



HAL
open science

Inspection dimensionnelle - Une approche multi-capteurs pour la vérification des spécifications géométriques

Sif Eddine Sadaoui

► To cite this version:

Sif Eddine Sadaoui. Inspection dimensionnelle - Une approche multi-capteurs pour la vérification des spécifications géométriques. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLN020 . tel-02186114

HAL Id: tel-02186114

<https://theses.hal.science/tel-02186114>

Submitted on 17 Jul 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.

Inspection dimensionnelle - Une approche multi-capteurs pour la vérification des spécifications géométriques

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

Ecole doctorale n°579 Dénomination (SMEMAG)
Spécialité de doctorat : Génie Mécanique

Thèse présentée et soutenue à Cachan, le 09 Juillet 2019, par

SIF EDDINE SADAoui

Composition du Jury :

M. Philippe VERON Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech	Président
M. Yann QUINSAT Professeur agrégé-HDR, ENS Paris-Saclay	Examineur
M. Jean-François FONTAINE Professeur des Universités, Université de Bourgogne	Rapporteur
M. Alex BALLU Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux	Rapporteur
Mme. Claire LARTIGUE Professeur des Universités, Université Paris-Sud	Directeur de thèse
M. Charyar MEHDI-SOUZANI Maître de Conférence, Université Paris 13	Co-encadrant de thèse
M. Jean-Louis GRZESIAK Directeur technique, Renishaw France	Invité

Remerciements

Mes travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été menés au sein du Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (*LURPA*) dans l'équipe Géométrie tridimensionnelle des pièces et des mécanismes (Géo3D), Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay (ancienne ENS Cachan). Je tiens à remercier le directeur du laboratoire, Monsieur Christophe Tournier et les responsables successifs de l'équipe Géo3D ; Messieurs Yann Quinsat et Charyar Mehdi-Souzani, ils m'ont accueilli chaleureusement au *LURPA* et m'ont permis de mener à bien mes travaux de recherche.

Je tiens particulièrement à adresser mes remerciements aux membres de jury. Je remercie Monsieur Philippe Veron qui a accepté de présider ce jury. Je tiens à remercier également Messieurs Jean-François Fontaine et Alex Ballu qui ont rapporté sur cette thèse avec beaucoup de minutie, ce qui m'a permis d'approfondir mes travaux et d'avoir plus de perspectives. Mes remerciements vont également à Messieurs Yann Quinsat et Jean-Louis Grzesiak qui ont examiné ces travaux avec rigueur.

Ces travaux de thèse n'auraient pas été possibles sans la direction et le soutien de Madame Claire Lartigue. Elle a été très impliquée dans ces travaux. Je tiens à la remercier pour toutes ces années de collaboration constructives et de soutien humain ainsi que pour sa disponibilité.

J'exprime toute ma reconnaissance envers Monsieur Charyar Mehdi-Souzani pour sa grande disponibilité et sa forte implication aussi bien sur les aspects scientifiques et techniques que sur l'aspect humain. J'ai beaucoup apprécié travailler à ses côtés et j'espère pouvoir collaborer avec lui pour de futurs travaux.

Je tiens également à remercier l'équipe de Renishaw qui m'a ouvert ses portes et a apporté des solutions à mes différentes interrogations.

Un grand remerciement à tous les membres du laboratoire, permanents, anciens et futurs docteurs pour leurs conseils, leur soutien et leurs encouragements ainsi que le temps passé ensemble durant ces années.

Je tiens à remercier ma famille et ma belle-famille et en particulier mes parents qui

m'ont épaulé durant toutes ces années. Merci également à tous ceux qui se sont déplacés, parfois de loin, le jour de ma soutenance.

Enfin, je tiens à exprimer un grand merci à ma femme Myriam qui a su m'épauler, m'encourager, me soutenir et tant de choses. Merci pour tout ce que tu as pu faire pour moi.

Table des matières

Introduction Générale	i
Table des matières	iii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	xv
Introduction Générale	1
1 Positionnement scientifique	5
1.1 Introduction	7
1.2 Inspection dimensionnelle multi-capteurs	7
1.3 Inspection dimensionnelle combinant un capteur laser-plan et un palpeur	10
1.4 Évaluation des performances des capteurs laser-plan	11
1.4.1 Concept de qualité associée aux capteurs laser-plan	11
1.4.2 Paramètres influant sur la qualité	12
1.4.3 Protocole d'évaluation de la qualité	15
1.4.4 Temps de mesure	17
1.4.5 Accessibilité du capteur laser-plan	17
1.4.6 Synthèse	19
1.5 Sélection des capteurs	19
1.6 Planification des trajectoires	23
1.6.1 Planification de la trajectoire du capteur laser-plan	23
1.6.2 Planification de la trajectoire du palpeur	26
1.6.3 Étude des problèmes de collision	29
1.7 Traitement des données	32
1.7.1 Pré-traitement	33
1.7.2 Fusion	35

1.8	Synthèse et Problématique	37
1.9	Démarche proposée	39
2	Génération des séquences d'opérations	43
2.1	Introduction	45
2.2	Qualification des capteurs	47
2.2.1	Caractérisation de la fenêtre de mesure (FOV) du capteur laser-plan	47
2.2.2	Évaluation du bruit	48
2.2.3	Évaluation de la justesse	49
2.2.4	Évaluation des erreurs de remise en position et de changement d'orientations du capteur laser-plan	51
2.2.5	Évaluation des performances du palpeur	52
2.2.6	Synthèse	53
2.3	Extraction des données d'inspection	54
2.3.1	Définition de la notion d'entité d'inspection	56
2.3.2	Assignment d'attributs aux entités	58
2.3.3	Organisation de la base de données des entités d'inspection	59
2.3.4	Application de la démarche d'extraction des données d'inspection	61
2.4	Choix d'un ensemble d'orientations du scanner	63
2.4.1	Méthodologie de sélection des orientations	63
2.4.2	Principe de génération de la liste des orientations	63
2.4.3	Démarche proposée	64
2.5	Génération des groupes d'entités	66
2.5.1	Principe de génération des groupes d'entités	68
2.5.2	Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan	69
2.5.3	Évaluation de l'aptitude du palpeur	81
2.6	Application de la démarche	84
2.6.1	Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan dans l' $Ornt_1$	85
2.6.2	Évaluation de l'aptitude du palpeur dans l' $Ornt_1$	85
2.6.3	Séquence d'opérations	86
2.7	Conclusion	88
3	Planification des trajectoires et exécution	91
3.1	Introduction	93

3.2	Approche proposée	94
3.3	Planification des trajectoires du capteur laser-plan	94
3.3.1	Évaluation de la plage des distances de numérisation admissibles	97
3.3.2	Évaluation des niveaux de trajectoire	99
3.3.3	Définition des points de passage	103
3.3.4	Évitement des collisions	105
3.3.5	Application	106
3.4	Planification des trajectoires du palpeur	106
3.4.1	Définition du nombre de points de mesure	108
3.4.2	Distributions des points de mesure	108
3.4.3	Définition des points d'accostage et des directions d'accostage	111
3.4.4	Définition de la séquence de points de mesure	112
3.4.5	Application	113
3.5	Exécution de la gamme d'inspection	114
3.5.1	Description de la chaîne d'exécution	116
3.5.2	Calcul de la trajectoire du scanner	117
3.5.3	Génération d'un fichier " <i>trajectoire</i> " contenant la gamme d'inspection	119
3.5.4	Export des données de mesure	121
3.6	Conclusion	122
4	Traitement des données pour l'évaluation des spécifications	125
4.1	Introduction	127
4.2	Démarche proposée	128
4.3	Pré-traitement des données de mesure avec le capteur laser-plan	129
4.4	Mise en cohérence (Unification) des nuages de points	132
4.4.1	Unification par application d'une translation	134
4.4.2	Évaluation de la méthode d'unification	134
4.4.3	Application sur le cas d'étude	136
4.5	Fusion des données	136
4.6	Évaluation des spécifications	139
4.7	Conclusion	143
	Conclusions & Perspectives	147

Bibliographie	151
A Caractéristiques techniques des capteurs et de la cellule de mesure	163
B Qualification des capteurs	169
B.1 Caractérisation de la fenêtre de mesure <i>FOV</i> du capteur laser-plan . . .	171
B.2 Évaluation du bruit et de justesse de mesure du capteur laser-plan	174
B.2.1 Évaluation du bruit	174
B.2.2 Évaluation de la justesse	175
B.3 Évaluation des erreurs de remise en position et de changement d'orienta- tions du capteur laser-plan	177
B.4 Évaluation des performances du palpeur à contact	179
C Programme d'exécution de la gamme d'inspection de la pièce test	181
D Rapport d'inspection de référence de la pièce test	191

Table des figures

1.1	Processus général d’inspection 3D multi-systèmes [Audfray, 2012].	9
1.2	Densité et temps de mesure avec un capteur laser-plan et un palpeur [Audfray, 2012].	10
1.3	Inspection dimensionnelle combinant un palpeur et un capteur laser-plan [Zhao et al., 2012].	11
1.4	Évaluation du bruit de mesure.	12
1.5	Évaluation de la justesse de mesure entre deux plans [Audfray, 2012]. . .	13
1.6	Distance et angles de numérisation [Audfray, 2012].	13
1.7	Bruit en fonction de distance de numérisation (capteur laser-plan de type <i>Aquilon</i>) [Sadaoui, 2016].	14
1.8	Évaluation du bruit en fonction de distance de numérisation [Audfray, 2012, Mehdi-Souzani et al., 2016].	16
1.9	Évaluation du bruit en fonction de l’angle de numérisation [Audfray, 2012, Mehdi-Souzani et al., 2016].	17
1.10	(a) Représentation du Rapport de Largeur Maximale Mesurée (RLMM) dans un cylindre [Boeckmans et al., 2014], (b) Évaluation de la surface mesurée d’un cylindre interne [Mehdi-Souzani et al., 2016].	18
1.11	Évolution de l’accessibilité d’un cylindre intérieur en fonction du nombre d’orientations [Audfray, 2012].	18
1.12	Classification des systèmes en fonction de leur résolution et de leur étendue de mesure [Weckenmann et al., 2009].	20
1.13	Principe du choix du système de mesure [Mohib et al., 2009].	22
1.14	Définition de la trajectoire du capteur laser-plan [Lartigue et al., 2014]. . .	23
1.15	(a) Carte de visibilité [Derigent et al., 2007], (b) Représentation des orientations de vue pour tous les voxels [Lartigue et al., 2014]	25

1.16	Planification des trajectoires du capteur laser-plan [Mahmud et al., 2011]	
	(a) Ensemble de directions de mesure possibles (720 orientations), (b)	
	Génération de points de vues.	25
1.17	Planification des trajectoires du capteur laser-plan [Zhao et al., 2012] (a)	
	Niveaux de trajectoire, (b) Lignes de numérisation et lignes de connexion.	26
1.18	Directions d'Approche du Palpeur pour une entité de type poche [Cho et al., 2005].	27
1.19	Stratégies de distribution des points de mesure.	29
1.20	Collision palpeur/pièce [Cho et al., 2004b, Al-Ahmari et al., 2016].	30
1.21	Études des problèmes de collision [Han et al., 2017].	31
1.22	Enveloppe convexe pour générer des trajectoires sans collisions [Li et al., 2018].	31
1.23	Modèle sphérique d'analyse de collision [Han et al., 2018].	32
1.24	Caractéristiques d'un nuage de points mesuré avec un capteur laser-plan [Mehdi-Souzani, 2006].	33
1.25	Correction du nuage de points du capteur laser-plan utilisant la mesure avec palpeur ; points rouges : mesure avec capteur laser-plan, ligne rouge : modèle gaussien associé au nuage de points du capteur laser, points bleus : mesure avec palpeur, ligne bleue : modèle de fusion, ligne noire : modèle nominal [Colosimo et al., 2015].	36
1.26	Démarche du fusion du nuage de points mesuré avec le capteur laser-plan (points verts) avec le nuage de points mesuré avec le palpeur (points noirs) [Rak et al., 2016].	37
1.27	(a) MMT ; (b) Scanner 3D composé d'un capteur laser-plan et un palpeur.	40
1.28	Approche globale d'inspection dimensionnelle.	41
1.29	Définition de la gamme d'inspection multi-capteurs.	41
1.30	Dessin de définition de la pièce test.	42
2.1	Génération des séquences d'opérations.	45
2.2	Approche proposée pour la génération des séquences d'opérations.	46
2.3	(a) Orientations de la ligne laser et des caméras ; (b) Dimensions de la fenêtre de mesure et les distances de numérisation.	48
2.4	Bruit en fonction de la distance de numérisation.	49

2.5	Bruit en fonction de l'angle de numérisation.	49
2.6	Justesse en fonction de la distance de numérisation.	50
2.7	Justesse relative en fonction de la distance de numérisation.	50
2.8	(a) Remise en position du capteur laser-plan [Audfray, 2012]; (b) Résultats d'évaluation des erreurs de remises en position.	51
2.9	Configurations du capteur pour l'évaluation des erreurs de changement d'orientations.	52
2.10	Évaluation des erreurs de changement d'orientations du capteur laser-plan.	52
2.11	Principe d'évaluation de la répétabilité de mesure avec un palpeur <i>TP2</i> dans les trois directions.	53
2.12	Exemple d'une spécification de localisation.	54
2.13	Classification des entités.	55
2.14	Exemples d'entités d'inspection : (a) Plans parallèles; (b) Motif d'entités; (c) Entité composée.	57
2.15	Exemple d'entités d'inspection avec les entités de mesure associées.	57
2.16	Entités de mesure et leurs attributs : (a) point; (b) ligne; (c) cercle; (d) plan; (e) cône; (f) cylindre; (g) demi-sphère; (h) courbe.	59
2.17	Repères entité de mesure <i>REM</i> (O_f, X_f, Y_f, Z_f).	59
2.18	Schéma relationnel de la base de données	60
2.19	Dessin de définition de la pièce test	61
2.20	Extraction des entités d'inspection de la pièce test.	62
2.21	(a) Analyse de cohérence; (b) Angle de visibilité du capteur laser-plan.	65
2.22	Identification des orientations du scanner pour le cas de la pièce test.	67
2.23	Algorithme de génération des groupes d'entités.	68
2.24	(a) Orientation du faisceau laser et orientations des caméras; (b) Modélisation de l'interruption du faisceau laser dans une orientation N_l par une facette $f_k : \{P'_1 P'_2 P'_3\}$ pour accéder à la facette $f_j : \{P_1 P_2 P_3\}$	72
2.25	Modélisation du problème de collision.	73
2.26	(a) Angle de numérisation (α); (b) Bruit en fonction de l'angle de numérisation (modélisation courbe de la Figure. 2.5 -Cubic Spline Interpolation).	74
2.27	Fonctions et ensembles flous des variables d'entrée.	75
2.28	Fonctions d'appartenance des variables d'entrée.	76

2.29	Aptitude du capteur laser-plan en fonction de l'incertitude du capteur et de l'incertitude admissible.	77
2.30	Modélisation de l'aptitude du capteur laser-plan.	78
2.31	Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité de forme complexe (type de spécification : forme, $IT = 0,15mm$) et une entité demi-sphérique (type de spécification : position, $IT = 0,1mm$). . .	80
2.32	Aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité de forme complexe avec une spécification de forme, $IT = 0,05mm$, en utilisant les méthodes classiques.	81
2.33	Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité de forme complexe avec une spécification de forme, $IT = 0,05mm$, utilisant la méthode proposée.	82
2.34	Orientations d'Approche du Palpeur (<i>OAP</i>) et Profondeurs de la Direction d'Approche (<i>PDA</i>).	83
2.35	Accessibilité du palpeur pour la mesure une entité de forme complexe. . .	84
2.36	Implémentation de la démarche proposée pour la génération des séquences d'opérations.	85
2.37	Aptitude du capteur laser-plan dans l' <i>Ornt</i> ₁ . Vert : Surfaces mesurées avec le capteur laser-plan ; Rouge : surfaces non mesurées.	86
2.38	Aptitude du palpeur dans l' <i>Ornt</i> ₁ . Vert : Surfaces mesurées avec le capteur laser-plan ; Bleu : Surfaces mesurées avec le palpeur ; Rouge : surfaces non mesurées.	87
2.39	Séquence d'opérations. Vert : Surfaces mesurées avec le capteur laser-plan ; Bleu : Surfaces mesurées avec le palpeur ; Rouge : surfaces non mesurées.	88
3.1	Deuxième étape de l'approche globale d'inspection.	93
3.2	Planification des trajectoires du scanner.	95
3.3	Définition de la trajectoire du capteur laser-plan [Lartigue et al., 2014]. . .	95
3.4	Planification de la trajectoire du capteur laser-plan dans des niveaux des trajectoires [Zhao et al., 2012].	96
3.5	Planification de la trajectoire du capteur laser-plan dans des niveaux des trajectoires.	97

3.6	(a) Fenêtre de mesure FOV ; (b) Plage de distances de numérisation . . .	98
3.7	(a) Dimensions de la FOV ; (b) Fenêtre de mesure FOV admissible. . . .	99
3.8	Plage des distances de numérisation admissibles.	100
3.9	Exemple de niveaux de trajectoire	100
3.10	Rectangle englobant les points d'intersection.	102
3.11	Génération de niveaux des trajectoires.	103
3.12	Démarche de définition des points de passage.	104
3.13	Planification de la trajectoire du capteur laser-plan dans des niveaux des trajectoires.	104
3.14	Modélisation du problème de collision entre deux points de passage. . . .	105
3.15	Trajectoires du capteur laser-plan dans l' $Ornt_1$	107
3.16	Trajectoires du capteur laser-plan.	107
3.17	Distributions des points de mesure : (a) : plan, (b) cône, (c) : cylindre ; (c) : demi-sphère.	110
3.18	Algorithme de distributions des points de mesure pour les formes complexes.	111
3.19	Points de mesure, point d'accostage, directions d'accostage : (a) : plan, (b) : cylindre interne ; (c) : cylindre externe.	112
3.20	Séquence des points de mesure et de transition :(a) : principe [Li et al., 2018], (b) : plan, (c) : cylindre interne ; (d) :cylindre externe.	113
3.21	Points de mesure, points d'accostage et les directions d'accostage pour les différentes entités de mesure.	114
3.22	Trajectoires du palpeur.	115
3.23	Exécution de la gamme d'inspection sur MMT.	116
3.24	Chaîne d'exécution.	117
3.25	Trajectoire du scanner.	118
3.26	(a) Translation entre le centre de rotation du scanner et le centre de la bille, (b) Transformation entre repère pièce et repère machine.	119
3.27	Structure du fichier " <i>trajectoire</i> ".	120
3.28	Photo de la pièce test usinée.	121
3.29	Résultats de mesure.	121
3.30	Implémentation de la démarche proposée pour la planification des trajec- toires et exécution.	123

4.1	Traitement des données de mesure pour l'évaluation des spécifications. . .	127
4.2	Démarche de traitement des données pour l'évaluation des spécifications.	128
4.3	Nettoyage du nuage de points du capteur laser-plan.	130
4.4	Filtrage du nuage de points du capteur laser-plan.	130
4.5	Suppression des points sur les bords d'une surface plane [Sadaoui, 2016].	131
4.6	Partition du nuage de points du capteur laser-plan.	131
4.7	Résultats de mesure avec le capteur laser-plan et le palpeur par rapport aux repères capteurs (R_p et R_l) et au repère machine (R_m).	132
4.8	Écart entre la sphère mesurée avec le capteur laser-plan et la sphère me- surée avec le palpeur [Martinez et al., 2010b].	133
4.9	Unification par application d'une translation	134
4.10	Mesure d'une surface plane avec un capteur laser-plan et un palpeur . .	135
4.11	Unification des nuages de points de la mesure avec le capteur laser-plan et le palpeur.	137
4.12	Nuage de points associé à une entité partiellement mesurée ; Points verts : mesure avec capteur laser-plan, Points bleus : mesure avec palpeur. . . .	137
4.13	Alignement des 3 plans mesurés avec le capteur laser-plan sur 3 plans mesurés avec le palpeur ; Points verts : mesure avec capteur laser, Points bleus : mesure avec palpeur.	138
4.14	Nuages de points associés aux entités de la pièce test.	140
4.15	Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de planéité de l'entité EI_1	140
4.16	Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de perpendi- cularité de l'entité EI_3	140
4.17	Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de coaxialité de l'entité EI_8 par rapport à l'entité EI_9	141
4.18	Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de localisation de l'entité EI_9	141
4.19	Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de localisation de l'entité EI_6	142
4.20	Rapport d'inspection (Tableau)	143
4.21	Rapport d'inspection (représentation 3D)	144

A.1	Cellule de mesure.	165
A.2	(a) <i>MMT</i> ; (b) Scanner <i>3D</i> composé d'un capteur laser-plan et un capteur à contact.	166
B.1	Inclinaison γ du capteur.	172
B.2	Ligne laser le long de la fenêtre de mesure.	172
B.3	Dimensions de la fenêtre de mesure et les distances de numérisation.. . . .	173
B.4	(a) Caractérisation de la fenêtre de mesure [Audfray, 2012]; (b) : Profil de la fenêtre de mesure dans le plan <i>XoZ</i>	173
B.5	Évaluation du bruit de mesure.	174
B.6	Bruit en fonction de distance de numérisation.	175
B.7	Bruit en fonction de l'angle de numérisation.	175
B.8	Calcul des défauts de justesse sur une hauteur de marche.	176
B.9	Justesse en fonction de la distance de numérisation sur une marche de 5 et 20mm.	176
B.10	Justesse relative ($ e $) en fonction de la distance de numérisation.	177
B.11	(a) Remise en position du capteur laser-plan [Audfray, 2012]; (b) Résultats d'évaluation des erreurs de remises en position.	178
B.12	Configurations du capteur pour l'évaluation des erreurs de changement d'orientations.	178
B.13	Évaluation des erreurs de changement d'orientations du capteur laser-plan.	179
B.14	Principe d'évaluation de la répétabilité de mesure du palpeur <i>TP2</i> dans les trois directions.	179

Liste des tableaux

2.1	Résultats d'évaluation de la répétabilité de mesure avec un palpeur <i>TP2</i> dans les trois directions.	53
2.2	Types d'entités d'inspection et entités de mesure.	56
2.3	Reconnaissance des données d'inspection pour le cas de la Figure. 2.15	57
2.4	Attributs des entités de mesure associées à l'exemple de la Figure. 2.17	60
2.5	Reconnaissance des données d'inspection pour le cas de la pièce test.	62
2.6	Matrice de décision.	77
2.7	Décision sur l'aptitude du capteur laser-plan et classification des entités en fonction de l'aptitude moyenne $A_{moyenne}$	78
2.8	Exemple d'application.	79
2.9	Aptitude du capteur laser-plan dans l' $Ornt_1$	86
2.10	Séquence d'opérations.	87
3.1	Nombre de points de mesure pour chaque type d'entité	108
4.1	Résultats de mesure avec les deux capteurs.	135
4.2	Évaluation de la répétabilité de la justesse relative h dans le cas de mesure avec deux capteurs.	136
A.1	Caractéristiques du scanner.	167
A.2	Caractéristiques sur machine.	167
B.1	Résultats d'évaluation de la répétabilité de mesure du TP2 dans les trois directions.	180

Introduction Générale

L'inspection dimensionnelle, qui consiste en la vérification des spécifications géométriques par rapport à la norme *GPS* (Spécification géométrique des produits) (*ISO 14638*) est une étape essentielle dans le cycle de vie des produits. Si l'inspection dimensionnelle basée sur un palpeur monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle (*MMT*) est un processus largement utilisé et maîtrisé, l'attention se porte désormais sur l'inspection dimensionnelle basée sur la mesure multi-capteurs. Le processus de mesure multi-capteurs utilise des capteurs de différentes technologies et de différentes caractéristiques avec pour objectif d'utiliser au mieux les performances de chacun des capteurs afin d'améliorer les performances du processus global.

Dans quelques études, les capteurs à contact et les capteurs sans contact sont combinés. L'inspection avec des capteurs à contact, tels que les palpeurs, permet d'envisager des résultats avec une faible incertitude de mesure. Cependant, le temps de mesure reste relativement long. Au cours des dernières années, les travaux menés sur les capteurs sans contact ont rendu cette technologie plus répandue dans l'industrie en lieu et place des capteurs à contact pour l'acquisition de forme en particulier pour des applications de rétro-conception. Les capteurs sans contact, tels que les capteurs laser-plan, permettent l'acquisition d'une grande densité de points dans un temps relativement court. Néanmoins, la qualité d'acquisition est affectée par le bruit de mesure. Dans un contexte de mesure multi-capteurs, la combinaison de deux capteurs avec des caractéristiques complémentaires, un capteur laser-plan et un palpeur par exemple, pourrait conduire à un processus d'inspection plus performant notamment en termes de rapidité de mesure. Un des enjeux majeurs reste la mise en œuvre et l'automatisation d'un tel processus pour la vérification des spécifications.

Dans ce contexte, notre objectif est de proposer une approche d'inspection dimensionnelle automatique, combinant un capteur laser-plan et un capteur à contact, conduisant à un rapport d'inspection qui contient les résultats d'évaluation des spécifications. En général, l'inspection avec un palpeur comporte trois étapes principales : la planification

de la gamme d'inspection, l'exécution de la gamme et l'évaluation des spécifications. La gamme d'inspection est constituée d'une séquence d'opérations définissant les orientations du palpeur et les trajectoires de mesure pour chaque surface à mesurer portant des spécifications.

Dans le cas d'inspection avec deux capteurs, une étape de sélection du capteur adéquat est nécessaire afin de générer la séquence d'opérations. Compte tenu de la différence de technologies (et de performances de mesure) de chacun des deux capteurs, la sélection du capteur approprié pour chaque surface à mesurer s'appuie sur des critères de performance et de qualité. Cela nécessite la qualification et la connaissance préalables des performances des capteurs d'une part, et la connaissance des informations relatives aux surfaces et aux spécifications d'autre part.

La génération de la trajectoire combinée des deux capteurs de différente technologie est une problématique complexe. D'une part, il s'agit de déterminer pour chaque capteur la séquence des points définissant la trajectoire de chacun d'eux, et d'autre part il s'agit de transformer ces trajectoires, calculées dans le repère du capteur, en une trajectoire commune qui sera exécutée sur la *MMT*.

Enfin, les données de mesure acquises par chaque capteur sont des données dites hétérogènes, issues de deux technologies de capteur différentes. Elles sont souvent de densité et de qualité différentes, ce qui rend leur exploitation pour des applications métrologiques plus difficile. Le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser est une représentation globale de l'ensemble des surfaces. Tandis que la mesure issue du palpeur est constituée d'ensembles de points associés à chacune des surfaces. Des étapes de traitement incluant la fusion des données hétérogènes peuvent s'avérer nécessaires.

Ainsi, en réponse aux problématiques évoquées ci-dessus, nous proposons une approche globale d'inspection multi-capteurs composée de 3 étapes majeures. La première consiste à définir la gamme d'inspection constituée de séquence d'opérations de mesure et de trajectoires. Ce qui change par rapport à une approche avec un seul capteur, c'est l'étape de sélection du capteur adéquat pour mesurer les surfaces qui portent des spécifications. Ainsi, une opération de mesure est la mesure, dans une orientation donnée, d'un ensemble de surfaces. La seconde étape est la définition des trajectoires ainsi que leur exécution sur une machine à mesurer. Cette seconde étape tire parti ici de l'utilisation d'un scanner unique qui porte les deux capteurs. La trajectoire peut ainsi être déterminée par orientation du scanner et pour chaque capteur. La troisième étape est

le traitement des données de mesure pour l'évaluation des spécifications. Il s'agit ici de mettre en cohérence des données hétérogènes dans un premier temps avant l'évaluation des grandeurs métrologiques.

Ce mémoire de thèse est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre fournit une synthèse de l'état de l'art afin de positionner notre travail par rapport aux travaux de littérature autour de l'inspection dimensionnelle multi-capteurs. Peu de travaux ont étudié une approche d'inspection globale combinant un capteur laser-plan et un palpeur, de la reconnaissance des données d'entrée du processus d'inspection à partir du modèle *CAO* jusqu'à la définition de la gamme d'inspection et puis l'évaluation des spécifications. Nous présentons ensuite dans ce chapitre la démarche globale que nous proposons pour répondre aux problématiques posées. Ces travaux ont pour finalité d'étudier la faisabilité d'une démarche d'inspection dimensionnelle combinant un capteur laser-plan et un palpeur.

Le deuxième chapitre présente le processus de génération des séquences d'opérations. Afin d'automatiser ce processus, les informations relatives aux surfaces et aux spécifications à inspecter sont identifiées et une base de données est créée. Pour ce faire, un nouveau concept de l'entité d'inspection, plus adapté au contexte de l'inspection multi-capteurs, est introduit. D'autre part, les performances des deux capteurs sont évaluées selon un protocole de qualification, et une base de données qualifiée répertoriant les données de performance des capteurs est alors établie. Une méthode itérative de génération des séquences des opérations de mesure basée sur l'évaluation des aptitudes des capteurs est introduite. Un modèle original basé sur la logique floue permettant d'évaluer l'aptitude du capteur laser-plan est détaillé dans ce chapitre.

Le troisième chapitre explique la deuxième étape de génération des trajectoires optimales. Dans chaque orientation, une méthode de planification des trajectoires du capteur laser-plan permettant la mesure avec une qualité attendue est proposée, basée sur la définition des niveaux de trajectoire. L'exécution automatique des trajectoires sur une machine *MMT* est réalisée en définissant une trajectoire combinée des deux capteurs tenant en compte la particularité d'avoir deux capteurs montés sur un scanner *3D*.

Le traitement des données hétérogènes issues de la mesure avec les deux capteurs est présenté dans le quatrième chapitre. Les étapes de pré-traitement associées au nuage de points du capteur laser sont décrites. La mise en cohérence et la fusion des données ayant des caractéristiques différentes sont traitées dans ce chapitre afin de pouvoir évaluer les

spécifications et générer le rapport d'inspection. Les résultats d'évaluation sont ensuite comparés à un rapport d'inspection de référence établi par mesure avec un palpeur afin de valider l'approche et démontrer sa pertinence.

Enfin, des conclusions seront tirées de ce travail, et des perspectives pour le poursuivre seront proposées à la fin du mémoire.

Chapitre
1

Positionnement scientifique

1.1 Introduction

Le processus d'inspection consiste à vérifier si la géométrie de la pièce fabriquée se situe dans les limites de tolérance des spécifications. L'inspection multi-capteurs consiste à utiliser des capteurs de technologies différentes, ainsi que des performances différentes, pour effectuer le processus d'inspection. Dans le présent chapitre, nous présentons les travaux existants dans la littérature autour de l'inspection multi-capteurs, et plus particulièrement les études portant sur l'utilisation combinée d'un capteur laser-plan et un palpeur. Nous détaillons par la suite, les problématiques liées à l'inspection multi-capteurs telles que l'évaluation des performances, la sélection des capteurs et la planification des trajectoires. Nous présentons ensuite une synthèse de l'état de l'art et l'approche que nous proposons pour répondre aux problématiques d'inspection avec deux capteurs, cadre de notre étude.

1.2 Inspection dimensionnelle multi-capteurs

Dans le cycle de fabrication, le processus d'inspection dimensionnelle est une étape essentielle afin de s'assurer que la géométrie de la pièce fabriquée répond aux exigences du modèle de conception [Kiraci et al., 2016]. L'inspection dimensionnelle, qui porte sur la vérification de la conformité géométrique des pièces par rapport aux spécifications, est un processus qui comporte deux étapes : la mesure et le traitement des données qui conduit à l'évaluation des spécifications. Généralement, un système de mesure, composé d'un système de déplacement et d'un système d'acquisition, est utilisé pour réaliser l'opération de mesure et fournir une représentation numérique de la pièce sous forme d'un nuage de points. Le système d'acquisition ou capteur permet d'acquérir la géométrie de la surface tandis que le système de déplacement ou porteur permet de déplacer le capteur pour réaliser la mesure. Le processus de traitement consiste à traiter et analyser les données issues de la mesure afin de vérifier la conformité de l'ensemble des spécifications géométriques et dimensionnelles associées.

Traditionnellement, le processus d'inspection s'appuie sur la mesure effectuée à l'aide de machines à mesurer tridimensionnelles (*MMT*) équipées d'un palpeur. Une inspection avec mesure manuelle prend beaucoup de temps et est tributaire de l'influence des facteurs humains [Martins et al., 2005, Zhao et al., 2012]. Ainsi, l'automatisation du

processus d'inspection est une préoccupation majeure.

Partant d'un modèle *CAO* de la pièce et des spécifications associées, un processus d'inspection automatisé consiste en différentes étapes qui doivent conduire à générer la gamme d'inspection qui sera automatiquement exécutée sur la *MMT*. La gamme d'inspection est la séquence des opérations de mesure des surfaces et la trajectoire du capteur permettant de mesurer chacune des surfaces. Une fois que la mesure est faite, le traitement des données conduit à générer un rapport d'inspection. Cho et al. ont proposé une approche d'inspection dimensionnelle basée sur le séquençement des surfaces à mesurer pour générer des gammes d'inspection à partir du modèle *CAO* [Cho et al., 2005]. L'approche est composée de deux niveaux. Le niveau global détermine les séquences des surfaces à mesurer et les orientations du palpeur, tandis que le niveau local définit la trajectoire du palpeur localement pour chaque surface. Kamrani et al. ont proposé une approche de planification d'inspection assistée par ordinateur (*Computer-Aided Inspection Planning-CAIP*) pour générer des gammes d'inspection en utilisant un palpeur monté sur une *MMT* [Kamrani et al., 2015]. Dans leur travail, plus d'attention a été accordée à l'automatisation du processus de reconnaissance des surfaces à inspecter à partir d'un modèle *CAO*. Zhao a proposé un processus de planification d'inspection on-machine dans lequel un nouveau format d'échange de données basé sur celui des normes *STEP* a été utilisé pour générer la gamme d'inspection [Zhao, 2009]. Stojadinovic et al. ont étudié une approche globale et automatique pour la planification d'inspection des pièces prismatiques en appliquant les étapes suivantes : reconnaissance des données d'inspection, analyse d'accessibilité du palpeur, étude d'évitement de collision et planification de la trajectoire du palpeur [Stojadinovic et al., 2016b]. La plupart de ces travaux se sont concentrés uniquement sur l'étape de planification et de génération des trajectoires d'inspection.

Au cours de la dernière décennie, un grand intérêt s'est porté sur le processus d'inspection multi-capteurs (utilisation de deux capteurs ou plus) pour réaliser le processus d'inspection dimensionnelle [Colosimo et al., 2015, Weckenmann et al., 2009]. Dans ce cas, des étapes supplémentaires telles que la sélection des capteurs, la planification des trajectoires des différents capteurs et le traitement des données de mesure (recalage et fusion) sont nécessaires. La génération des opérations d'inspection implique l'association du capteur approprié dans une configuration donnée pour chaque surface à inspecter. L'ordonnancement de ces opérations définit la séquence d'opérations. Audfray a proposé

une approche globale d'inspection 3D multi-systèmes qui se compose de quatre étapes principales : sélection du système de mesure, planification de la trajectoire des capteurs, exécution des mesures, traitement et analyse des données (Figure. 1.1) [Audfray, 2012]. La plupart des études se concentrent sur une ou deux étapes du processus, mais peu s'attachent à l'ensemble du processus global. Ainsi, Weckenmann et al. se sont concentrés sur le traitement des données obtenues à l'aide de différents types de capteurs [Weckenmann et al., 2009]. Mehdi-Souzani et al. se sont intéressés au choix du système de mesure approprié en fonction de l'application souhaitée, à partir d'une base de données de systèmes de mesure qualifiés [Mehdi-Souzani et al., 2016].

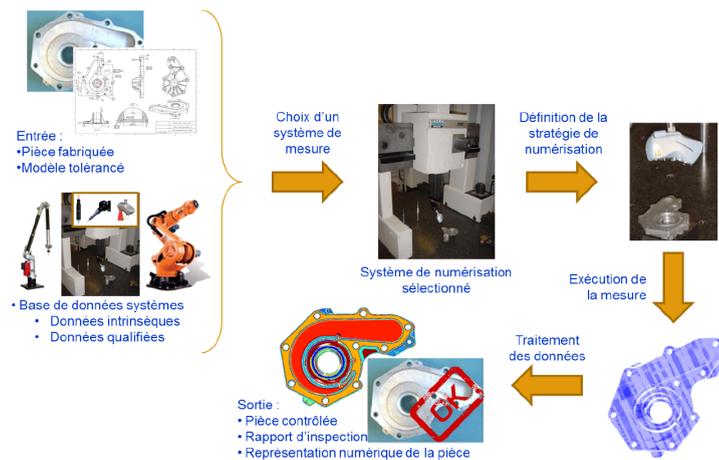


Figure 1.1 – Processus général d'inspection 3D multi-systèmes [Audfray, 2012].

En général, les palpeurs et les capteurs laser-plan sont combinés pour obtenir des informations plus complètes [Zhao et al., 2012]. Les palpeurs sont connus pour leur faible incertitude et bonne répétabilité [Martinez et al., 2010b]. Cependant, l'acquisition des données est lente et la densité des points mesurés est faible (quelques points/seconde). Les capteurs laser-plan permettent l'acquisition de données dans un temps relativement court (plusieurs milliers de points par seconde) [Boeckmans et al., 2015]. Cependant, la qualité d'acquisition est affectée par le bruit de mesure (entre 2 et 10 μm [Mahmud et al., 2011]) et fortement liée à la stratégie de mesure [Martinez et al., 2010a, Mehdi-Souzani et al., 2006] (Figure. 1.2). De plus, les problèmes d'accessibilité de ces capteurs, en particulier pour les formes internes telles que les alésages, doivent être pris en compte. En raison des caractéristiques complémentaires des deux capteurs, leur combinaison pourrait être un avantage pour le processus d'inspection.

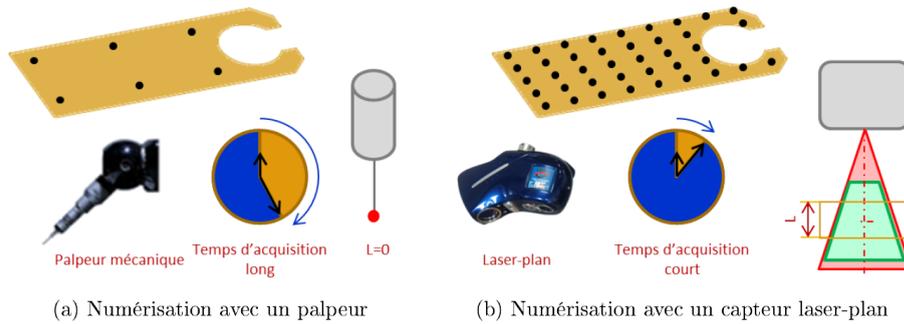


Figure 1.2 – Densité et temps de mesure avec un capteur laser-plan et un palpeur [Audfray, 2012].

1.3 Inspection dimensionnelle combinant un capteur laser-plan et un palpeur

Peu de travaux ont été rapportés concernant un processus complet d’inspection dimensionnelle combinant un capteur laser-plan et un palpeur. La plupart des auteurs s’attachent à définir la gamme d’inspection, c’est-à-dire la génération des séquences de mesure, voire dans certains cas, la planification des trajectoires de mesure. Ainsi, dans [Mohib et al., 2009], seules la sélection du capteur et la planification des trajectoires sont traitées. Le choix du capteur approprié pour mesurer une surface s’effectue selon un système basé sur des connaissances et des règles s’appuyant sur les performances du capteur. Ensuite, une formalisation par un problème du voyageur de commerce (Travel Salesperson Problem - *TSP*) est considérée pour déterminer la séquence de mesure.

D’autres auteurs ont développé un processus automatisé de planification d’inspection dimensionnelle [Zhao et al., 2012]. Le choix du capteur approprié pour mesurer une surface a été effectué selon des règles relatives : aux caractéristiques des capteurs disponibles (incertitude de mesure et autres performances), à la géométrie de la pièce et à l’environnement de mesure comme la couleur et le matériau. Les surfaces à mesurer sont ensuite divisées en deux groupes en fonction du capteur sélectionné. Pour chaque groupe, une planification de trajectoire est générée.

Ces quelques études rapportent qu’une étape essentielle concerne l’évaluation des performances du capteur laser-plan qui dépendent généralement de la configuration capteur/pièce. Les performances du capteur laser-plan sont ensuite utilisées afin de sélectionner la configuration capteur/pièce appropriée qui sert de support à la planification des trajectoires. Dans la suite, nous détaillons quelques-unes des méthodes proposées

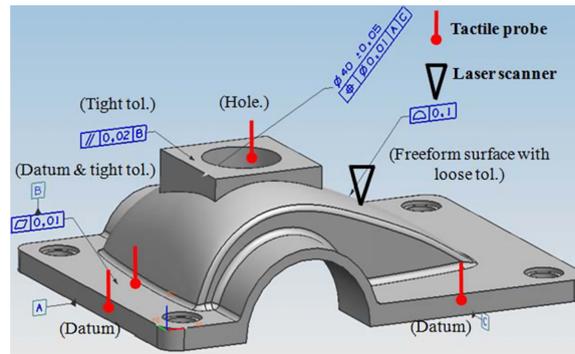


Figure 1.3 – Inspection dimensionnelle combinant un palpeur et un capteur laser-plan [Zhao et al., 2012].

dans la littérature concernant l'évaluation des performances, la sélection des capteurs, la planification des trajectoires et le traitement des données pour l'évaluation des spécifications.

1.4 Évaluation des performances des capteurs laser-plan

Avant de procéder à la planification de la gamme d'inspection, les performances des capteurs doivent être évaluées. La notion de performance de mesure est liée à la qualité et le temps de mesure. L'influence de la technologie des capteurs laser-plan sur la qualité de mesure est plus significative que celle des palpeurs. Ainsi, plusieurs travaux de littérature se sont focalisés sur l'évaluation des performances des capteurs laser-plan. En termes de temps de mesure, la mesure avec les capteurs laser est caractérisée par un faible temps de mesure en comparaison avec les palpeurs.

1.4.1 Concept de qualité associée aux capteurs laser-plan

En l'absence de normes, la qualité de mesure avec un capteur laser-plan est exprimée par des indicateurs de qualité, généralement évalués par des mesures d'artefacts. Le bruit et la justesse sont couramment utilisés pour caractériser la qualité des données de mesure. Ces indicateurs sont introduits dans [Hoppe et al., 1992], puis définis dans [Prieto, 2000], [Contri et al., 2002] et repris dans [Zuquete-Guarato et al., 2012], [Audfray et al., 2012], [Mehdi-Souzani et al., 2016].

Les indicateurs de bruit et de justesse sont définis comme suit :

- Le bruit δ , qui traduit l'erreur aléatoire, est un paramètre qui permet d'évaluer

la dispersion des points mesurés par rapport à un élément théorique associé (Figure. 1.4)(Équation. 1.1).

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)^2} \quad (1.1)$$

Où ; e_i sont les écarts des points par rapport à l'élément théorique associé, \bar{e}_i est la moyenne des écarts, n est le nombre de points et k est un facteur d'élargissement (généralement égal à 1). Dans le cas d'une association d'un plan avec le critère des moindres carrés, \bar{e}_i est nulle.

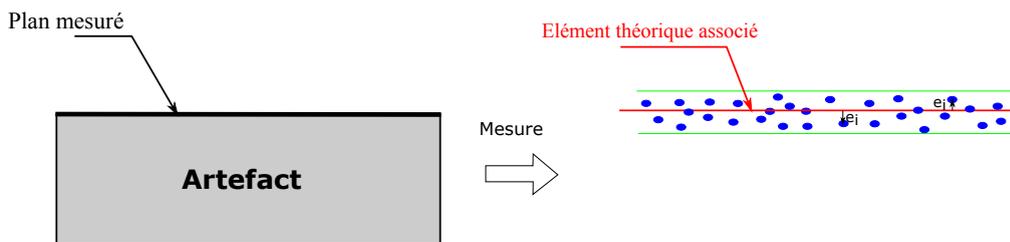


Figure 1.4 – Évaluation du bruit de mesure.

- La justesse e , qui traduit l'erreur systématique, est définie par la différence entre une valeur considérée comme vraie et la valeur mesurée. Elle est évaluée le plus souvent par la mesure d'une distance entre deux éléments, par exemple deux centres de sphères. Dans le cas de mesure d'une distance entre deux plans, la justesse e est donnée par l'Équation. 1.2 (Figure. 1.5) [Bourdet et al., 2005].

$$e = \frac{h_1 + h_2}{2} - h_0 = \frac{1}{2} \cdot (|\overrightarrow{A_1 A_2} \cdot \overrightarrow{N_1}| + |\overrightarrow{A_2 A_1} \cdot \overrightarrow{N_2}|) - h_0 \quad (1.2)$$

Où ; A_1 est le barycentre du nuage de points du plan 1, A_2 est le barycentre du nuage de points du plan 2, N_1 est la normale du plan des moindres carrés associé au nuage de points du plan 1, N_2 est la normale du plan des moindres carrés associé au nuage de point du plan 2 et h_0 est la distance de référence (certifiée).

1.4.2 Paramètres influant sur la qualité

La qualité de mesure avec un capteur laser-plan est affectée par plusieurs paramètres. Plusieurs travaux ont étudié les paramètres influents sur la qualité de mesure. Récemment, Gerbino et al. ont classé les paramètres influant sur la qualité de mesure en trois catégories [Gerbino et al., 2016] : les paramètres internes du capteur (résolu-

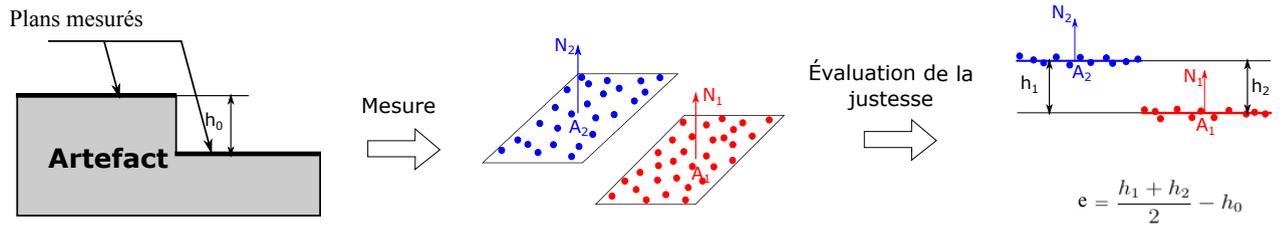


Figure 1.5 – Évaluation de la justesse de mesure entre deux plans [Audfray, 2012].

tion et anisotropie de la matrice CCD), les paramètres extérieurs liés à l’environnement (éclairage, brillance de la surface, temps de chauffe du capteur) et les paramètres relatifs à la stratégie de mesure, en particulier l’ensemble des configurations capteur/pièce définissant la trajectoire de mesure. Ces derniers paramètres relatifs à la stratégie sont les plus influant par rapport aux autres. Il s’agit de : la distance de numérisation d , l’angle de numérisation principal α et l’angle de numérisation secondaire β [Audfray, 2012] (Figure. 1.6) :

- L’angle de numérisation principal α : est l’angle entre la normale à la surface et le rayon émis par la source lumineuse dans le plan de triangulation.
- L’angle de numérisation secondaire β : est l’angle entre le rayon émis et la normale à la surface dans le plan orthogonal au plan de triangulation.
- La distance de numérisation d : est la distance entre la source lumineuse du capteur et la surface.

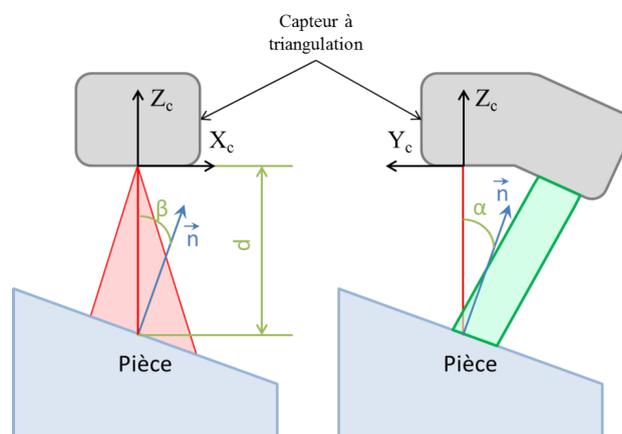


Figure 1.6 – Distance et angles de numérisation [Audfray, 2012].

Dans ces travaux [Prieto, 2000] et [Contri et al., 2002], les auteurs ont mis en avant la configuration capteur/pièce définie par la distance et les angles de numérisation comme

étant un facteur important sur la qualité des données. Lorsque la distance et/ou les angles de numérisation varient, le bruit et la justesse évoluent. Par exemple, la Figure 1.7 présente l'évolution du bruit de mesure en fonction de la distance de numérisation pour un capteur laser-plan de type *Aquilon* [Sadaoui, 2016]. La figure montre que le bruit est fortement dépendant de la distance de numérisation. L'influence de variation de l'angle de numérisation secondaire sur la qualité de mesure est négligeable devant l'influence de la distance et l'angle de numérisation principale [Mehdi-Souzani, 2006]. Ainsi, les paramètres de configuration de capteur majoritairement pris en compte sont la distance et l'angle de numérisation (principal).

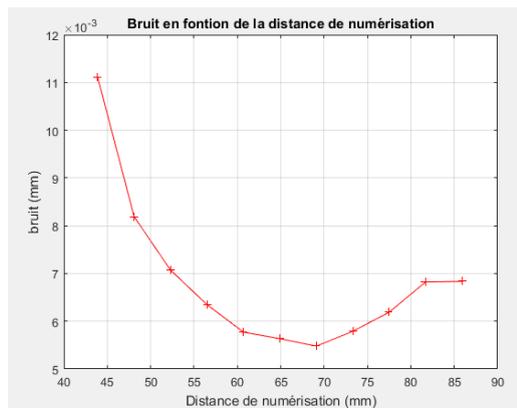


Figure 1.7 – Bruit en fonction de distance de numérisation (capteur laser-plan de type *Aquilon*) [Sadaoui, 2016].

Un autre paramètre qui influence la qualité de mesure avec un capteur laser-plan est le changement d'orientation. En règle générale, une fois que toutes les orientations du capteur sont calibrées, l'étape de recalibration n'est pas indispensable à chaque changement d'orientation. Néanmoins, des défauts de recalage des données, issues des acquisitions en utilisant différentes orientations, sont présents. Audfray distingue deux types d'erreurs de changement d'orientation [Audfray, 2012] : les erreurs de repositionnement et les erreurs de recalage. Les erreurs de repositionnement sont introduites par une remise en position du capteur en changeant l'orientation puis en revenant à la même orientation initiale sans refaire la calibration. Les erreurs de recalage représentent les défauts de recalage des acquisitions dans des configurations différentes pour lesquelles la calibration est réalisée à chaque changement d'orientation. Dans le travail de [Martinez et al., 2010a], deux stratégies sont testées : une stratégie de mesure avec une seule orientation, la deuxième avec deux orientations. Les résultats de comparaison de la surface recons-

truite par rapport à une surface de référence mesurée avec un palpeur montrent que la première stratégie de mesure avec une seule orientation présente un minimum d'écarts par rapport à la surface de référence. Mahmud et al. ont développé une stratégie de mesure avec un minimum d'orientations afin d'avoir une meilleure qualité de données [Mahmud et al., 2011].

1.4.3 Protocole d'évaluation de la qualité

Les méthodes d'évaluation des performances des capteurs laser-plan peuvent être classées selon deux catégories [Audfray, 2012] :

- Les méthodes d'évaluation par comparaison : dans lesquelles une mesure avec un autre système de meilleure qualité est utilisée comme référence. Généralement, la mesure avec le palpeur est considérée comme référence.
- Les méthodes d'évaluation par artefacts : dans lesquelles des artefacts de mesure sont utilisés pour évaluer la qualité.

En ce qui concerne les méthodes d'évaluation par comparaison, certains travaux ont porté sur la comparaison des performances du capteur laser-plan avec celle du palpeur à contact que ce soit à l'échelle d'artefacts calibrés de petites dimensions [Martinez et al., 2010b] ou à des échelles plus grandes (véhicule) [Kiraci et al., 2016]. Dans leur travail, Martinez et al. proposent une méthode d'évaluation basée sur l'évaluation des écarts [Martinez et al., 2010b]. Dans leur travail, les deux nuages de points obtenus par le capteur laser-plan et le palpeur sont recalés dans un système de référence commun. Les écarts de la surface reconstruite avec le nuage de points issus du laser-plan par rapport à celle reconstruite avec le nuage de points issus du palpeur sont ensuite calculés avec le logiciel *Geomagic qualify*© . La qualité de mesure avec le capteur laser-plan est ensuite évaluée par la valeur moyenne des écarts.

Pour la deuxième catégorie des méthodes d'évaluation des performances par artefacts, [Prieto, 2000], [Prieto et al., 2002] ont mis en avant l'importance d'évaluer l'influence de la configuration du capteur sur les indicateurs de qualité de mesure en utilisant des artefacts. [Bourdet et al., 2005] puis [Mehdi-Souzani, 2006] ont proposé un protocole d'évaluation du bruit et de la justesse en fonction de la distance et l'angle de numérisation. Pour l'évaluation du bruit en fonction de l'angle, le capteur étant fixé dans une orientation verticale constante et un artefact constitué de différents plans d'orientations

connues est mesuré. En utilisant un artefact plan, Gestel et al. proposent un protocole d'évaluation du bruit et de la justesse faisant varier la distance de numérisation puis l'angle de numérisation [Gestel et al., 2009]. Audfray a développé un protocole de qualification et d'évaluation des performances des systèmes de mesure optiques *Qualipso* [Audfray, 2012] plus générique qui permet de :

- Caractériser la fenêtre de mesure.
- Évaluer les erreurs de remises en position.
- Évaluer les erreurs de recalage des données.
- Évaluer le bruit en fonction de la distance de numérisation (Figure. 1.8).
- Évaluer le bruit en fonction de l'angle de numérisation (Figure. 1.9).
- Évaluer la justesse en fonction de la distance de numérisation

L'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation consiste à numériser un artefact plan à différentes distances en maintenant l'angle de numérisation constant. Pour chaque numérisation, le bruit de mesure est évalué par l'Équation. 1.1 (Figure. 1.8). Pour évaluer le bruit en fonction de l'angle de numérisation, le capteur est maintenu dans une orientation verticale fixe. L'angle de numérisation est modifié en mettant des empilements des cales étalons en dessous d'une règle Sinus (Figure. 1.9). Pour chaque angle de numérisation, l'artefact plan est numérisé et le bruit est évalué.

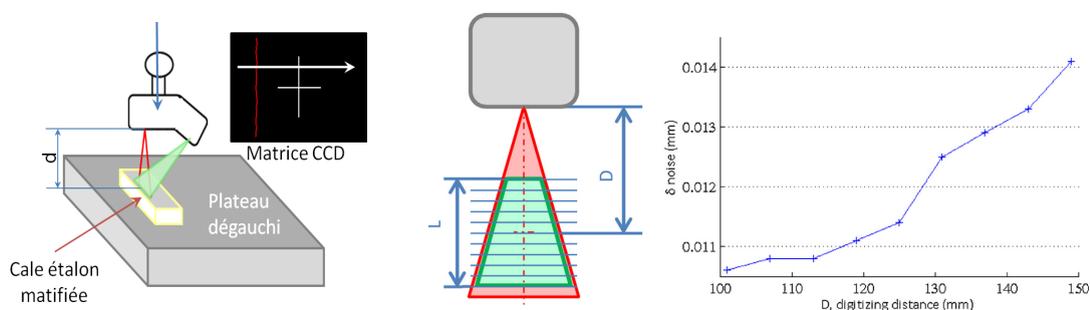


Figure 1.8 – Évaluation du bruit en fonction de distance de numérisation [Audfray, 2012, Mehdi-Souzani et al., 2016].

Ce protocole *Qualipso* peut être appliqué à différents types de capteurs laser, et conduit ainsi à la définition d'une base de données qualifiée contenant les résultats de qualification.

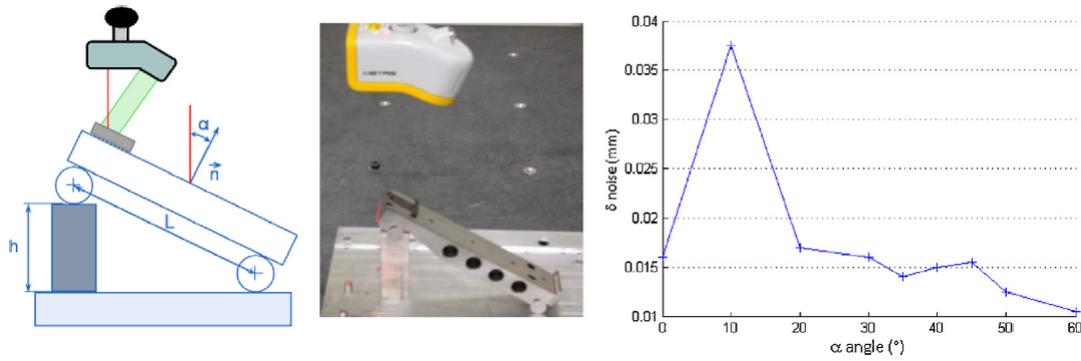


Figure 1.9 – Évaluation du bruit en fonction de l’angle de numérisation [Audfray, 2012, Mehdi-Souzani et al., 2016].

1.4.4 Temps de mesure

Le temps de mesure est un paramètre important dans le cycle de fabrication. Les capteurs laser sont caractérisés par un faible temps de mesure évalué à travers la vitesse de numérisation. Afin de caractériser la qualité de la mesure tenant compte du temps de mesure, des indicateurs additionnels tels que la densité et la complétude sont utilisés dans [Contri et al., 2002], [Audfray, 2012] et [Zuquete Guarato, 2013] pour caractériser la performance des capteurs laser-plan. Lorsque la densité et/ou la complétude des données de mesure sont imposées, la vitesse de numérisation est adaptée pour répondre aux besoins en termes de densité et de complétude.

Le paramètre de changement d’orientations a une influence directe sur le temps de mesure. Mohib et al. proposent une stratégie de planification d’inspection prenant compte la minimisation du temps de non-numérisation pris lors du changement d’orientation [Mohib et al., 2009].

1.4.5 Accessibilité du capteur laser-plan

La mesure avec le capteur laser-plan est caractérisée par le problème d’accessibilité du capteur à mesurer certaines zones des surfaces, en particulier pour les surfaces internes (cylindre interne par exemple). Un paramètre appelé Rapport de Largeur Maximale Mesurée (*RLMM*), qui caractérise l’accessibilité d’un cylindre interne avec le capteur laser-plan, est défini dans [Boeckmans et al., 2014]. Il traduit la profondeur maximale d’un cylindre qui peut être mesurée avec le capteur laser-plan, quand la ligne laser est parallèle à l’axe du cylindre (Figure. 1.10(a)). Dans le travail de [Mehdi-Souzani et al.,

2016] et [Zuquete-Guarato et al., 2012], l'accessibilité d'un cylindre interne est évaluée par l'aire du maillage associé au nuage de points mesuré avec une seule orientation (Figure. 1.10(b)). Dans le travail de [Audfray, 2012], l'accessibilité d'un cylindre interne est étudiée en fonction du nombre d'orientations de vue et des dimensions du cylindre. Cette étude d'accessibilité montre que la mesure des surfaces internes avec le capteur laser-plan nécessite plusieurs orientations du capteur (Figure. 1.11).

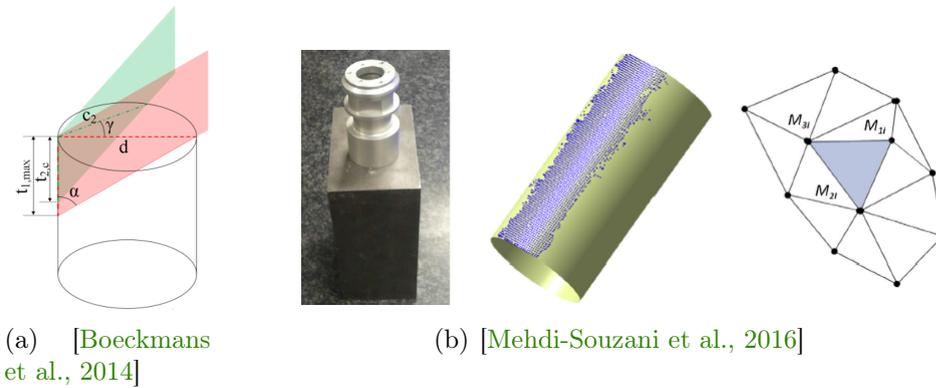


Figure 1.10 – (a) Représentation du Rapport de Largeur Maximale Mesurée (RLMM) dans un cylindre [Boeckmans et al., 2014], (b) Évaluation de la surface mesurée d'un cylindre interne [Mehdi-Souzani et al., 2016].

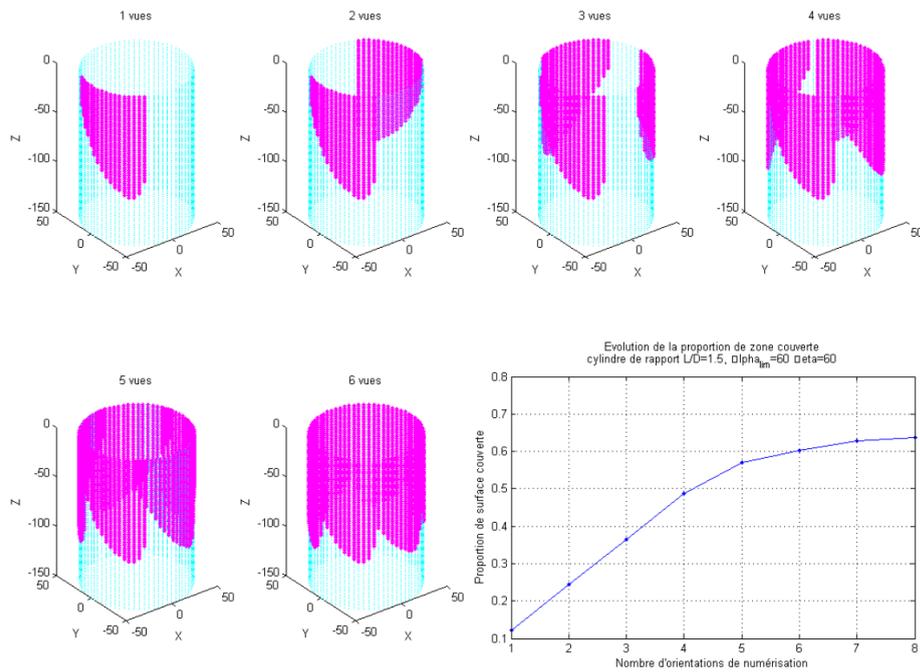


Figure 1.11 – Évolution de l'accessibilité d'un cylindre intérieur en fonction du nombre d'orientations [Audfray, 2012].

