



HAL
open science

Une approche globale pour la métrologie 3D automatique multi-systèmes

Nicolas Audfray

► **To cite this version:**

Nicolas Audfray. Une approche globale pour la métrologie 3D automatique multi-systèmes. Autre. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012. Français. NNT : 2012DENS0084 . tel-00907272

HAL Id: tel-00907272

<https://theses.hal.science/tel-00907272>

Submitted on 21 Nov 2013

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.

**THÈSE DE DOCTORAT
DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN**

Présentée par

Monsieur Nicolas AUDFRAY

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

Domaine :

Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil

Sujet de thèse :

**UNE APPROCHE GLOBALE POUR LA MÉTROLOGIE 3D
AUTOMATIQUE MULTI-SYSTÈMES**

Thèse présentée et soutenue à Cachan le 17 décembre 2012 devant le jury composé de :

Jean-Marc LINARES	Professeur, Aix Marseille Université	Président
Alain BERNARD	Professeur, Ecole Centrale Nantes	Rapporteur
Jean-François FONTAINE	Professeur, Université de Bourgogne	Rapporteur
Sébastien REMY	MCF HDR, Université de Technologie de Troyes	Examineur
Claire LARTIGUE	Professeur, Université Paris-Sud	Directeur de thèse
Charyar MEHDI-SOUZANI	MCF, Université Paris-Nord	Co-encadrant



Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
ENS CACHAN/EA 1385/Université Paris Sud 11
61 avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN CEDEX (France)

Une mesure exacte vaut l'avis de mille experts

Grace Hopper

REMERCIEMENTS

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire ont été menés au sein du Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA), dans l'équipe Geo3D. Je tiens à remercier les directeurs successifs du laboratoire Messieurs les professeurs Jean-Jacques Lesage et Luc Mathieu, ainsi que le responsable de l'équipe Monsieur François Thiébaud, ils m'ont accueilli chaleureusement au LURPA et m'ont permis de mener à bien ces travaux et de les défendre dans différentes conférences.

Je tiens particulièrement à adresser mes remerciements aux membres du jury. Je remercie particulièrement Monsieur le professeur Jean-Marc Linarès qui a accepté de présider ce jury. Merci également à Messieurs les professeurs Jean-François Fontaine et Alain Bernard qui ont rapporté sur cette thèse avec beaucoup de minutie, ce qui m'a permis d'approfondir mes travaux et d'élargir les perspectives. Mes remerciements vont également à Monsieur Sébastien Rémy qui a examiné ces travaux avec rigueur.

Ces travaux de thèse n'auraient pu voir le jour sans la direction et le soutien permanent de Madame le professeur Claire Lartigue. Elle a manifesté une grande implication dans ces travaux et a su recadrer les recherches lorsque cela était nécessaire. Je tiens à la remercier pour ces trois années de collaboration fort instructives et constructives. Très disponible, elle a également été d'un soutien humain sans faille.

Celui qui m'a épaulé au quotidien mérite également une place de choix dans ces remerciements. En effet, Charyar Mehdi-Souzani m'a apporté tout son soutien et son savoir tout au long de ces années de thèses. Charyar a toujours été présent pour défendre mes positions et m'épauler dans mes recherches. J'ai beaucoup apprécié travailler à ses côtés et tiens donc à le remercier pour ces années très riches humainement et scientifiquement. J'espère que nos chemins personnels et professionnels se recroiseront souvent.

J'adresse également mes remerciements au CMLA et à Julie Digne avec qui nous avons travaillé autour du projet inter-laboratoires de l'institut Farman « Géométrie Inverse pour l'Industrie », projet qui nous a permis de mettre en place les algorithmes de

segmentation des données bruitées.

Je tiens également à remercier l'équipe de Kréon Technologies qui m'a ouvert ses portes et a été attentive à mes différentes interrogations.

Une thèse serait bien plus difficile sans la bonne humeur qui règne dans le laboratoire grâce à ses membres. Je remercie mes compagnons de route et amis, je pense en particulier et par ordre alphabétique à Anne, Anthony, Michel, Picard, Zerty en ce qui concerne mes conscrits, Aza, Xavier, et tous les autres. Merci à Micky et Virgile pour la reprise du [CML](#). Un grand merci à Marc également qui a passé du temps sur les différents problèmes informatiques. Merci à mes différents co-bureaux qui ont défilé au cours de ces trois années, Robin, Julien, Min et Alex.

Les années de thèses mais également les 4 années de scolarité n'auraient pas été les mêmes sans les filles du DGM, merci Christine et Danielle pour toute votre implication, les voyages organisés et l'accueil chaleureux.

Je ne peux évidemment pas oublier ma famille et en particulier mes parents grâce à qui j'ai pu faire les études que j'ai choisies sans aucune pression familiale. Merci également d'être venu assister à ma soutenance, point final de ces longues années où j'ai profité des avantages de ma carte d'étudiant.

Merci également à tous ceux qui se sont déplacés, parfois de loin, le jour de la soutenance de mes travaux, je pense particulièrement à mes amis, Céline, Marion, Marion, Karine, Amaury, à mes frères Antoine et Etienne, à mes beaux-parents également, à tous ceux qui auraient aimé se déplacer mais qui n'ont pas pu, je pense à mon frère Rémi, à mes belles-sœurs, mes amis, ainsi qu'à tous ceux que j'aurais maladroitement oubliés et qui m'ont suivis de près ou de loin, qu'ils ne m'en tiennent pas rigueur.

Enfin, *last but not least* comme on dit, je tire un grand chapeau à mon épouse Justine qui a su m'épauler, m'encourager, me reconforter, me secouer, me soutenir, et tant d'autres choses, ainsi que relire des pages et des pages de ce manuscrit pour lui retirer un maximum de coquilles grammaticales et orthographiques, mais aussi pour lui apporter son regard extérieur néophyte pour le rendre peut-être un peu plus compréhensible pour chacun. Tu n'imaginais probablement pas tout ça en signant à l'aube de mon premier jour de thèse, mais merci pour tout ce que tu as pu faire pour moi, ce mémoire est aussi un peu le tien.

RÉSUMÉ

La métrologie 3D permet la vérification de spécifications géométriques et dimensionnelles sur des pièces mécaniques. Ce contrôle est classiquement réalisé à partir de mesures avec des capteurs à contact montés sur des machines à mesurer tridimensionnelles. Ce type de mesures offre une très grande qualité de données acquises mais requiert un temps d'exécution relativement long. Les présents travaux s'attachent donc à développer les mesures optiques dans le cadre de la métrologie 3D qui, avec une qualité diminuée, permettent une exécution beaucoup plus rapide. L'absence de norme concernant ces systèmes de mesure a pour conséquence leur utilisation rare dans le cadre de la métrologie. En effet, le choix d'un système est généralement réalisé à partir de spécifications sur sa qualité. Nous proposons donc une méthode de qualification des systèmes de mesure optiques permettant de quantifier la qualité des données qu'ils fournissent. Les données ainsi qualifiées sont stockées dans une base de données. Un processus global d'inspection 3D multi-systèmes est mis en place, permettant le choix du système de numérisation le mieux adapté (à contact ou sans contact) en termes de qualité et de coût de numérisation, à partir des données qualifiées de la base de données. Lors de l'utilisation de systèmes de mesure optiques, la baisse de qualité est essentiellement due au bruit de numérisation inhérent à ce type de systèmes. Un filtre permettant d'éliminer ce bruit, tout en gardant le défaut de forme de la surface, est mis en place dans le processus afin de rendre possible la vérification de spécifications avec des intervalles de tolérance faibles à l'aide de systèmes de mesure optiques.

ABSTRACT

3D metrology allows GD&T verification on mechanical parts. This verification is usually calculated using data obtained with a touch probe mounted on a coordinate measuring machine. Such a measurement offers a high data quality but requires an expensive processing time. The proposed research aims at expanding optical measurements in 3D metrology, reducing execution time but with a lower data quality. The lack of standard in this field makes the use of optical sensors uncommon in 3D metrology. Indeed, the system selection is mostly carried out from its quality specifications. Therefore we propose a protocol to assess the quality of optical measuring systems that allows in particular quantification of acquired data quality. The results of measuring system qualification are stored in a database. Taking advantages of this database, a global multi-system 3D inspection process is set up allowing the selection of the best digitizing system (contact or contactless) in terms of quality and digitizing cost. When using optical sensors, the poor quality is mostly due to digitizing noise inherent to this kind of systems. A filter that removes noise, keeping the form deviation of the surface, is proposed in the process to make possible the specification verification for applications with small tolerance intervals using optical systems.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xv

INTRODUCTION	1
--------------	---

CHAPITRE I – NUMÉRISATION 3D AUTOMATIQUE MULTI-SYSTÈMES	7
---	---

1	Introduction	9
2	Choix des systèmes	11
	2.1 Les systèmes de numérisation	12
	2.2 Choix des systèmes de numérisation	21
3	Stratégie de numérisation et planification de trajectoires	28
	3.1 Stratégie de numérisation d’objets inconnus	28
	3.2 Stratégie de numérisation à partir d’un modèle CAO	32
	3.3 Gestion des collisions	35
	3.4 Synthèse sur les stratégies de numérisation	37
4	Traitement des données acquises	37
	4.1 Recalage et fusion de données	39
	4.2 Segmentation ou partitionnement	42
	4.3 Filtrage	44
	4.4 Synthèse sur le traitement	45
5	Acquisition automatique	46

6	Démarche d'inspection 3D automatique multi-systèmes	50
6.1	Choix du système de numérisation 3D (A1)	55
6.2	Traitement et analyse des données (A4)	57

CHAPITRE II – QUALIFICATION ET PERFORMANCES DES SYSTÈMES

DE MESURE OPTIQUES	59
--------------------	----

1	Introduction	61
2	État de l'art sur la qualification des systèmes	61
2.1	Sources d'erreurs dégradant la qualité	61
2.2	Évaluation des performances des systèmes de numérisation	69
2.3	Synthèse	76
3	Mise en situation du protocole QualiPSO	77
3.1	Paramétrisation géométrique des capteurs sans contact	77
3.2	Caractéristiques de performance et de qualité	79
3.3	Classification des porteurs pour le protocole	81
3.4	Objectifs du protocole	82
4	Caractérisation du système	82
4.1	Évaluation de la fenêtre de mesure	82
4.2	Évaluation des remises en position du système	85
4.3	Évaluation de la calibration externe	89
5	Évaluation des indices de qualité	93
5.1	Évaluation du bruit de numérisation	93
5.2	Évaluation de la justesse	99
6	Matification	107
7	Application du protocole	109
7.1	Résultats sur les caractéristiques système	110
7.2	Résultats sur la qualité	114
7.3	Base de données qualifiées	119
8	Conclusion	121

CHAPITRE III – INSPECTION AUTOMATIQUE MULTI-SYSTÈMES : CHOIX	
DES SYSTÈMES DE NUMÉRISATION	123
<hr/>	
1	Introduction 124
2	Démarche d’inspection automatique multi-systèmes 124
3	Base de données systèmes 128
3.1	Organisation de la base de données 128
3.2	Base de données intrinsèques 129
3.3	Base de données systèmes qualifiés 133
4	Choix des systèmes de numérisation 136
4.1	Partitionnement du modèle (A11) 137
4.2	Identification des systèmes admissibles (ASI) (A12) 139
4.3	Sélection du système et configuration (A13) 147
4.4	Implémentation logicielle 153
5	Conclusion 157
CHAPITRE IV – TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES	
<hr/>	
1	Introduction 160
2	Recalage 161
2.1	Recalage global 163
2.2	Recalage local 165
2.3	Cartographie des écarts 169
3	Segmentation 170
4	Filtrage 173
4.1	Nécessité de filtrage 173
4.2	Méthodes de filtrage 178
4.3	Filtrage ondulatoire des données 3D 179
4.4	synthèse 185
5	Métriologie d’une pièce par capteur laser-plan 185
5.1	Segmentation 187
5.2	Filtrage 188
5.3	Synthèse 191

6	Conclusion	192
---	----------------------	-----

CONCLUSION ET PERSPECTIVES		195
----------------------------	--	-----

RÉFÉRENCES		199
------------	--	-----

Bibliographie	200
-------------------------	-----

Normes	216
------------------	-----

ANNEXES		219
---------	--	-----

A	Caractérisation de la fenêtre de mesure	I
---	---	---

B	Évaluation des remises en position capteurs et porteurs	III
---	---	-----

C	Évaluation du recalage des données acquises avec différentes configurations	V
---	---	---

D	Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation	VII
---	--	-----

E	Bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation	IX
---	--	----

F	Justesse de mesure en fonction de la distance de numérisation	XI
---	---	----

G	Justesse de mesure dite « relative » en fonction de la distance de numérisation	XIII
---	---	------

H	Détermination de l'accessibilité d'un capteur optique	XV
---	---	----

Table des figures

0.1	Processus général d'inspection 3D automatique multi-systèmes	3
1.1	Différents types d'acquisition multi-systèmes (d'après [ZHA10])	9
1.2	Objectifs de l'inspection 3D multi-systèmes	10
1.3	Problématiques liées à la numérisation multi-systèmes	11
1.4	Principaux constituants de la chaîne d'acquisition [CON01]	12
1.5	Classification des systèmes de numérisation [ZHA10]	13
1.6	Classification des systèmes de numérisation [VAR97]	13
1.7	Classification des technologies d'inspection [ARA11]	14
1.8	Exemples de systèmes de déplacement	15
1.9	Exemples de capteurs à contact	16
1.10	Principe de la triangulation	18
1.11	Capteur laser-plan [KREON]	18
1.12	Capteur à lumière structurée	19
1.13	Capteur chromatique cno focal [STIL]	19
1.14	Différents types d'inspection	20
1.15	Classification des systèmes de numérisation en fonction de l'incertitude de mesure et de la dimension des pièces [SAV07]	22
1.16	Classification des systèmes de numérisation en fonction de leur résolution et de leur étendue de mesure [WEC09]	22
1.17	Choix des systèmes de numérisation [ZHA10]	24
1.18	Évaluation du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation	25
1.19	Artefacts à numériser [BAR11]	26
1.20	MMT, palpeur et caméra [NAS97]	29
1.21	Photo et processus de RE pour un couple de capteurs palpeur/camera ccd [CHA01]	29

1.22	Séquence d'acquisition d'une surface (d'après [LU12])	30
1.23	Génération de trajectoires à partir d'une voxel-map [PAP97]	31
1.24	Carte de visibilité 2D (d'après [DER07])	33
1.25	Minimisation du nombre d'orientations [LOR09]	34
1.26	Trajectoires de numérisation (d'après [MAH11])	35
1.27	Boîtes englobantes contenant toutes les parties du système de numérisation [FER08]	36
1.28	Évitement des collision avec un robot de mesure et un capteur à triangulation laser (d'après [LAR08])	36
1.29	Nuage caractéristique d'un corps de pompe numérisé avec un capteur laser-plan	38
1.30	Effet du bruit de mesure sur l'évaluation de grandeurs géométriques [CON02]	38
1.31	Recalage des données numérisées sur un corps de pompe [ZHA10]	39
1.32	Recalage sur sphères [MAR08]	41
1.33	Partitionnement d'un corps de pompe (d'après [ZHA10])	43
1.34	Nuage de points issu de la numérisation d'un règle en marbre à l'aide d'un capteur laser-plan monté sur une MMT	44
1.35	Résultats du filtre de la transformée en distances [FOU06]	45
1.36	Actuelle boucle de contrôle en Fabrication [KUM07]	46
1.37	Représentation d'un processus d'inspection multi-capteurs [ZHA10]	47
1.38	Boucle de fabrication comprenant la phase d'inspection (d'après [ZHA09])	48
1.39	Boucle d'inspection sur machine avec un capteur de déplacement laser [KO07]	49
1.40	Processus général d'inspection 3D automatique multi-systèmes	51
1.41	SADT niveau A-0	52
1.42	SADT niveau A0	54
1.43	SADT niveau A1	55
1.44	SADT niveau A4	58
2.1	Sources d'imprécision [LAR04]	62
2.2	Erreur induite par un défaut d'orientation d'une tête de positionnement : différence entre capteurs à contact et capteurs optiques	63
2.3	Principales sources de bruit en mesures optiques [GOU97]	64
2.4	Schéma d'une caméra CCD [MEH06]	64

2.5	Disposition relatives des repères [MEH06]	66
2.6	Défauts de recalage et de calibration interne	66
2.7	Position relative des plans numérisés avec un capteur laser-plan et un palpeur mécanique	67
2.8	Nuage de points caractéristique : numérisation à l'aide d'un capteur laser-plan	70
2.9	Variance en Z en fonction de α [PRI99]	72
2.10	Evaluation de l'exactitude de mesure [CON02]	72
2.11	Évaluation du bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation et mise en évidence de l'influence des accélérations [MEH08]	73
2.12	Evaluation de l'exactitude de mesure pour un capteur laser-plan [FEN01] .	74
2.13	Comparaison 3D entre deux géométries reconstruites (laser vs contact) [MAR10]	75
2.14	Paramétrisation des capteurs à triangulation et confocaux	77
2.15	Fenêtre de vue des capteurs : a. fenêtre 1D (capteur confocal), b. fenêtre 2D (laser-plan), c. fenêtre 3D (lumière structurée)	78
2.16	Numérisation d'une surface plane de référence avec un capteur laser-plan .	79
2.17	Représentation graphique du bruit et de la justesse	80
2.18	Cartographie d'écarts entre les points d'une fenêtre de mesure nominale-ment plane et le plan des moindres carrés associé	83
2.19	Caractérisation de la fenêtre de mesure	84
2.20	Remise en position d'une tête de positionnement	86
2.21	Différentes configurations articulaires pour l'acquisition d'un même plan .	86
2.22	Calcul de l'erreur de recalage	89
2.23	Nuages de points superposée pour l'acquisition d'une sphère	90
2.24	Artefact sphérique	91
2.25	Configuration de référence et autres configurations	91
2.26	Calcul de l'erreur de recalage	92
2.27	Représentation du bruit de numérisation [LAR02]	94
2.28	Numérisation d'un artefact non plan : influence sur les paramètres	95
2.29	Zones de la fenêtre de mesure à caractériser en fonction du type de porteurs	96
2.30	Obtention de l'angle α	97
2.31	Résultat de l'application QualiPSO pour l'évaluation du bruit de numérisation	98

2.32	Marches réalisée avec des cales-étalon	100
2.33	Distance de numérisation pour l’acquisition d’une marche	101
2.34	Calcul de la justesse absolue sur une hauteur de marche	102
2.35	Résultat de l’application QualiPSO pour l’évaluation de la justesse	103
2.36	Différences entre la justesse de mesure et la justesse dite « relative »	104
2.37	Distance de numérisation pour une sphère	105
2.38	Justesse relative : position des plans associés par rapport au plan considéré comme référence	106
2.39	Justesse relative sur sphère : évaluation de la distance entre centres	107
2.40	Cale étalon matifiée partiellement	108
2.41	Comparaison des numérisations de la cale matifiée avec deux capteurs dif- férents	109
2.42	Profil de la fenêtre de mesure du capteur Zephyr KZ25	111
2.43	Bruit de numérisation sur l’acquisition d’une cale-étalon	111
2.44	Evolution de la distance des centres sphère à l’origine de repère mesure	112
2.45	Évaluation des remises en position du capteur Metris	113
2.46	Evolution de la distance des centres sphère à l’origine de repère mesure	114
2.47	Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation pour les MMT	114
2.48	Zones utiles des capteurs Pour garantir un bruit inférieur au seuil fixé	115
2.49	Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation pour les bras	115
2.50	Bruit de numérisation en fonction de α pour le système LC60D x_{MMT}	116
2.51	Bruit en fonction de des angles α et β pour le système G-Scan $_{bras}$	116
2.52	Justesse de mesure absolue en fonction de la distance de numérisation	117
2.53	Justesse de mesure relative en fonction de la distance de numérisation	118
3.1	SADT niveau A1	125
3.2	Classification des systèmes de numérisation	126
3.3	Base de données des systèmes de numérisation	128
3.4	Densité et temps d’acquisition avec différents capteurs	136
3.5	Dessin de définition partiel de la pièce à contrôler	137
3.6	Paramètres susceptibles d’influer sur la complexité de numérisation	140

3.7	Contexte de l'identification des systèmes admissibles	140
3.8	Implémentation logicielle de l'outil d'aide à la sélection des systèmes de numérisation	154
3.9	Organisation de la base de données	155
4.1	SADT niveau A4 : Traitement et analyse des données	160
4.2	Processus de traitement et analyse des données	161
4.3	Paramétrisation pour l'évaluation de la courbure discrète [SHM10]	162
4.4	Recalage sur un Modèle CAO [SHM10]	163
4.5	Recalage global : mise en correspondance des repères	164
4.6	Pièce test pour le recalage sur modèle CAO	165
4.7	Distance entre le point numérisé et son homologue théorique	166
4.8	Exemple de kd-trees en 2D [STA00]	168
4.9	Cartographie d'écart entre le modèle CAO et la pièce numérisée	169
4.10	Exemples de résultats de courbures	172
4.11	Résultat de la segmentation différentes pièces	173
4.12	Capteur laser-plan et MMT : Direction de numérisation	174
4.13	Identification de l'origine des défauts de numérisation sur différents artefacts	175
4.14	Nuages de points issus de la numérisation laser et du palpéage mécanique suivant différentes vues	177
4.15	Représentation de la fonction de pondération du filtre de profile [ISO11562]	179
4.16	Représentation de la fonction de pondération en deux dimensions	180
4.17	Nuages de points avant et après lissage superposés aux données palpées	181
4.18	Évolution de la planéité évaluée en fonction de la longueur d'onde de coupe	182
4.19	Identification de la plage de variation admissible de la longueur d'onde de coupe	183
4.20	Évolution du bruit de numérisation résiduel après lissage en fonction de la longueur d'onde de coupe	184
4.21	Dessin de définition partiel de la pièce à contrôler	186
4.22	Segmentation de la pièce norelem	187
4.23	Nuages de points avant et après filtage pour le plan A : influence de la longueur d'onde de coupe du filtre	188

4.24	Évolution de la planéité évaluée en fonction de la longueur d'onde de coupe λ_{co}	189
4.25	Évolution de la valeur calculée du défaut de parallélisme en fonction des longueurs d'onde de coupe du plan de référence et du plan tolérancé . .	191

Liste des tableaux

1.1	Comparaison des caractéristiques de systèmes d'acquisition [LOR09] . . .	23
1.2	Dispersion des numérisation [BAR11]	27
2.1	Relation entre les indicateurs de qualité et l'application visée [CON02] . .	71
2.2	Classification des porteurs pour l'évaluation des performances	81
2.3	Description des systèmes de numérisation testés	110
2.4	Base de données qualifiées	120
3.1	Base de données capteurs	131
3.2	Base de données porteurs	133
3.3	Base de données qualifiées	135
3.4	Partition du modèle CAO et association de l'incertitude admissible . . .	139
3.5	Indices de coût de numérisation évalués et critères de qualité	142
3.6	Résultat de l'identification des systèmes sur des critères d'aptitude	144
3.7	Indices de coût de numérisation évalués et critères de qualité	145
3.8	Indices de bruit et de justesse	146
3.9	Résultat de l'identification des systèmes admissibles	146
3.10	Pondérations relatives suggérées pour les spécification ISO GPS	150
3.11	Données qualifiées et indices de coût pour l'exemple traité	152
3.12	Pondérations suggérées pour les spécification ISO GPS	152
3.13	Résultat de la sélection des systèmes de numérisation	153
3.14	Résultat de la requête pour l'ensemble des systèmes de notre base de données	156
4.1	Résultats de l'évaluation de la planéité sur une règle en marbre	176
4.2	Résultat de la sélection des systèmes de numérisation	186

INTRODUCTION

Le domaine de l'inspection et du contrôle 3D des pièces mécaniques s'appuie traditionnellement sur une technologie parfaitement maîtrisée, celle des capteurs à contact par palpation mécanique montés sur des Machine à Mesurer Tridimensionnelles (MMT). De tels systèmes permettent d'envisager des résultats avec de faibles incertitudes. Cependant les temps de cycle restent relativement longs, incluant le temps d'exécution de la mesure mais également les temps de déplacement de la pièce hors ligne. En effet les MMT sont souvent situées à l'écart des lignes de production (*off-line*) afin de garantir des résultats optima. Dans ce contexte, de nouvelles solutions technologiques commencent à être disponibles. Ainsi les travaux menés au cours des 15 dernières années sur les capteurs sans contact ont permis de rendre cette technologie mature, ce qui se traduit par leur utilisation de manière de plus en plus répandue dans l'industrie en lieu et place des capteurs à contact. Les capteurs sans contact délivrent des quantités d'informations relatives à la géométrie des pièces en des temps relativement courts. De par leur technologie, ils sont par ailleurs facilement intégrables en lignes de production : soit sur poste dédié (des robots par exemple), soit directement sur poste de production par intégration du capteur dans la machine (mesure *in-process*). La localisation de la pièce *in situ* entraîne des gains substantiels en termes de temps de cycle. L'attrait pour la mesure sans contact est donc d'une part lié à des raisons économiques, en relation avec la diminution des temps de cycle, et d'autre part à une meilleure représentativité des éléments à mesurer compte tenu de la quantité importante de données obtenues. Il faut également souligner que le coût des capteurs sans contact diminue au fil des années et que les performances annoncées s'approchent de celles obtenues par palpation mécanique.

Bien que l'utilisation des capteurs de mesure sans contact ne cesse d'augmenter, il existe encore quelques freins à leur utilisation de façon optimisée. En effet en termes de qualité de mesure pure ces capteurs ne sont pas encore tout à fait au niveau des MMT équipées d'un capteur à contact. De plus, face à la diversité des solutions proposées (capteur laser-plan, lumière structurée, tomographie, etc.), il est souvent difficile

de choisir le ou les systèmes les plus adaptés aux besoins de l'application envisagée (inspection 3D, métrologie dimensionnelle ou géométrique, mesure de jeux, mesure de cordons de soudure, etc.). Ce choix est d'autant plus délicat que pour la plupart des applications, plusieurs systèmes peuvent être utilisés simultanément en réponse à des problèmes d'accessibilité et/ou de qualité des données acquises. Le choix d'un système s'appuie en général sur la notion de performances vis-à-vis de l'application considérée, ce qui nécessite la connaissance, l'évaluation ou la qualification des systèmes au préalable. Dans l'état actuel des choses, ce travail est difficilement réalisable par les utilisateurs. La principale raison est qu'aucune norme ne régit les performances en termes de qualité des capteurs sans contact, ce qui a pour conséquence que chaque constructeur spécifie les performances de ses systèmes à partir de définitions qui lui sont propre. Cet état de fait rend d'une part les performances énoncées difficilement reproductibles et surtout quasi impossibles toutes comparaisons entre systèmes concurrents. Ainsi nous retrouvons dans les documentations des termes relatifs aux performances tels que « précision¹ », « répétabilité », « résolution », ou encore « Erreur palpeur classique (MPE_p)² », qui n'ont pas d'unicité d'interprétation. L'absence de norme a également comme conséquence de ne pas imposer d'indicateurs de qualité ou de performance adaptés à la mesure sans contact comme par exemple le bruit de mesure qui est inhérent aux capteurs optiques. Ainsi, la sélection des systèmes de numérisation sur la base de critères de performance objectifs reste une problématique à part entière.

Si l'on s'intéresse plus spécifiquement au cas de l'inspection 3D, l'objectif est d'aboutir à une représentation numérique de la pièce permettant la vérification d'un ensemble de spécifications géométriques et dimensionnelles (Figure 0.1). Dans ce contexte, outre le choix du ou des systèmes, deux autres problèmes doivent être résolus : la définition d'une stratégie de numérisation optimisée et le traitement des données en vue de la vérification des spécifications. La stratégie de numérisation doit conduire à la définition des trajectoires de numérisation pour les systèmes considérés, trajectoires exemptes de collision, et optimisées selon le temps de mesure et les critères de qualité retenus. À partir des données acquises, souvent de natures différentes (nuages de points, maillages ou encore images), des algorithmes de traitement spécifiques sont souvent nécessaires afin d'extraire des informations obtenues les grandeurs à évaluer. Il s'agit en particulier

1. source Kreon

2. source Nikon metrology

de fusionner des données de natures différentes, de recalibrer des nuages de points obtenus par différents capteurs ou encore de segmenter les données en entités. De plus, s'agissant de données acquises par moyens optiques, celles-ci sont très généralement entachées de bruit de mesure qui rend difficile leur exploitation sans une opération de lissage préalable. Il est à noter que le bruit est bien souvent de l'ordre de grandeur des défauts à évaluer.

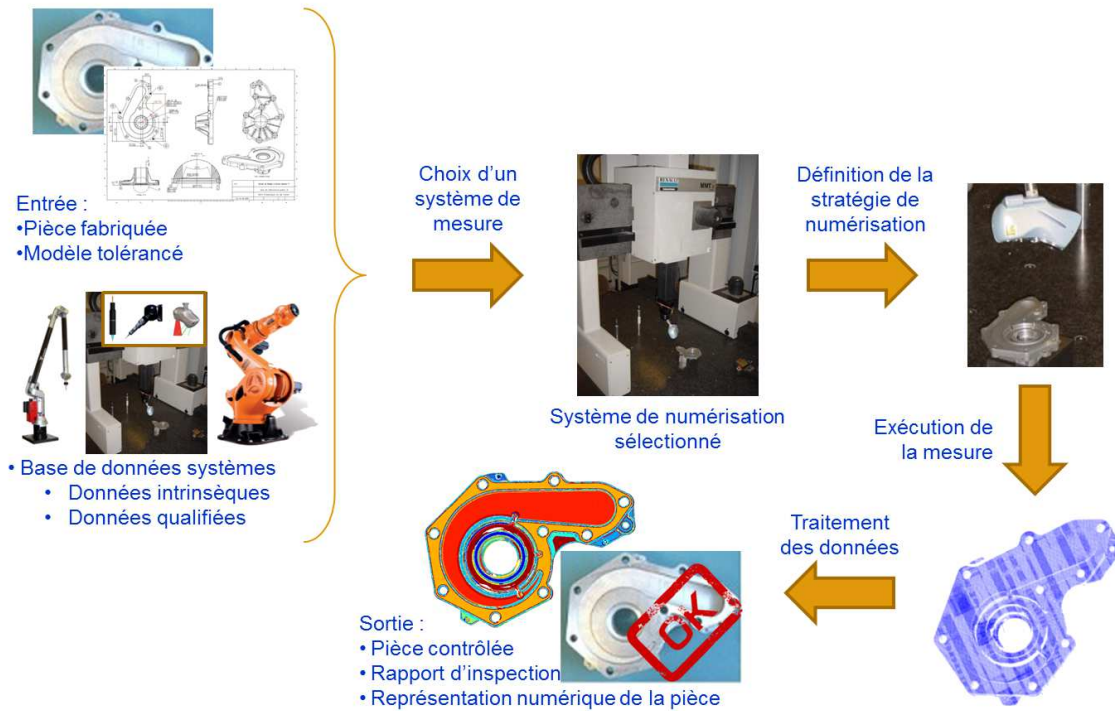


Figure 0.1 – Processus général d'inspection 3D automatique multi-systèmes

Dans ce contexte, nous avons proposé une approche globale en réponse au problème de la métrologie 3D automatique multi-systèmes. Cette approche se découpe selon les trois problématiques majeures évoquées ci-dessus : choix des systèmes de numérisation, élaboration des stratégies de numérisation et traitement des données.

Concernant le choix des systèmes de numérisation, nous nous sommes attachés à proposer une méthode de sélection en relation étroite avec les spécifications géométriques et dimensionnelles à vérifier. À l'heure actuelle les systèmes sont choisis à partir des données constructeur qui peuvent s'avérer ne pas être réalistes vis-à-vis des conditions d'utilisation envisagées (environnement, matériau de la pièce, finition de la surface, etc.). L'approche que nous proposons, essentiellement appliquée à la métrologie 3D, permet la sélection des systèmes de numérisation en fonction de critères d'aptitude, de qualité

ou encore de performance en regard de la spécification à vérifier. Les critères d'aptitude et de performance sont associés à des données intrinsèques aux systèmes telles que la technologie du capteur, sa résolution, sa vitesse d'acquisition, etc., alors que les critères de qualité s'attachent à évaluer la qualité des données acquises par le système. Avec pour objectif la comparaison et la sélection de systèmes de mesure il est ici nécessaire de disposer d'informations comparables entre les différents systèmes en cohérence avec l'application.

En réponse à ce problème, nous présentons ici un protocole de qualification générique des systèmes de mesure optiques. Ce protocole de Qualification des Performances des Systèmes Optiques (« QualiPSO ») se veut applicable à toute combinaison système de déplacement/technologie de capteurs classiquement présente dans l'industrie. La qualification est effectuée au travers d'indicateurs de qualité tels que le bruit de numérisation et la justesse de mesure, mais également au travers d'indicateurs plus généraux relatifs au système tels que l'évaluation de la méthode de calibration du système. De façon à valider sa pertinence et sa généricité, ce protocole a été mis en œuvre par différents utilisateurs dans différents laboratoires universitaire³, ce qui a permis la prise en compte d'un premier retour d'expérience. L'ensemble du protocole, et la justification du choix des indicateurs de qualité retenus fait l'objet d'une argumentation détaillée au sein du chapitre II.

Les premières utilisations de QualiPSO ont permis de générer un certain nombre de données qualifiées pour les systèmes testés. Ces résultats sont regroupés dans une base de connaissances de la qualité des systèmes de numérisation optiques vouée à s'élargir avec le temps. À cette base de connaissances, nous avons associé une deuxième partie qui stocke des informations dites intrinsèques inhérentes aux systèmes. L'ensemble constitue la base de données des systèmes de mesure que nous proposons et qui constitue l'outil central de la démarche de sélection de systèmes de mesure proposée.

La constitution de la base de données ne suffit pas à sélectionner le ou les systèmes de mesure. Il faut en effet mener un travail d'analyse du contenu de la base en lien direct avec l'application envisagée, ce travail qui conduit à la sélection est détaillé tout au long du chapitre III. Dans un contexte de métrologie 3D, il est indispensable d'obtenir une représentation numérique de chacune des surfaces nécessaires à la vérification d'une spécification. Le système ou les systèmes retenus doivent dans un premier temps

3. LURPA, Le2i, IRCCyN

être aptes à l'acquisition de la surface, en termes d'accessibilité, de nature de surface, ou encore de résolution vis-à-vis de la grandeur à évaluer. En métrologie 3D classique, l'acquisition est réalisée par un moyen de mesure dont l'incertitude est compatible (ou cohérente) avec la tolérance indiquée. Nous proposons d'avoir la même démarche pour la sélection du système de numérisation sans contact. Cependant, face à la difficulté de définir la notion d'incertitude de mesure pour de tels systèmes, celle-ci est remplacée par la notion d'indice de qualité : l'indice de qualité du système doit être cohérent avec la tolérance indiquée. Cette étape permet la sélection des systèmes admissibles au sens de la qualité de mesure. Elle est complétée par une étape d'évaluation des performances des systèmes, en termes de temps de mesure de façon à optimiser les temps de cycle. L'étape d'évaluation des performances conduit à sélectionner le système respectant les indices de qualité à coût minimal.

Dans le cas de l'utilisation des systèmes de mesure sans contact, les données acquises présentent un certain nombre de caractéristiques qui rendent difficile leur exploitation sans une étape de traitement au préalable. Les données sont bruitées, non homogènes, et constituent un ensemble de points ou un maillage représentatif de plusieurs surfaces d'une même pièce. L'étape de traitement réalise un certain nombre d'opérations, telles que le recalage, la fusion ou encore le partitionnement en surfaces élémentaires, afin d'obtenir un nuage de points par surface, exploitable pour les calculs métrologiques. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à quelques unes de ces opérations dans le chapitre IV afin de valider plus particulièrement la pertinence de l'utilisation de capteurs laser-plan pour la métrologie 3D. En ce sens, nous avons travaillé en collaboration avec le CMLA⁴ au travers d'un projet de l'institut Farman⁵ multidisciplinaire afin de proposer un algorithme de segmentation des nuages de points permettant le découpage des nuages bruts en surfaces élémentaires.

Par ailleurs les travaux de traitement introduits dans le chapitre IV comptent un volet consacré à la réduction de l'influence du bruit de mesure omniprésent dans les données issues de la mesure sans contact. En effet ce bruit pouvant être de l'ordre de grandeur des quantités à évaluer, il peut s'avérer très pénalisant pour la vérification des spécifications géométriques. Le filtrage apparaît donc indispensable. La singularité du filtre développé réside dans le fait qu'il permet d'éliminer le bruit sur les données issues d'un capteur

4. Centre de mathématiques et de leurs applications, ENS Cachan www.cmla.ens-cachan.fr/

5. www.farman.ens-cachan.fr

laser-plan tout en conservant les défauts inhérents aux surfaces fabriquées.

L'application d'un tel filtre permet ensuite l'exploitation du nuage pour la vérification des spécifications selon les méthodes classiques. Le chapitre suivant est consacré au positionnement de nos travaux dans le contexte général de la numérisation automatique multi-systèmes.

Chapitre I

NUMÉRISATION 3D AUTOMATIQUE MULTI-SYSTÈMES

Sommaire

1	Introduction	9
2	Choix des systèmes	11
2.1	Les systèmes de numérisation	12
2.1.1	Classification des systèmes	12
2.1.2	Systèmes de déplacement	14
2.1.3	Systèmes d'acquisition pour l'inspection 3D	16
2.1.4	Cadre de l'étude	20
2.2	Choix des systèmes de numérisation	21
2.2.1	Études dites qualitatives	21
2.2.2	Études dites quantitatives	24
2.2.3	Synthèse	27
3	Stratégie de numérisation et planification de trajectoires	28
3.1	Stratégie de numérisation d'objets inconnus	28
3.2	Stratégie de numérisation à partir d'un modèle CAO	32
3.2.1	Optimisation des points de vue	32
3.2.2	Optimisation de la qualité des données	34
3.3	Gestion des collisions	35
3.4	Synthèse sur les stratégies de numérisation	37
4	Traitement des données acquises	37
4.1	Recalage et fusion de données	39
4.2	Segmentation ou partitionnement	42
4.3	Filtrage	44
4.4	Synthèse sur le traitement	45

5	Acquisition automatique	46
6	Démarche d'inspection 3D automatique multi-systèmes	50
6.1	Choix du système de numérisation 3D (A1)	55
6.2	Traitement et analyse des données (A4)	57

1 Introduction

La numérisation 3D consiste à acquérir les surfaces des pièces, au moyen d'un système de mesure, de façon à obtenir une représentation numérique de la géométrie des pièces. L'acquisition multi-systèmes, ou communément appelée acquisition multi-capteurs permet de réaliser l'acquisition de la géométrie d'une pièce avec différents systèmes de numérisations. Le besoin peut être dû à des problèmes d'accessibilité, à une nécessité d'information avec une meilleure résolution localement, ou encore à une acquisition multi-échelles. Trois configurations d'acquisition multi-systèmes ont été identifiées par Durrant-Whyte [DUR88] puis repris par Weckenmann *et al* [WEC09] (Figure 1.1) : acquisitions complémentaires, compétitives et coopératives.

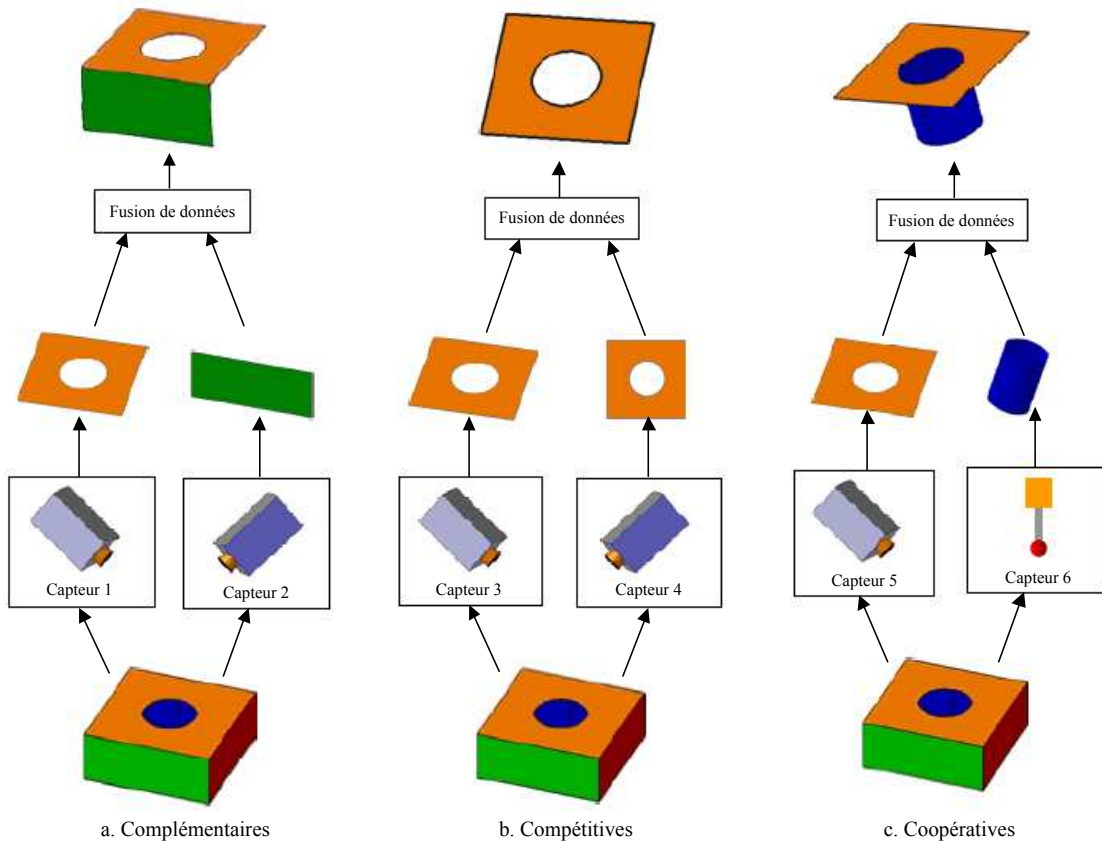


Figure 1.1 – Différents types d'acquisition multi-systèmes (d'après [ZHA10])

Lors d'acquisitions complémentaires les systèmes de numérisation sont indépendants mais les données collectées sont fusionnées afin d'obtenir une représentation plus complète de la pièce. La configuration complémentaire permet de régler des problèmes d'accessibilité ou d'optimiser l'orientation du capteur par rapport à la surface pour optimiser

le contraste [HEI03].

Les acquisitions compétitives permettent l'acquisition de la même surface avec des systèmes de numérisations similaires configurés indépendamment dans le but d'accroître la qualité en introduisant de la redondance dans la mesure [ZHA10].

