de trajectoire. Un formalisme de simulation de numérisation a été proposé pour développer le simulateur. Ce formalisme se compose de deux fonctions associées aux 2 contraintes : une fonction de visibilité et une fonction de qualité. La fonction de visibilité vérifie si les facettes de la surface sont vues par la nappe laser entre deux configurations successives de trajectoires. Les facettes qui satisfont à la fonction de visibilité sont vérifiées par la fonction de qualité qui définit la qualité de numérisation en fonction

de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation. Notre simulateur a été validé pour différents capteurs (KZ25, Aquilon), sur différents types de matériaux de la surface à numériser (aluminium, résine polyuréthane), et sur différents porteurs (MMT, Robot, MOCN).

La seconde contribution est la proposition d'une nouvelle méthode de planification de la trajectoire d'un capteur laser-plan, ISOvScan, adaptée à une structure 6 axes. Avec cette trajectoire de numérisation, la largeur du recouvrement entre deux passes consécutives est constante, et l'orientation du capteur est gérée en chaque point piloté. La qualité, ainsi que le temps de numérisation peuvent être maîtrisés en contrôlant les zones de recouvrement et en gérant l'orientation du capteur en continu (direction de numérisation du capteur orthogonale à la surface, ligne laser de numérisation perpendiculaire à la direction de déplacement). La méthode repose sur l'utilisation d'une transformation conforme au sens des moindres carrés pour transformer la surface 3D en un espace 2D. Le calcul de la trajectoire de numérisation est alors simplifié dans un espace 2D. La validation de cette méthode a été réalisée grâce à une expérimentation sur un robot industriel 6 axes équipé d'un capteur laser-plan.

Pour réaliser la mesure in-situ dans la MOCN 5 axes, lorsque le capteur prend la place de l'outil dans la broche de la machine-outil, les déplacements du capteur sont réalisés grâce à une structure à 5 degrés de liberté, plus la rotation de la broche. Cependant, comme la rotation de la broche pour la plupart des machines outils ne peut pas être contrôlée en continu entre deux configurations du capteur, nous ne pouvons pas appliquer directement la trajectoire de numérisation initiale ISOvScan pour la machine-outil 5 axes. Il est donc nécessaire de fixer l'indexation de la broche à une valeur constante W_{cst} pour toutes les configurations du capteur. La trajectoire initiale doit donc être modifiée. Cependant, cette modification ne pourra pas être réalisée en respectant l'ensemble des critères de qualité et de performance de la méthode ISOvScan. Ainsi, il est proposé deux façons de modifier la trajectoire : soit la priorité est donnée au temps de mesure, par le contrôle du recouvrement entre deux trajets consécutifs, soit la priorité est donnée à la qualité par le contrôle de l'orientation du capteur. Une application a été présentée pour confirmer la validité de la trajectoire de numérisation adaptée au capteur laser-plan sur la MOCN 5 axes.

Les résultats obtenus dans l'application ont permis de valider la trajectoire adaptée avec la priorité donnée au contrôle du recouvrement. La qualité de numérisation est assurée dans l'ensemble des zones de non-recouvrement. La largeur de zone du recouvrement entre deux passes est relativement constante. Les résultats obtenus dans ces travaux de thèse ont permis de valider la faisabilité de la mesure on-machine à l'aide d'un capteur laser-plan dans la MOCN 5 axes ce qui n'avait pas été réalisée auparavant à notre connaissance.

Nous pouvons faire un bilan des principales contribution de ces travaux de thèse :

- La réalisation d'un simulateur permettant de simuler la numérisation du capteur laser-plan ;

- La proposition d'une nouvelle méthode de génération de trajectoire de numérisation pour une structure 6 axes à recouvrement constant ;

- La proposition de la démarche de génération de trajectoire de numérisation sur une MOCN 5 axes adaptée de la trajectoire précédemment calculée pour robot 6 axes ;

- La validation de l'exécution d'une trajectoire de numérisation avec capteur laser-plan dans une MOCN 5 axes.