1.4.6 Synthèse

La notion de performance des capteurs laser-plan est liée à la qualité et au temps de mesure. La qualité de mesure avec le capteur laser-plan est généralement évaluée par les indicateurs de bruit et de justesse. Elle est affectée par plusieurs facteurs. L'un des facteurs le plus influant est la stratégie de mesure qui inclut les distances de numérisation, les angles de numérisation et les changements d'orientations. Connaître l'évolution des indicateurs de qualité en fonction de la configuration capteur/surface est nécessaire pour planifier un processus d'inspection performant en termes de qualité. Les capteurs laser-plan sont connus par leur faible temps de mesure par rapport aux palpeurs.

La qualité est également affectée par les changements d'orientations du capteur. Ces changements d'orientations peuvent par ailleurs affecter le temps de mesure. Concernant l'accessibilité des surfaces internes par le capteur laser-plan, les travaux montrent que plusieurs orientations sont souvent nécessaires pour obtenir une bonne représentativité de la surface.

La sélection du capteur adéquat dans un processus d'inspection multi-capteurs doit ainsi être basée sur les résultats d'évaluation des performances des capteurs. La trajectoire du capteur laser-plan définie par les distances et les angles de numérisation (configuration capteur/pièce) doit être générée par connaissance préalable de la qualité de mesure pour chaque configuration. Le temps de mesure peut être réduit lors de la planification de la trajectoire en utilisant le minimum de changement d'orientations.

1.5 Sélection des capteurs

La sélection des capteurs constitue une étape importante dans un processus d'inspection multi-capteurs. Dans un contexte d'inspection dimensionnelle, la sélection des capteurs consiste à choisir le capteur adéquat pour chaque surface afin de vérifier les spécifications associées. Ainsi, des critères de sélection sont utilisés pour choisir le capteur approprié.

Audfray classe les travaux de sélection des capteurs en deux types d'études : des études dites "*qualitatives*" dans lesquelles des règles de sélection sont définies pour choisir le capteur approprié et des études dites "*quantitatives*" dans lesquelles les règles de sélection sont basées sur les résultats de qualification des capteurs [Audfray, 2012]. Nous distinguons les travaux de sélection du système de mesure où le capteur et le

porteur adéquats sont à la fois sélectionnés et les travaux de sélection du capteur où seul le capteur adéquat est sélectionné tandis que le porteur est généralement une machine à mesurer tridimensionnelle.

Pour les études de sélection dites "*qualitatives*", plusieurs travaux réalisent le choix des systèmes en fonction de leurs catégories (Figure. 1.12). Savio et al. proposent une méthode de classification en fonction de la dimension de la pièce et de l'incertitude de mesure [Savio et al., 2007]. Bernard et al. développent une méthode de sélection du capteur le plus approprié pour une application de rétroconception selon un arbre de décision [Bernard et al., 2007]. Deux types de critères sont proposés : des critères d'opérabilité qui résultent de la technologie de mesure et des critères liés à l'objet à mesurer (accessibilité, matière et dimension). Weckenmann et al. proposent une classification des systèmes de mesure en fonction de l'étendue de mesure et de la résolution [Weckenmann et al., 2009]. Ces travaux permettent la sélection du système (capteur+porteur) en fonction des règles relatives aux données du constructeur comme la résolution, l'incertitude de mesure et la dimension de la pièce.

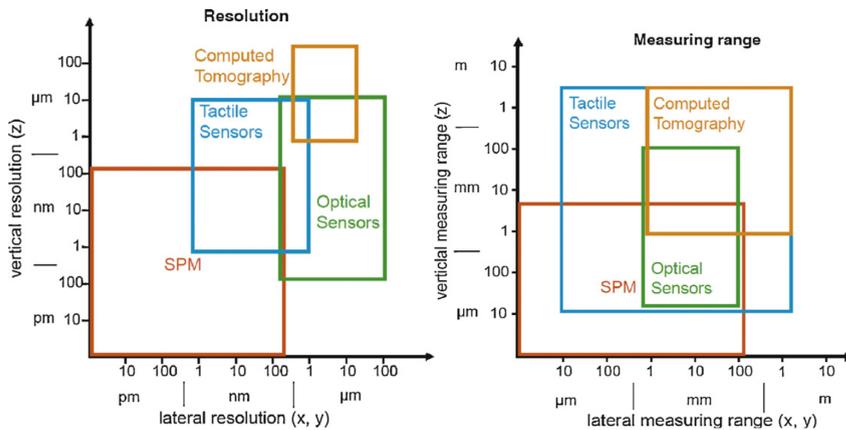


Figure 1.12 – Classification des systèmes en fonction de leur résolution et de leur étendue de mesure [Weckenmann et al., 2009].

Les études de sélection dites "*quantitatives*" sont basées sur la qualification du système de mesure. Lorient et al. proposent une méthode de sélection selon l'application désirée : l'analyse des données, la visualisation ou la duplication [Lorient, 2009]. Le choix du capteur est réalisé en fonction des critères suivants : précision, densité du maillage, complétude, texture, type de données. Zuquete-Guarato et al. ont mis en œuvre une étude comparative de trois systèmes de numérisation différents dans le but de réaliser un choix pour une application spécifique d'acquisition de la géométrie d'un vilebrequin.

Une étude de sélection est proposée à partir des critères de qualité en termes de bruit, de justesse, de complétude et d'accessibilité [Zuquete-Guarato et al., 2012].

Le travail de [Audfray et al., 2012] présente une étude plus complète sur le choix d'un système de mesure parmi plusieurs. Son approche est basée sur des critères d'aptitude, de qualité et de performance. La sélection d'un système s'effectue en deux étapes. La première est l'identification des systèmes admissibles au sens de l'aptitude et de la qualité. La sélection selon les critères d'aptitude est fonction des caractéristiques suivantes : type d'inspection (en ligne, hors ligne...etc.), la souplesse de la pièce (pièce rigide ou flexible), l'échelle de mesure, l'accessibilité et le format de données. Selon les besoins, les systèmes qui répondent aux exigences sont conservés. En termes des critères de qualité, seuls les systèmes de numérisation pour lesquels le bruit et la justesse sont inférieurs à une incertitude admissible sont identifiés comme étant admissibles en termes de qualité. La deuxième étape est la sélection du meilleur système parmi les systèmes admissibles en minimisant une fonction de coût tenant compte les critères de vitesse et de complexité. Mehdi-Souzani et al. se sont basés sur cette démarche pour proposer une méthode de sélection du système le plus approprié selon l'application désirée en introduisant des coefficients de pondération relatifs à l'application considérée dans la fonction coût [Mehdi-Souzani et al., 2016].

Quand le choix est limité à deux capteurs : un capteur laser-plan et un palpeur, les critères de sélection doivent être adaptés et restreints aux deux technologies de mesure. Seuls quelques travaux ont étudié la sélection du capteur parmi deux capteurs. Mohib et al. ont proposé une démarche quantitative de sélection dans laquelle le capteur laser-plan est sélectionné pour mesurer les surfaces complexes qui nécessitent une grande densité de points et le palpeur est utilisé pour mesurer les pièces prismatiques qui nécessitent une qualité élevée [Mohib et al., 2009]. La sélection du capteur dépend de trois éléments : la géométrie de la surface, l'accessibilité, et les spécifications. En fonction des trois éléments, des boîtes sont créées en 3D à l'intérieur desquelles des règles sont établies (Figure. 1.13). Les règles sont définies en fonction de trois types de variables : variables liées à la géométrie de la pièce, variables liées aux caractéristiques du capteur et variables liées à la configuration du capteur par rapport à la surface.

Mahmud et al. se sont attachés à caractériser l'aptitude d'un capteur laser-plan pour répondre au besoin métrologique [Mahmud et al., 2011] en fonction de la configuration du capteur. À partir d'une spécification géométrique ou dimensionnelle, les auteurs dé-

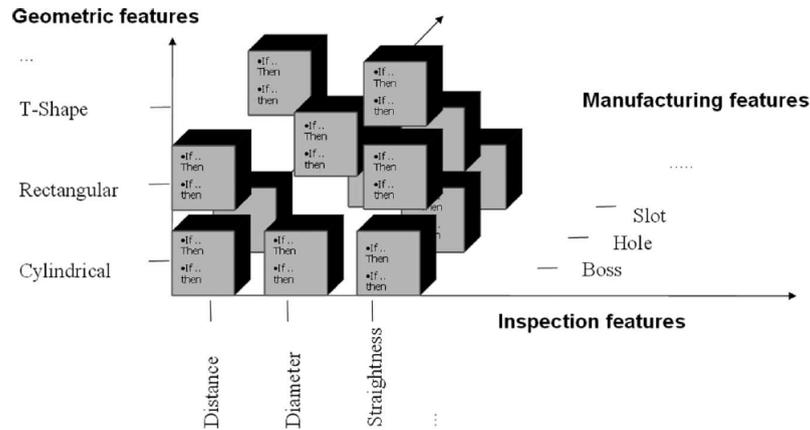


Figure 1.13 – Principe du choix du système de mesure [Mohib et al., 2009].

finissent l'incertitude admissible associée à la mesure de la surface en se basant sur la norme [ISO 14253-1]. L'incertitude de mesure doit être inférieure à $IT/8$ pour que la zone d'incertitude de l'instrument reste négligeable devant l'intervalle de tolérance. L'incertitude de mesure est exprimée en fonction des trois sources d'incertitude possible : l'incertitude du capteur qui dépend de l'angle de numérisation, l'incertitude de remise en position qui dépend du nombre d'orientations utilisées et les autres types d'incertitude liés à la machine et à la surface à mesurer. Zhao et al. proposent une démarche de sélection entre un capteur laser-plan et un palpeur, les deux montés sur une MMT [Zhao et al., 2012]. Cette démarche qualitative est basée sur des règles relatives à la spécification, la géométrie des surfaces, et les données spécifiques de la pièce (couleur, réflexion ... etc.).

En synthèse, nous distinguons les travaux qui s'intéressent au choix parmi plusieurs capteurs et les travaux qui s'intéressent au choix parmi deux capteurs ; un capteur laser-plan et un palpeur. Les démarches de sélection parmi plusieurs capteurs sont plus générales faisant intervenir plusieurs critères : aptitude, performance et critères liés à l'application. Lorsque le choix est limité à deux capteurs pour une application d'inspection dimensionnelle où le capteur adéquat doit être choisi en fonction des spécifications associées, les auteurs se limitent à développer des règles de sélection relatives aux capacités des deux capteurs. De plus, le choix du capteur est fonction du choix de sa configuration par rapport à la surface.

1.6 Planification des trajectoires

La planification des trajectoires des capteurs laser-plan est différente de celle des palpeurs. Ainsi, nous traitons dans les sections suivantes la planification des trajectoires du capteur laser-plan puis la planification des trajectoires du palpeur. Pour les deux cas de planification, les problèmes de collision du capteur doivent être étudiés pour générer des trajectoires sans collision.

1.6.1 Planification de la trajectoire du capteur laser-plan

La planification de la trajectoire du capteur laser-plan est basée sur la définition des configurations du capteur par rapport à la surface. Il s'agit de déterminer une succession de points de vue (P, \vec{d}) définis par un point P et une direction de vue \vec{d} (Figure. 1.14). Les points de vue sont paramétrés par les angles de numérisation. Deux catégories de travaux de planification des trajectoires sont distinguées : la planification des trajectoires pour mesurer un objet inconnu sans modèle *CAO* et la planification à partir d'un modèle *CAO*. Nous nous intéressons plus particulièrement à la deuxième catégorie. Connaissant l'évolution de la qualité de mesure, bruit et justesse, en fonction des configurations, l'objectif d'une planification automatique est de définir les configurations du capteur (orientation et points de passage) qui permettent la mesure avec une qualité attendue dans un temps de mesure optimal.

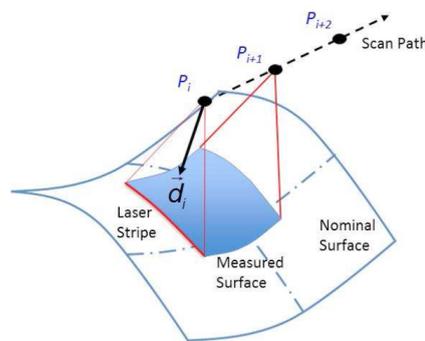


Figure 1.14 – Définition de la trajectoire du capteur laser-plan [Lartigue et al., 2014].

La trajectoire du capteur monté sur une *MMT* est en général définie par l'ensemble des configurations du capteur qui assurent un certain nombre de contraintes [Phan, 2019]. Les contraintes les plus courantes sont l'accessibilité, la qualité, la gestion des collisions, ou encore la gestion des recouvrements entre passes successives. Concernant l'accessi-

bilité, il s'agit de vérifier que la surface est visible par le capteur dans la configuration considérée. De nombreux travaux portent sur l'étude de l'accessibilité en définissant dans un premier temps les orientations de numérisation. La distance de numérisation est fixée à une distance dite "optimale" pour laquelle la qualité de mesure est meilleure (un bruit minimal par exemple). Kweon et Medeiros développent une méthode pour déterminer les orientations nécessaires à la vérification d'un ensemble de spécifications en utilisant le concept des cartes de visibilité [Kweon and Medeiros, 1998]. De nombreux travaux ont été basés sur les cartes de visibilité pour définir la configuration capteur/pièce. Derigent et al. utilisent les notions de visibilité locale et globale à travers les cartes de visibilité pour déterminer le nombre minimal d'orientations nécessaires à l'acquisition complète de la pièce [Derigent et al., 2007]. Les orientations qui assurent la visibilité globale de chaque surface sont représentées par une plage d'orientations sur un disque de la carte de visibilité. L'intersection de deux plages définit une plage d'orientations commune pour deux surfaces (Figure. 1.15(a)).

Une fois l'accessibilité contrôlée, une étude en termes de qualité de données de mesure est menée. Une démarche basée sur des critères de qualité relatifs à l'angle de numérisation a été mise en place par [Lartigue et al., 2014] pour obtenir une représentation complète d'une pièce dans un temps réduit. L'approche repose sur la représentation de la surface de la pièce sous la forme d'un ensemble de voxels tels que la taille du voxel est égale à la largeur de la fenêtre de mesure du capteur. À chaque voxel, une orientation de numérisation est associée en fonction de la visibilité de la surface et de la qualité de numérisation (Figure. 1.15(b)). Afin de respecter les critères de qualité, la configuration du capteur doit assurer un bruit de numérisation inférieur à un seuil donné. Les points de passage du capteur laser-plan sont ensuite définis à une distance qui correspond à la distance optimale.

Mahmud et al. ont proposé une méthode de planification des trajectoires du capteur laser-plan appliqué à l'ensemble des facettes du modèle nominal de la pièce [Mahmud et al., 2011]. La première étape consiste à déterminer pour chaque facette les orientations de numérisation admissibles à partir de l'ensemble d'orientations possibles (720 orientations) (Figure. 1.16(a)). Ces orientations dites "admissibles" doivent permettre l'accessibilité du faisceau laser à la surface, la visibilité de la trace laser par la caméra et la vérification des critères de qualité en termes de bruit. La deuxième étape consiste à affecter à chaque facette une seule orientation de numérisation. Cela revient à trouver

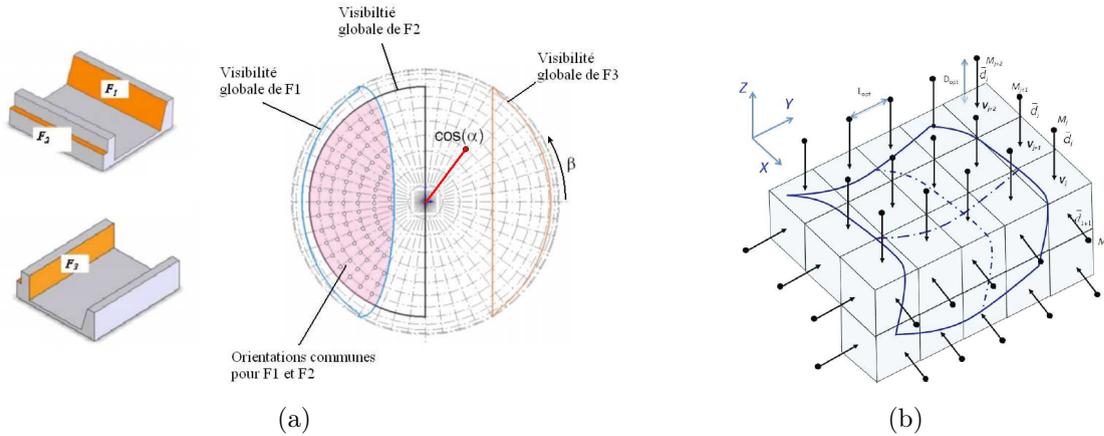


Figure 1.15 – (a) Carte de visibilité [Derigent et al., 2007], (b) Représentation des orientations de vue pour tous les voxels [Lartigue et al., 2014] .

une combinaison des orientations possibles qui garantisse un minimum de changement d'orientations. Ensuite, la trajectoire est définie par les points de vue qui sont déterminés par les sommets des facettes avec une translation le long de l'orientation du capteur. Cette translation correspond à la distance de numérisation optimale (Figure. 1.16(b)).

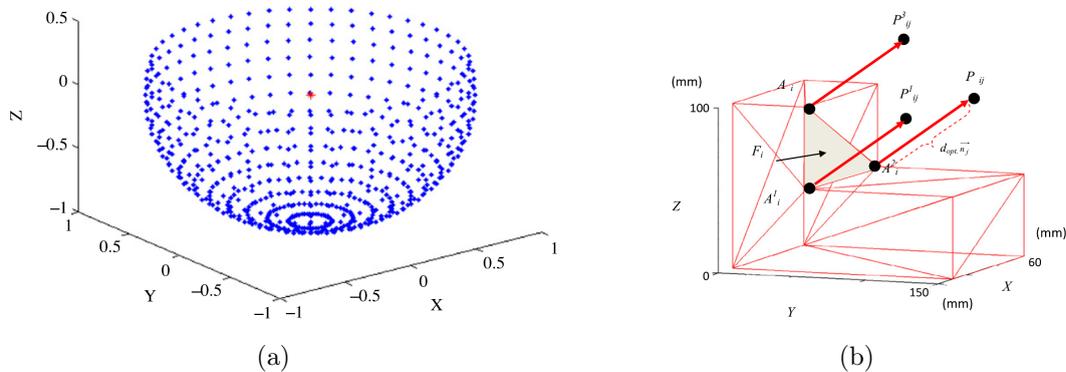


Figure 1.16 – Planification des trajectoires du capteur laser-plan [Mahmud et al., 2011] (a) Ensemble de directions de mesure possibles (720 orientations), (b) Génération de points de vues.

Dans le travail de [Zhao et al., 2012], la procédure de planification des trajectoires est décomposée en trois étapes : évaluation des orientations de numérisation, évaluation des distances de numérisation et génération des trajectoires. Le calcul des orientations de numérisation est fonction d'une étude de visibilité des points du maillage. À chaque groupe de points est associée une orientation de numérisation. Les distances de numérisation sont établies par la génération des niveaux de trajectoire (appelés aussi élévations) pour chaque groupe, ce qui conduit à créer des sous-groupes de points. Chaque sous-groupe

correspond à un niveau de trajectoire. Les points d'un même sous-groupe peuvent être mesurés par le capteur laser-plan dans le même niveau de trajectoire (Figure. 1.17(a)). La génération des trajectoires consiste à déterminer les lignes de numérisation et les lignes de connexion. Les lignes de numérisation sont celles suivies par le capteur laser-plan pour mesurer le sous-groupe de points correspondant et les lignes de connexion sont utilisées pour guider le capteur en se déplaçant d'une ligne de numérisation à l'autre (Figure. 1.17(b)).

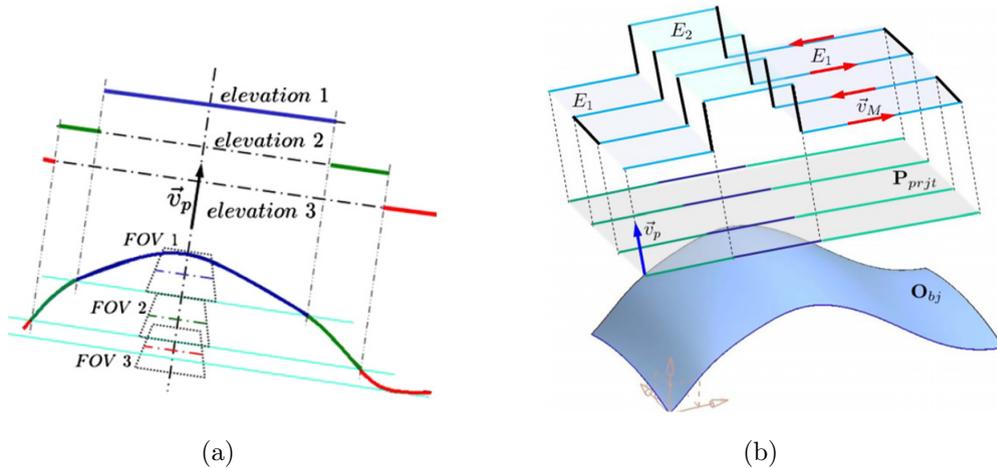


Figure 1.17 – Planification des trajectoires du capteur laser-plan [Zhao et al., 2012] (a) Niveaux de trajectoire, (b) Lignes de numérisation et lignes de connexion.

À partir des travaux de littérature qui s'intéressent à la planification des trajectoires du capteur laser-plan monté sur une *MMT*, nous concluons qu'une planification des trajectoires peut s'effectuer en définissant les meilleures configurations du capteur qui assurent une accessibilité des surfaces et une mesure avec une qualité requise. La trajectoire est générée par la définition de la séquence optimale des points de passage du capteur laser-plan. Ceci peut être assuré en adoptant des niveaux de trajectoires.

1.6.2 Planification de la trajectoire du palpeur

La planification de la trajectoire du palpeur s'appuie généralement sur les caractéristiques du capteur et de la surface à mesurer (spécifications, dimensions et complexité de la surface) pour déterminer les orientations du palpeur, le nombre de points de mesure et leur répartition [Yau and Menq, 1995, Hwang et al., 2004]. Pour traiter la planification des trajectoires du palpeur, les deux aspects suivants ont été abordés : analyse de l'accessibilité du palpeur, et choix de la distribution des points de mesure.

1.6.2.a Analyse d'accessibilité

L'analyse d'accessibilité consiste à déterminer les directions accessibles par le palpeur qui permettent la mesure des surfaces sans collision. Dans le travail de [Vafaeseefat and Elmaraghy, 2000], les auteurs définissent les directions accessibles du palpeur par l'analyse des domaines d'accessibilité aux points de la surface (sommets des facettes). Le domaine d'accessibilité en un point est défini par l'étude de faisabilité de mesure de toutes les directions possibles. Un algorithme de regroupement est ensuite proposé pour regrouper et classer les directions en fonction des domaines d'accessibilité. Hwang et al. utilisent les réseaux de neurones de Hopfield pour minimiser le nombre des directions du palpeur [Hwang et al., 2004]. Alvarez et al. analysent l'accessibilité d'une pièce représentée par son fichier *STL* en deux phases : une analyse locale qui ne tient compte que des collisions possibles du palpeur avec la surface elle-même (analyse des directions normales à la surface) et une analyse globale qui considère les collisions possibles avec l'ensemble de la pièce (calcul de multiples intersections entre le palpeur et toutes les normales) [Alvarez et al., 2008].

Dans le travail de [Cho et al., 2005], la problématique de l'accessibilité est traitée en définissant la direction d'approche du palpeur pour chaque entité à mesurer. La Direction d'Approche du Palpeur *DAP* (en anglais, Probe Approche Direction *PAD*) représente la direction accessible du palpeur pour mesurer l'entité. Un exemple des directions d'approche du palpeur *DAP* pour une entité de type poche est présenté dans la Figure. 1.18. Après avoir déterminé les directions d'approche du palpeur pour toutes les entités de la pièce, la séquence des entités à inspecter est déterminée en analysant les relations entre les directions d'approche possibles.

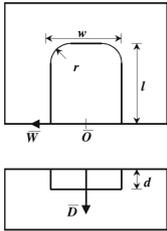
Feature	SLOT-5	Class	SLOT
		\vec{O} : position vector of origin \vec{W} : direction vector of width \vec{D} : direction vector of depth l : length w : width d : depth r : corner radius $PAD = \{ \vec{D}, \vec{D} \times \vec{W} \}$	

Figure 1.18 – Directions d'Approche du Palpeur pour une entité de type poche [Cho et al., 2005].

1.6.2.b Distribution des points de mesure

La distribution des points de mesure consiste à établir le nombre de points de mesure nécessaire ainsi que leur répartition. Le nombre de points de mesure est généralement déterminé à partir d'une fiche pratique [Beg and Shunmugam, 2002]. Par exemple, dans le travail de [Zhao, 2009], la norme britannique [BS7, 1989] est utilisée pour déterminer le nombre minimal de points de mesure nécessaire pour chaque entité géométrique.

Les points de mesure doivent être régulièrement répartis sur la surface à inspecter. La répartition des points de mesure sur la surface est établie à travers des stratégies de distribution. L'efficacité du choix d'une stratégie de distribution particulière a été reconnue comme une composante majeure de l'incertitude de mesure [Elkott et al., 2002].

Dans les travaux de [Mian and Al-Ahmari, 2017], [Zahmati et al., 2018], [He et al., 2018], les stratégies de distribution sont dévisées en deux grandes catégories : les stratégies de distribution standards (*Blind sampling strategies*) et les stratégies de distribution adaptatives (*Adaptive sampling strategies*) (Figure. 1.19). Pour les distributions standard, un nombre fixe de points de mesure est réparti sur la surface. La complexité de la surface n'est pas considérée pour répartir les points de mesure. Ces méthodes de distribution standards comprennent la distribution uniforme, aléatoire, stratifiée, séquence d'Hammersley (SM) et séquence d'Halton-Zaremba (SHZ). Dans le cas d'une distribution aléatoire, les points sont répartis de manière irrégulière (au hasard) sur toute la surface de mesure et fournissent généralement une représentation non réaliste de l'élément géométrique. À l'inverse, dans une distribution uniforme, les points sont répartis de manière homogène (agencés à des intervalles identiques) sur toute la surface. La distribution stratifiée est une technique où l'ensemble de la surface est divisé en sous-ensembles (aussi appelés strates). La théorie de la séquence de Hammersley a été proposée dans [J. M. Hammersley, 1964]. Cette méthode a été utilisée par Stojadinovic et al. pour distribuer des points de mesure dans le cas d'inspection des pièces prismatiques [Stojadinovic et al., 2016b]. L'avantage de ces méthodes standards est leur simplicité et leur temps de calcul réduit en comparaison des stratégies de distribution adaptative.

Pour les stratégies de distribution adaptative, le nombre de points de mesure et leurs distributions varient en fonction de la complexité et de la courbure de la surface [Yu et al., 2013]. Cela signifie que les parties complexes de la surface contiennent un plus grand nombre de points, tandis que les régions plus simples comprennent un nombre

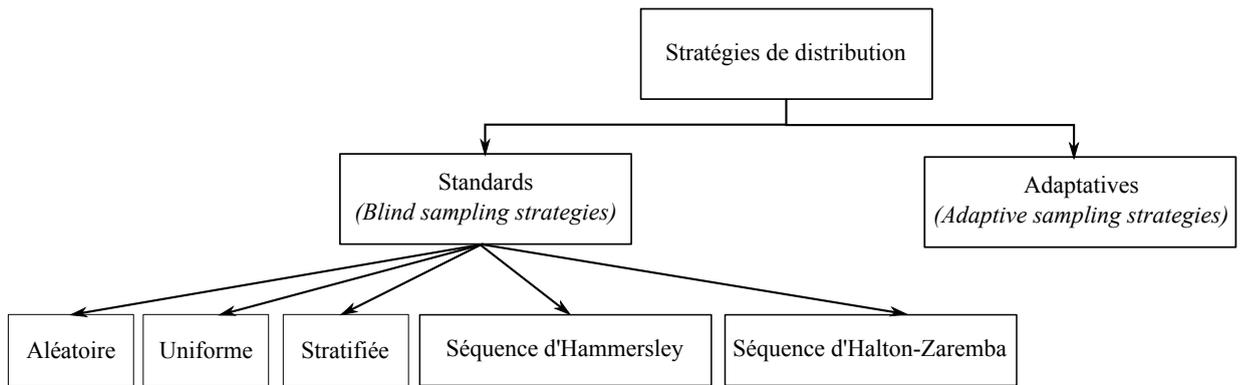


Figure 1.19 – Stratégies de distribution des points de mesure.

plus faible de points de mesure [Mian and Al-Ahmari, 2017]. Le processus de distribution adaptative est itératif. Plus de points de mesure sont ajoutés à une distribution initiale pour augmenter la fidélité de la géométrie de substitution reconstruite. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'un nombre maximal de points de mesure soit atteint ou jusqu'à ce que la géométrie de substitution devienne indifférente à l'ajout de points de mesure supplémentaires.

Les stratégies de distribution des points de mesure doivent être adaptées pour chaque type de surface. Nous distinguons deux types de surfaces, les formes canoniques et les formes complexes. Pour les formes canoniques, trois stratégies de distribution sont comparées dans le travail de [Lee et al., 1997]. À travers l'évaluation de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les points mesurés avec trois stratégies de distribution et un modèle de déviation globale (MDG), ils ont montré que la séquence d'Hammersley est plus efficace en termes d'incertitude que les distributions aléatoires et uniformes. La séquence d'Hammersley devra être privilégiée par rapport à la séquence d'Halton-Zaremba et la distribution uniforme lors de l'inspection de composants canoniques [Cho et al., 2004b]. La distribution adaptative est une approche dynamique qui s'adapte en fonction de la géométrie réelle et du profil de la surface [Saunders et al., 2014]. Ainsi, la stratégie de distribution adaptative est la plus appropriée pour évaluer les spécifications associées aux formes complexes.

1.6.3 Étude des problèmes de collision

Un aspect important pour la planification des trajectoires est l'évitement de collision entre le capteur et la pièce à mesurer, et/ou entre le porte-capteur et la pièce [Yau and

[Menq, 1995, Albuquerque et al., 2000]. Les problèmes de collision sont identiques dans le cas d'un capteur laser-plan ou un palpeur. Yuewei et al. s'appuient sur la notion des cônes d'accessibilité locale pour le calcul et la détection des collisions [Yuewei et al., 2010]. L'algorithme est basé sur une vérification d'éventuelles collisions entre le palpeur et la surface à mesurer pendant un déplacement donné. Dans le cas où une trajectoire présente un problème de collision, des points de contrôle sont ajoutés à la trajectoire dans des plans de référence définis à une distance de sécurité de la pièce. Dans les travaux de [Cho et al., 2004b] et [Al-Ahmari et al., 2016], les auteurs distinguent les problématiques de collision avec le capteur et de collision avec le porte-palpeur. La première peut être résolue en insérant de nouveaux points de passage pour éviter les collisions comme c'est indiqué dans la Figure. 1.20.

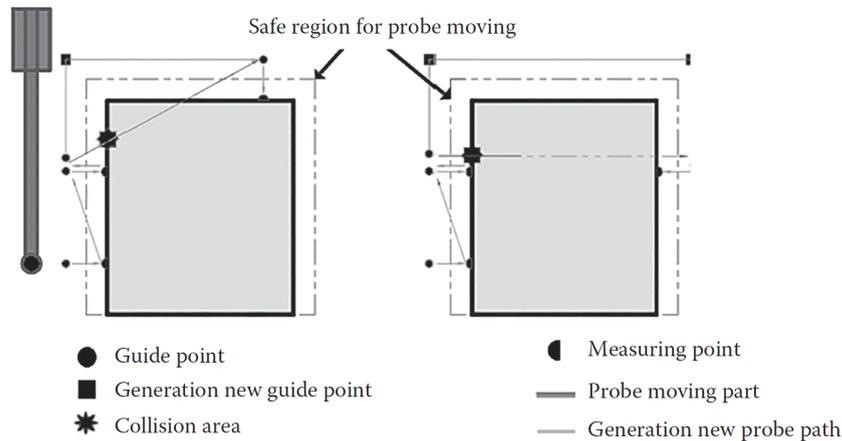


Figure 1.20 – Collision palpeur/pièce [Cho et al., 2004b, Al-Ahmari et al., 2016].

La détection des collisions est traitée dans le travail de [Han et al., 2017] en considérant le capteur et le porte-capteur comme une seule entité. Cet ensemble est constitué de deux cubes de grille, dont la longueur latérale est fonction de la longueur latérale du porte-capteur (Figure. 1.21(a)). Un algorithme de modélisation de l'espace de mesure est utilisé pour modéliser le volume de la pièce par des grilles cubiques (voxels) (Figure. 1.21(b)). La trajectoire optimale sans collision est ainsi obtenue en évaluant les éventuelles collisions entre les grilles qui représentent l'espace de mesure et l'espace des capteur et porte-capteur (Figure. 1.21(c)). Dans le travail de [Li et al., 2018], les auteurs utilisent un algorithme basé sur les enveloppes convexes pour générer des trajectoires permettant d'éviter les collisions (Figure. 1.22).

Han et al. proposent un modèle sphérique pour la détection des collisions [Han et al.,

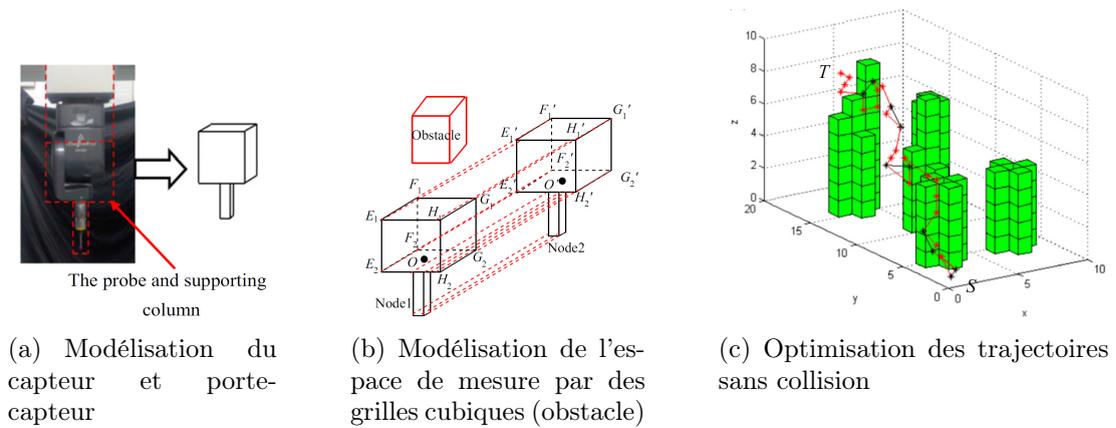


Figure 1.21 – Études des problèmes de collision [Han et al., 2017].

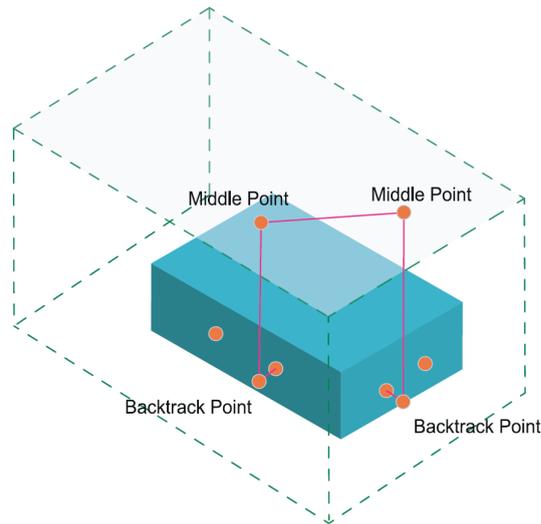


Figure 1.22 – Enveloppe convexe pour générer des trajectoires sans collisions [Li et al., 2018].

2018]. Une sphère est créée dont le centre est le point de la surface. Le rayon de la sphère est supérieur ou égal à la distance entre le centre de rotation et le bout du capteur. Le problème d'étude de collision se transforme en une recherche d'un certain espace libre dans l'espace de la sphère pour placer le capteur. Un cône contenant les directions de mesure sans collision est établi (Figure. 1.23).

En synthèse, les problèmes de collision peuvent être dus à une collision locale entre le capteur et la pièce ou à une collision globale entre le porte-capteur et la pièce. Pour gérer ces collisions, plusieurs types de modélisation peuvent être adoptés en fonction des technologies des capteurs utilisés. Dans les lignes de trajectoire (ligne reliant deux points de croisement successifs) qui ont des problèmes de collision, de nouveaux points

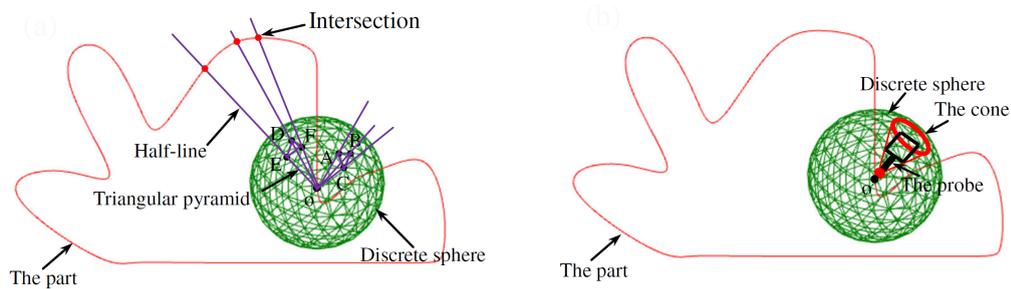


Figure 1.23 – Modèle sphérique d'analyse de collision [Han et al., 2018].

de transition du capteur sont ajoutés à la trajectoire.

1.7 Traitement des données

Dans le cas de l'inspection multi-capteurs, la problématique du traitement devient plus complexe, car il s'agit de traiter des données de mesure de différentes natures (telles que les nuages de points, les images) et de différentes caractéristiques (telles que la densité, la qualité, l'incertitude de mesure). Dans le cas d'une mesure coopérative avec un capteur laser-plan et un palpeur, les nuages de points sont de même nature, mais de caractéristiques différentes et de plus exprimés dans des repères différents. Le nuage de points associé au palpeur est de meilleure qualité mais peu dense. Alors que le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser-plan est de qualité moindre en comparaison de celui du palpeur, mais très dense, bruité et contenant des points aberrants. Le résultat de mesure avec le palpeur est composé de nuages de points qui correspondent aux surfaces mesurées. À chaque surface, un nuage de points est associé. Le résultat de mesure avec le capteur laser-plan est un ensemble de points qui définit une représentation globale de toutes les surfaces mesurées incluant des portions non désirées. Compte tenu de ces caractéristiques, le traitement des données doit prendre en compte le fait que :

- Le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser-plan est bruité et contient des points aberrants et des zones non utiles.
- Le nuage de points du capteur laser-plan est une représentation globale tandis que le nuage de points du palpeur est composé d'ensembles de points correspondant aux entités.

- Les coordonnées des points ne sont pas exprimées dans le même repère et sont de caractéristiques différentes.

Le nuage de points issu du capteur laser-plan doit donc être pré-traité et des étapes de mise en cohérence et de fusion des données issues des deux capteurs sont effectuées.

1.7.1 Pré-traitement

Le nuage de points résultant d'acquisition associée à chaque déplacement du capteur dans les différentes orientations est généralement dense, inhomogène, bruité et présente des points aberrants (Figure. 1.24) [Mehdi-Souzani, 2006]. Ces données sont rarement exploitables directement, et une étape de pré-traitement est indispensable avant toute exploitation.

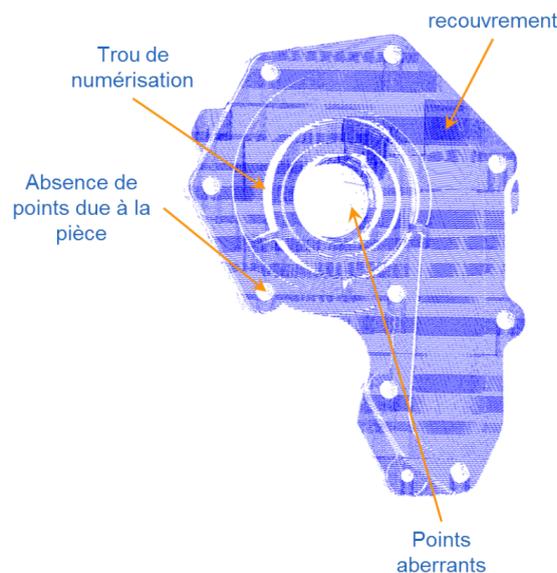


Figure 1.24 – Caractéristiques d'un nuage de points mesuré avec un capteur laser-plan [Mehdi-Souzani, 2006].

Dans un cas de pré-traitement des nuages de points issus d'une mesure avec un capteur laser-plan, de nombreux outils sont désormais disponibles dans les logiciels de CAO et de métrologie. Nous ne détaillerons pas ici les méthodes de la littérature, mais nous rappelons que dans le cadre du pré-traitement, les opérations suivantes doivent être envisagées [Wang et al., 2015] :

- Remplissage des données manquantes : dans les nuages de points mesurés avec les capteurs optiques, il peut y avoir la présence de trous de numérisation dans

lesquels on ne dispose pas d'informations. Les données manquantes peuvent être substitués par interpolation des données voisines ou par des valeurs significatives pour éviter des échecs de calcul ultérieurs [Senin et al., 2012].

- Filtrage et nettoyage : les points aberrants présents dans le nuage de points brut peuvent être dus à des phénomènes optiques liés à la technologie des capteurs ou à l'environnement [Lartigue et al., 2002]. La présence de ces points aberrants entraîne des erreurs de recalage, de fusion et d'évaluation des grandeurs géométriques. Par conséquent, ces points doivent être identifiés et éliminés ou corrigés. De plus, nous notons la présence des points qui ne correspondent pas à la mesure des surfaces de la pièce, mais aux surfaces du support ou des artefacts dans le champ de vision du capteur. Ces points devront être supprimés du nuage de points brut afin de ne garder que les points représentatifs des surfaces à inspecter.

Le filtrage agit sur la densité et le bruit associés au nuage de points brut. Il peut se faire selon deux techniques [Mehdi-Souzani, 2006] : par diminution du nombre de points en éliminant des points ou par homogénéisation en conservant un nombre de points donnés par unité de volume. Le nettoyage permet de s'affranchir du problème associé à la représentativité des données vis-à-vis de la surface numérisée. Le principe consiste à distinguer les points images de la surface numérisée par rapport aux autres. Cette opération est souvent réalisée par l'opérateur de manière interactive en éliminant les points qui lui semblent non représentatifs de la surface.

- Recalage : la mesure de l'ensemble de la pièce avec le capteur laser-plan nécessite souvent plusieurs orientations du capteur. Le but du recalage est d'exprimer tous les points numérisés dans un même repère pour avoir une cohérence entre les différentes numérisations.

Le recalage est une étape au cours de laquelle les données de mesure sont alignées et transformées dans un système de coordonnées commun. Le recalage peut se faire en utilisant la sphère de calibration. Le capteur est en général calibré pour chaque orientation sur la même sphère de calibration afin que les données issues de la mesure soient exprimées dans le même repère [Audfray, 2012].

- Partition : en métrologie dimensionnelle, la partition est la division d'un modèle d'une pièce en morceaux dont chacun correspond à un élément de surface. Anwer

et al. classifient les opérations de partition en deux classes : partition d'un modèle nominal (ideal form) et partition d'un modèle de peau (Skin model shape) [Anwer et al., 2018]. Diverses méthodes ont été développées pour réaliser la partition d'un nuage de points selon des critères géométriques et topologiques. Nous distinguons les 4 catégories suivantes : la partition par détection des arêtes [Huang and Menq, 2001], la partition par croissance des régions [Demarsin et al., 2007], la partition par regroupement d'attributs [Gelfand and Guibas, 2004, Yi et al., 2014] et la partition par une approche hybride [Zhao et al., 2013, Anwer and Mathieu, 2016]. Ces catégories sont détaillées dans [Anwer et al., 2018].

1.7.2 Fusion

La fusion en métrologie peut être définie comme le processus consistant à combiner des données provenant de plusieurs capteurs dans une représentation commune afin que l'évaluation métrologique puisse bénéficier de toutes les données issues des capteurs [Weckenmann et al., 2009]. Plusieurs approches de fusion ont été développées dans la littérature. Nous nous focalisons sur les travaux qui visent la fusion d'un nuage de points issu du capteur laser-plan avec un nuage de points issu du palpeur dans le but d'exploiter les avantages des deux technologies de mesure. Compte tenu des caractéristiques du nuage de points issus du capteur laser-plan, les études proposent des approches basées principalement sur la correction du nuage de points mesuré avec le capteur laser-plan utilisant le nuage de points mesuré avec le palpeur.

Une approche de fusion basée sur un processus gaussien (PG) a été proposée dans [Colosimo et al., 2015]. L'objectif est de corriger localement l'ensemble de données mesuré avec le capteur laser-plan au moyen d'un ensemble de points mesuré avec le palpeur. Le processus de fusion est réalisé en deux étapes : un modèle gaussien est d'abord construit à partir des données numérisées avec le capteur laser-plan, puis il est corrigé (mise à l'échelle et décalage) en utilisant les données mesurées avec le palpeur à travers un modèle de liaison en associant les points mesurés avec le palpeur à leurs correspondants dans le modèle gaussien (Figure. 1.25).

Dans le travail de [Rak et al., 2016, Rak, 2016], une démarche de fusion qui consiste à corriger le nuage de points du capteur laser-plan utilisant le nuage de points du palpeur est proposée. Elle consiste à déterminer les paires de points caractéristiques. Autour d'un

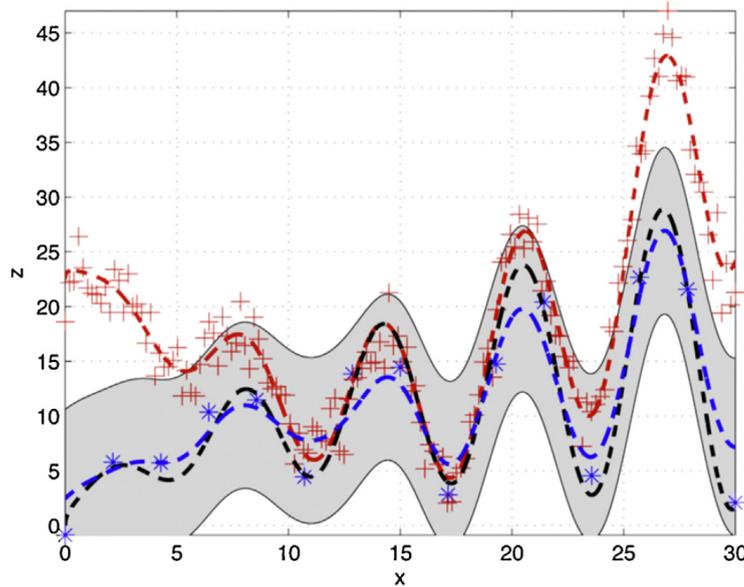


Figure 1.25 – Correction du nuage de points du capteur laser-plan utilisant la mesure avec palpeur ; points rouges : mesure avec capteur laser-plan, ligne rouge : modèle gaussien associé au nuage de points du capteur laser, points bleus : mesure avec palpeur, ligne bleue : modèle de fusion, ligne noire : modèle nominal [Colosimo et al., 2015].

point mesuré avec le palpeur (point noir dans la Figure. 1.26(a)), une sphère virtuelle est construite (Figure. 1.26(b)). La sphère contient des points mesurés avec le capteur laser-plan (points bleus dans la Figure. 1.26(c)) pour lesquels le barycentre est calculé (point rouge). Le barycentre et le centre de la sphère définissent une paire de points caractéristiques (points rouges et noirs dans la Figure. 1.26(d)). Pour chaque paire, le vecteur de correction Cor_Vect_i est calculé comme la différence de coordonnées des points caractéristiques. La transformation qui ramène les points mesurés avec le capteur laser-plan vers les points mesurés avec le palpeur est évaluée en fonction des vecteurs de correction Cor_Vect_i de tous les points caractéristiques. Afin d'évaluer l'influence du diamètre de la sphère virtuelle, 3 diamètres de sphères (10mm, 20mm et 30mm) ont été testés, les auteurs ont constaté que la distance moyenne entre les données fusionnées est faible pour un procédé de fusion avec un diamètre de sphère virtuelle faible.

En synthèse, les travaux de la littérature concernant la fusion d'un nuage de points issu du capteur laser-plan avec un nuage de points issu du palpeur concernent le cas de la mesure d'une même surface avec deux capteurs. En général, la mesure avec le palpeur est considérée comme référence pour corriger la mesure avec le capteur laser-plan.

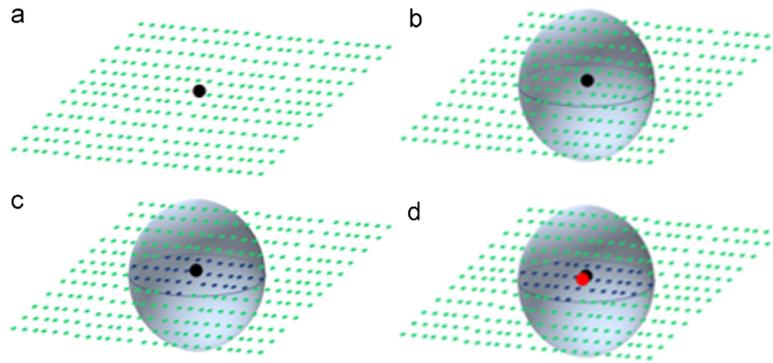


Figure 1.26 – Démarche du fusion du nuage de points mesuré avec le capteur laser-plan (points verts) avec le nuage de points mesuré avec le palpeur (points noirs) [Rak et al., 2016].

1.8 Synthèse et Problématique

Peu de travaux ont porté sur l'ensemble du processus d'inspection dimensionnelle combinant un capteur laser-plan et un palpeur. Dans les travaux mentionnés précédemment, les auteurs s'intéressent en général à quelques-unes des étapes de l'approche globale d'inspection, et concernent principalement la génération de la gamme d'inspection. D'autres travaux se sont concentrés sur la fusion des données de mesure provenant des deux capteurs. Le développement d'une approche globale d'inspection avec un capteur laser-plan et un palpeur reste une problématique à part entière.

Si nous nous intéressons aux étapes d'inspection dimensionnelle, classiquement l'inspection avec un seul capteur vise à générer la gamme d'inspection qui sera automatiquement exécutée sur la *MMT*. Puis, l'évaluation des spécifications à partir du nuage de points issu de la mesure donne lieu à un rapport d'inspection après traitement des données. La génération de la gamme d'inspection est en général décomposée en deux niveaux : un niveau global qui détermine la séquence des surfaces à mesurer et un niveau local qui détermine la trajectoire du capteur pour chaque surface. Une fois la trajectoire exécutée, les nuages de points obtenus sont traités de manière automatique, la plupart du temps par des logiciels de métrologie dimensionnelle, afin d'établir le rapport d'inspection .

La question que nous nous posons est : est-il possible de réaliser un processus d'inspection dimensionnelle automatique combinant un capteur laser-plan et un palpeur, utilisant au mieux les capacités de chacun des capteurs, depuis la génération de la gamme d'inspection jusqu'au traitement des données acquises après exécution des trajectoires ?

Cette problématique, non encore traitée dans sa globalité, fait apparaître un certain nombre de difficultés en partie associées à la technologie du capteur laser-plan. Rappelons ici que le capteur laser-plan permet de réaliser une mesure globale des surfaces dans un temps relativement court, mais les données sont relativement bruitées, alors que le palpeur permet d'acquérir les surfaces, avec une faible incertitude, mais avec une moins grande densité, et en des temps plus longs.

Cette problématique mise en avant fait apparaître 3 étapes majeures : la génération de la gamme d'inspection incluant la planification des trajectoires, l'exécution des trajectoires de chacun des capteurs, et enfin le traitement des données hétérogènes.

La génération de la gamme d'inspection comprend la définition des séquences de mesure, et la planification des trajectoires. Tout d'abord, après une analyse des spécifications, il convient de sélectionner le capteur adéquat qui permettra de vérifier la spécification. Les travaux de la littérature ont montré qu'à partir de l'évaluation des performances des capteurs, des règles sont mises en place afin de réaliser la sélection du capteur approprié. Dans le cas du capteur laser-plan, il s'agit également de sélectionner les configurations de mesure qui permettront d'atteindre la qualité attendue. Les études mettent en avant qu'il convient de limiter les changements de configurations, et plus particulièrement les changements d'orientation pour améliorer les performances, en termes de qualité et de temps de mesure. Les travaux de la littérature rapportent également que les surfaces internes sont rarement totalement accessibles avec le capteur laser-plan utilisant une seule orientation. Dans ce cas, le palpeur devrait donc être privilégié pour la mesure de telles surfaces. Une fois les séquences de mesure définies, il convient de planifier les trajectoires. La planification des trajectoires est une problématique liée à chaque capteur.

La planification des trajectoires du capteur laser-plan consiste à générer à partir des configurations obtenues la séquence optimale des points de passage qui permet la mesure de l'ensemble des surfaces avec une qualité requise et dans un temps optimal. D'autre part, la planification des trajectoires du palpeur consiste à définir les orientations accessibles et les points de mesure pour chaque surface. Des trajectoires exemptes de collision, et optimisées selon les critères de qualité et le temps de mesure, doivent être établies pour chaque capteur. L'exécution des trajectoires devient plus complexe lorsqu'il s'agit de piloter deux capteurs. La difficulté réside dans le fait de gérer l'exécution avec deux technologies différentes.

À l'issue de la phase de mesure, les données obtenues sont de nature différente. Le résultat de mesure avec les deux capteurs est exprimé par deux nuages de points dont la qualité et la densité sont différentes. Le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser-plan est en général bruité, et présente des points aberrants, des surfaces non désirées ou encore des trous de numérisation. De plus, alors que le palpeur mesure les entités de manière séparées, le nuage de points est global et comprend un ensemble d'entités. Ainsi, une étape de traitement de nuages de points s'avère nécessaire. Elle comprend deux volets, l'un correspond au traitement du nuage de points issus du capteur laser-plan afin de le rendre exploitable pour des applications de métrologie [Audfray, 2012]. Le second volet correspond à une étape de fusion des données hétérogènes, au cours de laquelle il s'agit de mettre les données issues des deux capteurs en cohérence. Une fois cette étape effectuée, l'exploitation pour la vérification des spécifications peut être réalisée.

Dans ce contexte, nous proposons une démarche complète d'inspection dimensionnelle s'appuyant sur la mesure combinée d'un capteur laser-plan et d'un palpeur.

1.9 Démarche proposée

Dans notre travail, nous utilisons les capacités d'un scanner 3D *Kreon Aquilon KA50* (Annexe. A) composé d'un capteur laser-plan sur lequel un palpeur *Renishaw TP2* est fixé. S'appuyant sur ce scanner composé des deux capteurs, l'objectif du travail de thèse est de proposer puis d'étudier la faisabilité d'une approche d'inspection dimensionnelle automatique basée sur la meilleure utilisation des deux capteurs. Nous partons du postulat que le capteur laser-plan est privilégié compte tenu de sa rapidité, dès lors que la qualité attendue est atteinte.

Afin d'exploiter les avantages du scanner, et dans l'objectif d'utiliser au mieux les capacités de chacun des capteurs, quelques règles sont posées à partir des résultats de la littérature :

- Le capteur laser-plan est utilisé lorsque les critères d'accessibilité et de qualité nous permettent de vérifier les spécifications associées ; sinon le palpeur est utilisé.
- Les entités internes sont mesurées avec le palpeur ;
- les changements d'orientation du scanner sont minimisés ; ainsi, la stratégie de

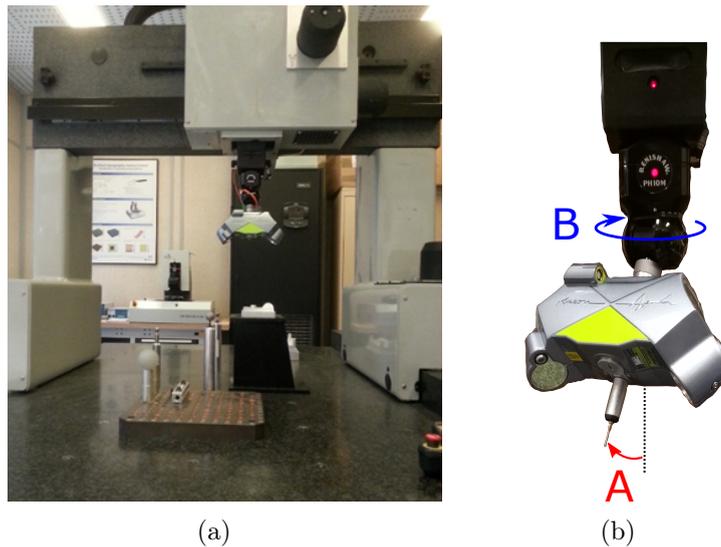


Figure 1.27 – (a) MMT ; (b) Scanner 3D composé d'un capteur laser-plan et un palpeur.

mesure est construite à partir des configurations du scanner et pour chaque configuration, le choix du capteur adéquat est réalisé.

Étant donné le modèle *CAO* de la pièce et les spécifications associées décrites sur un dessin de définition, nous proposons une approche globale découpée en trois étapes principales selon les problématiques majeures évoquées précédemment (Figure. 1.28) :

- Génération des séquences d'opérations de mesure ;
- Planification et exécution des trajectoires ;
- Traitement des données et évaluation des spécifications

Nous visons à automatiser le processus global d'inspection, ce qui mène à automatiser et apporter des contributions à toutes les étapes de l'approche (Figure. 1.28).

La génération des séquences d'opérations consiste à définir un ensemble d'opérations de mesure. Partant du dessin de définition, il s'agit d'extraire les surfaces à mesurer, puis pour chacune d'elles, d'associer le capteur approprié. Les surfaces à mesurer sont les surfaces qui portent des spécifications. Afin de pouvoir utiliser deux capteurs dans une même orientation et minimiser les changements d'orientations, un ensemble d'orientations initial basé sur une étude d'accessibilité globale des surfaces pour chaque capteur est proposé. L'aptitude des capteurs à mesurer avec une qualité donnée est testée pour chacune de ces orientations. Ainsi, pour chaque orientation, le capteur approprié est

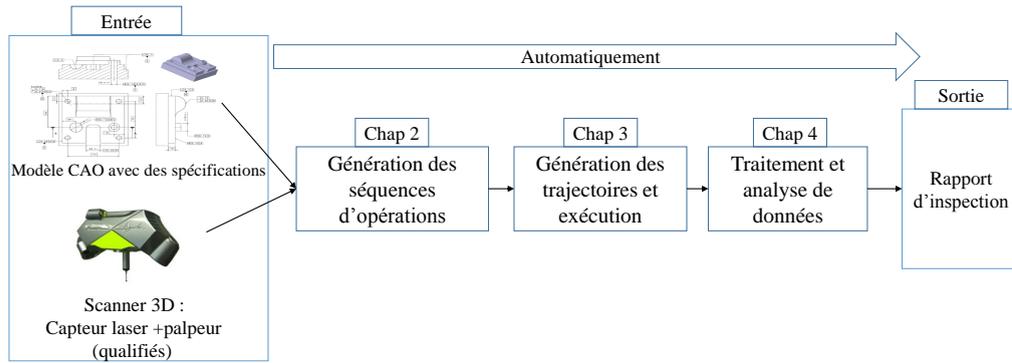


Figure 1.28 – Approche globale d'inspection dimensionnelle.

associé à chaque surface, ce qui définit les opérations de mesure (Figure. 1.29). Une opération est définie par la mesure des surfaces dans une orientation donnée. Les opérations de mesure doivent être ordonnées afin de déterminer la séquence d'opérations. Noter cependant que c'est une originalité. L'originalité réside dans le fait qu'il ne s'agit pas de chercher l'accessibilité de chaque capteur pour chaque surface puis de définir les orientations des capteurs, mais d'utiliser un ensemble minimal d'orientations puis d'évaluer les capacités des deux capteurs pour ces orientations. La génération des séquences d'opérations fait l'objet du Chapitre. 2

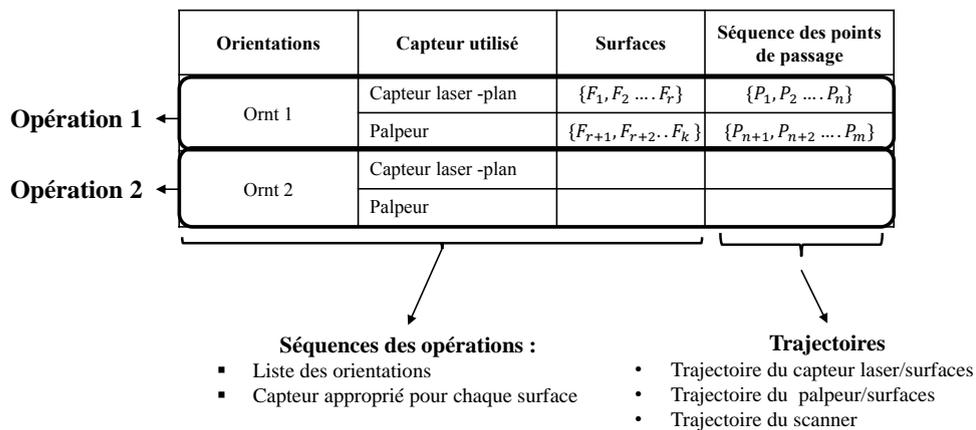


Figure 1.29 – Définition de la gamme d'inspection multi-capteurs.