Enfin les acquisitions coopératives utilisent des systèmes de numérisation de technologies différentes, ce qui permet d'acquérir des surfaces qui ne pourraient pas l'être avec des systèmes de même technologie. Les données fournies par les différents systèmes sont inhomogènes, c'est-à-dire de densités différentes, mais aussi potentiellement de natures différentes (maillage, nuage de points, image, etc.). Les acquisitions coopératives sont utilisées par exemple pour guider le palpement mécanique sur MMT avec une caméra [NAS97, CHA01] ou pour acquérir les surfaces inaccessibles [ZEX05].

L'acquisition multi-systèmes peut être utilisée dans le cadre de l'inspection 3D, l'inspection 3D étant un processus qui permet de vérifier l'exactitude d'une pièce manufacturée par rapport à un ensemble de spécifications données [NEW95, PRI00a, LI04]. Ainsi, l'inspection 3D permet, le contrôle de caractéristiques métrologiques (métrologie 3D), mais également le contrôle de caractéristiques géométriques tridimensionnelles telles que par exemple les courbures et les lignes de style.

Pour l'inspection 3D multi-systèmes plusieurs systèmes de numérisation peuvent être utilisés, simultanément ou non. À partir de spécifications données et d'un ensemble de systèmes de numérisation à disposition, l'objectif est alors d'aboutir à un rapport de vérification des spécifications (Figure 1.2) et/ou à une représentation numérique de la pièce.

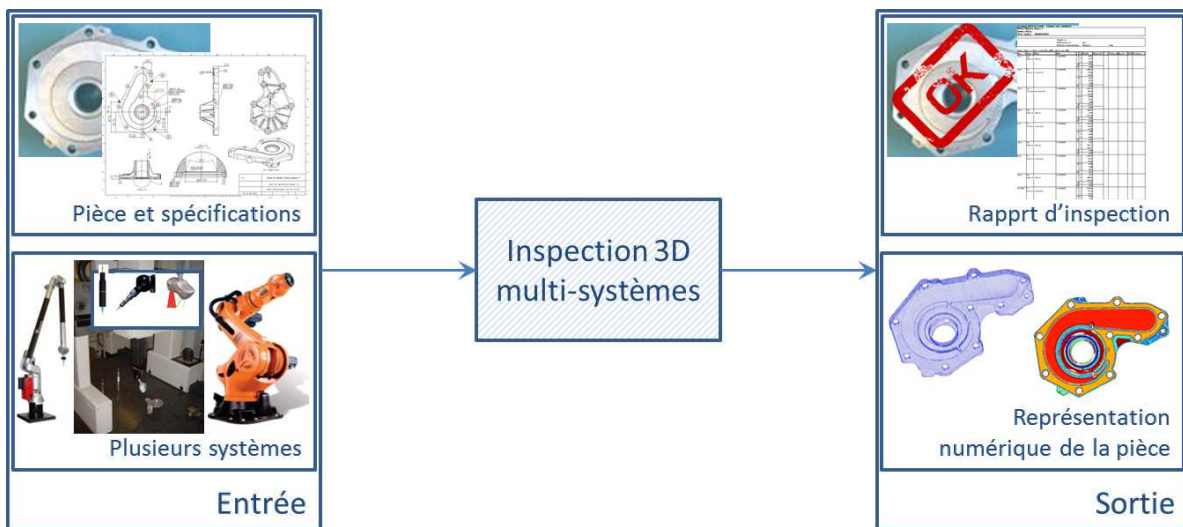


Figure 1.2 – Objectifs de l'inspection 3D multi-systèmes

Cet objectif conduit à distinguer trois problématiques majeures relativement à la numérisation 3D multi-systèmes (Figure 1.3) : le choix des systèmes de numérisation, la définition d'une stratégie de numérisation cohérente et le traitement des données.

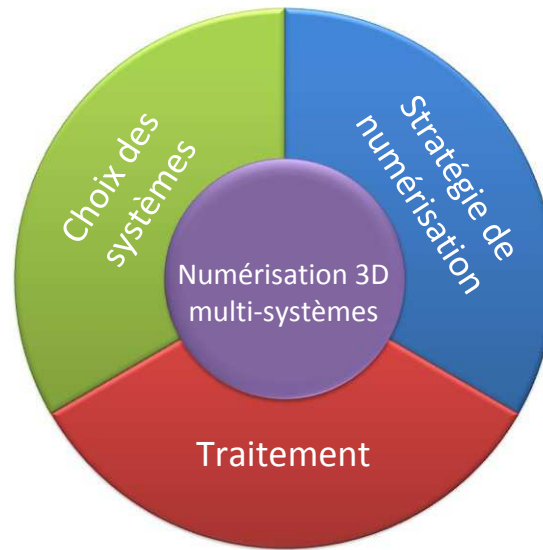


Figure 1.3 – Problématiques liées à la numérisation multi-systèmes

Chacune de ces problématiques n'est pas indépendante. La définition d'une stratégie de numérisation et le traitement des données sont en particulier très liés aux systèmes de numérisation choisis. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés aux travaux existants dans la littérature autour de ces trois grandes problématiques, avec pour application principale l'inspection 3D. Nous présentons ensuite l'approche que nous proposons afin de répondre au problème d'inspection 3D automatique multi-systèmes, cadre général de notre étude.

2 Choix des systèmes

Nous présentons dans cette section les travaux de la littérature relatifs au choix du système de numérisation. Pour ceci, nous détaillons dans un premier temps les systèmes de numérisation les plus courants dans l'industrie.

2.1 Les systèmes de numérisation

La numérisation d'objets nécessite un système d'acquisition de données (coordonnées, géométrie), couplé à un système de déplacement et à un système de traitement (Figure 1.4).

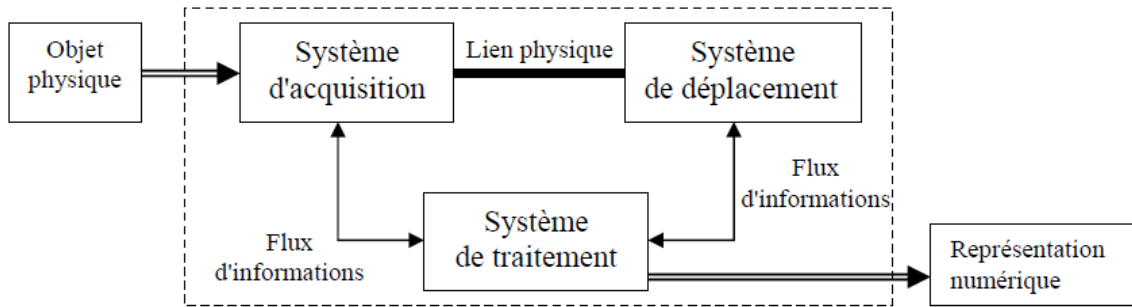


Figure 1.4 – Principaux constituants de la chaîne d'acquisition [CON01]

L'objectif de la numérisation est, partant d'un objet physique, obtenir une représentation numérique de la géométrie de sa surface, sous forme d'un nuage de points, un maillage, ou tout autre type de représentation numérique. Le système d'acquisition (ou capteur) permet d'acquérir des données de la surface. Le système de déplacement (ou porteur) permet de déplacer le capteur et/ou l'objet afin d'acquérir la pièce dans son ensemble. Enfin le système de traitement permet d'obtenir des données géométriques cohérentes (coordonnées 3D généralement) à partir des données brutes fournies par le capteur et/ou le porteur. Ce système de traitement est en général fortement lié au couple capteur/porteur, et ne fera pas l'objet d'une étude spécifique.

2.1.1 Classification des systèmes

Plusieurs classifications des systèmes de numérisation sont proposées dans la littérature. Ces différentes classifications ne prennent que rarement en compte le système de déplacement. En effet, c'est plutôt la technologie liée à l'acquisition des points qui est mise en avant, c'est-à-dire le capteur. Néanmoins ces différentes classifications s'accordent sur le fait de séparer les capteurs à contact des capteurs sans contact [VAR97, BOU98, CHR04]. Parmi les capteurs à contact, deux sous familles apparaissent : les palpeurs à déclenchement et les palpeurs de scanning (ou palpeurs dynamiques).

Concernant les capteurs sans contact, ces derniers sont en général divisés en sous-familles correspondant à la nature de la grandeur d'entrée du capteur. Ainsi une distinc-

tion est réalisée entre les capteurs détectant un rayon lumineux (capteurs optiques), une onde sonore (capteurs acoustiques), une onde magnétique (capteurs magnétiques) ou encore des rayons X (tomographie) [VAR97, ZHA10]. Dans le cadre des mesures dimensionnelles géométriques les capteurs optiques sont les plus largement utilisés et peuvent être différenciés par le fait qu'ils soient actifs ou passifs [BER07, ZHA10] (Figure 1.5).

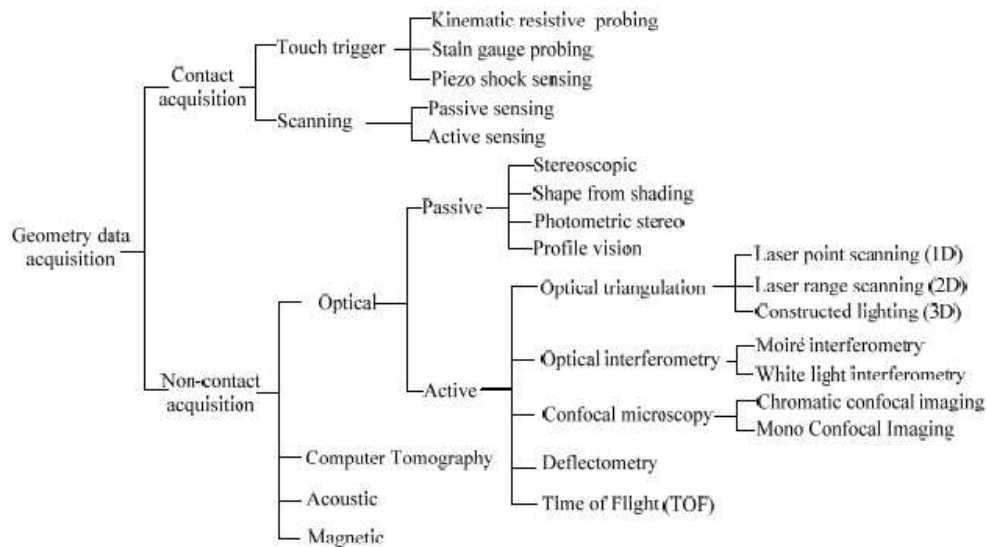


Figure 1.5 – Classification des systèmes de numérisation [ZHA10]

Un capteur optique actif est un capteur qui émet une source lumineuse ; c'est le cas notamment pour les capteurs laser, les capteurs à lumière structurée, ou encore les capteurs chromatiques confocaux. En revanche, un capteur passif n'émet pas de lumière ; une ou plusieurs caméras observent la scène, une calibration externe du dispositif permet de définir la position d'un point 3D observé par plusieurs caméras.

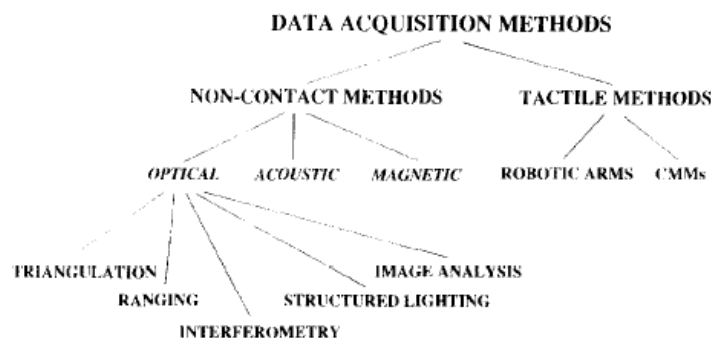


Figure 1.6 – Classification des systèmes de numérisation [VAR97]

Quelques classifications de la littérature font apparaître les porteurs comme celle de Várady *et al* qui distinguent les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) des bras polyarticulés. Cependant seuls les capteurs à contact sont considérés (Figure 1.6).

De leur côté, Arámbula *et al* [ARA11] font intervenir les machines-outils (MOCN) et les MMT en réalisant une classification des technologies d'inspection en fonction du type de contrôle, de conditions de ce dernier (en ligne (*real-time*) ou hors ligne (*Offline*), Figure 1.7).

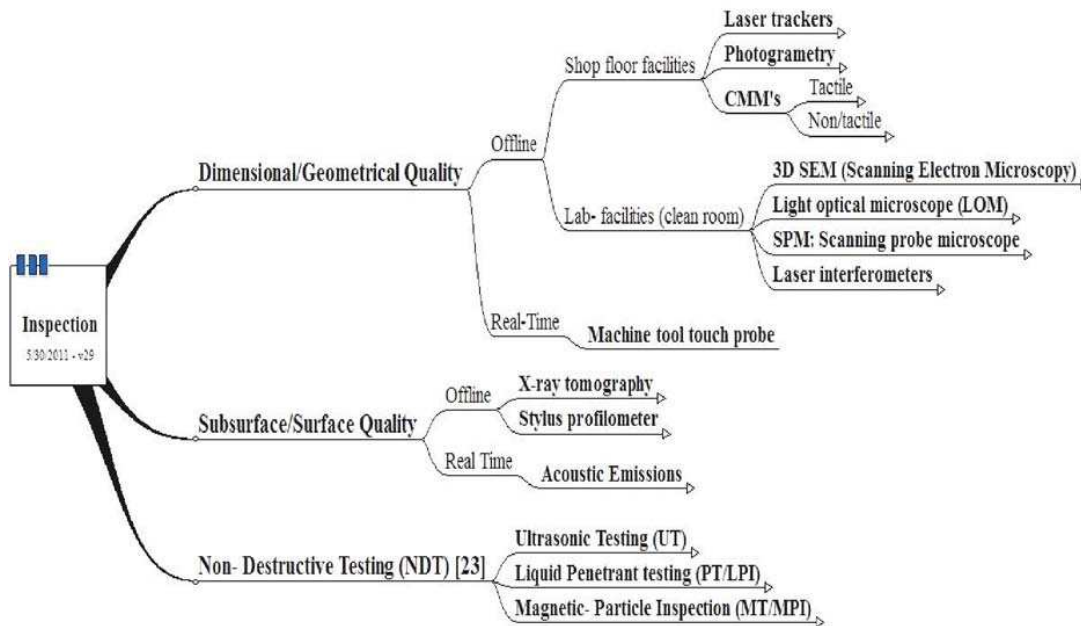


Figure 1.7 – Classification des technologies d'inspection [ARA11]

Il apparaît donc que les classifications diffèrent d'une étude à l'autre ; elles sont en général adaptées à l'application et au contexte industriel considéré. Dans la suite nous décrivons succinctement les différentes technologies de porteurs et de capteurs les plus couramment utilisées pour l'inspection 3D.

2.1.2 Systèmes de déplacement

Le système de déplacement (ou porteur) a pour fonction de maintenir le capteur en position et éventuellement de déplacer le capteur et/ou l'objet en vue d'une acquisition. Nous pouvons distinguer différentes grandes familles de porteurs, sans que cette liste soit exhaustive.

□ Les machines dédiées sont les porteurs les plus utilisés pour la métrologie 3D. Ces machines peuvent être spécifiques à l'utilisation d'un capteur (Station de micromesure

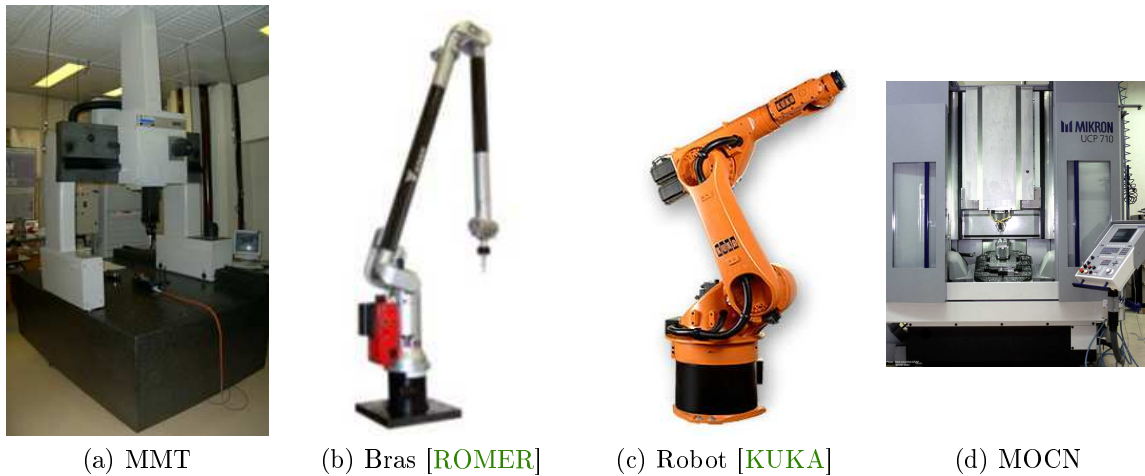


Figure 1.8 – Exemples de systèmes de déplacement

STIL par exemple), ainsi la cinématique machine est adaptée à l'utilisation du capteur. Cependant les machines les plus répandues dans l'industrie sont les Machines à Mesurer Tridimensionnelles (MMT) qui permettent l'intégration de différents capteurs avec ou sans contact (Figure 1.8a). Les machines, dédiées à la métrologie, ont une grande qualité géométrique et sont généralement composées de trois axes de translation ainsi que d'un organe orientant relativement le capteur par rapport à la pièce (tête de positionnement, plateau tournant).

□ Les bras polyarticulés sont de plus en plus utilisés car ils sont transportables facilement et offrent une bonne maniabilité (Figure 1.8b). Ils sont en général constitués d'un grand nombre d'axes de rotations (jusqu'à 7 axes) permettant une accessibilité dans les zones les plus délicates. Le capteur monté en bout de bras est déplacé manuellement par l'utilisateur ce qui ne permet pas d'automatisation de l'acquisition. Le principal frein à l'utilisation de tels systèmes pour la métrologie est l'incertitude des données fournies par les différents codeurs, ainsi que la dilatation des pièces qui composent le bras, ces systèmes étant prévus pour être déplacés dans un atelier, donc dans un environnement où les variations thermiques sont importantes. Bien que largement utilisés avec des palpeurs à contact, les bras polyarticulés sont de plus en plus utilisés avec des capteurs optiques.

□ Les robots de mesure, ou bras robotisés, fonctionnent sur le même principe que les bras polyarticulés, à la différence que leurs articulations sont motorisées (Figure 1.8c). Ces porteurs particuliers sont essentiellement utilisés dans l'industrie pour réaliser un contrôle en ligne de production sans qu'il y ait nécessité de démonter la pièce de son porte-pièce.

□ Les Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN) sont plus généralement utilisées pour l'usinage d'une pièce mécanique (Figure 1.8d). Ces machines, non prévues pour la mesure à l'origine, sont néanmoins de plus en plus utilisées afin de réaliser des contrôles sur machine (*on-machine inspection*), afin de diminuer les temps de transfert dans l'atelier, diminuer le nombre de machines de contrôle ainsi que d'augmenter le taux d'occupation des machines d'usinage. Ainsi, en plus des capteurs à contact généralement utilisés pour déterminer la position de la pièce dans la machine, il est à présent possible d'utiliser des capteurs optiques ([QUI12] par exemple). Les principaux problèmes résident dans la synchronisation des données capteur et porteur ainsi que dans la gestion des changements d'outils avec des capteurs.

2.1.3 Systèmes d'acquisition pour l'inspection 3D

Comme nous l'avons vu précédemment, nous pouvons distinguer deux catégories de capteurs : les capteurs à contact et les capteurs sans contact.

2.1.3.1 Les capteurs à contact

Dans le domaine de l'inspection 3D, et particulièrement en métrologie, les capteurs à contact se sont imposés depuis longtemps grâce à la qualité des données qu'ils fournissent, en particulier lorsqu'ils sont utilisés avec une MMT. Ils sont essentiellement de trois types : palpeurs, rigides, palpeurs à déclenchement et palpeurs de scanning [BOU87].

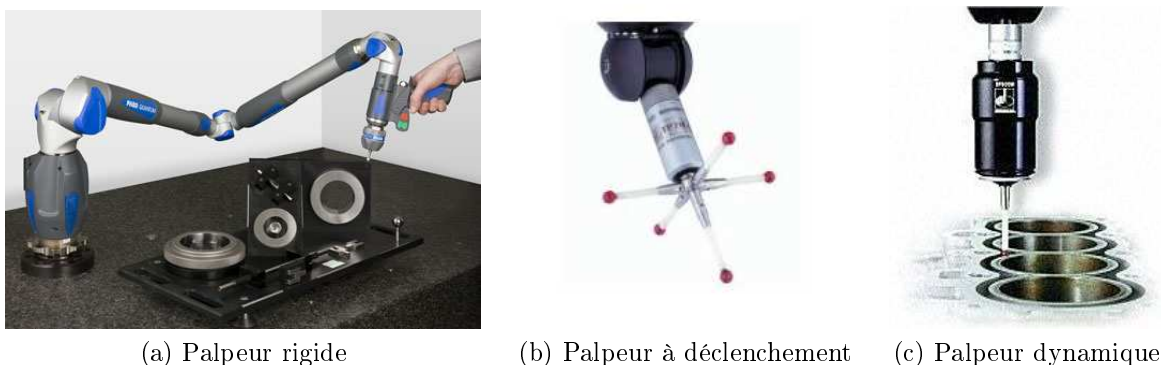


Figure 1.9 – Exemples de capteurs à contact

□ Les palpeurs rigides sont constitués d'une sphère en liaison encastrement avec le corps du capteur. Ces derniers sont utilisés exclusivement sur les bras polyarticulés

(Figure 1.9a). En effet, le déclenchement de la mesure est réalisé manuellement lorsque l'opérateur a positionné la sphère du palpeur en contact avec le point à acquérir. Au moment du déclenchement, les données fournies par les codeurs du bras sont relevées.

□ Les palpeurs à déclenchement, à l'instar des palpeurs rigides, ils permettent l'acquisition de points prédéfinis en amenant le palpeur au contact avec les surfaces. Ces capteurs sont constitués d'une partie mobile (stylet) dont l'extrémité est généralement une bille mise en contact avec la surface à acquérir. Ce sont les capteurs les plus largement utilisés dans le cadre de la métrologie tridimensionnelle (Figure 1.9b), mais leur fréquence d'acquisition ne permet pas d'acquérir plus de quelques points par seconde.

□ Les palpeurs de scanning, ou palpeurs mesurant, permettent l'acquisition de points à haute fréquence ($\sim 1\,000$ Hz) avec un contact continu sur la surface (Figure 1.9c). De la même façon que pour les palpeurs à déclenchement, il y a une partie mobile (stylet) et un corps fixe. Les applications sont similaires. L'avantage de ces capteurs, en dépit d'une qualité sensiblement inférieure à celle des autres capteurs à contact, est de fournir une meilleure représentation de la surface numérisée à travers une densité de points importante le long du trajet de scanning.

2.1.3.2 Les capteurs sans contact optiques

La mesure sans contact a vu son essor dans les années 1990 pour l'acquisition des pièces souples [CHE95] qui ne peuvent être mesurées par contact pour des raisons de flexion de la pièce durant la mesure ou d'intégrité de la pièce (surface détériorée par l'acquisition avec contact). Dans les années 2000, ces systèmes ont été de plus en plus utilisés à des fins de *Reverse Engineering* (RE¹) [BEN01, CAR01, SON02, MEH06a, LAR07, DUR10]. Nous présentons ici les grandes technologies de systèmes d'acquisition optiques actifs, qui font partie de notre étude.

□ Les systèmes d'acquisition optiques les plus répandus dans le domaine de l'inspection sont les capteurs à triangulation. Le principe de base est l'utilisation d'un émetteur qui projette une source lumineuse sur la surface, et un récepteur (en général une caméra) qui reçoit les rayons réfléchis par la surface. La position relative de l'émetteur et du récepteur est connue (Figure 1.10), ce qui permet de connaître la distance p entre le capteur et la surface par l'équation 1.1.

1. Reverse Engineering : activité de rétro-conception, création d'un modèle à partir d'une pièce réelle.

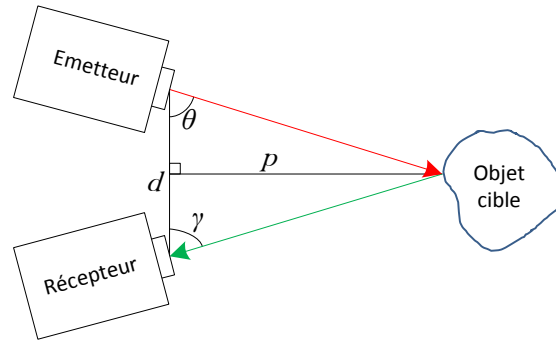


Figure 1.10 – Principe de la triangulation

$$p = \frac{d}{\cotan \theta + \cotan \gamma} \quad (1.1)$$

Parmi les capteurs à triangulation, certains ont une fenêtre de mesure 1D (capteur laser ligne), une fenêtre de mesure 2D (capteurs laser plan) ou une fenêtre de mesure 3D (projection de franges, de mouchetis, etc.). Néanmoins le principe reste le même, la caméra qui observe la scène est en général une caméra CCD (Charge-Coupled Device) d'une ou deux dimensions. Les points 3D de la scène sont projetés dans l'espace 2D (ou 1D) de la caméra. À partir d'une calibration interne du capteur, les données 2D sont exprimées dans un repère 3D lié au capteur.

Les capteurs à triangulation les plus répandus sont les capteurs à triangulation laser (laser-ligne et laser-plan). La source lumineuse projetée sur la pièce est une source laser (Figure 1.11). Une calibration externe permet d'exprimer les données 3D capteur dans le repère de mesure, repère commun à toutes les données acquises.

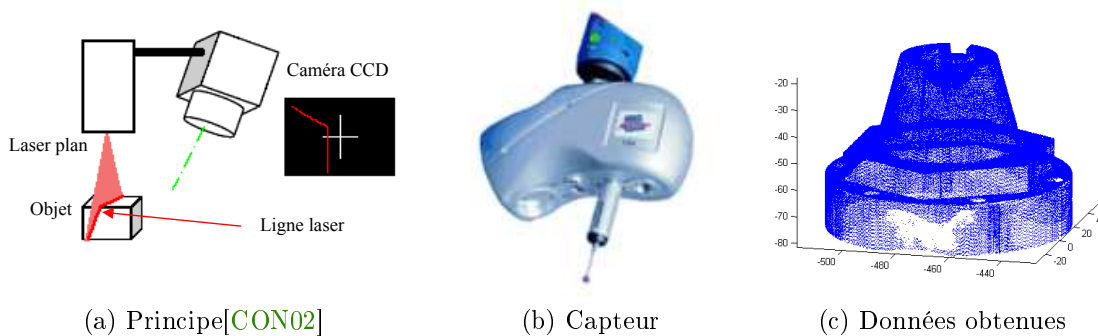


Figure 1.11 – Capteur laser-plan [KREON]

Les capteurs à triangulation projetant une lumière structurée sont de plus en plus utilisés (Figure 1.12); leur fenêtre de mesure 3D leur permet une grande vitesse d'acquisition. En effet, le temps d'une acquisition est celui de la prise d'une photo, et les

fenêtre de mesure sont relativement grandes (d'un format A5 [NOOME0] à plusieurs m^2 [GOM]). Contrairement aux capteurs laser classiques, il n'y a pas pour ces capteurs de calibration externe permettant de recalibrer les données. Les différentes acquisitions doivent avoir des zones de recouvrement afin que les données soient recalées à l'aide d'analyses de forme du maillage (position et courbure des nœuds par exemple)

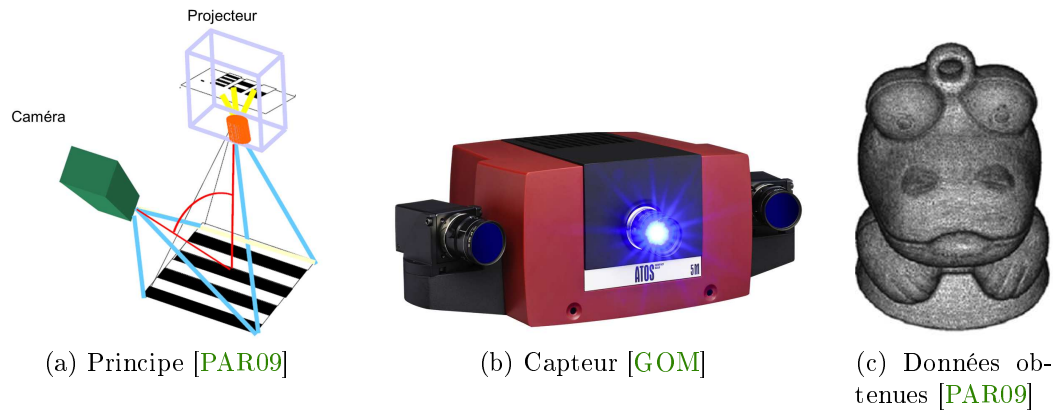


Figure 1.12 – Capteur à lumière structurée

□ Parmi les capteurs optiques actifs courants nous pouvons également citer les capteurs confocaux. Pour ce type de capteurs l'axe optique de l'émetteur et du récepteur sont confondus.

Parmi les capteurs confocaux, il existe des capteurs utilisant la lumière blanche comme source lumineuse (émetteur). Nous pouvons citer par exemple l'imagerie confocale chromatique (Figure 1.13)). Ces capteurs sont utilisés en général dans un contexte de métrologie des états de surface car ils présentent une résolution de l'ordre de quelques nanomètres. Ils peuvent être intégrés sur des stations de mesure dédiées, ou sur des MOCN [QUI12] voire des MMT [COS07].

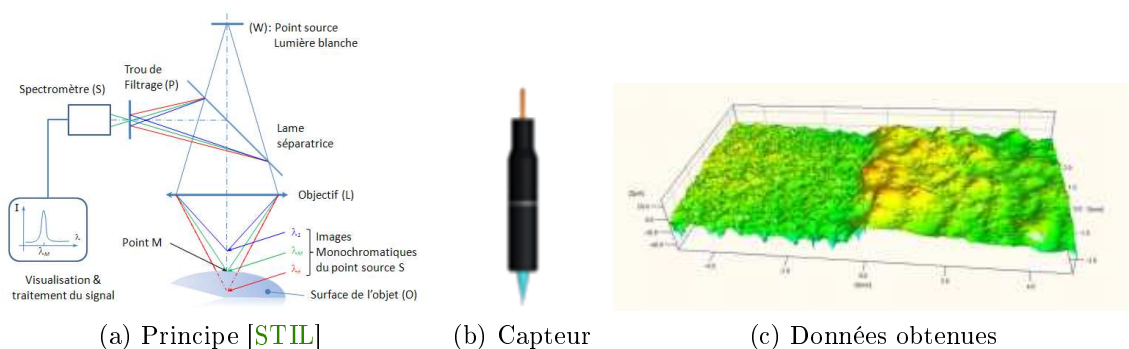


Figure 1.13 – Capteur chromatique confocal [STIL]

Les capteurs tels que les laser tracker (et les laser tracer) sont plutôt utilisés pour

les mesures de pièces de grandes dimensions (aéronautique, aérospatiale, etc.) ainsi que pour la caractérisation des défauts de machines (MMT, MOCN).

2.1.4 Cadre de l'étude

Plusieurs études ont permis de montrer l'intérêt des systèmes de mesure sans contact dans un contexte de métrologie 3D. Prieto [PRI99] met en avant l'intérêt des capteurs optiques au sens large en déterminant les configurations capteur/pièce qui permettent d'obtenir la meilleure qualité de données. Schwenke *et al* [SCH02] ont recensé les différents moyens optiques utilisables en métrologie dimensionnelle en précisant les caractéristiques métrologiques pour chacun des systèmes présentés. Par la suite Mahmud a utilisé un capteur laser plan pour la vérification de spécifications géométriques et dimensionnelles [MAH07].

La diversité des capteurs pouvant être associés à un choix de plus en plus important de porteurs conduit désormais à une plus grande variété de systèmes de numérisation. Comme nous l'avons vu en introduction, ceux-ci peuvent être utilisés simultanément dans le cadre de l'inspection 3D.

Il est possible d'envisager trois contextes différents : en ligne (*on-line*), c'est-à-dire sur la ligne de production ; sur machine (*on-machine*), c'est-à-dire directement sur la machine de fabrication ; ou encore hors ligne (*off-line*) dans un laboratoire de métrologie par exemple (Figure 1.14).

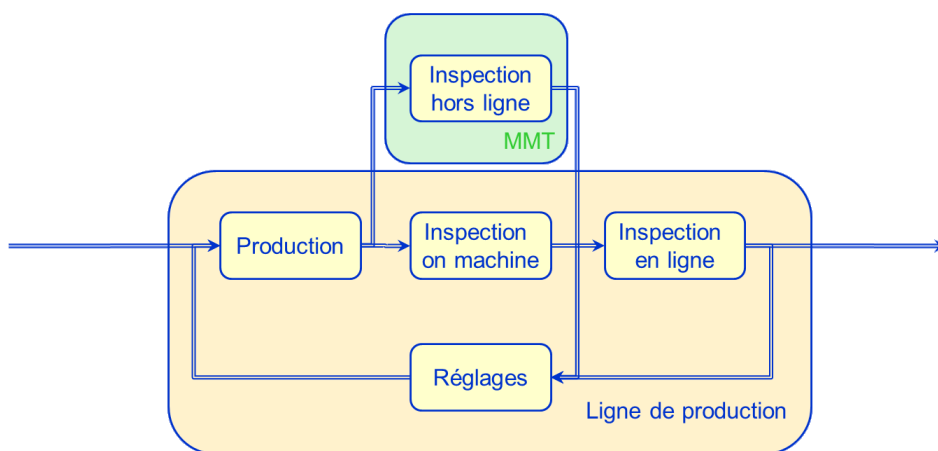


Figure 1.14 – Différents types d'inspection

Le choix du porteur et le posage de la pièce définissent le contexte d'inspection. Pour l'inspection sur machine, le posage de la pièce est imposé par la dernière phase de fabrication de la pièce qui reste en place sur la table de la MOCN. Le choix du porteur

est alors restreint aux porteurs qui permettent la numérisation de la pièce dans cette position : soit la MOCN elle-même, un bras robotisé ou polyarticulé. Pour l'inspection hors ligne, le choix du porteur et du posage peut être laissé libre au métrologue.

Après avoir fixé le cadre général de notre étude, nous nous intéressons aux critères de choix des systèmes de numérisation proposés dans la littérature.

2.2 Choix des systèmes de numérisation

Le choix des systèmes de numérisation constitue une partie majeure de l'acquisition multi-systèmes. Cependant, très peu de travaux évoquent ce point sensible. Le système doit en effet être choisi en accord avec l'application, ce qui nécessite de connaître la qualité et les performances des systèmes à disposition, et surtout d'utiliser des critères de choix entre des systèmes de technologies différentes et donc difficilement comparables.

Nous proposons une séparation des travaux de la littérature en deux parties : les études dites « qualitatives » qui permettent de définir un certain nombre d'heuristiques pour réaliser un choix en fonction de l'application, et les études dites « quantitatives » qui permettent d'évaluer la qualité des capteurs indépendamment de l'application.

2.2.1 Études dites qualitatives

Nous pouvons citer quelques travaux qui définissent un certain nombre d'heuristiques afin de choisir une famille de capteurs en fonction des dimensions de la pièces, de l'incertitude de mesure imposée, ou de la résolution [TON01, SAV07, WEC09]. Ainsi Savio *et al* [SAV07] proposent un guide de sélection du type de systèmes de numérisation en fonction des dimensions de la pièce et de l'incertitude de mesure (Figure 1.15). Cette étude définit des heuristiques sur le choix du système, mais la sélection reste qualitative et est réalisée par catégorie de systèmes. Cependant, nous constatons que des systèmes de même catégorie peuvent avoir une qualité et des performances très différentes, comme les capteurs laser-plan par exemple qui présentent des performances différentes selon les constructeurs (cf chapitre II).

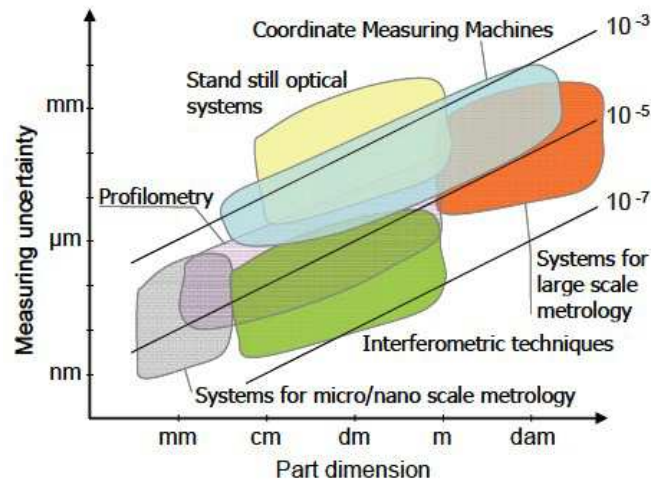


Figure 1.15 – Classification des systèmes de numérisation en fonction de l'incertitude de mesure et de la dimension des pièces [SAV07]

Dans une vision de fusion des données multi-capteurs Weckenmann *et al* [WEC09] proposent une classification des systèmes de numérisation en fonction de leur résolution et de leur étendue de mesure (Figure 1.16). Comme pour les travaux de Savio *et al*, cette étude reste qualitative et ne permet pas de réaliser un choix entre deux capteurs. Ces classifications sont réalisées sans évaluation des systèmes et reprennent donc les caractéristiques constructeur. Différents critères sont proposés pour la classification (Résolution, étendue de mesure, incertitude de mesure, dimension de la pièce).

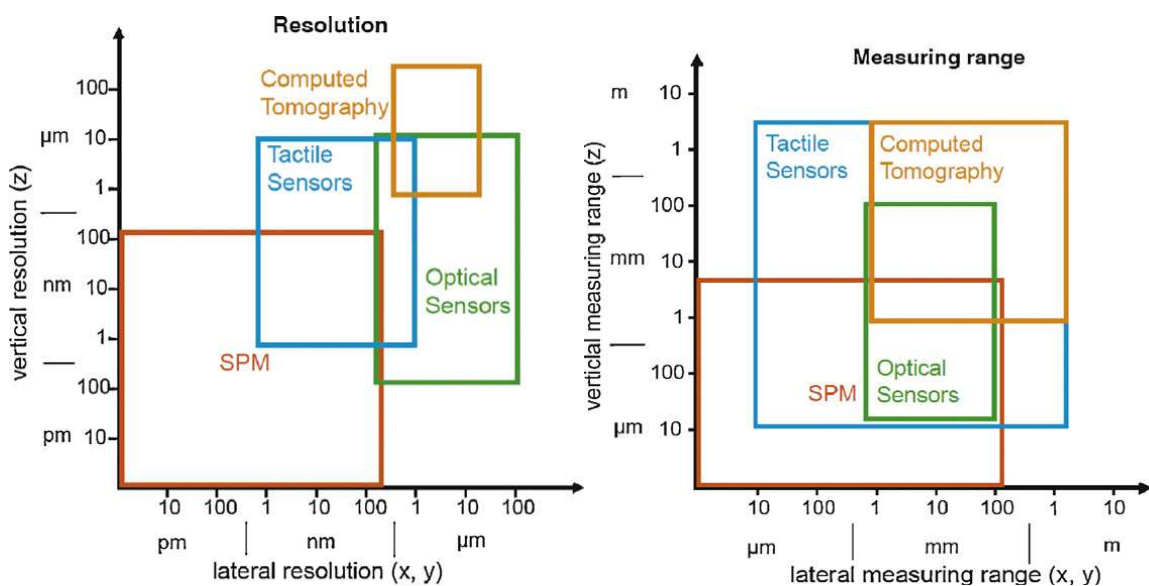


Figure 1.16 – Classification des systèmes de numérisation en fonction de leur résolution et de leur étendue de mesure [WEC09]

Loriot propose quant à lui de comparer les systèmes de numérisation selon différents critères qu'il définit en relation avec des applications d'analyse, de visualisation ou de duplication plus courantes dans le domaine de l'informatique graphique [LOR09]. Si la démarche est intéressante car différentes performances sont évaluées comme la vitesse d'acquisition, la précision du porteur ou encore l'ergonomie, l'évaluation n'est ici encore que qualitative (Tableau 1.1).

	Capteur laser ligne ou point sur MMT	Scanner à acquisition par vues	Capteur laser ligne sur bras polyarticulé
Vitesse d'acquisition	Faible vitesse d'acquisition ($\approx 80000\text{pts/s}$ balayage motorisé, dépend de la MMT) -	Vitesse d'acquisition très élevée ($\approx 500000\text{pts/s/m}^2$) ++	Vitesse d'acquisition élevée ($\approx 80000\text{pts/s}$ balayage manuel) +
Précision	Excellente précision de positionnement Bonne précision de mesure (dépend du capteur utilisé) ++	Bonne précision de positionnement (<i>bras robot</i>) ou pas de système de positionnement (<i>trépied</i>) Bonne précision de mesure +	Bonne précision de positionnement Bonne précision de mesure +
Texture	Pas de prise de texture -	Possible sur certains systèmes +	Pas de prise de texture -
Maniabilité Ergonomie Facilité d'utilisation	Peu maniable (<i>positionnement à travers un joystick</i>) - Non portable - Référentiel unique (<i>machine</i>) Recalage immédiat et précis entre les bandes d'acquisition + Nécessite un grand nombre de points de vue pour la numérisation d'un objet complexe -	Peu maniable (<i>certaines parties d'un objet complexe sont difficilement accessibles</i>) - Portable + Référentiel différent pour chaque vue - Nécessite un grand nombre de points de vue pour la numérisation d'un objet complexe -	Excellente maniabilité ++ Portable + Référentiel unique (<i>bras</i>) ++ Nécessite peu de points de vue pour la numérisation d'un objet complexe ++
Application prioritaire	Analyse (Duplication)	Visualisation (Duplication)	Duplication (Visualisation)

Tableau 1.1 – Comparaison des caractéristiques de systèmes d'acquisition [LOR09]

Zhao *et al* [ZHA12] sont les premiers à proposer une sélection de différents capteurs en fonction des spécifications à vérifier pour une même pièce. Ils proposent ainsi de choisir entre un capteur laser-plan et un palpeur mécanique montés sur une même MMT sur des

critères heuristiques. Cette étude qualitative donne des règles de choix : dès qu'il satisfait les contraintes liées à la qualité, le capteur laser doit être utilisé car l'acquisition de données est plus rapide avec ce système. Des heuristiques sur la géométrie des surfaces et sur le matériau, l'état de surface, la couleur de la pièce permettent de définir si le capteur laser est apte à l'acquisition de la surface. L'avantage principal de cette méthode est son intégration logicielle dans une démarche de planification automatique des trajectoires de numérisation. Une exemple de sélection du système est proposé conformément à ces heuristiques (Figure 1.17)

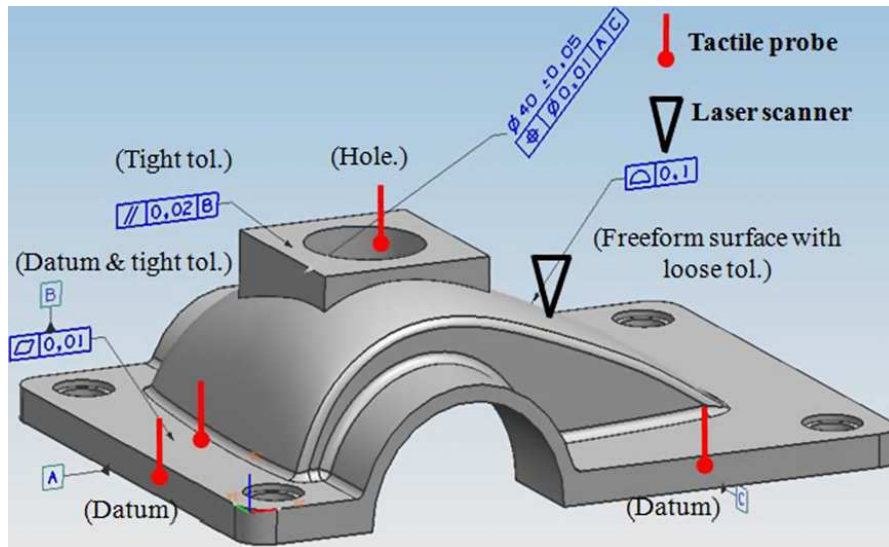


Figure 1.17 – Choix des systèmes de numérisation [ZHA10]

2.2.2 Études dites quantitatives

Un certain nombre de recherches sur le thème de la qualification des systèmes de numérisation ont été proposées pour compléter les études qualitatives. Ces méthodes s'appuient en général sur l'évaluation de la qualité des données acquises en accord avec l'application.