Concernant les perspectives de nos travaux, il est possible de généraliser la méthode ISOvScan à des surfaces non dépliables. En effet, dans notre approche, la transformation de la surface maillée 3D sur une surface paramétrique 2D est réalisée dans le cas d'une surface complètement dépliable (surface pouvant être mise à plat sur un plan sans la déchirer). Dans le cas où la surface est non dépliable, il pourrait être envisagé d'ajouter une étape de segmentation de la surface afin de la découper en parties dépliables. Ensuite, le processus de génération de trajectoire est appliquée pour chaque surface. La trajectoire finale est calculée en regroupant toutes les trajectoires.

Une autre amélioration possible à apporter à notre travaux concerne l'exécution de trajectoire de numérisation sur la machine-outil. Comme présenté au chapitre 5, pour la commande numérique (CN) Siemens 840D, la fonction TRAORI est utilisée pour calculer la transformation spatiale entre le repère de pièce et le repère de la

machine. Elle permet d' exécuter la trajectoire d'usinage directement dans le repère de la pièce. Cette fonction ne fonctionne que pour une géométrie d'outil axisymétrique. Dans notre cas, le capteur est monté dans la broche de la machine grâce à un porte-outil standard HSK 63A. Cela entraîne un décalage entre le repère de la broche et le repère du capteur selon les trois dimensions x, y et z. Afin d'utiliser la fonction TRAORI, nous devons donc décaler les coordonnées des points pilotés dans le repère de la pièce par une valeur de décalage δ. Pour éviter cet inconvénient, nous pouvons envisager de concevoir un porte capteur permettant de rendre colinéaire l'axe z du repère capteur avec l'axe z du repère de la broche.

La proposition d'actions correctives suite à la phase de mesure est une perspective prometteuse dans le contexte de la mesure in-situ. Une fois les points acquis, les défauts de la pièce sont déterminés par comparaison entre les points mesurés et la géométrie nominale de la pièce (CAO). Une action de correction peut ainsi être envisagée dès l'opération d'usinage suivante en modifiant les trajectoires d'usinage.

Références

[Andulkar et al., 2015] Andulkar, M. V., Chiddarwar, S. S., and Marathe, A. S. (2015). Novel integrated offline trajectory generation approach for robot assisted spray painting operation. *Journal of Manufacturing Systems*, 37 :201–216.

[Atkar et al., 2005] Atkar, P. N., Conner, D. C., Greenfield, A., Choset, H., and Rizzi, A. A. (2005). Uniform coverage of simple surfaces embedded in for auto-body painting. *Algorithmic Foundations of Robotics VI*, pages 27–42.

[Audfray, 2012] Audfray, N. (2012). *Une approche globale pour la métrologie 3D automatique multi-systemes*. PhD thesis, Ecole normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.

[Bernard and Véron, 2000] Bernard, A. and Véron, M. (2000). Visibility theory applied to automatic control of 3d complex parts using plane laser sensors. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 49(1) :113 – 118.

[Can and Ünüvar, 2010] Can, A. and Ünüvar, A. (2010). A novel iso-scallop tool-path generation for efficient five-axis machining of free-form surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(9-12) :1083–1098.

[Chen and Zhao, 2013] Chen, W. and Zhao, D. (2013). Path planning for spray painting robot of workpiece surfaces. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.

[Cho and Seo, 2002] Cho, M.-W. and Seo, T.-I. (2002). Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on cad/cam/cai integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(8) :607–617.

[Derigent et al., 2007] Derigent, W., Chapotot, E., Ris, G., Remy, S., and Bernard, A. (2007). 3d digitizing strategy planning approach based on a cad model. *Journal of computing and information science in engineering*, 7(1) :10–19.

[Ding et al., 2016] Ding, L.-j., Dai, S.-g., and Mu, P.-a. (2016). Cad-based path planning for 3d laser scanning of complex surface. *Procedia Computer Science*, 92 :526–535.

[Dubreuil, 2017] Dubreuil, L. (2017). *Mesure In-situ par moyens optiques.* PhD thesis, Université Paris-Saclay.

[ElMaraghy and Yang, 2003] ElMaraghy, H. and Yang, X. (2003). Computer-aided planning of laser scanning of complex geometries. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(1) :411–414.

[Fernandez et al., 2008] Fernandez, P., Rico, J. C., Alvarez, B. J., Valino, G., and Mateos, S. (2008). Laser scan planning based on visibility analysis and space partitioning techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(7-8) :699–715.