Pour compléter la gamme d'inspection, nous définissons la trajectoire de chaque capteur associée à chaque surface. La trajectoire est définie par la séquence des points de passage mesurant les surfaces. Ainsi, la gamme d'inspection est définie par les séquences d'opérations et les trajectoires comme c'est indiqué dans la Figure. 1.29. L'exécution consiste à transformer les informations contenues dans la gamme en ordre de mouvements

du système de déplacement (par exemple *MMT*) afin de réaliser la mesure et récupérer les données de mesure. La planification des trajectoires et l'exécution font l'objet du Chapitre. 3.

Les nuages de point obtenus sont souvent hétérogènes, un traitement des données est proposé pour évaluer les spécifications et établir le rapport d'inspection. Le pré-traitement du nuage de points provenant de la mesure avec le capteur laser-plan est d'abord réalisé. La mise en cohérence et la fusion seront ensuite appliquées sur les deux nuages de points des deux capteurs. Ces étapes de traitement seront détaillées dans le Chapitre. 4.

Afin de valider l'approche d'inspection multi-capteurs que nous proposons, une pièce test dont le dessin de définition partiel est présenté en Figure. ???. L'ensemble de la démarche globale sera implémenté et testé sur la pièce test.

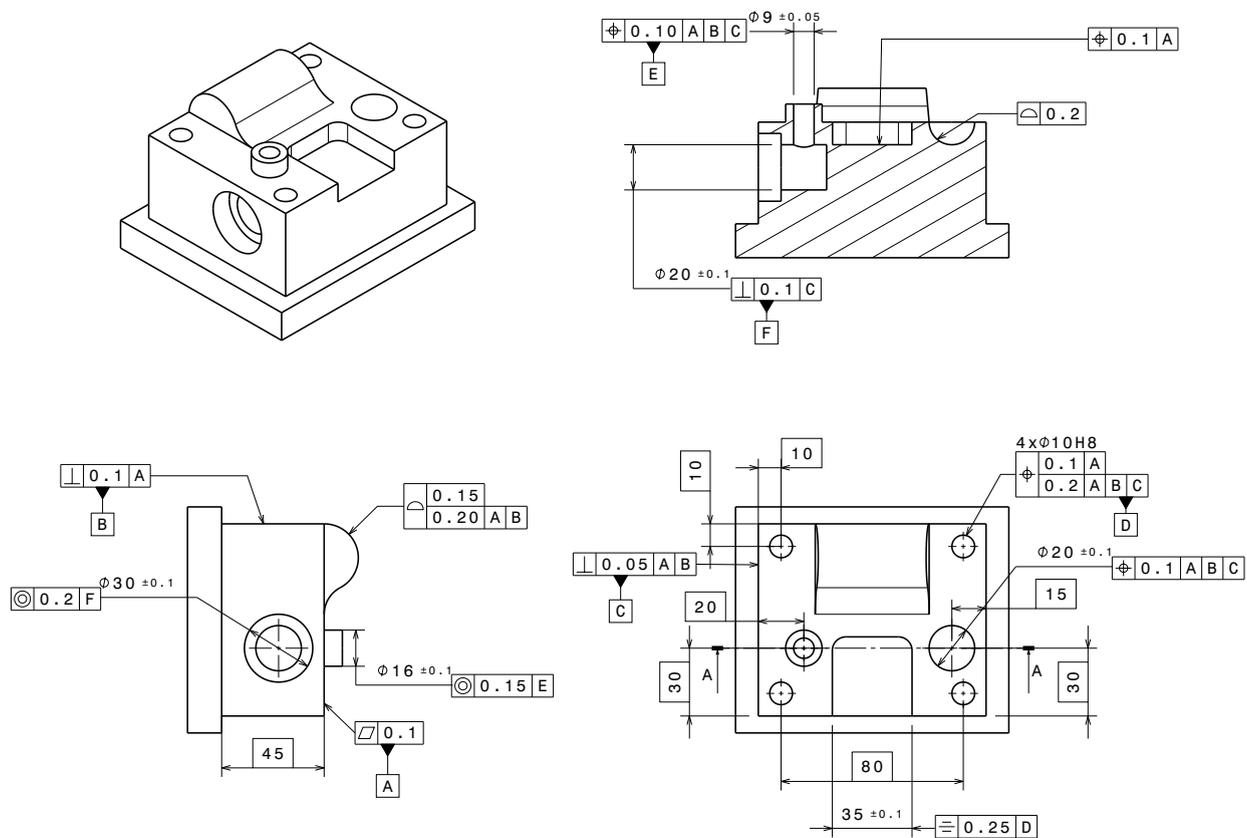


Figure 1.30 – Dessin de définition de la pièce test.

Chapitre
2

**Génération des séquences
d'opérations**

2.1 Introduction

La gamme d'inspection est réalisée à travers deux parties : la génération des séquences d'opérations, puis la définition des trajectoires de mesure. Dans ce chapitre, seule la première partie qui concerne la génération des séquences d'opérations est détaillée. La définition des trajectoires sera discutée au chapitre suivant.

Dans ce travail, une opération correspond à la mesure d'un groupe de surfaces dans une orientation du scanner (Figure. 2.1). Partant d'un modèle *CAO* de la pièce avec des spécifications décrites sur un dessin de définition, nous souhaitons mettre en place une démarche automatique pour générer puis ordonner les séquences d'opérations.

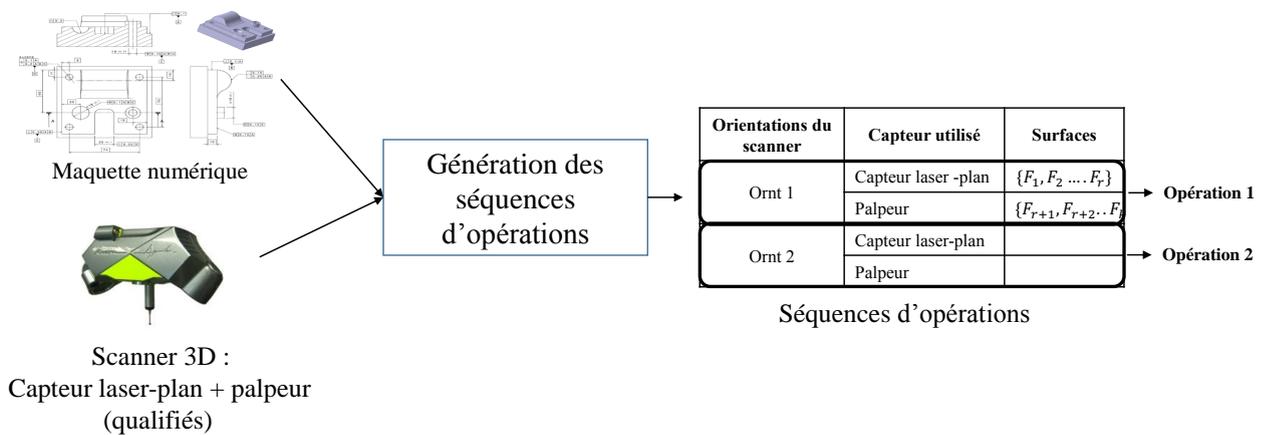


Figure 2.1 – Génération des séquences d'opérations.

Pour chaque surface, il s'agit de sélectionner le capteur approprié pour l'orientation considérée. Le capteur approprié est sélectionné en testant son aptitude à mesurer la surface dans l'orientation considérée, l'aptitude étant testée à partir des critères de performance. Nous privilégions la mesure avec le capteur laser-plan afin d'exploiter sa rapidité de mesure. Ainsi, l'aptitude du capteur laser-plan est testée d'abord. Dans le cas où les critères de performance ne sont pas vérifiés, l'aptitude du palpeur est ensuite testée. Cela ne peut se faire qu'à partir de la connaissance d'informations associées aux surfaces à inspecter, aux spécifications portées sur le dessin de définition, mais également à la capacité des capteurs.

Nous proposons une démarche de génération des séquences d'opérations composée de 3 étapes principales (Figure. 2.2). La première consiste à identifier les informations qui nous conduisent à introduire la notion d'entité à mesurer. Dans la deuxième étape,

un ensemble minimal d'orientations permettant l'accessibilité globale des surfaces est proposé en analysant le volume englobant la pièce. En troisième étape, l'évaluation de l'aptitude de chacun des capteurs pour chacune des orientations est testée. Les séquences d'opérations sont définies par la génération de groupes d'entités/surfaces pour chaque orientation.

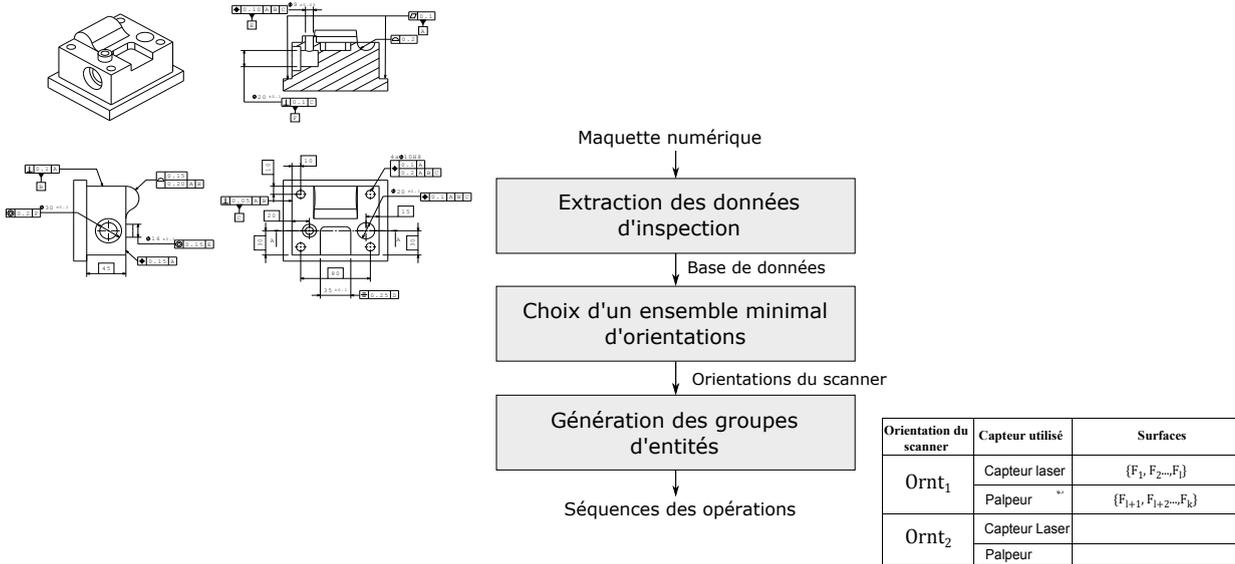


Figure 2.2 – Approche proposée pour la génération des séquences d'opérations.

L'aptitude des capteurs est en général basée sur les résultats d'évaluation des performances des capteurs, qui s'appuie sur une qualification des capteurs à disposition. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons la méthode de qualification des capteurs que nous avons retenue.

Dans une deuxième partie, nous présentons la méthode d'extraction des données d'inspection en adoptant la notion d'entité d'inspection. Nous proposons une définition de l'entité d'inspection plus adaptée au contexte de la métrologie 3D. Les attributs associés aux entités d'inspection sont stockés dans une base de données.

Dans une troisième partie, plutôt que d'étudier l'accessibilité de toutes les surfaces par chacun des capteurs, nous détaillons la méthode de sélection d'un ensemble minimal d'orientations permettant l'accessibilité globale aux surfaces à inspecter avec les deux capteurs.

La quatrième partie présente la méthode itérative de génération des groupes d'entités basée sur l'évaluation des aptitudes des capteurs. Pour une orientation du scanner donnée, l'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan est réalisée en premier puis celle du

palpeur. Chaque groupe d'entités est associé à une orientation du scanner et se compose de deux sous-groupes : l'un rassemble les entités à mesurer avec le capteur laser-plan et l'autre les entités à mesurer avec le palpeur.

Finalement, cette démarche de génération des séquences d'opérations est appliquée sur la pièce test retenue.

2.2 Qualification des capteurs

Le capteur laser-plan est constitué de deux caméras qui lui offrent un grand champ de visibilité. Selon un protocole d'évaluation des performances des capteurs optiques (*Qualipso*) développé au laboratoire [Audfray, 2012], nous nous sommes intéressés en premier lieu à la caractérisation de la fenêtre de mesure (*Field of View, FOV*) ainsi que ses dimensions. Nous évaluons ensuite les indicateurs de qualité tels que le bruit et la justesse. De plus, les erreurs de changement d'orientations et de remise en position du capteur sont évaluées.

La qualification de la performance du palpeur s'effectue principalement par l'évaluation de la répétabilité de mesure dans les différentes directions de déclenchement. Plus de détails sur la qualification des capteurs ainsi que leurs caractéristiques techniques sont présentés dans l'Annexe. A et B.

2.2.1 Caractérisation de la fenêtre de mesure (FOV) du capteur laser-plan

La fenêtre de mesure (*Field of view - FOV*) est un espace dans lequel la réflexion de la ligne laser est visible par la caméra du capteur. Pour déterminer la hauteur H de la fenêtre de mesure, nous déplaçons le capteur verticalement entre deux altitudes qui correspondent aux deux limites supérieure et inférieure de la fenêtre de mesure (Annexe. B). La hauteur de la fenêtre H est alors la différence des deux altitudes. Les largeurs L_1 et L_2 sont déterminées par la mesure de la longueur de la ligne laser dans les deux limites de la fenêtre de mesure. La distance de numérisation est définie par la distance entre le centre de rotation du capteur et la surface à numériser. Pour que la réflexion de la ligne laser soit visible par les caméras du capteur (Figure. 2.3(a)), cette distance de numérisation doit être dans un intervalle $[d_{min}, d_{max}]$. Les dimensions de la fenêtre de mesure et les distances de numérisation sont représentées dans la Figure. 2.3(b).

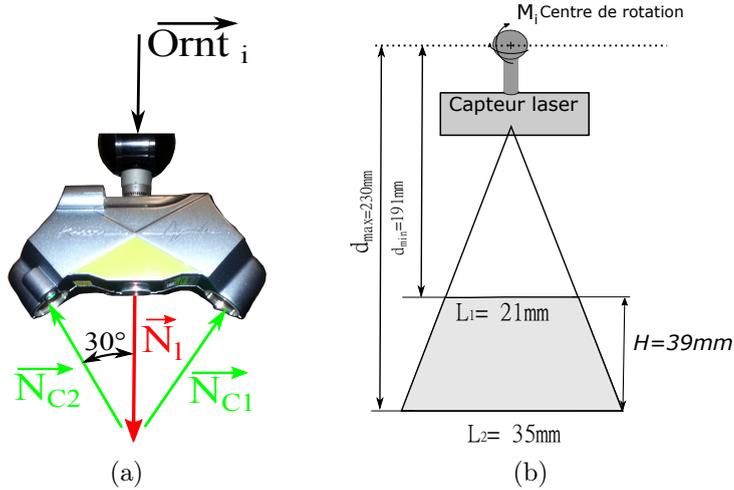


Figure 2.3 – (a) Orientations de la ligne laser et des caméras; (b) Dimensions de la fenêtre de mesure et les distances de numérisation.

2.2.2 Évaluation du bruit

Le bruit est défini par l'indicateur δ (Section. 1.4.1). Celui-ci dépend fortement de la stratégie de numérisation et en particulier de la distance et de l'angle de numérisation. L'angle de numérisation α est l'angle entre la normale à la surface et le rayon émis par la source lumineuse dans le plan de triangulation (Figure. 1.6). Le protocole *QualiPSO* a été mis en œuvre avec différentes configurations afin d'évaluer l'influence de la distance et de l'angle de numérisation sur le bruit.

En gardant le même angle de numérisation, en déplaçant le capteur pour modifier la distance de numérisation le long de la fenêtre de mesure. Les résultats d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation sont reportés dans la Figure. 2.4. Le bruit est minimal au milieu de la fenêtre de mesure. Cette configuration correspond à une distance de numérisation dite optimale (d_{opt}).

Afin de pouvoir analyser la variation du bruit en fonction de l'angle de numérisation, le bruit est évalué en modifiant l'angle de numérisation et en gardant une distance de numérisation fixe (celle qui présente un minimum de bruit). Les résultats d'évaluation du bruit en fonction de l'angle de numérisation sont reportés dans la Figure. 2.5. Les résultats obtenus mettent en avant qu'avec la même distance de numérisation, plus l'angle augmente, plus le bruit est important.

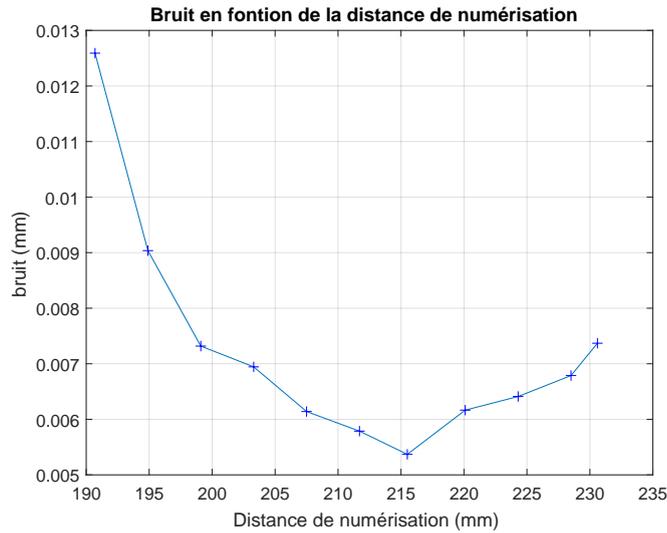


Figure 2.4 – Bruit en fonction de la distance de numérisation.

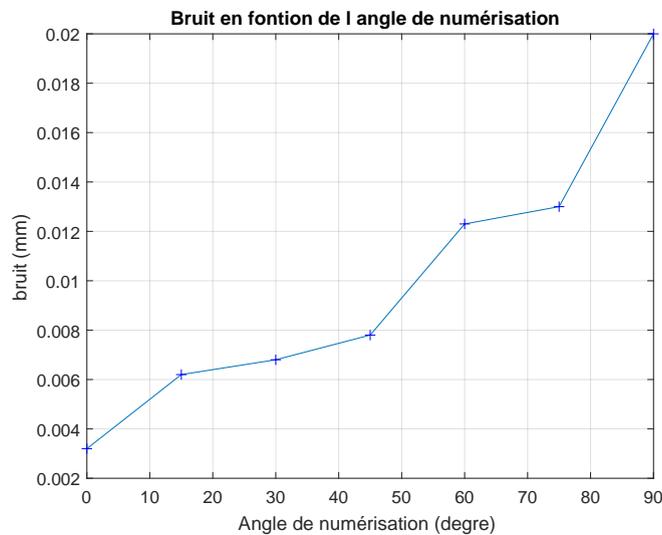


Figure 2.5 – Bruit en fonction de l'angle de numérisation.

2.2.3 Évaluation de la justesse

La justesse est définie par l'indicateur e (Section. 1.4.1). La justesse de mesure est évaluée en fonction de la distance de numérisation par la mesure d'une hauteur de marche calibrée de hauteur $H_1 = 4.99996\text{mm}$ et $H_2 = 19.99994\text{mm}$. Les résultats de la Figure. 2.6 montrent que la justesse peut atteindre jusqu'à $20\mu\text{m}$. Elle est minimale à une distance de numérisation optimale.

Dans son travail, Audfray a proposé une évaluation de la justesse dite relative sur un artefact de référence [Audfray, 2012]. Elle est évaluée comme la différence entre la

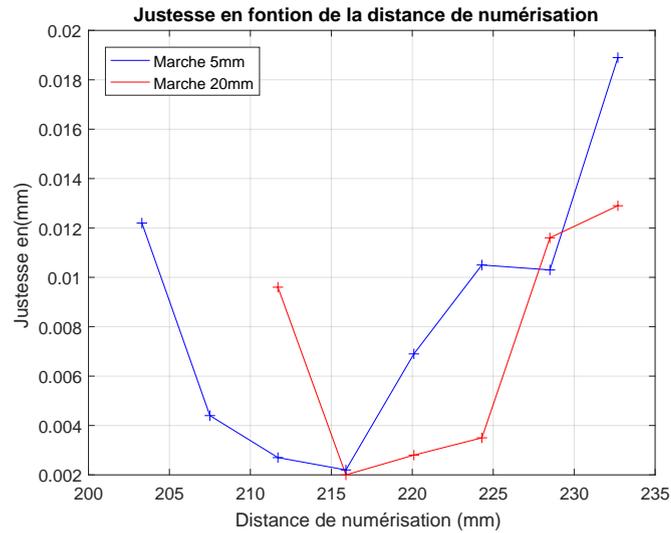


Figure 2.6 – Justesse en fonction de la distance de numérisation.

position calculée d'une surface numérisée et sa position théorique. Dans les calculs de la justesse relative, le plan numérisé à une distance optimale qui correspond au milieu de la fenêtre de mesure a été choisi comme plan de référence, car le bruit est minimal dans cette configuration. Les résultats sont reportés sur la Figure. 2.7. La justesse relative est minimale au milieu de la fenêtre de mesure.

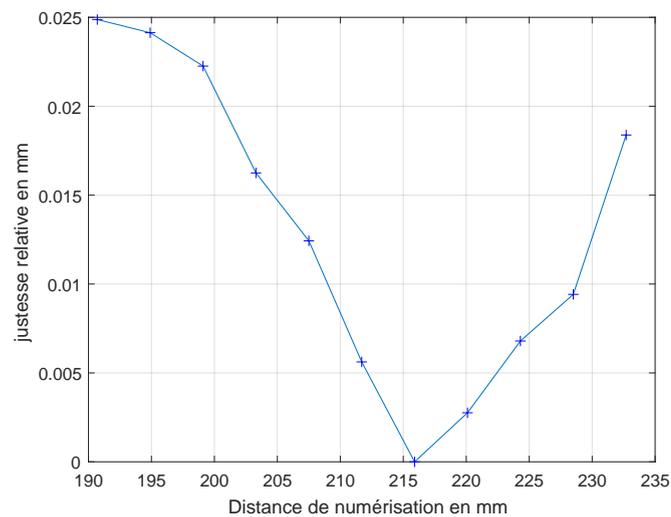


Figure 2.7 – Justesse relative en fonction de la distance de numérisation.

2.2.4 Évaluation des erreurs de remise en position et de changement d'orientations du capteur laser-plan

L'erreur de remise en position du capteur caractérise le défaut de recalage des nuages de points mesurés avec la même orientation, avec une remise en position du capteur effectuée entre deux numérisations successives sans effectuer une nouvelle calibration. Pour évaluer ce défaut, la sphère d'étalonnage a été numérisée dix fois dans une orientation calibrée, puis dix fois en ayant réalisé une première remise en position du capteur, et enfin dix fois en ayant réalisé une seconde remise en position (Figure. 2.8(a)). Pour chaque numérisation, une sphère des moindres carrés est associée.

Le barycentre C_{moy} des dix premières sphères est évalué. Les distances entre les centres des sphères pour chaque numérisation et le barycentre C_{moy} sont ensuite calculées (Figure. 2.8(b)). Les résultats montrent que les erreurs de remise en position peuvent atteindre jusqu'à $12\mu m$. La répétabilité pour une orientation (écart type $\sigma = 0.001mm$ des distances calculées pour une seule orientation) est faible par rapport à celle pour les trois orientations ensemble (écart type $\sigma = 0.004mm$ de toutes les distances).

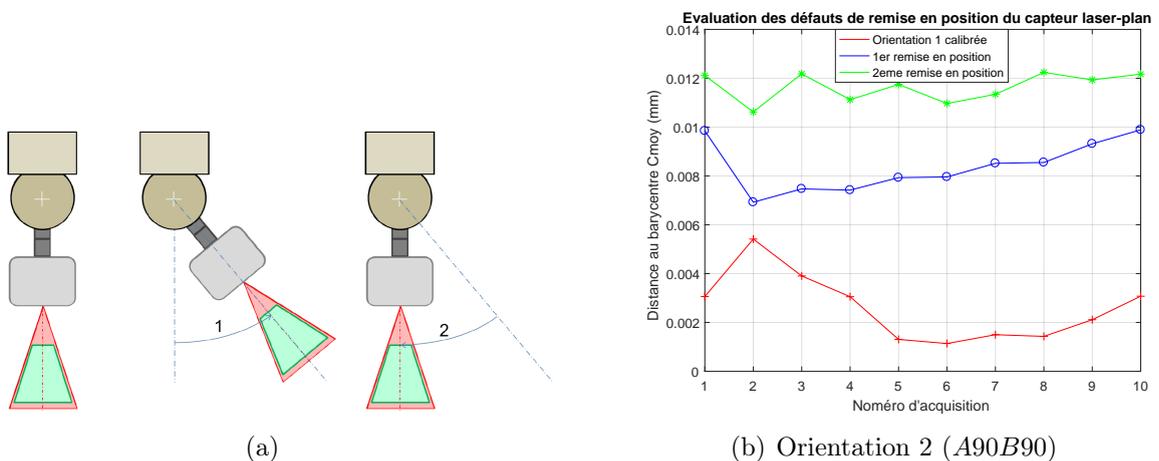


Figure 2.8 – (a) Remise en position du capteur laser-plan [Audfray, 2012]; (b) Résultats d'évaluation des erreurs de remises en position.

L'erreur de changement d'orientations représente l'erreur de calibration externe qui caractérise les erreurs causées par l'utilisation de plusieurs orientations lors de la mesure d'un même élément de référence. La sphère d'étalonnage a été mesurée cinq fois pour chacune des trois orientations du capteur (Figure. 2.9), chaque orientation étant calibrée. Les distances entre chaque centre de sphères calculé au barycentre des cinq premières acquisitions sont calculées (Figure. 2.10). Les résultats montrent que les erreurs

de changement d'orientations peuvent atteindre jusqu'à $20\mu m$.

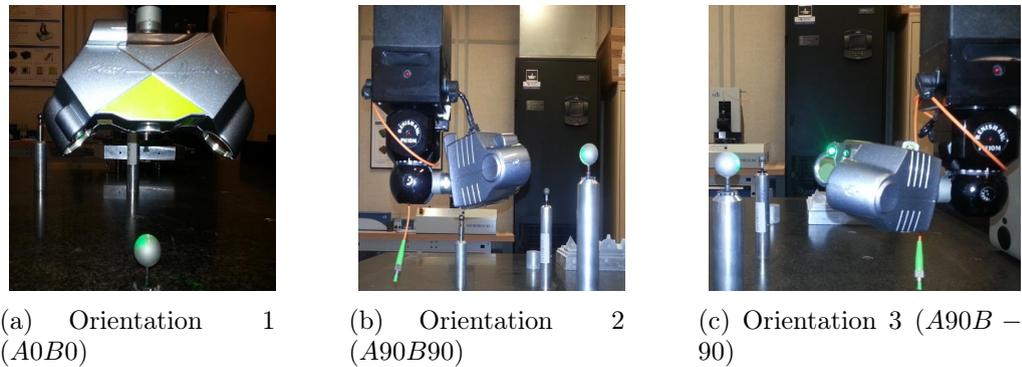


Figure 2.9 – Configurations du capteur pour l'évaluation des erreurs de changement d'orientations.

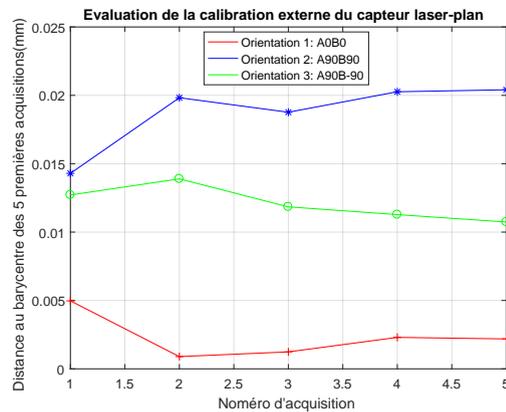


Figure 2.10 – Évaluation des erreurs de changement d'orientations du capteur laser-plan.

Ces deux erreurs dues au remise en position et au changement d'orientations du capteur sont significatives. Par conséquent, limiter le nombre d'orientations des capteurs dans la planification de la gamme d'inspection est à prendre en compte pour améliorer la qualité de mesure.

2.2.5 Évaluation des performances du palpeur

L'évaluation des performances du palpeur consiste principalement à évaluer la répétabilité. Cette évaluation a été effectuée dans les trois directions d'accostage X , Y et Z . Le même point a été acquis 30 fois selon la même direction d'accostage (Figure. 2.11). La moyenne, le minimum, le maximum des coordonnées des points ainsi que l'écart type sont évalués. Les résultats sont représentés dans le Tableau. 2.1. L'écart type est inférieur

à $1\mu m$ dans les trois directions d'accostage X , Y et Z .

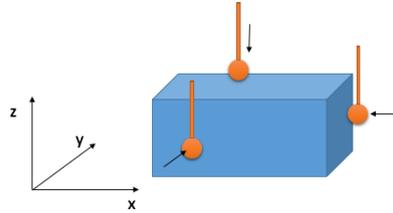


Figure 2.11 – Principe d'évaluation de la répétabilité de mesure avec un palpeur $TP2$ dans les trois directions.

	La moyenne mm	L'écart type mm	Min mm	Max mm
Selon X	-292.6194	$4.9013 \cdot 10^{-4}$	-292.6200	-292.6190
Selon Y	-145.7997	$5.8329 \cdot 10^{-4}$	-145.8010	-145.7990
Selon Z	-214.7570	$1.1563 \cdot 10^{-13}$	-214.7570	-214.7570

Tableau 2.1 – Résultats d'évaluation de la répétabilité de mesure avec un palpeur $TP2$ dans les trois directions.

Concernant les caractéristiques géométriques du palpeur, nous notons les deux paramètres suivants : la longueur du stylet $L_{stylet} = 20mm$ et le diamètre de la bille $D_{bille} = 2mm$.

2.2.6 Synthèse

À travers la qualification du capteur laser-plan, nous avons établi les courbes de variation du bruit en fonction de la distance et de l'angle de numérisation ainsi que la variation de la justesse en fonction de la distance de numérisation. Ces informations sont stockées dans une base de données de capteurs dits qualifiés. Une valeur de bruit ou de justesse peut être attribuée à chaque configuration de capteur (angle ou distance de numérisation).

Les dimensions de la fenêtre de mesure sont déterminées. La plage de variation de la distance de numérisation est comprise entre une distance minimale $d_{min} = 191mm$ et une distance maximale $d_{max} = 230mm$. Le bruit et la justesse sont minimaux quand la ligne laser est au milieu de la fenêtre de mesure, ce qui correspond à une distance de numérisation optimale $d_{opt} = 215mm$. La largeur de la ligne laser dans cette configuration optimale est $L_{opt} = 30mm$. Cependant, les largeurs minimale et maximale sont

respectivement $L_1 = 20mm$ et $L_2 = 35mm$. Concernant les dimensions du capteur, nous proposons de modéliser celui-ci par un parallélépipède dont les dimensions sont les suivantes : la largeur $a = 80mm$, la longueur $b = 200mm$ et la hauteur $c = 100mm$.

Les résultats d'évaluation de la répétabilité de mesure avec le palpeur dans les trois directions d'accostage X, Y et Z montrent la bonne performance de mesure avec le palpeur.

2.3 Extraction des données d'inspection

Les données d'inspection sont les surfaces à mesurer, mais également des attributs et des informations telles que les spécifications associées, qui sont utiles à la génération de la gamme d'inspection et au choix du capteur [Mahmud et al., 2011], [Audfray, 2012]. Prenons un exemple classique en métrologie. Pour vérifier la spécification de localisation de la Figure. 2.23, les surfaces à inspecter (deux plans) ainsi que toutes les informations requises pour le processus d'inspection, telles que le type de spécification, l'intervalle de tolérance et le système de référence doivent être identifiées.

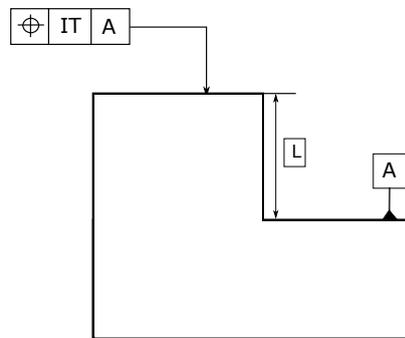


Figure 2.12 – Exemple d'une spécification de localisation.

Dans la littérature, les auteurs ont majoritairement utilisé la notion d'entité comme support des gammes d'inspections. Une entité est une forme générique à laquelle les ingénieurs associent un ensemble d'attributs et de connaissances qui sont utiles dans le raisonnement pour définir le produit [Nasr and Kamrani, 2006]. Une entité peut être définie comme une caractéristique de la pièce, qui porte un sens sémantique vis-à-vis de l'application [Bhandarkar and Nagi, 2000]. Le mot entité a plusieurs sens selon le contexte et le domaine d'application. Elle peut être une entité d'inspection, une entité de conception, une entité de fabrication, une entité d'assemblage ou une entité en robotique [Nasr and Kamrani, 2006, Al-Ahmari et al., 2016].

Généralement, un processus d'inspection peut s'appuyer sur l'une des trois notions suivantes : entité de mesure [Lee et al., 2007, Yuen et al., 2003, Wong et al., 2005], entité de fabrication (de forme, d'usinage) [Lee et al., 2004, Cho et al., 2005, Aslan et al., 1999, Devireddy, 1999, Kim et al., 2001] et entité d'inspection (Figure. 2.13).

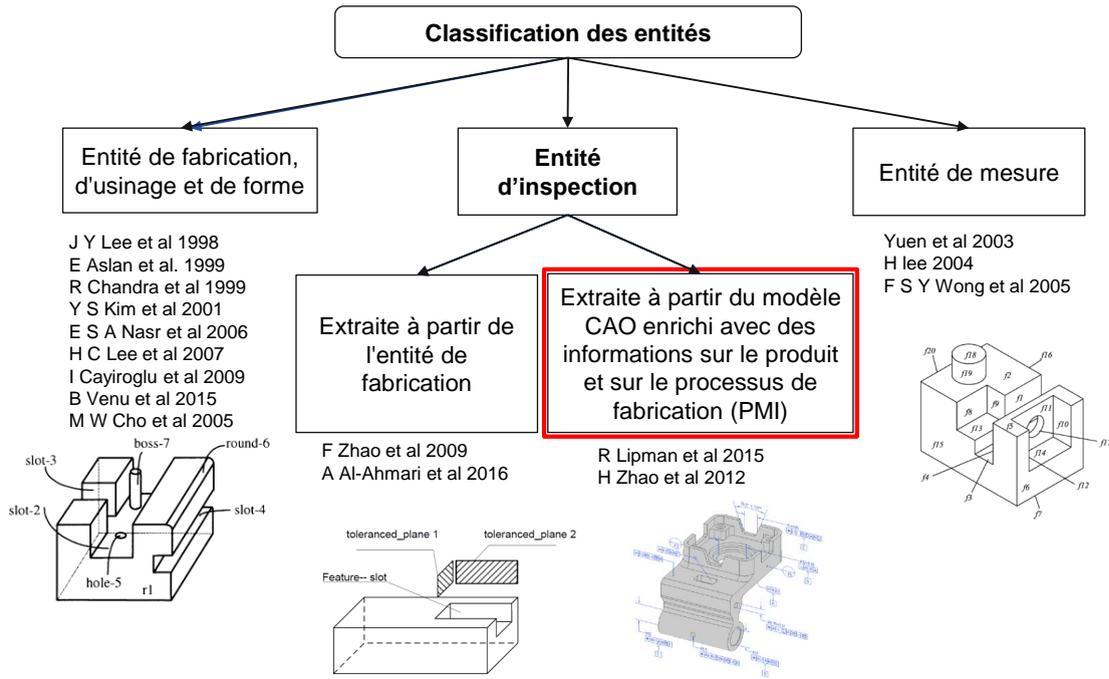


Figure 2.13 – Classification des entités.

Cho et al. développent une démarche d'inspection avec un palpeur utilisant la notion d'entité de fabrication [Cho et al., 2005]. Celle-ci est définie comme le résultat d'une opération de fabrication telle que *poche*, *rainure*. L'entité de mesure, définie par la surface élémentaire à mesurer (plan, sphère et cylindre...etc.), est utilisée dans [Yuen et al., 2003] pour définir une gamme d'inspection.

En métrologie, la notion d'entité doit être accompagnée d'informations relatives aux spécifications associées. Zhao développe une approche d'inspection on-machine (inspection pendant un processus d'usinage) [Zhao, 2009]. Dans son travail, l'entité d'inspection est extraite à partir d'entités de fabrication en regardant les surfaces associées à des spécifications et qui nécessitent d'être mesurées. Zhao et al. s'appuient sur la notion des surfaces portant des spécifications pour définir la gamme d'inspection [Zhao et al., 2012].

Dans ce travail, nous introduisons un nouveau concept d'entité d'inspection qui reprend la notion d'entité de mesure à laquelle nous associons des informations nécessaires à la génération de la gamme d'inspection ainsi qu'à la sélection du capteur.

2.3.1 Définition de la notion d'entité d'inspection

Nous utilisons la notion d'Entité d'Inspection (EI) qui peut être une entité tolérancée ou de référence. Nous définissons l'entité d'inspection tolérancée comme une entité à laquelle une ou plusieurs spécifications sont associées. Ainsi, une entité d'inspection est composée d'Entités de Mesure (EM) et des Spécifications associées (Sp).

Une entité de mesure (EM) est la surface élémentaire à mesurer. La spécification qui peut être géométrique ou dimensionnelle, est caractérisée par son type et ses attributs.

N	Entité d'inspection	N	Entité de mesure
1	point	1	Point
2	Ligne	2	Ligne
3	Cercle	3	Cercle
4	Courbe	4	Courbe
5	Plan	5	Plan
6	Cylindre	6	Cylindre
7	Demi-sphère	7	Demi-sphère
8	Cône	8	Cône
9	Surface complexe	7	Surface complexe
10	Plans parallèles		
11	Motif d'entités		
12	Entité composée		

Tableau 2.2 – Types d'entités d'inspection et entités de mesure.

Le Tableau. 2.2 représente une liste non exhaustive des types d'entités que nous avons retenues dans nos travaux. Les entités de mesure couvrent les types classiques qui se trouvent dans la plupart des logiciels de métrologie. Étant donné qu'une entité d'inspection peut avoir une ou plusieurs entités de mesure, la liste des entités d'inspection intègre les entités de mesure auxquelles nous rajoutons 3 nouveaux types. Le type *Plans parallèles* est la combinaison de 2 entités de mesure parallèles de type *Plan* (Figure. 2.14(a)). Le type *Motif d'entités* est une répartition linéaire ou circulaire d'entités de mesure. Par exemple, une distribution de 8 entités de mesure de type *Cylindre* sur un cercle de diamètre donné définit une entité d'inspection de type *Motif de cylindres* (Figure. 2.14(b)). Une entité d'inspection de type *Entité composée* est une combinaison de plusieurs entités de mesure (Exemple : plusieurs plans) (Figure. 2.14(c)).

Nous proposons de distinguer les entités d'inspection et les entités dites de non-inspection. Dans l'exemple de la Figure. 2.15, nous pouvons distinguer 2 entités d'inspection de type *Plans parallèles* qui sont représentées dans le Tableau. 2.3 : la première

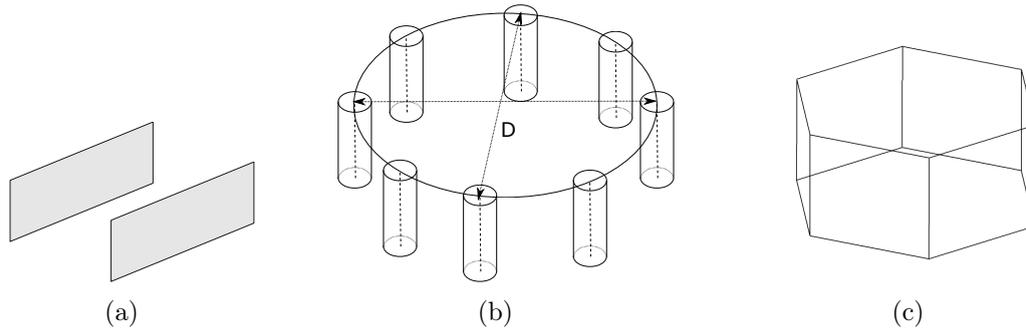


Figure 2.14 – Exemples d’entités d’inspection : (a) Plans parallèles ; (b) Motif d’entités ; (c) Entité composée.

(*EI1*), qui est tolérancée, est composée de deux entités de mesure (plan 1 et plan 2) ainsi que d’une spécification de symétrie ; la deuxième (*EI2*), qui est une référence, est composée de deux entités de mesure (plan 3 et plan 4). Les autres plans de la pièce sont des entités de non-inspection car ils ne portent pas de spécifications et ne sont pas des entités de référence.

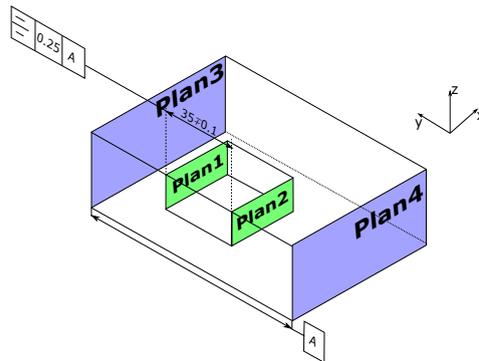


Figure 2.15 – Exemple d’entités d’inspection avec les entités de mesure associées.

Id	Type	Type	Nature de	Type de	Intervalle	Distance	Bornes	EIs de référence
EI	EI	EM	spécification	Tolérance	de	ou angle	d'intervalle	
	Plans	Plan			Tolérance	(mm ou °)		
EI1	Parallèles	Plan	Dimension	Dimension	-	L35	-0.1, +0.1	-
	Parallèles	Plan	Symétrie	Position	0.25	-	-	EI2
EI2	Plans	Plan	Référence	-	-	-	-	-
	Parallèles	Plan						

Tableau 2.3 – Reconnaissance des données d’inspection pour le cas de la Figure. 2.15

Après avoir défini et décomposé les entités d’inspection en entités de mesure et spécifications, il est important d’associer des attributs à ces éléments en fonction de leur type.

2.3.2 Assignment d'attributs aux entités

Afin de réaliser un processus d'inspection automatiquement, il est essentiel d'associer à chaque entité des attributs d'inspection. Ceux-ci sont associés aux entités de mesure et aux spécifications, et doivent être identifiés à partir du modèle *CAO*.

Dans la littérature, un modèle des Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement (*SATT*) est utilisé pour modéliser les entités géométriques [Petit, 2004, Chavanne, 2011]. Ce modèle est un langage déclaratif de description pour la position relative des Éléments Géométriques de Référence Minimum (*EGRM*). Chaque classe d'entité est caractérisée par son ou ses *EGRM* qui sont des éléments de la géométrie euclidienne du type point, droite et plan. Par exemple, l'*EGRM* d'un *SATT* sphérique est un point. La position relative de deux *SATT* est donnée par les distances et angles entre leurs *EGRM* respectifs. Dans ce travail, nous proposons d'assigner des attributs aux entités en nous basant sur la définition de la position et l'orientation de l'entité dans le repère pièce ainsi que ses dimensions intrinsèques.

Les attributs associés à l'entité de mesure (*EM*) sont sa position et son orientation dans le repère pièce ainsi que ses dimensions intrinsèques. Pour chaque (*EM*), un Repère Entité de Mesure *REM* (O_f, X_f, Y_f, Z_f) est défini (Figure. 2.16). Nous définissons le repère de telle façon que les vecteurs normaux aux plans ainsi que les vecteurs normaux aux plans contenant les cercles, les axes de symétrie des cylindres, demi-sphères et cônes correspondent à l'axe Z_f . La position et l'orientation du *REM* dans le repère pièce $Rp(O_p, X_p, Y_p, Z_p)$ sont connues.

Pour un type d'entité de mesure, les paramètres intrinsèques représentent l'information géométrique qui définit l'entité (Figure. 2.16). Par exemple, pour les entités de mesure de type *Plan*, la longueur selon la direction X_f et la longueur selon la direction Y_f sont stockées. Alors que pour une entité de mesure de type *Cylindre*, le diamètre d et la hauteur h sont mémorisés. Afin de distinguer les entités de mesure interne et externe, un paramètre λ , qui peut être -1 (entité interne) ou 1 (entité externe), est utilisé. Pour les courbes et les surfaces de forme complexes, la représentation *NURBS* (Non-Uniform Rational B-Spline) est adoptée, Les attributs sont alors : les points de contrôle, les poids et les séquences nodales.

Si on considère l'exemple de la Figure. 2.15, en plus des attributs associés aux spécifications qui sont résumées dans le Tableau. 2.3, nous associons à chaque entité de mesure

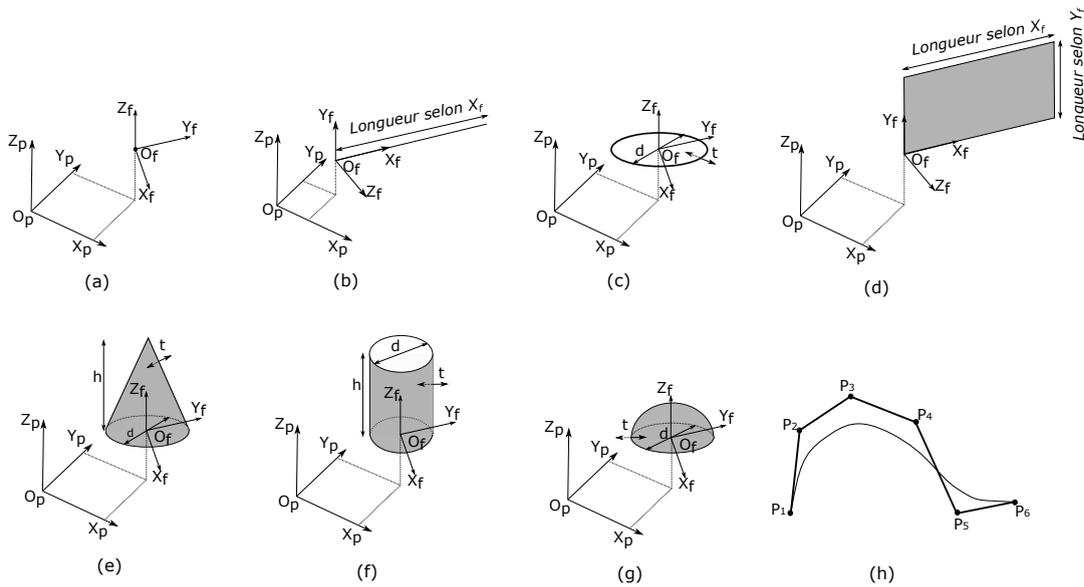


Figure 2.16 – Entités de mesure et leurs attributs : (a) point ; (b) ligne ; (c) cercle ; (d) plan ; (e) cône ; (f) cylindre ; (g) demi-sphère ; (h) courbe.

ses attributs géométriques. L'étude des attributs est reportée dans le Tableau. 2.4 et la Figure. 2.17.

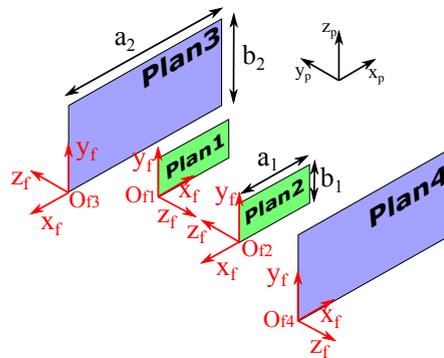


Figure 2.17 – Repères entité de mesure $REM (O_f, X_f, Y_f, Z_f)$.

2.3.3 Organisation de la base de données des entités d'inspection

Dans le but d'automatiser le processus de planification d'inspection, les informations extraites sont stockées dans une base de données. Le schéma relationnel de la base de données créée avec *SQL Workbench* est présenté dans la Figure. 2.18, dans laquelle les cinq éléments suivants sont définis : pièce, entité d'inspection, entité de non-inspection, entité de mesure et spécification. Les éléments sont définis par leurs identificateurs et des attributs. Les attributs de l'élément *spécification* (Sp) correspondent aux informations

Id EI	EM	Type EM	Position du $REM : (O_f)$	Orientation du $REM : (X_f, Y_f, Z_f)$	Paramètres intrinsèques			
					Longueur selon X_f	Longueur selon Y_f	Diamètre	Hauteur
EI1	Plan 1	Plan	$O_{f1}(x_1, y_1, z_1)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	a_1	b_1	-	-
	Plan 2	Plan	$O_{f2}(x_2, y_2, z_2)$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$-a_1$	b_1	-	-
EI2	Plan 3	Plan	$O_{f3}(x_3, y_3, z_3)$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$-a_2$	b_2	-	-
	Plan 4	Plan	$O_{f4}(x_4, y_4, z_4)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	a_2	b_2	-	-

Tableau 2.4 – Attributs des entités de mesure associées à l'exemple de la Figure. 2.17

nécessaires pour réaliser le processus de planification d'inspection, tel que le type de spécification et l'intervalle de tolérance, ainsi que les informations requises pour évaluer la spécification telle que la zone de tolérance (forme, orientation, position), l'élément tolérancé, les limites positives et négatives, les modificateurs et les exigences. Les attributs de l'élément *entités de mesure*, présentés dans la Section. 2.3.2, sont stockés dans la base de données.

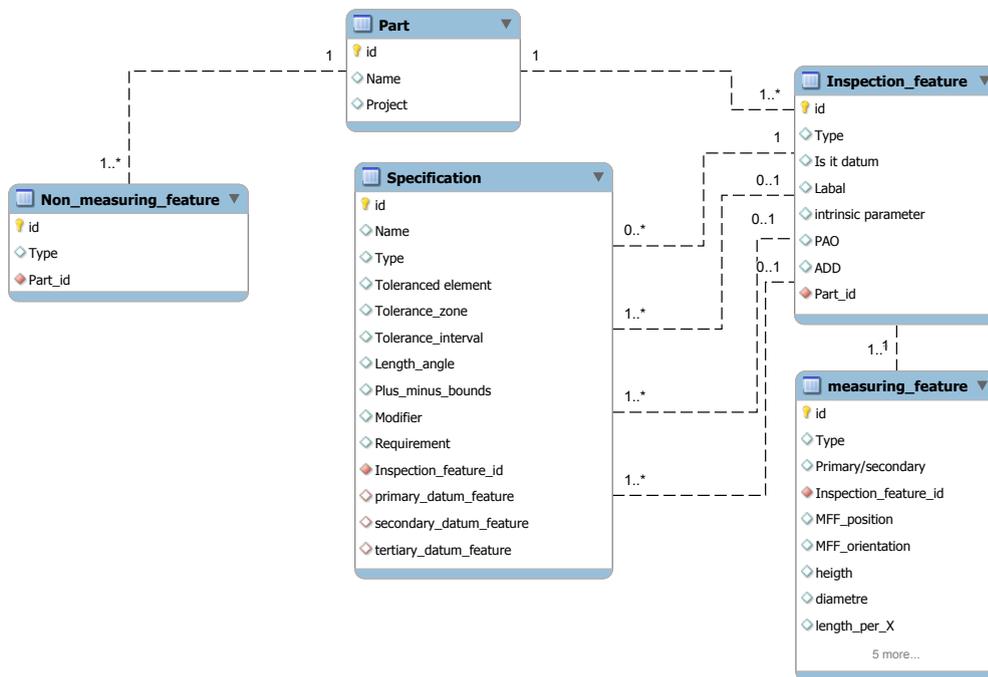


Figure 2.18 – Schéma relationnel de la base de données

2.3.4 Application de la démarche d'extraction des données d'inspection

À partir des définitions proposées précédemment, il est possible d'extraire les données d'inspection de la pièce test de la Figure. 2.19. En analysant le modèle *CAO*, la pièce est décomposée en entités d'inspection et entités de non-inspection. Nous identifions 12 entités d'inspection (Figure. 2.20); chaque entité est caractérisée par son identifiant. Pour chaque entité d'inspection, les entités de mesure et les spécifications associées sont extraites et représentées dans le Tableau. 2.5.

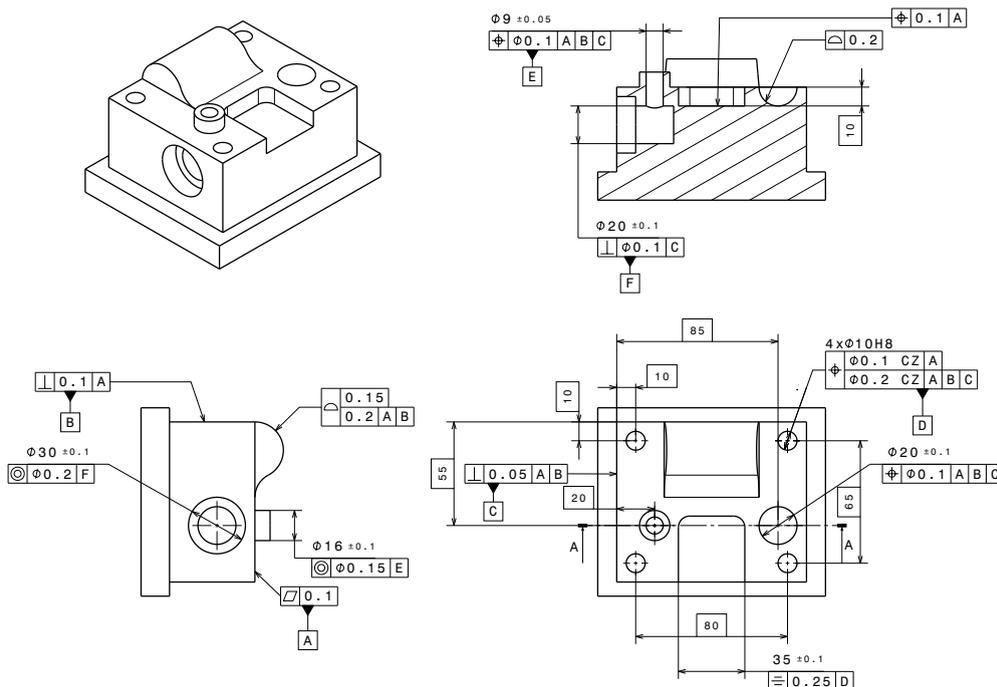


Figure 2.19 – Dessin de définition de la pièce test

Par exemple, l'entité d'inspection de type *motif d'entités*, définie par l'identifiant *EI10*, se compose de quatre entités de mesure cylindriques pour lesquelles trois spécifications doivent être évaluées. Si nous considérons la spécification de localisation, le type de tolérance, l'intervalle de tolérance et les entités du système de référence (*EI1*, *EI2* et *EI3*) sont reconnus. A noter que cette extraction se fait manuellement en analysant le modèle *CAO* de la pièce. Les logiciels ne possèdent pas des fonctions permettant l'extraction automatique des données d'inspection. L'automatisation de ce processus est l'une des perspectives de ce travail.

Après avoir extrait et stocké tous les attributs des entités, suivant l'approche de géné-

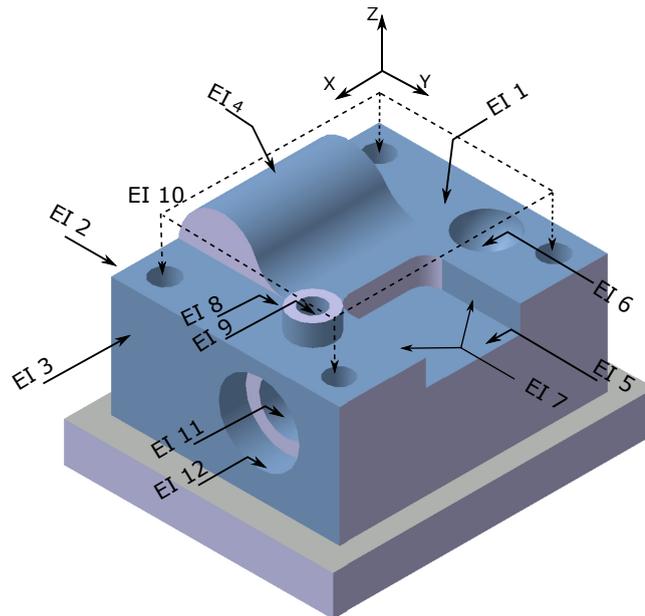


Figure 2.20 – Extraction des entités d'inspection de la pièce test.

Id EI	Type EI	Type EM	Spécification	Type de Tolérance	Intervalle de Tolérance (mm)	Distance ou angle (mm ou °)	Limites positives et négatives	EIs de référence
EI1	Plan	Plan	Planéité	Forme	0.1	-	-	-
EI2	Plan	Plan	Particularité	Orientation	0.1	-	-	EI1
EI3	Plan	Plan	Particularité	Orientation	0.05	-	-	EI1, EI2
EI4	Surface complexe	Surface complexe	Profil de Surface Profil de Surface	Forme	0.15	-	-	-
				Position	0.20	-	-	EI1, EI2
EI5	Plan	Plan	Localisation	Position	0.15	-	-	EI1
EI6	Demi-sphère	Demi-sphère	Dimension Profil de Surface Localisation	Dimension	-	$\varnothing 20$	-0.1, +0.1	-
				Forme Position	0.10 0.1	- -	- -	- EI1, EI2 and EI3
EI7	Plans Parallèles	Plan Plan	Dimension Symétrie	Dimension	-	L35	-0.1, +0.1	-
				Position	0.25	-	-	EI10
EI8	Cylindre	Cylindre	Dimension Coaxialité	Dimension	-	$\varnothing 16$	-0.1, +0.1	-
				Position	0.15	-	-	EI9
EI9	Cylindre	Cylindre	Dimension Localisation	Dimension	-	$\varnothing 9$	-0.05, +0.05	-
				Position	0.1	-	-	EI1, EI2 and EI3
EI10	Motif d'entités	Cylindre	Dimension	-	$\varnothing 10$	0, +0.022	-	
		Cylindre	Localisation	0.1	-	-	EI1	
		Cylindre Cylindre	Localisation Position	0.2	-	-	EI1, EI2 and EI3	
EI11	Cylindre	Cylindre	Dimension Particularité	Dimension	-	$\varnothing 20$	-0.1, +0.1	-
				Orientation	0.1	-	-	EI3
EI12	Cylindre	Cylindre	Dimension Coaxialité	Dimension	-	$\varnothing 30$	-0.1, +0.1	-
				Position	0.2	-	-	EI11

Tableau 2.5 – Reconnaissance des données d'inspection pour le cas de la pièce test.

ration des séquences d'opérations, nous définissons dans la prochaine section l'ensemble d'orientations minimal du scanner qui permet la mesure de ces entités. Celui-ci servira de support à l'étude des configurations capteur/pièce.

2.4 Choix d'un ensemble d'orientations du scanner

La définition d'une stratégie de mesure basée sur les orientations du scanner et pour chacune d'entre elles, la mesure est effectuée avec l'un des capteurs. Il est donc nécessaire de minimiser le nombre d'orientations du scanner.

Plutôt que d'étudier l'accessibilité de toutes les surfaces par le capteur laser-plan, une méthode proposée par [Lartigue et al., 2014] permet d'évaluer rapidement l'accessibilité globale du capteur par rapport aux surfaces. Cette méthode repose sur la recherche d'un ensemble minimal d'orientations selon les critères d'accessibilité.

Nous proposons de réaliser un choix des orientations du scanner à partir d'une sélection d'un ensemble minimal d'orientations classiquement définies par rapport au posage de la pièce dans l'espace de mesure et qui permettent une accessibilité globale des deux capteurs.

2.4.1 Méthodologie de sélection des orientations

Un ensemble d'orientations prédéfinies est proposé par analyse de l'accessibilité globale des surfaces de la pièce (Figure. 2.20) par les deux capteurs dans les orientations principales. Ces dernières sont définies par les directions de déplacement $\{-Z, +X, -X, +Y, -Y\}$ de la *MMT*. Généralement, pour un processus de planification de mesure, la pièce est mise en position de façon à ce qu'un nombre maximal d'entités puisse être mesurées par les orientations principales. L'ensemble d'orientations doit être ordonné en fonction du nombre d'entités à mesurer.

Il est nécessaire dans un premier temps de vérifier l'accessibilité des entités par les capteurs dans les orientations proposées. Comme il s'agit de deux capteurs de technologies différentes, l'accessibilité des deux capteurs est évaluée distinctement, ce qui conduit à générer deux listes d'orientations, la liste finale étant la fusion des deux listes.

2.4.2 Principe de génération de la liste des orientations

La mesure avec le capteur laser-plan est privilégiée pour les entités. Cependant, lorsque les entités sont internes comme les alésages par exemple, Audfray a montré que la surface n'était pas complètement accessible, en général peu accessible avec une seule orientation [Audfray, 2012]. Ainsi, pour les entités internes, la mesure avec le palpeur est recommandée [Zhao et al., 2012, Mohib et al., 2009]. Une première liste est créée en

analysant l'accessibilité du capteur laser-plan pour les orientations dites principales. Une seconde liste est définie en regroupant les orientations principales qui correspondent à l'Orientation d'Approche du Palpeur (*OAP*) des entités internes [Cho et al., 2004a, Cho et al., 2005] (Voir Section. 2.5.3.a).

2.4.3 Démarche proposée

La liste des orientations du scanner est établie et ordonnée selon les 3 étapes suivantes :

- Définition de la première liste ($Liste_1$) ;
- Définition de la seconde liste ($Liste_2$) ;
- Fusion des deux listes ($Liste_1$ et $Liste_2$).

1. Définition de la $Liste_1$ comme un ensemble d'orientations \vec{O}_i en étudiant l'accessibilité du capteur laser-plan sur l'ensemble des entités selon l'approche proposée par [Lartigue et al., 2014].

$$Liste_1 = \left\{ \vec{O}_i, i \in [1, m] \right\}$$

- (a) Discrétisation des entités par un ensemble de facettes (format STL). Le fichier STL est généré à l'aide des fonctions intégrées dans CATIA. Deux paramètres doivent être définis : la longueur maximale des facettes et l'erreur de corde entre le modèle et les facettes. La longueur maximale est réglée à 50% de la largeur de la ligne laser. L'erreur de corde doit être suffisamment petite pour que le modèle maillé soit une bonne approximation de la surface. Divers tests ont montré que ce paramètre a peu d'influence lorsqu'il est choisi en cohérence avec la courbure géométrique du modèle. Pour les surfaces planes, ce paramètre n'a pas d'influence.
- (b) Représentation de la surface par un ensemble de voxels construits tels que la taille du voxel corresponde à la largeur optimale de la ligne laser (L_{opt}) (Figure. 2.22(b)).
- (c) Évaluation du vecteur normal pour chaque voxel \vec{n}_{voxel} en tant que valeur moyenne des vecteurs normaux locaux. Un vecteur normal local est le vecteur normal à une des facettes incluses dans le voxel.