Les premières études sur la qualification des données sont apparues avec Prieto [PRI99] qui met en évidence l'influence des configurations capteur/pièce sur le bruit de numérisation. À partir de cette étude, Contri [CON02] s'attache à quantifier les données acquises par capteur laser-plan monté sur MMT et met en place des indicateurs de qualité des données numérisées. S'inspirant des travaux de Hoppe *et al* [HOP92], ces indicateurs de qualité sont aujourd'hui reconnus et traduisent la qualité du nuage de points en termes de densité, complétude, bruit et exactitude de mesure.

S'appuyant sur ces indicateurs, d'autres études ont été menées sur l'évaluation des capteurs laser-plan montés sur MMT [LAR02, BOU05, MEH08], mettant en avant l'influence des configurations capteur/pièce (distance et orientation) sur la qualité en termes de bruit et exactitude de mesure. Ainsi, le bruit de numérisation étant considéré comme l'écart-type de la répartition des écarts entre le nuage de points et un élément théorique associé, nous avons évalué le bruit de numérisation d'un capteur laser-plan en fonction de la distance de numérisation (Figure 1.18). Sur cet exemple le bruit de numérisation reste inférieur à 0,02 mm dans la plage de mesure.

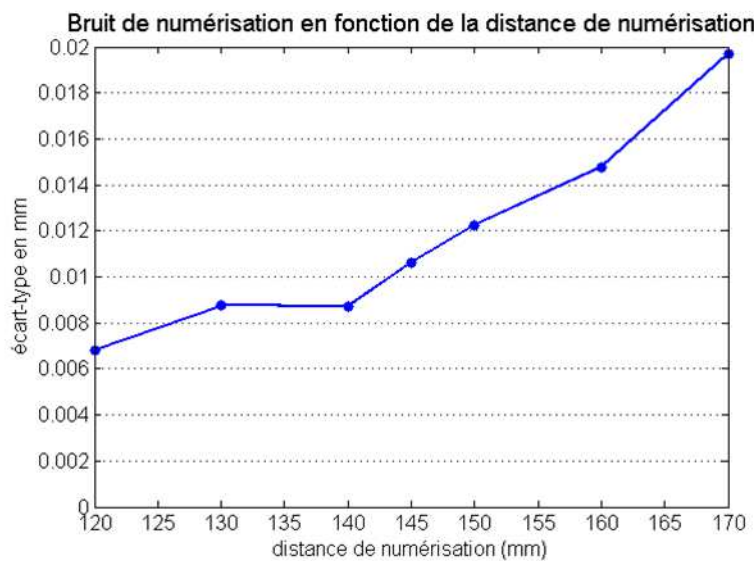


Figure 1.18 – Évaluation du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation

Van Gestel *et al* [VAN09] ajoutent aux paramètres influents le temps de chauffe du capteur laser tant au moment de sa calibration qu'au moment de son utilisation. Ils mettent ainsi en évidence l'importance d'utiliser le capteur dans les mêmes conditions de chauffe que lors de sa calibration.

Mahmud *et al* [MAH11] s'attachent à caractériser l'aptitude d'un système constitué d'une MMT et d'un capteur laser-plan à répondre au besoin métrologique. À partir d'une spécification géométrique ou dimensionnelle, les auteurs définissent l'incertitude admissible associée à la mesure de la surface se basant sur les normes [ISO14253-1]. L'incertitude élargie admissible U est établie à partir de l'intervalle de tolérance IT de la spécification à vérifier :

$$\frac{U}{IT} \leq \frac{1}{8} \quad (1.2)$$

avec $U = k \cdot u_c$, u_c étant l'incertitude de l'ensemble de la chaîne de mesure et k un facteur d'élargissement que les auteurs choisissent égal à 2 afin d'avoir un niveau de confiance de 95%. L'étude n'est réalisée que pour un seul système, mais pourrait être applicable à la comparaison de l'aptitude de différents systèmes relativement au besoin métrologique.

Barbero *et al* [BAR11], contrairement aux études précédentes focalisées sur un seul système, proposent une comparaison de différents systèmes de numérisation en évaluant l'exactitude de mesure, la dispersion qu'ils fournissent sur des éléments idéaux (sphère, cylindre, cale étalon) ainsi que des critères tels que la complétude et le nombre de points acquis sur des objets réels quelconques (Figure 1.19).



Figure 1.19 – Artefacts à numériser [BAR11]

Les artefacts non étalon sont utilisés pour évaluer la capacité des systèmes en termes de qualité de maillages (densité, rugosité, trous, etc.); les étalons sont utilisés pour évaluer le bruit et l'exactitude. Les systèmes étudiés sont : un capteur laser-plan monté sur une MMT puis sur un bras polyarticulé, un capteur laser-plan HandyScan Hexascan (manuel), un capteur laser-plan localisé avec une camera Krypton (localisation de LED infrarouges dans l'espace par triangulation), un capteur de projection de franges (ATOS) et un tomographe industriel. Pour chaque système et chaque artefact de référence les auteurs évaluent l'erreur de mesure de la dimension caractéristique (diamètre, distance plan-plan) ainsi que la dispersion des points par rapport à un élément idéal associé par le critère des moindres carrés. À partir de ces résultats et de l'incertitude connue des différents étalons, les auteurs déterminent l'incertitude de mesure liée à chaque système de numérisation (Tableau 1.2). Une méthode objective leur permet donc de comparer les

différents systèmes. Cependant, les cinq mesures sont réalisées pour chaque système et chaque artefact, sans que les conditions de numérisation (configuration capteur/pièce) ne soient précisées. L'étude permet de comparer les systèmes entre eux, mais elle ne répond pas à la question du choix des systèmes de numérisation en fonction d'une application.

		% <±0.05 mm	% between ±0.05 mm & ±0.1 mm	% between ±0.1 mm & 0.2 mm	% ≥0.2 mm
Camera	Sphere	58.81	28.99	11.54	0.66
	Cylinder	69.19	23.35	7.26	0.2
	Gauge block	77.73	20.31	1.65	0.31
Camera average		68.58	24.22	6.81	0.39
CMM	Sphere	91.97	7.87	0.16	0
	Cylinder	85.79	12.84	1.37	0
	Gauge block	99.51	0.49	0	0
CMM average		92.42	7.07	0.51	0
CT	Sphere	98.19	1.79	0.02	0
	Cylinder	83.17	13.78	2.98	0.07
	Gauge block	41.81	37.76	19.09	1.34
CT average		74.39	17.78	7.36	0.47
Exascan	Sphere	49.14	26.59	18.55	5.72
	Cylinder	66.98	24.75	7.99	0.28
	Gauge block	89.64	9.21	1	0.15
Exascan average		68.59	20.18	9.18	2.05
Atos	Sphere	99.96	0.04	0	0
	Cylinder	99.72	0.28	0	0
	Gauge block	94.41	5.58	0.01	0
Atos average		98.03	1.97	0	0

Tableau 1.2 – Dispersion des numérisation [BAR11]

Les travaux récents de Zuquete-Guarato *et al* [ZUQ12] mettent en œuvre l'étude comparative de trois systèmes de numérisation différents (un capteur laser-plan et deux capteurs à lumière structurée) dans le but de réaliser un choix pour une application spécifique qu'est l'acquisition complète d'un vilebrequin. En plus des critères de qualité en termes de bruit et de justesse, les auteurs prennent en compte les contraintes d'accessibilité et de complétude obtenue sur le nuage.

2.2.3 Synthèse

Les quelques travaux présents dans la littérature ne répondent pas complètement à la problématique de choix de systèmes de numérisation pour l'inspection 3D. Ces travaux proposent cependant des pistes au travers de l'évaluation de l'aptitude et des performances des systèmes par des critères tels que l'incertitude de mesure et les dimensions pièce [SAV07], la vitesse d'acquisition ou la maniabilité [LOR09] ou encore la qualité en termes de bruit et exactitude de mesure [PRI99, CON02, MEH08, MAH11].

Seuls Zuquete-Guarato *et al* [ZUQ12] proposent une étude plus complète vers le choix du système, mais les travaux restent spécifiques à l'application industrielle.

La sélection des systèmes de numérisation le mieux adapté pour une application reste donc à l'heure actuelle une problématique non complètement résolue.

3 Stratégie de numérisation et planification de trajectoires

La définition d'une stratégie de numérisation est une activité importante du processus. Il s'agit de définir l'ensemble des positions relatives capteur/pièce (distance et orientation relative) assurant une numérisation cohérente vis-à-vis de l'application, ainsi que les trajectoires associées qui assurent un respect des positions définies. D'une façon générale, la stratégie de numérisation est définie en relation avec la qualité de l'acquisition selon différents critères : accessibilité des surfaces, complétude, respect d'une densité ou bruit admissible. La planification des trajectoires quant à elle est réalisée de façon à minimiser les temps de numérisation en respectant l'espace des positions relatives admissibles.

Deux familles de méthodes existent, selon que le modèle CAO de la pièce est connu ou non. Dans le cas où l'objet est connu, le but est généralement de minimiser le temps de cycle en assurant une qualité des données en adéquation avec l'application. Dans le cadre de la numérisation d'objets de formes inconnues, l'objectif est généralement l'obtention d'une représentation numérique de l'objet la plus complète possible. Dans ce cas des acquisitions coopératives sont en général utilisées.

3.1 Stratégie de numérisation d'objets inconnus

Dans le cadre d'applications telles que la rétro-conception, le copiage de formes, la sauvegarde d'œuvres d'art ou de patrimoine, le modèle de l'objet à numériser n'est pas connu. Il s'agit alors de définir une stratégie de numérisation conduisant à la numérisation complète de l'objet de façon automatique.

Une acquisition coopérative couplant un système de vision et un capteur à contact peut être utilisée. Ainsi Nashman *et al* [NAS97] proposent une méthode d'inspection coopérative à l'aide d'une acquisition video et d'une acquisition avec un capteur montés sur une MMT 4 axes : 3 translations et une rotation grâce à un plateau tournant (Figure 1.20).

La caméra est utilisée ici afin de localiser et identifier l'objet afin de générer les trajectoires de numérisation pour un palpeur mécanique, un capteur à triangulation laser, un capteur capacitif ou encore des capteurs LVDT (Linear Variable Differential

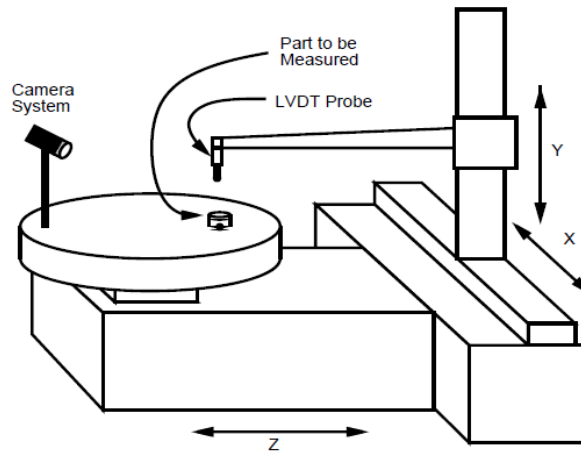
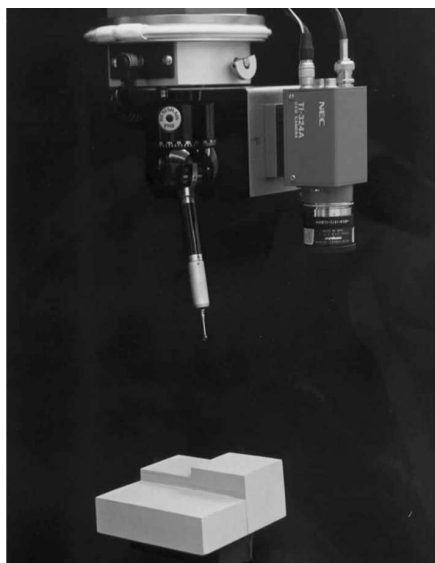


Figure 1.20 – MMT, palpeur et caméra [NAS97]

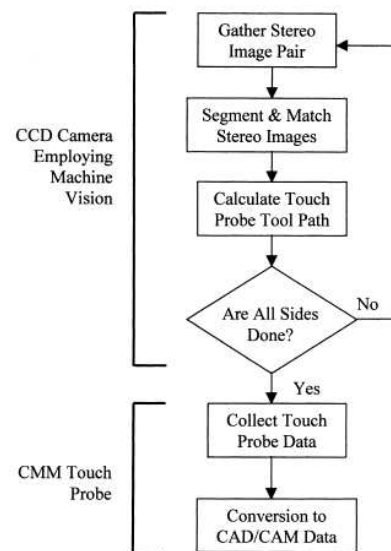
Transformer). Le processus de numérisation est réalisé en cinq étapes :

1. Segmentation de la surface à numériser depuis l'image de la scène ;
2. Extraction des pixels représentant le contour de la surface ;
3. Association de lignes aux pixels extraits ;
4. Détermination de la position initiale du capteur via une interface homme-machine ;
5. Déplacement du capteur le long de la surface.

Chan *et al* [CHA01] s'inscrivent également dans le cadre d'acquisitions coopératives, ils utilisent une caméra couplée à un palpeur sur une MMT (Figure 1.21).



(a) Photo d'un palpeur mécanique et d'une caméra ccd



(b) Processus de RE avec deux capteurs

Figure 1.21 – Photo et processus de RE pour un couple de capteurs palpeur/camera ccd [CHA01]

Les auteurs se placent dans un contexte de reverse engineering (RE). Ainsi l'acquisition réalisée par la caméra a deux principales fonctions : localiser la pièce sur la MMT et identifier les différentes surfaces à palper.

Récemment Lu *et al* [LU12] ont proposé une méthode de palpation automatique de surfaces de forme complexe en mettant au point un capteur constitué d'un palpeur mécanique entouré de part et d'autre par un capteur laser-ligne (Figure 1.22).

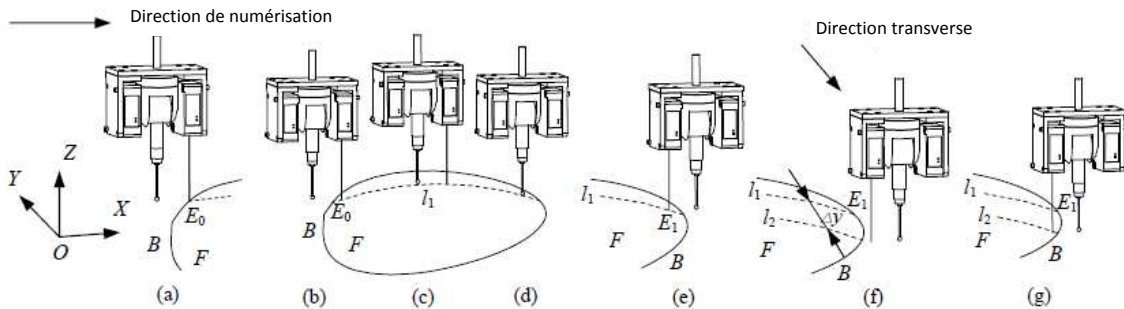


Figure 1.22 – Séquence d'acquisition d'une surface (d'après [LU12])

Les deux capteurs laser permettent de déterminer si la pièce se trouve sous le palpeur ou non et à quel moment le palpation doit commencer et s'arrêter.

Dans un contexte de RE mais avec un système constitué d'un capteur à lumière structurée et d'un porteur constitué d'un plateau tournant sur un berceau, Park et Chang [PAR09] proposent une méthode permettant d'obtenir une représentation de la pièce la plus complète possible. La pièce positionnée sur un plateau tournant est numérisée dans un premier temps avec un certain nombre d'orientations définies. Une analyse de la complétude des données permet de déterminer l'orientation pièce nécessaire pour combler les différents trous de numérisation lors de nouvelles acquisitions.

Pour de nombreuses études, le capteur et/ou la pièce sont positionnés avec différentes orientations afin d'obtenir une représentation complète de l'objet. Le concept utilisé est celui de la « NBV » (*Next Best View*) [PIT96, PAP97, MAS98, LI05a, MAR05, LOR09, PAR09]. À partir d'une ou plusieurs premières acquisitions initiales, l'analyse des données (proches des différents trous de numérisation) permet de déterminer l'orientation suivante du système de numérisation qui permet de combler les trous de numérisation. Ces étapes d'analyse et de renumérisation sont répétées jusqu'à obtention d'une complétude des données acceptable vis-à-vis de l'application.

Différents critères d'arrêt ont été proposés dans la littérature, tels qu'un taux de

complétude seuil ou une absence d'évolution de la complétude entre deux itérations. En ce sens, Lorient [LOR09] propose une synthèse des différentes méthodes de planification basées sur la *Next Best View* et présente les critères d'arrêt associés.

Les travaux de Papadopoulos-Orfanos [PAP97] et Mehdi-Souzani [MEH06] s'appuient sur une première numérisation qui sert de support à la création d'une voxel-map (représentation sous forme de voxels – cubes – de l'objet numérisé) du nuage de points permettant de localiser l'objet ainsi que d'approximer sa géométrie afin de se replacer dans le cadre où le modèle est connu (Figure 1.23).

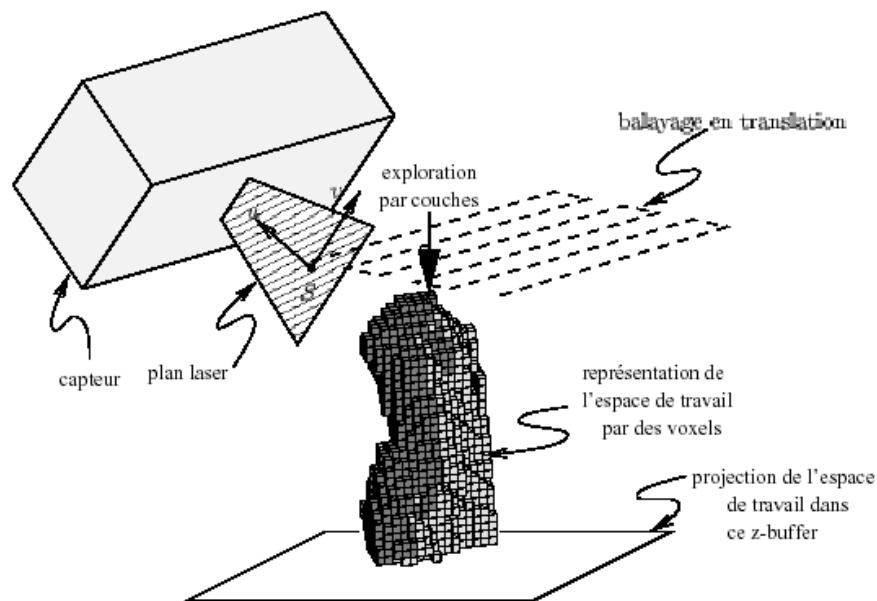


Figure 1.23 – Génération de trajectoires à partir d'une voxel-map [PAP97]

Afin d'ajouter la maîtrise de la qualité des données, Mehdi-Souzani propose une stratégie de numérisation intelligente avec un capteur laser-plan monté sur une MMT. À partir de la première numérisation manuelle de l'objet, des trajectoires qui optimisent les configurations capteur/pièce (position et orientation relatives) sont déterminées afin de respecter des critères de qualité au regard de l'application réalisée. La démarche de numérisation intelligente permet de maîtriser la qualité des données acquises à condition de connaître les capacités du système de numérisation en termes de bruit, d'exactitude de mesure, ou encore de complétude. De ce fait une qualification préalable du système est nécessaire.

3.2 Stratégie de numérisation à partir d'un modèle CAO

Lorsqu'un modèle CAO est donné, la définition d'une stratégie de numérisation en automatique peut avoir plusieurs intérêts : optimisation de la qualité, minimisation du temps de cycle, évitement des collisions. L'optimisation de la qualité est une problématique liée aux systèmes à base de capteur optique, pour lesquels la configuration capteur/pièce joue un rôle important sur le bruit de numérisation et la justesse de mesure [PRI99, CON02, MEH06] (Cf chapitre II). Une fois l'espace admissible des configurations capteur/pièce déterminé, la minimisation du temps de cycle doit permettre de respecter cet espace admissible en minimisant le nombre d'orientations capteur par exemple. Enfin une étude sur les collisions permet de générer les trajectoires de numérisation.

3.2.1 Optimisation des points de vue

Le problème de génération de trajectoires en automatique, aussi bien pour les capteurs à contact que pour les capteurs optiques, nécessite de déterminer le positionnement de la pièce dans l'espace de travail (posage) lorsque celui-ci n'est pas imposé (inspection hors ligne par exemple). En effet, le but de l'acquisition automatique étant de minimiser le temps de l'opération de contrôle, une minimisation du nombre de posages permettant l'acquisition de toutes les surfaces à numériser est nécessaire. Ainsi Kweon et Medeiros proposent une méthode permettant de déterminer les orientations strictement nécessaires à la vérification d'un groupe de spécifications donné [KWE98]. La méthode présentée utilise les cartes de visibilité (VMap) [GAN94, WOO94] .

À partir des cartes de visibilité de nombreux travaux ont été développés, essentiellement pour les systèmes de mesure optiques [PAP97, LEE00, REM04, DER05, LOR09]. Lee et Park [LEE00] définissent les directions accessibles localement (LAD) et les directions admissibles globalement (GAD) pour respecter des contraintes de configuration capteur/pièce.

Derigent *et al* [DER05, DER07] proposent d'utiliser également la notion de visibilité globale et locale à travers des cartes de visibilité 2D comme le montre la figure 1.24. L'étude est menée pour l'utilisation d'un capteur laser-plan monté sur une MMT équipée d'une tête de positionnement rotative possédant deux rotations A et B . Sur la carte de visibilité 2D représentée par un disque, les zones d'orientation accessibles sont reportées

pour chaque surface afin de déterminer le nombre minimum d'orientations nécessaires à l'acquisition complète de la pièce. Dans l'exemple présenté, il existe une plage d'orientations commune pour les faces F_1 et F_2 ; la surface F_3 doit en revanche être numérisée indépendamment.

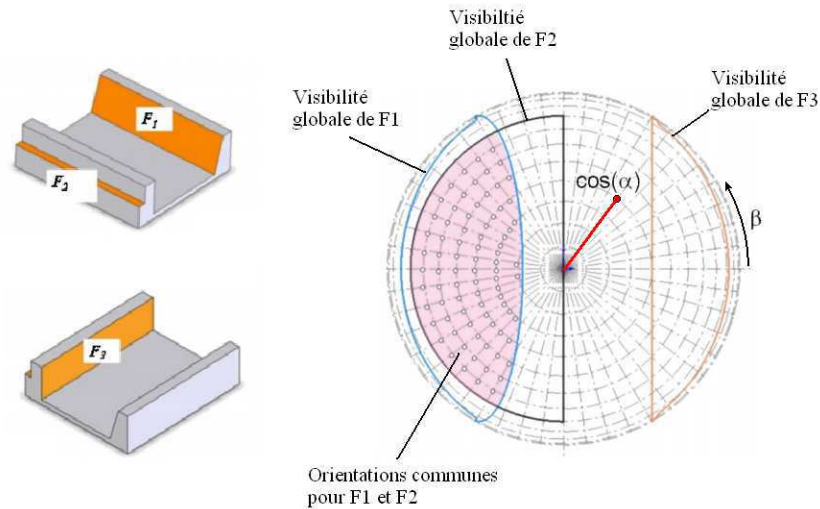


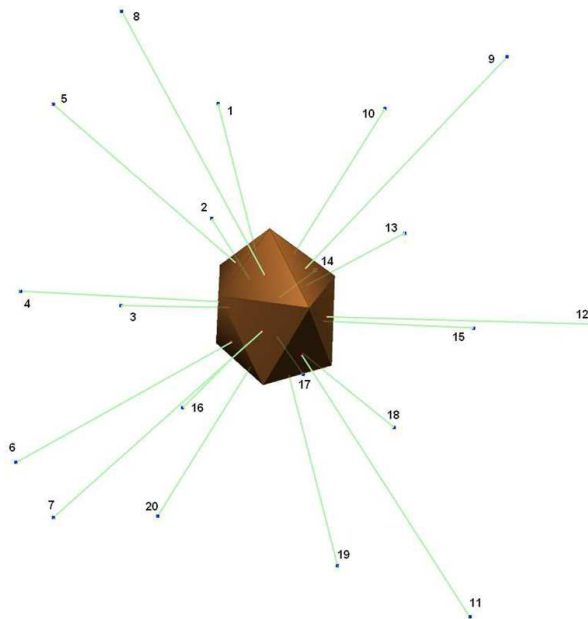
Figure 1.24 – Carte de visibilité 2D (d'après [DER07])

Afin de minimiser le nombre d'orientations lors d'une numérisation automatique avec un capteur optique, Lorient utilise une méthode matricielle, à partir d'une représentation disséminée minimale de l'objet, qui recense toutes les orientations v_i possibles ainsi que les faces f_i de l'objet à numériser [LOR09] (Figure 1.25). Les orientations admissibles pour une face étant repérées par un « 1 », le problème d'optimisation consiste à déterminer le nombre minimum de colonnes à considérer pour qu'il y ait au moins un « 1 » dans chaque ligne (toutes les faces doivent être visibles).

La problématique est sensiblement différente pour les capteurs à contact; les problèmes de visibilité étant alors similaires aux problèmes de gestion des collisions. Néanmoins, des travaux ont permis d'optimiser le temps de contrôle en réalisant un choix de posage pièce et d'orientation capteur optimisés. En ce sens Hwang *et al* [HWA04] ont défini une méthode qui, dans un premier temps trouve le nombre de posages pièce strictement nécessaires ainsi que le nombre minimum d'orientations palpeur qui permettent l'acquisition complète de la pièce. Dans un second temps ils déterminent la séquence de contrôle la plus rapide, c'est-à-dire qui minimise les temps de trajet entre les surfaces à acquérir.

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{16}	v_{17}	v_{18}	v_{19}	v_{20}
s_1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
s_2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
s_3	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
s_4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
s_5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_6	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
s_7	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
s_8	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_9	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
s_{10}	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
s_{11}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
s_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
s_{13}	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0
s_{14}	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
s_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
s_{16}	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
s_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
s_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
s_{19}	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
s_{20}	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1

(a) Matrice de mesurabilité des surfaces



(b) Points de vue potentiels

Figure 1.25 – Minimisation du nombre d'orientations [LOR09]

3.2.2 Optimisation de la qualité des données

Une fois que l'étude de définition de trajectoires a été menée pour satisfaire les conditions de visibilité, une optimisation en termes de qualité peut être réalisée.

À partir des études sur la qualification des systèmes de numérisation à base de capteur optique, ainsi que du besoin métrologique lié à l'application (IT de la spécification, type de spécification, etc.), les configurations capteur/pièce admissibles peuvent être établies. Ainsi un certain nombre de travaux ont permis de définir cet espace admissible.

Son *et al* [SON02] proposent une numérisation automatique de pièces dont le modèle est connu en utilisant une MMT équipée du table rotative et d'un capteur laser-plan. Le

but est de numériser une pièce de forme complexe en minimisant l'intervention humaine. La définition de la trajectoire prend en compte les paramètres tels que le nombre de scans nécessaires, ou encore l'orientation relative du capteur par rapport à la surface. La déviation du nuage de points par rapport au modèle CAO est évaluée afin de valider l'étude.

Mahmud [MAH07] détermine les trajectoires de numérisation avec un capteur laser plan avec pour objectif de minimiser l'incertitude de mesure, tout en respectant les conditions de visibilité. L'incertitude de mesure ayant été caractérisée et les positions et orientations capteurs ayant été considérées comme jouant un rôle important pour l'incertitude de mesure, ces deux facteurs sont pris en compte pour optimiser la trajectoire du capteur (figure 1.26).

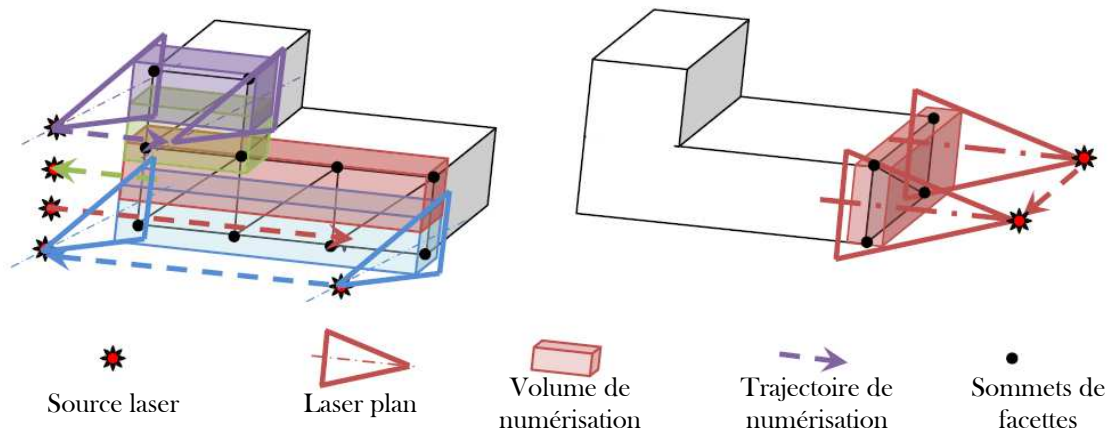


Figure 1.26 – Trajectoires de numérisation (d'après [MAH11])

Cette approche, comme celle de Mehdi-Souzani [MEH06] permet de maîtriser la qualité des données si les capacités du systèmes ont au préalable été identifiées.

3.3 Gestion des collisions

Les travaux sur l'évitement des collisions ont été largement étudiés pour les systèmes à base de capteur à contact [GU96, FAN98, AIN00, CHO04, CHO05]. En effet, cette problématique est d'autant plus complexe pour ces systèmes du fait que le capteur vient en contact de la pièce. Cependant, quelques travaux sur la gestion des collisions avec les capteurs optiques ont été menées [PAP97, FER08, LAR08]

Fernández *et al* [FER08] modélisent le système de numérisation, ici un capteur laser plan monté dans une MMT, par des boîtes englobantes qui ne doivent pas entrer en

collision avec la pièce (Figure 1.27). Étant donné que le capteur a une distance de travail donnée, l'approximation par des boîtes englobantes n'est pas pénalisante et introduit un certain coefficient de sécurité dans la génération des trajectoires.

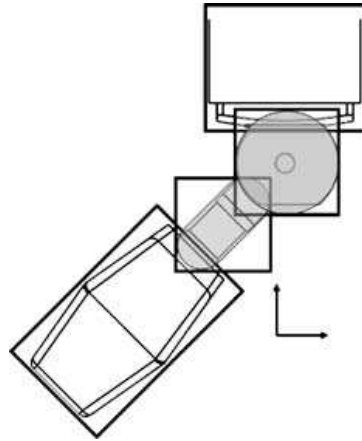
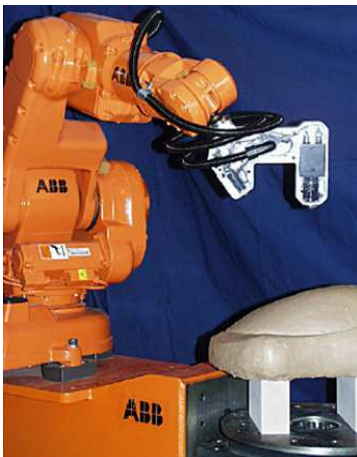
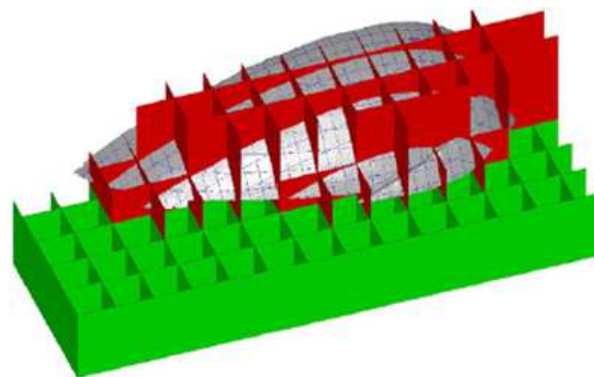


Figure 1.27 – Boîtes englobantes contenant toutes les parties du système de numérisation [FER08]

Larsson et Kjellander proposent une approche permettant de planifier les trajectoires de numérisation d'un capteur à triangulation laser monté sur un robot de mesure [LAR08], et traitent en particulier le problème des collisions, pour des objets inconnus. De ce fait un premier scan permet de déterminer une boîte englobante de la pièce (*Size scan*, Figure 1.28a).



(a) Robot et capteur laser



(b) Modèle *Space cell* utilisé pour les collisions

Figure 1.28 – Évitement des collision avec un robot de mesure et un capteur à triangulation laser (d'après [LAR08])

Le premier scan est réalisé à partir de quatre orientations orthogonales, le capteur étant positionné aux limites de l'espace de travail du robot. Ensuite, à partir des données acquises lors de cette première numérisation, un scan de forme est réalisé (*Shape scan*).

Afin d'éviter les collisions, les données sont discrétisées à l'aide d'un modèle appelé *Space cell* qui permet de déterminer les zones vides et les zones pleines (Figure 1.28b).

3.4 Synthèse sur les stratégies de numérisation

Comme nous avons pu le voir, beaucoup de travaux ont porté sur la définition de stratégies de numérisation ainsi que sur la planification de trajectoires. Ces travaux ont été menés aussi bien dans le cadre de la numérisation d'objets connus que d'objets inconnus pour différentes technologies de systèmes de numérisation.

La plupart des travaux s'inspirent des approches associées à la recherche de visibilité (objets de modèle connu) ou à la recherche de la meilleure vue (objets de formes inconnues), selon des critères de qualité et de performance donnés. Les méthodes proposées sont en général associées à un système de numérisation donné et sont ainsi peu générique.

4 Traitement des données acquises

Comme nous l'avons présenté en introduction de ce chapitre, la troisième problématique majeure liée à l'acquisition multi-systèmes est le traitement des données. En effet, une fois la numérisation réalisée, les grandeurs géométriques doivent être évaluées à partir des informations obtenues. Cependant, au préalable de cette évaluation, les données doivent être traitées afin d'être cohérentes vis-à-vis des caractéristiques géométriques à évaluer.

Lorsque ces données ont été acquises avec différents systèmes, ou différentes acquisitions successives, les informations doivent en effet être rendues cohérentes, c'est-à-dire exprimées dans le même repère.

Lorsque les données sont acquises avec des capteurs optiques, la qualité est dégradée par rapport aux données issues du palpement mécanique. Ces données sont généralement denses, bruitées, hétérogènes et présentant des trous de numérisation (Figure 1.29).

Il s'agit alors d'évaluer des grandeurs géométriques à partir de ces données discrètes fortement bruitées et incomplètes.

Afin de répondre à cette problématique, de nombreux travaux ont porté sur les problèmes de recalage, de segmentation ou encore de reconstruction de surfaces sur

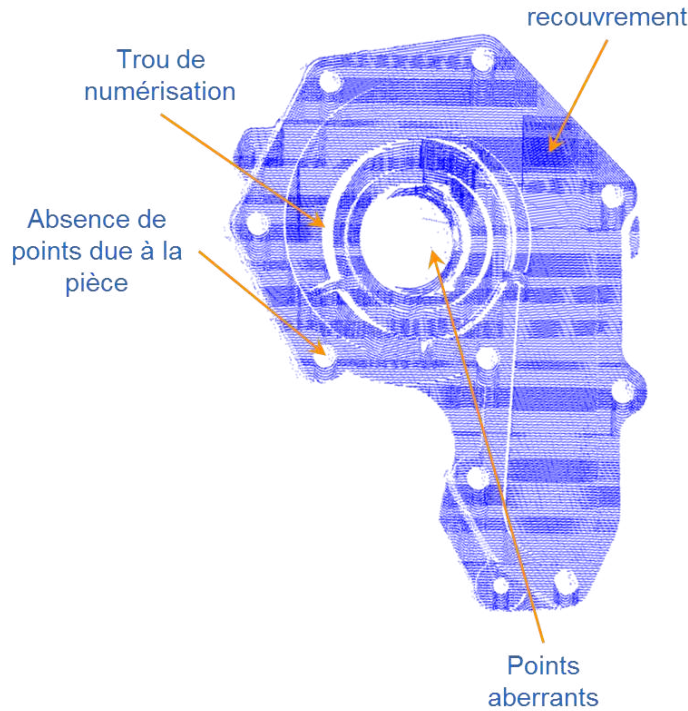


Figure 1.29 – Nuage caractéristique d’un corps de pompe numérisé avec un capteur laser-plan

des données bruitées. De nombreuses solutions logicielles sont aujourd’hui proposées en réponse à ces problématiques (Rapidform, Catia V5, etc.). Il existe cependant peu de travaux dédiés spécifiquement au contexte de l’inspection 3D pour lequel le bruit est pénalisant. En effet, lorsque deux surfaces sont trop proches, il peut être difficile voire

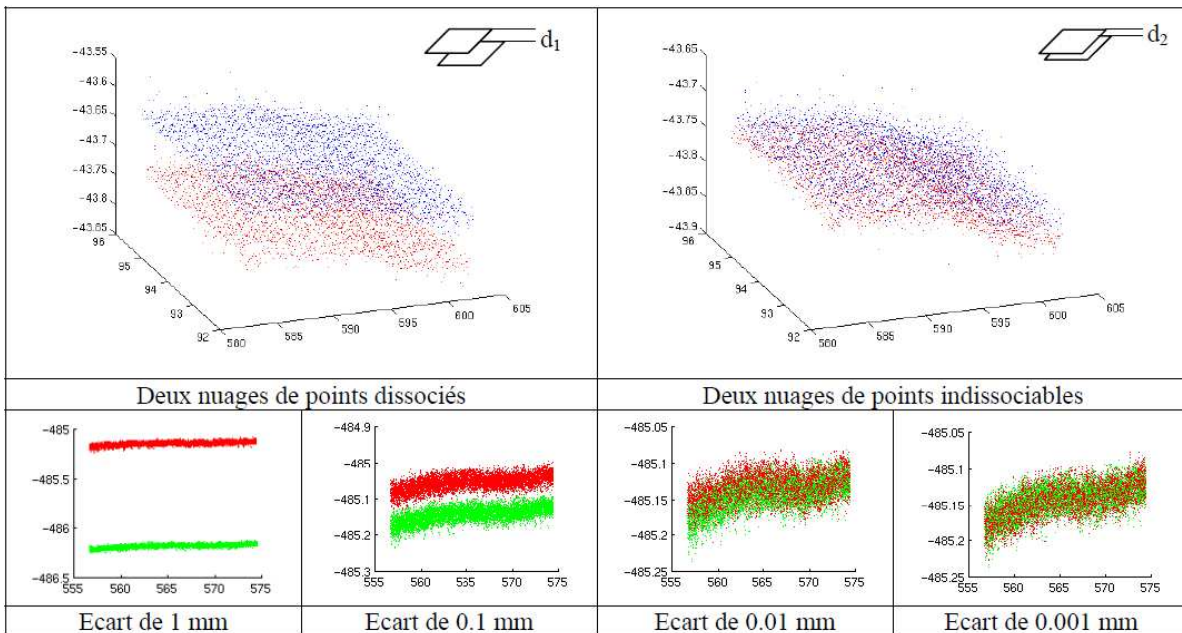


Figure 1.30 – Effet du bruit de mesure sur l’évaluation de grandeurs géométriques [CON02]

impossible de déterminer quels sont les points appartenant à l'une ou l'autre des deux surfaces (Figure 1.30). Dans cet exemple, des surfaces distantes de 0,01 mm ne sont pas dissociables.

Nous présentons ici les travaux de la littérature relativement au recalage et à la fusion de données, à la segmentation ainsi qu'au filtrage. Pour ces quelques opérations, les grands nuages de points bruités représentent une source de difficultés essentiellement dues au bruit, en particulier dans le cadre de l'inspection 3D.

4.1 Recalage et fusion de données

Le recalage des données consiste à exprimer des données issues de différents systèmes de numérisation [HUA09, ZHA10] ou de différents posages pièce et/ou capteur [MIT04, POT04, MAK06, JIA09], dans un même repère (Figure 1.31).