[Gerbino et al., 2016] Gerbino, S., Del Giudice, D. M., Staiano, G., Lanzotti, A., and Martorelli, M. (2016). On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3d inspection process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9-12) :1787–1799.

[Guarato, 2013] Guarato, A. Z. (2013). *Métrologie 3D de pièces de formes complexes par moyens optiques : Une application à l'équilibrage de vilebrequins.* PhD thesis, Ecole normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.

[Haker et al., 2000] Haker, S., Angenent, S., Tannenbaum, A., Kikinis, R., Sapiro, G., and Halle, M. (2000). Conformal surface parameterization for texture mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 6(2) :181–189.

[Hoppe et al., 1992] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W. (1992). *Surface reconstruction from unorganized points*, volume 26. ACM.

[Hormann et al., 2007] Hormann, K., Lévy, B., and Sheffer, A. (2007). Mesh parameterization : Theory and practice. *ACM SIGGRAPPH, course notes.*

[Koutecky et al., 2016] Koutecky, T., Palousek, D., and Brandejs, J. (2016). Sensor planning system for fringe projection scanning of sheet metal parts. *Measurement*, 94 :60–70.

[Lartigue et al., 2002] Lartigue, C., Contri, A., and Bourdet, P. (2002). Digitised point quality in relation with point exploitation. *Measurement*, 32(3) :193–203.

[Lartigue et al., 2014] Lartigue, C., Quinsat, Y., Mehdi-Souzani, C., Zuquete-Guarato, A., and Tabibian, S. (2014). Voxel-based path planning for 3d scanning of mechanical parts. *Computer-Aided Design and Applications*, 11(2) :220–227.

[Lavernhe et al., 2007] Lavernhe, S., Tournier, C., and Lartigue, C. (2007). Kinematic performances in 5-axis machining. *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II*, pages 489–503.

[Lee et al., 2004] Lee, H., Cho, M.-W., Yoon, G.-S., and Choi, J.-H. (2004). A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement-part i : Global inspection planning. *KSME International Journal*, 18(8) :1349–1357.

[Lee and Park, 2000] Lee, K. H. and Park, H.-p. (2000). Automated inspection planning of free-form shape parts by laser scanning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(4) :201–210.

[Li et al., 2011] Li, W., Yin, Z., Huang, Y., Wu, T., and Xiong, Y. (2011). Tool path generation for triangular meshes using least-squares conformal map. *International journal of production research*, 49(12) :3653–3667.

[Lévy et al., 2002] Lévy, B., Petitjean, S., Ray, N., and Maillot, J. (2002). Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(3) :362–371.

[Mahmud et al., 2011] Mahmud, M., Joannic, D., Roy, M., Isheil, A., and Fontaine, J.-F. (2011). 3d part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty. *Computer-Aided Design*, 43(4) :345–355.

[Martínez et al., 2010] Martínez, S., Cuesta, E., Barreiro, J., and Álvarez, B. (2010). Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5) :621–629.

[Martins et al., 2005] Martins, F. A. R., Garcia-Bermejo, J. G., Casanova, E. Z., and Gonzalez, J. R. P. (2005). Automated 3d surface scanning based on cad model. *Mechatronics*, 15(7) :837–857.

[Mavrinac et al., 2015] Mavrinac, A., Chen, X., and Alarcon-Herrera, J. L. (2015). Semiautomatic model-based view planning for active triangulation 3-d inspection systems. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 20(2) :799–811.

[Mehdi-Souzani et al., 2016] Mehdi-Souzani, C., Quinsat, Y., Lartigue, C., and Bourdet, P. (2016). A knowledge database of qualified digitizing systems for the selection of the best system according to the application. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 13 :15–23.

[Mehdi-Souzani et al., 2006] Mehdi-Souzani, C., Thiebaut, F., and Lartigue, C. (2006). Scan planning strategy for a general digitized surface. *Journal of computing and information science in engineering*, 6(4) :331–339.

[Mehdi-Souzani, 2007] Mehdi-Souzani, M. C. (2007). *Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité.* PhD thesis, ENS Cachan.