- (d) Analyse de la cohérence du vecteur normal : Le vecteur normal au voxel est dit représentatif si l'angle entre le vecteur normal et chaque vecteur normal local à une facette incluse dans le voxel est inférieur à un seuil θ_{seuil} . La valeur seuil est définie à partir du cône utilisé pour décrire le capteur (Figure. 2.21(b)). Généralement, θ_{seuil} est choisie comme étant le quart de l'angle définissant ce cône. Dans ce travail, l'angle du cône de visibilité ϕ est de 45° .

Considérons une facette k de vecteur normal local \vec{n}_k . Nous définissons l'angle θ_k par l'angle entre la normale moyenne \vec{n}_{voxel} et la normale locale \vec{n}_k (Figure. 2.21(a)). La cohérence est validée si $\theta_k \leq \theta_{seuil}$.

Si le vecteur normal n'est pas représentatif, la taille du voxel est divisée par deux, et l'analyse de la cohérence est évaluée pour chacun des deux nouveaux voxels (Figure. 2.21(a)).

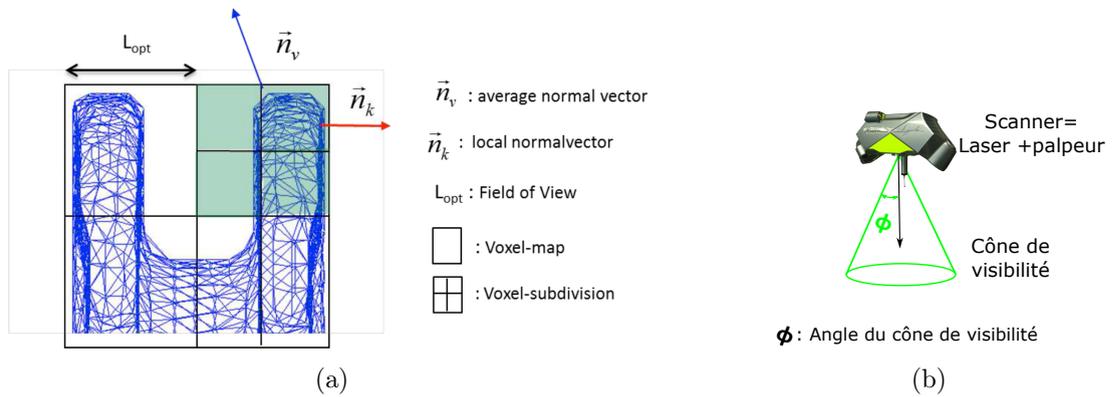


Figure 2.21 – (a) Analyse de cohérence; (b) Angle de visibilité du capteur laser-plan.

- (e) Étude de visibilité dans les orientations principales $\{Z-, X+, X-, Y+, Y-\}$ et qualification des voxels en voxels vus et voxels non vus : Un voxel est dit *vu* pour une orientation si l'angle entre cette orientation et le vecteur normal au voxel est inférieur à un angle de vue admissible par rapport à la qualité attendue. Dans ce travail, afin d'assurer un bruit de mesure inférieur à un seuil de $7.5 \mu\text{m}$, l'angle de vue admissible est limité à 45° (Section. 2.2.2). A chaque voxel vu est associée une orientation de vue.
- (f) Étude de visibilité des voxels non vus pour des orientations supplémentaires définies par l'intersection des premier et troisième plans bissecteurs. Le même principe de qualification des voxels en voxels vus et voxels non vus est appliqué dans ces orientations supplémentaires. Nous associons à chaque voxel vu une

orientation de vue.

- (g) Définition de $Liste_1$ par l'ensemble des orientations de vue associées aux voxels vus. Ces orientations sont classées en fonction du nombre de voxels visibles (Figure. 2.22(d)). Pour minimiser le nombre d'orientations du scanner, les orientations de vue qui mesurent un faible nombre de voxels sont négligées.
2. Définition de la $Liste_2$ par un ensemble d'orientations \vec{O}'_i . Ce sont les orientations principales qui correspondent aux Orientations d'Approche du Palpeur (OAP) [Cho et al., 2004a, Cho et al., 2005] permettant de mesurer les entités internes telles que les cylindres, les demi-sphères, les cônes et les plans parallèles. L' OAP représente l'orientation assurant l'accessibilité du palpeur pour mesurer l'entité (Figure. 2.34). L' OAP correspond aux axes de symétrie de l'entité lorsque celle ci en présente. L'ordre des orientations dans la $Liste_2$ est établi en fonction du nombre d'entités accessibles (Figure. 2.22(e)).

$$Liste_2 = \left\{ \vec{O}'_i, i \in [1, n] \right\}$$

3. La liste des orientations du scanner $Liste = \{Liste_1 \cup Liste_2\}$ est obtenue en fusionnant et en ordonnant les deux ensembles d'orientations \vec{O}_i et \vec{O}'_i . Les orientations répétées dans les deux groupes sont classées en premier (Figure. 2.22(f)). Pour le cas de la pièce test présentée dans la Figure. 2.22, les orientations \vec{O}_1 de la $Liste_1$ et \vec{O}'_1 de la $Liste_2$ correspondent à la même orientation $-Z$; cette orientation notée \overrightarrow{Ornt}_1 est la première orientation de la liste.

2.5 Génération des groupes d'entités

Une fois que toutes les entités d'inspection ont été identifiées, la pièce mise en position et les orientations du scanner définies, une analyse est faite pour créer des groupes d'entités associées aux orientations prédéfinies du scanner. Un groupe d'entités comprend deux sous-groupes : un sous-groupe pour les entités qui seront mesurées avec le capteur laser-plan et l'autre pour les entités qui seront mesurées avec le palpeur.

Dans ce travail, nous souhaitons privilégier la mesure avec le capteur laser-plan afin de tirer avantage de sa rapidité d'exécution. Dans ce sens, il convient d'étudier l'aptitude du capteur laser-plan vis-à-vis du niveau de qualité nécessaire pour vérifier une spécification

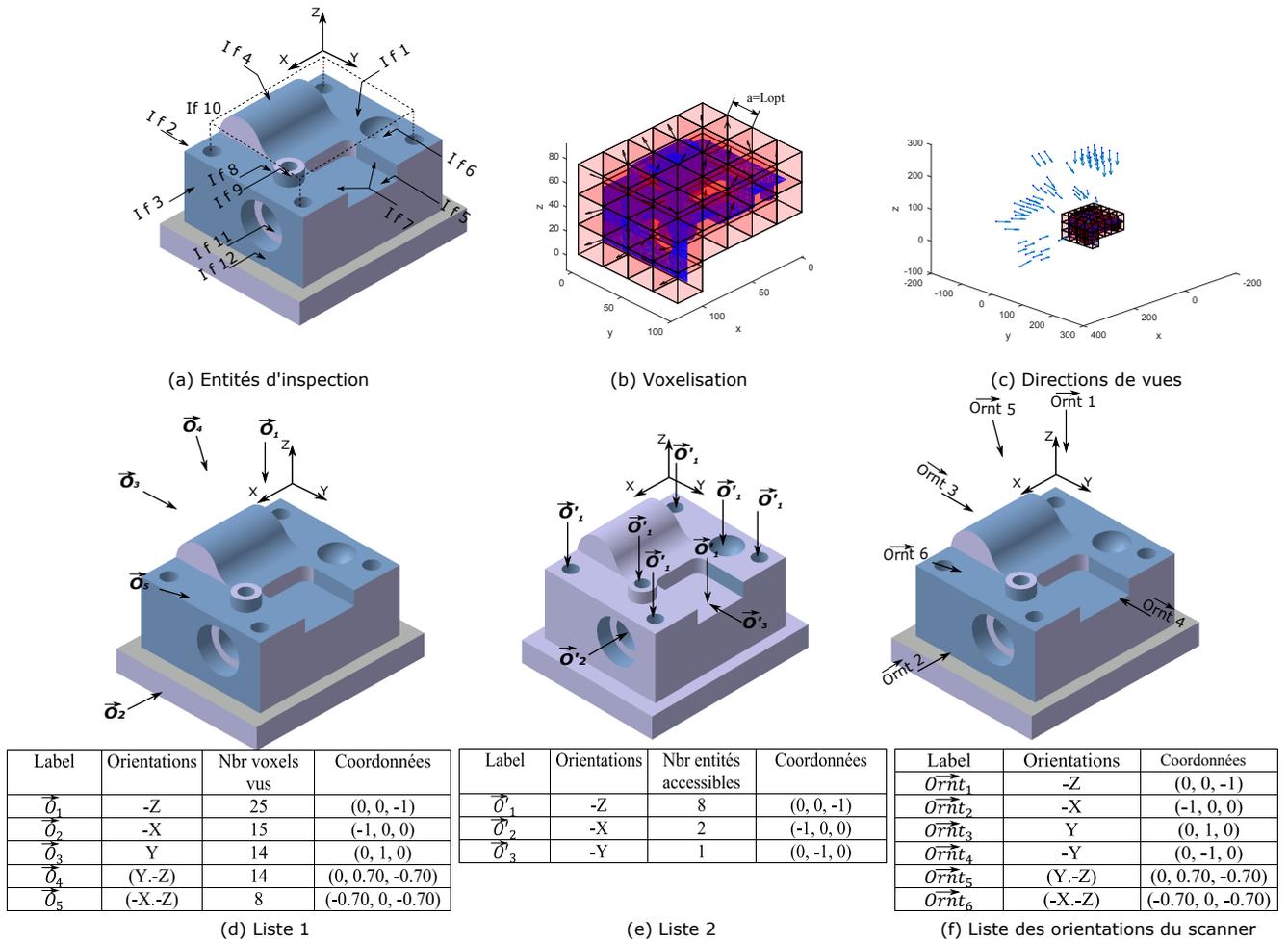


Figure 2.22 – Identification des orientations du scanner pour le cas de la pièce test.

donnée et répondre aux besoins métrologiques. Pour cela, nous proposons un algorithme de sélection des capteurs basé sur l'évaluation de l'aptitude des capteurs à mesurer une entité en fonction de la configuration du capteur et de la spécification à contrôler. Compte tenu de l'importance des erreurs de repositionnement du capteur [Audfray, 2012], la minimisation de changement d'orientations du scanner doit être envisagée lors de la génération des groupes d'entités.

Nous considérons qu'une entité d'inspection peut être mesurée par les deux capteurs, le capteur laser-plan et le palpeur. La mesure d'une entité d'inspection avec les deux capteurs génère un problème de cohérence des données de mesure au moment du traitement et analyse des spécifications. Cette problématique sera traitée dans le chapitre 4.

2.5.1 Principe de génération des groupes d'entités

L'algorithme de génération des groupes d'entités est présenté dans la Figure. 2.23. Partant de l'ensemble minimal d'orientations prédéfinies du scanner, pour chaque orientation, l'aptitude du capteur laser-plan est évaluée en premier. Nous distinguons les entités qui sont totalement mesurables de celles qui le sont partiellement et de celles qui ne le sont pas. Ainsi, une entité est dite mesurable par le capteur laser-plan si elle respecte un ensemble de conditions relatives aux critères de qualité, d'accessibilité et d'absence de collision.

Il se peut qu'une entité ne soit pas totalement mesurable et qu'une partie soit mesurable par le capteur laser-plan, dans ce cas, l'entité dite partiellement mesurable est séparée en portions mesurables et portions non mesurables. Pour les entités et portions non mesurables, l'aptitude du palpeur dans l'orientation considérée est alors évaluée afin de former un sous-groupe correspondant aux entités mesurables avec le palpeur.

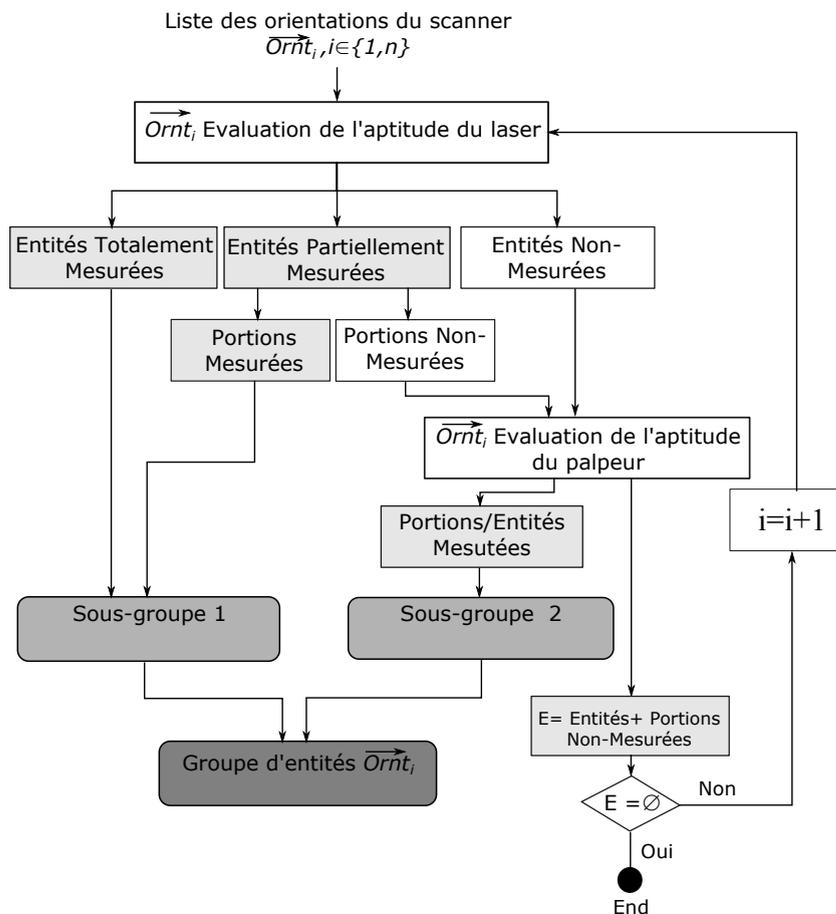


Figure 2.23 – Algorithme de génération des groupes d'entités.

Après une itération correspondant à une orientation, deux sous-groupes sont formés : un pour les entités qui seront mesurées avec le capteur laser-plan et un pour les entités qui seront mesurées avec le palpeur. Ces deux sous-groupes forment le groupe d'entités correspondant à l'orientation du scanner considérée. S'il existe des entités qui ne peuvent pas être mesurées dans l'orientation considérée, une autre orientation est choisie et les mêmes étapes sont répétées jusqu'à ce que toutes les entités soient mesurables. À la fin de l'algorithme, s'il reste des entités non mesurées, un autre positionnement de la pièce est choisi ou une autre étude des orientations du scanner doit être mise en place. Les étapes de l'algorithme sont détaillées dans les paragraphes suivants.

2.5.2 Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan

L'objectif de cette section est de détailler la méthode que nous proposons pour estimer l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité d'inspection dans une orientation donnée. Le capteur laser-plan est dit apte à mesurer une entité si les trois conditions suivantes sont vérifiées [Mahmud et al., 2011, Zhao et al., 2012, Mohib et al., 2009] :

- L'entité est accessible par le capteur laser-plan ;
- Aucune collision n'est détectée entre le scanner et la pièce dans l'orientation considérée ;
- L'incertitude du capteur laser-plan permet l'évaluation des spécifications associées à l'entité.

À chaque condition, nous associons un indicateur. A_{acc} est un indicateur qui représente l'aptitude du capteur laser-plan en termes d'accessibilité, A_{col} en termes d'évitement des collisions et A_{inc} en termes d'incertitude.

$$A_{acc} = \begin{cases} 1; & \text{Si l'entité est accessible par le capteur laser-plan,} \\ 0; & \text{Sinon} \end{cases}$$
$$A_{col} = \begin{cases} 1; & \text{Si aucune collision n'est détectée,} \\ 0; & \text{Sinon} \end{cases}$$
$$A_{inc} \in [0, 1]; \quad \text{Il est évalué à travers un modèle de logique floue.}$$

En général, pour une orientation donnée, l'aptitude du capteur laser-plan en termes

d'incertitude est évaluée en comparant l'incertitude de mesure à une incertitude admissible liée aux spécifications associées [Zhao et al., 2012, Audfray et al., 2012, Mahmud et al., 2011]. L'absence d'un modèle mathématique ou analytique pour évaluer l'aptitude du capteur laser-plan rend la décision plus subjective. Un modèle basé sur la logique floue pourrait fournir une formulation mathématique d'aide à la décision [Zadeh, 1975, Kovac et al., 2013]. Ainsi, un modèle original d'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan basé sur une modélisation par la logique floue est proposé. Si on utilise un raisonnement avec une logique classique, l'aptitude du capteur laser-plan en termes d'incertitude A_{inc} est exprimée par 1 ou 0 respectivement pour indiquer si le capteur laser-plan est apte ou non. Dans le raisonnement avec une logique floue, la transition entre le cas où le capteur est apte vers celui où il n'est pas, est exprimée par le paramètre A_{inc} reflétant le degré d'aptitude du capteur qui varie entre 0 et 1.

L'aptitude du capteur laser-plan est évaluée à l'aide de l'indicateur A qui est le produit des trois indicateurs précédents (Eqn. 2.1).

$$A = A_{acc} \cdot A_{col} \cdot A_{inc} \quad (2.1)$$

Pour simplifier le calcul de l'aptitude du capteur laser-plan, chaque entité est échantillonnée par un ensemble de facettes f_j , $E = \{f_j, j = 1 \dots m\}$ (format STL). L'aptitude du capteur est calculée en suivant l'Algorithme. 1. Le capteur laser-plan est dit apte en termes d'accessibilité, $A_{acc}(f_j) = 1$, si le faisceau laser ne croise aucune autre facette de la pièce et qu'aucune facette ne bloque la visibilité des caméras, sinon $A_{acc}(f_j) = 0$. Le capteur laser-plan est apte en termes d'évitement des collisions, $A_{col}(f_j) = 1$, si pour une distance donnée, le scanner ne touche pas la pièce dans la configuration considérée. L'aptitude du capteur laser-plan en termes d'incertitude est évaluée par un modèle de logique floue. Il sera abordé dans la prochaine section 2.5.2.c.

2.5.2.a Aptitude en termes d'accessibilité

Le capteur laser-plan utilisé dans ce travail est composé de deux caméras et d'une source de faisceau laser. Dans une orientation $\overrightarrow{Ornt_i}$, nous définissons $\overrightarrow{N_l}$ comme une orientation du faisceau laser, $\overrightarrow{N_{c1}}$ et $\overrightarrow{N_{c2}}$ comme deux orientations de la caméra (Figure. 2.24(a)). Une facette f_j est accessible par le capteur laser-plan ($A_{acc}(f_j) = 1$) si les deux conditions suivantes sont vérifiées : le faisceau laser n'intersecte pas les autres

Algorithme 1 Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan

```

for each facet  $f_j$  do
  if  $f_j$  is accessible by the laser then
     $A_{acc}(f_j) = 1$ 
  else
     $A_{acc}(f_j) = 0$ 
  end if
  if collision problem is detected then
     $A_{col}(f_j) = 0$ 
  else
     $A_{acc}(f_j) = 1$ 
  end if

  •  $U_{laser} \leftarrow$  measurement uncertainty ;
  •  $U_{add} \leftarrow$  admissible uncertainty ;
  •  $A_{inc}(f_j) = f(U_{laser}, U_{add}) \in [0, 1]$ ;

   $A_j(f_j) = A_{inc}(f_j) \cdot A_{acc}(f_j) \cdot A_{col}(f_j)$ 
end for

```

facettes de la pièce, et le faisceau réfléchi sur la facette peut atteindre au moins une caméra du capteur laser-plan sans être interrompu par une autre facette. L'accessibilité du faisceau laser dans l'orientation \vec{N}_l vers une facette f_j est évaluée selon l'Algorithme. 2.

Algorithme 2 Accessibilité du faisceau laser à une facette f .

```

Initialization :
 $Part = \{f_k; k \in [1, m]\}; f_j : \{P_1P_2P_3\}; G \leftarrow$  centroid  $P_1P_2P_3; \vec{N}_l \leftarrow \overrightarrow{Ornt}_i;$ 
 $A_{acc}(f_j) = 0$ 
for  $k \leq m$  do
   $f_k : \{P'_1P'_2P'_3\};$ 
  if  $f_j$  and  $f_k$  are not coplanar then
     $\vec{n}_1 \leftarrow \overrightarrow{GP'_1} \wedge \overrightarrow{P'_1P'_3}; \vec{n}_2 \leftarrow \overrightarrow{GP'_2} \wedge \overrightarrow{P'_2P'_1}; \vec{n}_3 \leftarrow \overrightarrow{GP'_3} \wedge \overrightarrow{P'_3P'_2}$ 
    if  $\vec{n}_1 \cdot \vec{N}_l \geq 0$  and  $\vec{n}_2 \cdot \vec{N}_l \geq 0$  and  $\vec{n}_3 \cdot \vec{N}_l \geq 0$  then
       $A_{acc}(f_j) = 1$ 
    end if
  end if
end for

```

La pièce est échantillonnée par un ensemble de facettes. Pour qu'une facette f_j soit accessible par le capteur laser-plan, il faut vérifier que le faisceau laser ne s'intersecte avec aucune facette f_k de la pièce.

Considérant $f_k : \{P'_1P'_2P'_3\}$, une facette de la pièce, le faisceau laser intersecte la facette f_k avant d'accéder à la facette f_j , si le vecteur \vec{N}_l traverse la pyramide $\{GP'_1P'_2P'_3\}$

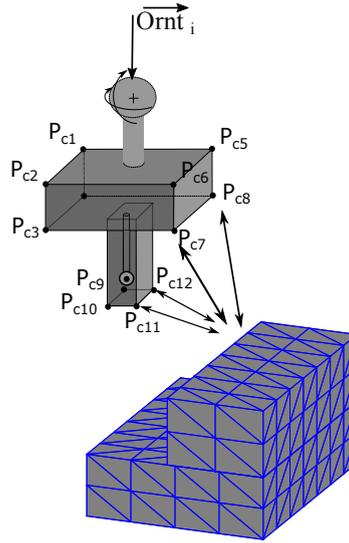


Figure 2.25 – Modélisation du problème de collision.

tude à l'aide d'un modèle logique flou. Le modèle proposé dans cette étude comporte les variables d'entrées suivantes : incertitude admissible U_{ad} et incertitude de mesure U_{laser} . En sortie, nous définissons un paramètre A_{inc} qui reflète l'aptitude du capteur laser-plan en termes d'incertitude. L'incertitude admissible U_{ad} est exprimée en fonction de l'intervalle de tolérance (IT) [Audfray et al., 2012, Mahmud et al., 2011] (Équation. (2.2)).

Nous supposons que l'incertitude standard associée au capteur laser-plan est le facteur principal qui contribue à l'incertitude de mesure U_{laser} . Deux indicateurs sont couramment utilisés pour quantifier l'incertitude associée au capteur laser-plan : le bruit et la justesse de mesure [Audfray et al., 2012, Mehdi-Souzani et al., 2016]. Nous exprimons l'incertitude du capteur laser-plan U_{laser} en fonction du bruit et de la justesse. Comme le bruit est fonction de l'angle de numérisation, l'incertitude U_{laser} est aussi fonction de l'angle de numérisation (α) (Figure. 2.26).

L'effet de la justesse sur l'évaluation d'une spécification de forme ou d'orientation est négligeable devant l'effet de bruit à une distance donnée [Audfray, 2012]. Ainsi, l'incertitude du capteur laser-plan est exprimée par l'Équation. (2.3).

$$U_{ad} = IT/8 \quad (2.2)$$

$$U_{laser}(\alpha) = \begin{cases} \delta(\alpha); & \text{Spécification de forme ou orientation,} \\ \sqrt{e^2 + \delta(\alpha)^2}; & \text{Autres types de spécifications} \end{cases} \quad (2.3)$$

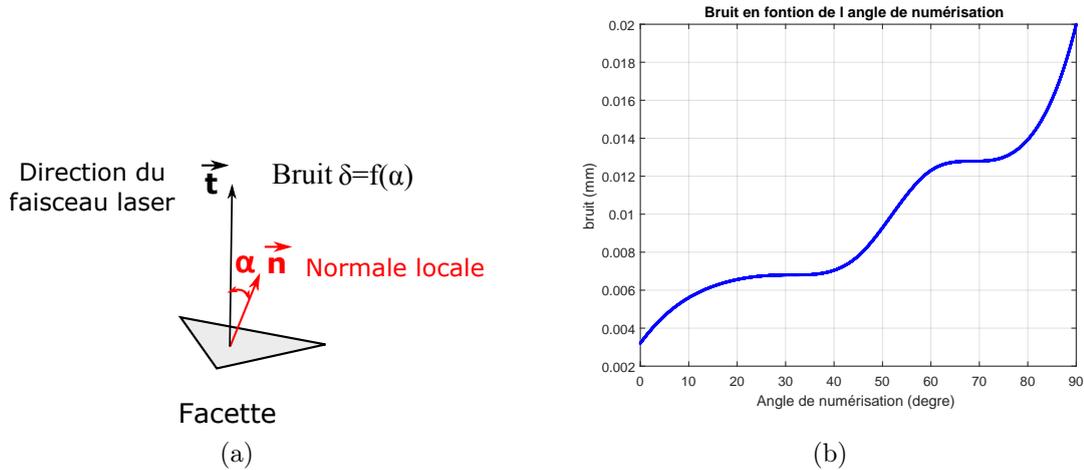


Figure 2.26 – (a) Angle de numérisation (α); (b) Bruit en fonction de l'angle de numérisation (modélisation courbe de la Figure. 2.5 -Cubic Spline Interpolation).

Où δ et e sont respectivement le bruit et la justesse de mesure.

La variation de l'incertitude du capteur laser-plan en fonction de l'angle de numérisation est représentée dans la Figure. 2.27(a).

La logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie classique. Dans la théorie classique des ensembles, l'appartenance d'un élément à un ensemble est évaluée de manière binaire; il appartient ou non à l'ensemble. En revanche, la théorie des ensembles flous permet l'évaluation graduelle de l'appartenance en définissant une fonction d'appartenance. En fonction des trois zones de variation de l'incertitude de mesure (Figure. 2.27(a)), nous associons à la variable d'entrée " U_{Laser} " trois ensembles flous: "Faible", "Moyen" et "Élevé". Ces trois ensembles flous sont présentés en vert, bleu et rouge respectivement (Figure. 2.27(a)). Nous soulignons que la couleur est plus ou moins foncée pour indiquer le degré d'appartenance. Notamment, la couleur bleue est plus foncée au milieu de l'ensemble et moins foncée sur les interfaces, cela signifie le passage progressif d'un ensemble à un autre. Par exemple; pour une valeur d'incertitude du capteur laser de $0.025mm$, elle appartient à 100% à l'ensemble "Élevé" indiqué en couleur rouge foncé et à 0% aux autres ensembles. Par contre, une valeur d'incertitude de capteur laser-plan de $0.0125mm$ qui appartient à 50% à l'ensemble "Élevé" et 50% à l'ensemble "Moyen", est située dans la partie rouge moins foncée pour indiquer l'appartenance à 50% à l'ensemble "Élevé" et en même temps elle est située dans la partie bleue moins foncée pour indiquer l'appartenance à 50% à l'ensemble "Moyen".

Pour la variable “ U_{ad} ”, deux ensembles flous sont définis : “Faible” et “Élevé” (couleur rouge et verte dans dans la Figure. 2.27(b)). Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée sont établies à travers les résultats de qualification du capteur laser-plan et l'expérience de l'utilisateur (Figure. 2.28). Trois types de fonctions d'adhésion sont utilisés : Fonction d'appartenance en forme de S, fonction d'appartenance en forme de Z et fonction d'appartenance en forme Gaussienne. Ces fonctions sont bien connues sur les logiciels de logique floue.

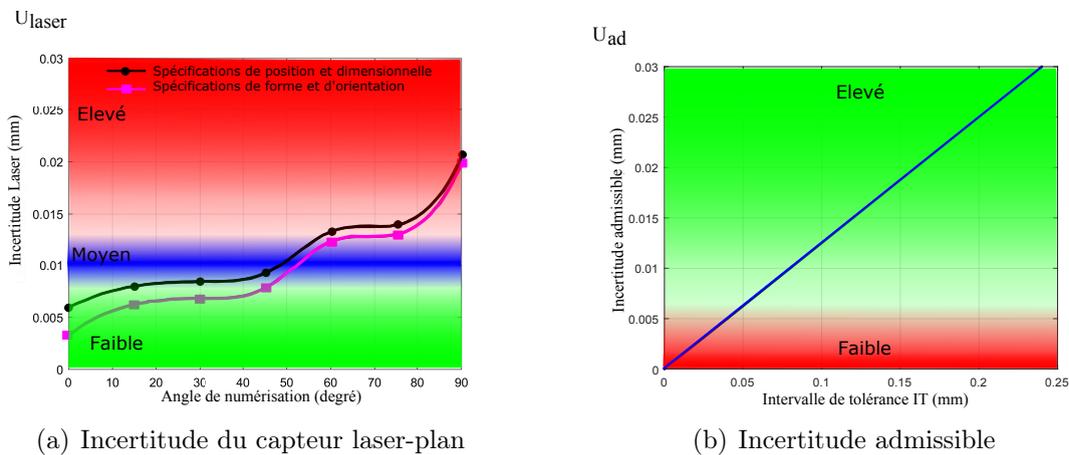


Figure 2.27 – Fonctions et ensembles flous des variables d'entrée.

Deux types de systèmes d'inférence floue sont généralement utilisés : celui de *Mamdani* et celui de *Sugeno* [Kovac et al., 2013]. La principale différence est que les fonctions d'appartenance de *Sugeno* sont soit linéaires soit constantes. Dans notre travail, le système d'inférence de *Sugeno* [Sugeno and Kang, 1988] est utilisé parce qu'il présente une bonne stabilité de résultats. Ainsi, la variable de sortie “ A_{Laser} ” a quatre valeurs linguistiques définies par des constantes (“Faible” = 0, “Moyennement faible” = 0.3, “Moyennement élevé” = 0.7 et “Élevé” = 1). Ces valeurs sont choisies de manière à ce que les valeurs “Faible” et “Élevé” soient respectivement 0 et 1, et les deux valeurs moyennes sont choisies après des tests parmi les valeurs qui permettent de représenter l'aptitude effective du capteur.

L'inférence floue repose sur la construction d'un ensemble de règles relatives aux variables linguistiques ; ces règles d'inférence représentent la connaissance que nous avons sur le système grâce à l'expertise humaine. Par exemple, le capteur laser-plan est apte à évaluer une spécification si l'incertitude admissible est élevée et si l'incertitude du capteur laser-plan est faible. Ainsi, nous établissons la règle suivante :

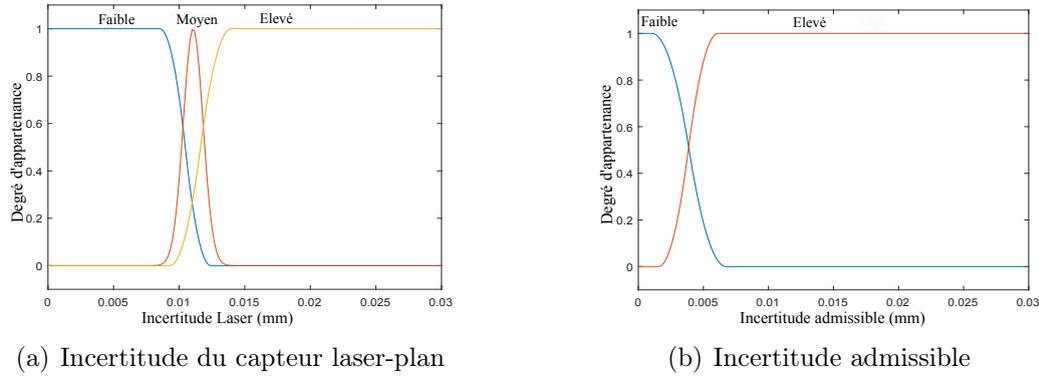


Figure 2.28 – Fonctions d'appartenance des variables d'entrée.

Si “*Incertitude du capteur laser-plan* A_{Laser} ” est “*Faible*” **et** “*Incertitude admissible* U_{ad} ” est “*Elevé*” **Donc** “*Aptitude du capteur laser-plan*” est “*Elevé*”.

Dans cette étude, nous développons 6 règles qui sont représentées sous forme d'une matrice de décision (Tableau. 2.6). Le modèle de logique floue décrit précédemment a été implémenté sur un outil de logique floue de MATLAB©. La Figure. 2.29 montre la surface 3D obtenue lors de la modélisation de l'aptitude du capteur laser-plan par une logique floue. La surface représente l'aptitude du capteur laser-plan en fonction de l'incertitude du capteur laser et de l'incertitude admissible. L'aptitude est maximale lorsque l'incertitude du capteur laser est faible et lorsque l'incertitude admissible est élevée (zone jaune dans la Figure. 2.29).

Considérant l'exemple de la Figure. 2.29, pour un couple de deux valeurs d'entrées : une incertitude admissible qui égale $0.02mm$ ($IT = 0.16mm$ selon l'Équation. (2.2)) et une incertitude du capteur laser-plan qui égale à $0.015mm$, l'aptitude du capteur vaut $A_1 = 0.3$. Alors que, pour la même valeur d'incertitude admissible et une faible valeur d'incertitude du capteur laser-plan ($A_{Laser} = 0.008$), l'aptitude monte à une valeur $A_2 = 0.6$.

2.5.2.d Aptitude du capteur laser-plan et classification des entités

Considérant une entité composée par un ensemble de facettes. L'aptitude du capteur laser-plan a été évaluée pour chaque facette $A_j(f_j)$ par le produit des trois paramètres ($A_{acc}(f_j)$, $A_{col}(f_j)$ et $A_{inc}(f_j)$) reflétant respectivement l'aptitude en termes d'accessibilité, d'absence de collision et en termes d'incertitude. L'aptitude du capteur laser-plan est la moyenne des aptitudes évaluées sur toutes les facettes (Eqn. 2.4) comme le montre

		Incertitude capteur laser A_{Laser}		
		Faible	Moyen	Élevé
Incertitude admissible U_{ad}	Faible	Moyennement Élevé	Moyennement Faible	Faible
	Élevé	Élevé	Moyennement Élevé	Moyennement Faible

Tableau 2.6 – Matrice de décision.

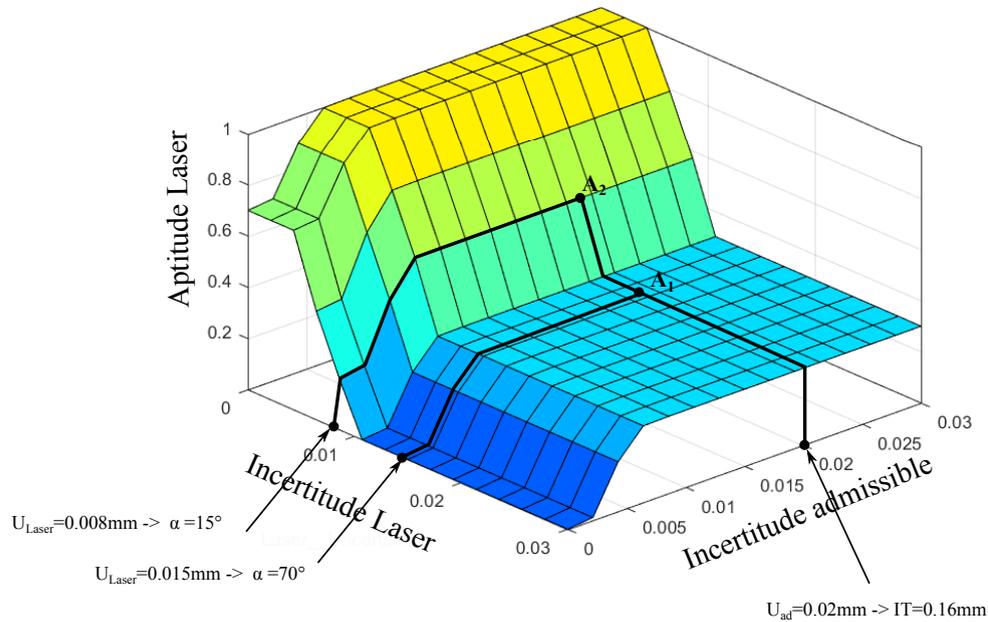


Figure 2.29 – Aptitude du capteur laser-plan en fonction de l'incertitude du capteur et de l'incertitude admissible.

la Figure. 2.30.

$$A_{moyenne} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m (A_j(f_j)) \quad (2.4)$$

Une entité est considérée comme entité totalement mesurée par le capteur laser-plan si l'aptitude moyenne est supérieure à A_{Seuil2} , et comme entité non mesurée si l'aptitude moyenne est inférieure à A_{Seuil1} (Tableau. 2.7). Si l'aptitude moyenne est comprise entre A_{Seuil1} et A_{Seuil2} , l'entité est considérée comme partiellement mesurée et nous distinguons les portions mesurées et les portions non mesurées. Les valeurs des paramètres de seuil sont déterminées en fonction des connaissances des experts à travers la qualification du capteur laser-plan.

Dans ce travail, ces deux valeurs seuils sont exprimées à partir du résultat de si-

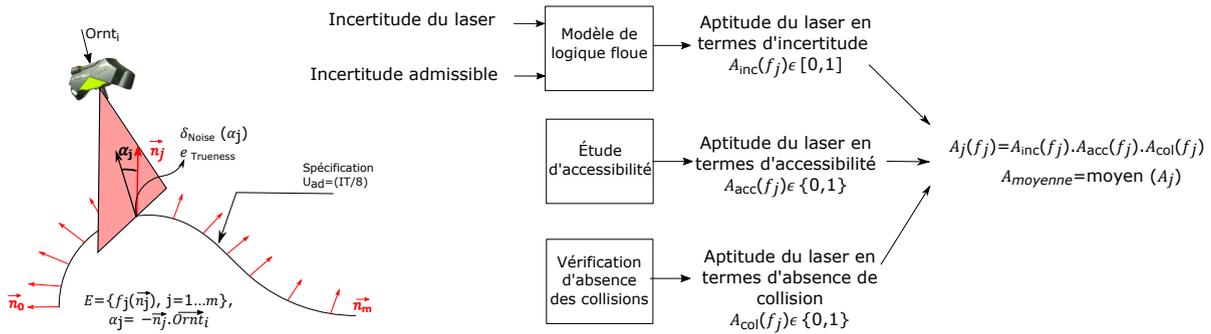


Figure 2.30 – Modélisation de l'aptitude du capteur laser-plan.

mulation de l'aptitude du capteur laser-plan en fonction de l'incertitude admissible et l'incertitude du capteur (Figure. 2.29). A_{Seuil1} et A_{Seuil2} sont fixés à 0.3 et 0.7 respectivement en fonction des deux valeurs qui délimitent les deux zones critiques vis-à-vis de l'aptitude du capteur laser-plan. Pour les entités partiellement mesurées, nous proposons de séparer les facettes pour lesquelles l'aptitude du capteur laser-plan est évaluée à plus de 0,5 pour former la portion mesurée. Cette valeur d'aptitude de 0.5 assure une incertitude de mesure inférieure à $0.01mm$. Les autres facettes pour lesquelles l'aptitude du capteur laser-plan est évaluée à moins de 0,5 forment la partie non mesurée.

Moyenne de l'aptitude du capteur $A_{moyenne}$	Aptitude du capteur à mesurer l'entité
$A_{moyenne} \leq A_{Seuil1}$	Entité non mesurée
$A_{Seuil1} < A_{moyenne} < A_{Seuil2}$	Entité partiellement mesurée
$A_{moyenne} \geq A_{Seuil2}$	Entité totalement mesurée

 Tableau 2.7 – Décision sur l'aptitude du capteur laser-plan et classification des entités en fonction de l'aptitude moyenne $A_{moyenne}$.

2.5.2.e Exemple d'application

Le principe d'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan est appliqué sur une entité de forme complexe (EI4) et une entité demi-sphère (EI6) (Tableau. 2.8). À l'entité EI4, une spécification de forme avec $IT = 0.15mm$ est associée. Les résultats sont présentés dans la Figure. 2.31(a) pour l'orientation $Ornt_1$. Une barre de couleur est utilisée pour indiquer l'aptitude du capteur laser-plan pour chaque facette. Les résultats montrent que l'aptitude du capteur est importante dans la zone où le capteur est perpendiculaire à la surface. Cependant, elle est moins importante dans la zone courbée où l'angle de numérisation est important. La moyenne des aptitudes est évaluée à 0,83

pour l'entité de forme complexe ($EI4$). Par conséquent, cette entité d'inspection est considérée comme une entité d'inspection totalement mesurée.

A l'entité demi-sphère $EI6$, une spécification de position avec $IT = 0.1mm$ est associée. La moyenne des aptitudes est évaluée à 0,48. Ainsi, l'entité est considérée comme une entité partiellement mesurée dont la portion mesurée est représentée en vert et la portion non mesurée est représentée en rouge (Figure. 2.31(b)).

Entité	Type	$IT(mm)$	Spécification	$A_{moyenne}$	Classification
$EI4$	Forme complexes	0.15	Forme	0.83	Totalement mesurée
$EI6$	Demi-sphère	0.1	Position	0.48	partiellement mesurée

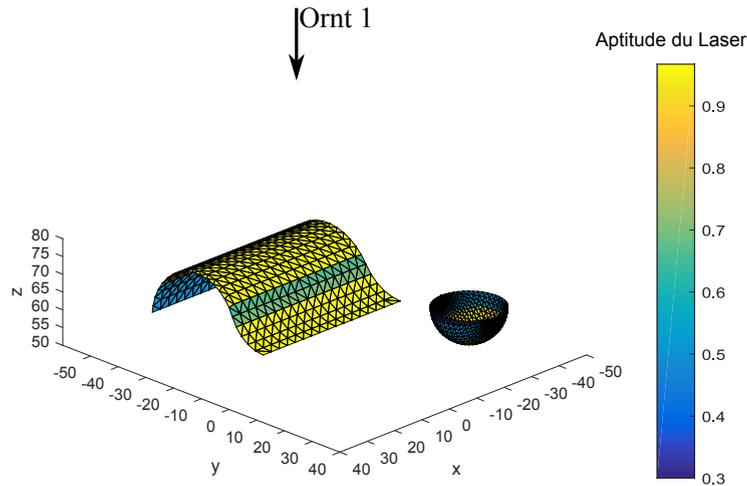
Tableau 2.8 – Exemple d'application.

2.5.2.f Synthèse et comparaison

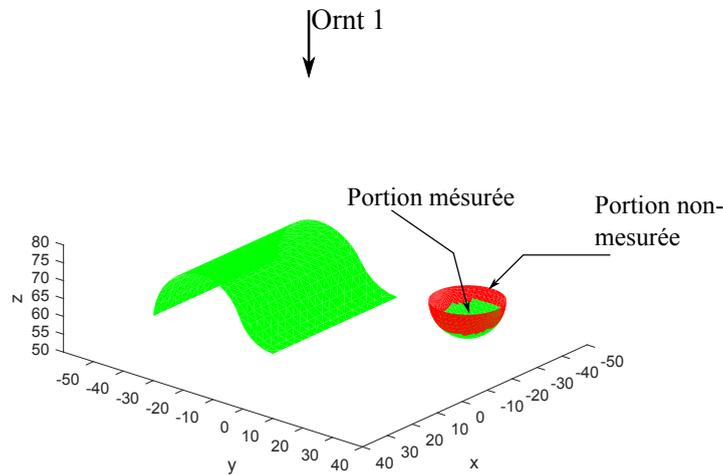
Un modèle d'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan, dont l'aptitude en termes d'incertitude est basée sur la théorie de la logique floue, est proposé. Dans cette section, nous comparons ce modèle avec les méthodes classiques d'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan. L'aptitude en termes d'incertitude est évaluée par une comparaison de l'incertitude du capteur laser-plan avec l'incertitude admissible comme suit [Zhao et al., 2012, Audfray et al., 2012, Mahmud et al., 2011] :

$$\begin{cases} U_{laser} \leq U_{ad}; & \text{Aptitude du capteur laser-plan} = 1; \text{ (entité mesurée),} \\ U_{laser} > U_{ad}; & \text{Aptitude du capteur laser-plan} = 0; \text{ (entité non-mesurée)} \end{cases}$$

Afin d'évaluer l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une forme complexe et évaluer une spécification de position avec un intervalle de tolérance $IT = 0,05mm$, l'incertitude admissible est calculée par : $U_{ad} = IT/8 = 0.006mm$. L'incertitude du capteur laser-plan U_{laser} , exprimée en fonction des indicateurs de qualité (Équation. (2.3)), dépend de l'angle de numérisation α (Figure. 2.27(a)). Afin d'assurer une meilleure qualité de mesure, l'angle de numérisation est limité à 45° , ce qui traduit par une valeur d'incertitude de mesure maximale de $U_{laser} = 0.01mm$. Comme $U_{laser} > U_{ad}$, l'aptitude du capteur laser-plan est égale à 0 ($A = 0$) et la forme complexe est alors considérée comme une entité non-mesurée (Figure. 2.32)). Le fait de majorer l'incertitude du capteur laser-plan à $0.01mm$, ce qui correspond à un angle de 45° , limite l'utilisation du



(a) Aptitude du capteur laser-plan dans chaque facette



(b) Portion mesurée et portion non-mesurée

Figure 2.31 – Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité de forme complexe (type de spécification : forme, $IT = 0,15mm$) et une entité demi-sphérique (type de spécification : position, $IT = 0,1mm$).

capteur laser-plan, alors que pour certaines portions de la surface, l'angle de numérisation est nul et l'incertitude du capteur laser-plan est alors assez faible.

Si nous appliquons notre modèle d'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan sur une forme complexe à laquelle une spécification de position de $0.05mm$ est associée, l'aptitude du capteur laser-plan n'est plus la même le long de la surface, car l'angle de numérisation est variable. Nous remarquons que le capteur laser-plan est apte à mesurer une grande partie de la surface à l'exception d'une partie où l'angle de numérisation

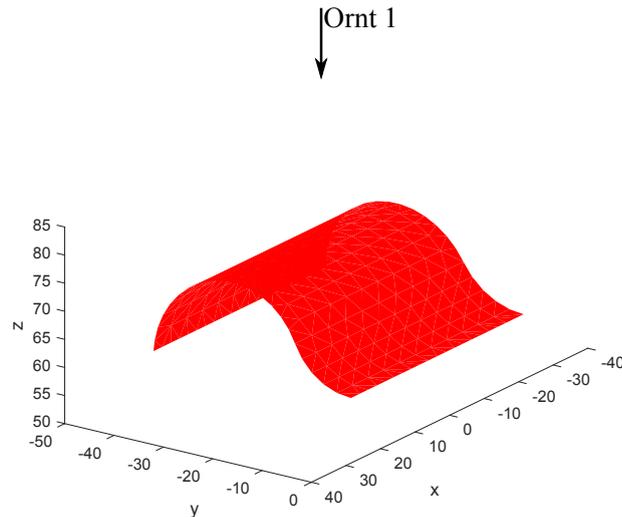


Figure 2.32 – Aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité de forme complexe avec une spécification de forme, $IT = 0,05mm$, en utilisant les méthodes classiques.

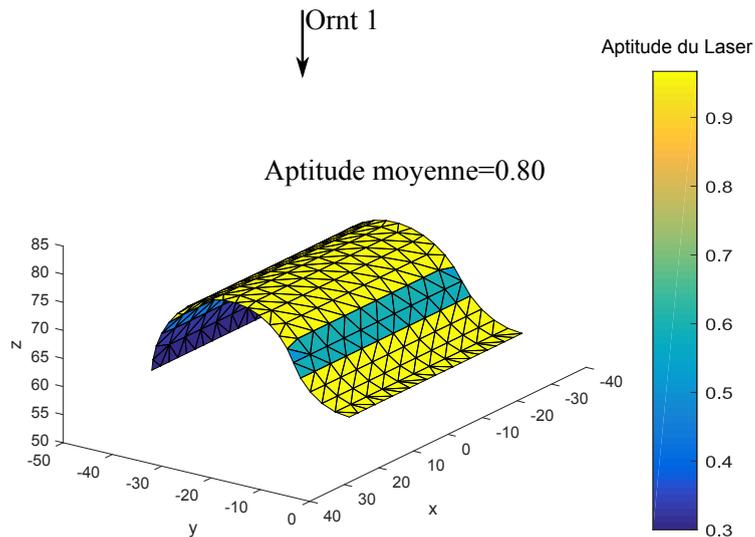
est faible, ce qui se traduit par une faible valeur d'aptitude (couleur bleue dans la Figure. 2.33). L'aptitude moyenne est évaluée à 0.8. Ainsi, on considère cette entité comme entité mesurée avec le capteur laser-plan.

Nous concluons qu'avec ce modèle d'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan, le capteur laser peut être utilisé autant que possible tant que les critères de qualité en termes de bruit et justesse sont respectés. De plus, L'aptitude que nous associons à chaque facette sera exploitée pour définir les trajectoires du capteur laser-plan.

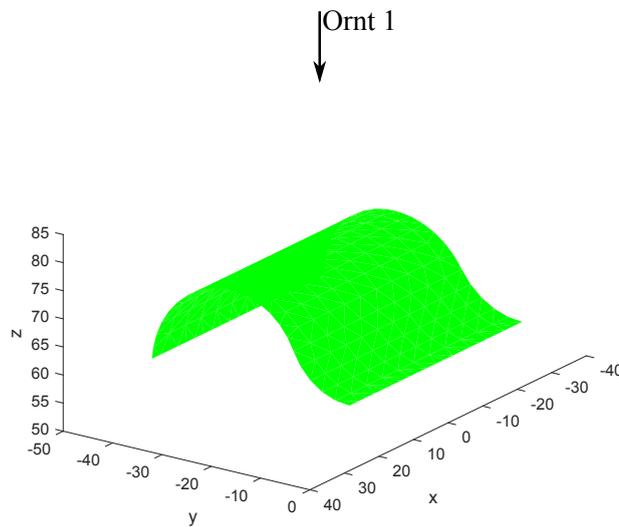
2.5.3 Évaluation de l'aptitude du palpeur

L'aptitude du palpeur est évaluée sur les entités et les portions qui ne peuvent pas être mesurées par le capteur laser-plan. Comme pour l'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan, le palpeur est dit apte à mesurer une entité si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- L'entité est accessible par le palpeur dans l'orientation considérée ;
- Aucune collision n'est détectée entre le scanner et la pièce dans la configuration considérée ;



(a) Aptitude dans chaque facette



(b) Entité totalement mesurable

Figure 2.33 – Évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité de forme complexe avec une spécification de forme, $IT = 0,05mm$, utilisant la méthode proposée.

2.5.3.a Aptitude en termes d'accessibilité

Les entités d'inspection canoniques telles que les cylindres et les plans parallèles sont caractérisées par une orientation d'approche du palpeur (*OAP*) [Cho et al., 2004a, Cho et al., 2005]. Quelques exemples d'*OAP* sont montrées dans la Figure. 2.34. Afin d'évaluer l'aptitude du palpeur en termes d'accessibilité, nous distinguons les entités caractérisées par une *OAP* et celles qui ont plusieurs *OAP* comme les plans et les formes complexes. Pour la première catégorie d'entités, le palpeur est dit apte à mesurer des

plans parallèles, des cylindres, des demi-sphères et des cônes, si l'orientation d'approche du palpeur (OAP) correspond à l'orientation du scanner $Ornt_i$.

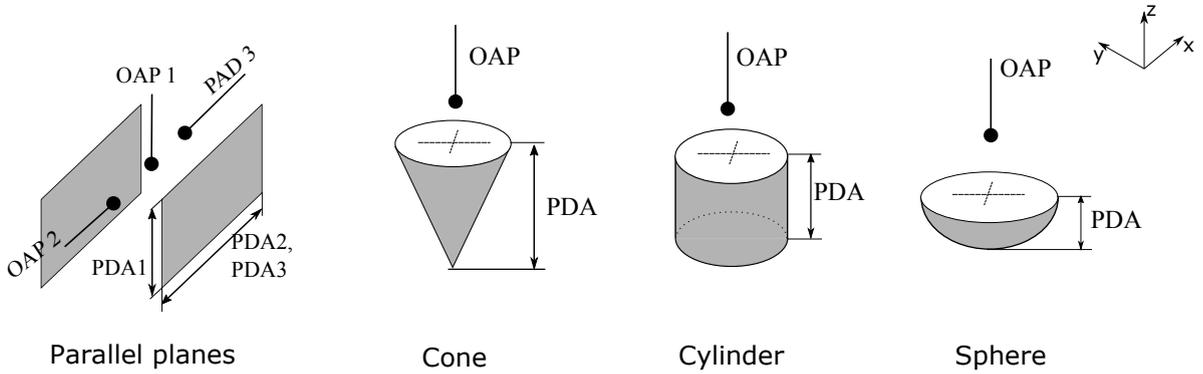


Figure 2.34 – Orientations d'Approche du Palpeur (OAP) et Profondeurs de la Direction d'Approche (PDA).

Pour les entités caractérisées par plusieurs OAP , le palpeur est dit apte à mesurer une entité plane dont le vecteur normal est \vec{n}_{plan} , si la condition de l'Équation. (2.5) est satisfaite.

$$\vec{n}_{plan} \cdot \vec{Ornt}_i \leq 0 \quad (2.5)$$

En ce qui concerne les entités de forme complexes, l'aptitude du palpeur est évaluée en analysant l'ensemble des facettes qui composent l'entité. Considérons une surface de forme complexe définie par un ensemble de facettes $E = \{f_j(\vec{n}_j), j = 1..m\}$, l'entité est dite accessible par le palpeur si la condition de l'Équation. (2.6) est satisfaite.

$$\forall j \in \{1, m\}; \vec{n}_j \cdot \vec{Ornt}_i \leq 0 \quad (2.6)$$

Dans l'exemple de la figure 2.35, le palpeur est apte à mesurer l'entité de forme complexes dans l' $Ornt_1$. Par contre, il n'est pas capable de la mesurer dans l' $Ornt_2$.

2.5.3.b Aptitude en termes de collision

En plus de l'orientation d'approche du palpeur, nous définissons la Profondeur de la Direction d'Approche PDA comme la profondeur de l'entité le long de la direction d'approche de la palpeur (PAD) [Kamrani et al., 2015] (Figure. 2.34).

L'aptitude en termes d'évitement de collisions est évaluée en comparant la longueur du stylet à la profondeur de la direction d'approche (PDA). Le stylet doit être plus long

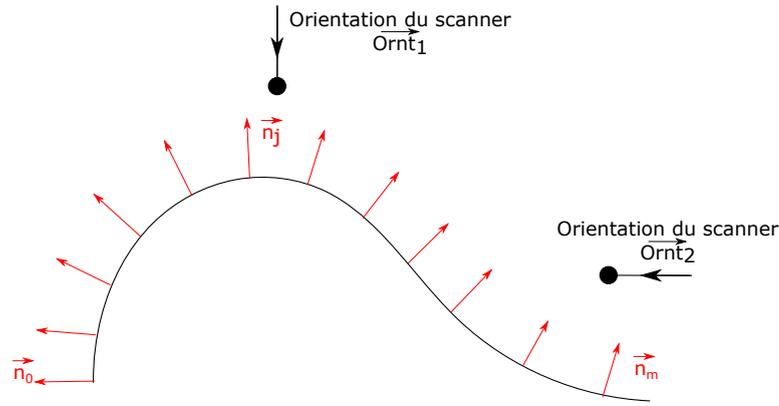


Figure 2.35 – Accessibilité du palpeur pour la mesure une entité de forme complexe.

que la *PDA*. De plus, il faut s'assurer que le scanner à cette configuration ne touche pas la pièce. Cette dernière analyse est réalisée suivant la même démarche décrite dans la Section 2.5.2.b

Pour une entité plane, sa longueur projetée selon l'orientation du scanner doit être inférieure à la longueur du stylet pour éviter les collisions entre le palpeur et l'entité.

2.6 Application de la démarche

La méthodologie proposée pour la planification des séquences d'opérations combinant un capteur laser-plan et un palpeur est implémentée en *MATLAB*© (Figure. 2.36) et appliquée sur la pièce test présentée dans la Figure. 2.19. Puisque la base de données est créée sur *SQL Workbench*©, un lien entre le langage *SQL* et *Matlab* est établi pour exécuter les requêtes de la base de données et récupérer les informations automatiquement. En utilisant les données récupérées de la base de données, les séquences d'opérations sont générées automatiquement. La liste des orientations du scanner est d'abord générée et ordonnée en mode automatique en analysant l'accessibilité des deux capteurs dans les directions principales. Ensuite, les groupes d'entités qui décrivent les séquences d'opérations sont générés en évaluant dans chaque orientation de la liste, l'aptitude du capteur laser-plan puis celle du palpeur.

Prenant pour exemple la première orientation ($Ornt_1$), nous évaluons dans les deux prochaines sections l'aptitude du capteur laser-plan ainsi que celui du palpeur dans cette orientation afin d'associer à l' $Ornt_1$ un groupe d'entités. Nous appliquons itérativement la même démarche dans les autres orientations pour générer les séquences d'opérations.

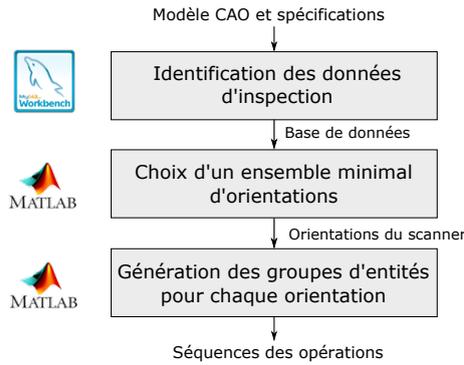


Figure 2.36 – Implémentation de la démarche proposée pour la génération des séquences d’opérations.

2.6.1 Évaluation de l’aptitude du capteur laser-plan dans l’ $Ornt_1$

L’aptitude du capteur laser-plan est évaluée dans la première orientation $Ornt_1$ pour l’ensemble des entités d’inspection. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.9. L’aptitude moyenne du capteur laser-plan à mesurer l’entité $EI1$ est de 1. Par conséquent, $EI1$ est considérée comme une entité totalement mesurée. De même, $EI5$ est également reconnue comme une entité totalement mesurée. De plus, l’aptitude moyenne du capteur laser-plan à mesurer l’entité de forme complexe $EI4$ est de 0,83. Cette entité est alors considérée comme une entité totalement mesurée. Nous remarquons que pour certaines facettes de l’entité $EI4$, la valeur de l’aptitude du capteur laser-plan est faible (voir Figure 2.31(a)). Puisque la majorité des facettes peuvent être mesurées avec une bonne qualité (valeur élevée de l’aptitude), le capteur laser-plan pourra être utilisé pour mesurer cette entité.

L’aptitude moyenne à mesurer l’entité semi-sphérique $EI6$ est évaluée à 0,48, elle est donc considérée comme une entité partiellement mesurée pour laquelle les portions mesurées et les portions non mesurées sont identifiées. Les entités et les portions qui peuvent être mesurées avec le capteur laser-plan dans l’orientation $Ornt_1$ sont colorées en vert dans la Figure 2.37. Le reste est considéré comme non mesuré et coloré en rouge.

2.6.2 Évaluation de l’aptitude du palpeur dans l’ $Ornt_1$

Pour les entités non mesurées avec le capteur laser-plan, l’aptitude du palpeur est testée dans l’ $Ornt_1$. Les entités $EI6$, $EI7$, $EI8$, $EI8$, $EI9$ et $EI10$ ont une Orientation d’Approche du Palpeur OAP correspondant à l’orientation $Ornt_1$. Elles sont donc mesurées avec le palpeur dans l’ $Ornt_1$. L’analyse d’accessibilité montre que le palpeur est

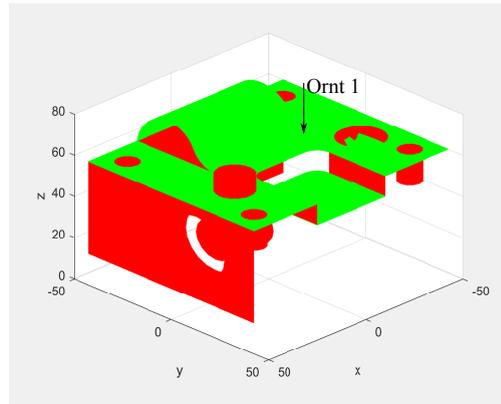


Figure 2.37 – Aptitude du capteur laser-plan dans l' $Ornt_1$. Vert : Surfaces mesurées avec le capteur laser-plan ; Rouge : surfaces non mesurées.

Id EI	Type EI	Spécification	Type de Tolérance	Intervalle de Tolérance (mm)	$A_{moyenne}$	Aptitude du capteur laser-plan
EI1	Plan	Planéité	Forme	0.1	1	Mesurable
EI2	Plan	Particularité	Orientation	0.1	0.1	Non-mesurable
EI3	Plan	Particularité	Orientation	0.05	0.1	Non-mesurable
EI4	Surface complexe	Profil de Surface Profil de Surface	Forme Position	0.15 0.20	0.83	Mesurable
EI5	Plan	Localisation	Position	0.15	0.99	Mesurable
EI6	Demi-sphère	Dimension Profil de Surface Localisation	Dimension Forme Position	$\varnothing 20$ (-0.1, +0.1) 0.10 0.1	0.48	Partiellement mesurable
EI7	Plans Parallèles	Dimension Symétrie	Dimension Position	$L35$ (-0.1, +0.1) 0.25	0.15	Non-mesurable
EI8	Cylindre	Dimension Coaxialité	Dimension Position	$\varnothing 16$ (-0.1, +0.1) 0.15	0.15	Non-mesurable
EI9	Cylindre	Dimension Localisation	Dimension Position	$\varnothing 9$ (-0.05, +0.05) 0.1	0.15	Non-mesurable
EI10	Motif d'entités	Dimension Localisation Localisation	Dimension Position Position	$\varnothing 10$ (0, +0.022) 0.1 0.2	0.14	Non-mesurable
EI11	Cylindre	Dimension Particularité	Dimension Orientation	$\varnothing 20$ (-0.1, +0.1) 0.1	0	Non-mesurable
EI12	Cylindre	Dimension Coaxialité	Dimension Position	$\varnothing 30$ (-0.1, +0.1) 0.2	0	Non-mesurable

Tableau 2.9 – Aptitude du capteur laser-plan dans l' $Ornt_1$.

capable de mesurer les deux entités d'inspection : $EI2$ et $EI3$. Cependant, un problème de collision est détecté, car les longueurs des plans sont supérieures à la longueur du stylet ($L_{stylet} = 20mm$). Les entités et les portions qui peuvent être mesurées avec le palpeur dans l'orientation $Ornt_1$ sont colorées en bleu dans la Figure. 2.39(b) et les surfaces non mesurées sont colorées en rouge.