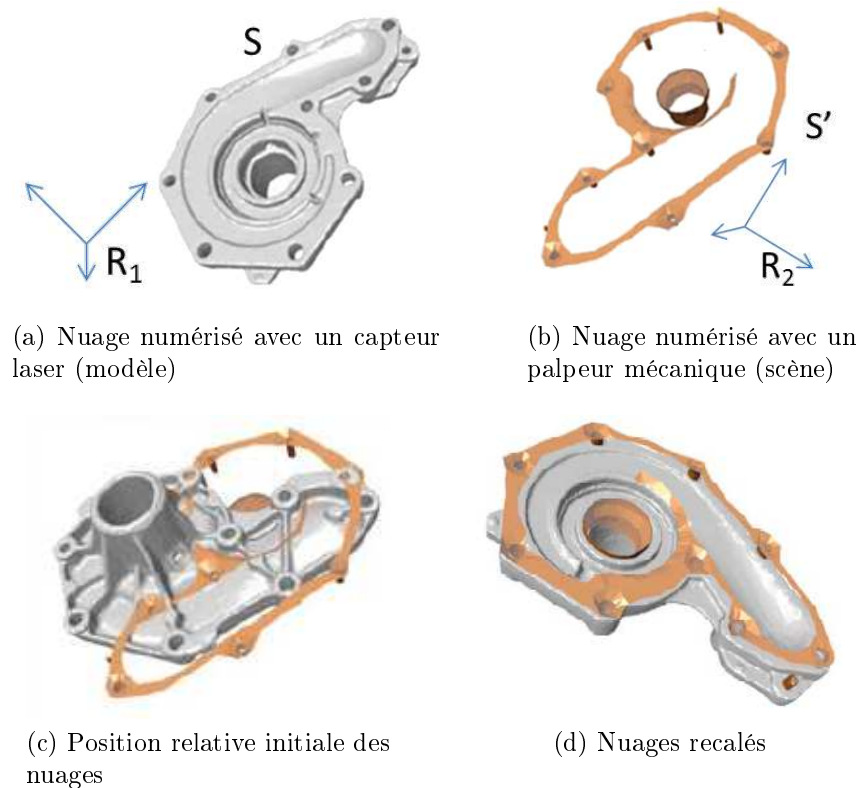


Figure 1.31 – Recalage des données numérisées sur un corps de pompe [ZHA10]

Il existe différentes méthodes de recalage que nous pouvons regrouper en deux grandes familles :

- le recalage « matériel » ;
- le recalage « logiciel ».

Dans le cas de l'utilisation d'une MMT, chaque capteur et chaque orientation capteur sont calibrés sur une même sphère d'étalonnage afin que l'ensemble des données acquises soient exprimées dans le même repère de mesure. Le recalage des données est réalisé de façon matérielle.

Lorsque le recalage matériel ne s'avère pas de qualité suffisante, un recalage logiciel supplémentaire peut être effectué. Le problème associé au recalage de deux ensembles de points est l'estimation de la transformation rigide qui amène un nuage de points sur un autre par minimisation d'une fonction d'erreur (Figure 1.31). Cette erreur à minimiser est souvent quadratique, et le problème se pose comme suit.

Soit un ensemble de N points $S' = \{P'_i\}$ que l'on souhaite recalcr sur un autre ensemble $S = \{P_i\}$ de même cardinal où chacun des points P'_i est apparié avec le point P_i ayant le même indice ; on cherche dans le repère absolu de S la transformation rigide, définie par la rotation \mathbf{R} et la translation \mathbf{t} qui appliquée à l'ensemble des points S' minimise la fonction coût suivante :

$$e = \sum_{i=1}^N \|P_i - \mathbf{R}(P'_i) - \mathbf{t}\|^2 \quad (1.3)$$

L'algorithme de recalage le plus répandu est l'algorithme *Iterative Closest Point* (ICP) développé indépendamment par Besl et McKay [BES92] et par Chen et Medioni [CHE91]. À partir de deux ensembles de points, une estimation de la transformation de corps rigide à appliquer pour les mettre en correspondance est évaluée. Après avoir déterminé les couples de points à mettre en correspondance, une fonction distance entre les deux nuages est minimisée à partir des distances point-point [BES92] ou des distances point-plan [CHE91].

L'une des premières applications de l'ICP est le recalage sur sphères. L'utilisation de plusieurs sphères de référence permet de recalcr les données en identifiant les centres sphère dans les différents nuages de points obtenus avec des vues différentes [MAR08]. En prenant soin qu'au moins trois sphères soient communes à deux acquisitions différentes, et en identifiant les centres sphère comme points communs aux deux acquisitions, la transformation de corps rigide permettant de recalcr les nuages de points ensemble est celle qui met en correspondance les centres sphère. L'utilisation des sphères est néanmoins contraignante car ces artefacts masquent en général une partie de la pièce, et pour chaque acquisition il est nécessaire d'avoir au moins trois sphères acquises en

commun avec une autre acquisition. Le recalage peut aussi être réalisé entre un nuage de points numérisé et un modèle CAO, ainsi Martinez *et al* utilisent trois sphères pour recalrer les données numérisées sur le modèle CAO (Figure 1.32).

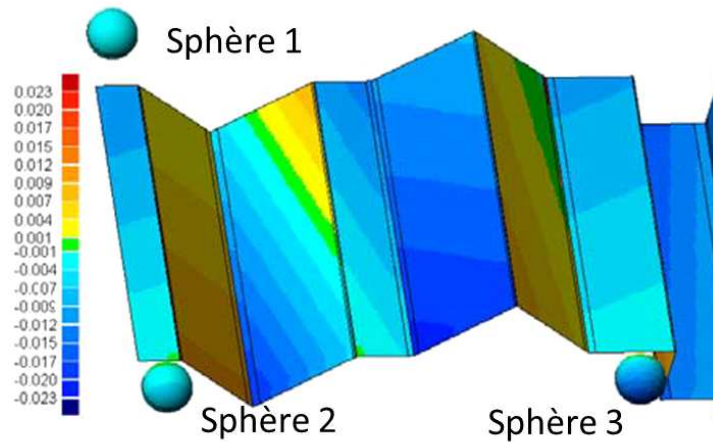


Figure 1.32 – Recalage sur sphères [MAR08]

Afin de se passer de l'utilisation des sphères, ce qui peut s'avérer contraignant, beaucoup de travaux ont fait leur apparition, en général basés sur l'ICP, mais avec des variantes permettant d'utiliser les données brutes de la pièce numérisée, d'accélérer les calculs et de réduire l'erreur de recalage. Ces différents travaux ajoutent à la distance euclidienne classique différentes notions telles que la courbure par exemple [YAU00, MIT04, SHM10, ZHA10].

Zhao [ZHA10] réalise ainsi le recalage d'une pièce mécanique numérisée avec un palpeur mécanique et un capteur laser-plan (Figure 1.31) dans des repères différents. Le nuage de points numérisé avec un capteur laser est considéré comme le modèle et la scène (nuage de points palpés) est recalé sur ce modèle. L'originalité de ces travaux réside d'une part dans l'utilisation de l'indice de forme (*shape index*) et de l'intensité de courbure (*curvedness*) [KOE92] pour déterminer les zones de recouvrement entre les données, ainsi que dans l'utilisation d'une variante de l'ICP intégrant dans la fonction distance un terme relatif à la courbure.

Une fois les données recalées entre elles, la fusion des données permet de régler les problèmes liés aux différents formats de données, aux différences de densité et au choix des données à garder et à éliminer [WEC09]. Différentes méthodes existent telles que les méthodes d'estimation basées sur une analyse des moindres carrés [BLA92], les moyennes pondérées [TAN04] ou encore les filtres de Kalman [HUA09] qui permettent de fusionner

les données hétérogènes issues de systèmes de numérisation de différentes technologies.

4.2 Segmentation ou partitionnement

Plusieurs travaux se sont penchés sur le partitionnement des données en surfaces élémentaires, notamment pour différentes applications telles le RE² [ALR00, BEN04, DEM07] ou encore la métrologie dimensionnelle [LIU08a] [SHE01]. Le partitionnement consiste à segmenter les données en différents sous-ensembles de paquets de points cohérents qu'il est possible de traiter séparément. Les différentes méthodes s'appuient sur un nuage de points [OST02, DEM07, LIU08a] ou sur un maillage [BEN04]. De manière générale, les différentes méthodes de segmentation peuvent être classées en trois catégories : les méthodes basées sur la recherche de frontières, celles basées sur la recherche de régions, ou encore les méthodes hybrides [BEN04, LIU08a] [VAR97].

La première famille de méthodes détecte en premier lieu les frontières entre les différentes régions. Les points de la frontière sont déterminés à partir d'informations telles que la normale et la courbure en chacun des points de l'ensemble. Les points « frontière » sont les points à forte variation de courbure ou forte variation d'orientation de la normale. Nous pouvons citer les travaux de Osty [OST02] de Benkő et Várady [BEN04], Demarsin *et al* [DEM07].

L'avantage principal des méthodes basées sur la recherche des frontières est le faible temps d'exécution. Leur inconvénient principal est l'influence du bruit de numérisation qui impacte fortement les résultats, surtout au niveau des lignes de crête correspondant aux frontières [VAR97].

Les méthodes basées sur la recherche des régions s'attachent à déterminer les régions à partir des points ayant des propriétés similaires (normales, courbures, ...). À partir d'un premier point dont les propriétés géométriques sont évaluées, la région est obtenue par accroissement en intégrant les points voisins ayant des propriétés géométriques proches (faible variation de courbure, faible variation de l'orientation de la normale). Les frontières sont ensuite reconstruites à partir de l'intersection des surfaces associées à chaque région. Ces méthodes s'appliquent sur le nuage entier, elles sont donc plus robustes par rapport au bruit que les précédentes. Notons par exemple dans ce domaine les travaux de Sunil et Pande [SUN08] ainsi que ceux de Rabbania *et al* [RAB06]. Parmi

les méthodes basées sur la recherche des régions, Zhao propose une méthode de partitionnement des nuages de points à partir de la notion d'indice de forme [KOE92] et d'intensité de courbure [ZHA10] (Figure 1.33).

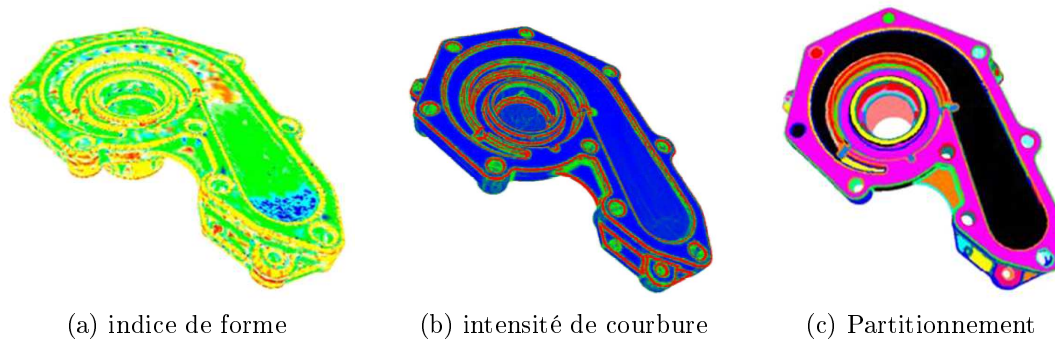


Figure 1.33 – Partitionnement d'un corps de pompe (d'après [ZHA10])

Les méthodes hybrides combinent les deux premières familles, afin de profiter de leurs avantages respectifs (temps d'exécution, robustesse, etc.). Les travaux sur ces méthodes sont relativement récents [ALR00, LAV05, LIU08a].

Pour la majorité des méthodes, la détection de lignes caractéristiques consiste essentiellement à trouver les lignes de crête et les lignes de vallée sur un nuage de points. La détection de ces lignes constitue une analyse de surface 3D [BEL05]. Les lignes de crête sont le lieu des points où la courbure principale maximale prend une valeur maximale le long de sa ligne de courbure associée. Les lignes « vallée » sont le lieu des points où la courbure principale minimale donne un minimum négatif le long de sa ligne de courbure [OHT04, YOS05, STY04].

La plupart des travaux sur les lignes de crêtes s'appuient sur le maillage de la surface [GUM01, HUB00, ZHA10] qui peut constituer une approximation ou un lissage des formes. D'autres travaux s'attachent à détecter les lignes caractéristiques en conservant le nuage de points brut de façon à préserver les différents niveaux de détail [DIG10].

Comme nous l'avons évoqué, les différentes méthodes de segmentation proposées permettent de partitionner les données obtenues en différents paquets qui sont traitées séparément par la suite. Les données de ces paquets étant encore des données brutes, c'est-à-dire que les points n'ont pas été altérés, une étape de filtrage est généralement nécessaire, en particulier pour les données issues de numérisation sans contact, afin d'évaluer les caractéristiques géométriques souhaitées.

4.3 Filtrage

L'opération de filtrage s'avère en général nécessaire avant toute exploitation lorsque les données sont acquises par moyens optiques (Figure 1.34).

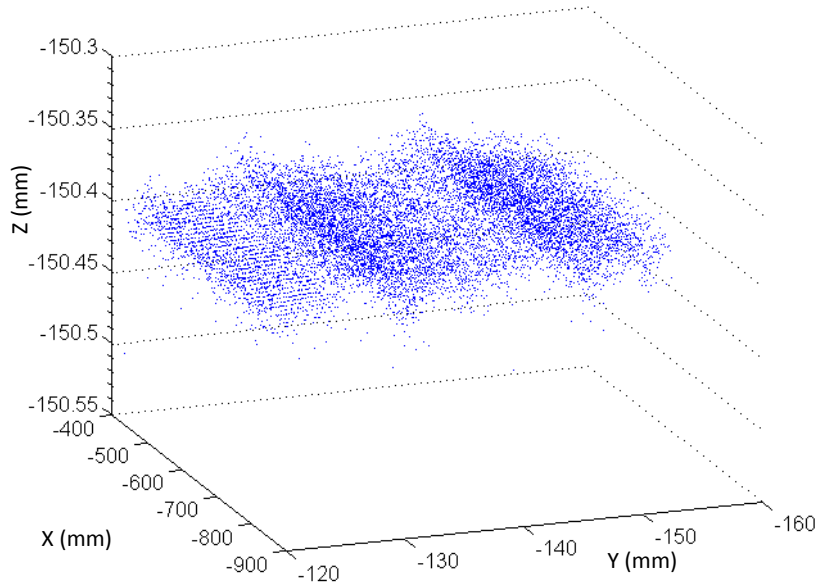


Figure 1.34 – Nuage de points issu de la numérisation d'un règle en marbre à l'aide d'un capteur laser-plan monté sur une MMT

Le filtrage permet d'éliminer le bruit de numérisation et peut également permettre d'homogénéiser les données. Aujourd'hui, la plupart des logiciels de traitement des données 3D intègrent des fonctions de filtrage permettant l'homogénéisation des données. Cependant il est difficile de maîtriser ces filtres qui suppriment des points et en déplacent d'autres, ce qui n'est pas acceptable en métrologie 3D par exemple. De ce fait, les équipes ayant le plus travaillé sur le filtrage sont issues du domaine de l'imagerie. Les principales applications sont la recherche de texture à partir de maillages bruités [TAU95, FLE03, FOU06]. Cependant les filtres proposés sont spécifiques aux applications artistiques pour lesquelles il est nécessaire de filtrer les données de telle sorte que les zones de détails ne soient pas altérées mais que le bruit soit éliminé. Fournier *et al* [FOU06] proposent ainsi un filtre adaptatif permettant de réduire le bruit de numérisation de données obtenues à partir d'un scanner 3D. Ce filtre adaptatif est appliqué à la transformée en distance (TD) [HIL98] qui représente l'ensemble des données recalées. Les résultats sur un modèle bruité de la tête de Jules César sont présentés sur la figure 1.35.

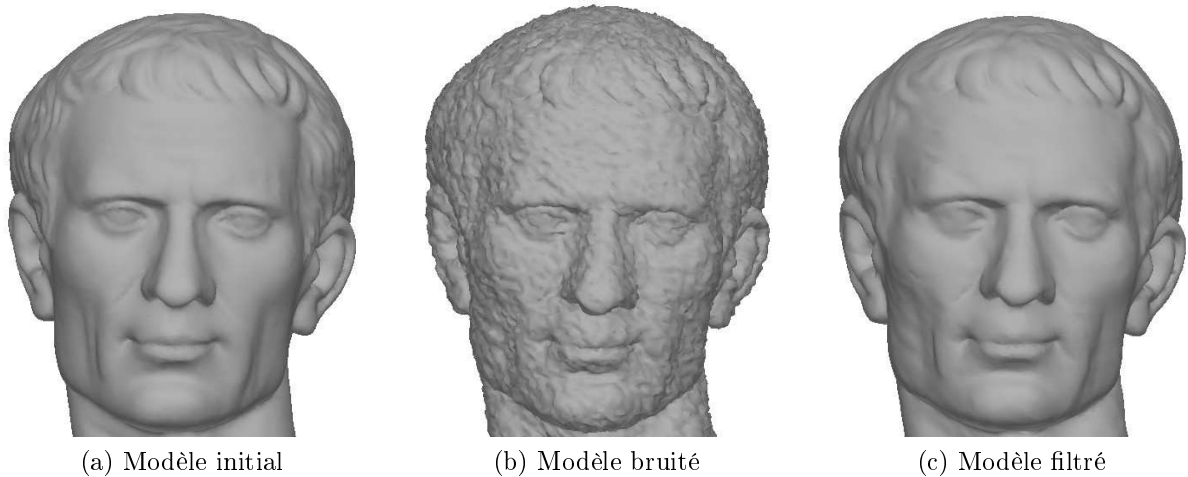


Figure 1.35 – Résultats du filtre de la transformée en distances [FOU06]

S'il existe des travaux sur l'homogénéisation par filtrage ou encore sur le filtrage pour la recherche de textures, il n'existe par contre que très peu de travaux concernant l'élimination du bruit pour évaluer des grandeurs métrologiques.

En métrologie dimensionnelle, les filtres font l'objet d'une norme pour la vérification des spécifications d'état de surface [ISO11562]. Ces filtres dits « à phase correcte » sont basés sur le principe qu'un profil numérisé sur une pièce mécanique a des défauts périodiques de longueurs d'onde distinctes. Ainsi, afin d'évaluer un critère de rugosité, il est nécessaire de filtrer les défauts d'ordre inférieur, c'est-à-dire ceux qui ont une longueur d'onde plus grande, à savoir les défauts de forme et d'ondulation. Ce principe pourrait être étendu à des filtres de surface (voir Chapitre IV).

4.4 Synthèse sur le traitement

Une fois la numérisation réalisée, les grandeurs géométriques doivent être évaluées à partir des informations obtenues. Le contexte de l'inspection 3D multi-systèmes fait apparaître deux problématiques majeures. La première est inhérente à l'utilisation de systèmes ou capteurs de technologies différentes. Il s'agit alors de fusionner et recalibrer les données obtenues dans un même repère afin de les rendre cohérentes et exploitables.

La seconde problématique relève du traitement des grands nuages de points obtenus. En effet, la numérisation 3D, en particulier par moyens optiques, permet l'acquisition de grands nuages de points représentatifs de la peau de l'objet. Il se pose alors le problème du traitement de ce nuage de points discret, généralement dense, inhomogène et

fortement bruité afin d'en extraire des caractéristiques géométriques. La démarche la plus classique, issue du RE consiste en deux étapes majeures, segmentation des données en sous-ensembles cohérents et association de surfaces élémentaires aux sous-ensembles partitionnés. La littérature présente de nombreux travaux dans ce domaine. De même, un bon nombre de solutions logicielles sont désormais proposées en réponse à ces problématiques. Cependant, la majorité des travaux se limite à la reconstruction surfacique, sans attention particulière à l'évaluation de caractéristiques géométriques rendue complexe par la présence du bruit de numérisation. Ainsi, Contri a montré qu'un bruit de numérisation trop important peut empêcher l'évaluation de dimensions (Figure 1.30). Ainsi, la dimension ne peut être évaluée que si le bruit a été au préalable filtré.

5 Acquisition automatique

L'inspection automatique prend tout son sens dans le cadre de l'inspection en ligne, que ce soit directement sur la machine d'usinage (MOCN) ou sur une machine dédiée au contrôle (MMT, Robot de mesure, etc.), mais des problématiques apparaissent en termes de format d'échange de données entre les phases d'usinage, de planification de l'inspection, d'exécution de l'inspection ainsi que dans la boucle de retour qui permet d'intégrer les résultats de l'inspection dans le processus de fabrication.

À l'heure actuelle le processus d'inspection dans le cadre de la fabrication est celui détaillé sur la figure 1.36.

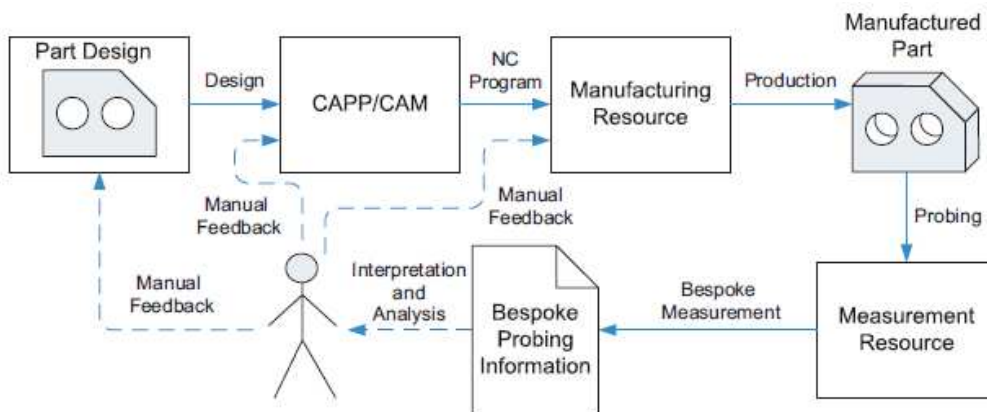


Figure 1.36 – Actuelle boucle de contrôle en Fabrication [KUM07]

Le résultat de mesure de la pièce n'est pas intégré automatiquement dans le proces-

sus [KUM07, KO07]. En effet, les formats d'échange ne le permettant pas, l'opérateur doit analyser les différents défauts de la pièce afin de modifier les paramètres de la fabrication au niveau de la CAO (redéfinition de la géométrie), de la FAO (redéfinition des paramètres de fabrication) ou de maintenance du matériel de fabrication (changement d'outil, mise en géométrie, etc.).

Le principal frein à la non intégration automatique des résultats de mesure réside en partie dans le fait qu'il n'existe pas de format de données d'échange commun à la fabrication et au contrôle. En effet, les données de mesure utilisent des formats tels que DME, DMIS [DMIS], ou encore STEP AP219 [ISO10303-219], mais aucun lien n'est réalisé avec les données de fabrication.

Pour palier ce problème, un certain nombre de travaux ont porté sur la planification d'inspection assistée par ordinateur *CAIP* (*Computer-Aided Inspection Planning*). Le but principal de ces travaux est d'intégrer automatiquement les résultats du contrôle dans la boucle de fabrication pour modifier les paramètres de fabrication. Un *CAIP* est généralement constitué de 4 étapes majeures (Figure 1.37) :

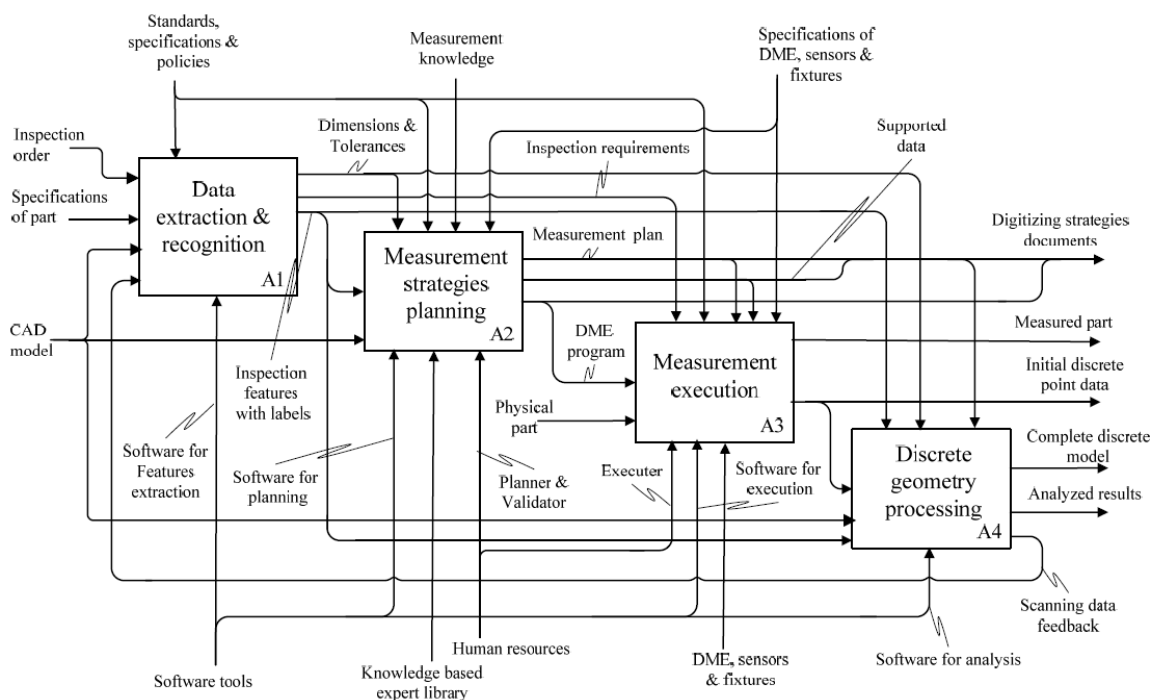


Figure 1.37 – Représentation d'un processus d'inspection multi-capteurs [ZHA10]

- Extraction des données du modèle [ZHA10] ou définition du produit [PRO07] ;
- Planification des stratégies de numérisation ;
- Exécution de la mesure ;

- Traitement des données.

Certaines méthodes découpent le processus en deux grandes étapes [ZHA09a, CHO04, LEE04] :

- Planification globale de l'inspection ;
- Planification locale de l'inspection.

Cette décomposition permet dans un premier temps (planification globale) d'isoler les entités géométriques à acquérir ainsi que de séquencer les acquisitions. Dans un second temps (planification locale), les éléments géométriques (lignes, surfaces) sont extraits de chaque entité et les points à acquérir sont déterminés.

La plupart des travaux s'inscrivent dans le contexte de l'inspection sur machine (*On-Machine Measurement*) [CHO02, CHO04, LEE04, KO07], ou dans celui de l'inspection en ligne au sens large [ZHA09, LIN01]. Ces travaux ont pour but d'intégrer les données d'inspection au processus de fabrication par l'intermédiaire d'une chaîne de retour dans le processus (Figure 1.38).

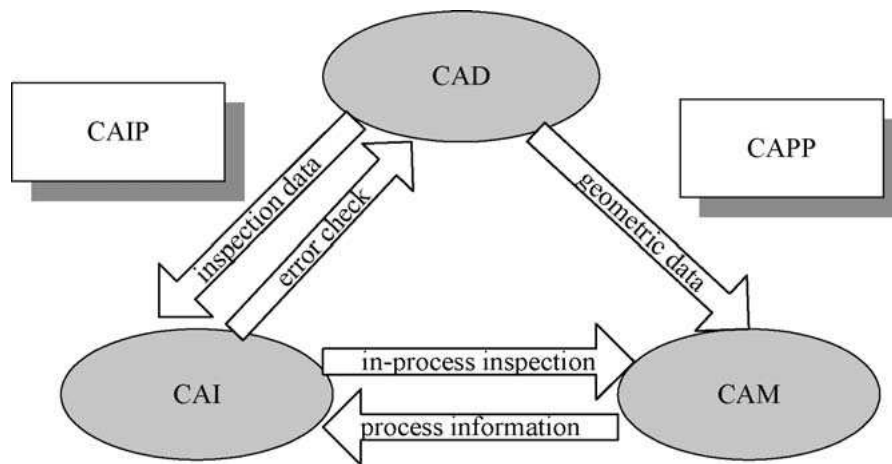


Figure 1.38 – Boucle de fabrication comprenant la phase d'inspection (d'après [ZHA09])

Le format de données STEP est celui qui se rapproche le plus des données de fabrication qui utilisent un langage similaire. Lin et Chow [LIN01] ont ainsi proposé une méthode de description des entités telles que les MMT, les capteurs, mais aussi la pièce avec ces entités de mesure, les résultats, etc. pour les mesures sur MMT afin d'intégrer le processus de mesure au processus de fabrication. Cette approche permet de planifier le contrôle à partir des données issues de la fabrication, mais le feedback reste impossible avec un tel format de données, les résultats de mesure ne peuvent pas être intégrés automatiquement à la fabrication.

Afin de se rapprocher des travaux récents en fabrication autour de la norme STEP-

NC [ISO14649] [BRE06, LAG10], et afin d'intégrer l'inspection en ligne dans ce format d'échange normalisé, Zhao *et al* [ZHA09, ZHA09a] ont travaillé sur l'intégration d'un projet de norme pour STEP-NC inspection [ISO14649-16] qui permet d'intégrer les ressources, opérations et résultats de mesure dans la boucle de fabrication (Figure 1.38).

Pour ce faire les différentes parties de la norme STEP-NC permettent de d'intégrer les données de la fabrication (Partie 10, 11 et 12 de la norme STEP-NC [ISO14649]) et les données d'inspection (partie 16 de la norme [ISO14649-16]) afin de modifier les paramètres d'usinage après inspection de la pièce.

La norme [ISO14649-16] a donc permis d'intégrer le processus d'inspection mais uniquement dans le cas de capteurs à contact montés sur des MMT ou MOCN. Le cas des capteurs sans contact de plus en plus présents dans l'industrie n'est pas traité dans cette norme.

Dans le cadre général STEP-NC, mais aussi dans un cadre plus général de CAIP, très peu de travaux portent sur l'utilisation de capteurs sans contact. Nous pouvons néanmoins citer les travaux de Ko *et al* [KO07] qui s'inscrivent dans la planification d'inspection sur machine avec un capteur sans contact. Le capteur utilisé est un profilomètre laser monté directement dans la MOCN, mais la boucle de retour n'est pas automatique, les données de mesure sont intégrées par l'opérateur grâce à une commande numérique (CN) ouverte (Figure 1.39).

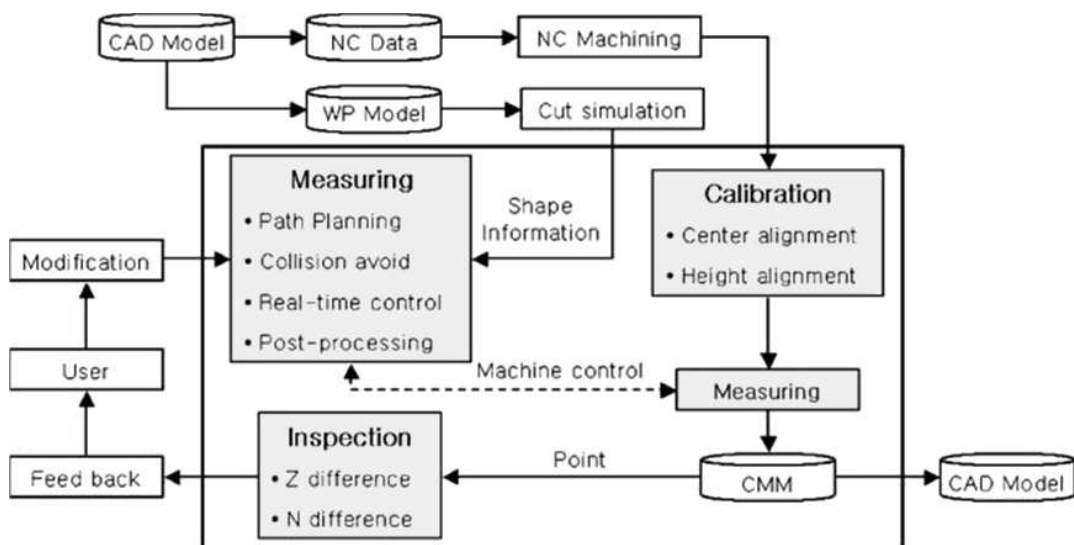


Figure 1.39 – Boucle d'inspection sur machine avec un capteur de déplacement laser [KO07]

Finalement l'intégration complète de l'inspection automatique dans un processus d'inspection en ligne ou sur machine n'est pas encore réalisée. Bien que le cas des capteurs

à contact soit traité dans une norme [ISO14649-16], cette dernière n'est encore pas publiée officiellement, et le cas des capteurs sans contact n'est pas traité. De ce fait les travaux sur la planification de l'inspection assistée par ordinateur pour les systèmes de numérisation sans contact sont rares et ne résolvent pas la fermeture de la boucle d'inspection en automatique.

L'approche que nous proposons pour l'inspection 3D automatique multi-systèmes s'appuie sur la littérature et se décompose en quatre étapes avec un apport majeur sur le plan multi-systèmes non pris en compte à l'heure actuelle. Ces quatre étapes sont les suivantes :

- Choix des systèmes de numérisation ;
- Définition d'une stratégie de numérisation ;
- Exécution de la numérisation ;
- Traitement des données.

Nous avons choisi de ne pas traiter la problématique de la boucle de retour dans cette thèse, néanmoins l'étude s'attache à rendre possible cette intégration par la suite. En effet, le processus d'inspection présenté dans le paragraphe 6 peut être utilisé dans les contextes d'inspection en ligne sur machine ou hors-ligne, les problématiques spécifiques à chaque cas sont extérieures à l'étude, seule l'influence sur le porteur et les posages pièce sont pris en compte.

6 Démarche d'inspection 3D automatique multi-systèmes

Comme nous l'avons présenté en introduction de ce chapitre, le problème de l'inspection 3D automatique multi-systèmes consiste, à partir de spécifications à vérifier et de systèmes de numérisation à disposition, à réaliser l'ensemble des activités permettant de vérifier les spécifications.

Nous venons de voir que ce problème fait intervenir différentes activités classiques généralement traitées séparément (cf paragraphe 5). Différents travaux ont traité le thème de la planification du processus d'inspection 3D multi-systèmes assistée par ordinateur [ZHA10], en se focalisant sur la planification de trajectoires de numérisation, sur le traitement des données issues de différents systèmes, mais pas sur la sélection en amont de ces systèmes. Cependant l'activité de choix du système de numérisation n'est en général pas traitée.

Les problématiques sous-jacentes que nous proposons sont les suivantes [AUD12] (Figure 1.40) :

- Choix des systèmes de numérisation ; il nécessite une connaissance de la qualité et des performances des différents systèmes, ainsi que la définition de critères de sélection.
- Définition d'une stratégie de numérisation ; elle doit être en accord avec l'application et les systèmes de numérisation choisis.
- Exécution de la mesure ; elle nécessite une cohérence des formats de données.
- Traitement et analyse des données ; cette dernière activité doit permettre d'extraire les caractéristiques géométriques inhérentes à l'application à partir des données provenant de différents systèmes de numérisation.

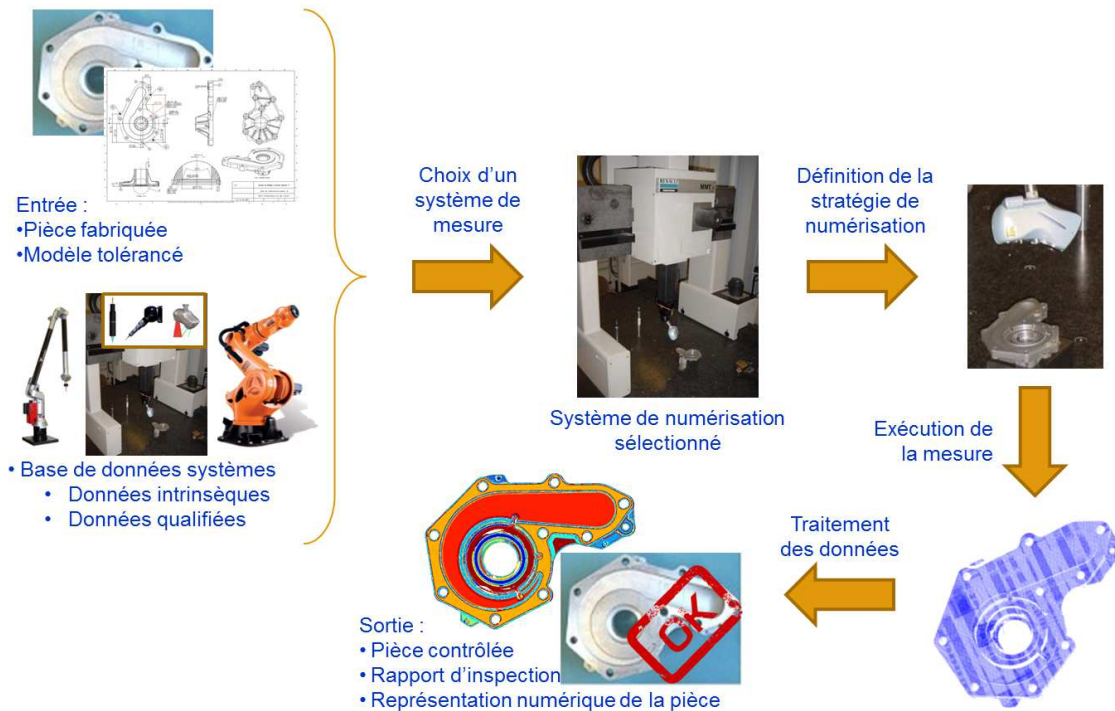


Figure 1.40 – Processus général d'inspection 3D automatique multi-systèmes

La démarche proposée se positionne dans un cadre général qui peut être adapté à l'inspection en ligne ou l'inspection hors ligne (Figure 1.14). Dans ce contexte, la figure 1.41 représente l'approche globale que nous proposons exprimée sous un formalisme SADT. Le niveau A-0 permet de visualiser les entrées-sorties, les contraintes et les outils relatifs à notre étude. À partir d'un modèle CAO tolérancé, une pièce fabriquée et un ordre de contrôle, l'objectif est d'aboutir à un rapport d'inspection et à une représen-

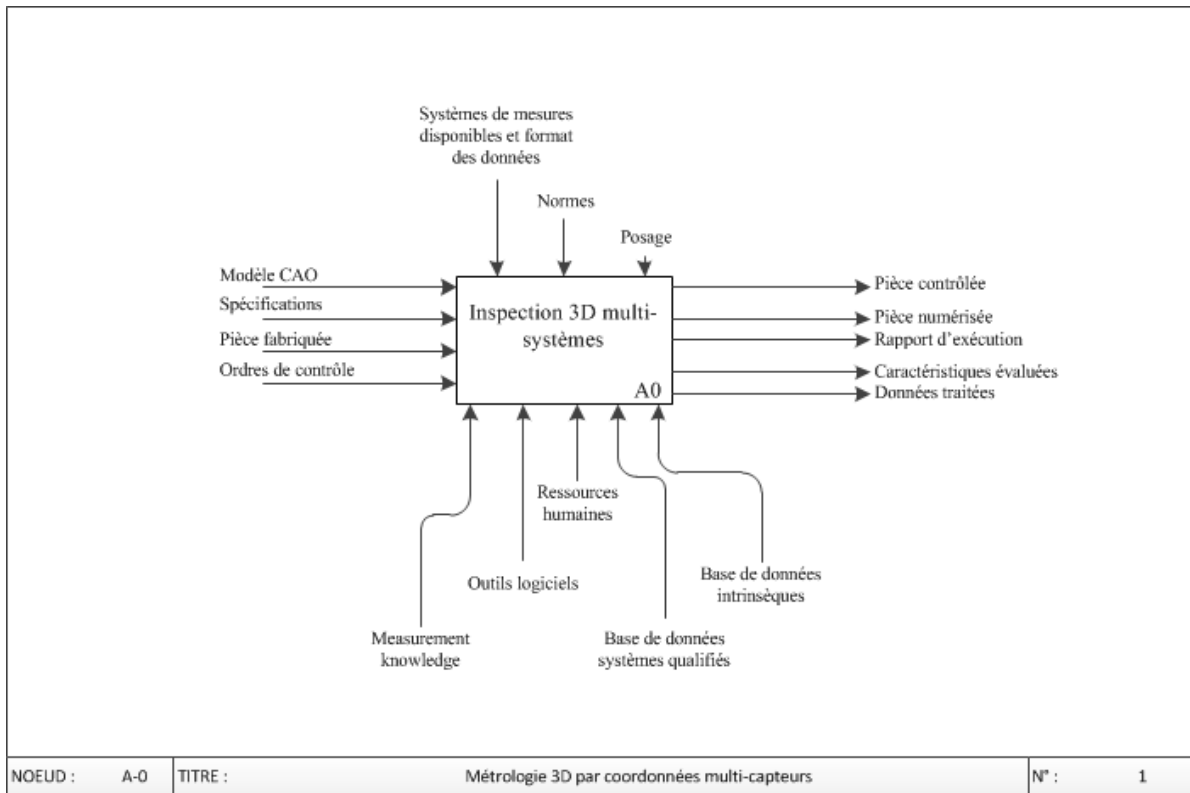


Figure 1.41 – SADT niveau A-0

tation numérique de la pièce. Pour ce faire, un certain nombre d'outils sont à notre disposition :

- une base de données de systèmes de numérisation ;
- des outils logiciels ;
- des ressources humaines ;
- la base des connaissances en métrologie.

Mais nous devons également prendre en compte des contraintes telles que :

- les normes ;
- les systèmes de numérisation à disposition ;
- le posage de la pièce éventuellement imposé.

Considérant les problématiques énoncées précédemment (Figure 1.40), nous proposons une décomposition de notre démarche en 4 activités (Figure 1.42) : choix de systèmes de numérisation (A1), Planification de la numérisation (A2), Exécution de la numérisation (A3), Traitement et analyse des données (A4). Par rapport aux démarches généralement proposées, l'activité de choix de systèmes de numérisation constitue une partie innovante. En effet, la plupart des études d'inspection 3D automatique proposées

dans la littérature se limitent à l'utilisation d'un palpeur à contact soit sur MMT soit sur MOCN [LIN01, ZHA09]. Les quelques études relatives à l'acquisition multi-systèmes sont quant à elles plus axées sur le traitement des données en vue de les rendre cohérentes et exploitables [WEC09, ZHA10], et reposent sur la connaissance *a priori* des systèmes utilisés.

Dans une démarche globale et générique, le choix des systèmes de numérisation consiste à sélectionner les systèmes et leurs configurations les plus adaptés pour effectuer l'application donnée selon des critères définis. L'activité de Planification de la numérisation consiste à fournir une trajectoire de numérisation pour chaque système sélectionné et chaque surface à numériser. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 3, la définition d'une stratégie de numérisation d'objets connus a fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature. À ce titre, celle-ci ne fera pas l'objet d'une attention particulière dans les travaux présentés ici. L'activité Exécution de la trajectoire permet le déplacement du porteur pour chacun des systèmes sélectionnés afin de respecter les trajectoires de numérisation définies à l'étape précédente. La principale problématique à ce niveau est l'incompatibilité de format d'échange des données entre la phase de planification et les différents systèmes de numérisation à piloter. Cette partie ne sera pas traitée dans le cadre de notre étude³. Enfin, l'activité Traitement et analyse des données est essentielle dans un contexte d'inspection 3D. La plupart des difficultés soulignées relèvent du traitement des grands nuages de points en relation avec les caractéristiques des données acquises par moyens optiques en termes de densité, bruit et complétude. Comme nous l'avons souligné au paragraphe 4, le contexte spécifique de la métrologie 3D, cadre restreint de l'inspection 3D que nous nous proposons de traiter, engendre des problématiques supplémentaires. En particulier, il est nécessaire d'éliminer le bruit de numérisation afin de rendre les données exploitables pour des applications de métrologie.