[Norberto Pires et al., 2009] Norberto Pires, J., Chen, H., Fuhlbrigge, T., and Li, X. (2009). A review of cad-based robot path planning for spray painting. *Industrial Robot : An International Journal*, 36(1) :45–50.

[Phan et al., 2017] Phan, N. D. M., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2017). Simulation of laser-sensor digitizing for on-machine part inspection. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*, pages 301–311. Springer.

[Phan et al., 2018] Phan, N. D. M., Quinsat, Y., Lavernhe, S., and Lartigue, C. (2018). Scanner path planning with the control of overlap for part inspection with an industrial robot. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1) :629–643.

[Prieto et al., 1999] Prieto, F., Redarce, H., Lepage, R., and Boulanger, P. (1999). Range image accuracy improvement by acquisition planning. In *Proceedings of the 12th conference on vision interface (VI'99), Trois Rivieres, Québec, Canada*, pages 18–21.

[Quinsat, 2016] Quinsat, Y. (2016). *Apport de la mesure in-situ pour la maîtrise de la qualité des surfaces fabriquées.* PhD thesis, ENS Cachan.

[Raffaeli et al., 2013] Raffaeli, R., Mengoni, M., and Germani, M. (2013). Context dependent automatic view planning : the inspection of mechanical components. *Computer-Aided Design and Applications*, 10(1) :111–127.

[Sinumerik, 2004] Sinumerik, S. (2004). 840d/840di/810d,«. *Manuel de programmation-Notions complémentaires», édition*, 3.

[Son et al., 2002] Son, S., Park, H., and Lee, K. H. (2002). Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(8) :889–897.

[Suresh and Yang, 1994] Suresh, K. and Yang, D. (1994). Constant scallop-height machining of free-form surfaces. *Journal of engineering for industry*, 116(2) :253–259.

[Tang and Chen, 2015] Tang, Y. and Chen, W. (2015). Surface modeling of workpiece and tool trajectory planning for spray painting robot. *PloS one*, 10(5) :e0127139.

[Tournier and Duc, 2002] Tournier, C. and Duc, E. (2002). A surface based approach for constant scallop heighttool-path generation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(5) :318–324.

[Viprey, 2016] Viprey, F. (2016). *Modélisation et caractérisation des défauts de structure de machine-outil 5 axes pour la mesure in-process.* PhD thesis, Université Paris-Saclay.

[Vivekanandhan et al., 1994] Vivekanandhan, T., Kashani, A., and Echempati, R. (1994). Computer-aided torch trajectory generation for automated coating of parts with complex surfaces. *Journal of Thermal Spray Technology*, 3(2) :208–215.

[Vukasinovic et al., 2010] Vukasinovic, N., Bracun, D., Mozina, J., and Duhovnik, J. (2010). The influence of incident angle, object colour and distance on cnc laser scanning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1-4) :265–274.

[Wu et al., 2015] Wu, Q., Lu, J., Zou, W., and Xu, D. (2015). Path planning for surface inspection on a robot-based scanning system. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on*, pages 2284–2289. IEEE.

[Xi and Shu, 1999] Xi, F. and Shu, C. (1999). Cad-based path planning for 3-d line laser scanning. *Computer-Aided Design*, 31(7) :473–479.

[Zhao et al., 2017] Zhao, B., Feng, G., Yan, L., Dongya, Z., Wanli, Z., and Fei, Z. (2017). Study on generation and optimization methodology of on-machine measurement schemes for multi-axis cnc machine tool. In *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pages V04AT05A017–V04AT05A017. American Society of Mechanical Engineers.

[Zhao et al., 2008] Zhao, F., Xu, X., and Xie, S. (2008). Step-nc enabled on-line inspection in support of closed-loop machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(2) :200–216.

[Zhao et al., 2015] Zhao, J., Zou, Q., Li, L., and Zhou, B. (2015). Tool path planning based on conformal parameterization for meshes. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(5) :1555–1563.

[Zhao and Xu, 2010] Zhao, Y. F. and Xu, X. (2010). Enabling cognitive manufacturing through automated on-machine measurement planning and feedback. *Advanced Engineering Informatics*, 24(3) :269–284.