2.6.3 Séquence d'opérations

À la fin de la première itération (évaluation des aptitudes du capteur laser-plan et du palpeur), un groupe d'entités correspondant à l'orientation $Ornt_1$ est créé. Il représente

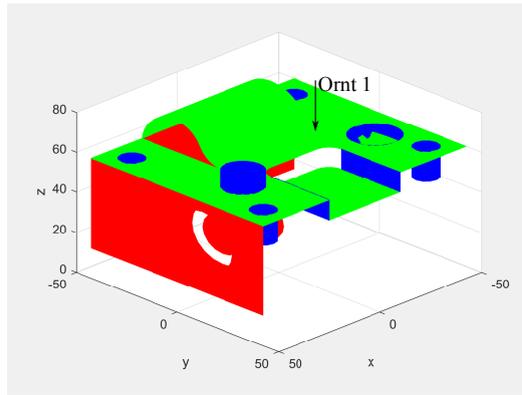


Figure 2.38 – Aptitude du palpeur dans l’ $Ornt_1$. Vert : Surfaces mesurées avec le capteur laser-plan ; Bleu : Surfaces mesurées avec le palpeur ; Rouge : surfaces non mesurées.

la première ligne du Tableau 2.10 et se compose de deux sous-groupes : un sous-groupe des entités mesurées avec le capteur laser-plan et un sous-groupe des entités mesurées avec le palpeur.

Orientation	Capteur utilisé	Entités mesurées
$Ornt_1$	Capteur laser-plan	$EI1, EI4, EI5$ et <i>Portion de $EI6$</i>
	Palpeur	<i>Portion de $EI6$</i> , $EI7, EI8, EI9$ et $EI10$
$Ornt_2$	Capteur laser-plan	$EI3$
	Palpeur	$EI11$ et $EI12$
$Ornt_3$	Capteur laser-plan	$EI2$
	Palpeur	-

Tableau 2.10 – Séquence d’opérations.

Pour le reste des entités et portions non mesurées, les principes d’évaluation de l’aptitude du capteur laser-plan et du palpeur sont répétés dans les autres orientations de la liste. Pour la deuxième itération, un groupe d’entités composé par deux sous-groupes est généré. Ces derniers représentent la deuxième ligne du Tableau 2.10. Les surfaces qui ne sont pas mesurées au bout de deux itérations (entité plane $EI2$) sont affichées en rouge dans la Figure. 2.39(a).

Après 3 itérations, l’ensemble des entités d’inspection peut être mesuré en utilisant seulement 3 orientations du scanner. Pour la première et deuxième orientation, les deux capteurs seront utilisés simultanément. Quant à la troisième orientation, le capteur laser-plan est utilisé pour mesurer la dernière entité. Les trois groupes d’entités sont présentés dans le Tableau 2.10 et affichés dans la Figure. 2.39(b). Les surfaces vertes représentent les entités mesurées avec le capteur laser-plan tandis que les surfaces bleues représentent

les entités mesurées avec le palpeur.

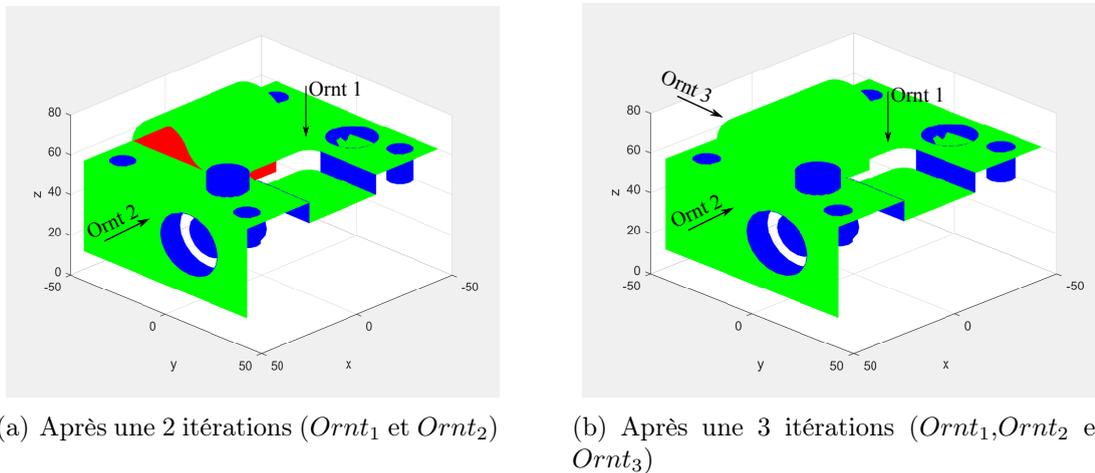


Figure 2.39 – Séquence d'opérations. Vert : Surfaces mesurées avec le capteur laser-plan ; Bleu : Surfaces mesurées avec le palpeur ; Rouge : surfaces non mesurées.

2.7 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté la démarche de génération des séquences d'opérations qui exploite les avantages du scanner 3D. Celui-ci permet d'utiliser les deux capteurs sans changer d'orientation. La démarche proposée comprend trois étapes. Tout d'abord, à partir du modèle *CAO* présentant les spécifications, une base de données contenant les informations requises au processus d'inspection est créée. La notion d'entité d'inspection composée d'entités de mesure et de spécifications est adoptée. L'extraction des données à partir d'un modèle *CAO* se fait manuellement en analysant un fichier *STEP* de la pièce. Cette étape pourra être automatisée dans les futurs travaux. Dans la deuxième étape, un ensemble d'orientations prédéfinies du scanner est proposé en vérifiant l'accessibilité globale des capteurs dans les orientations principales. Ces orientations définissent les configurations du scanner pour la génération des trajectoires. Il convient alors de générer les séquences d'opérations, c'est-à-dire associer à chaque configuration le groupe de surfaces à mesurer pour chaque capteur. Les séquences d'opérations sont générées dans la troisième étape. Dans chaque orientation du scanner, l'aptitude du capteur laser-plan est d'abord évaluée pour définir un sous-groupe d'entités mesurées. Pour le reste qui est non mesuré, l'aptitude du palpeur est évaluée pour former le deuxième sous-groupe. L'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan est effectuée

selon des critères de qualité, d'accessibilité et d'absence de collision. En ce qui concerne l'aptitude en termes de qualité, nous avons proposé de nous appuyons sur un modèle de logique floue qui tient en compte l'incertitude de mesure et l'incertitude admissible pour évaluer l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une entité. L'intérêt d'un tel modèle d'évaluation d'aptitude est de maximiser le nombre de surfaces pouvant être mesurées avec le capteur laser-plan, lorsque les critères de qualité le permettent. Cette méthode est implémentée sous *MATLAB*® puis appliquée à une pièce test avec succès.

Pour compléter la gamme, nous avons besoin de définir les distances de numérisation dans le cas de mesure avec le capteur laser-plan et les points de mesure dans le cas de mesure avec le palpeur. Le chapitre suivant présente l'étape suivante de génération des trajectoires et son exécution sur une machine à mesure tridimensionnelle.

Chapitre
3

**Planification des trajectoires et
exécution**

3.1 Introduction

La première partie de génération de la gamme d'inspection, c'est-à-dire la génération des séquences d'opérations, a été détaillée dans le chapitre précédent. À chaque entité d'inspection est associé le capteur adéquat dans une orientation donnée.

Dans ce chapitre, nous définissons la deuxième partie de la gamme, c'est-à-dire la planification des trajectoires du scanner. L'exécution de la gamme d'inspection sera ensuite présentée (Figure. 3.1). La trajectoire est composée de la trajectoire du capteur laser-plan et de la trajectoire du palpeur. À l'issue de l'exécution de la gamme d'inspection, nous disposons de deux nuages de points, le premier résultant de la mesure avec le capteur laser-plan et le second de la mesure avec le palpeur. Le traitement des données fait l'objet du chapitre 4.

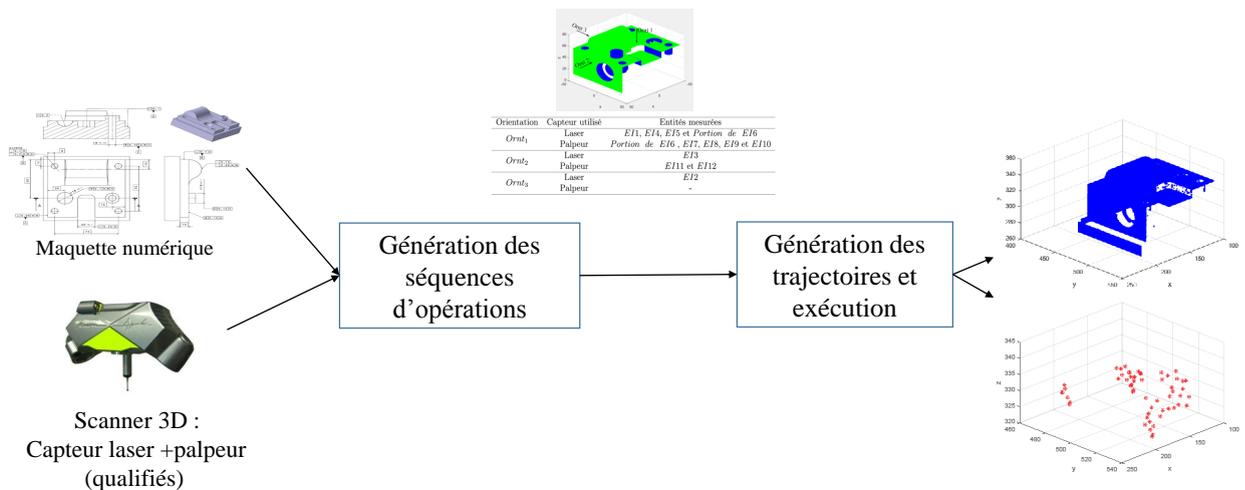


Figure 3.1 – Deuxième étape de l'approche globale d'inspection.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la démarche proposée pour générer les trajectoires. La notion de la trajectoire est différente pour chaque capteur. Ainsi, nous détaillons chacune des méthodes de planification de trajectoires.

Nous présentons par la suite la partie d'exécution de la gamme d'inspection. La difficulté réside dans la gestion de deux capteurs de technologies différentes. Afin de réaliser un processus de génération et d'exécution automatique de la gamme d'inspection, nous proposons de générer un fichier dit "*trajectoire*" qui contient les données d'exécution et qui doit être compatible avec les logiciels de commande de la machine.

3.2 Approche proposée

Pour définir la trajectoire associée à un capteur, la technologie de mesure qu'il utilise doit être prise en compte. Les trajectoires des deux capteurs doivent permettre une exécution automatique selon des critères de qualité et d'absence de collision.

Pour une orientation du scanner donnée, la trajectoire comprend la trajectoire du capteur laser-plan et la trajectoire du palpeur (Figure. 3.2). Pour le sous-groupe des entités à mesurer avec le capteur laser-plan, la trajectoire associée, qui est définie par un ensemble de points de passage, est identifiée en paramétrant les distances de numérisation. Concernant le sous-groupe des entités à mesurer avec le palpeur, nous définissons les points de mesure, les points d'accostage et les directions d'accostage. Les points d'accostage permettent la transition entre une vitesse de déplacement rapide et une vitesse de déplacement lente. La direction d'accostage est la direction de déplacement du palpeur pour mesurer un point.

Nous procédons à la mesure avec le capteur laser-plan puis la mesure avec le palpeur avant de passer à l'orientation suivante. Par conséquent, la trajectoire du scanner dans une orientation donnée est obtenue par transformation et assemblage des trajectoires du capteur laser-plan et du palpeur (Figure. 3.2). Sachant que les trajectoires des deux capteurs sont définies et exprimées différemment, la transformation et l'assemblage ont pour but de définir une trajectoire de scanner qui correspond à la fois à la trajectoire du capteur laser et à la trajectoire du palpeur.

Les données de la trajectoire finale du scanner doivent être générées automatiquement et envoyées vers la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) pour réaliser son exécution et récupérer les résultats de mesure.

3.3 Planification des trajectoires du capteur laser-plan

La trajectoire de mesure avec le capteur laser-plan est une succession de points de vue (P, \vec{d}) définis par un point P et une direction de vue \vec{d} (Figure. 3.3). Ces deux paramètres sont définis en fonction des critères de qualité afin d'avoir le meilleur positionnement du capteur (distance et orientation) par rapport à la surface.

Nous visons à définir les trajectoires du capteur laser en optimisant la qualité de mesure et en minimisant le temps de mesure. L'optimisation de la qualité est relative à

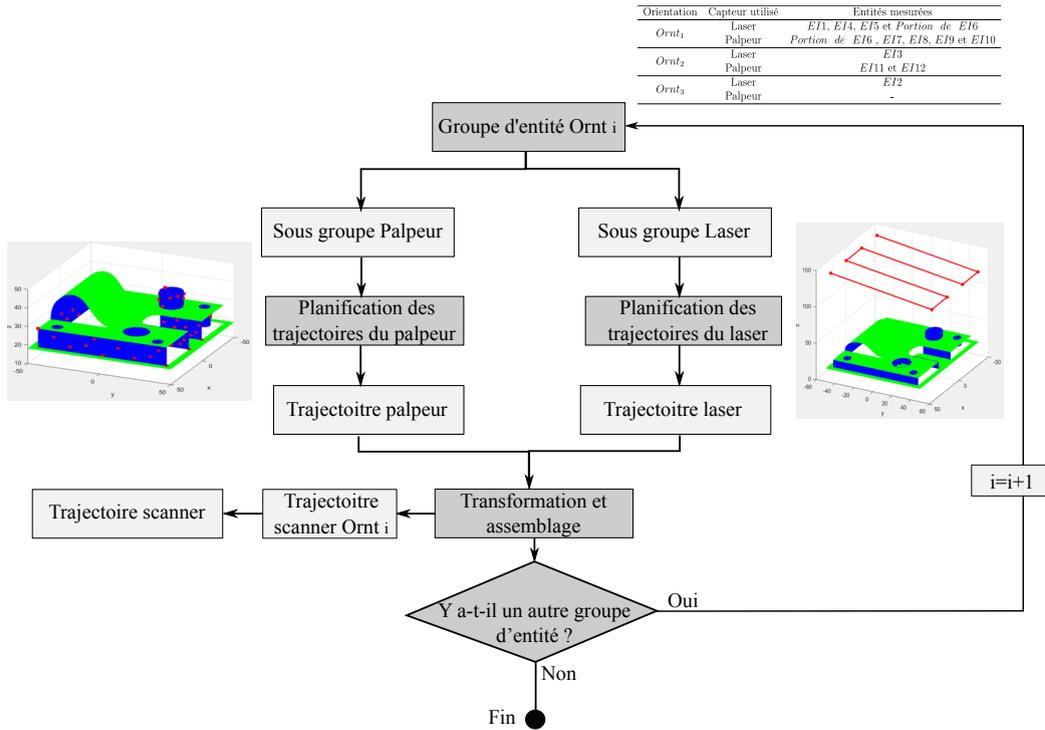


Figure 3.2 – Planification des trajectoires du scanner.

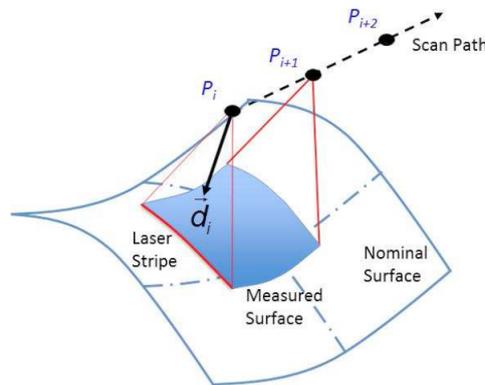


Figure 3.3 – Définition de la trajectoire du capteur laser-plan [Lartigue et al., 2014].

la configuration capteur/pièce pour laquelle l'angle et la distance de numérisation jouent un rôle important sur l'évaluation du bruit et de la justesse. Dans la démarche globale que nous proposons, la configuration du capteur en regard de l'angle est prédéfinie et optimisée. À chaque entité à mesurer avec le capteur laser-plan est associée une orientation qui remplit les critères de qualité attendue (voir chapitre précédent). Nous cherchons donc à définir les distances de numérisation qui permettent la mesure des surfaces avec la qualité attendue.

Une démarche proposée par Zhao et al. consiste à établir des lignes de scan et des

lignes de connexion dans des niveaux de trajectoires (Figure. 3.4) [Zhao et al., 2012] (Section. 1.6.1). Un niveau de trajectoire est un plan support dans lequel les points de passage sont définis. Dans ce travail, nous reprenons cette idée et nous définissons la trajectoire du capteur laser-plan par des lignes reliant les points de passage P_i dans des niveaux de trajectoire. Le fait de définir les niveaux de trajectoire séparément pour chaque entité tel que proposé dans [Zhao et al., 2012], peut conduire à un nombre assez élevé de niveaux de trajectoire. Dans certains cas, un seul niveau peut mesurer plusieurs surfaces avec la qualité requise, ce qui réduit le temps de mesure. D'autre part, imposer des niveaux de trajectoire perpendiculaires à l'orientation du capteur [Zhao et al., 2012] peut conduire également à générer beaucoup de niveaux de trajectoire. Une mesure avec une qualité désirée peut être obtenue sans imposer des niveaux perpendiculaires à l'orientation du capteur.

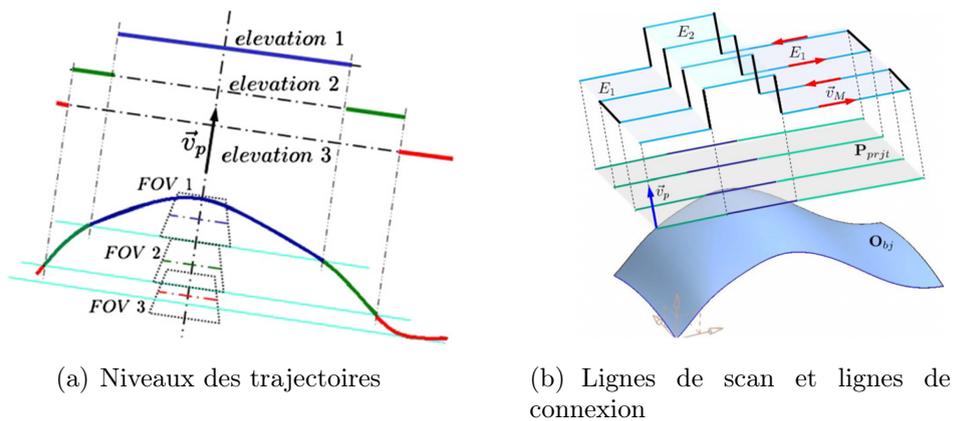


Figure 3.4 – Planification de la trajectoire du capteur laser-plan dans des niveaux des trajectoires [Zhao et al., 2012].

Pour l'exemple de la Figure. 3.5, nous proposons de mesurer les deux plans verts. Si nous traitons chaque plan séparément, la trajectoire est générée dans deux niveaux. Cependant, un seul niveau de trajectoire qui n'est pas nécessairement perpendiculaire à l'orientation du capteur peut être utilisé pour mesurer les deux plans.

Le fait d'utiliser un minimum de niveaux de trajectoire peut contribuer à minimiser le temps de mesure et améliorer la qualité des données de mesure. En ce qui concerne la qualité de la mesure, lorsque le capteur se déplace dans une ligne de numérisation entre deux points de passage, l'accélération et la décélération du capteur entraînent une dégradation de la qualité de la mesure sur les abords du nuage de points [Sadaoui, 2016]. Ainsi, des changements brusques de la vitesse de déplacement aux points de passage du

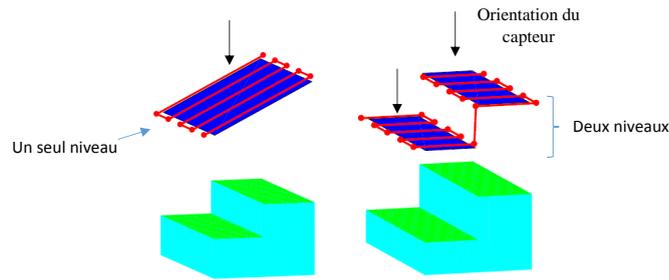


Figure 3.5 – Planification de la trajectoire du capteur laser-plan dans des niveaux des trajectoires.

capteur affectent la qualité de la mesure. L'utilisation d'un nombre limité de niveaux de trajectoire réduit les changements brusques de vitesse et permet donc une mesure de meilleure qualité.

Le temps de mesure est proportionnel à la longueur de la trajectoire [Mohib et al., 2009]. Ainsi, une trajectoire avec un minimum de niveaux est caractérisée par une faible longueur de trajectoire et a donc une conséquence directe sur le temps de mesure.

Nous proposons une démarche de planification des trajectoires en stratégie Zig-Zag pour chaque niveau de trajectoire défini en fonction des distances de numérisation dites admissibles qui assurent une qualité attendue. Cette démarche est à appliquer à chaque groupe d'entités associé à une orientation du scanner. La démarche proposée est composée de quatre étapes :

- Évaluation des plages de distances de numérisation admissibles ;
- Définition des niveaux de trajectoire ;
- Définition des points de passage ;
- Évitement des collisions ;

Dans la suite, nous détaillons ces étapes pour la première orientation du scanner ($Ornt_1$) qui correspond au premier groupe d'entités. Cette démarche est répétée pour toutes les orientations de la gamme.

3.3.1 Évaluation de la plage des distances de numérisation admissibles

Afin de respecter les critères de qualité relatifs à la distance de numérisation, les niveaux de trajectoire sont définis en analysant la plage des distances de numérisation

admissibles correspondant à toutes les facettes composant le groupe d'entités. La plage des distances de numérisation représente toutes les distances de numérisation permettant la mesure de la facette avec la qualité attendue. La distance de numérisation est définie par la distance entre le centre de rotation du capteur, qui représente le point de passage, et le centre de la facette (Figure. 3.6(a)). Une surface est mesurable avec le capteur laser-plan si pour l'orientation considérée, la surface appartient à la fenêtre de mesure FOV . Cette configuration correspond à une plage de distances de numérisation qui varie entre d_{min} et d_{max} (Figure. 3.6(b)). Une meilleure qualité de mesure en termes de bruit et de justesse est obtenue quand la surface est placée au milieu de la fenêtre de mesure, ce qui correspond à une distance de numérisation optimale (d_{opt}) (voir section. 2.2.1). Nous définissons la plage de distance de numérisation correspondant à chaque facette par les deux points P_{Inf} et P_{Sup} . Le point P_{Opt} est quant à lui le point de passage optimal correspondant à la distance optimale (Figure. 3.6(b)).

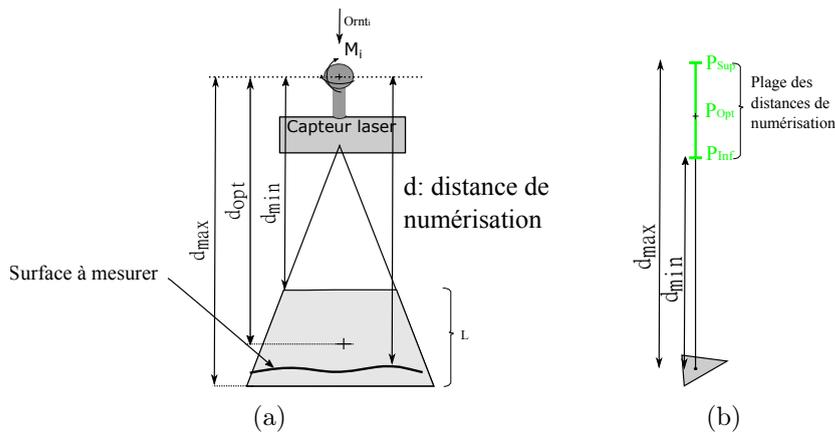


Figure 3.6 – (a) Fenêtre de mesure FOV ; (b) Plage de distances de numérisation

Rappelons que l'évaluation de l'aptitude du capteur laser-plan pour l'orientation considérée conduit à la définition d'un paramètre $A \in [0, 1]$ qui reflète l'aptitude du capteur laser-plan pour l'orientation considérée. Quand l'aptitude en termes d'orientation est faible, il est préférable de positionner le capteur dans les meilleures conditions en termes de distance de numérisation, c'est-à-dire à une distance de numérisation optimale. Ainsi, nous définissons la notion de la fenêtre de mesure dite *admissible* qui tient compte de l'aptitude du capteur laser-plan en termes d'orientation (Figure. 3.7). Elle est plus large quand l'aptitude est élevée et plus restreinte quand l'aptitude est faible. La hauteur de la fenêtre de mesure admissible (L_j) est exprimée en fonction de l'aptitude

du capteur laser-plan A_j (section. 2.5.2.d) avec $L_j = f(A_j, L)$. Nous choisissons d'exprimer la hauteur admissible de fenêtre de mesure par $L_j = A_j \cdot L$ qui permet d'avoir une fenêtre de mesure admissible centrée au milieu de la fenêtre de mesure.

De la même manière, nous définissons la plage des distances de numérisation dite *admissibles* $[P_{Inf}, P_{Sup}]$ qui tient compte de l'aptitude du capteur laser-plan en termes d'orientation. Pour l'exemple de la Figure. 3.8, les plages de distances de numérisation admissibles sont définies en fonction de l'aptitude du capteur laser-plan en termes d'orientation. L'aptitude est élevée quand le capteur laser-plan est perpendiculaire à la surface à mesurer, ce qui définit une plage de distances de numérisation plus large. Cette plage de distances représentée en vert est plus restreinte quand l'orientation du capteur s'éloigne de la perpendiculaire (aptitude plus faible).

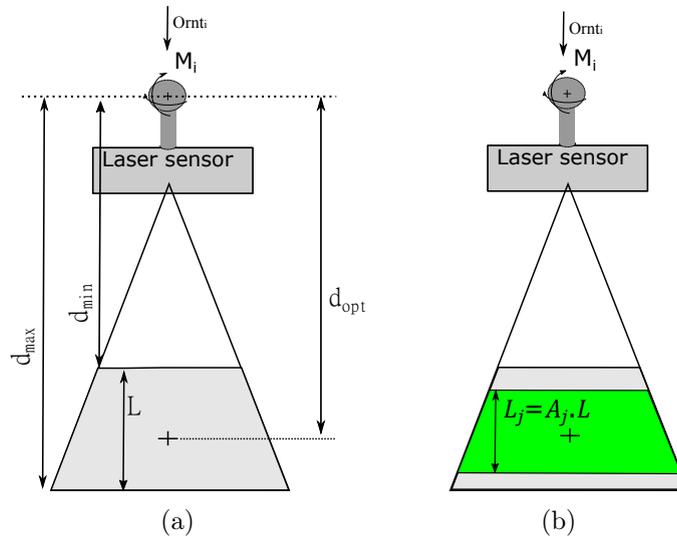


Figure 3.7 – (a) Dimensions de la *FOV* ; (b) Fenêtre de mesure *FOV* admissible.

Pour toutes les facettes composant le groupe des entités, les plages des distances de numérisation admissibles sont définies par les deux groupes de points extrêmes P_{Inf} et P_{Sup} qui les limitent et les points P_{Opt} qui représentent les points de passage optimaux pour lesquels le bruit et la justesse sont minimaux.

3.3.2 Évaluation des niveaux de trajectoire

La démarche proposée pour générer les niveaux de trajectoire associés aux facettes d'un groupe d'entités dans une orientation donnée repose sur la définition d'un nombre minimal de plans support qui permettent de mesurer l'ensemble des facettes du groupe

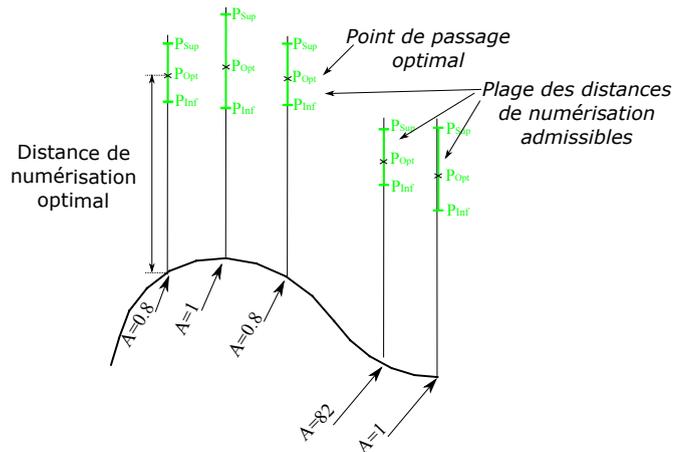


Figure 3.8 – Plage des distances de numérisation admissibles.

avec une meilleure qualité en termes de bruit et de justesse. Ces plans sont définis par analyse des plages des distances de numérisation admissibles associées aux facettes du groupe d'entités.

Afin d'avoir une qualité attendue, les points de passage du capteur doivent être situés au plus proche possible des points de passage optimaux. Pour minimiser le nombre de niveaux, nous proposons une méthode itérative de génération des niveaux des trajectoires. Pour l'exemple de la Figure. 3.9, la forme complexe (a) présente moins de courbure, un seul niveau de trajectoire permet de passer par l'ensemble des plages de distances de numérisation admissibles. Cependant, un seul niveau de trajectoire ne permet pas la mesure de la forme complexe (b).

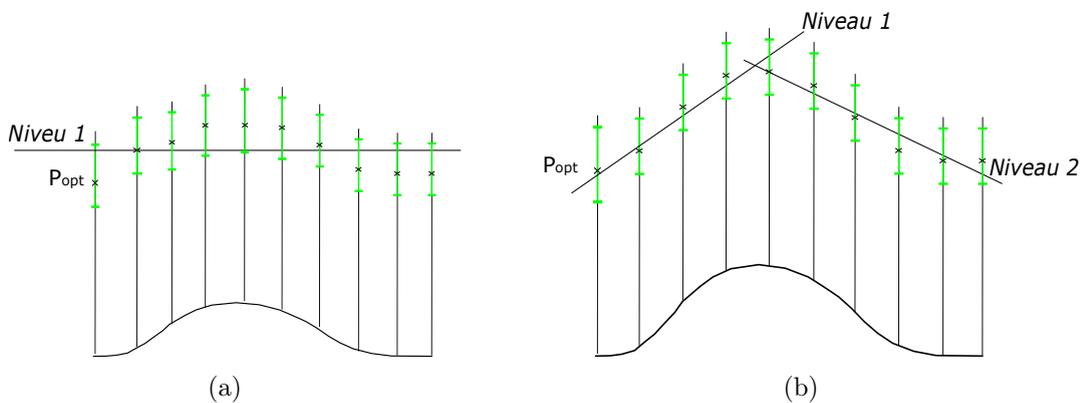


Figure 3.9 – Exemple de niveaux de trajectoire

La mesure globale de toutes les facettes avec un plan qui passe au plus proche possible des points de passages optimaux est testée. Pour assurer la mesure de toutes les facettes

du groupe, ce plan doit passer par l'ensemble des segments des droites qui représentent les plages des distances de numérisation admissibles. Dans le cas où le plan ne permet pas la mesure de l'ensemble des facettes, cet ensemble est partitionné en deux groupes. Nous testons à nouveau la mesure globale du premier groupe avec un seul niveau. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce qu'un nombre minimal de niveaux soit généré pour mesurer l'ensemble des facettes. À chaque facette f_i est associée un triplet de points $S_i = \{P_{Inf}(i), P_{Sup}(i), P_{Opt}(i)\}$ contenant les points limitant la plage des distances de numérisation admissibles (P_{Inf} et P_{Sup}) ainsi que le point de passage optimal P_{Opt} . Les niveaux de trajectoire sont définis en suivant les étapes :

1. Définition d'un ensemble $E_u = \{S_i, i \in [1, n_t]\}$ par tout les triplets S_i correspondant à toutes les facettes du groupe d'entités. Un ensemble E_r est initialisé par un ensemble vide.
2. Définition du plan des moindres carrés qui passe au plus proche possible des points de passage optimaux P_{Opt} de tout les triplets de l'ensemble E_u .
3. Évaluation du nombre de facettes qui peuvent être mesurées avec ce niveau de trajectoire. Une facette f_i est mesurable si une intersection entre le plan support et la plage des distances de numérisation admissibles $[P_{Inf}(i), P_{Sup}(i)]$ est détectée. Le pourcentage des facettes mesurées dans l'ensemble E_u est évalué comme suit (Équation. (3.1) :

$$P_r = \frac{n_m}{n_t} . 100 \quad (3.1)$$

Où : n_m : Nombre des facettes mesurables ; n_t : Nombre des facettes (triplets S_i) de l'ensemble E_u .

4. Lorsque $P_r < 95\%$, l'ensemble E_u est partitionné en deux groupes : E_{Gr1} et E_{Gr2} . Le partitionnement en *k-moyennes* (ou *k-means* en anglais) est utilisé pour diviser les facettes de l'ensemble E_u , en fonction des points P_{Opt} de leurs triplets, en deux groupes (cluster). Le partitionnement est réalisé de façon à minimiser la distance d'un point P_{Opt} à la moyenne des points de son cluster. Les deux ensembles (E_u , E_r) sont ensuite actualisés : $E_u = E_{Gr1}$; $E_r = E_r \cup E_{Gr2}$.

Le pourcentage seuil est choisi comme étant 95% pour tenir compte du fait que la

mesure d'une facette est effectuée par une ligne laser (capteur laser-plan) plutôt que par un point (capteur laser-ligne).

5. Le processus revient à l'étape (2) pour un nouveau calcul du plan qui passe au plus proche des points de passage optimaux P_{Opt} de l'ensemble E_u . Il s'arrête lorsque la condition ($P_r \geq 95\%$) est satisfaite.
6. Lorsque $P_r \geq 95\%$, le niveau de trajectoire est retenu pour mesurer les facettes de l'ensemble E_u . Étant donné un niveau de trajectoire associé à un groupe de facettes E_u , le rectangle englobant qui délimite les points d'intersection des plages de distance admissibles avec le plan support est déterminé (Figure. 3.10).

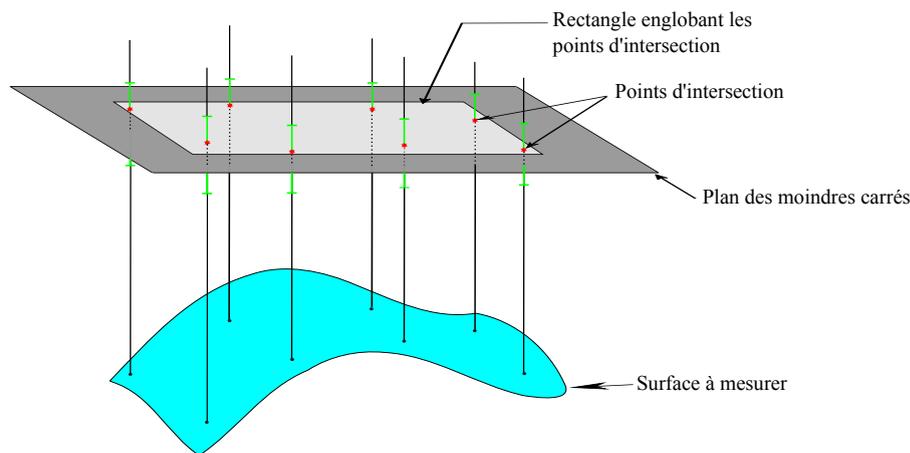


Figure 3.10 – Rectangle englobant les points d'intersection.

7. Si l'ensemble E_r est non vide, l'ensemble E_u devient E_r ; et E_r est initialisé par un ensemble vide. Le processus retourne à l'étape (2) jusqu'à ce que l'ensemble E_r soit vide.

Cette méthode de génération des niveaux de trajectoire est appliquée sur deux pièces tests de hauteurs de marche différentes (Figure. 3.11). Nous cherchons à mesurer les 3 plans supérieurs (représentés en vert) pour évaluer 3 spécifications de forme avec $IT = 0.1mm$. Pour une orientation ($Ornt_1$), l'aptitude du capteur laser-plan est évaluée à 1 sur l'ensemble des facettes des 3 plans. Les plages de variation des distances de numérisation admissibles sont limitées par les points de couleur cyan et magenta qui représentent P_{Inf} et P_{Sup} respectivement. Les points P_{Opt} sont représentés en jaune. Dans le cas de hauteur de marche de $20mm$ (Figure. 3.11(a)), un seul niveau de trajectoire qui passe par l'ensemble des segments de droites $[P_{Inf}, P_{Sup}]$ est généré. Cependant, trois

niveaux de trajectoire sont nécessaires pour mesurer les 3 plans de la Figure. 3.11(b), car il est impossible d'avoir un ou deux plans qui passent par tous les segments de droites $[P_{Inf}, P_{Sup}]$.

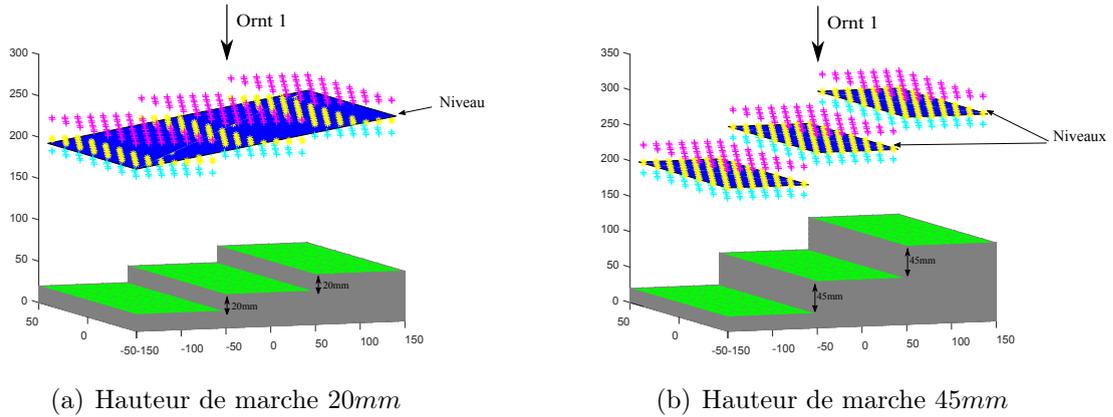


Figure 3.11 – Génération de niveaux des trajectoires.

3.3.3 Définition des points de passage

Le capteur se déplace d'un point de passage à l'autre dans le même niveau pour mesurer la surface correspondante. Les points de passage représentent la séquence des coordonnées des points de passage du centre de rotation du capteur laser-plan. Ces points sont situés sur les niveaux de trajectoire définis précédemment. Dans chaque niveau, un rectangle englobant défini par 4 points est calculé. La trajectoire pour l'orientation considérée commence par le sommet le plus éloigné de tous les autres. Partant de ce point, la trajectoire dans ce rectangle est générée en stratégie Zig-Zag comme indiqué dans la Figure. 3.12(a). À partir du dernier point généré dans ce niveau, le sommet le plus proche dans le rectangle suivant est déterminé. La trajectoire en Zig-Zag est ensuite générée dans ce niveau en stratégie Zig-Zag. Les points de passage sont déterminés dans chaque rectangle en partant du sommet le plus proche de l'ancien point de passage (Figure. 3.12(b)).

La stratégie Zig-Zag consiste à faire des mouvements d'aller et de retour entre des points de passage avec un pas fixe (Figure. 3.12(a)). La gestion du recouvrement pendant la planification des trajectoires peut améliorer la qualité de mesure [Phan et al., 2018]. Dans ce travail, cette problématique n'as pas été abordée. Un minimum de recouvrement est assuré en utilisant un pas correspondant à 95% de la largeur minimale

de la ligne laser L_1 (Figure. 2.3). La direction de déplacement d est perpendiculaire à la ligne laser-plan [Mahmud et al., 2011].

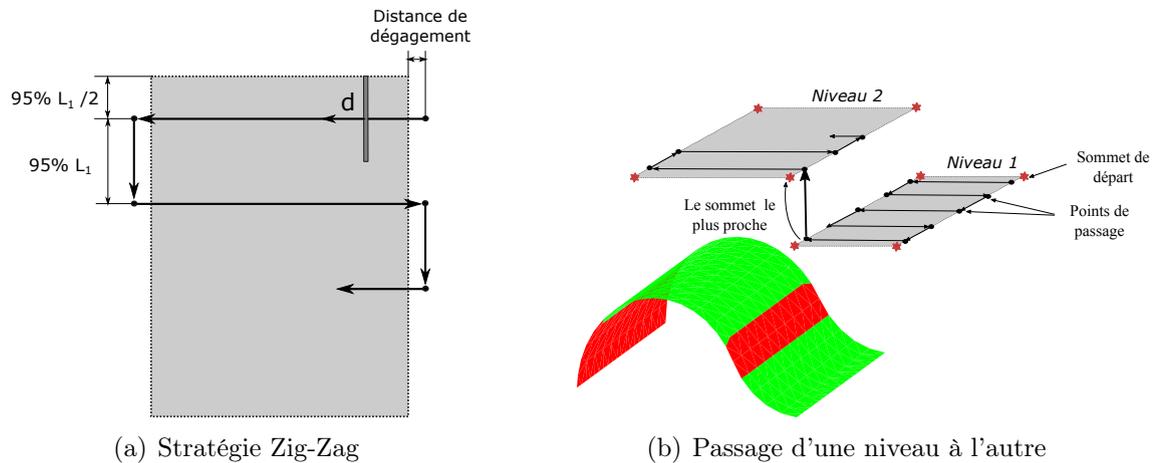


Figure 3.12 – Démarche de définition des points de passage.

Nous appliquons cette méthode sur les deux pièces de la Figure. 3.11 pour générer les points de passage. La séquence des points de passage de la Figure. 3.13(a) est générée dans un seul niveau de trajectoire qui permet de mesurer les trois plans. Pour la Figure. 3.13(b), une séquence des points de passage est générée dans chaque niveau. Le passage d'un niveau à l'autre s'effectue par le sommet le plus proche afin de réduire la longueur de la trajectoire et d'éviter la mesure multiple de la même surface en passant plusieurs fois (recouvrement).

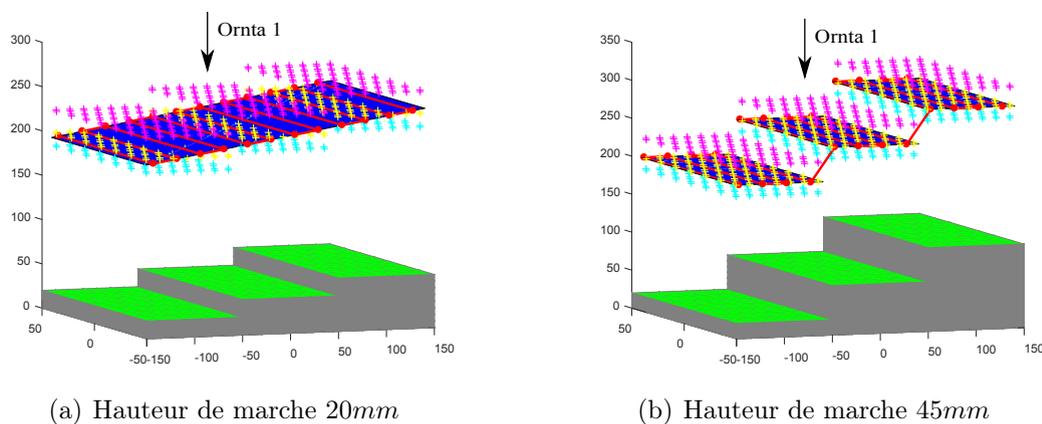


Figure 3.13 – Planification de la trajectoire du capteur laser-plan dans des niveaux des trajectoires.

3.3.4 Évitement des collisions

L'objectif de cette section est de générer des trajectoires sans collision. Rappelons qu'une première étude des collisions a été effectuée pour chaque orientation de la gamme (Section. 2.5.2.b). Une fois que les points de passage sont définis pour chaque orientation, nous vérifions les problèmes de collision qui peuvent apparaître lors du déplacement du scanner d'un point de passage vers un autre. Le scanner est modélisé par deux parallélépipèdes avec leurs sommets S_k (Figure. 3.14(a)). La trajectoire est dite sans collision, si pour chaque ligne de trajectoire reliant deux points successifs $P(j)$, $P(j+1)$, aucune des droites reliant les sommets S_k entre deux positions successives j et $j+1$ n'intersecte une facette de la pièce. Dans le cas où un problème de collision est détecté, 4 points de transition $[P'_1, P'_2, P'_3, P'_4]$ sont ajoutés selon une procédure itérative (Figure. 3.14(a)). Une ligne $S_k(j)$, $S_k(j+1)$ présente une intersection avec une facette définie par 3 sommets $\{V_1, V_2 \text{ et } V_3\}$ si (Figure. 3.14(b)) :

- il existe un point d'intersection I entre la droite et le plan support de la facette formé par les trois points $\{V_1, V_2 \text{ et } V_3\}$;
- le points d'intersection I appartient au segment de droite $[S_k(j), S_k(j+1)]$;
- le points d'intersection I appartient au triangle $\{V_1 V_2 V_3\}$. Cette condition permet d'exclure le cas où la ligne coupe le plan support de la facette en un point situé à l'extérieur de la facette.

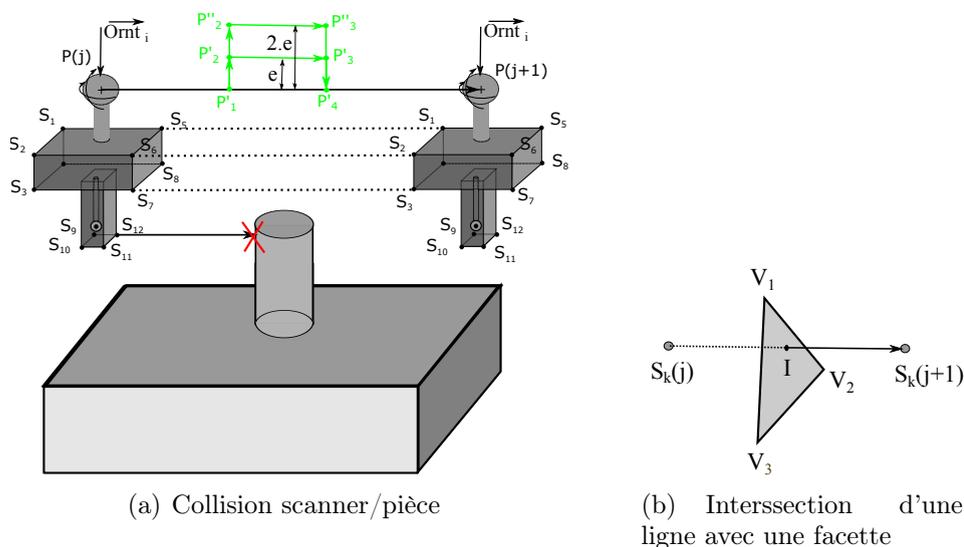


Figure 3.14 – Modélisation du problème de collision entre deux points de passage.

3.3.5 Application

La méthode proposée pour générer les trajectoires du capteur laser-plan est implémentée sous *MATLAB*®. À partir des groupes d'entités à mesurer avec le capteur laser-plan, nous définissons la trajectoire du capteur laser-plan pour chaque orientation du scanner afin de mesurer les entités correspondantes à cette orientation.

Pour la première orientation ($Ornt_1$), un groupe d'entités composé par $EI1$, $EI4$, $EI5$ et une *Portion de $EI6$* est à mesurer par le capteur laser-plan (Tableau 2.10). Une valeur d'aptitude du capteur laser-plan est attribuée à chaque facette du groupe (section. 2.5.2.d). Une plage des distances de numérisation admissibles est ensuite déterminée pour chaque facette selon la valeur de l'aptitude en termes d'orientation. Les plages de variation de la distance de numérisation sont délimitées par les points de couleur cyan et magenta (Figure. 3.15). Pour mesurer l'ensemble des facettes, un niveau de trajectoire qui passe par l'ensemble des plages des distances de numérisation admissibles est généré. Les points de passage sont définis selon la stratégie de Zig-Zag dans ce niveau de trajectoire. Notons que les deux plans ($EI1$, $EI5$), la forme complexe $EI4$ et la portion de la sphère $EI6$ peuvent être mesurés avec un seul niveau de trajectoire. Ce niveau de trajectoire permet la mesure avec la qualité attendue dans un temps de mesure réduit.

De la même manière, la trajectoire du capteur laser-plan est déterminée dans l' $Ornt_2$ et l' $Ornt_3$ pour mesurer les entités correspondantes. Les résultats sont représentés dans la Figure. 3.16.

3.4 Planification des trajectoires du palpeur

Dans la littérature, la planification des trajectoires du palpeur monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle (*MMT*) est bien développée. Nous nous intéressons plus particulièrement à la planification des trajectoires du palpeur pour mesurer les entités correspondantes dans un cadre d'inspection multi-capteurs. Les entités à mesurer avec le palpeur sont définies avec leurs paramètres intrinsèques dans la base de données (Voir section. 2.3.3).

Dans ce travail, les orientations d'accessibilité sont déjà définies et optimisées pour chaque groupe d'entité. Ainsi, nous nous focalisons sur les problématiques suivantes pour générer la trajectoire du palpeur dans une orientation donnée :

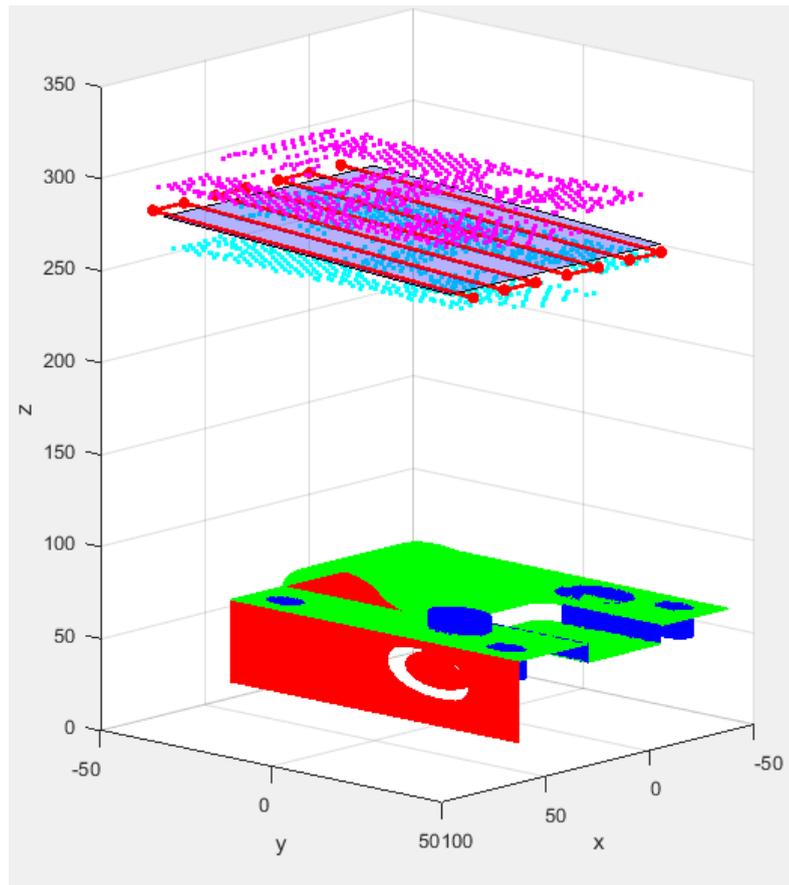
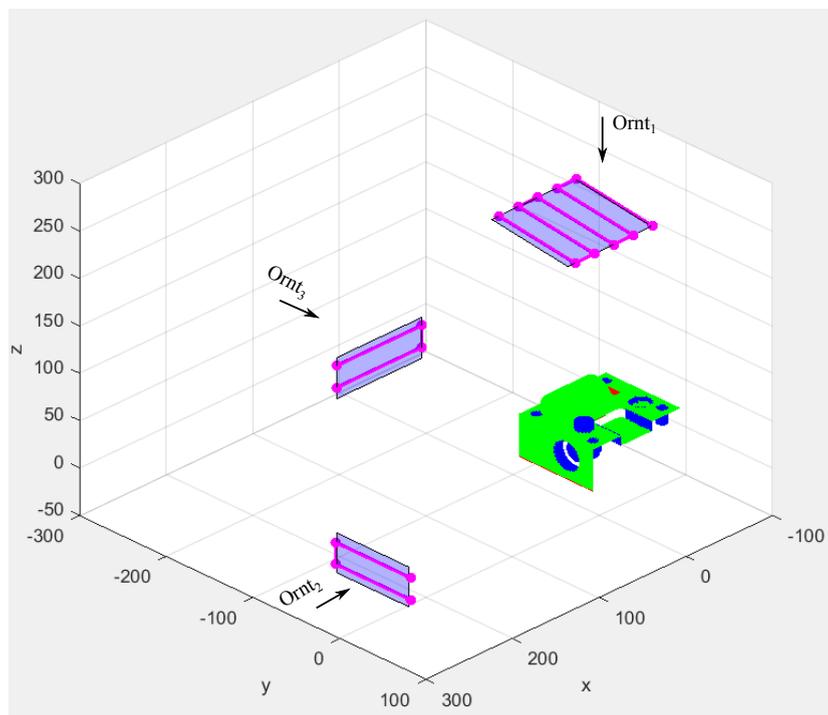
Figure 3.15 – Trajectoires du capteur laser-plan dans l' $Ornt_1$.

Figure 3.16 – Trajectoires du capteur laser-plan.

- Détermination du nombre et distribution des points de mesure ;
- Détermination des points d'accostage et les directions d'accostage ;
- Définition de la séquence de points de mesure.

3.4.1 Définition du nombre de points de mesure

La sélection du nombre et de l'emplacement des points de mesure est importante pour aboutir à un processus d'inspection optimal (Section. 1.6.2). La méthode utilisée pour choisir le nombre de points de mesure pour chaque entité est basée sur la fiche de techniques de mesure sur machines à mesurer tridimensionnelles (fiche G550-1) [fic, 1998]. Comme le montre le Tableau. 3.1, le nombre de points est fonction de la spécification à vérifier. Ces valeurs peuvent être ajustées en fonction de la dimension de la pièce, le temps dont on dispose et la qualité de mesure souhaitée. Dans ce travail, nous choisissons le nombre de points en fonction du type de spécification associée tel que présenté dans le Tableau. 3.1.

Type d'élément	Selon la fiche G550-1 [fic, 1998]			Nombre de points retenu		
	Dimension	Localisation ; construction	Défaut de forme	Dimension	Localisation ; Orientation	Défaut de forme
Point	-	1 à 3	-	-	1	-
Droite	-	3 à 5	7 mini	-	4	7
Plan	-	4 à 6	10 mini	-	5	10
Cercle	8 à 12	4 à 8	24 mini	10	6	24
Cylindre	8 à 16	8 à 12	36 ou 12 point par section, 3 sections mini	12	10	12
Cône	8 à 16	8 à 12	36 ou 12 point par section, 3 sections mini	12	10	12
Sphère	8 à 16	5 à 9	24 et plus	12	8	24

Tableau 3.1 – Nombre de points de mesure pour chaque type d'entité

3.4.2 Distributions des points de mesure

Comme nous l'avons présenté dans la section. 1.6.2, la séquence d'Hammersley qui permet de répartir N points dans l'espace 2D est privilégiée pour la distribution des points de mesure lors de l'inspection des formes canoniques. Pour chaque type de forme canonique, les points de mesure sont définis par la séquence d'Hammersley qui a pour but de calculer les coordonnées des points de mesure dans un repère associé à l'entité dit

repère entité. Les coordonnées des points (s_i, t_i) sont calculées de la manière suivante (Équation. (3.2)) :

$$\begin{cases} s_i = \frac{i}{N} \\ t_i = \sum_{j=0}^{k-1} ([\frac{i}{2^j}] \text{Mod}(2)) \cdot 2^{-(j+1)} \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec $k = \log_2 N$, $\text{Mod}(2)$ est l'opérateur mathématique dont le résultat est le reste de la division de l'expression par deux, N est le nombre de points et $i = 0, 1, 2, \dots, (N + 1)$.

Stojadinovic et al. ont modifié la séquence d'Hammersley pour définir la distribution des points de mesure pour les cylindres, les demi-sphères et les cônes [Stojadinovic et al., 2016b]. Les coordonnées (s_i, t_i, w_i) des points de mesure sont calculées dans le repère entité selon les formules suivantes :

Demi-sphère (de rayon R) :

$$\begin{cases} s_i = \sqrt{R^2 - ((\sum_{j=0}^{k-1} ([\frac{i}{2^j}] \text{Mod}2) \cdot 2^{-(j+1)}) \cdot R)^2} \cdot \cos(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ) \\ t_i = \sqrt{R^2 - ((\sum_{j=0}^{k-1} ([\frac{i}{2^j}] \text{Mod}2) \cdot 2^{-(j+1)}) \cdot R)^2} \cdot \sin(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ) \\ w_i = (\sum_{j=0}^{k-1} ([\frac{i}{2^j}] \text{Mod}2) \cdot 2^{-(j+1)}) \cdot R \end{cases} \quad (3.3)$$

Cylindre (de hauteur h et de rayon R) :

$$\begin{cases} s_i = R \cdot \cos(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i) \\ t_i = R \cdot \sin(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i) \\ w_i = (\sum_{j=0}^{k-1} ([\frac{i}{2^j}] \text{Mod}2) \cdot 2^{-(j+1)}) \cdot h \end{cases} \quad (3.4)$$

Cône (de hauteur h et de rayon de base R) :

$$\begin{cases} s'_i = \sqrt{1 - \sum_{j=0}^{k-1} ([\frac{i}{2^j}] \text{Mod}2) \cdot 2^{-(j+1)}} \cdot R \\ t'_i = \frac{i}{N} \cdot 360^\circ \\ w'_i = (R - s'_i) \cdot \frac{h}{R} \\ s_i = s'_i \cdot \cos(t'_i); t_i = t'_i \cdot \sin(t'_i); w_i = w'_i \end{cases} \quad (3.5)$$

Les coordonnées de points de mesure dans le repère entité sont évaluées pour chaque type d'entité canonique selon les formules proposées dans [Stojadinovic et al., 2016b]. Un exemple de répartition de 10 points de mesure selon la séquence d'Hammersley pour un plan, cylindre, sphère et cône est représenté dans la Figure. 3.17.

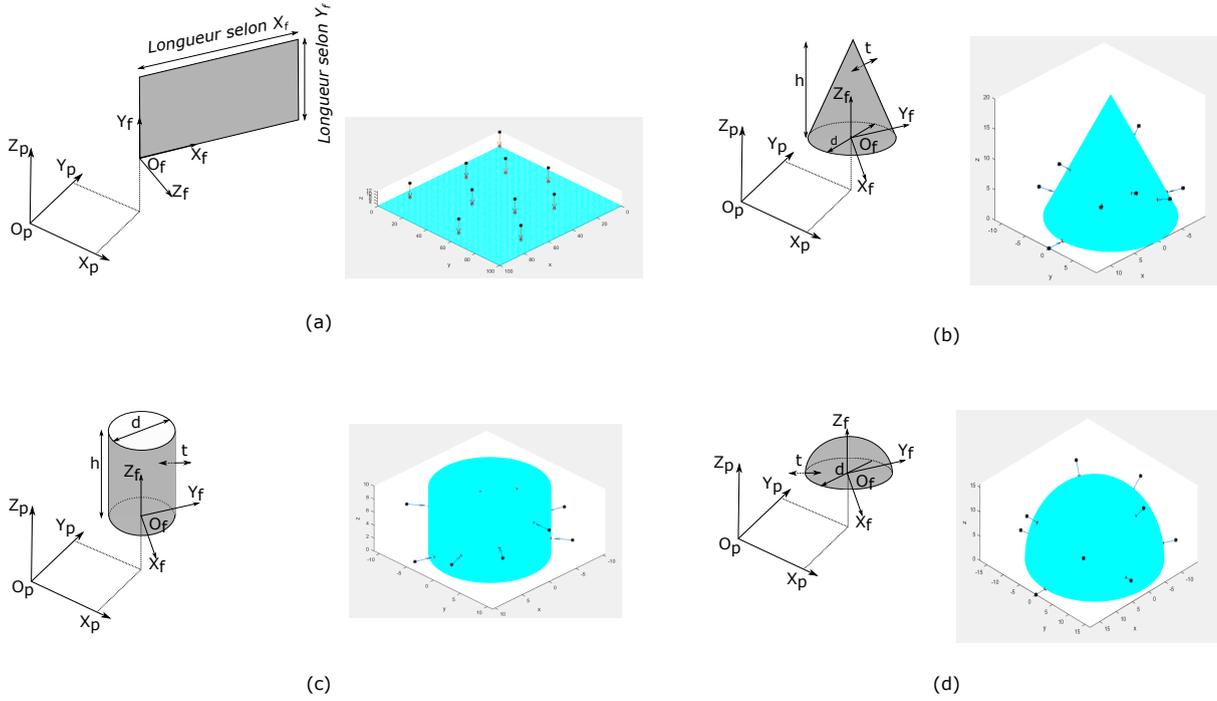


Figure 3.17 – Distributions des points de mesure : (a) : plan, (b) cône, (c) : cylindre ; (d) : demi-sphère.