Ainsi, les travaux développés dans cette thèse s'articulent autour des activités (A1) et (A4).

3. Une application VB permettant le pilotage automatique de la MMT du LURPA a été réalisée [AUD09], elle permet le déplacement automatique de la machine à partir d'un fichier de points de trajectoire

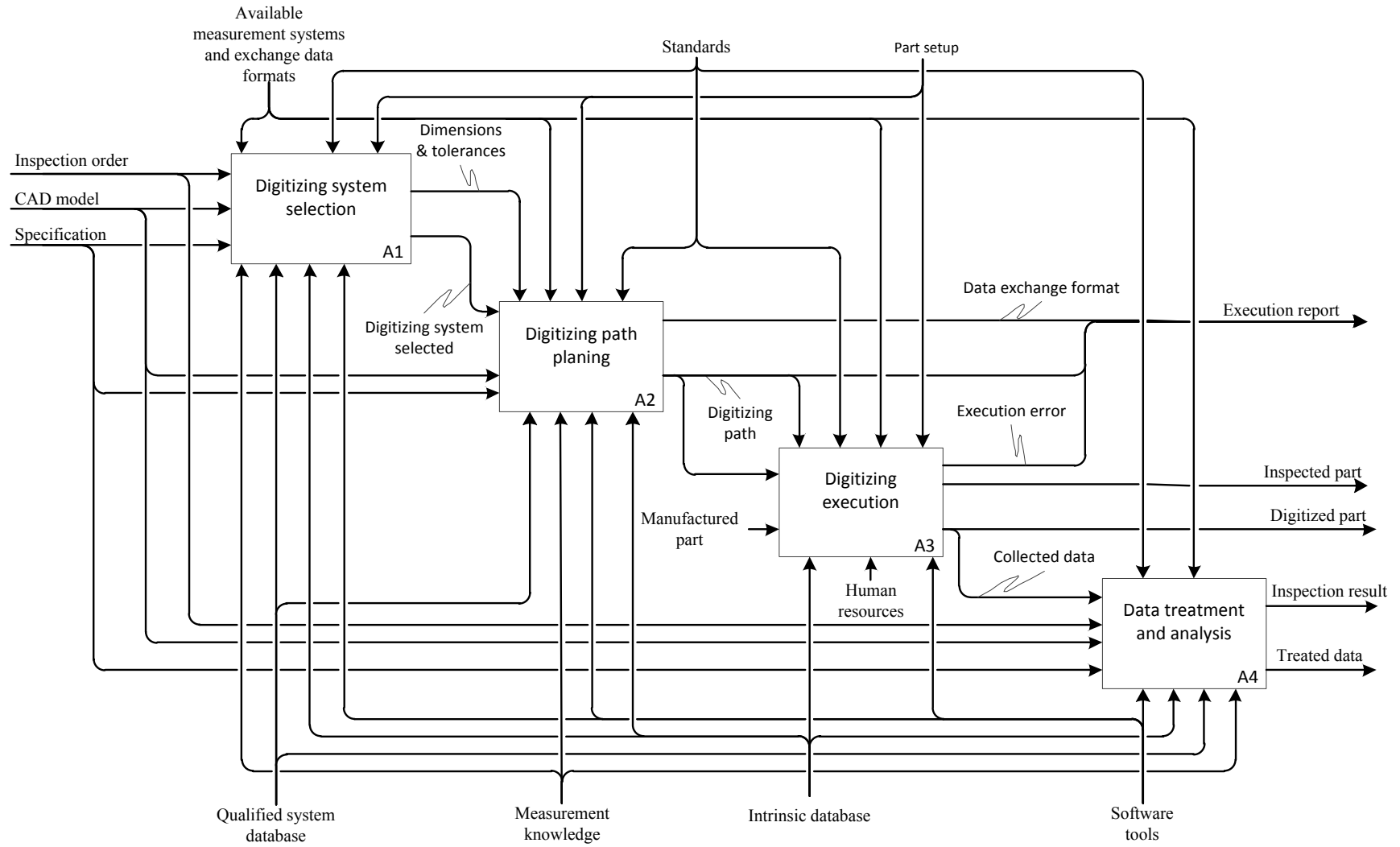


Figure 1.42 – SADT niveau A0

6.1 Choix du système de numérisation 3D (A1) [AUD12]

L'activité de choix du système de numérisation est centrale dans le processus, et consiste à déterminer le système de numérisation (capteur et porteur) le mieux adapté à chacune des surfaces de la pièce au regard de la spécification ou la grandeur à vérifier, c'est-à-dire répondant à des critères d'aptitude, de qualité et de performance. En d'autres termes, une surface ne nécessitant pas une acquisition de grande qualité peut être numérisée plus rapidement qu'une surface pour laquelle une spécification sur l'état de surface est à vérifier, et donc nécessitant une plus faible résolution et une grande exactitude.

Afin de répondre à ces contraintes, l'activité est divisée en trois sous-activités A11 à A13 (Figure 1.43) :

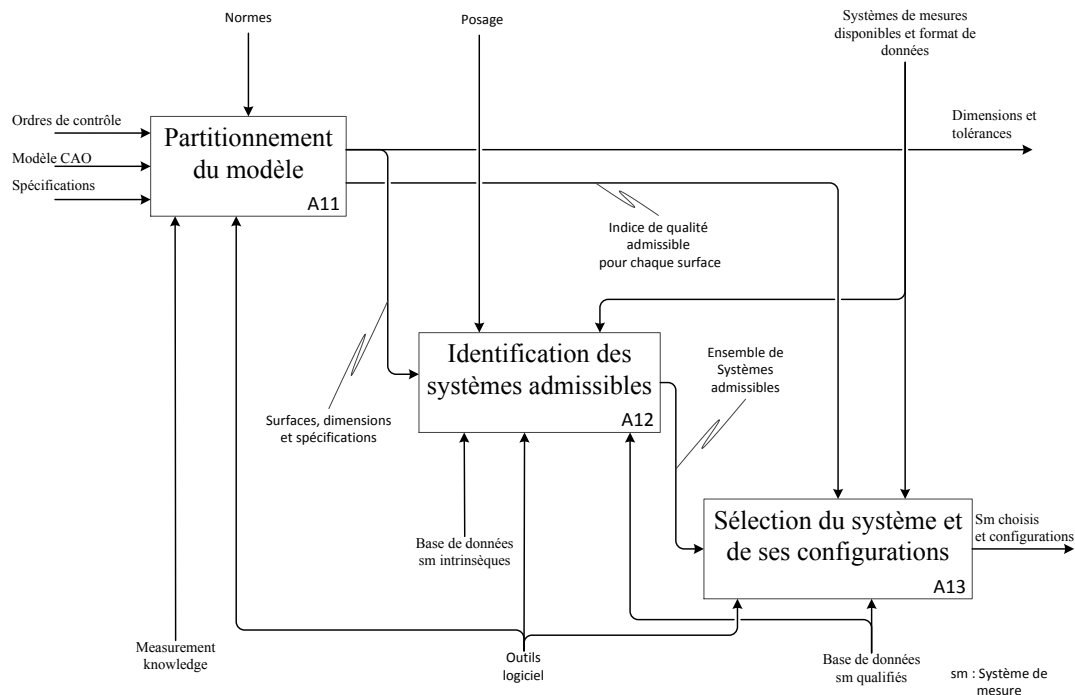


Figure 1.43 – SADT niveau A1

- Partitionnement en surfaces ;
- Identification des Systèmes Admissibles (ASI) ;
- Sélection du système et des configurations associées.

Rappelons que notre démarche admet comme point d'entrée un modèle CAO tolérancé. L'activité de partitionnement consiste à identifier les surfaces élémentaires à mesurer (La justification de ce choix provient du fait que l'acquisition est réalisée surface par surface,

et non entité par entité) Ce sont les surfaces pour lesquelles au moins une spécification leur est attachée, qu'elles soient tolérancées et/ou de référence. Ainsi, pour chaque surface élémentaire du modèle, la nature et l'intervalle de tolérance des spécifications concernées sont recensées. L'intervalle de tolérance permet en particulier de déterminer la qualité requise pour son acquisition [MAH11].

Comme pour les quelques approches de la littérature qui traitent de la comparaison des capteurs, nous proposons de sélectionner les systèmes selon différents critères.

Notre démarche est décomposée en deux temps :

- Identification des systèmes admissibles en fonction de leur aptitude et de la qualité des données acquises ;
- Sélection du système et de ses configurations selon des critères de performance.

Dans cette optique nous proposons les définitions suivantes.

Définition 1 *L'aptitude d'un système est sa capacité intrinsèque à effectuer l'acquisition de la surface en fonction de caractéristiques physiques et géométriques de la pièce et/ou de la surface ainsi que de l'échelle de numérisation.*

L'aptitude est considérée en termes d'accessibilité, d'échelle de mesure, de rigidité pièce, de texture ou encore d'indice de réflexion.

Définition 2 *La qualité d'un système de numérisation est sa capacité lui permettant de satisfaire le besoin exprimé.*

La qualité est évaluée au travers d'indicateurs qui quantifient la qualité des données acquises (en relation avec l'application). Dans le cadre de la métrologie, il s'agit essentiellement du bruit et de la justesse.

Définition 3 *La performance d'un système de numérisation est sa capacité à donner le résultat optimal avec un coût minimal.*

En d'autres termes la performance est la somme de l'efficacité et de l'efficience.

Le choix des systèmes admissibles permet de réduire le nombre de systèmes utilisables pour la numérisation d'une surface et le meilleur des systèmes parmi ceux-ci est le moins coûteux.

À partir de différents systèmes admissibles, le meilleur système est obtenu par minimisation d'une fonction de coût établie sur des critères de performance tels que la

vitesse de numérisation, la densité de points qu'il est possible d'obtenir ou encore la minimisation du changement de configuration capteurs.

La sélection du système s'appuie sur la connaissance d'informations relatives à la performance et à la qualité des systèmes. Afin de stocker ces informations, nous avons proposé de définir une base de données des systèmes de numérisation constituée de deux volets : une base de données intrinsèques et une base de données qualifiées. La base de données intrinsèques regroupe les données relatives indépendamment aux capteurs et aux porteurs données par les fabricants. Ces données sont utilisées pour caractériser l'aptitude des systèmes. La base de données qualifiées contient les données relatives à la qualité et aux performances des systèmes de numérisation, obtenues après qualification du système de numérisation. Dans ce sens, nous avons proposé un protocole de qualification des performances des systèmes optiques, QualiPSO. Contrairement à la majorité des approches qui ne qualifient généralement que le capteur, notre démarche de qualification s'intéresse au système de numérisation défini par le couple capteur/porteur. Cette étape originale de qualification fait l'objet du chapitre II. L'approche de sélection des systèmes de numérisation est détaillée au chapitre III.

6.2 Traitement et analyse des données (A4)

Afin d'obtenir un rapport d'inspection, quelle que soit la spécification à vérifier, l'activité « Traitement et analyse des données », est essentielle. Nous avons choisi de décomposer cette activité en 5 sous-activités (Figure 1.44) :

- Nettoyage ; consiste à retirer les données numérisées aberrantes.
- Fusion ; permet de recalculer et fusionner les données provenant de différents systèmes de numérisation et/ou différentes vues [ZHA10].
- Partition ; réalise le partitionnement des données en sous-ensembles correspondant à chaque surface élémentaire afin qu'elles soient traitées séparément [MEH10].
- Filtrage et lissage ; élimine le bruit de numérisation et lisse des données [AUD11, AUD12a].
- Évaluation des caractéristiques ; Évalue les grandeurs correspondant aux spécifications géométriques à vérifier.

Ce découpage a été choisi de manière cohérente avec la littérature [ZHA10], chaque étape correspondant à une problématique forte de traitement des grands ensembles de

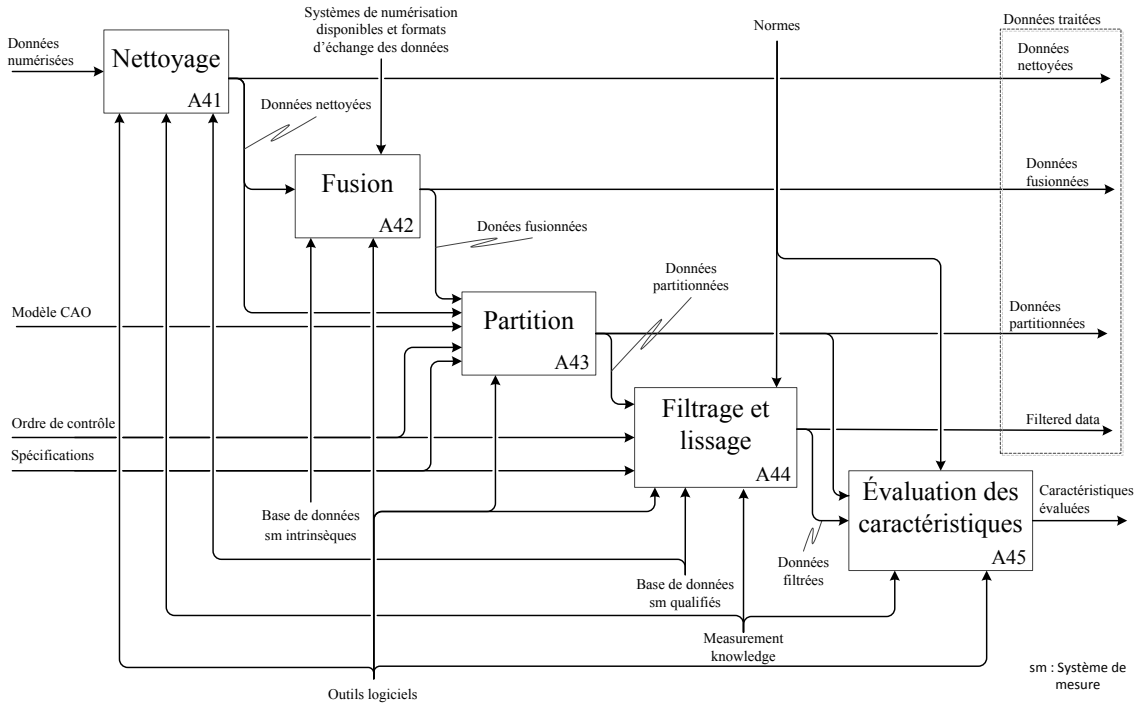


Figure 1.44 – SADT niveau A4

données 3D. L'étape de traitement et analyse des données présentée ici est détaillée dans le chapitre IV ; une attention particulière sur les étapes de partitionnement et de filtrage des données sera portée. L'étape de partitionnement résulte de travaux développés dans le cadre du projet Farman GII en partenariat avec le CMLA-ENS Cachan. Concernant le filtrage, l'utilisation d'un filtre adapté aux applications métrologiques est détaillée. Ce filtre permet d'éliminer le bruit de numérisation tout en conservant les défauts des surfaces.

Chapitre II

QUALIFICATION ET PERFORMANCES DES SYSTÈMES DE MESURE OPTIQUES

« QUALIPSO »

Sommaire

1	Introduction	61
2	État de l'art sur la qualification des systèmes	61
2.1	Sources d'erreurs dégradant la qualité	61
2.1.1	Système de déplacement (porteur)	62
2.1.2	Système d'acquisition (capteur)	63
2.1.3	Système de traitement	65
2.1.4	Stratégie de numérisation	67
2.1.5	Synthèse	68
2.2	Évaluation des performances des systèmes de numérisation	69
2.2.1	Caractéristiques des données acquises	69
2.2.2	Méthodes objectives	71
2.2.3	Méthodes comparatives	74
2.3	Synthèse	76
3	Mise en situation du protocole QualiPSO	77
3.1	Paramétrisation géométrique des capteurs sans contact	77
3.2	Caractéristiques de performance et de qualité	79
3.3	Classification des porteurs pour le protocole	81
3.4	Objectifs du protocole	82
4	Caractérisation du système	82
4.1	Évaluation de la fenêtre de mesure	82
4.1.1	Définition	82

4.1.2	Procédure de caractérisation	83
4.1.3	Artefacts de numérisation	84
4.1.4	Évaluation des caractéristiques	85
4.2	Évaluation des remises en position du système	85
4.2.1	Définition du recalage des données	85
4.2.2	Artefacts de numérisation	87
4.2.3	Procédure de caractérisation	87
4.2.4	Évaluation des caractéristiques	88
4.3	Évaluation de la calibration externe	89
4.3.1	Calibration et recalage des données	89
4.3.2	Artefacts de numérisation	90
4.3.3	Procédure d'évaluation de la calibration	91
4.3.4	Exploitation des mesures	92
5	Évaluation des indices de qualité	93
5.1	Évaluation du bruit de numérisation	93
5.1.1	Définition du bruit de numérisation	93
5.1.2	Paramètres influents et artefacts de numérisation	93
5.1.3	Artefacts de numérisation	94
5.1.4	Caractérisation de l'influence de la distance de numérisation	95
5.1.5	Caractérisation de l'influence des angles de numérisation	96
5.1.6	Calcul du bruit	98
5.2	Évaluation de la justesse	99
5.2.1	Définition de la justesse de mesure	99
5.2.2	Évaluation de la justesse de mesure	99
5.2.3	Évaluation de la justesse de mesure dite « relative »	103
6	Matification	107
7	Application du protocole	109
7.1	Résultats sur les caractéristiques système	110
7.1.1	Fenêtre de mesure	110
7.1.2	Étude des défauts de remise en position	111
7.1.3	Étude des défauts de recalage dus à la calibration	113
7.2	Résultats sur la qualité	114
7.2.1	Bruit de numérisation	114
7.2.2	Justesse de mesure	117
7.2.3	Justesse dite « relative »	118
7.3	Base de données qualifiées	119
8	Conclusion	121

1 Introduction

Afin de réaliser un choix de système de numérisation dans la démarche d'inspection 3D multi-systèmes proposée ici, une base de données de systèmes qualifiés est mise en place dans laquelle des informations sur les capacités et aptitudes des systèmes de numérisation sont stockées. Afin d'instancier cette base de données, il est nécessaire de qualifier les différents systèmes de numérisation, avec pour objectif de déterminer leurs limites en termes de qualité de données acquises ainsi que leurs configurations d'utilisation optimales, ce qui permet de valider ou non l'utilisation d'un système pour une application donnée (Chapitre III).

Le présent chapitre décrit le protocole QualiPSO, Qualification et Performances des Systèmes de mesure Optiques, que nous proposons. Le protocole est essentiellement dédié aux systèmes de mesure à base de capteurs optiques, l'évaluation de la performance et de la qualité des capteurs à contact étant déjà bien maîtrisée. Après un état de l'art sur la qualification des données et des systèmes d'acquisition, nous positionnerons nos travaux afin de justifier l'intérêt du protocole mis en place. Nous présentons par la suite la paramétrisation géométrique des systèmes de numérisation que nous adoptons afin de maîtriser des paramètres équivalents sur des systèmes de numérisation de technologies différentes. Le protocole est ensuite explicité pour chaque caractéristique à évaluer.

2 État de l'art sur la qualification des systèmes

Afin de maîtriser au mieux les données acquises par numérisation sans contact, il est nécessaire de qualifier ces systèmes. Les données collectées sont entachées d'erreurs (justesse, bruit, etc.) qui sont dues en partie au capteur, au porteur, ainsi qu'à la stratégie de numérisation adoptée. Nous présentons dans un premier temps les sources d'erreurs affectant la qualité, puis nous présentons les travaux existants en termes de qualification des systèmes qui nous ont permis de mettre en place le protocole QualiPSO.

2.1 Sources d'erreurs dégradant la qualité

Comme nous l'avons vu précédemment, un système de numérisation est constitué d'un capteur (ou système d'acquisition) et d'un porteur (ou système de déplacement), mais aussi d'un système de traitement [CON01]. L'incertitude sur l'acquisition des points

peut provenir ainsi de chacun des trois systèmes : acquisition, déplacement et traitement (Figure 2.1). Les auteurs mettent également en avant la stratégie de numérisation comme source d'erreurs potentielle. Ces différentes sources sont détaillées dans la suite.

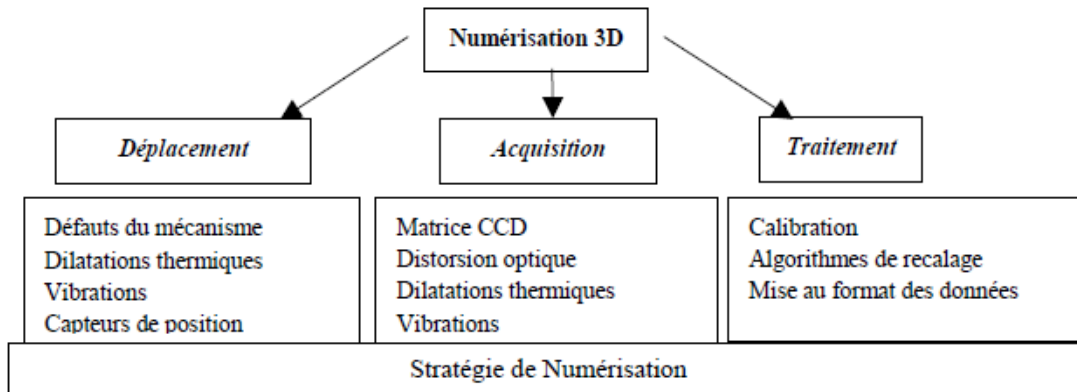


Figure 2.1 – Sources d'imprécision [LAR04]

2.1.1 Système de déplacement (porteur)

Lors du déplacement du capteur, les sources d'erreurs sont dues aux défauts du mécanisme, aux dilatations thermiques, aux vibrations ou encore aux capteurs de position (règles, codeurs, etc.) [LAR04]. Dans l'hypothèse de stabilité thermique et vibratoire, ainsi que dans l'hypothèse des défauts des mécanismes négligeables, il ne reste que les erreurs liées aux capteurs de position. Ces derniers sont généralement négligés dans le cas de l'utilisation de MMT, mais lors de l'utilisation de bras robotisés ou polyarticulés, les codeurs génèrent en général des erreurs dont on ne peut pas faire abstraction dans le cadre de l'inspection dimensionnelle. Santolaria *et al* ont développé une méthode de caractérisation de la répétabilité de mesure d'un bras polyarticulé à l'aide d'une *ball-bar* [SAN08]. Leur étude est basée sur la détermination des paramètres géométriques optimaux en termes de qualité de données. Les travaux mettent en avant une répétabilité de mesure non acceptable pour de l'inspection ($2\sigma=0,202$ mm dans la pire configuration pour le bras étudié), d'où un besoin de correction logicielle pour améliorer la répétabilité afin d'obtenir une valeur maximale diminuée de 50%.

Certains systèmes nécessitent une calibration dans chaque configuration du porteur (MMT avec une tête rotative positionnante par exemple). Les erreurs engendrées par les étapes de mises en position sont généralement négligées [MAH11], les calibrations sont

donc réalisées au préalable de l'utilisation et le système remis en position à plusieurs reprises. Cependant l'utilisation de capteurs optiques augmente considérablement le bras de levier d_i entre l'axe de rotation de l'articulation et le point acquis sur la surface. Ainsi un faible défaut d'orientation α de l'organe engendre une erreur e_i plus importante sur la position du point acquis (Figure 2.2). Nous considérons donc ici que ces erreurs engendrées doivent être prises en compte.

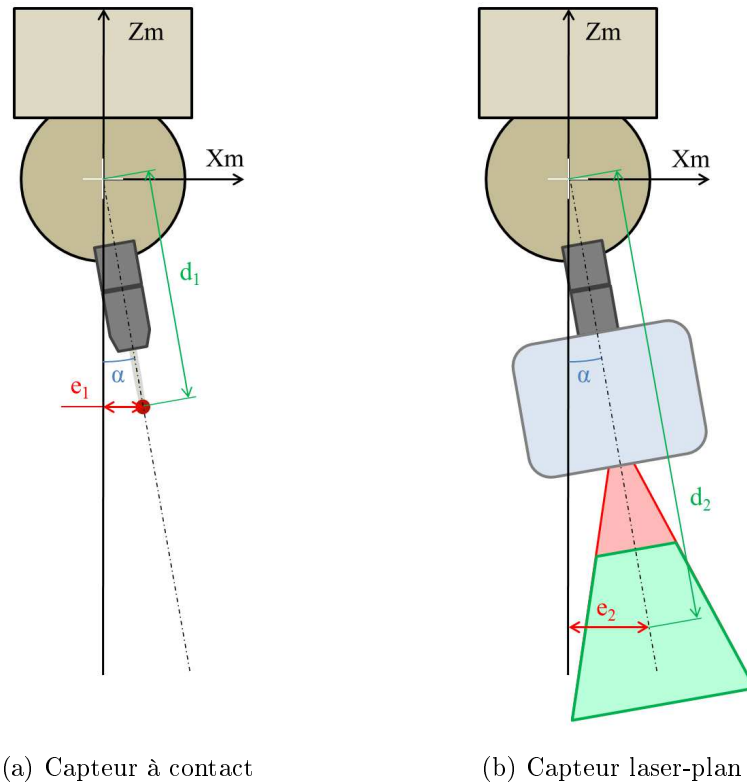


Figure 2.2 – Erreur induite par un défaut d'orientation d'une tête de positionnement : différence entre capteurs à contact et capteurs optiques

2.1.2 Système d'acquisition (capteur)

Dans le cadre de l'acquisition à l'aide de capteurs optiques 3D, les erreurs et imprécisions sont principalement dues à la qualité du capteur et à l'environnement (Figure 2.3).

En effet, le capteur est constitué d'une source lumineuse et d'un récepteur qui ont un impact sur la qualité [CON02a]. La source émet une lumière ayant une répartition d'intensité supposée gaussienne, mais qui en réalité ne l'est pas [ZHO98].

Concernant le récepteur, il s'agit dans la plupart des cas d'une caméra CCD (Charged-Coupled Device) dont un schéma de principe est donné sur la figure 2.4. La caméra

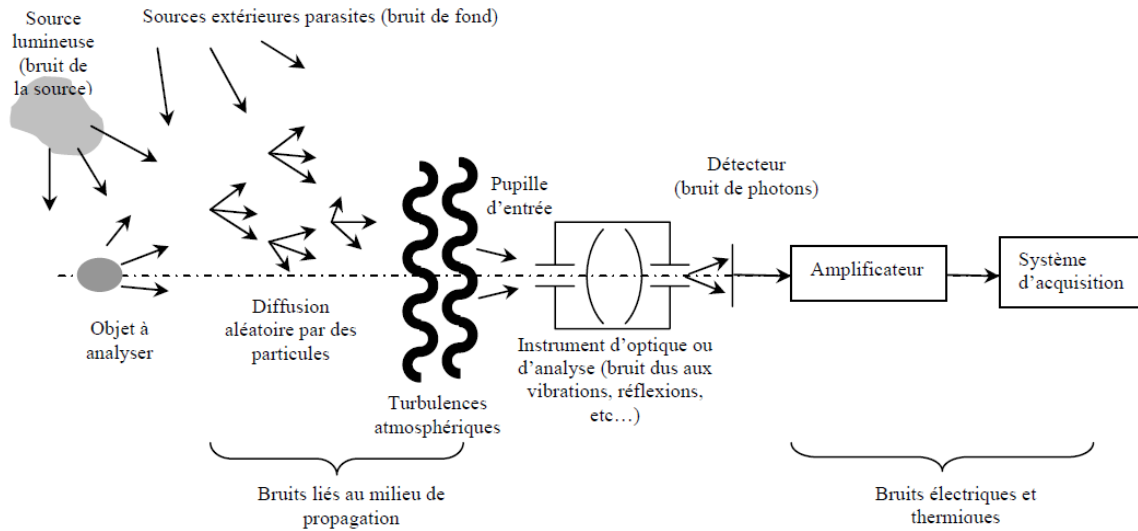


Figure 2.3 – Principales sources de bruit en mesures optiques [GOU97]

est constituée de deux organes principaux : l'objectif et la matrice CCD. L'objectif est constitué d'un grand nombre de lentilles (15 au minimum pour assurer une représentation géométrique conforme de l'objet [TOR04]). Les problèmes d'alignement de ces lentilles provoquent des distorsions, principalement radiales et tangentielles [CHA98, GUE03].

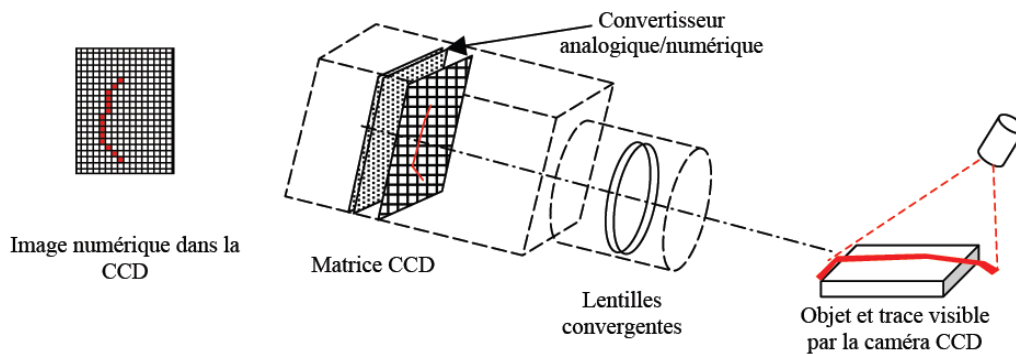


Figure 2.4 – Schéma d'une caméra CCD [MEH06]

La matrice CCD est composée de pixels constitués d'un semi-conducteur en sandwich dans un condensateur électrique [OBS04]. Ces pixels peuvent présenter des défauts (forme, qualité des condensateurs, polarisation, etc.) ce qui génère du bruit. Ces défauts sont corrigés en partie par des opérations logicielles.

Une étape de calibration interne du capteur permet le passage du repère image 2D de la matrice CCD au repère 3D caméra.

Dans le cadre de l'utilisation d'un capteur laser-plan, en plus du problème d'aniso-

trope de la matrice CCD [CON02] s'ajoute le problème de forme du plan laser. En effet, celui-ci, formé par dilatation d'un faisceau laser dans une direction, présente un défaut de forme qui influe sur la qualité des mesures.

En ce qui concerne les dilatations thermiques et les vibrations, il est généralement admis que la mesure est réalisée dans un environnement stabilisé du point de vue thermique et vibratoire [LAR04], ces erreurs sont donc négligeables. En ce sens, Van Gestel *et al* ont mis en évidence l'importance d'atteindre une plage de stabilité thermique du capteur dans le cadre de l'utilisation d'un capteur laser-plan monté sur MMT.

Prieto a montré que la forme et la nature de la pièce jouent un rôle important en termes d'exactitude de mesure [PRI99]. En effet, des paramètres tels que la réflexivité de la surface qui change au cours de la numérisation, une surface trop réfléchissante, une géométrie discontinue en tangence, un faisceau lumineux partiellement occlus ou encore du bruit de *speckle*¹ sont autant de paramètres qui génèrent des perturbations sur les points acquis. Préalablement à ces travaux, Chavand et Colle [CHA98] avaient étudié les perturbations engendrées par les conditions de mesure. Ils avaient ainsi mis en évidence l'importance du matériau et de l'état de surface de la pièce, du milieu entre le capteur et la pièce, ainsi que la largeur du faisceau de mesure et la fréquence de l'onde émise.

2.1.3 Système de traitement

Le système de traitement permet de réaliser le lien entre les données caméra et les données porteur, afin que l'utilisateur obtienne des données 3D (nuage de points, maillage, etc.). Ainsi une étape de calibration externe permet le passage du repère caméra au repère de mesure lié au porteur (Figure 2.5).

Une étape de calibration interne préalable, réalisée en usine, permet de passer des données du repère caméra R_{CCD} aux données liées au repère capteur R_C . L'étape de calibration externe permet alors de passer du repère capteur R_C au repère mesure R_0 lié à la machine. De la même manière que pour l'étalonnage d'un palpeur mécanique monté sur MMT, la calibration externe consiste à numériser une sphère de faible défaut de forme dont le centre constitue le centre du repère mesure R_0 . La calibration externe est réalisée pour chaque nouvelle configuration capteur/porteur (différentes orientations capteur). De ce fait, les données acquises dans ces différentes configurations sont recalées,

1. Phénomène de rétrodiffusion qui apparaît lorsque la rugosité est très supérieure à la longueur d'onde du rayon lumineux émis [CHA98]

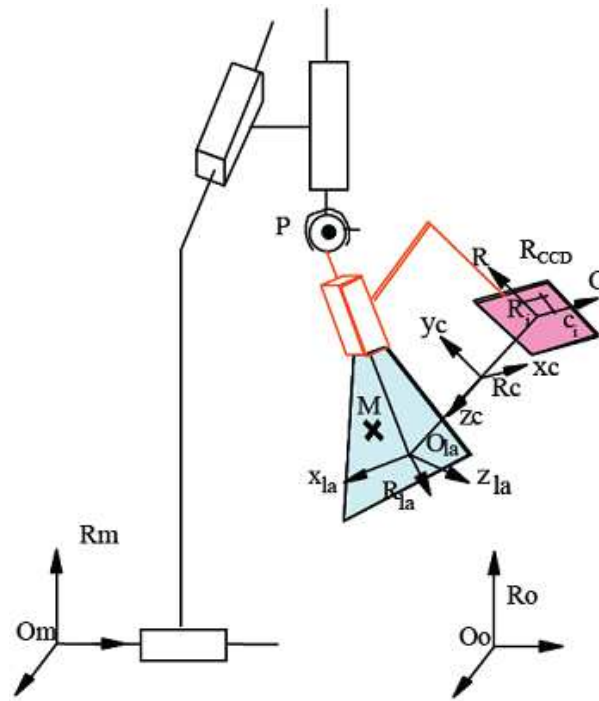
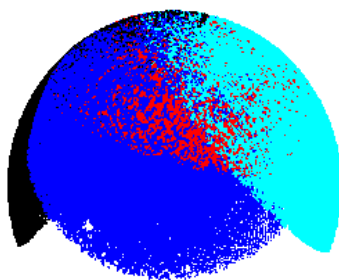


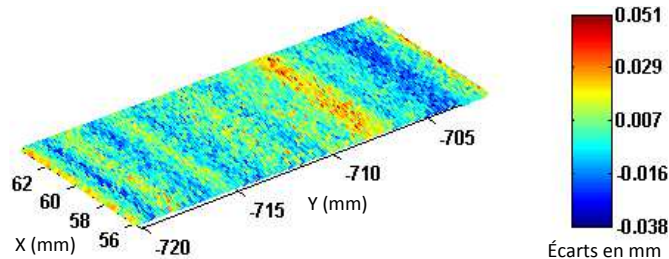
Figure 2.5 – Disposition relative des repères [MEH06]

c'est-à-dire exprimées dans le même repère.

Le système de traitement est également une source d'erreurs non négligeable, notamment en termes de recalage des données acquises avec plusieurs positions capteur, de calibration externe du capteur ainsi que dans la mise au format des données [LAR04]. Par exemple, lors de l'utilisation de plusieurs systèmes ou plusieurs posages de la pièce, une opération de recalage est indispensable.



(a) Défaut de recalage des vues d'une sphère dus à la calibration externe



(b) Défaut de calibration d'un capteur laser-plan

Figure 2.6 – Défauts de recalage et de calibration interne

La figure 2.6a présente qualitativement le défaut de recalage des différentes prises de vue d'une sphère ; la figure 2.6b présente les écarts entre les points acquis avec un capteur laser-plan sur un plan de référence et le plan associé par le critère des moindres

carrés.

2.1.4 Stratégie de numérisation

Pour la plupart des paramètres énoncés ci-dessus, la stratégie de numérisation a un impact important sur les perturbations, en particulier ce que nous appelons la configuration capteur/pièce qui regroupe la distance et les angles de numérisation. En effet, lorsque l'on modifie la distance et l'angle entre le capteur et la pièce à numériser, les propriétés de réflexion sont modifiées et le bruit induit varie donc également. Pour exemple, la figure 2.7 présente l'évolution de la position relative d'un plan numérisé avec un capteur laser-plan avec celui obtenu par palpation mécanique, en fonction de la distance de numérisation. La figure montre que la position évaluée du plan est fortement dépendante de la distance de numérisation.

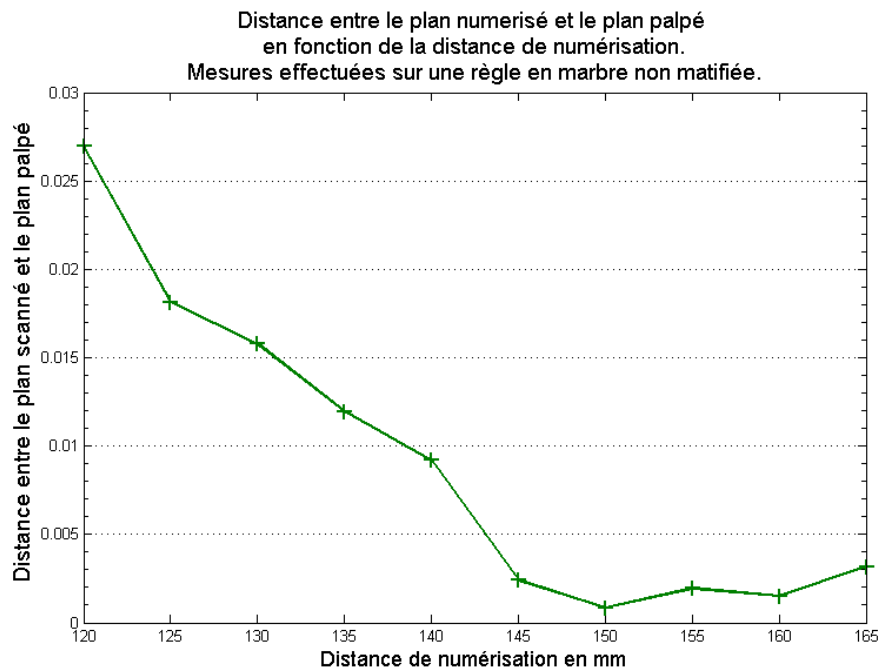


Figure 2.7 – Position relative des plans numérisés avec un capteur laser-plan et un palpeur mécanique

En ce sens, Prieto a développé un modèle de bruit prenant en compte ces facteurs qui influent sur la qualité des données acquises [PRI99]. L'auteur peut ainsi prédire le bruit de numérisation en fonction de l'angle et de la distance de numérisation. Les travaux de Contri ont permis de valider cette première approche [CON02] qui met en avant la configuration capteur/pièce comme étant un facteur important concernant la qualité des données.

2.1.5 Synthèse

Comme nous l'avons vu, tous les éléments liés à la numérisation, le capteur, le porteur et le système de traitement, mais aussi la stratégie de numérisation, jouent un rôle important dans la qualité des données acquises en étant chacun source d'imprécisions.

En effet, l'utilisation de capteurs optiques génère du bruit qui entache d'incertitude les données acquises. Ce bruit est très dépendant de la stratégie de numérisation, et particulièrement la configuration capteur/pièce, qui joue donc un rôle fondamental dans la maîtrise de la qualité des données acquises.

Les défauts engendrés par les porteurs sont en général d'un ordre de grandeur inférieur à ceux engendrés par les capteurs optiques. De ce fait, dans le cas de l'utilisation de MMT, ces défauts sont généralement négligés.

Fort de ce constat, en se basant sur la décomposition introduite au paragraphe 2.1, Mahmud *et al* ont déterminé la chaîne d'incertitude d'un système composé d'un capteur laser-plan et d'une MMT [MAH11] à partir de la méthode PUMA (Procedure for Uncertainty of Measurement MAnagement) définie par Heping et Xiangqian [HEP09]. Les auteurs aboutissent à un modèle d'incertitude composé de quatre termes : u_{sen} l'incertitude due au capteur, u_{ref} l'incertitude liée à la remise en position d'une tête positionnante, u_{CMM} l'incertitude due à la MMT et u_{mat} l'incertitude liée au matériau de la pièce à numériser. En revanche, l'incertitude liée au déplacement est considérée comme négligeable.

Les hypothèses réalisées par Mahmud sont valides pour l'utilisation de MMT, cependant, lorsque des porteurs autres sont utilisés, il semble indispensable de prendre en compte les imprécisions engendrées par les déplacements, en particulier lorsque le porteur utilise des codeurs (bras polyarticulés ou robotisés).

Finalement, pour le présent protocole aucun des maillons de la chaîne n'est négligé ; nous considérons le système de numérisation dans son ensemble, ainsi que la stratégie de numérisation, et proposons des grandeurs et caractéristiques à évaluer basées sur la littérature.

2.2 Évaluation des performances des systèmes de numérisation

Dans la littérature les méthodes d'évaluation des systèmes de numérisation peuvent être classées en deux familles :

- les méthodes que nous qualifions de « comparatives ». Ce sont les méthodes qui utilisent un système de numérisation donnant des résultats de meilleure qualité, définissant une mesure de référence.
- les méthodes que nous qualifions d'« objectives ». Ce sont les méthodes qui utilisent des artefacts de numérisation de référence seuls, sans dépendance à un autre système de numérisation.

Cependant le point de vue adopté peut être différent. En effet, certains évaluent la qualité des données acquises avec un système de numérisation donné, alors que d'autres s'attachent à valider un système de numérisation pour l'application désirée. Dans le premier cas une méthode objective est généralement mise en place [AGU96, FEN01, MEH08], alors que dans le second cas une méthode comparative peut être plus appropriée [MAR10].

2.2.1 Caractéristiques des données acquises

Les données issues de la mesure 3D sans contact possèdent des caractéristiques particulières qui les différencient des données issues de la mesure avec contact. Ainsi les données obtenues, généralement des nuages de points, sont denses, inhomogènes, bruitées, présentant des lacunes de numérisation et avec une exactitude de mesure moins bonne que celle obtenue par palpation mécanique [LAR02, LAR04] (Figure 2.8).