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences (SMEMAG)

Titre : Trajectoire de numérisation adaptatives en contexte in-situ

Mots clés : In-situ, Trajectoire de numérisation, Capteur laser-plan, Recouvrement, Machine-outil 5 axes

Résumé : Dans le contexte d'inspection du procédé d'usinage, l'intégration des opérations de mesure au processus de fabrication permet de réaliser les actions correctives à appliquer aux opérations de fabrication et ainsi de diminuer le temps de cycle de fabrication. Nous nous sommes intéressés dans ces travaux à la réalisation de la mesure on-machine par capteur laser plan dans une MOCN 5 axes. La problématique liée à la mesure on-machine concerne la proposition d'une méthode de planification de trajectoires qui résulte d'un compromis entre le temps de mesure et la qualité des données acquises.
Nous proposons dans un premier temps un format de description des paramètres de la trajectoire du capteur permettant d'intégrer l'orientation de la broche dans la machine. Comme la détermination de point de vue dans notre contexte est adoptée pour le capteur laser plan, les contraintes de visibilité et de qualité sont appliquées à la position de ligne laser sur la surface. Nous proposons de réaliser d'un simulateur de trajectoires de numérisation. Ce simulateur nous permet d'identifier les zones de la pièce correctement numérisées en termes des critères de visibilité et de qualité. Il permet à la fois de valider la trajectoire avant l'exécution de la numérisation sur le système physique et d'aider à la génération de trajectoire de numérisation.
Pour contrôler le temps et la qualité de numérisation, une méthode de planification de la trajectoire de numérisation pour une structure 6 axes, ISOvScan, est proposée. Dans cette méthode, la zone de recouvrement entre deux passes consécutives est constante, l'orientation du capteur en chaque point piloté est gérée afin d'assurer la qualité de numérisation et de maximiser le taux de couverture du laser. La méthode repose sur l'utilisation de la transformation conforme au sens des moindres carrés (Least Squares Conformal Maps-LSCM) pour transformer la surface 3D en un espace 2D. Le calcul de la trajectoire de numérisation peut alors être effectué plus simplement dans cet espace 2D. Comme la cinématique de la machine-outil 5 axes ne permet pas d'appliquer directement la trajectoire 6 axes créée par ISOvScan, les méthodes pour générer une trajectoire du capteur laser adaptée à la machine-outil 5-axes sont proposées dans ces travaux. Une application de mesure 5 axes avec capteur laser-plan est réalisée pour valider cette trajectoire de numérisation.

Title : Adaptive scanning strategies for on-machine part inspection

Keywords : On-machine, Scan path, Laser plane sensor, Overlap, 5-Axis Machine-tool

Abstract : In the context of the inspection of the machining process, the integration of the measurement operations into the manufacturing process allows to realize the corrective actions applied to the manufacturing operations and thus to reduce the manufacturing cycle time. Our objective in this work is to realize an on-machine measurement (OMM) by laser plane sensor in a 5-axis machine-tool. The problem related to OMM concerns the proposition of a scan path planning method that results from a compromise between the measurement time and the quality of the data acquired.
First of all, we propose a description format of the parameters of the sensor path allowing to integrate the orientation of the spindle in the machine. As the determination of view point in our context is adopted for the laser plane sensor, the visibility and quality constraints are applied to the digitizing laser line position on the surface. We propose to realize a simulator of digitizing path. This simulator allows us to identify correctly the areas of the digitized part in terms of the scanning visibility and quality. It allows to validate the scan path before executing the scan on the physical system and to help the scan path generation.
To control the scan time and quality, a scan path planning method for a 6-axis structure, ISOvScan, is proposed. In this method, the overlap zone between two consecutive passes is constant, the orientation of the sensor at each driven point is managed in order to ensure the scanning quality and to maximize the coverage rate of the laser. The method relies on the use of the Least Squares Conformal Maps (LSCM) to transform the 3D surface into a 2D space. The calculation of the scan path can then be done more simply in this 2D space. Since the kinematics of the machine tool does not enable to directly apply the 6 axes scan path created by ISOvScan, the methods for generating a laser scan path adapted to 5-axis machine-tool are proposed in this work. A 5-axis measurement application with laser-plane sensor is performed to validate this adapted scan path.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France