Les coordonnées des points de mesure doivent être exprimées dans le repère pièce. À chaque entité de mesure, il est associé un repère entité $REM (O_f, X_f, Y_f, Z_f)$ dans lequel les points de mesure (s_i, t_i, w_i) sont exprimés. La position P_f et l'orientation R_f du repère entité dans le repère pièce sont stockés dans la base de données (Section. 2.3.2). La matrice de passage du repère entité au repère pièce est notée par T_f . Les coordonnées des points de mesure M dans le repère pièce sont exprimées par (x_i, y_i, z_i) (Équation. (3.4.2)) :

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 0 \end{pmatrix} = T_f \cdot \begin{pmatrix} s_i \\ t_i \\ w_i \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & P_f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s_i \\ t_i \\ w_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Pour les formes complexes, nous adoptons des stratégies de distribution adaptatives. La méthode proposée par Yu et al. est utilisée [Yu et al., 2013]. Elle est composée des étapes suivantes (Figure. 3.18) :

1. Sélection d'un nombre maximal de points de mesure N_{max} , une erreur maximale admissible ϵ , et un nombre maximal d'itérations n .
2. Distribution aléatoire de quelques points de mesure M sur la forme complexe.
3. Génération d'une géométrie de substitution (B-splines rationnels non uniformes) en utilisant les points M . Une grille de points avec une densité suffisante est évaluée sur la géométrie de substitution.
4. Calcul des écarts d_i entre la grille de points de la géométrie de substitution et le modèle nominal. Le maximum des écarts d_i est sélectionné comme écart global d .
5. Comparaison de l'écart global d avec l'erreur maximale admissible ϵ et le nombre d'itérations i avec le nombre maximal d'itérations n , si d est supérieur à ϵ et i est inférieur à n , alors le point de grille qui a un maximum d'écart est ajouté dans l'ensemble des points initial M . Ensuite, le processus retourne à l'étape (3). Sinon, fin du processus et l'ensemble de points de mesure représente les points M .

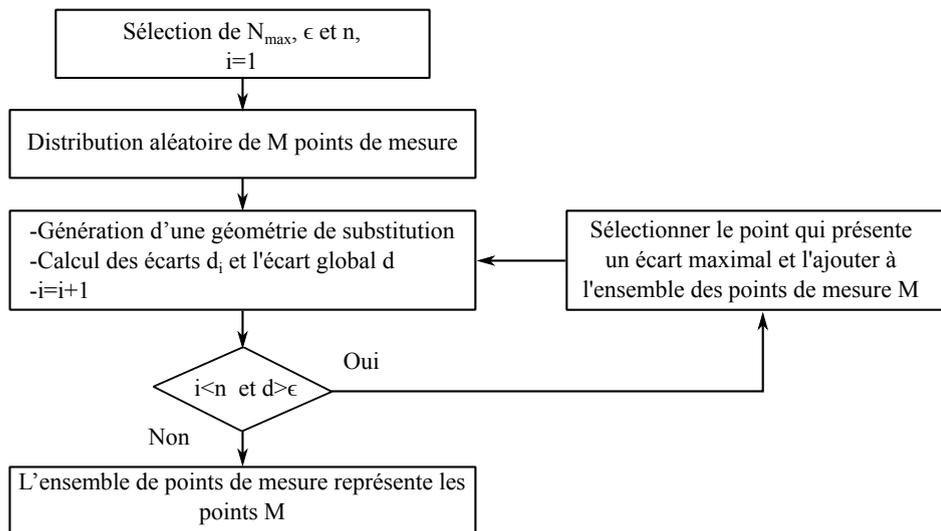


Figure 3.18 – Algorithme de distributions des points de mesure pour les formes complexes.

3.4.3 Définition des points d'accostage et des directions d'accostage

La direction d'accostage est la direction de déplacement prise par le palpeur avant de toucher la surface au point de mesure. C'est la direction perpendiculaire à la surface au point de mesure. La direction d'accostage pour les entités de mesure planes est l'opposé

du vecteur normal au plan extérieur matière. Pour les entités cylindriques, sphériques et coniques, la direction d'accostage est évaluée en tenant compte du paramètre λ , qui peut être -1 pour une entité interne ou 1 pour une entité externe (Section. 2.3.2).

La trajectoire du palpeur est composée de deux groupes de points : les points de mesure et les points d'accostage [Stojadinovic et al., 2016a]. Ces derniers représentent les points de transition entre une vitesse rapide et une vitesse lente. Selon le type d'entité (planes, entité interne ou externe), les points d'accostage sont définis à une distance de transition d_t dans la direction d'accostage. Dans l'exemple de la Figure. 3.19, les points de mesure sont présentés en rouge tandis que les points d'accostage sont présentés en noir.

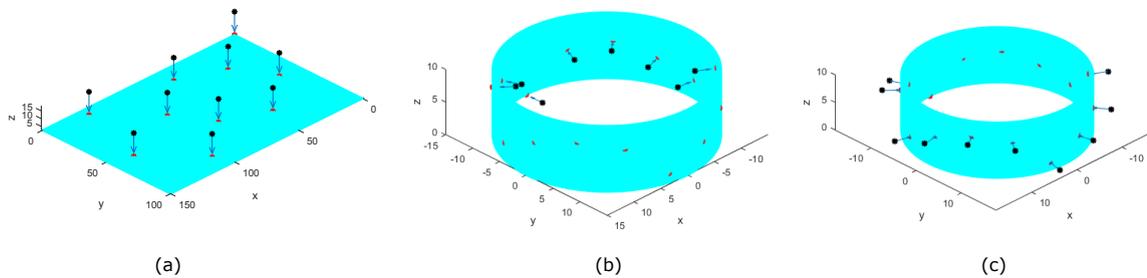


Figure 3.19 – Points de mesure, point d'accostage, directions d'accostage : (a) : plan, (b) : cylindre interne ; (c) : cylindre externe.

3.4.4 Définition de la séquence de points de mesure

Afin de réduire le temps de mesure, la séquence de points de mesure et les points de transition doivent être ordonnés. Le temps de mesure est proportionnel à la distance totale (distance euclidienne) parcourue par le palpeur [Mian and Al-Ahmari, 2014]. Partant d'un point donné, le palpeur se déplace d'abord avec une vitesse rapide vers un point d'accostage. Puis, un déplacement avec une faible vitesse est effectué dans la direction d'accostage vers le point de mesure. Ensuite, un retour vers le point d'accostage avant d'aller avec une vitesse rapide vers un autre point d'accostage [Li et al., 2018] (Figure. 3.20(a)). Le passage d'un point d'accostage i vers un autre point d'accostage ($i + 1$) est fonction de la distance euclidienne la plus courte (Figure. 3.20). Pour les entités externes, il faut s'assurer que la distance d'accostage d_t soit assez grande afin que le palpeur ne touche pas la surface lors d'un déplacement entre deux points d'accostage.

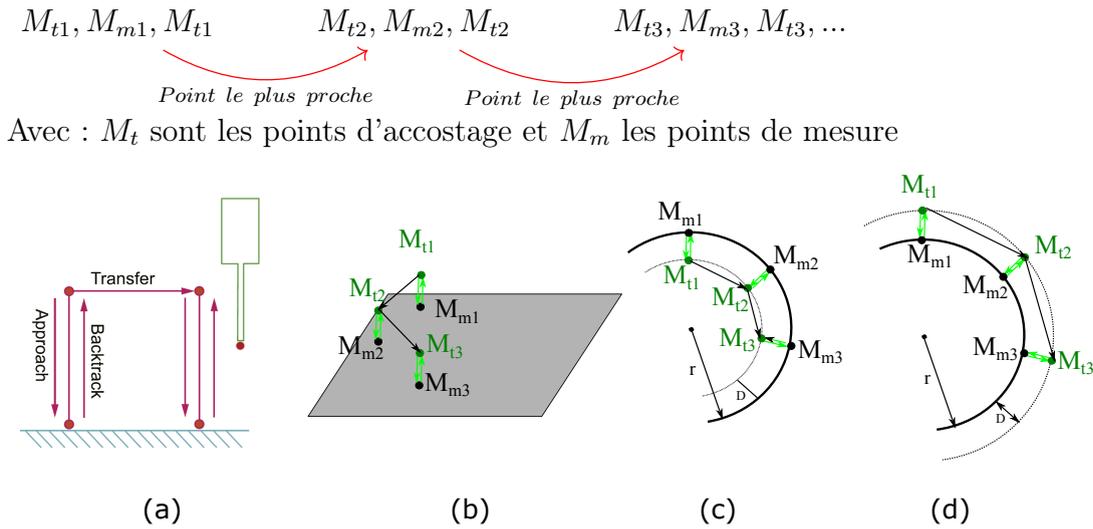
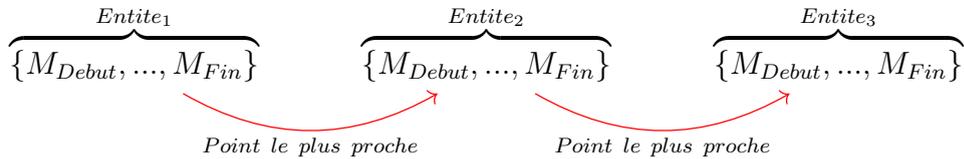


Figure 3.20 – Séquence des points de mesure et de transition :(a) : principe [Li et al., 2018], (b) : plan, (c) : cylindre interne; (d) :cylindre externe.

Dans le même but de réduire le temps de mesure, les entités de mesure doivent être ordonnées. À partir du dernier point d'accostage d'une entité, l'entité suivante est celle qui a le plus proche point d'accostage. Le passage d'un point à un autre doit s'effectuer sans collision avec la pièce.

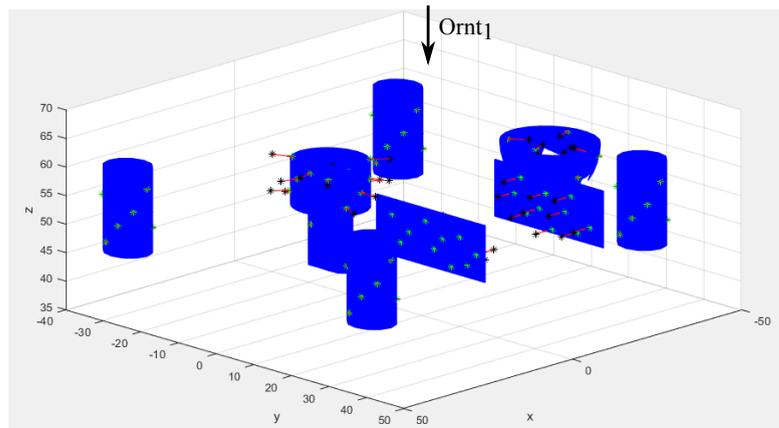


3.4.5 Application

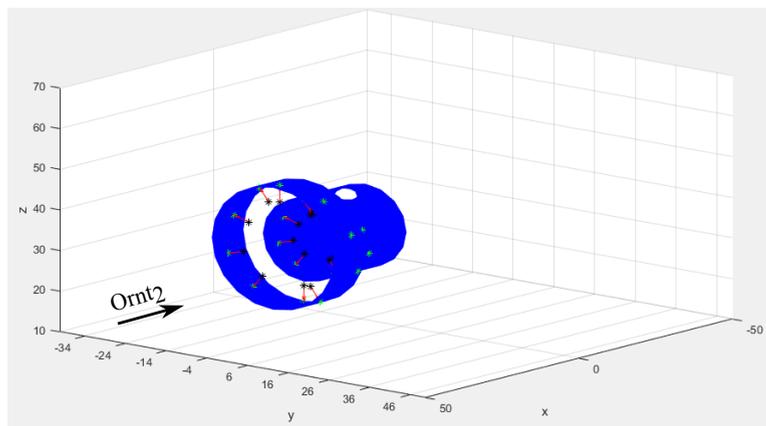
La méthode proposée pour générer les trajectoires du palpeur est implémentée en *MATLAB*®. À partir des groupes d'entités à mesurer avec le palpeur tels que définis dans les séquences d'opérations, nous définissons la trajectoire du palpeur dans chaque orientation du scanner pour mesurer les entités correspondantes à cette orientation. Le nombre de points de mesure et leurs distributions sont calculés pour chaque type d'entité selon la méthode proposée précédemment ainsi que les points d'accostage et les directions d'accostage.

Pour la première orientation ($Ornt_1$), les entités $EI7$, $EI8$, $EI9$, $EI10$ et une *Portion de EI6* sont à mesurer avec le palpeur. La Figure. 3.21(a) présente les points de mesure, les points d'accostage et les directions d'accostage pour les différentes entités de mesure. Pour la demi-sphère, une portion est à mesurer avec le capteur laser-plan et le reste est à mesurer avec le palpeur. Les points de mesure avec le palpeur sont

définis pour la portion correspondante. Concernant la deuxième orientation ($Ornt_2$), les résultats de planification des trajectoires de mesure des entités $EI10$ et $EI12$ sont représentés dans la Figure. 3.21(b). La Figure. 3.22 présente les trajectoires du palpeur pour les différentes entités de mesure.



(a) $Ornt_1$



(b) $Ornt_2$

Figure 3.21 – Points de mesure, points d'accostage et les directions d'accostage pour les différentes entités de mesure.

3.5 Exécution de la gamme d'inspection

La gamme d'inspection générée précédemment contient la trajectoire du capteur laser-plan et celle du palpeur dans chaque orientation du scanner. La trajectoire est définie par la séquence des points de passage exprimés dans le repère pièce. L'exécution consiste à transformer les données contenues dans la gamme d'inspection en des déplacements de la MMT afin de mesurer les surfaces et récupérer les données de mesure (Figure. 3.23).

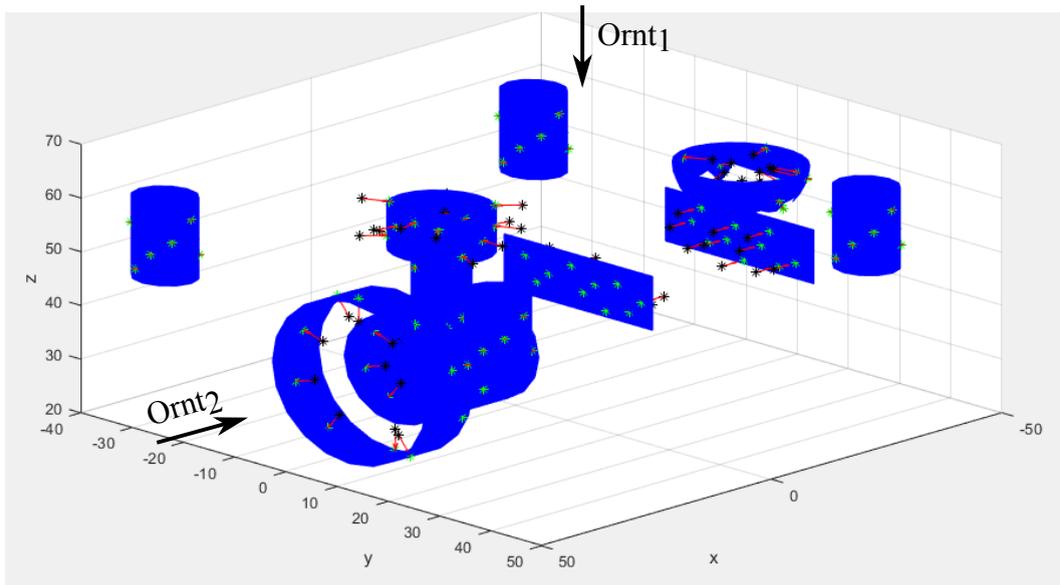


Figure 3.22 – Trajectoires du palpeur.

La difficulté réside dans l'automatisation d'un processus d'exécution à partir des données de la gamme d'inspection. L'exécution avec deux capteurs de technologies différentes rend cette problématique plus complexe.

En fonction de la position de la pièce dans le volume de la *MMT*, les déplacements de la machine doivent être adaptés à cet emplacement. Ainsi, une fois que la pièce est positionnée et localisée dans le repère machine, la trajectoire est exprimée en fonction de cette position. Afin de réaliser une exécution automatique, un fichier appelé "*trajectoire*" contenant les informations des trajectoires en langage de pilotage de la machine est généré.

En général, pour chaque technologie de mesure, à contact ou sans contact, un logiciel est utilisé pour gérer et exécuter le processus de mesure. Pour le capteur laser-plan, un logiciel associé "*Polygonia (Kreon)*" est utilisé pour effectuer des opérations de numérisation et récupérer les nuages de points numérisés. Ce logiciel n'est pas adapté à l'évaluation des spécifications et à la génération des rapports d'inspection. D'autre part, un logiciel associé au palpeur "*Modus (Renishaw)*" peut effectuer des déplacements automatiques, mesurer les surfaces, récupérer les données de mesure, évaluer les spécifications, et générer un rapport d'inspection. Ainsi, nous utilisons le logiciel *Polygonia* pour la gestion de la mesure avec le capteur laser-plan et le logiciel *Modus* pour gérer la mesure avec le palpeur et réaliser les déplacements automatiques.

Les deux capteurs sont calibrés sur des sphères de calibration pour les différentes

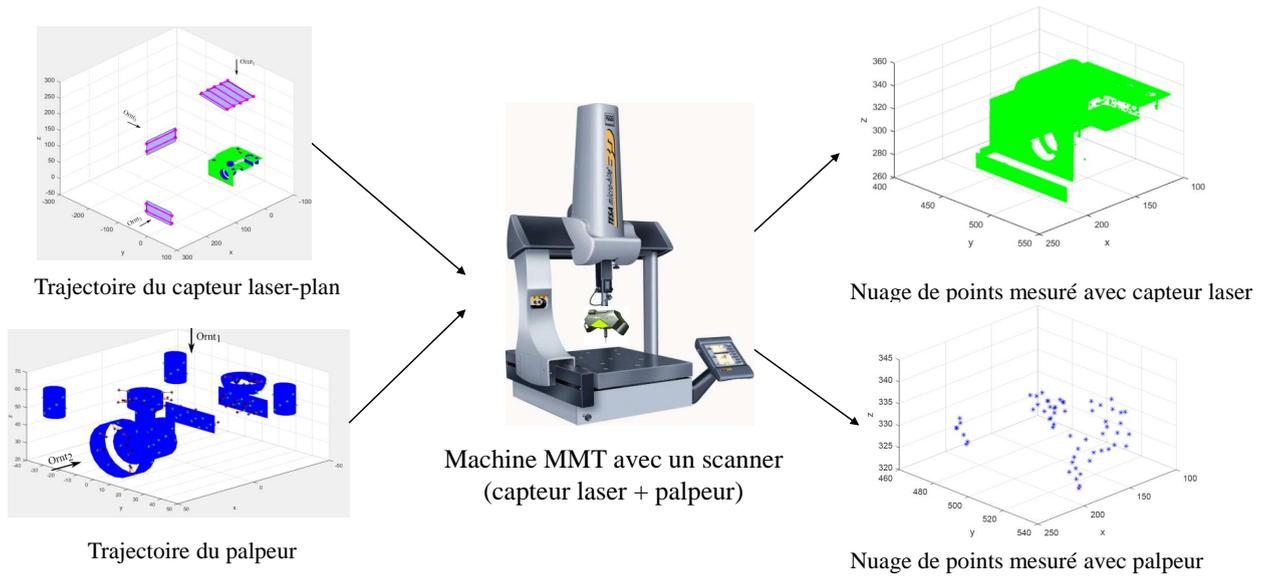


Figure 3.23 – Exécution de la gamme d’inspection sur MMT.

orientations de la gamme d’inspection. Ainsi, le résultat de mesure avec chaque capteur est un nuage de points exprimé dans le repère de calibration dont l’origine est le centre de la sphère de calibration. Ces résultats de mesure sont exportés à la fin du processus de mesure afin de les traiter et évaluer les spécifications associées comme développé dans le chapitre suivant.

Dans la suite, nous détaillons les éléments composant la chaîne d’exécution multi-capteurs. La trajectoire du scanner est définie par la séquence des déplacements du centre de la bille du palpeur dans le repère machine R_m . La trajectoire du scanner est alors générée par transformation et assemblage de la trajectoire du capteur laser-plan et la trajectoire du palpeur. La génération d’un fichier "*trajectoire*" contenant la trajectoire du scanner est détaillée dans l’étape suivante afin de réaliser une exécution automatique et ensuite exporter les résultats de mesure.

3.5.1 Description de la chaîne d’exécution

La chaîne d’exécution est l’ensemble des composants permettant de réaliser l’exécution de la gamme d’inspection. Elle comporte généralement un ordinateur, deux types de contrôleurs (*Renishaw et Kreon*), une machine à mesurer tridimensionnelle et un scanner composé de deux capteurs montés sur la tête de la machine (Figure. 3.24). Avec l’ordinateur, un fichier contenant la gamme d’inspection est lancé sur le logiciel *Modus*. Des consignes sont ensuite envoyées au contrôleur *Renishaw* pour déplacer la machine.

Les positions des règles de la machine sont enregistrées par les contrôleurs. En fonction de la technologie des capteurs, les données de mesure sont relevées et transmises au contrôleur. Puis, les résultats de mesure sont communiqués à l'ordinateur. Le nuage de points mesuré avec le capteur laser-plan est rapporté via le logiciel *Polygonia* et celui de la mesure avec palpeur rapporté par le biais de *Modus*.

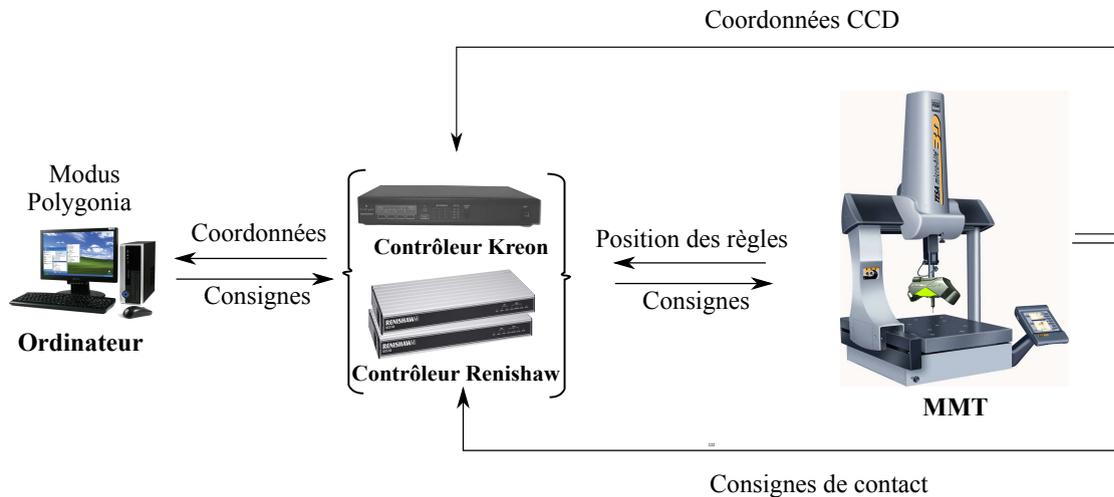


Figure 3.24 – Chaîne d'exécution.

3.5.2 Calcul de la trajectoire du scanner

Selon l'algorithme présenté précédemment en Figure. 3.2, la trajectoire du scanner est obtenue en transformant puis en assemblant dans chaque orientation la trajectoire du capteur laser-plan et la trajectoire du palpeur. Nous définissons la trajectoire du scanner par la séquence des déplacements du centre de la bille du palpeur t_j dans le repère machine R_m (Figure. 3.25). En revanche, la trajectoire du capteur laser-plan est définie par les centres de rotation du scanner dans le repère pièce R_p . Ainsi, deux transformations sont appliquées, la première pour passer du centre de rotation du scanner au centre de la bille du palpeur, et la seconde pour exprimer les coordonnées des points dans le repère machine R_m . Pour la trajectoire du palpeur définie par la séquence des points de passage du centre de la bille du palpeur dans le repère pièce R_p , une transformation pour exprimer les coordonnées des points dans le repère machine R_m est appliquée.

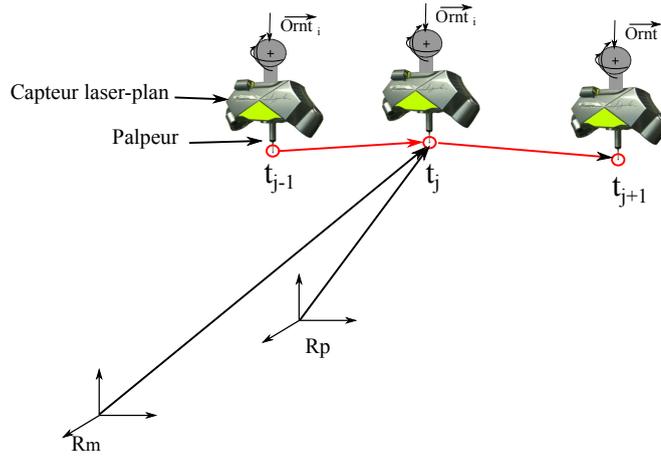


Figure 3.25 – Trajectoire du scanner.

3.5.2.a Transformation de la trajectoire du capteur laser-plan du centre de rotation du scanner au centre de la bille du palpeur

Pour une orientation donnée ($Ornt_i$), les points de passage du capteur laser-plan sont exprimés par les coordonnées du centre de rotation du scanner P_j (Figure. 3.26(a)). Afin de les transformer, une translation d'une distance d_p le long de l'orientation $Ornt_i$ est appliquée à chaque point de la trajectoire. Cette valeur d_p est la distance constante entre le centre de rotation du scanner et le centre de la bille du palpeur (Figure. 3.26(a)). Les points P'_j de la trajectoire du capteur laser-plan sont ainsi exprimés pour une orientation $Ornt_i$ par l'Équation. (3.7).

$$\vec{P}'_j = \vec{P}_j + d_p \cdot \overrightarrow{Ornt_i} \quad (3.7)$$

3.5.2.b Transformation des coordonnées des points du repère pièce R_p au repère machine R_m

La pièce est mise en position dans le volume de la machine, une mesure préalable de 3 plans permet de localiser la pièce dans le repère machine R_m . Les trajectoires du capteur laser-plan (P'_j) et du palpeur (M_k) sont exprimées dans le repère pièce R_p (Figure. 3.26(b)). Connaissant l'emplacement de la pièce dans le repère machine R_m , une transformation \mathbf{T} est appliquée aux coordonnées des points de la trajectoire P'_j et M_k pour établir la trajectoire dans le repère machine (Équation. (3.8)).

$$\vec{t}_j = \mathbf{T} \cdot \vec{P}'_j; \quad \vec{t}_k = T \cdot \vec{M}_k \quad (3.8)$$

La position et l'orientation de la pièce dans le repère R_m définissent une matrice de transformation T (Équation. (3.9)) où la matrice R est la matrice de rotation du repère pièce par rapport au repère machine. La matrice R est déterminée par la mesure de trois plans de la pièce. La translation $\overrightarrow{O_m O_p}$ est évaluée par la mesure d'un point M_{ref} qui est l'intersection des trois plans.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} R & \overrightarrow{O_m O_p} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \text{ avec } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} X_p & Y_p & Z_p \\ r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

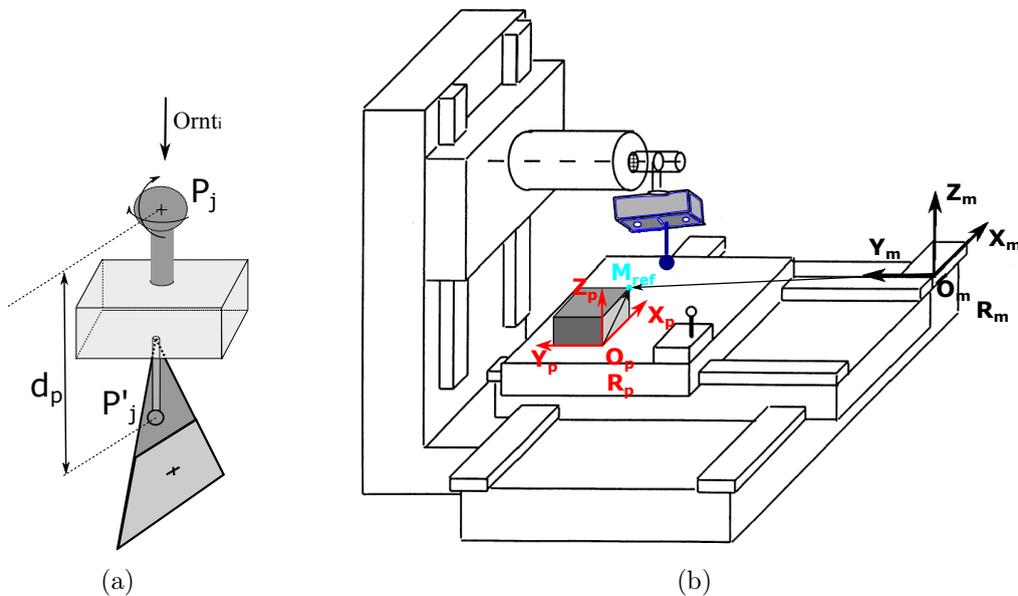


Figure 3.26 – (a) Translation entre le centre de rotation du scanner et le centre de la bille, (b) Transformation entre repère pièce et repère machine.

Après transformation, la trajectoire du scanner est établie pour chaque orientation par assemblage de la trajectoire du capteur laser et de la trajectoire du palpeur.

3.5.3 Génération d'un fichier "trajectoire" contenant la gamme d'inspection

La gamme d'inspection est définie et les trajectoires sont établies dans le repère machine selon la position de la pièce. Ces informations sont ensuite enregistrées dans un fichier exécutable par la machine pour réaliser l'exécution automatique de la gamme. Ce

fichier doit être compatible avec le langage d'exécution de la machine. Nous utilisons le logiciel *Modus* pour réaliser des commandes automatiques avec lequel la programmation est en langage I++. La structure d'un fichier "*trajectoire*" est décrite dans la Figure. 3.27. Les paramètres de mesure tels que la vitesse de déplacement et l'unité de mesure sont déclarés en premier. Puis, pour chaque orientation de la gamme d'inspection, la mesure est effectuée avec le capteur laser-plan puis avec le palpeur avant de changer l'orientation.

Comme la numérisation avec le capteur laser-plan est opérée par le logiciel *Polygonia*, lorsque le scanner se déplace entre les points de passage (instruction GO TO...), une intervention de l'utilisateur est nécessaire pour lancer et arrêter la numérisation sur *Polygonia*. La mesure avec le palpeur dans une orientation donnée est réalisée selon la séquence des entités définie dans la gamme.

Cette méthode de génération d'un fichier "*trajectoire*" est implémentée en Matlab© pour permettre la transition automatique de la planification de la gamme vers l'exécution. Le fichier généré pour le cas d'étude est présenté dans l'Annexe. C.

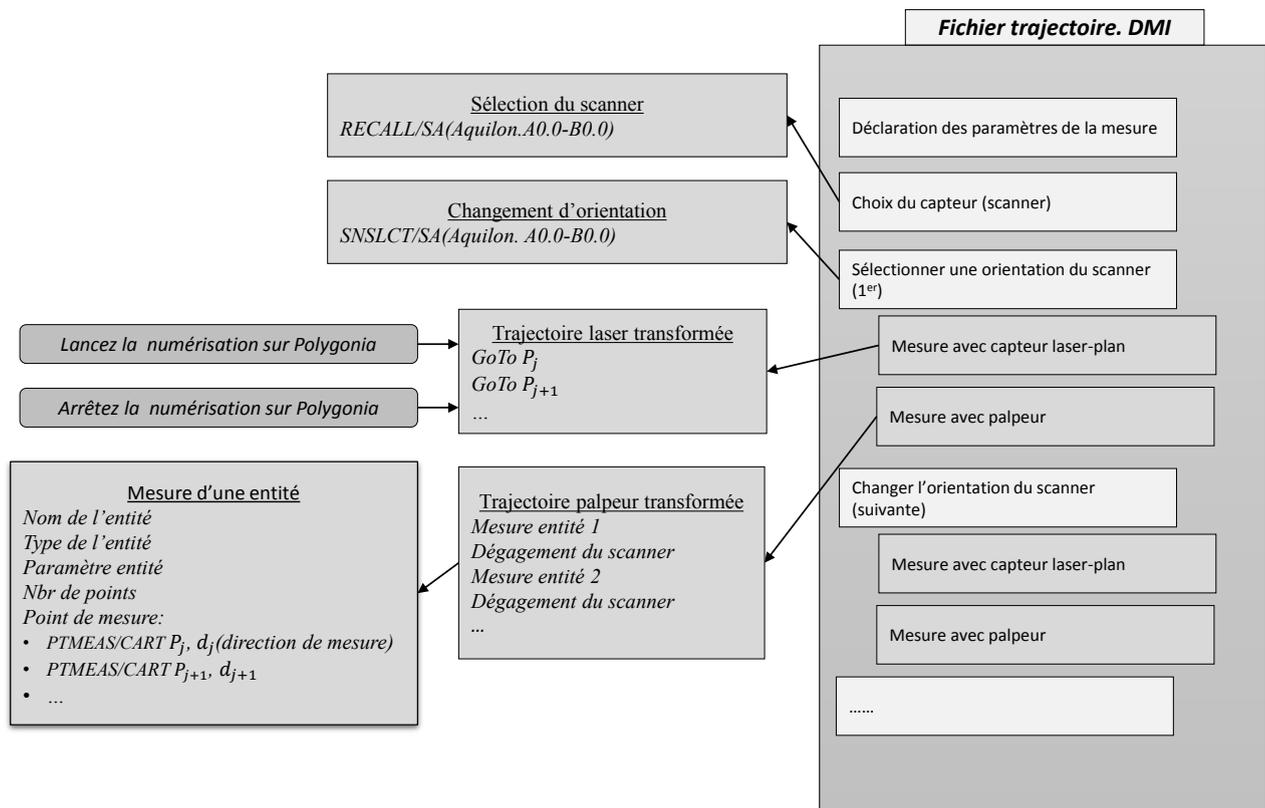


Figure 3.27 – Structure du fichier "*trajectoire*".

3.5.4 Export des données de mesure

Le fichier "*trajectoire*" est envoyé à la machine pour réaliser son exécution et mesurer la pièce test (Figure. 3.28). À la fin de la mesure, deux nuages de points sont rapportés via les deux logiciels. Pour la mesure avec le capteur laser-plan, le nuage de points qui correspond à la surface externe mesurée est exporté du logiciel *Polygonia* (Figure. 3.29(a)). Les points de contact de la bille du palpeur avec la surface à mesurer sont calculés par compensation avec le rayon de la bille. Ces points de contact qui représente le nuage de points du palpeur sont exportés du logiciel *Modus* (Figure. 3.29(b)).

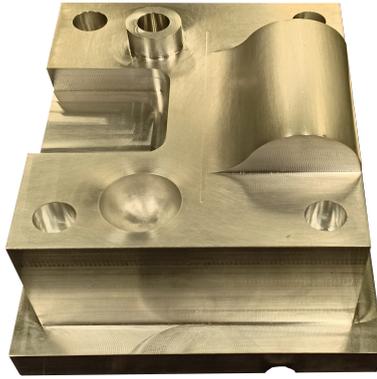


Figure 3.28 – Photo de la pièce test usinée.

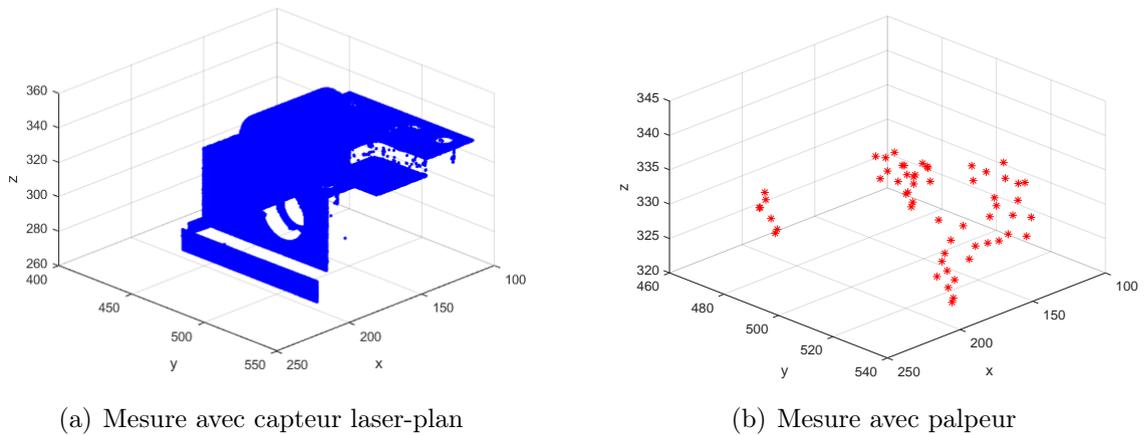


Figure 3.29 – Résultats de mesure.

Les nuages de points issus des deux capteurs sont de nature différente. Le nuage de points du capteur laser-plan est global, dense et bruité. En revanche, le nuage de points du palpeur est moins dense et non-bruité. Le traitement de ces données hétérogènes est une étape nécessaire avant d'évaluer les spécifications sur ces nuages de points. Cela fera l'objet du chapitre suivant.

3.6 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons traité le niveau local de la génération de la gamme d'inspection, c'est-à-dire la planification des trajectoires. Cette procédure est réalisée en deux parties : planification des trajectoires du capteur laser-plan pour les surfaces à mesurer avec le capteur laser-plan, et planification des trajectoires du palpeur pour les surfaces à mesurer avec le palpeur. Les orientations du scanner sont définies au préalable dans le niveau global de génération de la gamme d'inspection. La trajectoire du capteur laser-plan est définie par une séquence de points de passage dans des niveaux de trajectoires. Ces derniers sont établis par analyses des plages de variation des distances de numérisation. Cette méthode permet l'optimisation du temps de mesure tout en respectant les critères de qualité. Nous avons mis en place une démarche de génération d'un nombre minimal de niveaux de trajectoire afin d'optimiser le temps et la qualité de mesure. La séquence des points de passage est déterminée de telle façon à réduire le temps de mesure. Pour la trajectoire du palpeur, nous avons défini la distribution des points de mesure en fonction du type d'entité géométrique. Partant des séquences d'opérations définies au Chapitre 2, les trajectoires des deux capteurs sont déterminées automatiquement en se basant sur les informations stockées dans la base de données.

Nous avons mis en œuvre une méthode de génération automatique de la trajectoire exécutée sur *MMT*. Selon la technologie du capteur, la trajectoire est définie dans le repère pièce soit par les coordonnées du centre de rotation du scanner, ou par les coordonnées du centre de la bille du palpeur. Des transformations sont appliquées avant assemblage des trajectoires des deux capteurs pour définir la trajectoire du scanner dans le repère machine.

La particularité de la méthode que nous avons proposée pour la planification de la gamme d'inspection réside dans le fait que la mesure est effectuée avec le capteur laser-plan dans une orientation donnée, puis la mesure avec le palpeur dans la même orientation avant de changer l'orientation du scanner. Contrairement à d'autres travaux où l'ensemble de la gamme de mesure est réalisée avec le capteur laser-plan dans toutes les orientations et ensuite la gamme de mesure avec le palpeur est réalisée. La méthode détaillée dans ce chapitre permet la mesure avec une qualité souhaitée et maîtrisée dans un temps optimal.

La finalité de cette approche est d'effectuer un processus d'inspection automatique et

performant. Un résumé de l'approche proposée est présenté dans la Figure. 3.30. Partant des séquences d'opération définies dans le chapitre précédent, les trajectoires sont définies automatiquement sous *Matlab*®. Un fichier contenant les informations de la gamme est ensuite généré et envoyé à la machine pour réaliser une exécution automatique. À la fin de l'exécution, les nuages de points de mesure sont exportés. Le chapitre suivant porte sur l'étape de traitement de ces données hétérogènes et l'évaluation des spécifications.

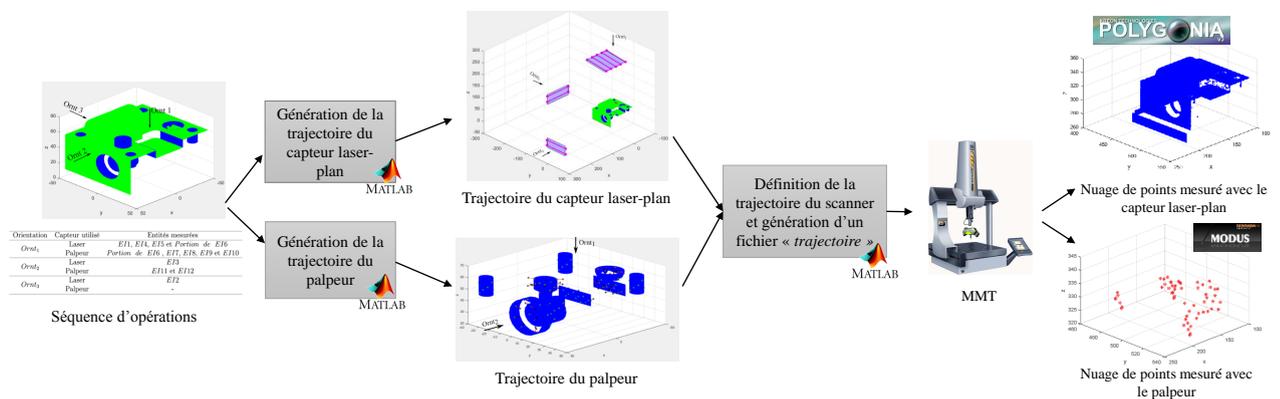


Figure 3.30 – Implémentation de la démarche proposée pour la planification des trajectoires et exécution.

Chapitre
4

**Traitement des données pour
l'évaluation des spécifications**

4.1 Introduction

La troisième étape de l'approche globale d'inspection dimensionnelle multi-capteurs, c'est-à-dire le traitement des données pour l'évaluation des spécifications, est traitée dans ce chapitre. L'objectif est de générer le rapport d'inspection de la pièce à partir des deux nuages de points provenant de la mesure avec le capteur laser-plan et le palpeur (Figure. 4.1).

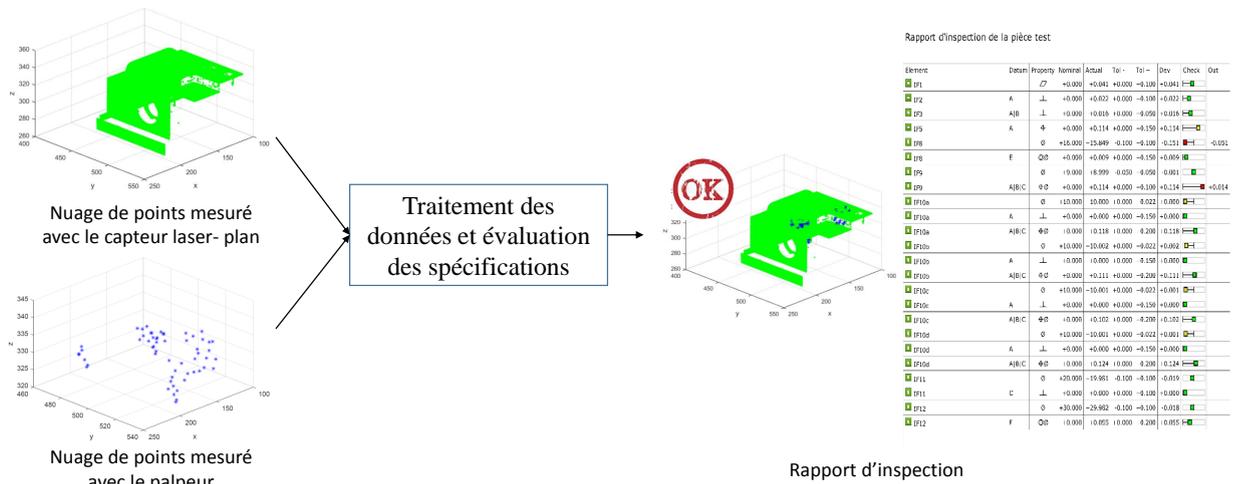


Figure 4.1 – Traitement des données de mesure pour l'évaluation des spécifications.

Dans le cas d'une mesure coopérative avec un capteur laser-plan et un palpeur, les nuages de points sont de même nature, mais de caractéristiques différentes et de plus exprimés dans des repères différents. Le nuage de points associé au palpeur est de meilleure qualité mais peu dense. Alors que le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser-plan est de qualité moindre en comparaison de celui du palpeur, mais très dense, bruité et contenant des points aberrants. Le résultat de mesure avec le palpeur est composé de nuages de points qui correspondent soit aux entités d'inspection totalement mesurées soit aux entités d'inspection partiellement mesurées. À chaque entité (partiellement ou totalement mesurée), un nuage de points est associé. Le résultat de mesure avec le capteur laser-plan est un ensemble de points qui définit une représentation globale de toutes les entités totalement et partiellement mesurées incluant des portions non désirées. Compte tenu de ces caractéristiques, la démarche de traitement doit prendre en compte le fait que :

- Le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser-plan est bruité et contient des points aberrants et des zones non utiles.

- Le nuage de points du capteur laser-plan est une représentation globale tandis que le nuage de points du palpeur est composé d'ensembles de points correspondant aux entités.
- Les coordonnées des points ne sont pas exprimées dans le même repère et sont de caractéristiques différentes.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons l'approche proposée de traitement des données pour l'évaluation des spécifications. Tout d'abord, les caractéristiques d'un nuage de points mesuré avec le capteur laser-plan ainsi que les étapes de pré-traitement associées sont présentées. Puis, une démarche d'unification des nuages de points mesurés avec les deux capteurs est proposée pour exprimer les coordonnées des points dans le même repère. La fusion des données des deux capteurs est ensuite réalisée. L'évaluation des spécifications est finalement effectuée sur les nuages de points après traitement. L'approche est mise en œuvre sur l'exemple proposé pour l'évaluation des spécifications.

4.2 Démarche proposée

L'approche que nous proposons pour l'évaluation des spécifications est présentée dans la Figure. 4.2.

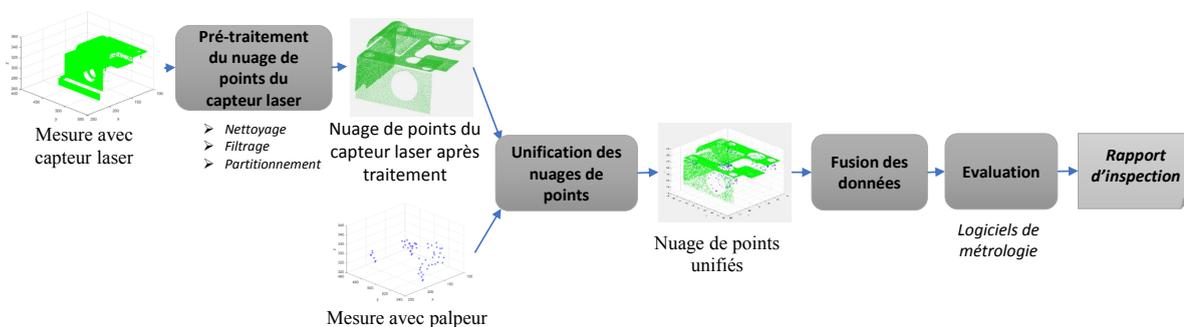


Figure 4.2 – Démarche de traitement des données pour l'évaluation des spécifications.

À l'issue de la mesure, deux nuages de points sont exportés. Le nuage de points mesuré avec le capteur laser-plan est une représentation globale des surfaces exprimée dans un repère dont l'origine est le centre de la sphère de calibration du capteur laser-plan. Tandis que le résultat de mesure avec le palpeur est un ensemble de nuages de

points dont chacun correspond à une entité. Les coordonnées des points sont exprimées dans un repère dont l'origine est le centre de la sphère de calibration du palpeur.

La première étape de l'approche est le pré-traitement du nuage de points issu du capteur laser-plan, compte tenu de ses caractéristiques [Mehdi-Souzani, 2006]. Cette étape comprend les opérations assez classiques de nettoyage, filtrage du bruit et partition en sous-ensembles de points, chacune étant associée à une entité.

La seconde étape de l'approche consiste à mettre en cohérence les nuages de points, c'est-à-dire exprimer les coordonnées des points dans un repère unique. Cela est réalisé par une opération d'unification des nuages de points. À l'issue de cette étape, un nuage de points est associé à chaque entité. Le nuage de points qui correspond à une entité partiellement mesurée est composé de deux sous-ensembles de points, le premier provient de la mesure avec le capteur laser et le second provient de la mesure avec le palpeur.

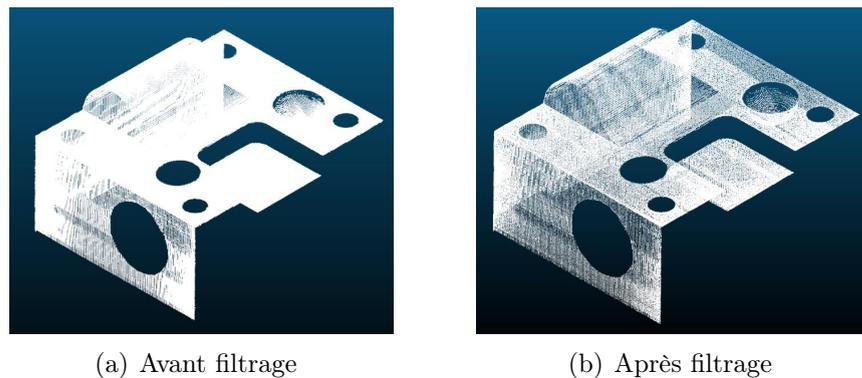
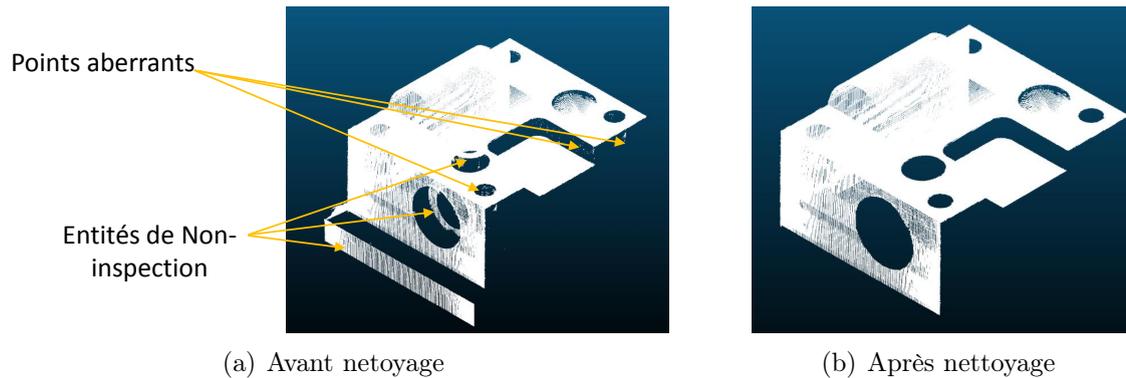
Les nuages de points des deux capteurs sont caractérisés par des propriétés complémentaires. Une étape de fusion est nécessaire afin d'exploiter la grande densité du nuage de points du capteur laser-plan et la bonne qualité de mesure du palpeur. L'évaluation des spécifications est ensuite réalisée sur les nuages de points correspondant aux entités d'inspection. Les étapes de l'approche sont appliquées sur les nuages de points issus de la mesure de la pièce test.

4.3 Pré-traitement des données de mesure avec le capteur laser-plan

Les étapes de pré-traitement des données de mesure avec le capteur laser sont largement traitées dans la littérature. Par ailleurs, de nombreuses solutions logicielles sont aujourd'hui proposées en réponse à des problématiques de pré-traitement des données (*Gom Inspect*, *Cloud Compare*, *Rapide-form*, *Géomagic*). Dans ce travail, nous proposons de réaliser les opérations de traitement avec le logiciel *Cloud Compare*© afin de valider la faisabilité de l'approche globale. Ces opérations pourront être étudiées et automatisées dans les travaux futurs.

L'approche proposée pour générer des trajectoires a été élaborée pour fournir une mesure complète des surfaces. Les points aberrants et les nuages de points qui ne correspondent pas aux entités d'inspection (entités de non-inspection), mais qui se trouvent dans le champ de mesure avec le capteur laser-plan, sont supprimés manuellement avec

le logiciel *Cloud Compare*©. Le résultat avant et après l'opération du nettoyage est affiché dans la Figure. 4.3. Pour réduire le bruit et éliminer d'autres points aberrants, nous appliquons un filtre adaptatif (filtrage qui tient compte de la courbure de la surface) au nuage de points. Le résultat est représenté dans la Figure. 4.4.



La partition avec le logiciel *Cloud Compare*© est basé sur la détection des formes par l'algorithme de RANSAC [Schnabel et al., 2007]. Les nuages de points correspondant aux plans sont d'abord détectés, ensuite ceux des cylindres, des sphères, des cônes et enfin ceux des formes complexes. Après partition, le nuage de points correspondant à chaque entité est déterminé. Nous proposons de supprimer les points qui sont sur les bords des surfaces, car ils présentent une qualité dégradée [Sadaoui, 2016]. Un bruit assez élevé est observé au début et à la fin d'une ligne de numérisation (appelé effet moustache) (Figure. 4.5(a)). Afin de supprimer les points qui présentent une qualité dégradée sur les bords d'une surface plane, un parallélépipède convexe englobant le nuage de points

lui est associé. Un second parallépipède est ensuite construit en décalant les sommets du parallépipède englobant. Les points qui sont à l'extérieur de ce dernier sont ainsi supprimés (Figure. 4.5). Le résultat après partition est affiché dans la Figure. 4.6.

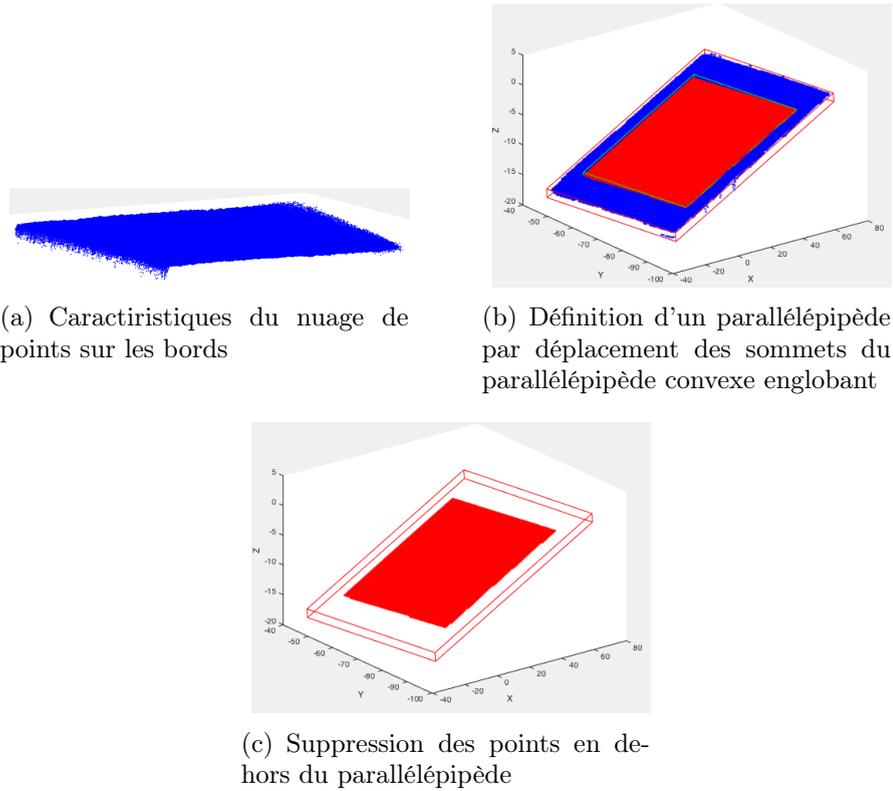


Figure 4.5 – Suppression des points sur les bords d'une surface plane [Sadaoui, 2016].

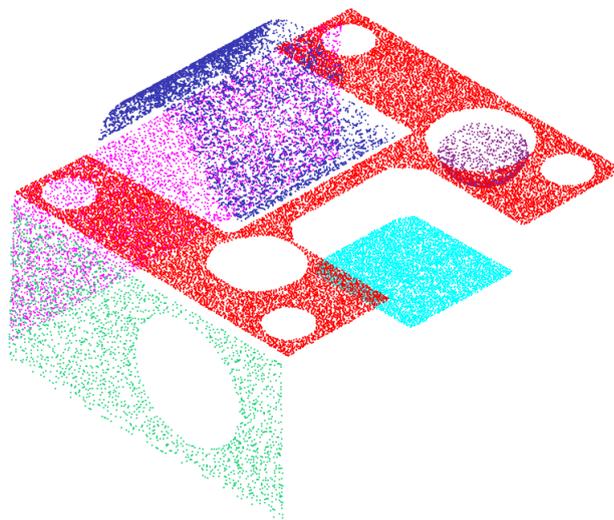


Figure 4.6 – Partition du nuage de points du capteur laser-plan.

Les nuages de points des entités (totalement et partiellement) mesurées avec le cap-

teur laser-plan sont ainsi déterminés. L'étape suivante consiste à mettre en cohérence les nuages de points des entités mesurées avec les deux capteurs.

4.4 Mise en cohérence (Unification) des nuages de points

L'objectif de la mise en cohérence des nuages de points est d'exprimer les résultats de mesure avec les deux capteurs dans un repère unique. Le résultat de mesure avec un capteur est exprimé dans un repère dont l'origine est le centre de la sphère de calibration du capteur (Figure. 4.7). Ainsi, nous cherchons à déterminer la transformation à appliquer sur un nuage de points pour le ramener vers l'autre. Comme la mesure avec le palpeur est de meilleure qualité, nous appliquons la transformation sur le résultat de mesure avec le capteur laser-plan pour le ramener vers le résultat de mesure avec le palpeur.

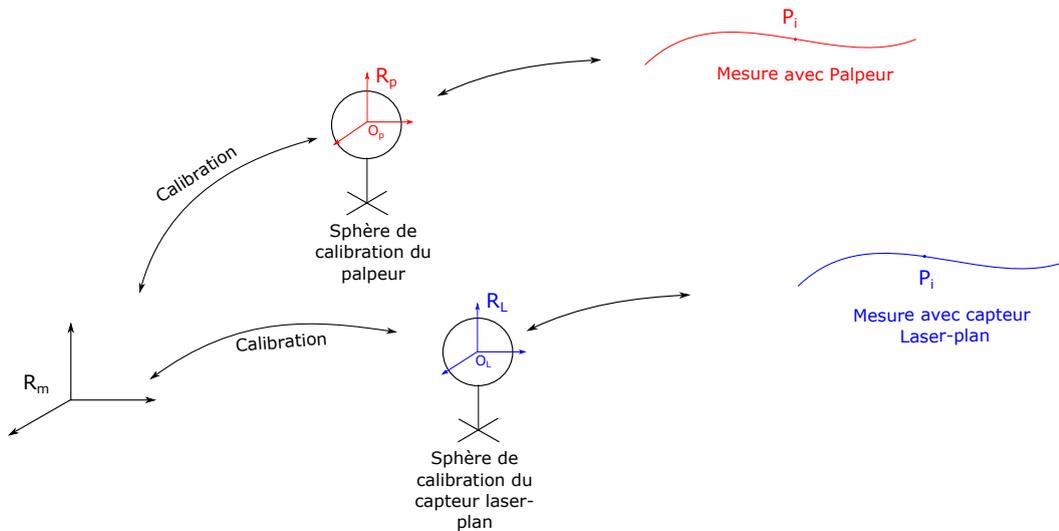


Figure 4.7 – Résultats de mesure avec le capteur laser-plan et le palpeur par rapport aux repères capteurs (R_p et R_l) et au repère machine (R_m).

L'ensemble du capteur laser-plan et du palpeur forme un scanner qui est monté sur la tête *PH10* de la *MMT*. Chaque capteur est lié au scanner. Un déplacement du scanner dans un axe donné provoque le même déplacement des deux capteurs. Cela signifie que les axes des repères (R_p et R_l) établis par la calibration des deux capteurs sont alignés. Ainsi, le processus d'unification se limite au calcul d'une translation entre le repère du capteur laser-plan et le repère du palpeur. Cette translation correspond à la distance entre le centre de la sphère de calibration du capteur laser-plan et le centre de la sphère de calibration du palpeur.

En calibrant les deux capteurs sur la même sphère, les deux repères devraient être confondus, car les deux origines correspondent au même point qui est le centre de la sphère. Néanmoins, la différence de technologies de mesure avec les deux capteurs fait que les deux repères de calibration ne sont pas identiques. Cela peut s'expliquer par l'écart entre les coordonnées du centre des sphères mesurées avec le capteur laser-plan et le palpeur (Figure. 4.8). Dans le travail de [Martinez et al., 2010b], un écart de position ΔZ de la coordonnée Z (pour une orientation verticale du scanner $A0B0$) est généralement relevé entre les centres des sphères. Ainsi, même si les capteurs sont calibrés sur la même sphère de calibration, les repères de calibration associés ne sont pas exactement les mêmes et une opération d'unification est alors nécessaire.

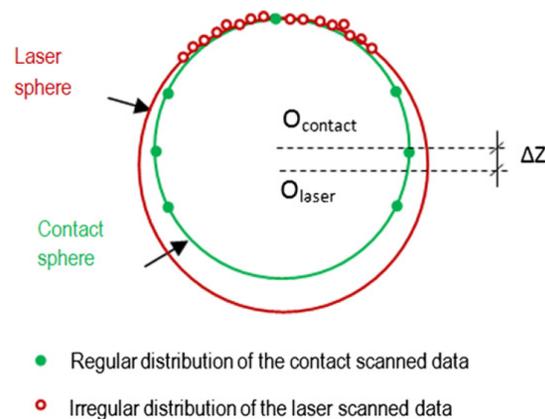


Figure 4.8 – Écart entre la sphère mesurée avec le capteur laser-plan et la sphère mesurée avec le palpeur [Martinez et al., 2010b].

Pour réaliser un processus d'unification efficace sans prendre en compte les écarts dus à la différence de la technologie de mesure, une technique d'unification a été proposée dans [Zhao et al., 2017]. Les auteurs proposent d'exprimer les coordonnées des points dans un repère unique qui est le repère de la machine (R_m) afin de s'affranchir de l'influence de la technologie de mesure. Cependant, il est difficile d'exprimer les coordonnées des points mesurés avec le capteur laser-plan dans le repère de la machine, car un modèle spécifique est requis. Les seules informations fournies sont les coordonnées des points dans le repère de calibration du capteur laser-plan. Dans ce travail, nous proposons une méthode d'unification pratique et facile à mettre en œuvre pour laquelle chaque capteur est calibré sur sa propre sphère de calibration.