En l'absence de normes, des indicateurs de qualité ont été développés de manière à quantifier ces caractéristiques. Partant des travaux de Hoppe *et al* [HOP92], Contri a proposé de qualifier un nuage de points au moyen de quatre indicateurs désormais usuels [CON02] : densité, complétude, bruit et exactitude. Les deux premiers sont dits « intrinsèques » car ils peuvent être évalués sur les données sans connaissance du processus d'acquisition qui a permis de les obtenir. En revanche, les deux derniers indicateurs sont dits « spécifiques » car leur évaluation dépend fortement du système de numérisation ainsi que des paramètres du processus de numérisation (configuration capteur/pièce, environnement, etc.). Les définitions de ces indicateurs sont les suivantes [CON02] :

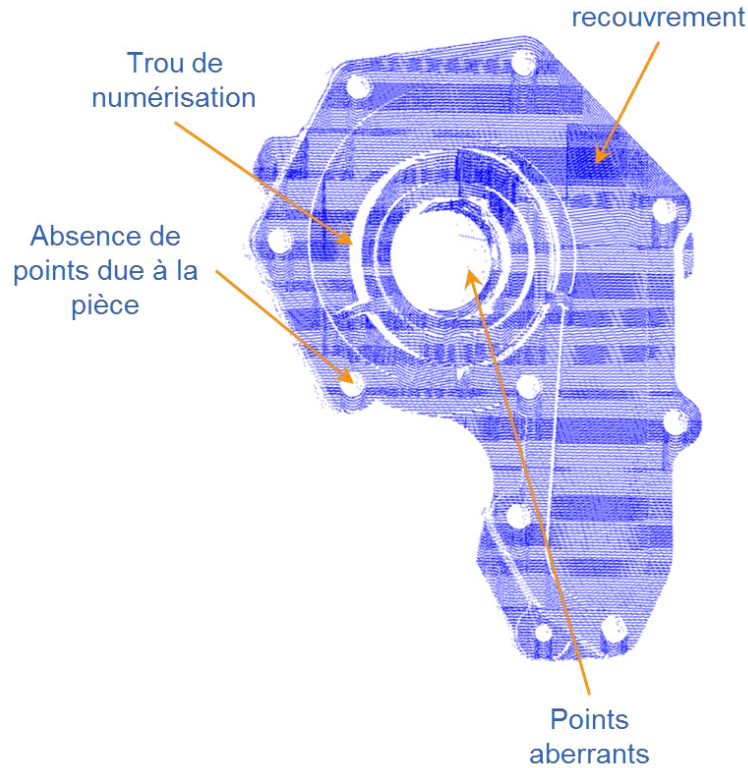


Figure 2.8 – Nuage de points caractéristique : numérisation à l’aide d’un capteur laser-plan

δ -bruit : Soit $X = x_1, \dots, x_n$ un ensemble de points numérisés sur ou proche de la surface inconnue S . Chaque point $x_i \in X$ pouvant s’écrire sous la forme $x_i = a_i + e_i$, où $a_i \in S$ est un point de la surface inconnue et $e_i \in \mathbb{R}^3$ est un vecteur d’erreur. Une acquisition X est dite δ -bruitée si $\|e_i\| \leq \delta$ pour tout i , $\|x\|$ est ici la distance euclidienne.[HOP92]

Le bruit de numérisation est en général évalué en considérant δ comme un multiple de l’écart-type de la répartition des écarts e_i .

τ -exactitude : Une acquisition est dite τ -exacte si en considérant M le point réel de la surface visé et M_i le point numérisé, alors : $\|\overrightarrow{M_i M}\| \leq \tau$.

ρ -densité : Soit $Y = y_1, \dots, y_n \subset X$ un ensemble d’acquisitions non bruitées de la surface S . Y est appelé ρ -dense si toute sphère de rayon ρ , centrée sur un point M ne contient qu’un seul point dans l’ensemble Y .

κ -complétude : Une "incomplétude" est définie par un changement local brusque de densité dont on aura fixé le seuil. La grandeur κ associée est un

taux de couverture de la surface numérisée tel que :

$$\kappa\% = \left(1 - \frac{\sum Aires_{zones\ seuillées}}{\sum Aires_{zones\ numérisées}} \right) \cdot 100$$

Ces indicateurs jouent un rôle important dans le processus de numérisation 3D, mais ils n'ont pas tous le même intérêt en fonction de l'application réalisée avec les données acquises. Ainsi, Contri [CON02] a proposé de mettre en relation l'application et les indicateurs de qualité (Tableau 2.1).

Applications \ Indicateurs de qualité	densité	complétude	bruit	Exactitude
Rétroconception	+	=	++	=
Copiage de forme	++	+	+	++
Inspection dimensionnelle	=	+	+	++
Visualisation 3D	+	++	=	=
Prototypage Rapide	+	++	=	=

++ : indicateur principal, + : indicateur secondaire, = : indifférent

Tableau 2.1 – Relation entre les indicateurs de qualité et l'application visée [CON02]

Dans le cas de l'inspection 3D, l'exactitude est l'indicateur prépondérant, mais le bruit et la complétude sont également importants. Dans le cadre de la vérification d'une spécification de forme notamment, ces deux derniers indicateurs deviennent prépondérants devant l'exactitude de mesure.

2.2.2 Méthodes objectives

Parmi les précurseurs dans le domaine de l'évaluation des performances des systèmes de numérisation 3D sans contact, nous pouvons citer les travaux de Prieto [PRI99, PRI03] qui met en avant l'importance d'évaluer l'influence de la configuration capteur/pièce sur la qualité des données. La figure 2.9 représente l'évolution de la variance en Z (axe optique) en fonction de l'angle de numérisation α^2 (Figure 2.9).

Par la suite Contri [CON02] a proposé une évaluation de la qualité des données acquises avec un capteur laser-plan monté sur MMT. Ses travaux ont permis d'évaluer l'exactitude de mesure en fonction de la position d'un point acquis dans la matrice CCD, ainsi que le bruit en fonction de l'angle de numérisation à travers les indicateurs

2. Les paramètres géométriques sont définis au paragraphe 3.1, Figure 2.14

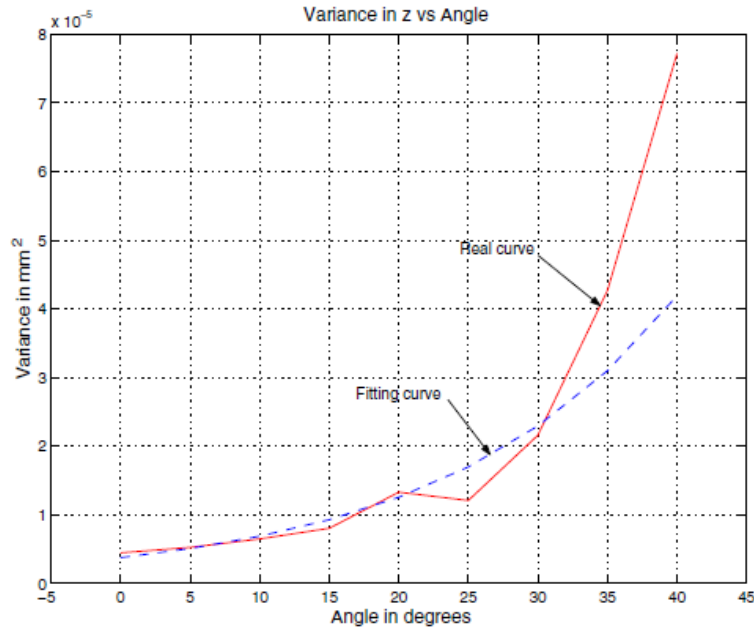
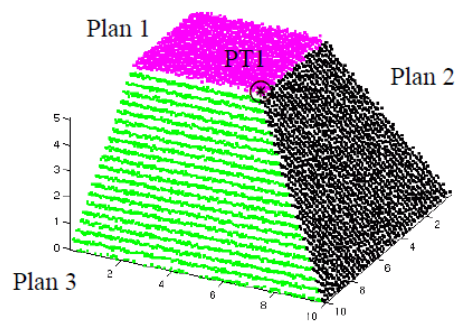


Figure 2.9 – Variance en Z en fonction de α [PRI99]

de qualité définis précédemment. À partir d'un artefact constitué de plusieurs plans (Figure 2.10a) l'auteur évalue l'erreur d'exactitude associée à l'évaluation de la distance entre deux points 3D, formés par l'intersection de trois plans (Figure 2.10b), en fonction de la position 2D dans l'espace du capteur. La fenêtre de mesure est ainsi caractérisée afin d'associer à chaque point acquis une incertitude de mesure.



(a) Artefact triplan



(b) Extraction d'un point

Figure 2.10 – Evaluation de l'exactitude de mesure [CON02]

Bourdet *et al* [BOU05], puis Mehdi-Souzani *et al* [MEH08] ont mis en place un protocole d'évaluation de la qualité des données acquises à l'aide d'un capteur laser-plan monté sur MMT. Cette évaluation permet d'identifier le bruit de numérisation et la justesse de mesure en fonction des configurations capteur/pièce (α et d). Les acquisitions

sont réalisées sur des artefacts de référence : cales-étalon, sphère d'étalonnage du capteur, marches.

Afin d'évaluer l'influence des angles de numérisation sur le bruit de numérisation un artefact constitué de différents plan d'orientation connue est utilisé (Figure 2.11a).

L'artefact est numérisé avec une orientation verticale constante du capteur de façon à faire évoluer l'angle de numérisation à chaque plan. Mehdi-Souzani met en évidence en même temps l'influence de la dynamique système sur la densité des données (Figure 2.11b). En conséquence, l'auteur supprime 10% des lignes numérisées pour palier les problèmes dynamiques.

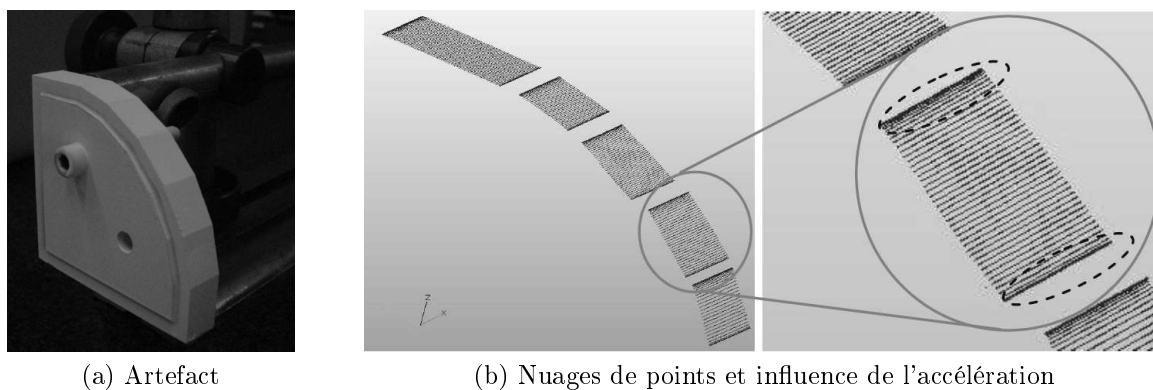


Figure 2.11 – Évaluation du bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation et mise en évidence de l'influence des accélérations [MEH08]

Van Gestel *et al* [VAN09] proposent un test d'évaluation des capteurs laser-plan montés sur MMT. Le test consiste à faire varier les paramètres de numérisation sur des artefacts plan. La variation des paramètres est réalisée avec le porteur (déplacement et orientation du capteur). Les résultats montrent que le bruit de numérisation augmente avec la distance de numérisation mais diminue avec l'angle.

Les auteurs mettent en outre en avant l'évolution de la qualité de l'acquisition en fonction du temps de chauffe du laser et proposent une méthode pour déterminer le temps de chauffe nécessaire avant d'étalonner et d'utiliser le capteur. Pour ce faire, ils calibrent le système à un temps connu après allumage du laser, puis réalisent des mesures un jour après calibration, après différents temps de chauffe du laser. Ces mesures sont réalisées pour différentes calibrations (temps de chauffe différents). L'une des conclusions importantes de leurs travaux est que les temps de chauffe pour l'étalonnage et l'utilisation du système doivent être proches afin de minimiser l'erreur engendrée.

La majorité des travaux proposés dans la littérature portent sur les capteurs laser-

plan montés sur des MMT. Nous pouvons néanmoins citer les travaux de Santolaria *et al* [SAN09, SAN11] qui ont étudié les problématiques engendrées par la calibration d'un capteur à nappe laser monté sur un bras polyarticulé. En effet, contrairement au cas où le capteur est monté sur une MMT, la calibration externe du capteur est réalisée une fois pour toute la mesure et joue un rôle prépondérant dans la qualité des données. Bien qu'il ne s'agisse pas de travaux d'évaluation d'un système de numérisation, il nous semble intéressant de les citer car ils soulèvent les problématiques liées à l'utilisation de bras polyarticulés.

2.2.3 Méthodes comparatives

Lorsque des artefacts de référence ne sont pas disponibles, les méthodes comparatives sont proposées. Elles sont basées sur l'utilisation d'un système de numérisation plus performant que celui à évaluer. Il s'agit en général d'une MMT équipée d'un palpeur mécanique. En effet, ce système offre une acquisition dépourvue de bruit et dont la justesse est en général de l'ordre de quelques micromètres ($3,5\mu\text{m}+L/300$ selon [SPC09]).

Feng *et al* [FEN01] évaluent les erreurs systématique et aléatoire d'un capteur laser-plan. L'erreur systématique est la composante invariable de l'erreur de numérisation dans les mêmes conditions de numérisation. L'erreur aléatoire est en partie due au bruit de speckle [BAR91], mais aussi à l'environnement. La qualification du système consiste à numériser un artefact constitué d'un plan et d'une sphère de faible défaut de forme dans plusieurs configurations capteur/pièce (Figure 2.12).

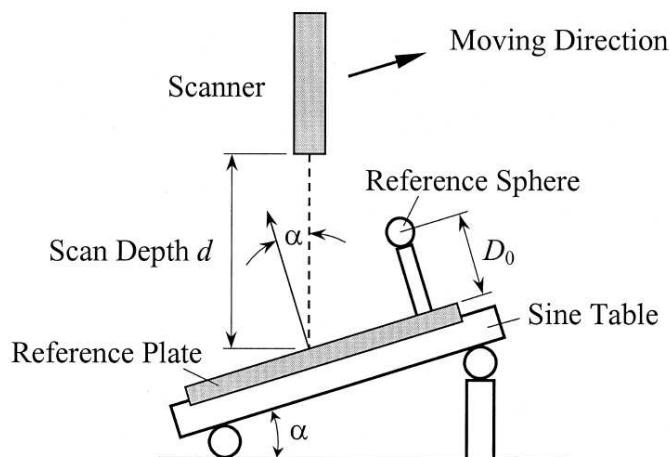


Figure 2.12 – Evaluation de l'exactitude de mesure pour un capteur laser-plan [FEN01]

En effet, la distance d et l'angle de numérisation α constituent dans cette étude les deux paramètres dont les auteurs souhaitent connaître l'influence sur l'exactitude de mesure et le bruit de numérisation. La distance D_0 entre le centre de la sphère et le plan est déterminée par palpement mécanique. Ensuite, pour chaque acquisition cette distance est recalculée et la différence entre le résultat obtenu et la valeur prise pour référence donne l'erreur de justesse, l'écart-type de répartition des écarts entre le nuage de points obtenu et le plan associé au nuage donne le bruit de numérisation. Les auteurs déterminent ainsi les meilleures configurations capteur/pièce ainsi que l'erreur engendrée par cette configuration.

Martínez *et al* [MAR08, MAR10, MAR10a] évaluent l'aptitude d'un capteur laser-plan monté sur une MMT à réaliser des mesures métrologiques.

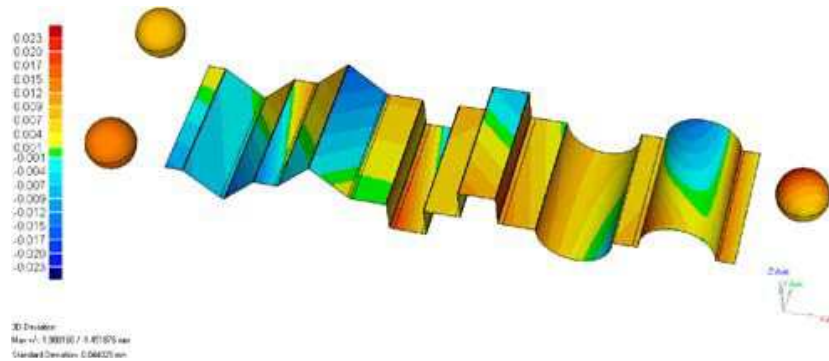


Figure 2.13 – Comparaison 3D entre deux géométries reconstruites (laser vs contact) [MAR10]

Les auteurs utilisent une pièce test tolérancée numérisée en premier lieu avec un palpeur mécanique monté sur la même MMT. Les données obtenues lors de cette première phase de numérisation constituent la référence, elles sont considérées comme représentant au mieux la peau réelle de la pièce test. Après une seconde acquisition avec le capteur laser-plan, les données obtenues sont recalées entre elles à l'aide d'un système classique à trois sphères. La comparaison entre les données obtenues avec les différents capteurs est réalisée par une cartographie d'écarts obtenue par reconstruction des surfaces acquises à l'aide de logiciels de CAO (Figure 2.13).

Les différentes méthodes présentées ont l'avantage d'être peu coûteuses à mettre en place car elles ne nécessitent pas l'achat d'un étalon et sont transportables dans les différents laboratoires souhaitant qualifier leurs systèmes. Cependant, du fait de

l'utilisation d'un système de numérisation de référence présentant ces propres défauts, il est nécessaire d'utiliser les résultats obtenus avec précaution.

2.3 Synthèse

Dans la littérature les travaux portent essentiellement sur des capteurs laser-plan montés sur des MMT, pour lesquels l'objectif est essentiellement de trouver le bruit en fonction des configurations capteur/pièce (angles et distance de numérisation). Peu de travaux portent sur l'exactitude de mesure ou encore sur l'évaluation de la calibration des systèmes. En ce qui concerne les porteurs, peu de travaux concernent d'autres porteurs que les MMT, alors que la problématique de performance des différents porteurs semble importante [BAR11, SAN11]. Dans la plupart des cas, le système de numérisation est caractérisé suivant une procédure propre à chaque auteur, compte tenu qu'il n'existe pas de norme sur la qualification des moyens de mesure sans contact. Dans chacun des cas les artefacts sont différents et adaptés à l'application réalisée. Il n'existe donc pas de protocole d'évaluation des performances des systèmes adaptable dans la majorité des cas.

Ainsi l'objectif des travaux proposés vise à uniformiser l'approche de qualification des systèmes de numérisation grâce à un protocole adaptable à une majorité de systèmes. La qualification des systèmes de numérisation (capteur + porteur) devrait aussi permettre d'établir une cartographie des performances système selon un ensemble d'indices de qualité définis.

La plupart des études sont menées pour le cas d'une MMT pour laquelle les erreurs de mesure sont souvent négligées, ce qui ne peut pas être le cas avec tous les porteurs. Ainsi, la démarche se veut applicable d'une part aux capteurs optiques montés sur des porteurs pilotables comme les MMT, les robots de mesure ou encore les MOCN, d'autre part aux capteurs seuls ou fixés sur des porteurs non pilotables comme les bras polyarticulés ou les trépieds.

La différence entre les porteurs pilotables et les porteurs non pilotables réside dans le fait que pour la première famille il est possible de contrôler les paramètres influents comme la distance de numérisation et les angles de numérisation, grâce au pilotage des configurations capteurs par la commande numérique (CN), alors que cela n'est pas possible pour la deuxième famille. Ainsi l'acquisition est souvent réalisée avec une confi-

guration capteur/pièce qui n'est pas explicitement définie.

Notre approche ne reprend pas toutes les caractéristiques évaluées dans la bibliographie mais reprend les principales afin de proposer une méthode générique de qualification basée sur des artefacts simples.

3 Mise en situation du protocole QualiPSO

Dans cette partie nous définissons les paramètres géométriques, c'est-à-dire les angles et distances de numérisation, qui caractérisent les configurations capteur/pièce, que nous utilisons par la suite dans le protocole, ainsi que les caractéristiques de la fenêtre de mesure. Nous présentons ensuite les caractéristiques de performance et de qualité que nous proposons d'évaluer. Une attention particulière est portée sur la classification des porteurs adoptée.

3.1 Paramétrisation géométrique des capteurs sans contact

La configuration capteur/pièce est en général définie à partir des angles de numérisation et de la distance de numérisation. Dans cette étude, nous faisons varier uniquement la distance de numérisation et l'angle de numérisation principal, et nous adoptons la paramétrisation suivante (Figure 2.14) :

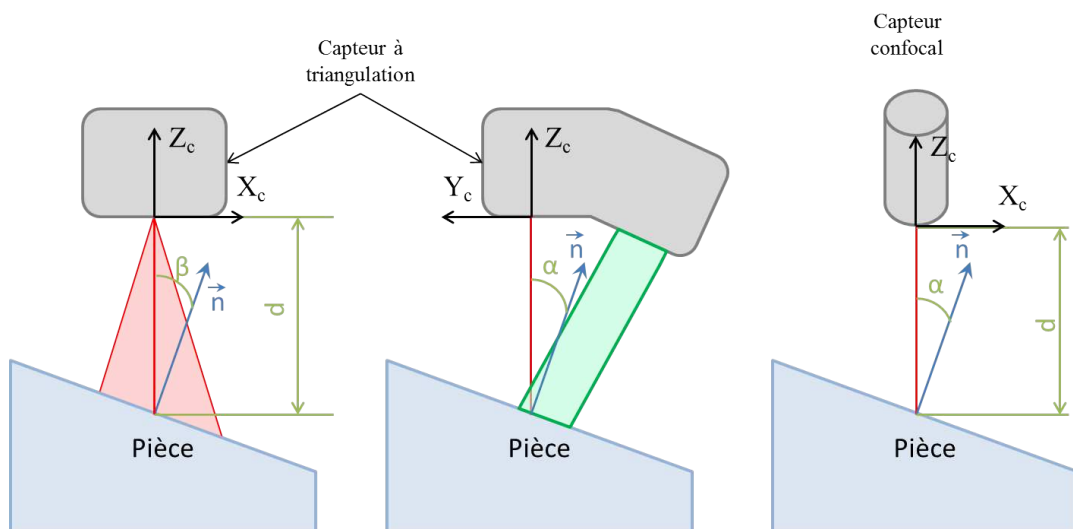


Figure 2.14 – Paramétrisation des capteurs à triangulation et confocaux

– α angle de numérisation principal ; dans le cas de capteur à triangulation — plan

qui contient l'axe de la source et l'axe de la caméra — il s'agit de l'angle entre la normale à la surface considérée et le rayon émis par la source lumineuse dans le plan de triangulation ; pour les capteurs confocaux il s'agit simplement de l'angle entre la normale à la surface et l'axe optique du capteur.

- β angle de numérisation secondaire ; pour les capteurs à triangulation, il s'agit de l'angle entre le rayon émis et la normale à la surface mesurée dans le plan orthogonal au plan de triangulation passant par le rayon émis de la source lumineuse ; il n'existe pas pour les capteurs confocaux.
- d distance de numérisation ; distance entre la source lumineuse du capteur et la surface.

Les capteurs optiques ont un espace de travail caractérisé par une fenêtre de mesure. Selon les technologies, cette fenêtre peut être 1D (capteurs confocaux, laser-ligne), 2D (capteurs laser-plan) ou 3D (lumière structurée) (Figure 2.15).

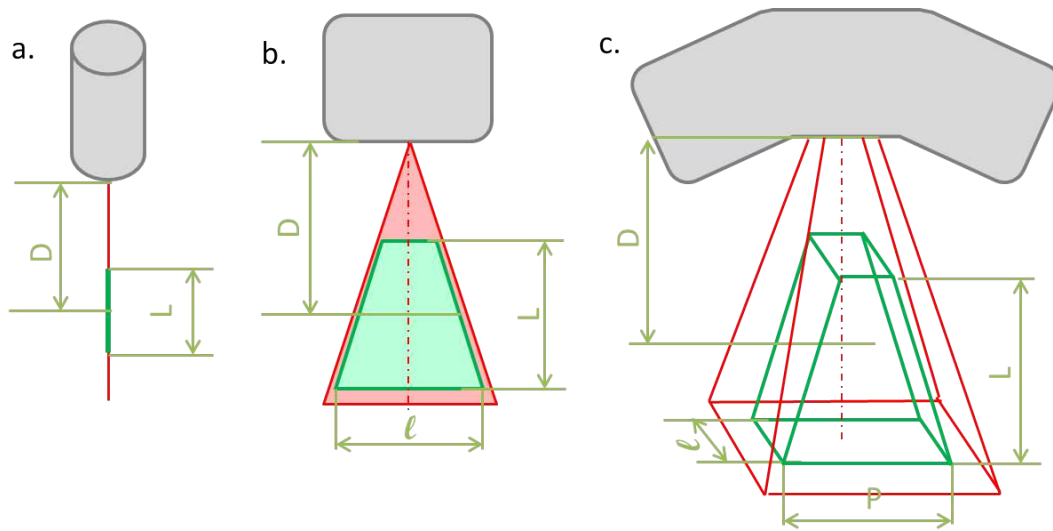


Figure 2.15 – Fenêtre de vue des capteurs : a. fenêtre 1D (capteur confocal), b. fenêtre 2D (laser-plan), c. fenêtre 3D (lumière structurée)

Un capteur est caractérisé par sa distance de travail D et les dimensions de sa fenêtre de mesure (hauteur L , largeur ℓ et/ou profondeur P). Ainsi la distance de numérisation d doit satisfaire l'équation 2.1.

$$D - \frac{L}{2} \leq d \leq D + \frac{L}{2} \quad (2.1)$$

3.2 Caractéristiques de performance et de qualité

À partir des travaux existants [CON02, MEH06, VAN09, BAR11], nous avons pu mettre en avant les caractéristiques de performance et de qualité à évaluer afin de qualifier les systèmes de numérisation. Nous proposons une qualification en deux parties :

- caractérisation du « système » ;
- caractérisation de la qualité.

La caractérisation du système est inhérente au système de numérisation utilisé et fait intervenir des caractéristiques sur lesquelles il n'est pas possible d'intervenir. La synthèse de paragraphe 2.1.5 a mis en avant en particulier l'importance de l'anisotropie de la matrice CCD sur la qualité des données. En effet, l'anisotropie de la matrice CCD peut générer des défauts sur le nuage de points comme le montre la figure 2.16.

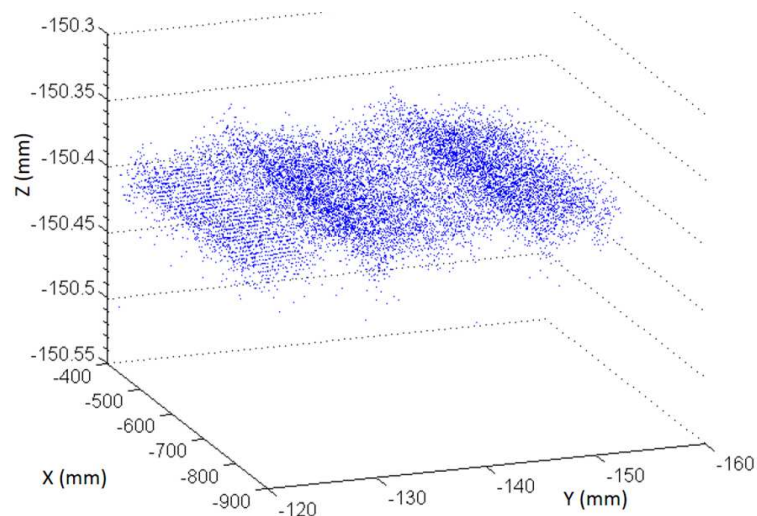


Figure 2.16 – Numérisation d'une surface plane de référence avec un capteur laser-plan

Cette figure représente un nuage de points issu de la numérisation d'une surface de référence réputée plane avec un capteur laser-plan monté sur une MMT. Les ondulations que l'on peut constater sont dues à l'anisotropie de la fenêtre de mesure.

Comme nous l'avons déjà mis en avant, la méthode permettant de rendre cohérentes les données issues de plusieurs configurations est propre à chaque système et est en général source d'imprécisions [SAN09].

Le porteur a lui aussi ses propres défauts, essentiellement en ce qui concerne les remises en position du système. En effet, ces remises en position concernent les différentes configurations articulaires possibles pour une configuration capteur/pièce donnée, ainsi que les remises en position des têtes de positionnement sur les MMT. Dans le premier cas l'incertitude liée aux codeurs engendre des erreurs et dans le second cas c'est l'incertitude

de remise en position de la tête positionnante, ajoutée à un bras de levier plus grand avec les capteurs optiques, qui engendre des erreurs.

Nous avons donc retenu pour ce protocole de qualification les trois caractérisations du système suivantes :

- Évaluation de la fenêtre de mesure (défaut de forme de la fenêtre) ;
- Évaluation de la calibration externe (recalage des données issues de plusieurs vues) ;
- Évaluation des remises en position (recalage des données issues d'une même vue après remise en position).

Comme nous l'avons vu dans la littérature, la caractérisation des performances en termes de qualité peut se faire au travers d'indicateurs de qualité. Nous nous basons principalement sur les indices de qualité développés par Contri [CON02] puis repris par Mehdi-Souzani [MEH06] (Figure 2.17) :

- le bruit de numérisation qui traduit la fidélité de mesure d'un point ou l'erreur aléatoire ;
- l'exactitude de mesure que nous évaluons au travers de la justesse qui traduit l'erreur systématique de la position d'un point numérisé.

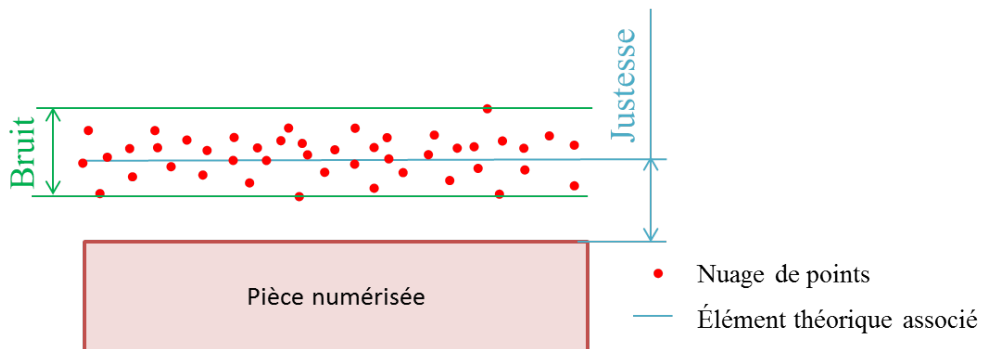


Figure 2.17 – Représentation graphique du bruit et de la justesse

Le protocole que nous proposons est construit sur une approche objective qui consiste à évaluer les grandeurs ou caractéristiques précédemment citées par la mesure d'artefacts de référence spécifiques pour la numérisation.

La qualification porte sur le système de numérisation, couple capteur/porteur. Comme nous l'avons évoqué, nous ne nous limitons pas aux porteurs courants tels MMT ou machines dédiées mais à tout type de porteur. Une classification est nécessaire de façon à adapter au mieux le protocole à chaque système.

3.3 Classification des porteurs pour le protocole

Le porteur a pour fonction de maintenir le capteur en position et éventuellement déplacer le capteur et/ou l'objet en vue de l'acquisition globale de ce dernier. Nous proposons que les différents porteurs soient séparés en deux familles : les porteurs pilotables tels que les MMT, les MOCN et les bras robotisés d'une part et les porteurs non pilotables tels que les bras polyarticulés, les trépieds et les porteurs manuels d'autre part. En effet, pour les porteurs non pilotables il est difficile de maîtriser les paramètres de configuration capteur/surface tels que la distance de numérisation et l'angle de numérisation.

Par ailleurs pour chacune des deux familles présentées, nous distinguons deux classes de porteurs correspondant à l'unicité de la configuration articulaire vis-à-vis d'une configuration capteur/pièce. En d'autres termes, nous séparons les porteurs pour lesquels plusieurs configurations articulaires existent pour une unique position (distance et orientation) du capteur par rapport à la surface à numériser. C'est le cas notamment pour les bras polyarticulés. Le tableau 2.2 récapitule la position des différents porteurs répertoriés dans chacune des deux classes proposées.

		Configuration articulaire pour une position capteur	
		unique	multiple
Porteurs	pilotables	MMT MOCN	bras robotisés
	non pilotables	trépieds porteurs manuels	bras polyarticulés

Tableau 2.2 – Classification des porteurs pour l'évaluation des performances

Le protocole QualiPSO que nous proposons précise donc les précautions à prendre dans chacun des quatre cas d'étude pour évaluer les performances et la qualité des systèmes. Pour chaque caractéristique à évaluer, les différences de protocole sont précisées afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté.

Nous présentons par la suite les différentes caractéristiques à évaluer ainsi que les protocoles mis en place. Une première partie porte sur la caractérisation du système, puis une seconde partie porte sur l'évaluation des indices de qualité.

3.4 Objectifs du protocole

Le protocole QualiPSO est un ensemble de procédures d'évaluation des caractéristiques présentées. Pour chacune de ces caractéristiques le protocole décrit les points suivants :

- Définition de la caractéristique ;
- Artefacts nécessaires ;
- Procédure d'évaluation à mettre en œuvre ;
- Évaluation des caractéristiques.

Afin d'être utilisable par un grand nombre d'utilisateurs, le protocole est constitué d'un ensemble de fiches correspondant chacune à l'évaluation d'une caractéristique en fonction d'un paramètre donné (évaluation du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation par exemple). De façon à alléger le propos, ces fiches sont proposées en annexe. Les grands principes du protocole sont repris dans les paragraphes suivants (Annexes A à G).

4 Caractérisation du système

Cette section présente les différentes caractéristiques système à évaluer ainsi que le protocole de qualification à mettre en œuvre. La caractérisation du système permet de comprendre l'origine de certains défauts d'un nuage de points comme les erreurs dues à la calibration du capteur ou aux remises en position du système.

Nous présentons dans cette section la démarche qui a conduit à ces protocoles simples à mettre en œuvre et basés sur l'utilisation d'artefacts couramment utilisés dans les laboratoires de métrologie.

4.1 Évaluation de la fenêtre de mesure (Annexe A)

4.1.1 Définition

La fenêtre de mesure comme présentée sur la figure 2.15 peut représenter un segment (capteurs confocaux et laser ligne), un trapèze (laser-plan) ou une pyramide à base rectangulaire tronquée (lumière structurée). Les parties optiques des capteurs créent des distorsions qui engendrent un défaut de forme de la fenêtre de mesure dans le cas des systèmes laser-plan (fenêtre 2D) ou lumière structurée (fenêtre 3D). La caractérisation

de la fenêtre de mesure proposée permet ainsi de définir les zones de la fenêtre de mesure à éviter. Les constructeurs préconisent en général d'utiliser la partie centrale de la fenêtre de mesure et d'éviter les contours. Un exemple de cartographie d'écart entre une fenêtre de mesure supposée plane d'un capteur laser-plan (Kréon Zephyr KZ25) et le plan des moindres carrés associé est donné en figure 2.18.

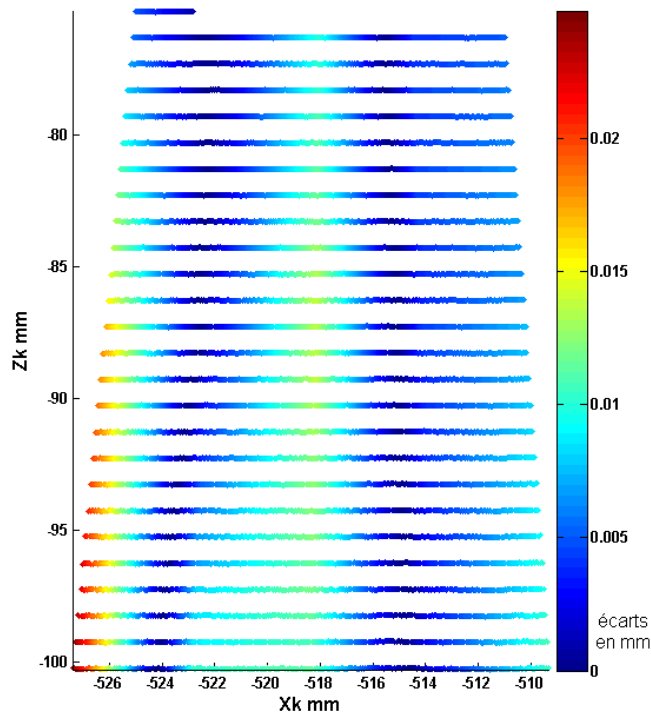


Figure 2.18 – Cartographie d'écart entre les points d'une fenêtre de mesure nominale plane et le plan des moindres carrés associé

Sur cette figure les zones de couleurs différentes traduisent le défaut de forme de la fenêtre de mesure. Ces défauts seraient dus à l'étape de calibration interne d'après le constructeur, mais quelle que soit l'origine leur évaluation permet de mieux maîtriser la qualité des données acquises.

4.1.2 Procédure de caractérisation

La figure 2.19 présente la procédure de caractérisation de la fenêtre de mesure dans le cas d'un capteur laser-plan (cas 2D). Le principe consiste à reconstituer la fenêtre de mesure en réalisant l'acquisition d'un artefact plan dans les différentes parties de la fenêtre.

Dans le cas 2D, la fenêtre est reconstituée par acquisition de lignes à différentes dis-

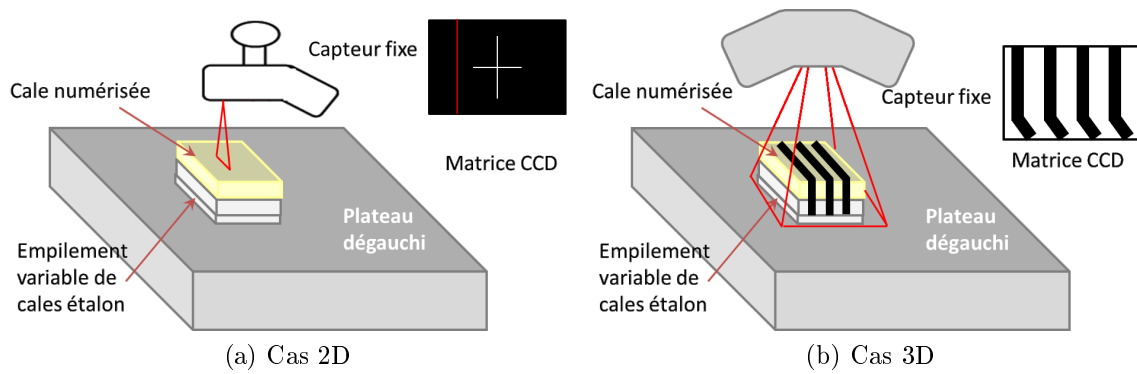


Figure 2.19 – Caractérisation de la fenêtre de mesure

tances de numérisation. Dans le cas 3D, une acquisition d'un plan à différentes distances de numérisation est nécessaire.

Afin de s'affranchir des erreurs engendrées par le reste de la chaîne de mesure, il est nécessaire de garder le capteur fixe ; l'artefact doit être déplacé entre chaque acquisition. Ainsi la même configuration au niveau du porteur est préservée pour toutes les acquisitions. Le second avantage dû au fait que les coordonnées lues sur les règles (ou les codeurs) du porteur restent constantes est que les données acquises représentent directement la fenêtre de mesure ; il n'est pas nécessaire de réaliser de transformation géométrique sur les différentes données pour les recaler entre elles. La fenêtre de mesure est ainsi reconstruite avec un pas choisi afin que sa représentation soit complète.

4.1.3 Artefacts de numérisation

Le plan ou la ligne à acquérir est matérialisé par un artefact plan. Un empilement de cales de dimensions connues permet de gérer la distance de numérisation, le capteur restant fixe.

La cale-étalon supérieure de l'empilement joue le rôle d'artefact de numérisation. Afin de limiter les variations dues aux défauts des artefacts, la même cale doit être numérisée pour chaque acquisition. La modification de l'empilement ne se fait donc pas en ajoutant une cale au-dessus de la cale supérieure, mais en modifiant l'empilement par la base. Nous considérons donc le défaut de forme des cales et le défaut d'orientation de l'empilement comme négligeable afin de considérer la ligne (ou le plan) acquise à chaque acquisition comme identique.

4.1.4 Évaluation des caractéristiques

L'exploitation des résultats consiste à évaluer le défaut de forme de la fenêtre de mesure par rapport à sa forme nominale.

Ainsi dans le cas 2D, chaque ligne acquise est évaluée afin de déterminer son défaut de rectitude. Ceci permet de connaître les défauts de la fenêtre de mesure localement. Dans un second temps, l'ensemble des lignes acquises devant représenter un plan, le défaut de planéité de l'ensemble des données est évalué. Ce défaut de planéité a peu d'influence lors de la numérisation de plans avec un angle de numérisation nul, mais engendre des erreurs plus contraignantes dans le cas de numérisation de formes plus complexes ou avec un angle de numérisation plus grand.

Enfin dans le cas 3D, pour chaque acquisition un plan des moindres carrés est associé au nuage afin d'évaluer le défaut de forme local de la fenêtre de mesure. En revanche le défaut de forme global ne peut-être évalué car la fenêtre de mesure n'est pas une surface canonique que l'on peut associer aux données.

4.2 Évaluation des remises en position du système (Annexe B)

4.2.1 Définition du recalage des données

Pour la plupart des systèmes de numérisation il est possible de remettre en position le capteur ou le système complet sans que le constructeur ne préconise (ou ne propose) d'étape de recalibration du système. C'est le cas notamment pour les capteurs montés sur une tête rotative sur une MMT ou les capteurs montés sur des bras robotisés ou polyarticulés. Dans le premier cas, l'utilisation d'une tête pivotante type PH10 Renishaw permet l'orientation du capteur dans un nombre fini de positions discrètes (Figure 2.20). Pour chaque nouvelle orientation le système doit être étalonné afin de recalibrer les données issues des acquisitions en utilisant les autres orientations. Il est donc proposé ici d'évaluer la dispersion du recalage due à la remise en position de la tête pivotante, caractérisée par un défaut de recalage des différents nuages de points obtenus.

Dans le cas des bras robotisés ou polyarticulés, le problème est sensiblement différent. Il n'est pas nécessaire de recalibrer le système à chaque réorientation car ce sont les configurations articulaires du système qui permettent de connaître la position du capteur. Chaque orientation est calibrée une fois pour toute. Cependant, les codeurs sont

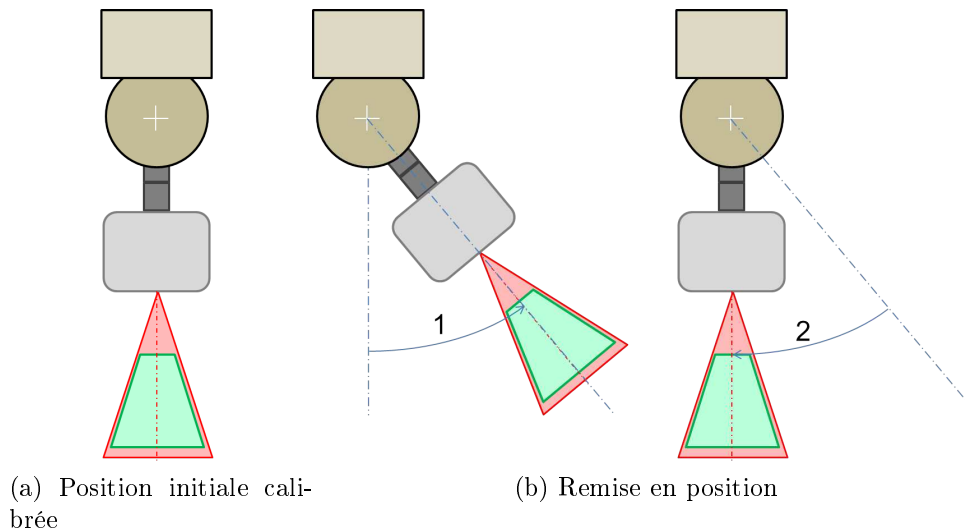


Figure 2.20 – Remise en position d'une tête de positionnement

en général source d'incertitude de par leur technologie et du fait qu'ils sont multipliés pour ce type de porteurs. À cette incertitude s'ajoute le fait que plusieurs configurations articulaires permettent d'obtenir la même configuration capteur/pièce comme le montre la figure 2.21, ce qui génère des problèmes de recalage entre les données.