4.4.1 Unification par application d'une translation

Cette technique consiste à calibrer les deux capteurs sur deux sphères de calibration. À chaque capteur un repère est associé dont l'origine est le centre de la sphère de calibration. L'écart entre les deux repères (R_p et R_l) est ensuite établi par évaluation de la distance entre les centres de sphères. Une translation \vec{T} correspondant à cet écart est appliquée sur le nuage de points mesuré avec le capteur laser-plan pour le ramener vers le nuage de points du palpeur (Figure. 4.9).

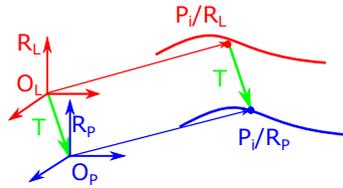


Figure 4.9 – Unification par application d'une translation

4.4.2 Évaluation de la méthode d'unification

Afin d'évaluer la méthode de mise en cohérence des nuages de points par application d'une translation, nous avons réalisé un test de mesure d'un artefact plan avec deux capteurs (Figure. 4.10(a)). Après avoir calibré les deux capteurs sur leurs sphères de calibration respectives, la moitié de la surface plane est mesurée avec le capteur laser-plan et l'autre moitié est mesurée avec le palpeur (Figure. 4.10(b)). La translation T est le vecteur reliant les deux centres des sphères de calibration. Cette translation est appliquée au nuage de points du capteur laser-plan.

Le nuage de points du capteur laser-plan après transformation et le nuage de points du palpeur sont affichés dans la Figure. 4.10(c). Le nuage de points de la mesure coopérative est obtenu par l'union du nuage de points du palpeur avec le nuage de points du capteur laser-plan après translation. Un plan des moindres carrés est associé à chaque nuage de points. Les éléments de situation (un point et le vecteur normal) des plans associés sont reportés dans le Tableau. 4.1.

En analysant les éléments de situation, un écart de justesse relative h (Équation. (4.1), Figure. 4.10(d)) de $3.68 \mu\text{m}$ est observé entre le plan obtenu par la mesure coopérative et le plan mesuré avec le palpeur.

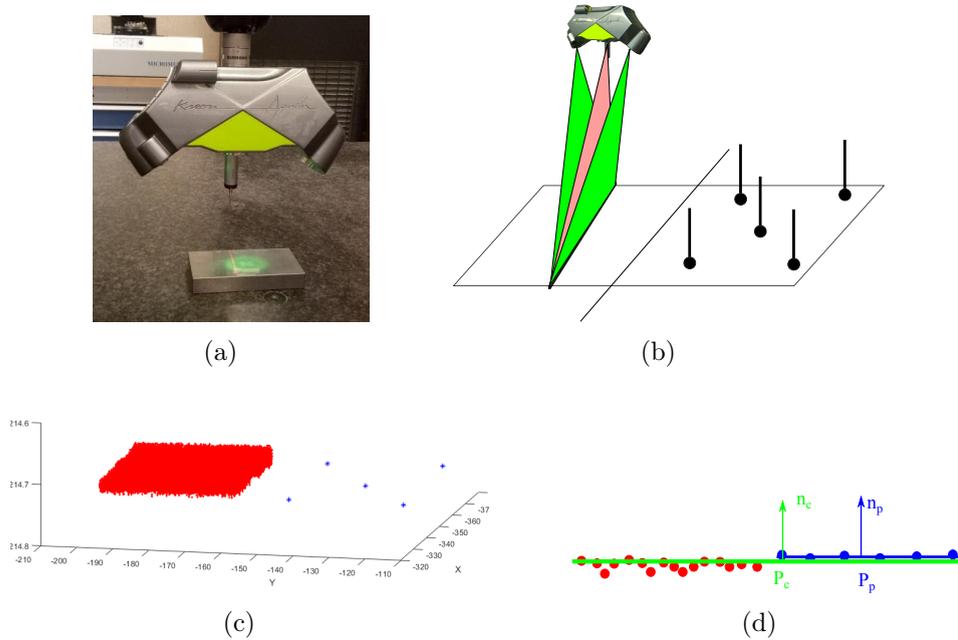


Figure 4.10 – Mesure d’une surface plane avec un capteur laser-plan et un palpeur

Mesure avec palpeur		Mesure coopérative	
Point P_p	Vecteur normal \vec{n}_p	Point P_c	Vecteur normal \vec{n}_c
-353.3116	0.0001	-351.9578	0.0001
-131.7303	0.0001	-180.8757	0.0001
-214.7383	1.0000	-214.7347	1.0000

Tableau 4.1 – Résultats de mesure avec les deux capteurs.

$$h = \frac{1}{2} \cdot (|\overrightarrow{P_p P_c} \cdot \vec{n}_p| + |\overrightarrow{P_c P_p} \cdot \vec{n}_c|) \quad (4.1)$$

Où; P_p et \vec{n}_p sont les éléments de situation du plan associé au nuage de points mesuré avec le palpeur, P_c et \vec{n}_c sont les éléments de situation du plan associé au nuage de points de la mesure coopérative.

Dans le but d’évaluer la répétabilité de la justesse relative, nous avons répété cette démarche 5 fois en réalisant dans chaque cas : la calibration des capteurs sur leurs sphères de calibration respectives, l’évaluation de la translation \vec{T} et la mesure coopérative avec les deux capteurs (Tableau. 4.2). L’écart de justesse relative h est calculé pour chaque essai. La valeur moyenne des écarts est évaluée à $h_{moy} = 3.4\mu m$ et l’écart type est de $\sigma = 1.07\mu m$. La valeur de l’écart type ne permet pas de conclure sur la répétabilité de la justesse relative. La valeur maximale de justesse relative est de $h_{max} = 4.5\mu m$. Cette valeur est inférieure à la valeur minimale de l’incertitude admissible $U_{ad} \in [6, 30\mu m]$

(évaluée par $IT/8$) de l'ensemble des spécifications à évaluer dans notre cas d'étude. À partir de cette analyse, nous concluons que la méthode d'unification permet de recalibrer les nuages de points de deux capteurs avec une faible erreur de recalage en comparaison aux intervalles de tolérances des spécifications à évaluer (h est relativement faible par rapport à $IT/8$).

Essai	Écart de justesse relative h (μm)
Essai 1	3.7
Essai 2	1.7
Essai 3	3.9
Essai 4	4.5
Essai 5	4.1
Essai 6	2.5

Tableau 4.2 – Évaluation de la répétabilité de la justesse relative h dans le cas de mesure avec deux capteurs.

4.4.3 Application sur le cas d'étude

Nous appliquons la méthode d'unification sur les deux nuages de points du capteur laser-plan et du palpeur. Après qualification des deux capteurs dans une orientation donnée, la translation $\vec{\mathbf{T}}$ dans l'orientation considérée est calculée par la différence de positions des deux sphères de calibration. Pour chaque orientation du scanner \overrightarrow{Ornt}_i , une translation $\vec{\mathbf{T}}_i$ est déterminée, et nous l'appliquons au nuage de points provenant de la mesure avec le capteur laser-plan pour l' \overrightarrow{Ornt}_i . L'ensemble des nuages de points des entités sont ainsi exprimés dans le même repère. Le résultat est affiché dans la Figure. 4.11. Le nuage de points du capteur laser est représenté en vert et celui du palpeur en bleu.

4.5 Fusion des données

Les nuages de points associés à chaque entité sont établis. Par la suite, nous utilisons ces nuages de points pour évaluer les spécifications associées aux entités. Pour certaines spécifications, leur évaluation implique l'utilisation du nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser-plan et du nuage de points issu de la mesure avec le palpeur (Exemple, une spécification dont l'élément tolérancé est mesuré avec un capteur et le système de référence est mesuré avec le second capteur). Le nuage de points est composé

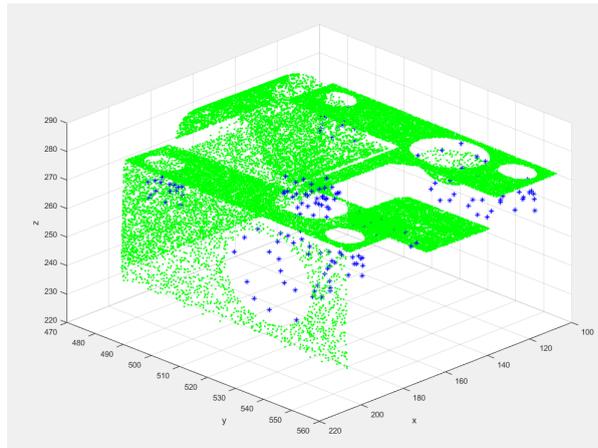


Figure 4.11 – Unification des nuages de points de la mesure avec le capteur laser-plan et le palpeur.

par deux sous-ensembles de points provenant des deux capteurs. Toutefois, même si les nuages de points des deux capteurs ont été unifiés avec une faible erreur de recalage, l'évaluation de ce type de spécifications peut ne pas être conforme. Dans le même sens, le nuage de points d'une entité partiellement mesurée est composé par deux sous-ensembles de points provenant des deux capteurs (Figure. 4.12). La fusion des nuages de points est alors nécessaire pour corriger les écarts entre les nuages de points des deux capteurs.

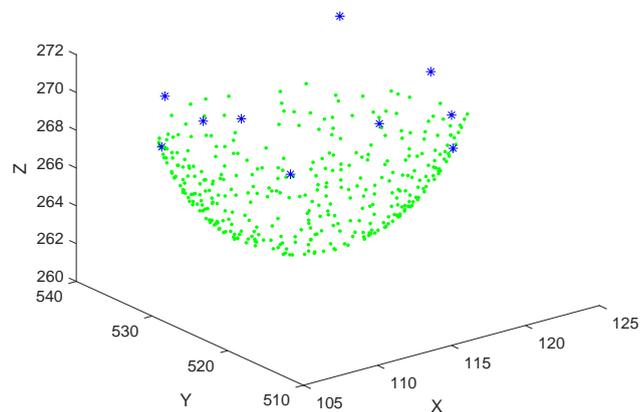


Figure 4.12 – Nuage de points associé à une entité partiellement mesurée ; Points verts : mesure avec capteur laser-plan, Points bleus : mesure avec palpeur.

La plupart des travaux de littérature sur la fusion s'appliquent à des cas de mesure d'une même surface avec les deux capteurs. Un processus de fusion local qui consiste à fusionner le nuage de points du capteur laser-plan avec celui du palpeur pour chaque surface nécessite la mesure de toutes les surfaces avec les deux capteurs, ce qui n'est pas l'intérêt de ce travail.

Dans ce travail, compte tenu de la qualité très différente des nuages de points issus de deux capteurs, il ne semble pas pertinent de mettre en place une méthode de fusion entité par entité. En effet, on constate par exemple qu'il pourrait être délicat de vérifier des spécifications pour lesquelles le système de référence est constitué sur des plans mesurés uniquement avec le capteur laser-plan. Ainsi, nous proposons de mesurer les trois plans du système de référence à la fois avec le capteur laser-plan et avec le palpeur. La fusion des données issues des deux capteurs permettra une fusion globale des nuages de points de toutes les entités.

Un processus de fusion basé sur l'alignement des 3 plans du système de référence qui ont été mesurés avec les deux capteurs est proposé (Figure. 4.13). Ce processus s'effectue en déterminant la transformation \mathbf{F} résultante de l'alignement des 3 plans mesurés avec le capteur laser-palan sur les 3 plans mesurés avec le palpeur, et puis en appliquant cette transformation sur le nuage de points global de toutes les entités mesurées avec le capteur laser-plan.

En utilisant le logiciel *Gom inspect*©, les trois plans associés aux nuages de points mesurés avec le capteur laser-palan sont alignés sur les 3 plans associés aux nuages de points mesurés avec le palpeur, et la transformation \mathbf{F} résultante de l'alignement est présentée dans l'Équation. (4.2).

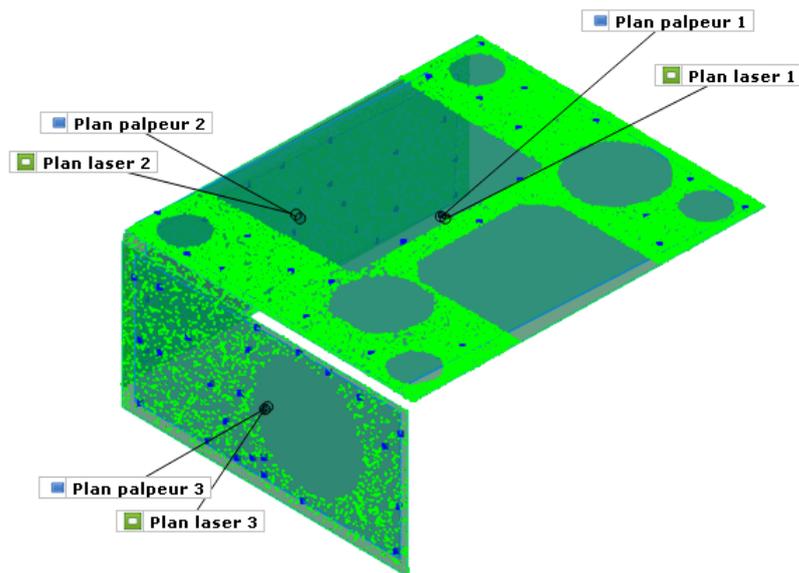


Figure 4.13 – Alignement des 3 plans mesurés avec le capteur laser-plan sur 3 plans mesurés avec le palpeur ; Points verts : mesure avec capteur laser, Points bleus : mesure avec palpeur.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & -0.000 & -0.067 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & -0.030 \\ 0.000 & -0.000 & 1.000 & -0.010 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Nous remarquons que la matrice de transformation est principalement composée d'une translation permettant de corriger les écarts résiduels de l'opération d'unification. Cette matrice de transformation \mathbf{F} est ensuite appliquée sur tous les nuages de points des entités mesurés avec le capteur laser.

4.6 Évaluation des spécifications

Rappelons que notre objectif est de pouvoir évaluer les spécifications portées sur le dessin de définition (Figure. ??) en utilisant une mesure combinant un capteur laser-plan et un palpeur. Après traitement des données de mesure, à chaque entité mesurée avec le capteur laser-plan ou avec le palpeur est associé son nuage de points correspondant après fusion des données (Figure. 4.14). L'évaluation selon la norme *GPS* (Spécification géométrique des produits) (*ISO 14638*) est généralement réalisée à l'aide des logiciels de métrologie. Dans ce travail, nous utilisons le logiciel *Gom Inspect*® pour évaluer les spécifications et générer le rapport d'inspection. Pour chaque entité d'inspection EI_i , les spécifications associées sont évaluées. Les résultats d'évaluation de toutes les spécifications définissent le rapport d'inspection de la pièce.

Afin de comparer le rapport d'inspection généré avec la mesure multi-capteurs, nous avons fait appel à un prestataire (ZEISS Calypso) certifié pour réaliser l'inspection de la pièce. Le rapport d'inspection dit de référence est présenté en Annexe D. Une comparaison avec notre approche est proposée pour quelques spécifications.

Dans les deux rapports d'inspection, les spécifications associées aux entités totalement mesurées avec le capteur laser-plan (EI_1 , EI_2 , EI_3 , EI_4 et EI_5) sont vérifiées. Prenons la spécification de planéité associée à l'entité EI_1 (Figure. 4.15), l'écart obtenu avec notre démarche ($0.041mm$) est supérieur à celui obtenu dans le rapport de référence ($0.002mm$), néanmoins, il demeure inférieur à l'intervalle de tolérance de la spécification ($IT = 0.1mm$). Ainsi, la spécification est vérifiée. Ceci montre l'aptitude du capteur laser à évaluer cette spécification. De la même façon, la spécification de perpendicularité

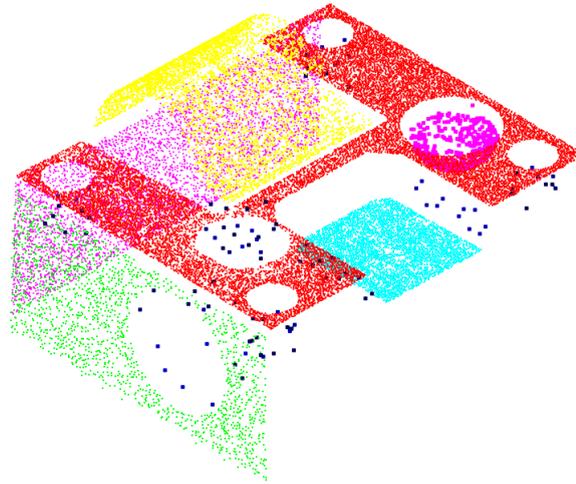


Figure 4.14 – Nuages de points associés aux entités de la pièce test.

associée à l'entité EI_3 est vérifiée dans les deux rapports d'inspection (Figure. 4.16).

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
<input checked="" type="checkbox"/> EI 01			+0.000	+0.041	+0.000	+0.100	+0.041	<input checked="" type="checkbox"/>	

(a) Rapport d'inspection de notre démarche

	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart
34 - Planéité 0.1	0.002	0.000	0.100		- 0.002

(b) Rapport d'inspection de référence

Figure 4.15 – Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de planéité de l'entité EI_1

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
<input checked="" type="checkbox"/> EI 03	A B		+0.000	+0.016	+0.000	+0.050	+0.016	<input checked="" type="checkbox"/>	

(a) Rapport d'inspection de notre démarche

	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart
22 - Perpendicularité 0.05 - A - B	0.004	0.000	0.050		- 0.004

(b) Rapport d'inspection de référence

Figure 4.16 – Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de perpendicularité de l'entité EI_3

Concernant les spécifications associées aux entités EI_7 , EI_8 et EI_{12} , les nuages de

points des éléments tolérancés et des systèmes de référence sont mesurés avec le palpeur. Ainsi, les résultats d'évaluation sont proches de ceux du rapport d'inspection de référence. Un exemple de spécification de coaxialité de l'entité EI_8 par rapport à l'entité EI_9 est présenté dans la Figure. 4.17. L'écart obtenu avec notre démarche est proche de celui obtenu dans le rapport d'inspection de référence.

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
 EI 08	E	$\odot \emptyset$	+0.000	+0.009	+0.000	+0.150	+0.009		

(a) Rapport d'inspection de notre démarche

	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart
 6 - Coaxialité 0.15 - E	0.011	0.000	0.150		- 0.011

(b) Rapport d'inspection de référence

Figure 4.17 – Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de coaxialité de l'entité EI_8 par rapport à l'entité EI_9

Pour les spécifications associées aux entités EI_9 , EI_{10} et EI_{11} , les nuages de points des éléments tolérancés sont mesurés avec un capteur et les systèmes de référence sont mesurés avec l'autre capteur. Selon notre démarche, ces spécifications sont vérifiées et les écarts obtenus sont inférieurs aux intervalles de tolérance des spécifications associées. Une comparaison d'évaluation de la spécification de localisation associée à l'entité EI_9 est présentée dans la Figure. 4.18. Les résultats d'évaluation d'une spécification dont le système de référence est mesuré avec un capteur et l'élément tolérancé est mesuré avec l'autre capteur montrent la faisabilité de la démarche d'inspection multi-capteurs proposée.

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
 EI 09	A B C	$\oplus \emptyset$	+0.000	+0.079	+0.000	+0.100	+0.079		

(a) Rapport d'inspection de notre démarche

	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart
 8 - Localisation 0.1 - A - B - C	0.024	0.000	0.100		- 0.024

(b) Rapport d'inspection de référence

Figure 4.18 – Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de localisation de l'entité EI_9

Concernant la spécification associée à l'entité EI_6 , le nuage de points utilisé pour l'évaluation de la spécification provient de la mesure avec les deux capteurs, une portion de la surface est mesurée avec le capteur laser-plan et l'autre portion est mesurée avec le palpeur. Cette spécification est vérifiée avec un écart de $0.093mm$ qui est inférieur à l'intervalle de tolérance $IT = 0.1mm$ (Figure. 4.5(a)). Cela montre d'une part la possibilité d'une mesure coopérative de la même entité avec deux capteurs, et d'autre part, la fusion des données est indispensable pour évaluer les spécifications associées aux entités mesurées avec les deux capteurs.

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
 EI 06	A B C	$\Phi S\emptyset$	+0.000	+0.093	+0.000	+0.100	+0.093		

(a) Rapport d'inspection de notre démarche

	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart
 	8 - Localisation 0.1 - A - B - C				-
	0.024	0.000	0.100		0.024

(b) Rapport d'inspection de référence

Figure 4.19 – Comparaison des résultats d'évaluation de la spécification de localisation de l'entité EI_6

Les résultats d'évaluation des spécifications associées à toutes les entités sont présentés dans la Figure. 4.20 et la Figure. 4.21. Les entités mesurées avec le capteur laser-plan sont représentées en vert, celles mesurées avec le palpeur sont représentées en bleu et l'entité mesurée avec les deux capteurs est représentée en rose.

Nous concluons de cette analyse que lorsqu'il s'agit d'évaluer les spécifications dont le nuage de points provient d'une mesure avec le palpeur, les résultats de l'évaluation des spécifications sont proches de ceux du rapport d'inspection de référence puisque ce dernier est établi par une mesure avec le palpeur. Pour l'évaluation des spécifications utilisant les nuages de points de la mesure avec le capteur laser-plan, les résultats sont également cohérents avec le rapport de référence. Il convient de rappeler que l'aptitude du capteur laser-plan à évaluer ces spécifications a été étudiée au Chapitre. 2. Le modèle proposé a montré que le capteur laser-plan est apte à évaluer ces spécifications. Grâce aux résultats de l'évaluation des spécifications, nous avons montré la pertinence de ce modèle proposé pour évaluer l'aptitude du capteur laser.

Nous soulignons que lorsqu'on trouve que la spécification n'est pas vérifiée en utilisant

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
EI 04	A B C	\cap	+0.000	+0.125	+0.000	+0.200	+0.125		
EI 01		\sphericalangle	+0.000	+0.041	+0.000	+0.100	+0.041		
EI 02	A	\perp	+0.000	+0.022	+0.000	+0.100	+0.022		
EI 03	A B	\perp	+0.000	+0.016	+0.000	+0.050	+0.016		
EI 05	A	\oplus	+0.000	+0.054	+0.000	+0.100	+0.054		
EI 08		\emptyset	+16.000	+15.849	-0.100	+0.100	-0.151		-0.051
EI 08	E	$\odot\emptyset$	+0.000	+0.009	+0.000	+0.150	+0.009		
EI 09		\emptyset	+9.000	+8.999	-0.050	+0.050	-0.001		
EI 09	A B C	$\oplus\emptyset$	+0.000	+0.079	+0.000	+0.100	+0.079		
EI 10a		\emptyset	+10.000	+10.002	+0.000	+0.022	+0.002		
EI 10a	A B C	$\oplus\emptyset$	+0.000	+0.079	+0.000	+0.100	+0.079		
EI 10b		\emptyset	+10.000	+10.001	+0.000	+0.022	+0.001		
EI 10b	A B C	$\oplus\emptyset$	+0.000	+0.071	+0.000	+0.200	+0.071		
EI 10c		\emptyset	+10.000	+10.001	+0.000	+0.022	+0.001		
EI 10c	A B C	$\oplus\emptyset$	+0.000	+0.070	+0.000	+0.200	+0.070		
EI 10d		\emptyset	+10.000	+10.000	+0.000	+0.022	+0.000		
EI 10d	A B C	$\oplus\emptyset$	+0.000	+0.084	+0.000	+0.200	+0.084		
EI 11		\emptyset	+20.000	+19.981	-0.100	+0.100	-0.019		
EI 11	C	\perp	+0.000	+0.000	+0.000	+0.100	+0.000		
EI 12		\emptyset	+30.000	+29.982	-0.100	+0.100	-0.018		
EI 12	F	$\odot\emptyset$	+0.000	+0.030	+0.000	+0.200	+0.030		
EI 06		\emptyset	+20.000	+19.932	-0.100	+0.100	-0.068		
EI 06	A B C	$\oplus S\emptyset$	+0.000	+0.093	+0.000	+0.100	+0.093		
EI 07	D	\equiv	+0.000	+0.016	+0.000	+0.250	+0.016		

Figure 4.20 – Rapport d’inspection (Tableau)

la mesure avec le capteur laser-plan, cela ne veut pas dire que cela ne l’est pas. Ainsi, la méthode d’inspection multi-capteurs proposée permet la vérification des spécifications, mais elle ne fournit pas l’information sur la mesure tels que l’écart de planéité.

L’évaluation des spécifications utilisant deux nuages de points provenant de deux capteurs de technologies différentes peut être effectuée après une étape de traitement des données. Cela montre l’importance du traitement dans le cas d’une inspection multi-capteurs.

4.7 Conclusion

La troisième partie de l’approche globale d’inspection a été présentée dans ce chapitre. Elle est composée des quatre opérations suivantes : le pré-traitement des données de mesure avec le capteur laser-plan, l’unification des nuages de points des deux capteurs, la fusion des données et l’évaluation des spécifications.

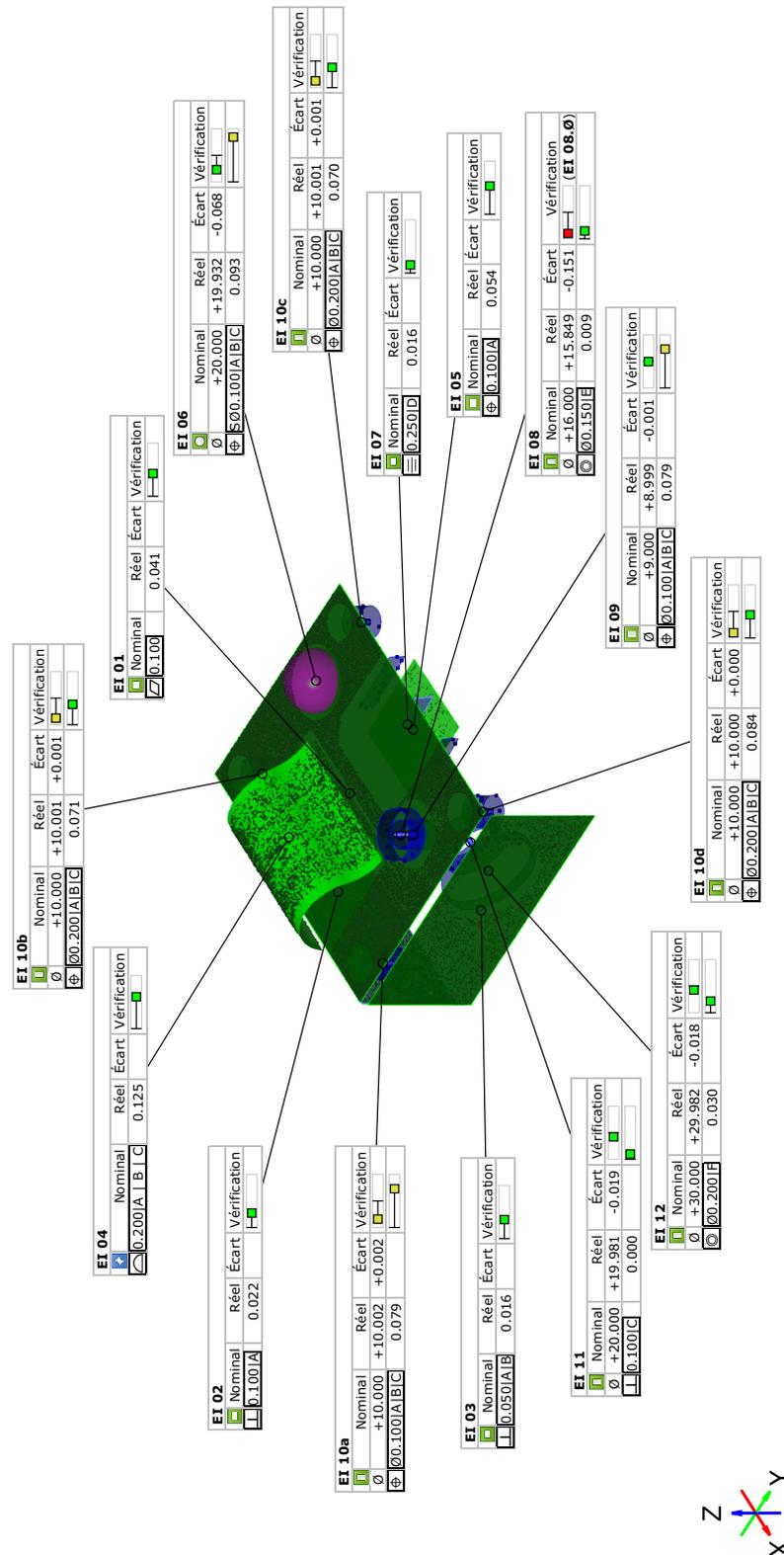


Figure 4.21 – Rapport d'inspection (représentation 3D)

Le nuage de points du capteur laser-plan est dense, bruité, contient des points aberrants et reflète une représentation globale des entités. Afin d'associer un nuage de points représentatif à chaque entité, les opérations suivantes sont effectuées : nettoyage, sup-

pression des points aberrants, filtrage et partition. Dans un premier temps, ces opérations sont réalisées manuellement avec le logiciel *Cloud Compare*®. Leur automatisation pourrait être abordée dans les prochains travaux.

Nous avons montré par la suite la nécessité d'unifier les nuages de points acquis avec les deux capteurs. Une méthode permettant d'exprimer les coordonnées des points dans un seul repère a été proposée. Cette méthode est basée sur la mesure des deux sphères de calibration et le calcul de la translation entre les centres des sphères. Cette méthode a été testée en effectuant une mesure coopérative d'un artefact plan avec les deux capteurs. Les résultats montrent que cette méthode permet l'unification des nuages des points avec une faible erreur de recalage.

Pour pouvoir utiliser les nuages de points des deux capteurs pour évaluer les spécifications, les données de mesure sont fusionnées. Dans ces travaux, les entités ne sont mesurées qu'avec un seul capteur. Ainsi, le processus de fusion est réalisé de manière globale, c'est-à-dire que tous les nuages de points des entités mesurés avec le capteur laser-plan sont fusionnés avec tous les nuages de points des entités mesurés avec le palpeur. Ce processus de fusion est réalisé par une opération d'alignement des trois plans mesurés avec les deux capteurs afin de corriger l'écart entre les nuages de points issus des deux capteurs. Ce processus pourrait être amélioré dans les futurs travaux.

L'évaluation des spécifications associées à chaque entité est réalisée sur les nuages de points correspondants. Les résultats d'évaluation sont comparés aux résultats d'évaluation de référence établis par une mesure avec un palpeur. Les résultats de la démarche proposée sont conformes au rapport d'inspection de référence. Ceci montre la faisabilité de la démarche d'inspection combinant un capteur laser-plan et un palpeur que nous avons proposée.

Nous pouvons souligner que les méthodes que nous avons retenues à chacune des étapes de la démarche globale sont pertinentes et nécessaires. L'aptitude du capteur laser-plan à évaluer les spécifications est montrée à travers l'évaluation des spécifications, dont le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser. L'étape de pré-traitement du nuage de points est ainsi indispensable pour préparer les nuages de points à l'évaluation des spécifications. D'autre part, il est également à noter que l'évaluation des spécifications utilisant des nuages de points des deux capteurs implique nécessairement que les deux données doivent être fusionnées.

Conclusions & Perspectives

Dans un contexte d'inspection dimensionnelle dans laquelle la mesure multi-capteurs est de plus en plus répondeuse, nous avons proposé une démarche combinant un capteur laser-plan avec un palpeur. Le but est de partir du modèle *CAO* de la pièce portant les spécifications ainsi que de la connaissance des performances des deux capteurs pour générer toute la procédure à exécuter qui nous permettra d'obtenir, en sortie, le rapport d'inspection de la pièce. Dans l'approche proposée, la mesure avec le capteur laser-plan est privilégiée afin de profiter de ses avantages et en particulier le gain de temps que cela génère. Dans le cas où les critères de qualité ne permettent pas la mesure avec le capteur laser-plan, la mesure avec le palpeur est alors mise en œuvre. Nous tirons parti ici de l'utilisation d'un scanner *3D* qui est équipé de deux capteurs. L'originalité de notre approche réside dans la manière de générer la gamme d'inspection avec ces deux capteurs de technologie différente.

Afin d'automatiser le processus de planification d'inspection, les données d'inspection sont identifiées à partir du modèle *CAO* de la pièce. Cette analyse basée sur la définition d'entité d'inspection que nous avons introduite, aboutie à la mise en place d'une base de données qui regroupe les entités d'inspection ainsi que l'ensemble de leurs attributs nécessaire au processus d'inspection. En parallèle, les données relatives aux performances des capteurs, évaluées selon le protocole *Qualipso* sont stockées dans une base de données des capteurs. À travers la mise en œuvre de ce protocole, nous obtenons la variation des indicateurs de qualité (bruit et justesse) en fonction de la distance et de l'angle de numérisation, deux paramètres indispensables pour contrôler le capteur laser-plan dans la phase de numérisation et plus particulièrement pour définir la trajectoire de mesure.

La mise en place de la démarche passe par la définition des séquences d'opérations qui sont générées automatiquement en évaluant pour chaque orientation l'aptitude du capteur laser-plan en premier puis celle du palpeur. L'évaluation de l'aptitude est effectuée en termes d'accessibilité, d'absence de collision et d'incertitude que l'on peut raisonnablement associer à la spécification traitée. Pour l'accessibilité, nous nous ap-

puyons sur un ensemble minimal d'orientations pour lesquelles l'accessibilité globale des surfaces avec chaque capteur est vérifiée. Un modèle original basé sur la logique floue est utilisé pour évaluer l'aptitude du capteur laser-plan à mesurer une surface en lien avec les spécifications associées. Les résultats de mesure montrent la pertinence des modèles d'évaluation d'aptitude.

Pour chaque orientation, la trajectoire de chacun des capteurs est définie relativement aux surfaces à mesurer. Dans le cas du capteur laser-plan, nous avons mis en place une méthode de génération de trajectoires basée sur des niveaux de trajectoire pour chaque orientation afin de mesurer les surfaces correspondantes avec une qualité désirée dans un temps de mesure optimal. Ces niveaux de trajectoire, dans lesquels les séquences de points de passage sont défini, sont générés de telle façon à respecter les critères de qualité en termes de distance de numérisation. D'autre part, la trajectoire optimale du palpeur est déterminée pour chaque entité. Afin de réaliser une exécution automatique des trajectoires sur la machine, nous avons défini la trajectoire combinée des deux trajectoires permettant la mesure avec le capteur laser-plan puis la mesure avec le palpeur pour une orientation donnée avant de passer à l'orientation suivante. Un fichier dit "*trajectoire*", compatible avec le langage de commande de la machine, est généré et transmis à la machine pour effectuer la mesure. Partant des bases de données précédemment créées, la planification et l'exécution de la gamme d'inspection sont ainsi automatisées.

Dans ce contexte, le traitement des données issues de la mesure multi-capteurs devient une étape majeure du processus d'inspection. En effet, les nuages de points provenant des deux capteurs sont hétérogènes et exprimés dans deux repères différents. Du fait des différentes caractéristiques des nuages de points, des opérations de traitement sont alors nécessaires. Le nuage de points issu de la mesure avec le capteur laser-plan est nettoyé, filtré, et les points aberrants sont supprimés. Suit ensuite une étape de partitionnement qui aboutit à l'association d'un nuage de point à chaque entité. Une démarche d'unification est ensuite proposée pour exprimer les coordonnées des points des deux capteurs dans le même repère. Afin de pouvoir exploiter les données de mesure avec les deux capteurs pour l'évaluation des spécifications, nous avons mis en place une démarche de fusion globale de données basée sur une opération d'alignement. Cette méthode de fusion simple s'avère pertinente et nous permet de réaliser l'exploitation des données. Enfin, l'évaluation des spécifications est réalisée sur les nuages de points

fusionnés associés à chaque entité. Les résultats d'évaluation démontrent la faisabilité de la démarche d'inspection multi-capteurs que nous proposons.

Les perspectives de ces travaux concernent chacune des étapes de notre approche pour lesquelles des améliorations peuvent être apportées. L'une des perspectives à court terme consiste à finaliser les quelques points manquants pour avoir une automatisation globale de la démarche. Il s'agit ici en particulier de finaliser l'extraction des données depuis le modèle *CAO*. Le concept d'entité d'inspection a été proposé de telle sorte que celui-ci soit avec les formats d'échange de données tels que le format *STEP* avec pour perspective d'automatiser l'opération d'identification des données d'inspection à partir d'un modèle *CAO* de la pièce sous format *STEP*. Pour ce faire, une première amélioration pourrait être de créer un analyseur syntaxique (*en anglais : parser*) qui permet d'extraire les données d'inspection depuis un fichier *STEP* et de les stocker dans la base de données. La base de données peut également être améliorée en intégrant tous les types d'attributs des entités d'inspection que l'on peut trouver dans la norme *ISO*.

L'évaluation des aptitudes des capteurs et la génération de séquences d'opérations sont effectuées au moyen de paramètres et de valeurs seuils. Ces valeurs sont évaluées par des tests d'aptitude des capteurs. Elles peuvent être davantage optimisées et un protocole d'évaluation de ces valeurs peut être envisagé.

Une perspective pourrait être envisager pour réaliser une plateforme logicielle commune pour les deux capteurs afin d'effectuer l'exécution et collecter les résultats de mesure sur la même plateforme. Les opérations de traitement des nuages de points provenant du capteur laser-plan telles que le nettoyage, le filtrage et le partitionnement peuvent être automatisées dans les futurs travaux. Une amélioration des algorithmes de traitement existant dans la littérature est également envisagée pour s'approcher de ce qui est préconisé dans la norme *ISO*. Dans un premier temps, la fusion des données est réalisée par une opération d'alignement de trois plans mesurés avec les deux capteurs. Elle pourra être améliorée en utilisant la méthode du torseur de petits déplacements [Bourdet et al., 1996] pour réaliser un déplacement rigide du nuage de points du capteur laser vers le nuage de points du palpeur.

Sur le long terme, nous proposons deux perspectives :

- L'intégration de nouveaux systèmes de mesure dans la perspective de mesure col-

laborative, tels que des capteurs à grands champs de mesure (type Gom). Cela nécessite la définition de nouveaux indicateurs ou la modification d'indicateurs existants pour la sélection et l'évaluation de l'aptitude des capteurs. De plus, il faut tenir compte des capacités de ces nouveaux capteurs dans le processus de définition de la séquence de mesure. La notion de trajectoire devrait être étudiée à nouveau pour vérifier si elle est valable ou non.

- La prise en compte du procédé de fabrication de la pièce dans le processus d'inspection. Jusqu'à présent, nous ne considérons que le modèle *CAO* de la pièce et les capacités des capteurs, mais pas le processus de fabrication utilisé pour fabriquer la pièce. L'objectif est de réfléchir à l'intérêt de prendre en compte ou non ce paramètre. La connaissance préalable des tendances en termes de déviations géométriques et/ou dimensionnelles du procédé peut guider la réflexion lors de la génération de la gamme de mesure, en particulier dans le cas d'un procédé de fabrication additive avec de fortes déviations des pièces produites. La prise en compte des modèles de déviation de ces pièces pour accentuer la stratégie de mesure pourrait être étudiée.

Bibliographie

- [BS7, 1989] (1989.). Guide to assessment of position, size, and departure from nominal form of geometric features, the minimum number of points.
- [fic, 1998] (1998). *Techniques de mesure sur machines à mesurer tridimensionnelles, transfert d'expériences*. Mouvement français pour la qualité, Métrologie grand sud.
- [Al-Ahmari et al., 2016] Al-Ahmari, A., Nasr, E. A., and Abdulhameed, O. (2016). *Computer-Aided Inspection Planning : Theory and Practice*. CRC Press.
- [Albuquerque et al., 2000] Albuquerque, V. A., Liou, F. W., and Mitchell, O. R. (2000). Inspection point placement and path planning algorithms for automatic cmm inspection. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 13(2) :107–120.
- [Alvarez et al., 2008] Alvarez, B. J., Fernandez, P., Rico, J., Mateos, S., and Suarez, C. M. (2008). Accessibility analysis for automatic inspection in cmms by using bounding volume hierarchies. *International Journal of Production Research*, 46(20) :5797–5826.
- [Anwer and Mathieu, 2016] Anwer, N. and Mathieu, L. (2016). From reverse engineering to shape engineering in mechanical design. *CIRP Annals*, 65(1) :165 – 168.
- [Anwer et al., 2018] Anwer, N., Scott, P. J., and Srinivasan, V. (2018). Toward a classification of partitioning operations for standardization of geometrical product specifications and verification. *Procedia CIRP*, 75 :325 – 330. The 15th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, CIRP CAT 2018, 11-13 June 2018, Milan, Italy.
- [Aslan et al., 1999] Aslan, E., ŞEKER, U., and Alpdemir, N. (1999). Data extraction from cad model for rotational parts to be machined at turning centres. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 23(5) :339–348.
- [Audfray, 2012] Audfray, N. (2012). *Une approche globale pour la metrologie 3D automatique multi-systemes*. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure Paris Saclay.

- [Audfray et al., 2012] Audfray, N., Mehdi-Souzani, C., and Lartigue, C. (2012). Assistance to automatic digitizing system selection for 3d part inspection. In *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design And Analysis*, pages 447–456. American Society of Mechanical Engineers.
- [Beg and Shunmugam, 2002] Beg, J. and Shunmugam, M. S. (2002). An object oriented planner for inspection of prismatic parts – oopipp. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(12) :905–916.
- [Bernard et al., 2007] Bernard, A., Laroche, F., Ammar-Khodja, S., and Perry, N. (2007). Impact of new 3d numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1) :143 – 148.
- [Bhandarkar and Nagi, 2000] Bhandarkar, M. P. and Nagi, R. (2000). Step-based feature extraction from step geometry for agile manufacturing. *Computers in Industry*, 41(1) :3 – 24.
- [Boeckmans et al., 2015] Boeckmans, B., Welkenhuyzen, F., Zhang, M., and Kruth, J.-P. (2015). Determination of aspect ratio limitations, accuracy and repeatability of a laser line scanning cmm probe. *International Journal of Automation Technology*, 9(5) :466–472.
- [Boeckmans et al., 2014] Boeckmans, B., Zhang, M., Welkenhuyzen, F., Dewulf, W., and Kruth, J.-P. (2014). Comparison of aspect ratio, accuracy and repeatability of a laser line scanning probe and a tactile probe. In *10th IMEKO Symposium : Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry (LMPMI) 2014*.
- [Bourdet et al., 1996] Bourdet, P., Mathieu, L., Lartigue, C., and Ballu, A. (1996). The concept of the small displacement taylor in metrology. *Series on advances in Mathematics for Applied Sciences*, 40 :110–122.
- [Bourdet et al., 2005] Bourdet, P., Thiébaud, F., Lartigue, C., and Breteau, P. (2005). Evaluation des performances la mesure par capteur optique sur machine à mesurer tridimensionnelle. *Actes de : 12ème Congrès International de Métrologie*, pages 183–189.

- [Chavanne, 2011] Chavanne, R. (2011). *Contribution au tolérancement fonctionnel 3D des mécanismes complexes : synthèse des spécifications et analyse de tolérances*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [Cho et al., 2005] Cho, M.-W., Lee, H., Yoon, G.-S., and Choi, J. (2005). A feature-based inspection planning system for coordinate measuring machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(9) :1078–1087.
- [Cho et al., 2004a] Cho, M.-W., Lee, H., Yoon, G.-S., and Choi, J.-H. (2004a). A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement — part ii : Local inspection planning —. *KSME International Journal*, 18(8) :1358–1367.
- [Cho et al., 2004b] Cho, M.-W., Lee, H., Yoon, G.-S., and Choi, J.-H. (2004b). A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement—part ii : Local inspection planning—. *KSME international journal*, 18(8) :1358–1367.
- [Colosimo et al., 2015] Colosimo, B. M., Pacella, M., and Senin, N. (2015). Multisensor data fusion via gaussian process models for dimensional and geometric verification. *Precision Engineering*, 40 :199 – 213.
- [Contri et al., 2002] Contri, A., Bourdet, P., and Lartigue, C. (2002). Quality of 3d digitised points obtained with non-contact optical sensors. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1) :443 – 446.
- [Demarsin et al., 2007] Demarsin, K., Vanderstraeten, D., Volodine, T., and Roose, D. (2007). Detection of closed sharp edges in point clouds using normal estimation and graph theory. *Computer-Aided Design*, 39(4) :276 – 283.
- [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.
- [Devireddy, 1999] Devireddy, C. R. (1999). Feature-based modelling and neural networks-based capp for integrated manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 12(1) :61–74.

- [Elkott et al., 2002] Elkott, D. F., Elmaraghy, H. A., and Elmaraghy, W. H. (2002). Automatic sampling for cmm inspection planning of free-form surfaces. *International Journal of Production Research*, 40(11) :2653–2676.
- [Gelfand and Guibas, 2004] Gelfand, N. and Guibas, L. J. (2004). Shape segmentation using local slippage analysis. In *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIG-GRAPH symposium on Geometry processing*, pages 214–223. ACM.
- [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) :1787–1799.
- [Gestel et al., 2009] Gestel, N. V., Cuyppers, S., Bleys, P., and Kruth, J.-P. (2009). A performance evaluation test for laser line scanners on cmms. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3) :336 – 342. Optical Measurements.
- [Han et al., 2018] Han, Z., Liu, S., Li, X., Wang, Y., Zhang, X., and Zhang, G. (2018). Path planning method for intelligent cmms based on safety and the high-efficiency principle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9) :4003–4012.
- [Han et al., 2017] Han, Z., Liu, S., Yu, F., Zhang, X., and Zhang, G. (2017). A 3d measuring path planning strategy for intelligent cmms based on an improved ant colony algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1) :1487–1497.
- [He et al., 2018] He, G., Sang, Y., Pang, K., and Sun, G. (2018). An improved adaptive sampling strategy for freeform surface inspection on cmm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1) :1521–1535.
- [Hoppe et al., 1992] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W. (1992). *Surface reconstruction from unorganized points*, volume 26. ACM.
- [Huang and Menq, 2001] Huang, J. and Menq, C.-H. (2001). Automatic data segmentation for geometric feature extraction from unorganized 3-d coordinate points. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3) :268–279.

- [Hwang et al., 2004] Hwang, C.-Y., Tsai, C.-Y., and Chang, C. A. (2004). Efficient inspection planning for coordinate measuring machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(9) :732–742.
- [J. M. Hammersley, 1964] J. M. Hammersley, D. H. (1964). Monte carlo methods. *Wiley*, pp. 25–42.
- [Kamrani et al., 2015] Kamrani, A., Abouel Nasr, E., Al-Ahmari, A., Abdulhameed, O., and Mian, S. H. (2015). Feature-based design approach for integrated cad and computer-aided inspection planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9) :2159–2183.
- [Kim et al., 2001] Kim, Y. S., Wang, E., and Rho, H. M. (2001). Geometry-based machining precedence reasoning for feature-based process planning. *International Journal of Production Research*, 39(10) :2077–2103.
- [Kiraci et al., 2016] Kiraci, E., Turley, G. A., Attridge, A., Olifent, A., and Williams, M. A. (2016). Evaluating the capability of laser scanning to measure an automotive artefact : a comparison study of touch trigger probe and laser-scanning. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 18(4) :440–455.
- [Kovac et al., 2013] Kovac, P., Rodic, D., Pucovsky, V., Savkovic, B., and Gostimirovic, M. (2013). Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(4) :755–762.
- [Kweon and Medeiros, 1998] Kweon, S. and Medeiros, D. (1998). Part orientations for cmm inspection using dimensioned visibility maps. *Computer-Aided Design*, 30(9) :741 – 749.
- [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*, pages 220–227.

- [Lee et al., 1997] Lee, G., MOU, J., and Shen, Y. (1997). Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(7) :917 – 934.
- [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 et al., 2007] Lee, H. C., Jhee, W. C., and Park, H.-S. (2007). Generative {CAPP} through projective feature recognition. *Computers & Industrial Engineering*, 53(2) :241 – 246. Selected Papers from The 27th. International Conference on Computers & Industrial Engineering - Part 2.
- [Li et al., 2018] Li, B., Feng, P., Zeng, L., Xu, C., and Zhang, J. (2018). Path planning method for on-machine inspection of aerospace structures based on adjacent feature graph. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 54 :17 – 34.
- [Loriot, 2009] Loriot, B. (2009). *Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D*. PhD thesis, Université de Bourgogne.
- [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.
- [Martinez et al., 2010a] Martinez, S., Cuesta, E., Barreiro, J., and Álvarez, B. (2010a). Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5) :621–629.
- [Martinez et al., 2010b] Martinez, S., Cuesta, E., Barreiro, J., and Alvarez, B. (2010b). Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(12) :1238 – 1246.
- [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.

- [Mehdi-Souzani, 2006] Mehdi-Souzani, C. (2006). *Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité*. PhD thesis, École Normale Supérieure Paris Saclay.
- [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., Thiébaud, 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.
- [Mian and Al-Ahmari, 2014] Mian, S. H. and Al-Ahmari, A. (2014). Enhance performance of inspection process on coordinate measuring machine. *Measurement*, 47 :78 – 91.
- [Mian and Al-Ahmari, 2017] Mian, S. H. and Al-Ahmari, A. M. (2017). Application of the sampling strategies in the inspection process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 231(4) :565–575.
- [Mohib et al., 2009] Mohib, A., Azab, A., and ElMaraghy, H. (2009). Feature-based hybrid inspection planning : A mathematical programming approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(1) :13–29.
- [Nasr and Kamrani, 2006] Nasr, E. S. A. and Kamrani, A. K. (2006). A new methodology for extracting manufacturing features from {CAD} system. *Computers & Industrial Engineering*, 51(3) :389 – 415. Special Issue on Selected Papers from the 34th. International Conference on Computers and Industrial Engineering (ICC&IE).
- [Petit, 2004] Petit, J.-P. (2004). *Spécification Géométrique des produits : méthode d'analyse de tolérances. Application en conception assistée par ordinateur*. PhD thesis, Université de Savoie.
- [Phan, 2019] Phan, N. D. M. (2019). *Adaptive scanning strategies for on-machine part inspection*. Theses, Université Paris-Saclay.

- [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, 2000] Prieto, F. (2000). *Métrieologie assistée par ordinateur : apport des capteurs 3D sans contact*. PhD thesis, École de technologie supérieure.
- [Prieto et al., 2002] Prieto, F., Redarce, T., Lepage, R., and Boulanger, P. (2002). An automated inspection system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(12) :917–925.
- [Rak, 2016] Rak, M. B. (2016). *Fusion of high density low precision and low density high precision data in coordinate metrology*. PhD thesis, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- [Rak et al., 2016] Rak, M. B., Wozniak, A., and Mayer, J. (2016). The use of low density high accuracy (ldha) data for correction of high density low accuracy (hdla) point cloud. *Optics and Lasers in Engineering*, 81 :140 – 150.
- [Sadaoui, 2016] Sadaoui, S. E. (2016). Dimensional inspection - combining a touch probe and laser sensor for geometrical specification verification. Master’s thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [Saunders et al., 2014] Saunders, P., Wilson, A., Orchard, N., Tatman, N., and Maropoulos, P. (2014). An exploration into measurement consistency on coordinate measuring machines. *Procedia CIRP*, 25 :19 – 26. 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution.
- [Savio et al., 2007] Savio, E., De Chiffre, L., and Schmitt, R. (2007). Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56(2) :810–835.
- [Schnabel et al., 2007] Schnabel, R., Wahl, R., and Klein, R. (2007). Efficient ransac for point-cloud shape detection. In *Computer graphics forum*, volume 26, pages 214–226. Wiley Online Library.

- [Senin et al., 2012] Senin, N., Blunt, L. A., and Tolley, M. (2012). Dimensional metrology of micro parts by optical three-dimensional profilometry and areal surface topography analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 226(11) :1819–1832.
- [Stojadinovic et al., 2016a] Stojadinovic, S. M., Majstorovic, V. D., Durakbasa, N. M., and Sibalija, T. V. (2016a). Ants colony optimisation of a measuring path of prismatic parts on a cmm. *Metrology and Measurement Systems*, 23(1) :119–132.
- [Stojadinovic et al., 2016b] Stojadinovic, S. M., Majstorovic, V. D., Durakbasa, N. M., and Sibalija, T. V. (2016b). Towards an intelligent approach for {CMM} inspection planning of prismatic parts. *Measurement*, 92 :326 – 339.
- [Sugeno and Kang, 1988] Sugeno, M. and Kang, G. (1988). Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, 28(1) :15 – 33.
- [Vafaeseefat and Elmaraghy, 2000] Vafaeseefat, A. and Elmaraghy, H. A. (2000). Automated accessibility analysis and measurement clustering for cmms. *International Journal of Production Research*, 38(10) :2215–2231.
- [Wang et al., 2015] Wang, J., Leach, R. K., and Jiang, X. (2015). Review of the mathematical foundations of data fusion techniques in surface metrology. *Surface Topography : Metrology and Properties*, 3(2) :023001.
- [Weckenmann et al., 2009] Weckenmann, A., Jiang, X., Sommer, K.-D., Neuschaefer-Rube, U., Seewig, J., Shaw, L., and Estler, T. (2009). Multisensor data fusion in dimensional metrology. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, 58(2) :701 – 721.
- [Wong et al., 2005] Wong, F. S. Y., Chuah, K. B., and Venuvinod, P. K. (2005). Automated extraction of dimensional inspection features from part computer-aided design models. *International Journal of Production Research*, 43(12) :2377–2396.
- [Yau and Menq, 1995] Yau, H.-T. and Menq, C.-H. (1995). Automated cmm path planning for dimensional inspection of dies and molds having complex surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(6) :861 – 876.

- [Yi et al., 2014] Yi, B., Liu, Z., Tan, J., Cheng, F., Duan, G., and Liu, L. (2014). Shape recognition of cad models via iterative slippage analysis. *Computer-Aided Design*, 55 :13 – 25.
- [Yu et al., 2013] Yu, M., Zhang, Y., Li, Y., and Zhang, D. (2013). Adaptive sampling method for inspection planning on cmm for free-form surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9) :1967–1975.
- [Yuen et al., 2003] Yuen, C., Wong, S., and Venuvinod, P. K. (2003). Development of a generic computer-aided process planning support system. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1–3) :394 – 401. {IMCC2000} Vol. 2 S.I.
- [Yuewei et al., 2010] Yuewei, B., Shuangyu, W., Kai, L., and Xiaogang, W. (2010). A strategy to automatically planning measuring path with cmm offline. In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, pages 3064–3067.
- [Zadeh, 1975] Zadeh, L. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—i. *Information Sciences*, 8(3) :199 – 249.
- [Zahmati et al., 2018] Zahmati, J., Amirabadi, H., and Mehrad, V. (2018). A hybrid measurement sampling method for accurate inspection of geometric errors on freeform surfaces. *Measurement*, 122 :155 – 167.
- [Zhao et al., 2013] Zhao, H., Anwer, N., and Bourdet, P. (2013). Curvature-based registration and segmentation for multisensor coordinate metrology. *Procedia CIRP*, 10 :112 – 118. The Twelfth CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing.
- [Zhao et al., 2012] Zhao, H., Kruth, J.-P., Gestel, N. V., Boeckmans, B., and Bleys, P. (2012). Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe. *Measurement*, 45(5) :1057 – 1066.
- [Zhao et al., 2017] Zhao, Y., Wang, Z., Fu, L., Qu, X., Zhang, H., and Liu, C. (2017). A new method for registration of heterogeneous sensors in a dimensional measurement system. *Measurement Science and Technology*, 28(10) :105012.
- [Zhao, 2009] Zhao, Y. F. (2009). *An Integrated Process Planning System for Machining and Inspection*. Theses, University of Auckland.

[Zuquete Guarato, 2013] Zuquete Guarato, A. (2013). *3D Metrology of parts with complex shapes by optical sensors : An application for crankshaft balancing*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.

[Zuquete-Guarato et al., 2012] Zuquete-Guarato, A., Mehdi-Souzani, C., Quinsat, Y., Lartigue, C., and Sabri, L. (2012). Towards a new concept of in-line crankshaft balancing by contact less measurement : process for selecting the best digitizing system. In *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, pages 17–25. American Society of Mechanical Engineers.

Annexe

A

**Caractéristiques techniques des
capteurs et de la cellule de mesure**

Les équipements de mesure sont placés dans une salle de mesure (cellule de mesure) où la température et l'humidité sont contrôlées et surveillées (Figure. A.1). L'humidité est d'environ 50% avec une variation de $\pm 5\%$. Alors que la température est fixée à la température de référence de 20°C avec $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de variation. L'incertitude de mesure due aux variations des conditions environnementales peut être négligée devant les autres sources d'incertitude.



Figure A.1 – Cellule de mesure.

Généralement, un système de mesure $3D$ comprend un système d'acquisition (ou capteurs) afin d'acquérir des données de mesure, un système de déplacement (ou porteur) pour déplacer les capteurs et un système de traitement permettant d'obtenir les résultats de mesure à partir des données mesurées. Une machine à mesurer tridimensionnelle (*MMT*) de marque *SEIV Renault*, comprenant 3 guidages en translation orthogonaux (X , Y et Z), est utilisée comme système de déplacement. Elle peut intégrer des capteurs sans contact ou des capteurs à contact comme des systèmes d'acquisition grâce à une tête motorisée *Renishaw PH10*.

Nous utilisons un scanner $3D$, comprenant deux types de capteurs, un capteur laser-plan et un palpeur. Le scanner est monté sur une tête pivotante indexée motorisée (*Renishaw PH10*) de la machine *MMT* (Figure. A.2(a)). La tête pivotante tourne autour de deux axes, A (axe horizontal) et B (axe vertical) (Figure. A.2(b)). A varie entre 0° et 105° avec un pas de 7.5° alors que B varie entre -180° et 180° avec un pas de 7.5° . Les orientations du scanner sont définies par rapport aux deux angles A et B . Le centre de rotation de la tête pivotante définit le centre de rotation des capteurs.

Le capteur laser-plan utilisé (*Kreon Aquilon KA50*) est le capteur le plus perfor-

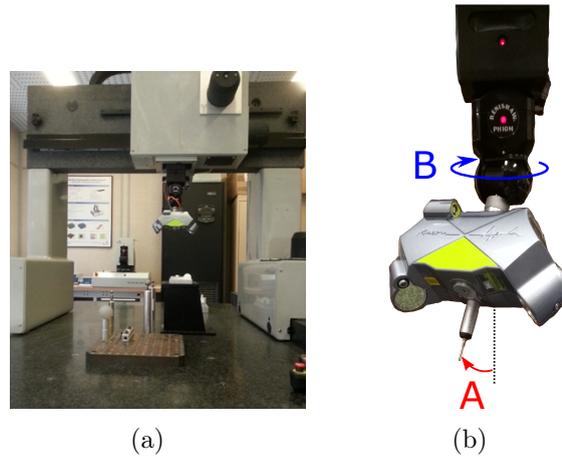


Figure A.2 – (a) *MMT*; (b) Scanner 3D composé d'un capteur laser-plan et un capteur à contact.

mant de la gamme *Kreon*, conçu pour répondre aux applications industrielles exigeantes telles que l'analyse dimensionnelle, le contrôle qualité, le prototypage rapide, la rétro-conception et l'acquisition des surfaces. Il intègre deux caméras permettant un balayage maximal de la surface. Les logiciels et contrôleurs suivants sont utilisés avec ce capteur : *Metrolog*, *ArcoCAD*, *Capps*, *DMIS*, *Metrologic*, *Renishaw*, *Pantec*. Les spécifications techniques sont les suivantes :

- Vitesse maximale : 1 000 000 Points/seconde
- Longueur maximale de la ligne laser : 50mm ;

Les caractéristiques techniques du scanner ainsi que ses caractéristiques quand il est monté sur une machine sont présentées dans le Tableau. A.1 et Tableau. A.2. Ces caractéristiques sont extraites de la fiche technique fournie par le constructeur *Kreon*. Les valeurs sont données selon la norme EN/ISO 10360-2 ou VDI 2617 part 6.2 pour une *MMT* avec une précision de $2.5 \mu\text{m} + L/350$ ou supérieur.

Le scanner peut intégrer un palpeur avec le capteur laser-plan sans démonter ce dernier. Un palpeur *TP2* est intégré sur le scanner. Il est caractérisé par une longueur du stylet de 20mm et un diamètre de la bille de 2mm .

Deux contrôleurs, de type *Kreon* et *Renishaw*, sont utilisés pour envoyer les ordres de mesure et recevoir les signaux de mesure des deux logiciels associés respectivement au capteur laser-plan et au palpeur. Le contrôleur *Renishaw* permet également de gérer les ordres de mouvements de la machine *MMT* via le serveur (*UCCserver*). En ce

Tableau A.1 – Caractéristiques du scanner.

Caractéristique	Valeur
Résolution de ligne	25 μm
Distance morte	60 mm
Profondeur du champ	75 mm
Compensation de température	Oui
Fréquence max	500 Hz
Erreur de palpation	5 μm
Test multi-orientation	15 μm

Tableau A.2 – Caractéristiques sur machine.

Caractéristique	Description
Interface machine	Bras articulés, CNC, Machine outils, MMT manuelles et pilotées
Compatibilité du palpeur sous le scanner	Palpeur rigide, Renishaw TP2/20/200
Compatibilité Renishaw	MIH,PH10T, PH10M, Mq Multiwire et IS1-2
Connexion PC	USB

qui concerne les logiciels, la mesure avec le capteur laser-plan est gérée par le logiciel *Polygonia (Kreon)* et celle avec le palpeur est gérée par *Modus (Renishaw)*.

Annexe

B

Qualification des capteurs

Le scanner 3D est composé d'un capteur laser-plan et un palpeur. Selon un protocole d'évaluation des performances des capteurs optiques (*Qualipso*) développé au laboratoire [Audfray, 2012], nous nous sommes intéressés en premier lieu à la caractérisation de la fenêtre de mesure (*Field of View FOV*) ainsi que ses dimensions. Des indicateurs de qualité tels que le bruit et la justesse puis les erreurs de changement d'orientation et de remise en position du capteur sont ensuite évaluées.

Le capteur à contact est un palpeur à déclenchement *TP2*. La qualification de la performance du palpeur s'effectue par évaluation de la répétabilité de mesure dans les différentes directions de déclenchement.