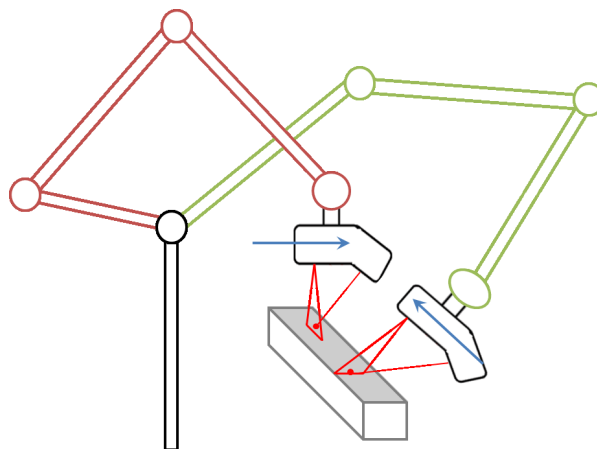


Figure 2.21 – Différentes configurations articulaires pour l'acquisition d'un même plan

Nous avons vu que le porteur était comme chaque maillon de la chaîne de mesure source d'imprécisions. Ce que nous souhaitons évaluer ici est la dispersion de recalage des données pour des acquisitions réalisées après remise en position du système (Figure 2.20), c'est-à-dire en utilisant le système dans une position déjà occupée auparavant en utilisant la calibration déjà réalisée.

Le défaut de recalage est évalué comme la distance entre deux points réputés identiques obtenus par différentes acquisitions. Le point en question peut être un point

physique ou un point géométrique (centre d'une sphère ou intersection de trois plans par exemple).

Soit M_{th} le point théorique ou point de référence, le défaut de recalage d_{ri} du nuage contenant le point M_i réputé identique à M_{th} est évalué par la distance euclidienne $\|\overrightarrow{M_{th}M_i}\|$.

$$d_{ri} = \|\overrightarrow{M_{th}M_i}\| \quad (2.2)$$

4.2.2 Artefacts de numérisation

Les artefacts utilisés pour caractériser le défaut de recalage dû à la remise en position du système doit permettre l'extraction géométrique. En effet, avec des systèmes à base de capteur optique, la numérisation d'un point physique n'est en général pas possible, il est donc préférable d'utiliser des artefacts permettant l'extraction d'un point géométrique. Les artefacts triplans [CON02] ou les sphères sont donc particulièrement adaptés. Pour le présent protocole, et dans l'optique de simplicité de mise en œuvre de celui-ci, nous préconisons l'utilisation d'une sphère, cette sphère étant généralement fournie avec le capteur pour la procédure de calibration. Par ailleurs, la sphère étant utilisée dans différentes parties du protocole QualiPSO, ceci permet de limiter le nombre d'artefacts à se procurer pour la mise en œuvre globale de QualiPSO. Notons qu'il est préférable de connaître le diamètre réel de la sphère, ceci permet de fixer ce paramètre lors de l'association d'une sphère aux données obtenues, ce qui permet de ne pas prendre en compte la différence de rayon évaluée mais uniquement la variation de position de la sphère.

4.2.3 Procédure de caractérisation

Une distinction particulière est faite ici entre les systèmes pour lesquels une configuration capteur/pièce correspond à une unique configuration articulaire, c'est le cas pour les MMT et MOCN par exemple, et les systèmes possédant plusieurs configurations articulaires pour une configuration donnée, comme pour les bras polyarticulés ou robotisés. En effet dans le premier cas nous parlons bien d'un problème de remise en position. En particulier pour les systèmes 4 ou 5 axes positionnés comme les MMT avec une tête PH10, l'incertitude provient essentiellement de l'incertitude de remise en position de cette tête. L'incertitude associée est souvent négligée pour les capteurs à contact, mais

ne peut l'être pour les capteurs optiques pour lesquels l'augmentation significative de la masse et du bras de levier sont source d'erreurs. Dans le cas de l'utilisation de bras, il s'agit plutôt de caractériser l'incertitude qu'engendre le fait que plusieurs configurations articulaires peuvent être utilisées pour une même acquisition.

Le protocole est donc présenté sous deux volets, le premier adapté pour les systèmes similaires aux MMT équipées d'une tête rotative positionnante et le second adapté aux bras de mesure.

□ MMT et MOCN

Afin d'évaluer la dispersion de recalage due aux remises en position, la sphère est au préalable numérisée dix fois afin d'évaluer la dispersion de recalage dans des conditions sans remises en position du système. Dans un second temps, le système est remis en position comme explicité sur la figure 2.20 et cinq nouvelles acquisitions sont réalisées. Cette étape de remise en position est répétée plusieurs fois. Notons que la calibration du système dans la configuration utilisée a été réalisée une fois au préalable et qu'elle n'est pas réalisée de nouveau à chaque remise en position.

□ Bras et robots de mesure

Dans le cas des bras et robots de mesure, dix premières acquisitions sont réalisées dans une configuration articulaire de référence. Par la suite, la configuration capteur/pièce (distance et orientation relatives du capteur et de la surface) est maintenue identique, mais la configuration articulaire du porteur est modifiée et cinq nouvelles acquisitions sont réalisées. Les opérations de modification articulaire et de numérisation sont répétées plusieurs fois.

4.2.4 Évaluation des caractéristiques

Afin d'évaluer le recalage des données, une sphère des moindres carrés de rayon imposé est associée à chacun des nuages de points obtenus. Le centre de ces différentes sphères est extrait. La position de référence du centre de la sphère est considérée comme étant le barycentre des centres obtenus lors des dix premières acquisitions (Figure 2.22a). Par la suite, l'erreur de recalage est évaluée entre chaque centre et la position de référence ainsi déterminée (Figure 2.22b).

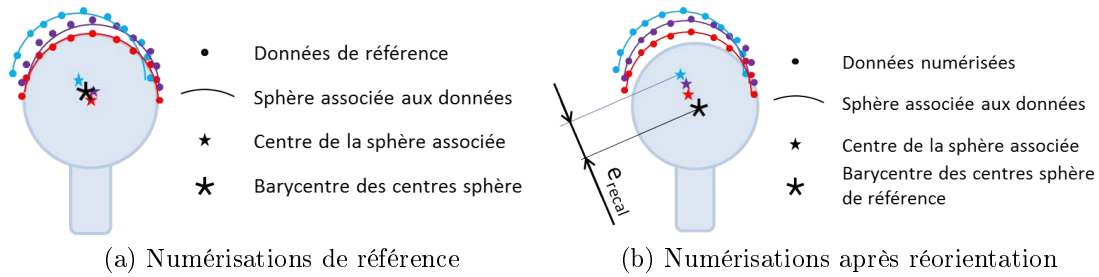


Figure 2.22 – Calcul de l’erreur de recalage

Une fois les défauts de recalage évalués, il convient de prendre une décision sur la nécessité ou non de recalibrer le système à chaque remise en position ou bien de se contenter de calibrations régulières. Cette décision est évidemment à prendre en connaissance des besoins liés à l’application.

4.3 Évaluation de la calibration externe (Annexe C)

L’étape de calibration externe permet de recalculer automatiquement les données issues des acquisitions dans différentes configurations (positions et orientations capteur). Le cas le plus classique est celui d’un capteur laser-plan monté sur une MMT équipée d’une tête de positionnement rotative permettant d’orienter le capteur. La calibration est réalisée en numérisant une sphère de calibration (de faible défaut de forme connu), en différents endroits de la fenêtre de mesure (donc de la matrice CCD). L’ensemble des nuages ainsi obtenus en 2D dans le repère capteur R_C représente une seule et même sphère dont on connaît la position et le rayon. La correspondance entre les données 2D dans R_C et les données 3D dans R_0 est ainsi réalisée. Nous proposons dans ce paragraphe d’évaluer la qualité de la calibration externe du système.

4.3.1 Calibration et recalage des données

La calibration externe permettant de recalculer les données entre elles, nous évaluons la qualité de la calibration à travers l’évaluation du recalage des données.

Le recalage est défini de la même façon que pour l’évaluation des remises en position (Paragraphe 4.2.1), la différence entre les deux parties du protocole réside dans les configurations de numérisation. Dans cette partie, le but est d’évaluer les défauts de recalage pour des acquisitions dans des configurations différentes, la calibration étant réalisée à chaque changement d’orientation. Les défauts de mise en position du système

sont ainsi pris en compte dans la calibration externe.

De ce fait, il est proposé d'évaluer l'erreur de recalage des systèmes de numérisation polyarticulés pour des acquisitions dans les mêmes configurations capteur/pièce, ainsi que dans des configurations capteur/pièce différentes.

La figure 2.23 présente les écarts entre les points numérisés sur une sphère d'étalonnage et la sphère des moindres carrés associée au nuage, pour une acquisition avec un capteur laser-plan (Metris LC60Dx) monté sur un bras polyarticulé (Metris MCAII-7axis) en utilisant plusieurs configurations articulaires différentes. Sur cette figure, les différentes passes apparaissent clairement car les configurations articulaires variables engendrent une erreur de recalage des différents nuages de points obtenus.

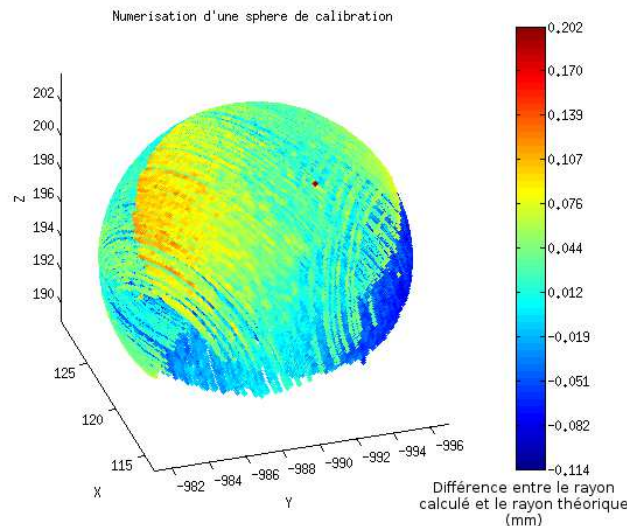


Figure 2.23 – Nuages de points superposés pour l'acquisition d'une sphère

4.3.2 Artefacts de numérisation

Pour cette partie du protocole QualiPSO, de la même manière que pour l'évaluation de la qualité des remises en position, l'artefact doit permettre d'évaluer le recalage des données et doit pour ceci contenir un point géométrique facilement extractible. Une condition supplémentaire pour cet artefact est que le point géométrique doit pouvoir être extrait à partir d'acquisitions réalisées avec différents points de vue. Il a donc été choisi pour ce protocole d'utiliser un artefact sphérique de diamètre connu (Figure 2.24).



Figure 2.24 – Artefact sphérique

4.3.3 Procédure d'évaluation de la calibration

Dans le cadre de l'évaluation de la calibration du système, le protocole consiste à numériser l'élément de référence avec différentes positions et orientations du système de numérisation. Nous distinguons ici aussi les différents types de porteurs.

□ MMT et MOCN

Pour les porteurs ayant une configuration articulaire unique pour une configuration capteur/pièce donnée, le protocole nécessite dans un premier temps de réaliser dix numérisations successives après calibration du système dans une configuration de référence (Figure 2.25a). L'étape suivante consiste à orienter le système dans une configuration différente (Figures 2.25b et 2.25c).

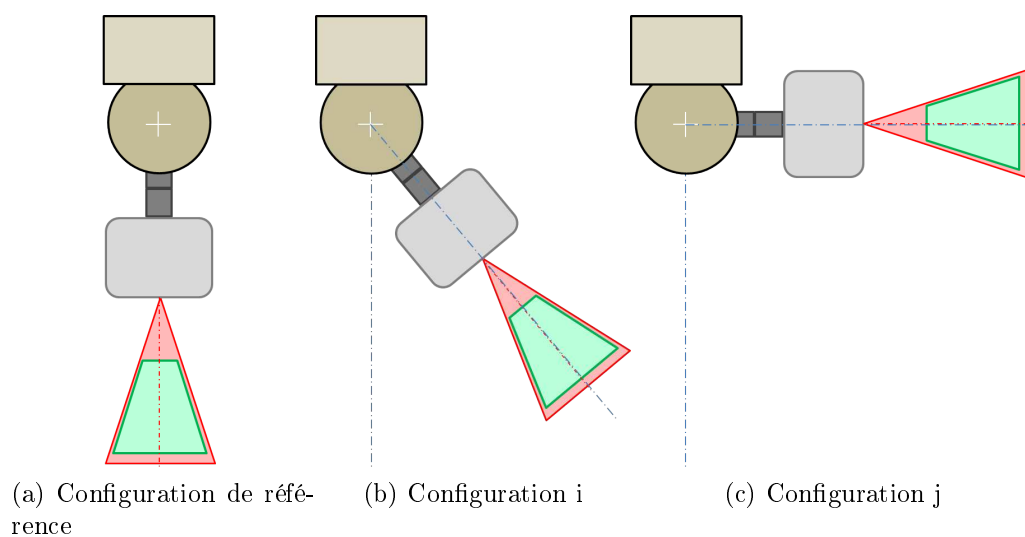


Figure 2.25 – Configuration de référence et autres configurations

Dans le cas de l'utilisation d'une MMT équipée d'une tête de positionnement, la

calibration externe du système est réalisée après chaque orientation du système. En effet, afin d'éviter de cumuler les défauts dus à la remise en position du système, les calibrations ne sont pas réalisées en début de protocole comme il est généralement le cas avec des capteurs à contact.

□ Bras et robots de mesure

Pour le cas des porteurs ayant plusieurs configurations articulaires possibles pour une seule configuration capteur/pièce, il n'existe pas d'étape de calibration externe qu'il est nécessaire de réaliser pour chaque nouvelle orientation du système. En effet, lorsque l'orientation du capteur est connue grâce aux codeurs du porteur (bras polyarticulés ou robotisés), l'étape de calibration n'est pas nécessaire. Ce qui est alors évalué correspond à une erreur de recalage due en partie aux défauts du porteur.

4.3.4 Exploitation des mesures

Le rayon réel de la sphère étant connu (certification de l'artefact ou mesure avec un système de mesure de meilleure qualité), l'association d'une sphère parfaite sur les données est réalisée en fixant le rayon à cette valeur donnée avec le critère des moindres carrés. La dispersion des positions des centres sphères est évaluée dans l'espace, ceci permet de mettre en évidence le défaut de recalage matérialisé par la distance entre les centres calculés des sphères numérisées.

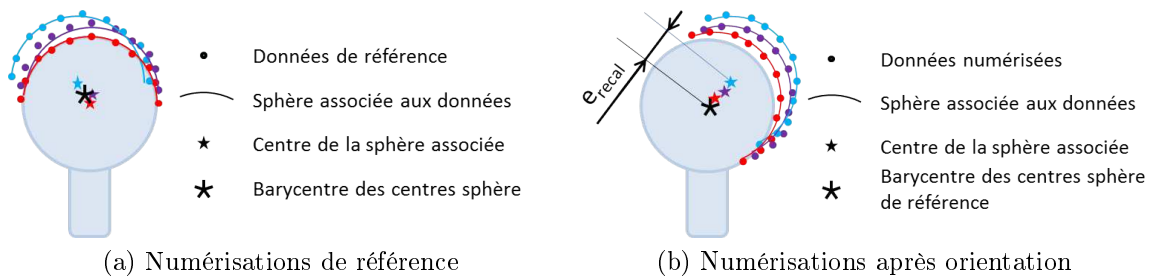


Figure 2.26 – Calcul de l'erreur de recalage

Nous relevons également le défaut de forme de l'ensemble des données numérisées (Figure 2.23), ce qui permet d'obtenir une estimation des défauts que l'on obtiendrait sur la numérisation d'un objet avec plusieurs orientations. Pour ceci nous avons développé un programme matlab permettant de calculer la sphère associée aux données par le critère des moindres carrés avec un rayon imposé.

5 Évaluation des indices de qualité

L'évaluation des indices de qualité des systèmes de numérisation est présentée dans cette section. Rappelons que nous proposons d'évaluer le bruit de numérisation ainsi que la justesse de mesure.

5.1 Évaluation du bruit de numérisation

5.1.1 Définition du bruit de numérisation

Le bruit de numérisation ne fait pas l'objet d'une norme, mais l'indicateur δ -bruit proposé dans la littérature [HOP92], permet de quantifier ce bruit (Figure 2.27). L'indicateur de bruit permet d'évaluer la dispersion des points numérisés par rapport à un nuage de points théoriques. Nous adoptons pour le bruit la définition de l'indicateur δ -bruit proposée par Contri [CON02] défini par l'équation 2.3 :

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i (e_i - \bar{e}_i)^2} \quad (2.3)$$

où k représente un facteur d'élargissement choisi ici égal à 1 (cas général en numérisation 3D sans contact), p_i le poids de chacun des points et \bar{e}_i la moyenne des écarts. Dans le cas d'une association avec le critère des moindres carrés, les p_i sont égaux à 1 et la valeur moyenne \bar{e}_i est nulle [SHA98], ce qui conduit à l'équation 2.4.

$$\delta = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (2.4)$$

5.1.2 Paramètres influents et artefacts de numérisation

Le bruit de numérisation issu de la mesure avec des capteurs optiques est sensible à plusieurs paramètres (distance de numérisation, angle de numérisation, nature de la surface, éclairage, etc.) cependant nous considérons que nous ne pouvons pas intervenir sur les éléments environnants tels que la température, l'hygrométrie ou encore l'éclairage. En effet, dans un contexte industriel (mesure directement sur une MOCN par exemple), ces paramètres varient au cours de la journée. Nous considérons néanmoins que leur

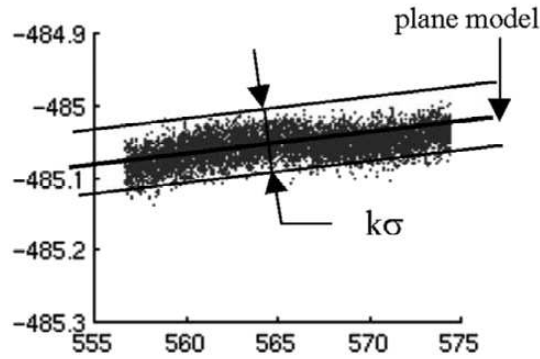


Figure 2.27 – Représentation du bruit de numérisation [LAR02]

variation est négligeable durant la phase d'évaluation du système de numérisation avec le protocole proposé.

Les paramètres influents que nous pouvons maîtriser sont essentiellement les trois paramètres suivants :

- la distance de numérisation d ;
- l'angle de numérisation α ;
- l'angle secondaire β .

Le protocole élaboré s'attache donc à évaluer l'influence de ces facteurs sur le bruit de numérisation. L'influence de chacun de ces trois paramètres est évaluée indépendamment.

5.1.3 Artefacts de numérisation

Au vu des paramètres à maîtriser précisés ci-dessus, l'artefact doit permettre cette maîtrise. L'utilisation d'artefacts plans semble donc la mieux adaptée. En effet, l'utilisation d'artefacts présentant des courbures génère une variation des distances et angles de numérisation (Figure 2.28), alors qu'en numérisant une surface plane, la distance de numérisation peut être maintenue constante pour chaque acquisition. Il en est de même pour les angles de numérisation.

Cette constatation est vraie dès lors que le capteur a plus d'une dimension et que le système de déplacement ne peut pas orienter le capteur en continu.

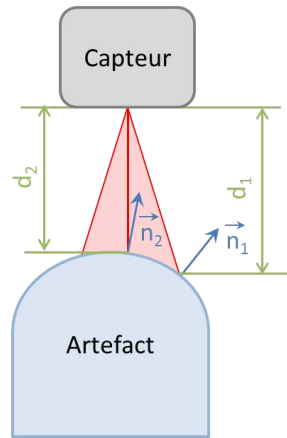


Figure 2.28 – Numérisation d’un artefact non plan : influence sur les paramètres

5.1.4 Caractérisation de l’influence de la distance de numérisation (Annexe D)

Pour la plupart des capteurs optiques, le bruit de numérisation augmente avec l’augmentation de la distance de numérisation, il est néanmoins nécessaire d’évaluer l’amplitude de variation du bruit afin de déterminer une plage de distances de numérisation admissible pour un critère de qualité donné.

La procédure consiste à numériser un artefact plan dont les propriétés de réflexion sont en adéquation avec le capteur utilisé, à différentes distances, en maintenant les angles α et β constants dans une configuration optimale (généralement 0°).

Pour cette partie du protocole, une attention particulière est aussi portée sur la catégorie des porteurs.

□ Porteurs pilotables

Dans le cas de l’utilisation de porteurs pilotables (MMT, MOCN, bras robotisés, etc.), la distance de numérisation peut être maîtrisée. Ainsi l’influence de la distance de numérisation sur le bruit peut être caractérisée avec un pas fin. Nous préconisons un pas entre chaque acquisition d’une valeur $pas = \frac{L}{10}$ où L est la profondeur de la fenêtre de mesure (Figure 2.29a). Ceci permet d’avoir une représentation fine de l’évolution du bruit de numérisation en fonction de la distance .

□ Porteurs non pilotables

En ce qui concerne les porteurs non pilotables, il n’est pas possible de garantir un pas constant entre les différentes acquisitions, ni une distance constante lors d’une acqui-

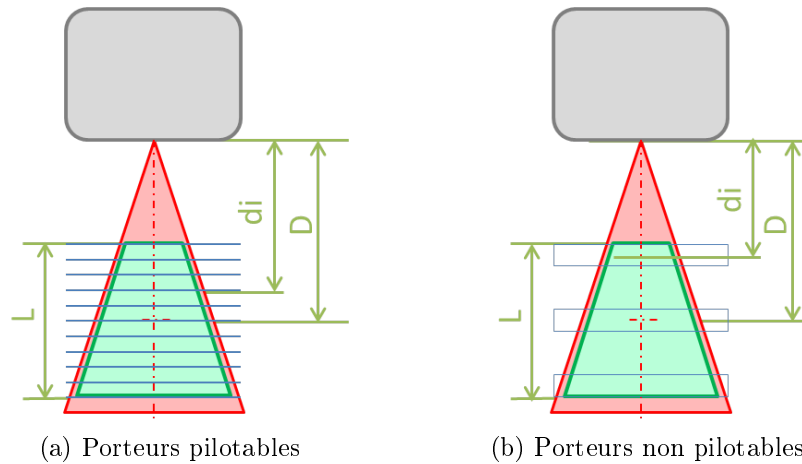


Figure 2.29 – Zones de la fenêtre de mesure à caractériser en fonction du type de porteurs

tion. Dans ce cas, nous proposons de déterminer les bornes inférieures et supérieures du bruit en réalisant des acquisitions dans trois zones caractéristiques de la fenêtre de mesure, à savoir le milieu de cette fenêtre ainsi que les deux parties extrêmes (Figure 2.29b). Notons que ces distances caractéristiques sont obtenues de manière qualitative, l'opérateur doit essayer de maintenir le capteur au plus proche de la configuration désirée.

□ Porteurs ayant des configurations articulaires multiples

Enfin dans chacun des deux cas présentés, pour l'utilisation d'un système possédant plusieurs configurations articulaires pour une même configuration capteur/pièce, nous proposons de réaliser plusieurs acquisitions avec des configurations différentes, c'est-à-dire en maintenant constante la distance et les angles de numérisation, mais en modifiant les configurations articulaires du porteur. Ceci a pour but de se rapprocher des conditions d'utilisation réelles dans lesquelles l'opérateur ne peut pas garantir que les configurations articulaires seront identiques à chaque acquisition. Ce qui est évalué dans ce cas n'est pas uniquement du bruit résultant des différentes configuration capteur/pièce, mais un cumul d'une erreur de justesse due au porteur avec du bruit de numérisation dû principalement au capteur, mais qui pour ce type de systèmes ne sont pas facilement dissociables.

5.1.5 Caractérisation de l'influence des angles de numérisation (Annexe E)

Nous pouvons réaliser de la même manière des acquisitions en modifiant l'angle de numérisation principal α en gardant constants la distance de numérisation d et l'angle

secondaire β . Pour ce protocole, le capteur est orienté afin que l'axe de la source lumineuse soit vertical. L'angle α est obtenu en utilisant une règle sinus (Figure 2.30). Avec les données de la figure, l'angle α est créé grâce à un empilement de cales-étalon

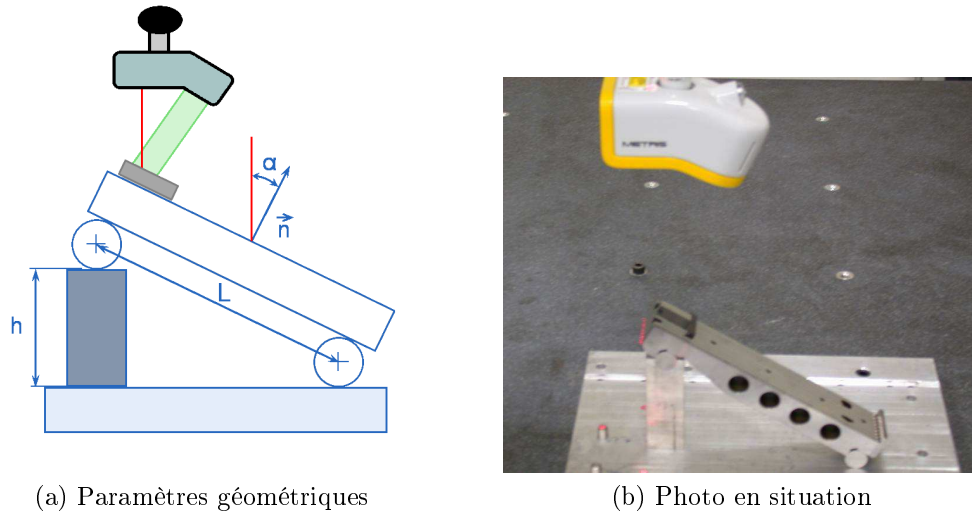


Figure 2.30 – Obtention de l'angle α

de hauteur h , la valeur de l'angle étant donnée par la relation 2.5.

$$\alpha = \arcsin \frac{h}{L} \quad (2.5)$$

□ Porteurs pilotables

Dans le cas de l'utilisation de porteurs pilotables, à une erreur constante près sur l'angle α due à l'incertitude d'orthogonalité entre l'axe de la source lumineuse du capteur et la surface de l'artefact à numériser lorsque $h = 0$, l'angle α peut être maîtrisé précisément avec l'empilement de cales. Nous préconisons ainsi de faire varier l'angle de 5° entre chaque acquisition afin de caractériser l'évolution du bruit due à cet angle.

□ Porteurs non pilotables

Considérons à présent le cas des porteurs non pilotables, une variation de 5° n'aurait pas véritablement de sens étant donnée l'incertitude sur l'orientation relative entre la surface de l'artefact et le capteur. Nous proposons donc de garder l'axe capteur proche de la verticale et de ne tester que les angles $\alpha = 0^\circ, 30^\circ$ et 60° en modifiant l'empilement sous la règle sinus. Une fois encore le but de cette partie est d'identifier un majorant du bruit induit par une mauvaise orientation du capteur par rapport à la surface.

□ Porteurs ayant des configurations articulaires multiples

De la même manière que pour l'évaluation de l'influence de la distance de numérisation, pour les porteurs possédant plusieurs configurations articulaires différentes pour une configuration capteur/pièce unique, nous proposons de réaliser des acquisitions en utilisant différentes configurations articulaires pour chaque angle retenu. L'évaluation du bruit de numérisation est ensuite effectuée sur chaque nuage indépendamment puis sur les ensembles de données correspondant à un angle de numérisation donné. Ce protocole est détaillé de façon plus complète annexe E.

5.1.6 Calcul du bruit

À chaque ensemble de données acquises un plan des moindres carrés est associé. Nous étudions ensuite la répartition des écarts de chacun des points obtenus au plan idéal associé. Il est ainsi essentiel d'avoir utilisé des artefacts de faible défaut de forme afin de pouvoir considérer ces écarts comme du bruit de numérisation et non un défaut de forme de l'artefact. Le relevé de l'écart-type σ de la distribution des écarts permet de déterminer le bruit de numérisation avec la relation $\delta = k \cdot \sigma$ avec $k = 1$ pour notre étude. Un guide matlab permettant d'évaluer le bruit de numérisation sur des artefacts plan a été mise en œuvre (Figure 2.31).

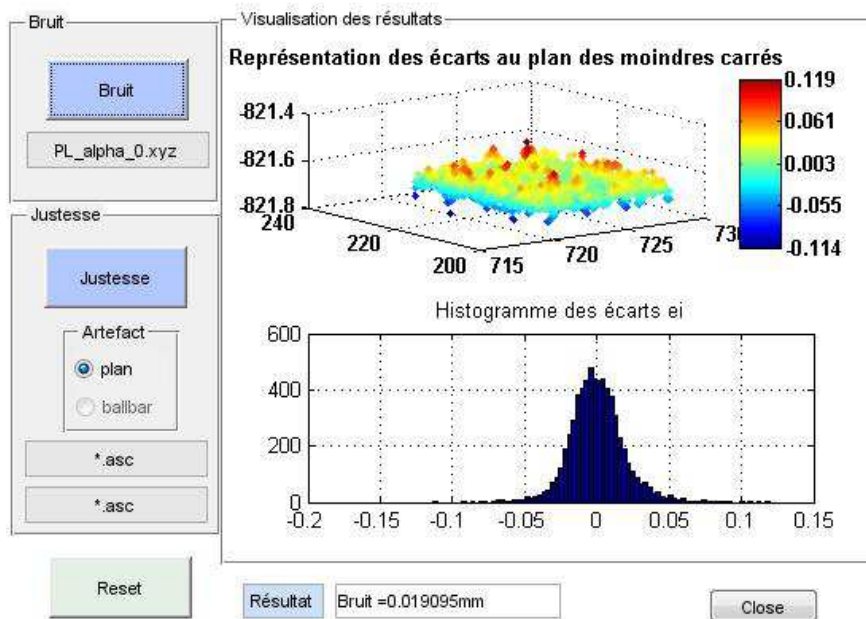


Figure 2.31 – Résultat de l'application QualiPSO pour l'évaluation du bruit de numérisation

5.2 Évaluation de la justesse

Nous définissons ici la justesse de mesure qui peut être évaluée par deux approches différentes. Nous proposons d'évaluer la justesse de mesure et la justesse de mesure dite « relative ».

5.2.1 Définition de la justesse de mesure

Quelques définitions [VIM] :

- Erreur de mesure : différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence.
- Erreur systématique : composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible.
- Justesse de mesure : étroitesse de l'accord entre la valeur moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence.

Dans notre cas, les points 3D obtenus ne constituent pas des valeurs mesurées car ils ne représentent pas une grandeur. Cependant, il est possible d'établir l'erreur de justesse sur la mesure d'une distance connue que nous appellerons « justesse de mesure », ainsi que l'erreur sur le calcul de la position d'une entité (Point, Droite, Plan) dans un repère par rapport à une mesure de référence que nous appelons « justesse relative ».

5.2.2 Évaluation de la justesse de mesure (Annexe F)

5.2.2.1 Justesse de mesure

La justesse de mesure est évaluée par la mesure d'une distance connue entre deux éléments (points, droites, plans). L'erreur de justesse j_a est donnée par la différence entre la valeur mesurée de la distance et la valeur considérée comme vraie de cette distance. Cette valeur considérée comme vraie peut être donnée par la certification de l'artefact à numériser ou par la mesure à l'aide d'un système de mesure considéré comme plus juste.

5.2.2.2 Paramètres influents et artefacts

La justesse de mesure est déterminée sur un artefact de référence comme la différence entre la valeur mesurée d'une distance entre deux entités et la valeur considérée comme vraie de cette distance. Un artefact comportant une distance identifiable est nécessaire, (barre à boule, marche, etc.), nous proposons un artefact composé d'une marche de

hauteur connue (Figure 2.32). L'avantage d'un tel artefact est la possibilité de maîtriser la distance de numérisation, ainsi que d'acquérir les deux entités en même temps, les deux plans ne devant pas être espacés d'une distance supérieure à la hauteur L de la fenêtre de mesure. Les deux plans doivent avoir un défaut de forme faible, ainsi qu'un défaut de parallélisme négligeable. Enfin les propriétés de réflexion de l'artefact doivent répondre aux contraintes du système de numérisation à évaluer. Il est possible d'utiliser un artefact composé de deux cales-étalon superposées (Figure 2.32).

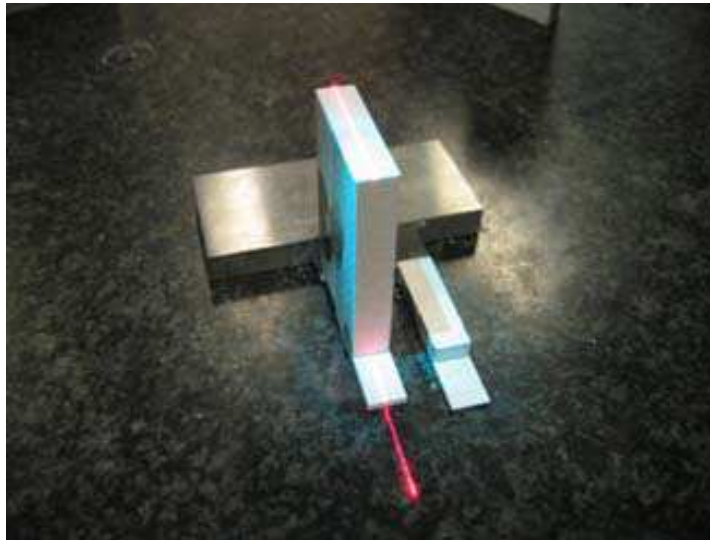


Figure 2.32 – Marches réalisée avec des cales-étalon

Afin de caractériser l'ensemble de la fenêtre de mesure, nous préconisons d'utiliser trois hauteurs de marches différentes :

- Une marche de hauteur $h_0 = \frac{9L}{10}$;
- Une marche de hauteur $h_0 = \frac{L}{2}$;
- Une marche de hauteur $h_0 = \frac{L}{10}$.

Le principal paramètre influant sur la justesse de mesure a été identifié comme étant la distance de numérisation [BOU05, MEH06], les angles de numérisation sont considérés comme ayant une influence moins importante. Ainsi, seule l'évaluation de l'influence de la distance de numérisation est proposée ici.

5.2.2.3 Procédure d'évaluation de la justesse en fonction de la distance de numérisation

La notion de distance de numérisation est ici délicate car les différentes parties de l'artefact sont à des distances différentes du capteur. Ce problème se résout en utilisant

une convention : nous considérons que la distance de numérisation est la distance entre la source lumineuse du capteur et le plan inférieur de la marche mesurée (Figure 2.33).

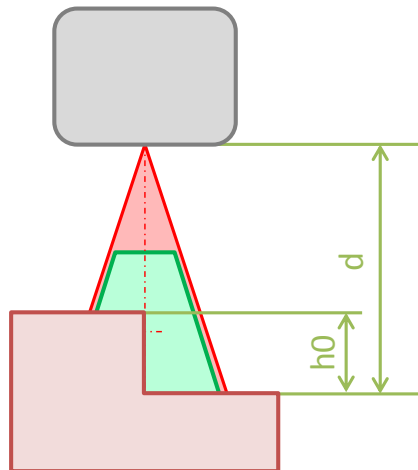


Figure 2.33 – Distance de numérisation pour l’acquisition d’une marche

Les acquisitions sont réalisées en incrémentant la distance de numérisation. La numérisation est évidemment réalisée tant que les deux plans de la marche sont visibles par le capteur, c’est-à-dire contenus dans la fenêtre de mesure.

□ Porteurs pilotables

Lors de l’utilisation de porteurs pilotables, du fait de la bonne maîtrise de la distance de numérisation, le pas entre les différentes acquisitions est fixé à une valeur $pas = \frac{L}{10}$ où L est la profondeur de la fenêtre de mesure du capteur. L’utilisation d’un tel pas permet d’obtenir une bonne représentation de l’évolution de la justesse de mesure en fonction de la distance de numérisation.

□ Porteurs non pilotables

Dans le cas de l’utilisation d’un porteur non pilotable, seules les bornes de l’erreur de justesse sont évaluées en numérisant l’artefact dans trois zones : au plus proche de l’artefact, au milieu de la fenêtre de mesure et au plus loin de l’artefact.

□ Porteurs ayant des configurations articulaires multiples

Pour les systèmes avec un porteur ayant plusieurs configurations articulaires pour une configuration capteur/pièce, de la même manière que pour l’évaluation du bruit,

plusieurs configurations articulaires sont utilisées pour chaque distance de numérisation, ce qui permet de prendre en compte les erreurs introduites par l'utilisation de configurations articulaires différentes.

5.2.2.4 Calcul de la justesse de mesure

Pour une hauteur de marche, le calcul de l'erreur de justesse de mesure est réalisé de la manière suivante. Une fois la marche numérisée, deux groupes de données (nuages de points, maillages, etc.) correspondant aux deux plans de la marche sont obtenus. Les points du nuage sont divisés en deux parties : d'une part les points représentant le plan supérieur et de l'autre les points représentant le plan inférieur. La figure 2.34 représente un artefact de référence composé de deux plans distants de h_0 , ainsi que le nuage issu de l'acquisition de ces deux plans. Les points pour lesquels il est difficile de

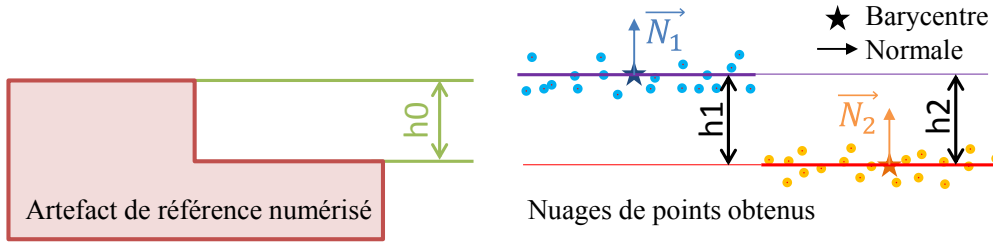


Figure 2.34 – Calcul de la justesse absolue sur une hauteur de marche

décider de leur appartenance à un plan sont éliminés. Il en résulte donc deux nuages de points $M_{sup} = \{M_{sup,1}, \dots, M_{sup,n}\}$ et $M_{inf} = \{M_{inf,1}, \dots, M_{inf,n}\}$. \bar{M}_{sup} (resp. \bar{M}_{inf}) est le barycentre du nuage M_{sup} (resp. M_{inf}) et \vec{N}_{sup} (resp. \vec{N}_{inf}) est la normale du plan associé au nuage M_{sup} (resp. M_{inf}), selon le critère des moindres carrés [BOU05]. La hauteur h_1 est la distance entre le barycentre du nuage M_{sup} et le plan associé au nuage M_{inf} . La hauteur h_2 est la distance entre le barycentre du nuage M_{inf} et le plan associé au nuage M_{sup} . La distance h calculée entre les deux plans est la moyenne de h_1 et h_2 comme définie dans l'équation 2.6. La justesse absolue j_a est donnée par l'équation 2.7.

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{|(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{inf}| + |(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{sup}|}{2} \quad (2.6)$$

$$j_a = h - h_0 \quad (2.7)$$

Le guide matlab que nous avons développé permet également le calcul de la justesse sur des marches (Figure 2.35).

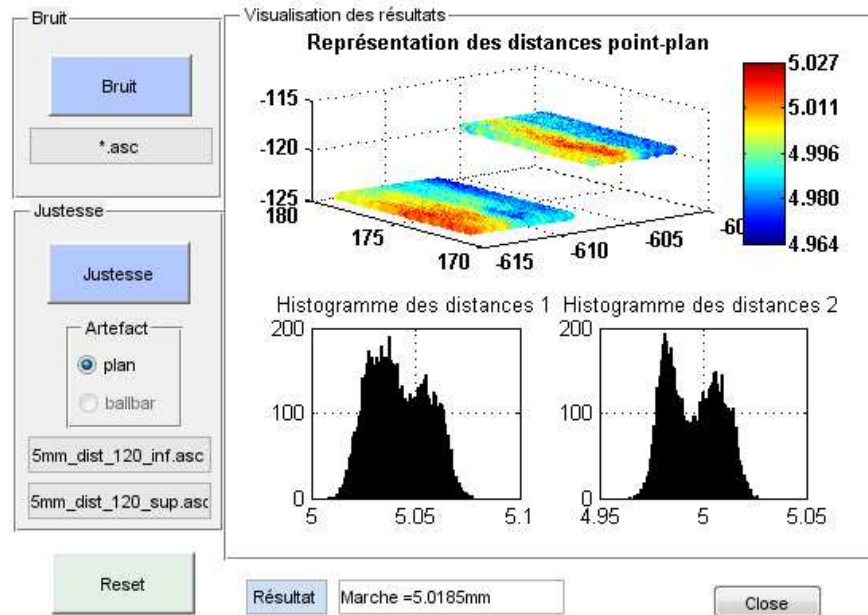


Figure 2.35 – Résultat de l’application QualiPSO pour l’évaluation de la justesse

5.2.3 Évaluation de la justesse de mesure dite « relative » (Annexe G)

5.2.3.1 Justesse relative

La justesse relative est évaluée sur un artefact de référence comme la différence entre la position calculée d’une surface numérisée (plan, sphère, etc.) et sa position théorique. La distance calculée est donc la distance entre deux surfaces extraites de deux nuages de points différents, représentant la même surface physique. Les deux nuages sont acquis dans des conditions différentes, mais la distance nominale entre les surfaces extraites est nulle.