B.1 Caractérisation de la fenêtre de mesure *FOV* du capteur laser-plan

Le but de cette section est de déterminer les dimensions de la *FOV*, puis de caractériser l'anisotropie de la fenêtre de mesure qui est généralement due à l'anisotropie des caméras *CCD* (*Charge Coupled Device*).

La conception du capteur est telle que celui-ci est incliné d'un angle γ constant par rapport à l'axe *Z* de la *MMT* (Figure. B.1(a)), ce qui conduit à l'inclinaison de la ligne laser dans la fenêtre de mesure (Figure. B.1(b)). Afin de déterminer la valeur de l'angle d'inclinaison, des cales étalons sont intercalées au-dessous d'une règle Sinus comme le montre la Figure. B.1(a). L'angle γ est obtenu lorsque la ligne laser devient horizontale dans la fenêtre de mesure ; il est calculé selon la formule suivante :

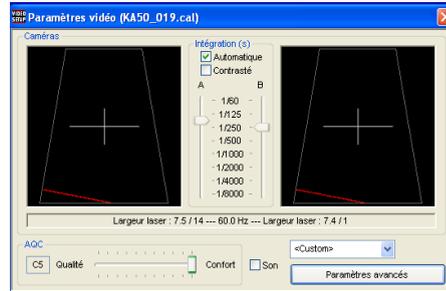
$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{h}{l}\right) \quad (\text{B.1})$$

Où : $l = 200\text{mm}$ est la longueur de la règle sinus, et h la hauteur de la cale étalon qui correspond à une ligne laser horizontale dans la fenêtre de mesure. Pour notre étude $h = 38.6\text{mm}$, ce qui correspond à un angle $\gamma = 11.13^\circ$. Cette inclinaison est caractéristique du capteur, indépendamment de la configuration capteur /pièce.

Pour déterminer la hauteur de la fenêtre de mesure, nous déplaçons la ligne laser dans les limites de la fenêtre de mesure. Dans un premier temps, la ligne est en bas de la fenêtre (Figure. B.2(a)), ce qui correspond à une altitude $Z_1 = -319.114$. En déplaçant le capteur vers le haut, la ligne laser se déplace aussi jusqu'à la limite supérieure de la



(a) Angle d'inclinaison du capteur dans l'espace de travail



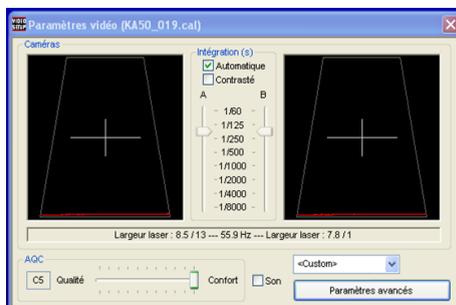
(b) Inclinaison de la ligne laser dans la fenêtre de mesure

Figure B.1 – Inclinaison γ du capteur.

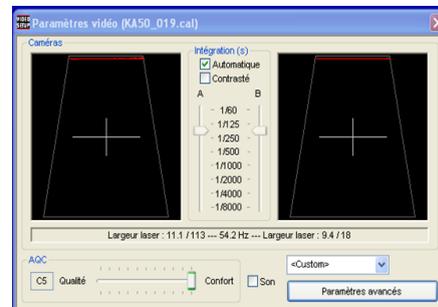
fenêtre (Figure. B.2(b)), cette configuration correspond à une altitude $Z_2 = -361.802$. Le déplacement du capteur selon l'axe Z est alors la différence des deux altitudes $H' = Z_1 - Z_2 = 42.688mm$. La hauteur de la fenêtre H est calculé suivant la formule :

$$H = H' . \cos(\gamma) = 41.87mm \quad (B.2)$$

Étant donnée l'inclinaison de la ligne laser dans la fenêtre de mesure, nous proposons de réduire la hauteur de la fenêtre à $L = 39mm$ pour s'assurer que la ligne laser appartienne complètement à la fenêtre de mesure. La distance de numérisation est définie comme la distance entre le centre de rotation du capteur et la surface à numériser. Pour que la réflexion de la ligne laser soit visible par le capteur laser-plan, cette distance de numérisation d doit être dans un intervalle $[d_{min}, d_{max}]$ (Figure. B.3).



(a) Ligne laser en bas de la fenêtre de mesure



(b) Ligne laser en haut de la fenêtre de mesure

Figure B.2 – Ligne laser le long de la fenêtre de mesure.

Selon le protocole *QualiPSO* [Audfray, 2012], la caractérisation de l'anisotropie de la fenêtre de mesure consiste à visualiser l'allure générale des écarts géométriques des

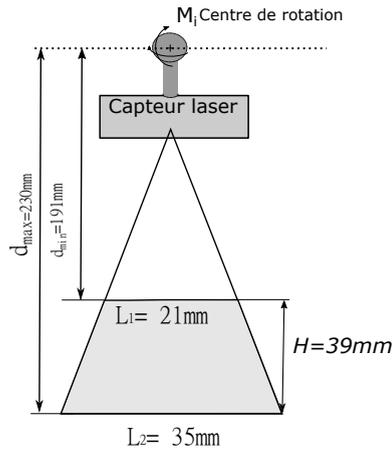


Figure B.3 – Dimensions de la fenêtre de mesure et les distances de numérisation..

points numérisés dans différentes positions de la fenêtre de mesure.

Le capteur est mis en position fixe. En déplaçant une surface plane le long de la fenêtre de mesure (par ajout des cales-étalons, Figure. B.4(a)), dix lignes sont numérisées (Figure. B.4(b)). Un plan des moindres carrés a été associé à l'ensemble des lignes numérisées. La visualisation des écarts des nuages de points par rapport à ce plan montre l'anisotropie de la fenêtre (Figure. B.4(b)). Les écarts de forme obtenus sont dûs principalement à la calibration interne du capteur, il peut attendre jusqu'à $20\mu m$ sur les bords de la fenêtre de mesure.

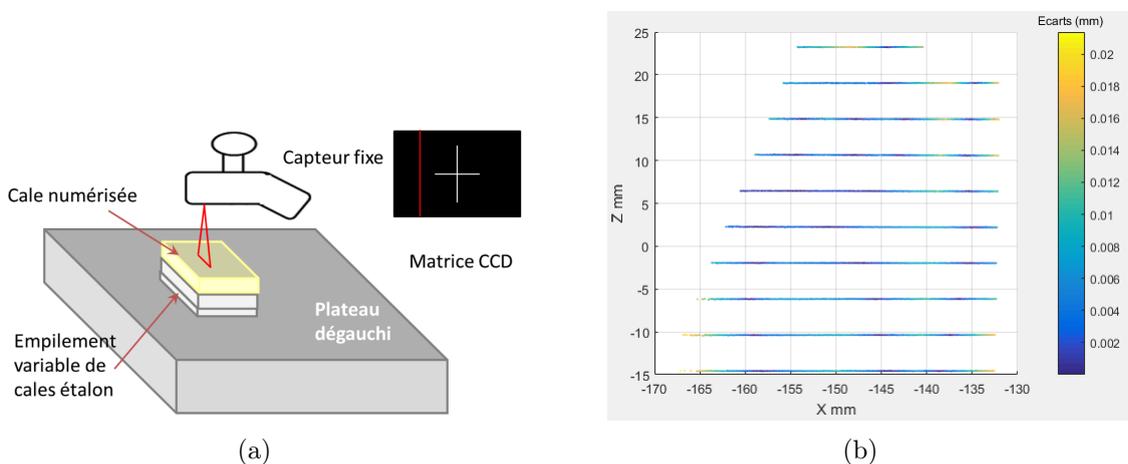


Figure B.4 – (a) Caractérisation de la fenêtre de mesure [Audfray, 2012]; (b) : Profil de la fenêtre de mesure dans le plan XoZ.

B.2 Évaluation du bruit et de justesse de mesure du capteur laser-plan

B.2.1 Évaluation du bruit

Comme le bruit de numérisation ne fait pas l'objet d'une norme, un indicateur δ a été proposé [Audfray, 2012]. Il permet d'évaluer la dispersion des points numérisés par rapport à un élément théorique, généralement un plan (Figure. B.5) :

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)^2} \quad (\text{B.3})$$

Où ; e_i sont les écarts des points par rapport à l'élément théorique associé, \bar{e}_i est la moyenne des écarts, n est le nombre de points et k est un facteur d'élargissement (généralement égal à 1). Dans le cas d'une association d'un plan avec le critère des moindres carrés, \bar{e}_i est nulle.

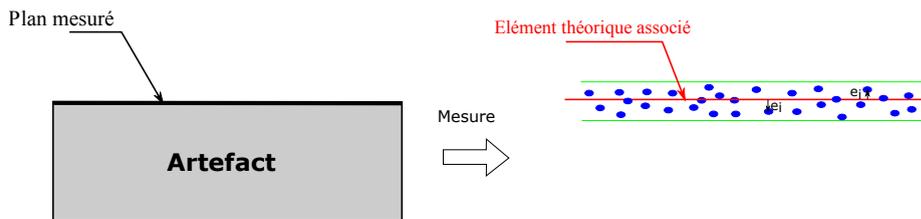


Figure B.5 – Évaluation du bruit de mesure.

Le bruit de numérisation dépend fortement de la stratégie de numérisation en particulier de la distance et de l'angle de numérisation. Le protocole QualiPSO a été mis en œuvre avec différentes configurations afin d'évaluer l'influence de la distance et de l'angle de numérisation sur le bruit.

En gardant le même angle de numérisation, et en déplaçant le capteur pour modifier la distance de numérisation le long de la fenêtre de mesure, nous obtenons les résultats d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation reportés en Figure. B.6.

Afin d'évaluer le bruit en fonction de l'angle de numérisation, le bruit a été évalué en modifiant l'angle de numérisation et en gardant une distance de numérisation fixe (celle qui présente un minimum de bruit). Les résultats d'évaluation du bruit en fonction de l'angle de numérisation sont reportés dans la Figure. B.7.

Les résultats obtenus mettent en avant que le bruit est plus faible pour une distance de numérisation qui correspond au milieu de la fenêtre de mesure par rapport au bruit

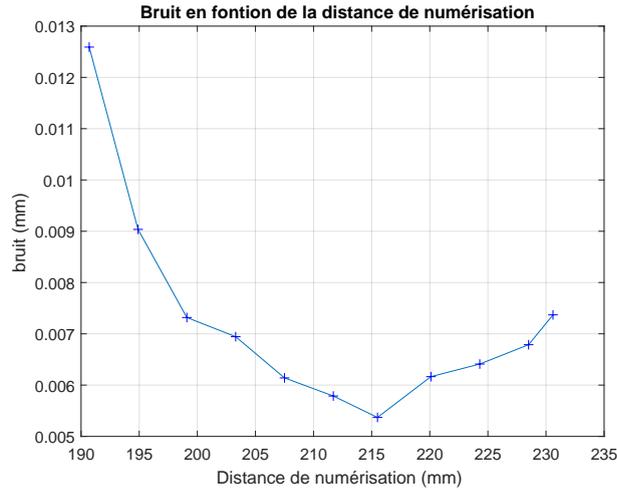


Figure B.6 – Bruit en fonction de distance de numérisation.

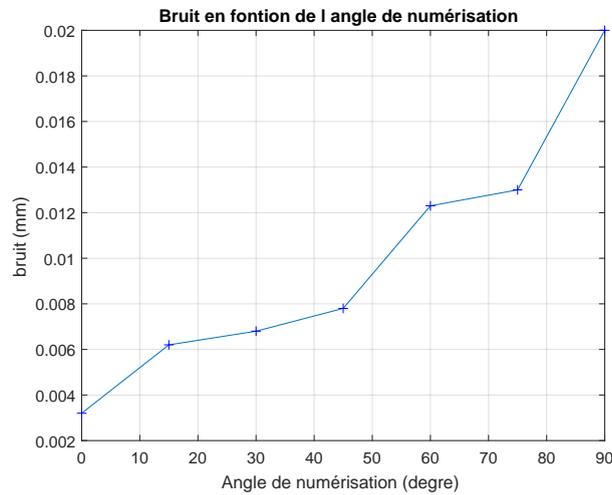


Figure B.7 – Bruit en fonction de l'angle de numérisation.

obtenu pour une distance de numérisation qui correspond aux bords de la fenêtre. Avec la même distance de numérisation, plus l'angle augmente, plus le bruit est important.

B.2.2 Évaluation de la justesse

La justesse de mesure est évaluée par la mesure d'une distance connue entre deux éléments, l'erreur de justesse étant définie par la différence entre la valeur mesurée et la valeur considérée comme vraie de cette distance. Dans le cas d'une mesure d'une distance entre deux plans, la justesse est définie comme suit (Figure. B.8) :

$$e = \frac{h_1 + h_2}{2} - h_0 = \frac{1}{2} \cdot (\|\overrightarrow{A_1 A_2} \cdot \overrightarrow{N_1}\| + \|\overrightarrow{A_2 A_1} \cdot \overrightarrow{N_2}\|) - h_0 \quad (\text{B.4})$$

Où ; A_1 est le barycentre du nuage de points du plan 1, A_2 est le barycentre du nuage de points du plan 2, N_1 est la normale du plan des moindres carrés associé au nuage de points du plan 1, N_2 est la normale du plan des moindres carrés associé au nuages de point du plan 2 et h_0 est la distance de référence (certifiée).

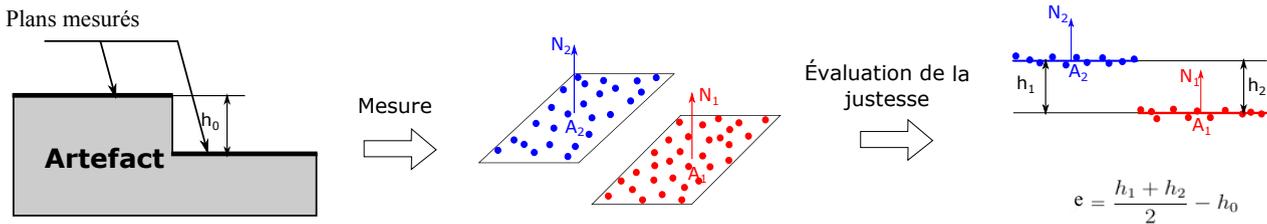


Figure B.8 – Calcul des défauts de justesse sur une hauteur de marche.

La justesse a été évaluée en fonction de la distance de numérisation par rapport au plan inférieur (Figure. B.9(a)). Le test d'évaluation est réalisé sur deux marches certifiées de hauteur $H_1 = 4.99996mm$ et $H_2 = 19.99994mm$. Les résultats de la Figure. B.9(b) montrent que l'erreur de justesse peut atteindre jusqu'à $20\mu m$. Elle est minimale à une distance de numérisation optimale.

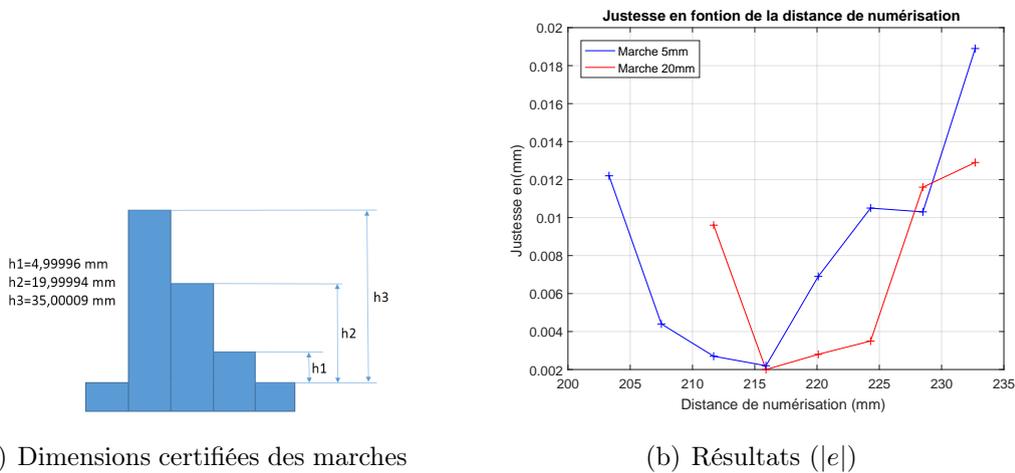


Figure B.9 – Justesse en fonction de la distance de numérisation sur une marche de 5 et $20mm$.

Dans son travail, [Audfray, 2012] a proposé une évaluation de la justesse dite relative sur un artefact de référence. Elle est évaluée comme la différence entre la position calculée d'une surface numérisée et sa position théorique. Dans les calculs de la justesse relative, le plan numérisé à une distance optimale qui correspond au milieu de la fenêtre de mesure

a été choisi comme plan de référence, car le bruit est minimal dans cette configuration. Les résultats sont reportés dans la Figure. B.10.

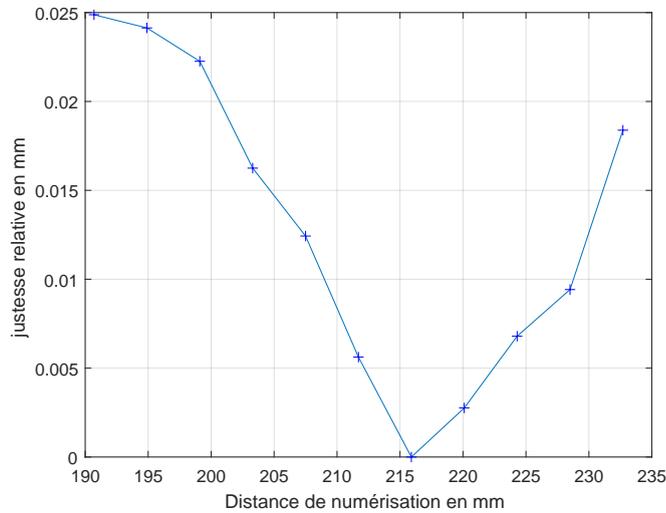


Figure B.10 – Justesse relative ($|e|$) en fonction de la distance de numérisation.

En conclusion de cette partie de l'évaluation du bruit et de la justesse, nous proposons de mesurer avec une configuration où la ligne laser est placée au milieu de la fenêtre de mesure et le faisceau laser est perpendiculaire à la surface à mesurer (angle de numérisation faible) afin d'avoir de meilleures performances de mesure.

B.3 Évaluation des erreurs de remise en position et de changement d'orientations du capteur laser-plan

D'autres indicateurs de performance ont été étudiés tels que l'évaluation de l'erreur de remise en position du capteur. Cette erreur caractérise le défaut de recalage des nuages de points mesurés avec la même orientation, mais une remise en position du capteur est effectuée entre deux numérisations successives sans effectuer une nouvelle calibration. Pour évaluer ce défaut, la sphère d'étalonnage a été numérisée dix fois dans une orientation calibrée, puis dix fois en ayant réalisé une première remise en position du capteur, et enfin dix fois en ayant réalisé une seconde remise en position (Figure. B.11(a)). Pour chaque numérisation, une sphère des moindres carrés est associée.

Le barycentre C_{moy} des dix premières sphères est évalué. Les distances entre les centres des sphères pour chaque numérisation et le barycentre C_{moy} sont ensuite calculées (Figure. B.11(b)). Les résultats montrent que les erreurs de remise en position peuvent

atteindre jusqu'à $12\mu m$. La répétabilité pour une orientation (écart type $\sigma = 0.001mm$ des distances calculées pour une seule orientation) est faible par rapport à celle pour les trois orientations ensemble (écart type $\sigma = 0.004mm$ de toutes les distances).

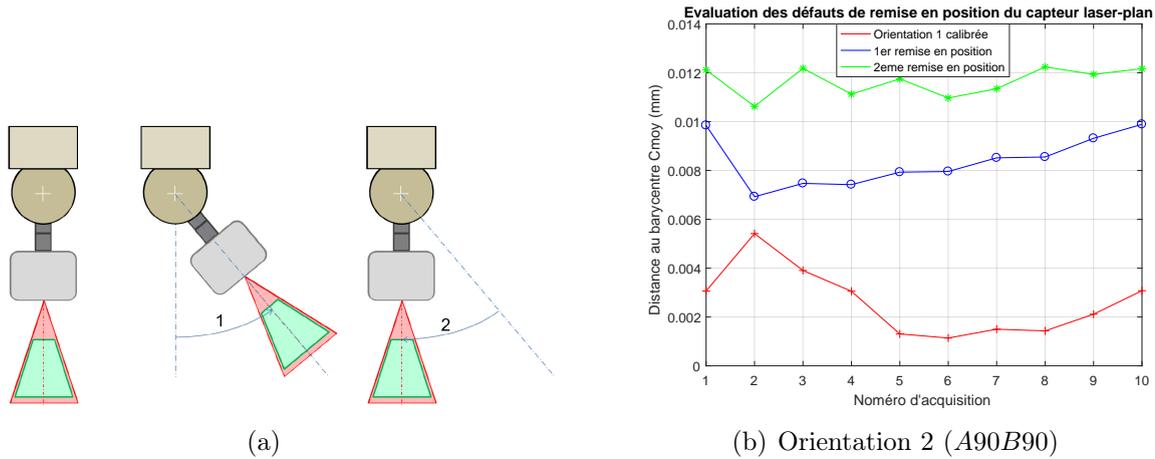


Figure B.11 – (a) Remise en position du capteur laser-plan [Audfray, 2012]; (b) Résultats d'évaluation des erreurs de remises en position.

L'erreur de changement d'orientations représente l'erreur de calibration externe qui caractérise les erreurs causées par l'utilisation de plusieurs orientations lors de la mesure d'un même élément de référence. La sphère d'étalonnage a été mesurée cinq fois pour chacune des trois orientations du capteur (Figure. B.12), chaque orientation étant calibrée. Les distances entre chaque centre de sphères calculé au barycentre des cinq premières acquisitions sont calculées (Figure. B.13). Les résultats montrent que les erreurs de changement d'orientations peuvent atteindre jusqu'à $20\mu m$.

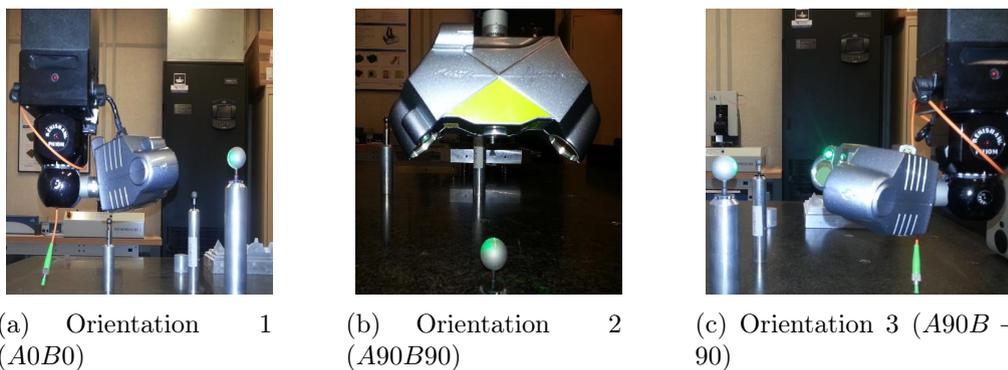


Figure B.12 – Configurations du capteur pour l'évaluation des erreurs de changement d'orientations.

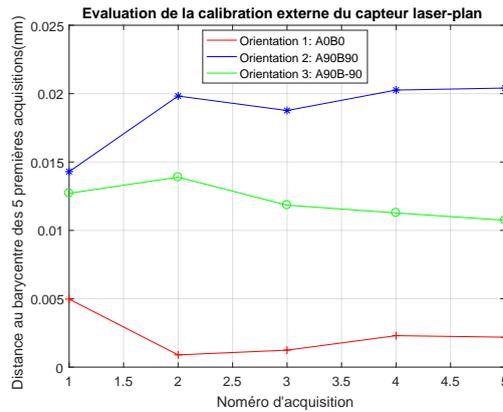


Figure B.13 – Évaluation des erreurs de changement d’orientations du capteur laser-plan.

Ces deux erreurs dues au changement d’orientation et de remise en position du capteur sont significatives. Par conséquent, limiter le nombre d’orientations des capteurs dans la planification de la gamme d’inspection est à prendre en compte pour améliorer la qualité de mesure.

B.4 Évaluation des performances du palpeur à contact

L’évaluation des performances du capteur à contact consiste principalement à évaluer la répétabilité. Cette évaluation a été effectuée dans les trois directions d’accostage X, Y et Z. Le même point a été acquis 30 fois selon la même direction d’accostage (Figure. B.14). La moyenne, le minimum, le maximum des coordonnées des points ainsi que l’écart type sont évalués. Les résultats sont représentés dans le Tableau. B.1.

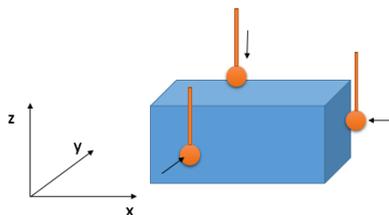


Figure B.14 – Principe d’évaluation de la répétabilité de mesure du palpeur *TP2* dans les trois directions.

Tableau B.1 – Résultats d'évaluation de la répétabilité de mesure du TP2 dans les trois directions.

	La moyenne	L'écart type	Min	Max
Selon X	-292.6194	$4.9013 \cdot 10^{-4}$	-292.6200	-292.6190
Selon Y	-145.7997	$5.8329 \cdot 10^{-4}$	-145.8010	-145.7990
Selon Z	-214.7570	$1.1563 \cdot 10^{-13}$	-214.7570	-214.7570

Annexe

C

**Programme d'exécution de la gamme
d'inspection de la pièce test**

```

DMISMN/'Start Template',05.2
FILNAM/'Start Template',05.2
DV(0)=DMESWV/'18,1,0,270'
UNITS/MM,ANGDEC
DECPL/ALL,DEFAULT
V(0)=VFORM/ALL,PLOT
DISPLY/TERM,V(0),STOR,DMIS,V(0)
SNSET/APPRCH,5
FEDRAT/MESVEL,MMPS,0.1
SNSET/CLRSRE,15
SNSET/DEPTH,0
D(0)=DATSET/MCS
MODE/AUTO,PROG,MAN
T(CORTOL_X1)=TOL/CORTOL,XAXIS,-0.1,0.1
T(CORTOL_Y1)=TOL/CORTOL,YAXIS,-0.1,0.1
T(CORTOL_Z1)=TOL/CORTOL,ZAXIS,-0.1,0.1
T(DIAM_1)=TOL/DIAM,-0.1,0.1
$$ Sensor definition added by template

TEXT/OPER,' Déplacer le capteur à un endroit plus sécurisé pour changer l'orientation puis cliquer sur OK'
RECALL/SA(Aquilon.1.20.3.A0.0-B0.0)
SNSLCT/SA(Aquilon.1.20.3.A0.0-B0.0)
TEXT/OPER,' Début de la numérisation avec le capteur laser dans l'orientation A0 B0'
GOTO/CART,138.9258,468.0059,302.5738

TEXT/OPER,' Lancer la numérisation sur Polygonia dans l'orientation A0 B0 puis cliquer sur OK'

GOTO/CART,139.0303,562.0728,292.0728
GOTO/CART,154.0296,562.0728,292.2221
GOTO/CART,153.9251,468.0059,302.7231
GOTO/CART,168.9243,468.0059,302.8724
GOTO/CART,169.0289,562.0728,292.3713
GOTO/CART,184.0281,562.0728,292.5206
GOTO/CART,183.9236,468.0059,303.0217
GOTO/CART,198.9229,468.0059,303.1710
GOTO/CART,199.0274,562.0728,292.6699
GOTO/CART,214.0266,562.0728,292.8192
GOTO/CART,213.9221,468.0059,303.3203
GOTO/CART,228.9214,468.0059,303.4696
GOTO/CART,229.0259,562.0728,292.9685

TEXT/OPER,' Fin de la numérisation avec le capteur laser dans l'orientation A0 B0'

TEXT/OPER,' Début de la mesure avec le palpeur dans la même orientation'

GOTO/CART,154.068,511.289,353.643
GOTO/CART,114.8040,527.9370,284.6490
GOTO/CART,114.8040,527.9370,271.6490

$$<MEAS_SPHERE name = "SPH01 ">
MODE/PROG,MAN
F(SPH01)=FEAT/SPHERE, INNER,CART,114.8040,527.9370,271.6490,20.0000,-0.0000,-0.0000,1.0000
MEAS/SPHERE,F(SPH01),10
PTMEAS/CART,121.8103,522.8466,266.6490,-0.7006,0.5090,0.5000
PTMEAS/CART,120.4952,520.1037,269.1490,-0.5691,0.7833,0.2500
PTMEAS/CART,109.3551,520.4372,267.8990,0.5449,0.7500,0.3750
PTMEAS/CART,105.3120,524.8529,271.0240,0.9492,0.3084,0.0625
PTMEAS/CART,105.7697,530.8724,268.5240,0.9034,-0.2935,0.3125
PTMEAS/CART,109.0304,535.8837,269.7740,0.5774,-0.7947,0.1875
PTMEAS/CART,114.8040,536.9292,267.2740,0.0000,-0.8992,0.4375
PTMEAS/CART,120.6790,536.0232,271.3365,-0.5875,-0.8086,0.0312
PTMEAS/CART,121.6581,532.9168,266.3365,-0.6854,-0.4980,0.5313
PTMEAS/CART,123.9307,530.9024,268.8365,-0.9127,-0.2965,0.2812
ENDMES
$$<\MEASSPHERE = SPH01>

GOTO/CART,114.8040,527.9370,271.6490
GOTO/CART,114.8040,527.9370,284.6490
GOTO/CART,154.068,511.289,353.643

$$<MEAS_PLANE name = "PLN1">
MODE/PROG,MAN
F(PLN01)=FEAT/PLANE,CART,132.3040,557.9370,261.6490,1.0000,-0.0000,-0.0000
MEAS/PLANE,F(PLN01),13
PTMEAS/CART,132.3040,554.5620,264.4182,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,556.2495,267.1875,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,552.8745,269.9567,1.0000,-0.0000,-0.0000

```

```

PTMEAS/CART,132.3040,549.4995,268.5721,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,547.8120,265.8028,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,551.1870,264.0336,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,541.0620,265.1105,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,542.7495,267.8798,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,537.6870,263.7259,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,534.3120,266.4952,1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,132.3040,535.9995,269.2644,1.0000,-0.0000,-0.0000
ENDMES
$$<\MEAS_PLANE = PLN01>

GOTO/CART,154.068,511.289,353.643

$$<MEAS_PLANE name = "PLN2">
MODE/PROG,MAN
F(PLN02)=FEAT/PLANE,CART,167.3040,557.9370,261.6490,-1.0000,-0.0000,-0.0000
MEAS/PLANE,F(PLN02),13
PTMEAS/CART,167.3040,553.7832,263.8990,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,555.8601,266.1490,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,551.7062,268.3990,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,547.5524,267.2740,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,545.4755,265.0240,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,541.3216,263.2115,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,537.1678,264.4615,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,539.2447,266.7115,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,535.0908,268.9615,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,533.0139,263.3365,-1.0000,-0.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,167.3040,543.3985,269.5240,-1.0000,-0.0000,-0.0000
ENDMES
$$<\MEAS_PLANE = PLN02>

GOTO/CART,154.068,511.289,353.643

GOTO/CART,179.8040,510.3370,284.6490
GOTO/CART,179.8040,510.3370,274.6490
$$<MEAS_CYLNR name = "CYL01 ">
MODE/PROG,MAN
F(CYL01)=FEAT/CYLNR, OUTER,CART,179.8040,527.9370,271.6490,0.0000,0.0000,-1.0000,16.0000
MEAS/CYLNR,F(CYL01),10
PTMEAS/CART,177.5501,520.2611,276.1490,-0.2817,-0.9595,-0.0000
PTMEAS/CART,173.7580,522.6981,275.3990,-0.7557,-0.6549,-0.0000
PTMEAS/CART,171.8854,526.7985,278.7740,-0.9898,-0.1423,-0.0000
PTMEAS/CART,172.5269,531.2603,275.0240,-0.9096,0.4154,-0.0000
PTMEAS/CART,177.5501,535.6129,278.2115,-0.2817,0.9595,-0.0000
PTMEAS/CART,182.0579,535.6129,274.0865,0.2817,0.9595,-0.0000
PTMEAS/CART,185.8500,533.1759,276.3365,0.7557,0.6549,-0.0000
PTMEAS/CART,187.7226,526.7985,276.8053,0.9898,-0.1423,-0.0000
PTMEAS/CART,185.8500,522.6981,276.0553,0.7557,-0.6549,-0.0000
PTMEAS/CART,182.0579,520.2611,279.4303,0.2817,-0.9595,-0.0000
ENDMES
$$<\MEAS_CYLNR = CYL01>

GOTO/CART,182.0579,510.6611,279.4303
GOTO/CART,182.0579,510.6611,292.4303
GOTO/CART,154.068,511.289,353.643
GOTO/CART,179.8040,527.9370,286.1490
GOTO/CART,179.8040,527.9370,266.6490

$$<MEAS_CYLNR name = "CYL02 ">
MODE/PROG,MAN
F(CYL02)=FEAT/CYLNR, INNER,CART,179.8040,527.9370,266.6490,0.0000,0.0000,-1.0000,9.0000
MEAS/CYLNR,F(CYL02),10
PTMEAS/CART,179.8040,523.4370,266.6490,-0.0000,1.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,178.2649,532.1656,268.6178,0.3420,-0.9397,-0.0000
PTMEAS/CART,183.7011,525.6870,271.4303,-0.8660,0.5000,-0.0000
PTMEAS/CART,182.6965,531.3842,274.2428,-0.6428,-0.7660,-0.0000
PTMEAS/CART,179.8040,532.4370,275.3678,0.0000,-1.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,184.2356,528.7184,277.0553,-0.9848,-0.1736,-0.0000
PTMEAS/CART,178.2649,523.7084,273.3990,0.3420,0.9397,-0.0000
PTMEAS/CART,181.3431,523.7084,274.3834,-0.3420,0.9397,-0.0000
PTMEAS/CART,175.9069,525.6870,272.2740,0.8660,0.5000,-0.0000
PTMEAS/CART,175.3724,527.1556,270.5865,0.9848,0.1736,-0.0000
ENDMES
$$<\MEAS_CYLNR = CYL02>

GOTO/CART,179.8040,527.9370,266.6490
GOTO/CART,179.8040,527.9370,286.1490

```

GOTO/CART,154.068,511.289,353.643
GOTO/CART,189.8040,547.9370,276.1490
GOTO/CART,189.8040,547.9370,260.6490

```
$$<MEAS_CYLNDR name = "CYL03 ">  
MODE/PROG,MAN  
F(CYL03)=FEAT/CYLNDR, INNER,CART,189.8040,547.9370,256.6490,0.0000,0.0000,-1.0000,10.0000  
MEAS/CYLNDR,F(CYL03),10  
PTMEAS/CART,193.0179,544.1068,259.6334,-0.6428,0.7660,-0.0000  
PTMEAS/CART,194.7280,547.0688,263.6803,-0.9848,0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,189.8040,552.9370,265.3678,0.0000,-1.0000,-0.0000  
PTMEAS/CART,191.5141,552.6355,266.4928,-0.3420,-0.9397,-0.0000  
PTMEAS/CART,191.5141,543.2385,264.3834,-0.3420,0.9397,-0.0000  
PTMEAS/CART,186.5901,544.1068,264.5240,0.6428,0.7660,-0.0000  
PTMEAS/CART,184.8800,547.0688,260.5865,0.9848,0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,185.4739,550.4370,263.9615,0.8660,-0.5000,-0.0000  
PTMEAS/CART,194.1341,550.4370,260.3053,-0.8660,-0.5000,-0.0000  
PTMEAS/CART,188.0939,552.6355,258.6178,0.3420,-0.9397,-0.0000  
ENDMES  
$$<\MEAS_CYLNDR = CYL03>
```

GOTO/CART,189.8040,547.9370,260.6490
GOTO/CART,189.8040,547.9370,276.1490
GOTO/CART,154.068,511.289,353.643
GOTO/CART,189.8040,482.9370,276.1490
GOTO/CART,189.8040,482.9370,260.6490

```
$$<MEAS_CYLNDR name = "CYL04 ">  
MODE/PROG,MAN  
F(CYL04)=FEAT/CYLNDR, INNER,CART,189.8040,482.9370,256.6490,0.0000,0.0000,-1.0000,10.0000  
MEAS/CYLNDR,F(CYL04),10  
PTMEAS/CART,193.0179,479.1068,259.6334,-0.6428,0.7660,-0.0000  
PTMEAS/CART,194.7280,482.0688,263.6803,-0.9848,0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,189.8040,487.9370,265.3678,0.0000,-1.0000,-0.0000  
PTMEAS/CART,194.7280,483.8052,267.0553,-0.9848,-0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,188.0939,478.2385,263.3990,0.3420,0.9397,-0.0000  
PTMEAS/CART,185.4739,480.4370,262.2740,0.8660,0.5000,-0.0000  
PTMEAS/CART,186.5901,486.7672,261.7115,0.6428,-0.7660,-0.0000  
PTMEAS/CART,184.8800,483.8052,267.3365,0.9848,-0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,194.1341,485.4370,260.3053,-0.8660,-0.5000,-0.0000  
PTMEAS/CART,188.0939,487.6355,258.6178,0.3420,-0.9397,-0.0000  
ENDMES  
$$<\MEAS_CYLNDR = CYL04>
```

GOTO/CART,189.8040,482.9370,260.6490
GOTO/CART,189.8040,482.9370,276.1490
GOTO/CART,154.068,511.289,353.643
GOTO/CART,109.8040,482.9370,276.1490
GOTO/CART,109.8040,482.9370,260.6490

```
$$<MEAS_CYLNDR name = "CYL05 ">  
MODE/PROG,MAN  
F(CYL05)=FEAT/CYLNDR, INNER,CART,109.8040,482.9370,256.6490,0.0000,0.0000,-1.0000,10.0000  
MEAS/CYLNDR,F(CYL05),10  
PTMEAS/CART,113.0179,479.1068,259.6334,-0.6428,0.7660,-0.0000  
PTMEAS/CART,114.7280,482.0688,263.6803,-0.9848,0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,113.0179,486.7672,264.2428,-0.6428,-0.7660,-0.0000  
PTMEAS/CART,111.5141,487.6355,266.4928,-0.3420,-0.9397,-0.0000  
PTMEAS/CART,111.5141,478.2385,264.3834,-0.3420,0.9397,-0.0000  
PTMEAS/CART,106.5901,479.1068,264.5240,0.6428,0.7660,-0.0000  
PTMEAS/CART,104.8800,482.0688,260.5865,0.9848,0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,105.4739,485.4370,263.9615,0.8660,-0.5000,-0.0000  
PTMEAS/CART,104.8800,483.8052,267.3365,0.9848,-0.1736,-0.0000  
PTMEAS/CART,108.0939,487.6355,258.6178,0.3420,-0.9397,-0.0000  
ENDMES  
$$<\MEAS_CYLNDR = CYL05>
```

GOTO/CART,109.8040,482.9370,260.6490
GOTO/CART,109.8040,482.9370,276.1490
GOTO/CART,154.068,511.289,353.643
GOTO/CART,109.8040,547.9370,276.1490
GOTO/CART,109.8040,547.9370,260.6490

```
$$<MEAS_CYLNDR name = "CYL06 ">  
MODE/PROG,MAN  
F(CYL06)=FEAT/CYLNDR, INNER,CART,109.8040,547.9370,256.6490,0.0000,0.0000,-1.0000,10.0000  
MEAS/CYLNDR,F(CYL06),10
```

```

PTMEAS/CART,113.0179,544.1068,259.6334,-0.6428,0.7660,-0.0000
PTMEAS/CART,114.7280,547.0688,263.6803,-0.9848,0.1736,-0.0000
PTMEAS/CART,109.8040,552.9370,265.3678,0.0000,-1.0000,-0.0000
PTMEAS/CART,111.5141,552.6355,266.4928,-0.3420,-0.9397,-0.0000
PTMEAS/CART,111.5141,543.2385,264.3834,-0.3420,0.9397,-0.0000
PTMEAS/CART,106.5901,544.1068,264.5240,0.6428,0.7660,-0.0000
PTMEAS/CART,105.4739,545.4370,262.2740,0.8660,0.5000,-0.0000
PTMEAS/CART,106.5901,551.7672,261.7115,0.6428,-0.7660,-0.0000
PTMEAS/CART,105.4739,550.4370,263.9615,0.8660,-0.5000,-0.0000
PTMEAS/CART,114.1341,550.4370,260.3053,-0.8660,-0.5000,-0.0000
ENDMES
$$<\MEAS_CYLNDR = CYL06>

GOTO/CART,109.8040,547.9370,260.6490
GOTO/CART,109.8040,547.9370,276.1490
GOTO/CART,154.068,511.289,353.643

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(SPH01),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_SPH01.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(SPH01)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(SPH01)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(SPH01)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(SPH01)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(SPH01)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(SPH01)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(PLN01),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_PLN01.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(PLN01)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(PLN01)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(PLN01)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(PLN01)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(PLN01)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(PLN01)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(PLN02),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_PLN02.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(PLN02)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(PLN02)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(PLN02)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(PLN02)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(PLN02)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(PLN02)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

```

```

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL01),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL01.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(CYL01)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(CYL01)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(CYL01)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(CYL01)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(CYL01)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(CYL01)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL02),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL02.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(CYL02)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(CYL02)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(CYL02)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(CYL02)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(CYL02)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(CYL02)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL03),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL03.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(CYL03)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(CYL03)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(CYL03)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(CYL03)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(CYL03)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(CYL03)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL04),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL04.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(CYL04)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(CYL04)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(CYL04)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(CYL04)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(CYL04)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(CYL04)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval

```

Annexe C. Programme d'exécution de la gamme d'inspection de la pièce test

```
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL05),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL05.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(CYL05)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(CYL05)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(CYL05)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(CYL05)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(CYL05)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(CYL05)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
L_STR_Comma=ASSIGN/','
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL06),PTDATA
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL06.txt'
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
xval=OBTAIN/FA(CYL06)[L_INT_Loop_Counter],2
yval=OBTAIN/FA(CYL06)[L_INT_Loop_Counter],3
zval=OBTAIN/FA(CYL06)[L_INT_Loop_Counter],4
ival=OBTAIN/FA(CYL06)[L_INT_Loop_Counter],5
jval=OBTAIN/FA(CYL06)[L_INT_Loop_Counter],6
kval=OBTAIN/FA(CYL06)[L_INT_Loop_Counter],7
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,
kval
ENDDO
CLOSE/DID(Export_Data)
$$-----

TEXT/OPER,' Fin de la mesure avec le palpeur'

GOTO/CART,686.244,750.034,382.261

RECALL/SA(Aquilon.1.20.3.A90.0-B0.0)
SNSLCT/SA(Aquilon.1.20.3.A90.0-B0.0)
TEXT/OPER,' Début de la numérisation avec le capteur laser dans l'orientation A90 B0'
GOTO/CART,225.7006,561.5203,230.6314

TEXT/OPER,' Lancer la numérisation sur Polygonia dans l'orientation A90 B0 puis cliquer sur OK'

GOTO/CART,225.7006,469.3537,230.6314
GOTO/CART,225.7006,469.3537,215.6314
GOTO/CART,225.7006,561.5203,215.6314
GOTO/CART,225.7006,561.5203,200.6314
GOTO/CART,225.7006,469.3537,200.6314

TEXT/OPER,' Fin de la mesure avec le capteur laser'

GOTO/CART,244.338,527.803,246.431
GOTO/CART,192.8040,527.9370,251.6490
GOTO/CART,179.8040,527.9370,251.6490
$$<MEAS_CYLNDR name = "CYL07 ">
MODE/PRŒG,MAN
F(CYL07)=FEAT/CYLNDR, INNER,CART,179.8040,527.9370,251.6490,-1.0000,0.0000,0.0000,20.0000
MEAS/CYLNDR,F(CYL07),10
PTMEAS/CART,179.8040,527.9370,241.6490,-0.0000,-0.0000,1.0000
PTMEAS/CART,185.0540,521.5091,243.9886,-0.0000,0.6428,0.7660
PTMEAS/CART,182.4290,518.0889,249.9125,-0.0000,0.9848,0.1736
PTMEAS/CART,186.9290,518.0889,253.3855,-0.0000,0.9848,-0.1736
PTMEAS/CART,183.1790,521.5091,259.3094,-0.0000,0.6428,-0.7660
PTMEAS/CART,186.3665,531.3572,261.0459,-0.0000,-0.3420,-0.9397
PTMEAS/CART,182.2415,536.5973,256.6490,-0.0000,-0.8660,-0.5000
```

```
PTMEAS/CART,186.7415,537.7851,253.3855,-0.0000,-0.9848,-0.1736
PTMEAS/CART,182.9915,536.5973,246.6490,-0.0000,-0.8660,0.5000
PTMEAS/CART,180.4603,534.3649,243.9886,-0.0000,-0.6428,0.7660
ENDMES
```

```
$$<\MEAS_CYLNR = CYL07>
```

```
GOTO/CART,179.8040,527.9370,251.6490
GOTO/CART,192.8040,527.9370,251.6490
GOTO/CART,244.338,527.803,246.431
GOTO/CART,202.8040,527.9370,251.6490
GOTO/CART,194.8040,527.9370,251.6490
```

```
$$<MEAS_CYLNR name = "CYL08 ">
```

```
MODE/PROG,MAN
```

```
F(CYL08)=FEAT/CYLNR, INNER,CART,189.8040,527.9370,251.6490,-1.0000,0.0000,0.0000,30.0000
```

```
MEAS/CYLNR,F(CYL08),18
```

```
PTMEAS/CART,194.3040,522.8067,237.5536,-0.0000,0.3420,0.9397
PTMEAS/CART,195.0540,518.2952,240.1583,-0.0000,0.6428,0.7660
PTMEAS/CART,193.5540,514.9466,244.1490,-0.0000,0.8660,0.5000
PTMEAS/CART,196.9290,513.1649,254.2537,-0.0000,0.9848,-0.1736
PTMEAS/CART,194.6790,514.9466,259.1490,-0.0000,0.8660,-0.5000
PTMEAS/CART,195.6165,527.9370,266.6490,-0.0000,0.0000,-1.0000
PTMEAS/CART,196.3665,533.0673,265.7444,-0.0000,-0.3420,-0.9397
PTMEAS/CART,196.7415,542.7091,254.2537,-0.0000,-0.9848,-0.1736
PTMEAS/CART,194.4915,542.7091,249.0443,-0.0000,-0.9848,0.1736
PTMEAS/CART,194.9603,533.0673,237.5536,-0.0000,-0.3420,0.9397
```

```
ENDMES
```

```
$$<\MEAS_CYLNR = CYL08>
```

```
GOTO/CART,189.8040,527.9370,251.6490
GOTO/CART,202.8040,527.9370,251.6490
```

```
DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
```

```
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
```

```
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
```

```
L_STR_Comma=ASSIGN/','
```

```
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL07),PTDATA
```

```
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL07.txt'
```

```
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
```

```
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
```

```
xval=OBTAIN/FA(CYL07)[L_INT_Loop_Counter],2
```

```
yval=OBTAIN/FA(CYL07)[L_INT_Loop_Counter],3
```

```
zval=OBTAIN/FA(CYL07)[L_INT_Loop_Counter],4
```

```
ival=OBTAIN/FA(CYL07)[L_INT_Loop_Counter],5
```

```
jval=OBTAIN/FA(CYL07)[L_INT_Loop_Counter],6
```

```
kval=OBTAIN/FA(CYL07)[L_INT_Loop_Counter],7
```

```
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,kval
```

```
ENDDO
```

```
CLOSE/DID(Export_Data)
```

```
$$-----
```

```
DECL/LOCAL,INTGR,L_INT_Number_Points,L_INT_Loop_Counter
```

```
DECL/LOCAL,DOUBLE,xval,yval,zval,ival,jval,kval
```

```
DECL/LOCAL,CHAR,512,L_STR_Comma
```

```
L_STR_Comma=ASSIGN/','
```

```
L_INT_Number_Points=VALUE/FA(CYL08),PTDATA
```

```
DID(Export_Data)=DEVICE/STOR,'C:\Users\Administrateur\Desktop\Sif thèse\final test\palpeur\out_CYL08.txt'
```

```
OPEN/DID(Export_Data),DIRECT,OUTPUT,APPEND
```

```
DO/L_INT_Loop_Counter,1,L_INT_Number_Points,1
```

```
xval=OBTAIN/FA(CYL08)[L_INT_Loop_Counter],2
```

```
yval=OBTAIN/FA(CYL08)[L_INT_Loop_Counter],3
```

```
zval=OBTAIN/FA(CYL08)[L_INT_Loop_Counter],4
```

```
ival=OBTAIN/FA(CYL08)[L_INT_Loop_Counter],5
```

```
jval=OBTAIN/FA(CYL08)[L_INT_Loop_Counter],6
```

```
kval=OBTAIN/FA(CYL08)[L_INT_Loop_Counter],7
```

```
WRITE/DID(Export_Data),xval,L_STR_Comma,yval,L_STR_Comma,zval,L_STR_Comma,ival,L_STR_Comma,jval,L_STR_Comma,kval
```

```
ENDDO
```

```
CLOSE/DID(Export_Data)
```

```
$$-----
```

```
TEXT/OPER,' Fin de la mesure avec le palpeur'
```

```
GOTO/CART,575.296,143.277,515.831
```

```
RECALL/SA(Aquilon.1.20.3.A90.0-B-90.0)
```

```
SNSLCT/SA(Aquilon.1.20.3.A90.0-B-90.0)
TEXT/OPER,' Début de la numérisation avec le capteur laser dans l'orientation A90 B-90'
GOTO/CART,203.1373,447.0404,205.2981

TEXT/OPER,' Lancer la numérisation sur Polygonia dans l'orientation A90 B-90 puis cliquer sur OK'

GOTO/CART,96.4707,447.0404,205.2981
GOTO/CART,96.4707,447.0404,220.2981
GOTO/CART,203.1373,447.0404,220.2981
GOTO/CART,203.1373,447.0404,235.2981
GOTO/CART,96.4707,447.0404,235.2981

GOTO/CART,189.774,332.44,538.71
RECALL/SA(Aquilon.1.20.3.A0.0-B0.0)
SNSLCT/SA(Aquilon.1.20.3.A0.0-B0.0)

TEXT/OPER,' Fin d'exécution de la gamme'
PAUSE
ENDFIL
```

Annexe

D

**Rapport d'inspection de référence de
la pièce test**



MANAGEMENT DE LA QUALITE
Nous sommes certifiés
Surveillance volontaire régulière
selon la norme ISO 9001:2000



ZEISS Calypso C32B MMT

Date 23 Avril 2019

Date de création 28 Mars 2019 16:43:00



Plan de contrôle

ENS PARIS SACLAY PIECE

Nom	Commande	Affaire	N° Pièce
PERRIER	2019-001084	44301	1

Remarque:

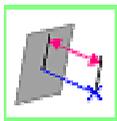
15:32:28 00:00:00,0

	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart
--	-------------	-----------	-----------	-----------	-------



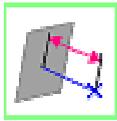
Résultat total

Toutes les caractéristiques :	63
Hors tolérance :	1
Au-dessus de la limite d'avertissement :	0
Pas calculé :	0



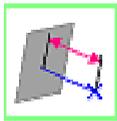
1 - 15 # TROU A #

14.826	15.000			-0.174
--------	--------	--	--	--------



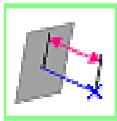
1 - 15 # TROUS B #

14.826	15.000			-0.174
--------	--------	--	--	--------



1 - 15 # TROUS C #

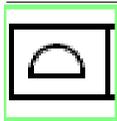
14.825	15.000			-0.175
--------	--------	--	--	--------



1 - 15 # TROUS D #

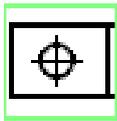
14.824	15.000			-0.176
--------	--------	--	--	--------

2 - 15
MESURE: 15.15



3 - Forme surface 0.2

0.075	0.000	0.200		0.075
-------	-------	-------	--	-------



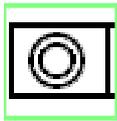
4 - Localisation 0.1 - A

0.028	0.000	0.100		0.028
-------	-------	-------	--	-------



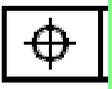
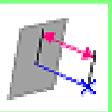
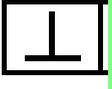
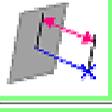
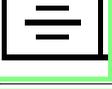
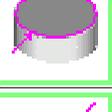
5 - Ø16

15.841	16.000	0.100	-0.100	-0.159
--------	--------	-------	--------	--------



6 - Concentricité 0.15 - E

0.011	0.000	0.150		0.011
-------	-------	-------	--	-------

Nom Pièce		Opérateur		Heure		Date		ZEISS	
ENS PARIS SACLAY PIECE		Master		15:32:28		23 Avril 2019			
	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart				
	7 - Ø9	9.006	9.000	0.050	-0.050	-	0.006		
	8 - Localisation 0.1 - A - B - C	0.024	0.000	0.100		-	0.024		
	9 - 10	9.988	9.000				0.988		
	10 - Ø20	19.989	20.000	0.100	-0.100	-	-0.011		
	11 - Perpendicularité 0.1 - C	0.022	0.000	0.100		-	0.022		
	12 - 10	9.902	9.906				-0.004		
	13 - 20	20.004	20.005				-0.001		
	14 - 35	34.950	35.000	0.100	-0.100	--	-0.050		
	15 - Symétrie 0.25 - D	0.002	0.000	0.250		-	0.002		
	16 A - Ø10 H8	10.008	10.000	0.022	0.000	--	0.008		
	16 B - Ø10 H8	10.008	10.000	0.022	0.000	--	0.008		
	16 C - Ø10 H8	10.009	10.000	0.022	0.000	-	0.009		

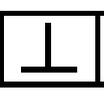
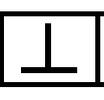
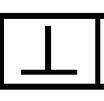
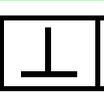
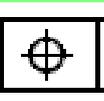
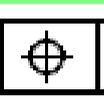
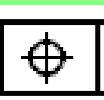
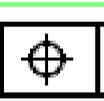
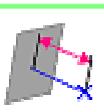
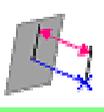
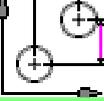
Nom Pièce
ENS PARIS SACLAY PIECE

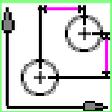
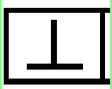
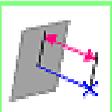
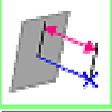
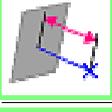
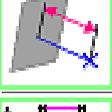
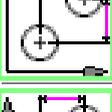
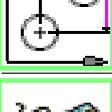
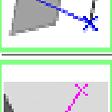
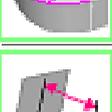
Opérateur
Master

Heure
15:32:28

Date
23 Avril 2019



	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart	
 16 D - Ø10 H8	10.006	10.000	0.022	0.000	--	0.006
 17 - Perpendicularité 0.1 - A # TROU A #	0.000	0.000	0.100			0.000
 17 - Perpendicularité 0.1 - A # TROU B #	0.001	0.000	0.100			0.001
 17 - Perpendicularité 0.1 - A # TROU C #	0.001	0.000	0.100			0.001
 17 - Perpendicularité 0.1 - A # TROU D #	0.001	0.000	0.100			0.001
 18 - Localisation 0.2 - A - B - C # TROUS A #	0.020	0.000	0.200		-	0.020
 18 - Localisation 0.2 - A - B - C # TROUS B #	0.029	0.000	0.200		-	0.029
 18 - Localisation 0.2 - A - B - C # TROUS C #	0.075	0.000	0.200		--	0.075
 18 - Localisation 0.2 - A - B - C # TROUS D #	0.029	0.000	0.200		-	0.029
 19 - 20	20.009	20.000	0.050	-0.050	-	0.009
 20 - 100	100.014	100.000				0.014
 21 - 65 # ENTRE TROUS A ET D #	65.002	65.000	0.050	-0.050	-	0.002

Nom Pièce		Opérateur		Heure		Date		ZEISS	
ENS PARIS SACLAY PIECE		Master		15:32:28		23 Avril 2019			
	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart				
	21 - 65 # ENTRE TROUS B ET C # 65.002	65.000	0.050	-0.050	-		0.002		
	22 - Perpendicularité 0.05 - A - B 0.004	0.000	0.050	-		0.004			
	23 - 10 10.005	10.000	0.050	-0.050	-		0.005		
	24 - 10 10.008	10.000	0.050	-0.050	-		0.008		
	25 - 120 120.026	120.000					0.026		
	26 - 85 85.015	85.000	0.050	-0.050	--		0.015		
	27 - 80 # ENTRE TROUS A ET B # 80.005	80.000	0.050	-0.050	-		0.005		
	27 - 80 # ENTRE TROUS C ET D # 80.010	80.000	0.050	-0.050	-		0.010		
	28 - 50 50.091	50.000					0.091		
	29 - 29 28.963	29.000					-0.037		
	30 - R6 5.994	6.000					-0.006		
	31 - 55 # DU Ø9 # 55.005	55.000	0.050	-0.050	-		0.005		

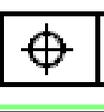
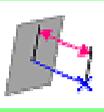
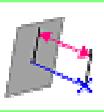
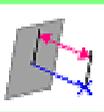
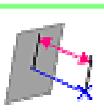
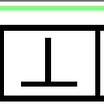
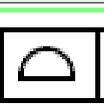
Nom Pièce
ENS PARIS SACLAY PIECE

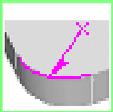
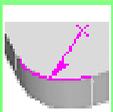
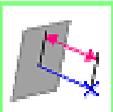
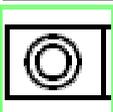
Opérateur
Master

Heure
15:32:28

Date
23 Avril 2019



	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart	
 31 - 55 # SPHERE #	54.996	54.998	0.050	-0.050		
 32 - Ø20	19.930	20.000	0.100	-0.100		---
 33 - Localisation 0.1 - A - B - C	0.045	0.000	0.100			--
 34 - Planéité 0.1	0.002	0.000	0.100			-
 35 - 8	8.194	8.000				
 36 - 20 # DU Ø30 #	19.972	20.000				
 36 - 20 # DU Ø20 #	19.979	20.000				
 37 - 30 DU Ø30	29.978	30.000				
 37 - 30 DU Ø20	29.978	30.000				
 38 - 45	44.893	44.896				
 39 - Perpendicularité 0.1 - A	0.002	0.000	0.100			-
 40 - Forme surface 0.15	0.011	0.000	0.150			-

Nom Pièce ENS PARIS SACLAY PIECE		Opérateur Master		Heure 15:32:28		Date 23 Avril 2019			
	Val. réelle	Val. nom.	Tol. Sup.	Tol. Inf.	Ecart				
	41 - R15 14.988	15.000			-0.012				
	43 - R13.33 13.453	13.330			0.123				
	42 - 40 40.065	40.000			0.065				
	44 - Ø30 29.990	30.000	0.100	-0.100	-	-0.010			
	45 - Concentricité 0.2 - F 0.014	0.000	0.200		-	0.014			

Titre : Inspection dimensionnelle - Une approche multi-capteurs pour la vérification des spécifications géométriques

Mots clés : Inspection dimensionnelle, Métrologie 3D, Multi-capteurs, Capteur laser-plan, Palpeur à contact, Trajectoire, Gamme d'inspection, Automatisation, Machine à mesurer tridimensionnelle (*MMT*)

Résumé :

L'inspection dimensionnelle, qui consiste à vérifier la conformité géométrique des pièces vis-à-vis des spécifications, est une étape essentielle dans le cycle de vie des produits. Elle s'appuie de plus en plus sur la mesure multi-capteurs qui permet un gain de temps certain. Néanmoins, le gain de temps n'a de sens que si la qualité des résultats respecte le besoin métrologique. En effet, la mise en œuvre combinée de capteurs de technologie et de caractéristiques différentes engendre un certain nombre de problèmes qui affectent directement la qualité de la mesure. Dans ce travail, une approche d'inspection automatique utilisant un scanner combinant un capteur à contact avec un capteur laser-plan monté sur une *MMT* est proposée. Cette approche cherche à utiliser au mieux les capacités de chacun des capteurs, en privilégiant la mesure avec le capteur laser-

plan dès lors que la qualité requise est obtenue pour un gain de temps. L'approche consiste à définir une séquence d'opérations de mesure de surfaces qui portent des spécifications, appelées entités d'inspection.

Partant d'un ensemble d'orientations du scanner, la séquence d'opérations est établie pour chaque orientation par évaluation de l'aptitude du capteur laser puis celle du palpeur à mesurer les surfaces avec la qualité nécessaire. La gamme d'inspection est complétée par la définition optimale de la trajectoire du capteur laser-plan et celle du palpeur pour chaque orientation. La trajectoire finale exécutée sur machine *MMT* est obtenue par transformation et assemblage des deux trajectoires. À l'issue de l'exécution, la mesure avec les deux capteurs conduit à deux nuages de points hétérogènes qu'il convient de traiter avant l'évaluation finale des spécifications.

Title : Dimensional inspection - Multi-sensor approach for geometrical specification verification

Keywords : Dimensional inspection, 3D Metrology, Multi-sensor, Laser-plan sensor, Touch probe, Path, Inspection plan, Automation, Coordinate measuring machine (*CMM*)

Abstract :

Dimensional inspection, which consists in verifying the geometric conformity of parts in terms of specifications, is an essential step in the product life cycle. Recently, dimensional inspection has been increasingly based on multi-sensor measurement that allows a significant time saving. However, time saving is only meaningful if the quality of the results respects the metrological requirements. Indeed, the combined use of sensors of different technologies and characteristics generates issues that affect the measurement quality. In this work, an automatic inspection approach using a scanner combining a contact sensor with a laser-plane sensor mounted on a *CMM* is proposed. This approach aims to best use the abilities of each of the sensors, giving priority to measurement with the laser-plan sensor as soon as the required quality is

obtained for time saving. The approach consists in defining a sequence of surface measurement operations that have specifications, called inspection features.

Starting from a set of scanner orientations, the sequence of operations is established for each orientation by evaluating the ability of the laser sensor and then that of the probe to measure surfaces with the required quality. The inspection plan is completed by the optimal definition of the laser-plane sensor path and the probe path for each orientation. The final path executed on the *CMM* machine is obtained by transforming and assembling the two paths. At the end of the execution, the measurement with the two sensors leads to two heterogeneous point clouds that must be processed before the final evaluation of the specifications.