Contrairement à la justesse de mesure présentée en 5.2.2, les défauts des règles de mesure sont pris en compte dans l’évaluation de la distance plan-plan. En effet, le cas précédent, les deux plans numérisés de la marche sont acquis à déplacement nul dans l’axe du capteur. Dans le cas présent, le capteur est déplacé le long de son axe entre les numérisations du plan (Figure 2.36). En ce qui concerne les capteurs 1D, seule une ligne est acquise (une direction de balayage), l’ensemble des lignes obtenues est projeté dans le plan contenant l’axe du capteur et l’axe de déplacement du porteur. Les distances

sont donc évaluées entre droites et non entre plans.

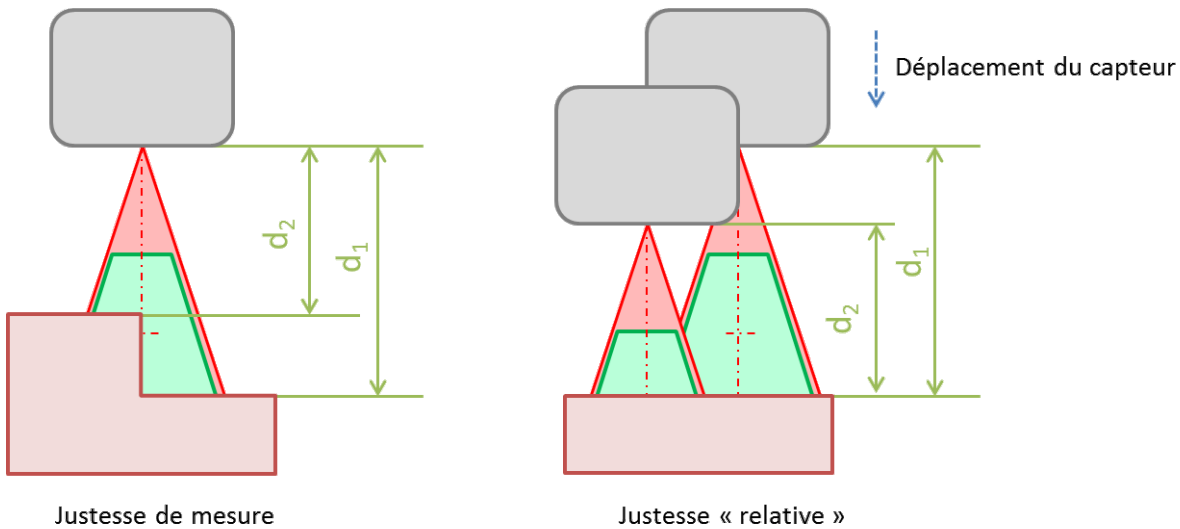


Figure 2.36 – Différences entre la justesse de mesure et la justesse dite « relative »

5.2.3.2 Paramètres influents et artefacts

La justesse relative est déterminée sur un artefact de référence comme la différence entre la position calculée d'une entité (point, droite, plan) lors d'une numérisation avec sa position théorique, ou évaluée lors d'une première acquisition avec le même système d'acquisition ou un autre considéré comme fournissant des données plus justes. En effet, si un autre système de mesure à disposition est étalonné dans le même référentiel que le système étudié, typiquement si l'on souhaite évaluer un capteur laser-plan monté sur MMT et qu'il y a à disposition un palpeur mécanique étalonné sur le même artefact que le capteur laser, les coordonnées de référence de l'artefact pourront être déterminées par palpement mécanique.

Pour la justesse, le principal paramètre influent qu'il est possible de maîtriser est la distance de numérisation. L'avantage de l'utilisation d'un artefact plan est la maîtrise de ce paramètre de configuration capteur/pièce. Cependant, en fonction de la qualité du système de numérisation étudié, des défauts d'orientation des données acquises sur le plan pourront apparaître et la seule évaluation de la distance plan-plan n'a plus réellement de sens. En revanche, l'utilisation d'une sphère permet d'éviter ce problème en évaluant la justesse relative de la position d'un point dans l'espace. Les défauts d'orientation ne sont donc pas problématiques dans ce cas.

Nous pouvons considérer qu'avec l'utilisation d'une MMT ou d'une MOCN, le défaut

d'orientation entre les acquisitions reste négligeable, l'utilisation de plans dans ce cas est donc pertinente. Dans le cas des bras robotisés et polyarticulés, de par leur architecture ce défaut d'orientation peut ne pas être négligeable, il est donc plus judicieux dans ce cas d'utiliser un artefact sphérique.

Notons que cette partie du protocole ne s'applique pas pour les systèmes dont le porteur ne délivre pas de coordonnées 3D comme les porteurs manuels ou les trépieds. En effet, il n'existe pas de distance physique à évaluer, la comparaison entre deux acquisitions ne peut se faire en termes de justesse puisqu'il n'existe pas de référentiel commun entre ces différentes numérisations.

De la même manière que dans la partie dédiée à la justesse absolue, seule l'influence de la distance de numérisation est proposée.

5.2.3.3 Procédure d'évaluation en fonction de la distance de numérisation (Annexe G)

Dans le cas de l'utilisation d'un artefact plan, la procédure consiste à numériser un plan à différentes distances de numérisation, de la même manière que pour l'évaluation de l'influence de la distance de numérisation sur le bruit.

Dans le cadre de l'utilisation d'un artefact sphérique, la distance de numérisation considérée est la distance entre le zénith de la sphère et la source lumineuse du capteur comme le montre la figure 2.37. Ainsi, afin d'évaluer l'influence de la distance sur la

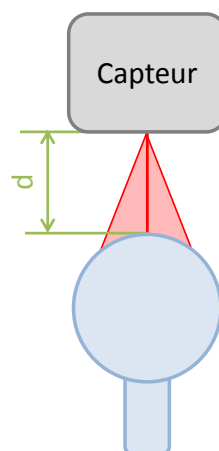


Figure 2.37 – Distance de numérisation pour une sphère

justesse relative, plusieurs numérisations à des distances différentes sont réalisées.

Le protocole concernant les porteurs non pilotables et les porteurs à configurations

articulaires multiples est analogue à celui de la détermination de l'influence de la distance de numérisation sur le bruit détaillé en section 5.1.4, il n'est donc pas détaillé de nouveau ici, mais est présenté dans l'annexe G.

5.2.3.4 Calcul des résultats

Dans le cas de la numérisation d'un artefact plan, la surface de référence est établie par une première numérisation (ou avec un autre système de numérisation). Les hauteurs hi entre les différents acquisitions et le plan de référence sont évaluées de la même façon que pour la justesse absolue : un plan des moindres carrés est associé à chacun des groupes de données. La différence entre les deux évaluations est que toutes les données sont une représentation discrète de la même surface.

La figure 2.38 illustre les différents nuages de points obtenus lors de la numérisation d'une unique surface plane de référence.

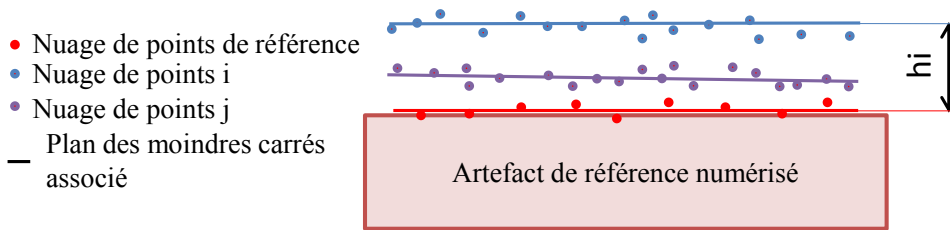


Figure 2.38 – Justesse relative : position des plans associés par rapport au plan considéré comme référence

La surface de référence est établie par une première numérisation (en rouge sur la figure 2.38), les hauteurs hi entre les différents nuages et le plan de référence sont évaluées de la même façon que pour la justesse absolue. La différence est que tous les nuages sont une représentation discrète de la même surface. Soit $M_{ref} = \{M_{ref,1}, \dots, M_{ref,n}\}$ le nuage de point de référence et $M_i = \{M_{i,1}, \dots, M_{i,n}\}$ les différents nuages de points acquis avec de la même façon \bar{M}_i les barycentres respectifs et \vec{N}_i les normales respectives aux plans associés, l'erreur de justesse relative j_r est donnée par l'équation 2.8.

$$j_r = hi = \frac{hi1 + hi2}{2} = \frac{|(\bar{M}_i - \bar{M}_{ref}) \cdot \vec{N}_{ref}| + |(\bar{M}_i - \bar{M}_{ref}) \cdot \vec{N}_i|}{2} \quad (2.8)$$

avec $hi1$ et $hi2$ les distances calculées d'un barycentre au plan associé au deuxième nuage

et vice versa.

Dans le cas de la numérisation d'une sphère, de la même manière la première acquisition est prise pour référence s'il n'existe pas un système plus juste permettant d'obtenir les coordonnées du centre de la sphère. À chaque groupe de données acquises une sphère des moindres carrés est associée au nuage en imposant son rayon égal au rayon théorique. La distance entre chacun des centres ainsi déterminée est calculée et est considérée comme étant l'erreur de justesse relative (Figure 2.39).

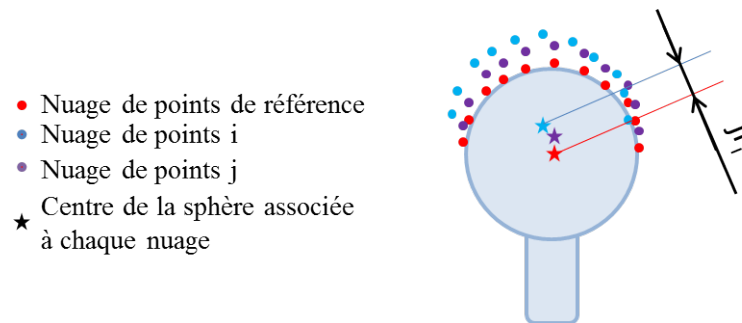


Figure 2.39 – Justesse relative sur sphère : évaluation de la distance entre centres

6 Matification

Certains capteurs optiques ne permettent pas l'acquisition de tous les types de surface (surfaces brillantes, surfaces transparentes, surfaces absorbantes, etc.), le choix de l'artefact est donc primordial. Cet artefact doit être de faible défaut de forme (environ $1\mu\text{m}$: cale étalon par exemple) et répondre aux conditions de réflexion associées au capteur utilisé. Toutefois, dans le cas où il est impossible d'obtenir un artefact respectant cette condition de réflexion, il est possible de matifier une cale étalon à l'aide de poudre réflecteur utilisée pour le ressuage³. Il est néanmoins évident que la qualité de la surface est dégradée, une surépaisseur variable est ajoutée à la surface. La figure 2.40 montre le résultat d'acquisition d'une cale étalon en partie matifiée (une partie de la surface a été protégée lors de la pulvérisation de la poudre), à l'aide d'un capteur monochromatique confocal STIL [STIL]. Ce capteur est utilisé pour le contrôle de l'état de surface des pièces. Il a une résolution de $0.1\mu\text{m}$ et une plage de mesure de 0.3mm pour le crayon utilisé ici. Le nuage de points obtenu a été réorienté de sorte que la partie non matifiée (partie droite en bleu sur la figure) soit orientée suivant Z.

3. Méthode de contrôle des fissures dans une soudure

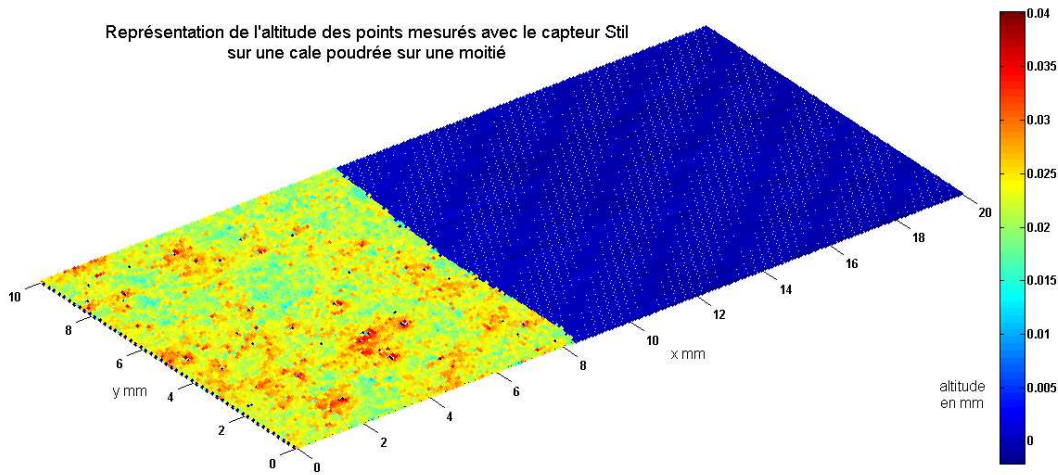


Figure 2.40 – Cale étalon matifiée partiellement

Ces résultats montrent que l'épaisseur moyenne de matifiant est de l'ordre de 0,025 mm. Ceci ne poserait aucun souci si la répartition du matifiant était homogène, mais ce n'est pas le cas, la différence d'épaisseur peut varier jusqu'à 0,02 mm. Dans le cas de la mesure d'un défaut de forme, la variation d'épaisseur de matifiant peut ainsi engendrer une erreur de mesure importante. Il convient donc d'être très prudent lors de l'exploitation des données issues d'une telle numérisation.

Afin de s'assurer que la matification n'influence pas les résultats obtenus, il est intéressant de comparer les résultats de l'acquisition du même artefact matifié obtenus avec deux systèmes de numérisation différents : le système que l'on souhaite évaluer et un système de meilleure qualité. La figure 2.41 présente les résultats obtenus à l'aide d'un système composé d'un capteur laser-plan Kréon Zephyr KZ25 [KREON] monté sur une MMT SEIV Renault, et du capteur STIL précédemment présenté utilisé avec une station dédiée.

Les résultats montrent que les défauts du capteur laser-plan sont supérieurs aux défauts engendrés par la poudre. Il existe en effet un facteur deux entre les deux écarts-types évalués avec les deux systèmes sur la répartition des écarts au plan des moindres carrés associé au nuage de points. Dans le cas de ce système de numérisation, une cale étalon matifiée peut donc être utilisée pour la qualification du système.

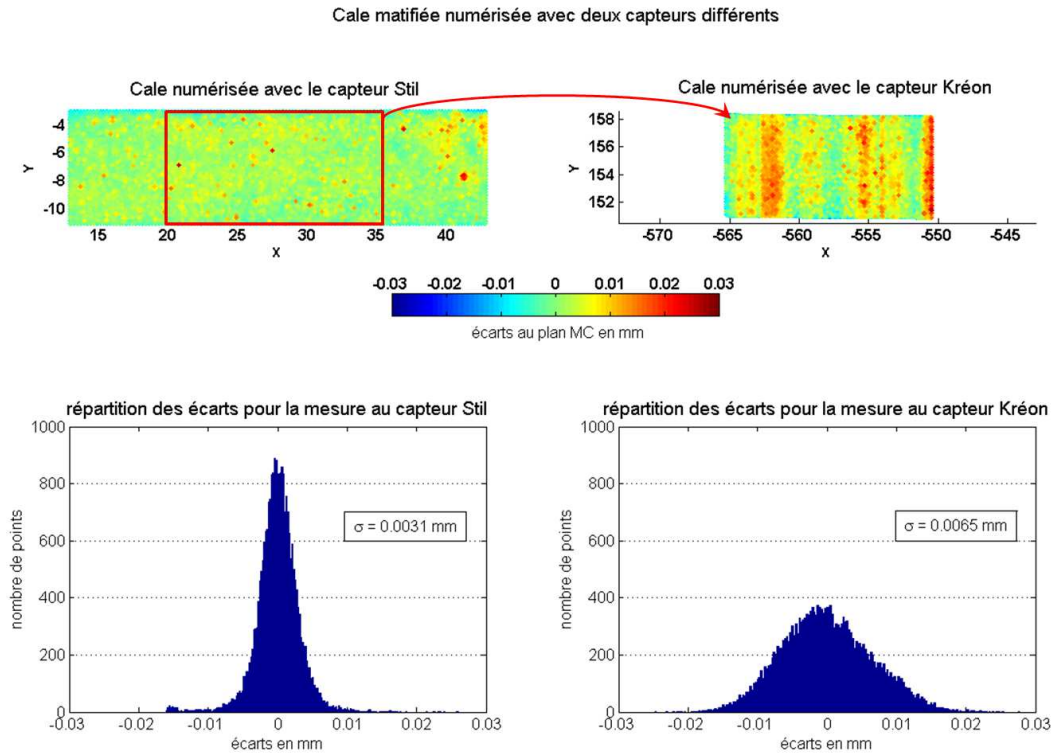


Figure 2.41 – Comparaison des numérisations de la cale matifiée avec deux capteurs différents

7 Application du protocole

Ce paragraphe décrit la mise en œuvre du protocole sur un ensemble de systèmes que nous avons pu tester, aussi bien au LURPA que dans d'autres laboratoires tels que l'IRCCyN de l'École Centrale de Nantes et le Le2i de l'Université de Bourgogne. Ces systèmes de numérisation sont présentés dans le tableau 2.3.

Les systèmes étudiés ont des technologies et des fabricants différents ainsi que des structures de porteurs différents. En effet, des capteurs laser-plan, des capteurs à lumière structurée montés sur des porteurs différents tels que des MMT, des bras polyarticulé ou tout simplement sans porteur (capteur manuel) ont été qualifiés. Les résultats obtenus nous permettent de comprendre le comportement des systèmes de numérisation en termes de qualité des données acquises ainsi que de renseigner la base de données qualifiées que nous avons mise en place, afin de réaliser un choix de système de numérisation à partir des données d'aptitude, de qualité et de performance. Cette base de données est présentée au paragraphe 7.3. Nous proposons dans la suite quelques résultats détaillés

4. Test réalisés à l'IRCCyN à l'École Centrale de Nantes
5. Test réalisés à l'IRCCyN à l'École Centrale de Nantes
6. Test réalisée au Le2i de l'Université de Bourgogne à Auxerre

Système	Zephyr_{MMT}	LC60Dx_{MMT} ⁴	LC60Dx_{bras} ⁵	TP2_{MMT}
Capteur	Zephyr KZ25	LC60Dx	LC60Dx	TP2
Technologie	Laser-plan	Laser-plan	Laser-plan	Palpage méca.
Porteur	seiv	Metris	MCAII-7axis	seiv
Catégorie	MMT + PH10	MMT + PH10	Bras 7 axes	MMT + PH10
Système	GOM	Noomeo	Minolta	G-Scan_{bras} ⁶
capteur	ATOS CS 2M	OptiNum-RE	Vivid 910	G-Scan RX2
Technologie	Lum. struct.	Lum. struct.	Laser-plan	Laser-plan
Porteur	Trépied	Main	Trépied	Sigma 2025
Catégorie	Trépied	Manuel	Trépied	Bras 7 axes
Système	CL2_{MMT}			
capteur	CL2			
Technologie	Chromatique			
Porteur	seiv			
Catégorie	MMT + PH10			

Tableau 2.3 – Description des systèmes de numérisation testés

et commentés.

La temps de mise en œuvre du protocole peut varier en fonction de système à évaluer et de la connaissance du protocole, mais nous pouvons estimer à une journée le temps nécessaire à l'acquisition des données nécessaires aux différents calculs. Les numérisations ont été réalisées par les utilisateurs, en notre absence et nous avons ensuite réalisé les calculs.

7.1 Résultats sur les caractéristiques système

7.1.1 Fenêtre de mesure

La fenêtre de mesure du capteur Kréon Zephyr KZ25 a été évaluée selon la procédure définie en Annexe A. La figure 2.42 représente les écarts entre chacun des points acquis et le plan des moindres carrés associé au nuage de points.

Le défaut de forme obtenu est de 0,08 mm, ce qui peut avoir un impact sur la qualité des données acquises comme le montre la forme du nuage de points obtenu en numérisant une cale-étalon sur la figure 2.43. Les traces qui apparaissent sur le nuage de points sont dues aux défauts de la fenêtre de mesure probablement causés par la méthode de calibration interne du capteur.

Ce protocole n'a pas pu être mis en œuvre sur certains systèmes testés (LC60Dx_{MMT}

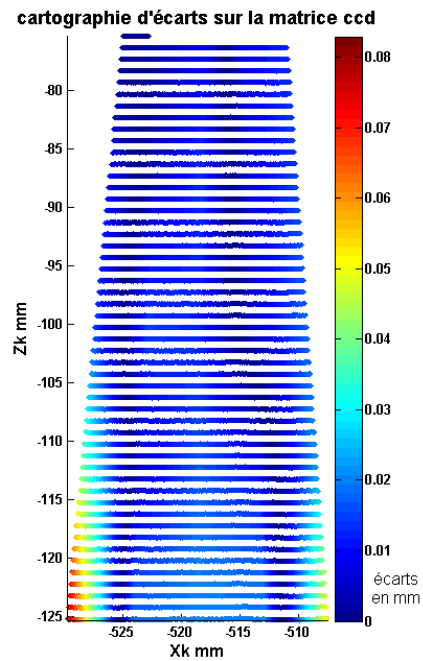


Figure 2.42 – Profil de la fenêtre de mesure du capteur Zephyr KZ25

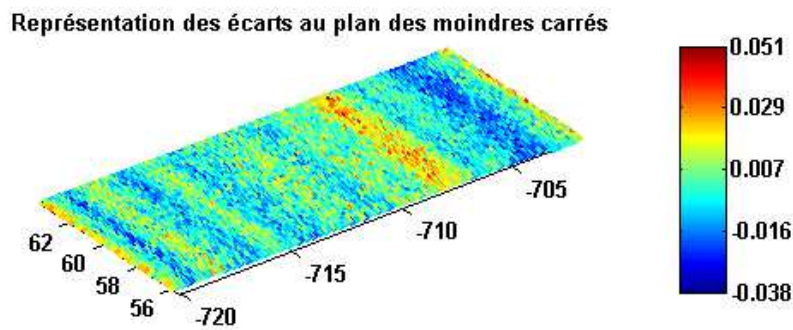


Figure 2.43 – Bruit de numérisation sur l'acquisition d'une cale-étalon

et LC60Dx_{bras}), le logiciel de numérisation nécessite parfois qu'il y ait un déplacement du système pour réaliser l'acquisition, or pour ce protocole il est indispensable que le système reste fixe.

7.1.2 Étude des défauts de remise en position

Le capteur Zephyr KZ25 est utilisé avec une MMT équipée d'une tête de positionnement rotative PH10. L'utilisation d'un tel système nécessite la calibration externe du système dans chacune des positions de la tête PH10. Nous avons évalué l'erreur engendrée par la remise en position du système lorsque la calibration n'est pas réalisée de nouveau à chaque remise en position. La figure 2.44 présente les résultats de cette étude.

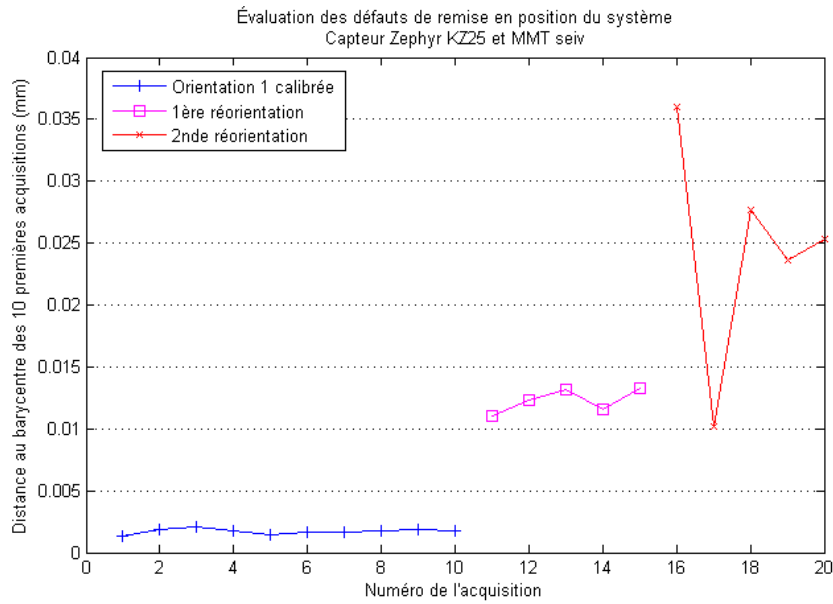


Figure 2.44 – Evolution de la distance des centres sphère à l’origine de repère mesure

La sphère d’étalonnage a été numérisée dix fois comme préconisé sans réaliser de remises en position, puis cinq fois en ayant réalisé une première remise en position de la tête PH10, et enfin cinq nouvelles fois en ayant réalisé une seconde remise en position du système. Comme le préconise le présent protocole, le barycentre des dix premières acquisitions est évalué et la distance de chacun des centres calculés à ce barycentre est évaluée.

Les résultats montrent que le système a une bonne répétabilité lorsque l’on ne réalise pas de remises en position (écart-type $\sigma = 0,0002$ mm), mais que ceci ne reste pas vrai dans le cas de rotation de la tête sans recalibration externe (écart-type de l’ensemble des données $\sigma_{tot} = 0,0106$ mm). Sur certains résultats l’erreur introduite atteint $35 \mu\text{m}$. La conclusion qui peut donc être tirée ici est qu’il est nécessaire de recalibrer le système à chaque remise en position, en particulier pour des applications métrologiques.

De la même manière le test a été réalisé avec le capteur Nikon LC60Dx monté d’une part sur la MMT (Figure 2.45a) puis sur le bras (Figure 2.45b). Dans le cas où le capteur est utilisé sur MMT, l’erreur engendrée par les remises en position n’excède pas $2 \mu\text{m}$. Dans le cadre général de la métrologie 3D, cette erreur est relativement faible, une recalibration n’est donc pas nécessaire à chaque remise en position.

En revanche, concernant les différentes configurations articulaires du bras, des erreurs de l’ordre de $0,5$ mm sont engendrées. Pour ce cas il n’est pas possible de recalibrer car

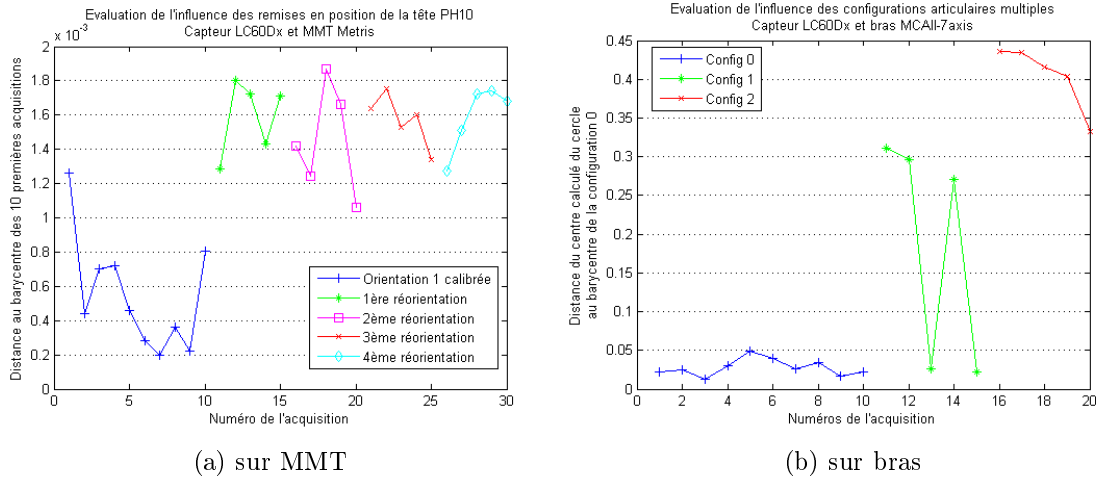


Figure 2.45 – Évaluation des remises en position du capteur Metris

les données 3D sont données par les codeurs, responsables de ces erreurs. En conclusion, il n'est pas possible d'utiliser un tel système pour vérifier des spécifications géométriques avec un IT faible. C'est la raison pour laquelle ces systèmes de déplacement sont plus généralement utilisés dans le cadre de la rétro-conception.

7.1.3 Étude des défauts de recalage dus à la calibration

Pour le système $Zephyr_{MMT}$, la qualification de la qualité de la calibration a été étudiée au travers des essais proposés en Annexe C. Ainsi la sphère d'étalonnage du système a été numérisée avec plusieurs orientations du capteur, chaque orientation étant calibrée. La figure 2.46 donne les résultats de cette qualification. Les distances entre les centres calculés de chaque acquisition au barycentre des dix premières acquisitions de référence sont représentés sur la figure 2.46.

Ces résultats montrent que bien que le système soit calibré dans chacune des orientations utilisées, des erreurs sont engendrées par l'utilisation de plusieurs vues (de 8 à 12 μm pour cet exemple). Ces erreurs assimilables à des erreurs de justesse peuvent être pénalisantes lorsque l'acquisition complète d'une pièce nécessite plusieurs orientations capteur, en particulier pour les applications métrologiques. Une étude sur l'intervalle de tolérance minimal acceptable devra être dressée par la suite pour assurer que ces erreurs restent acceptables pour l'application.

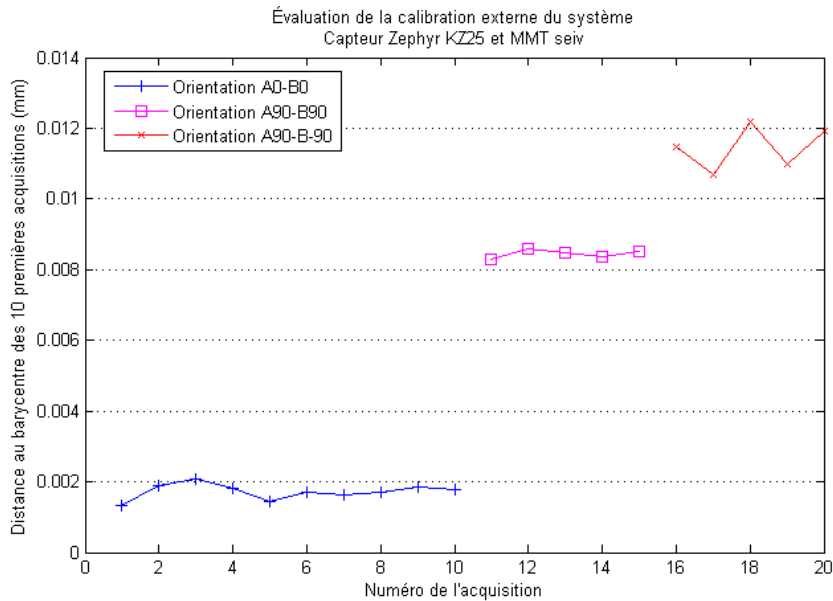


Figure 2.46 – Evolution de la distance des centres sphère à l’origine de repère mesure

7.2 Résultats sur la qualité

7.2.1 Bruit de numérisation

La figure 2.47 présente les résultats de l’évolution du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation pour le système Zephyr_{MMT} (Figure 2.47a) et le système LC60Dx_{MMT} (Figure 2.47b).

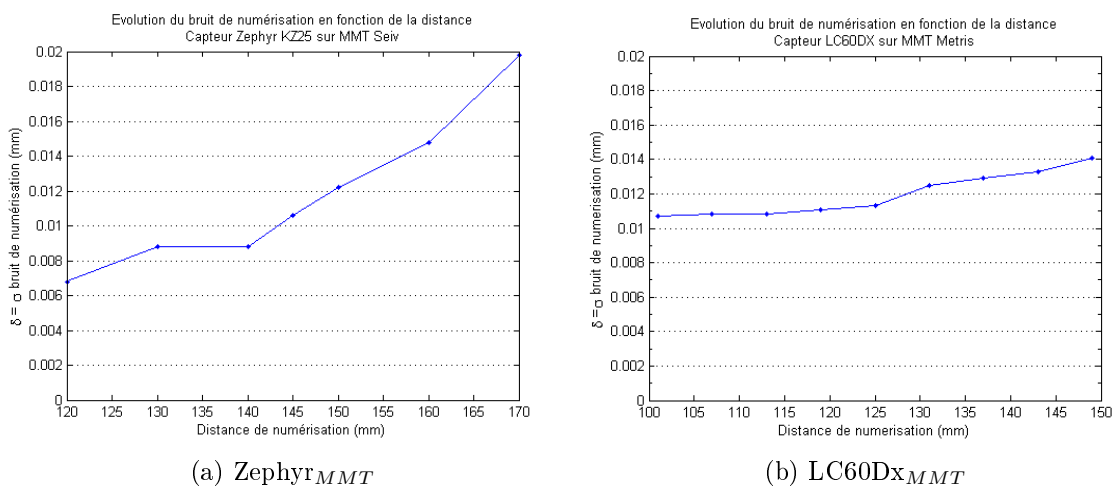


Figure 2.47 – Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation pour les MMT

Nous constatons dans les deux cas que le bruit augmente avec la distance de numérisation. De ces données nous pouvons déterminer une plage de distances de numérisation qui garantissent un bruit inférieur à un seuil. Dans le cas du système Zephyr_{MMT}, le bruit

peut être garanti inférieur à 0,01 mm pour une distance de numérisation inférieure à 145 mm (soit 50% de la fenêtre de mesure, Figure 2.48a). Pour le système LC60Dx_{MMT}, le bruit sera garanti inférieur à 0,011 mm pour une distance de numérisation inférieure à 115 mm (soit 42% de la fenêtre de mesure, Figure 2.48b).

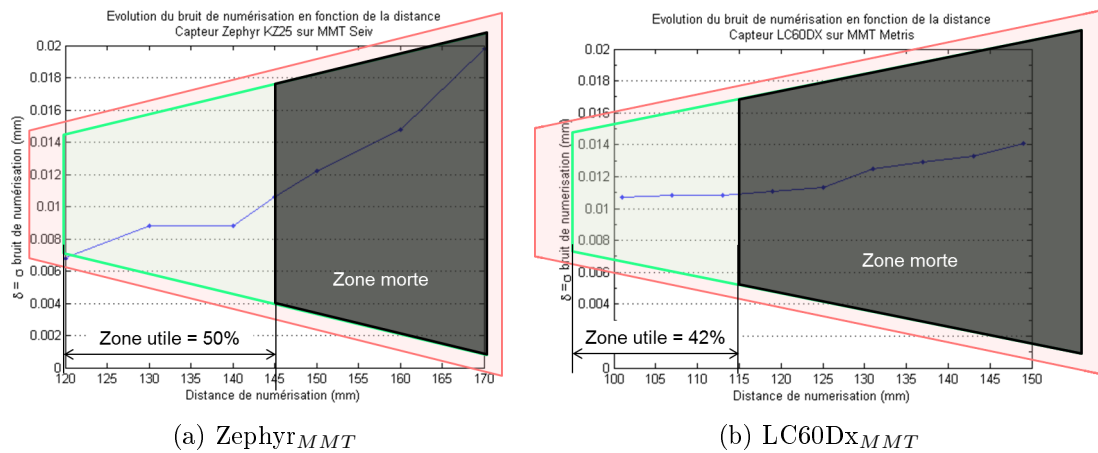


Figure 2.48 – Zones utiles des capteurs Pour garantir un bruit inférieur au seuil fixé

Le même test a été réalisé pour le système LC60Dx_{bras} et le système G-Scan_{bras} (Figure 2.49).

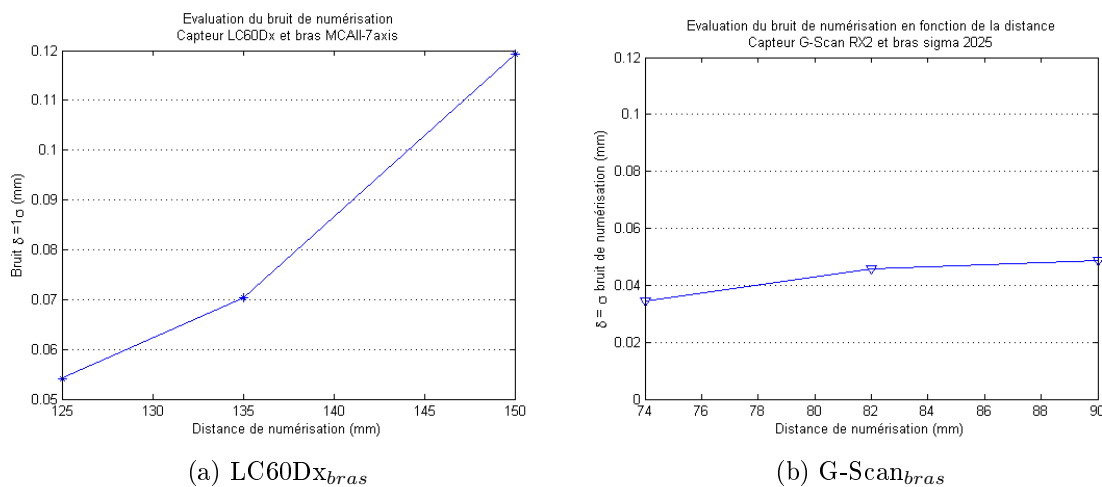


Figure 2.49 – Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation pour les bras

Pour ces porteurs (bras polyarticulés), comme la distance de numérisation n'est pas maîtrisable, seules trois acquisitions au milieu et aux extrémités de la fenêtre de mesure ont été réalisées. Les résultats vont dans le même sens que ceux des tests sur MMT à

savoir que le bruit de numérisation augmente avec la distance de numérisation. Comme il n'est pas possible de maîtriser la distance de numérisation, seule la valeur maximale du bruit observé est considérée, ainsi le système LC60Dx_{bras} fournit un bruit maximum $\delta_{max} = 0,12$ mm et le système G-Scan_{bras} fournit un bruit maximum $\delta_{max} = 0,045$ mm.

Le protocole a été mis en œuvre sur les capteur Noomeo et GOM par Alexandre Zuquete [ZUQ12]. Les résultats ont été ajoutés à la base de données qualifiées présenté dans le paragraphe 7.3.

Nous avons également réalisés les tests sur le bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation. Les résultats sont présentés sur les figures 2.50 et 2.51.

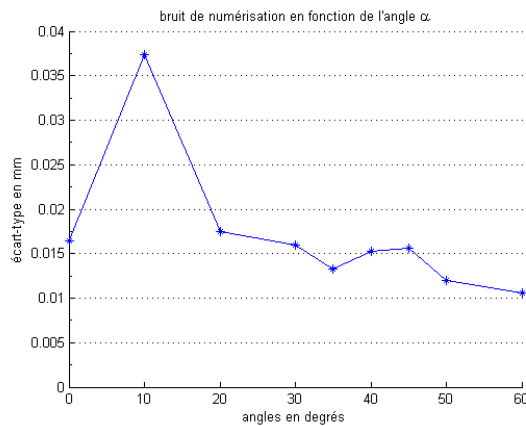


Figure 2.50 – Bruit de numérisation en fonction de α pour le système LC60Dx_{MMT}

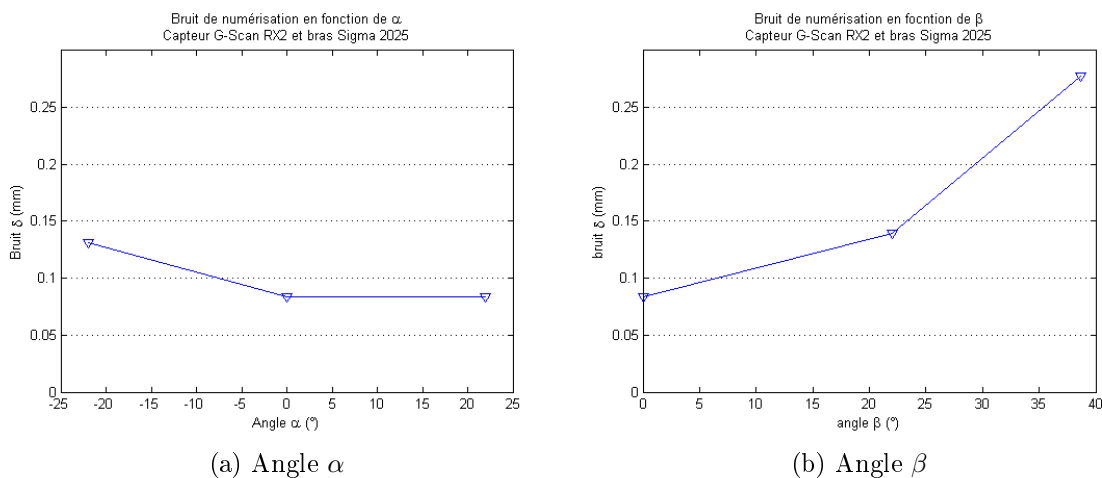


Figure 2.51 – Bruit en fonction de des angles α et β pour le système G-Scan_{bras}

Les résultats sur l'influence des angles de numérisation sur le bruit ne sont pas équivalents suivant les systèmes de numérisation. Nous ne pouvons pas dresser de conclusion

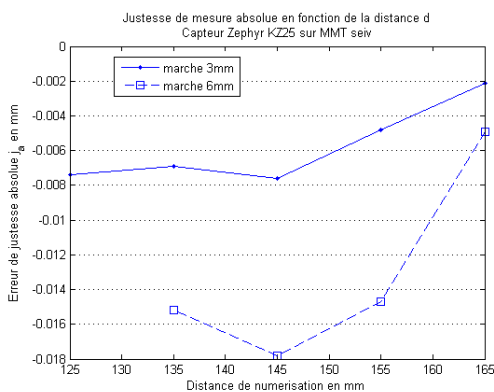
générale, mais pour chacun des systèmes étudiés, une plage de variation angulaire admissible peut être établie pour respecter un bruit maximal admissible.

Les résultats de ce protocole sur le bruit de numérisation permettent de déterminer le bruit fourni par le système de numérisation. Bien que le bruit soit essentiellement dû au capteur, le porteur peut avoir un rôle plus ou moins important. Pour une MMT, des vibrations du porteur peuvent générer du bruit. Dans le cas des porteurs pour lesquels le déplacement est manuel (bras polyarticulés par exemple), les mouvements de l'opérateur sont source de bruit. Comme le capteur est toujours associé à un porteur, il est apparu indispensable d'évaluer la qualité du système complet.

Pour la plupart des capteurs optiques, ce bruit est pénalisant car de grande amplitude, mais des solutions de traitement des données permettent de diminuer ce bruit. Nous proposons dans le chapitre IV une méthode de filtrage qui permet de réduire le bruit de numérisation sans modifier le défaut de forme de la pièce. Ainsi, après filtrage des données, il devient possible d'utiliser des données initialement bruitées pour réaliser des calculs métrologiques.

7.2.2 Justesse de mesure

La justesse de mesure a été testée sur des marches constituées de deux cales-étalon. Le capteur Kréon a été testé sur deux marches de hauteur nominale 3 et 6 mm, l'erreur de justesse ainsi évaluée est représentée sur la figure 2.52a. Le capteur Nikon a été testé sur une marche de 10 mm, l'erreur de justesse est donnée sur la figure 2.52b.



(a) KZ25

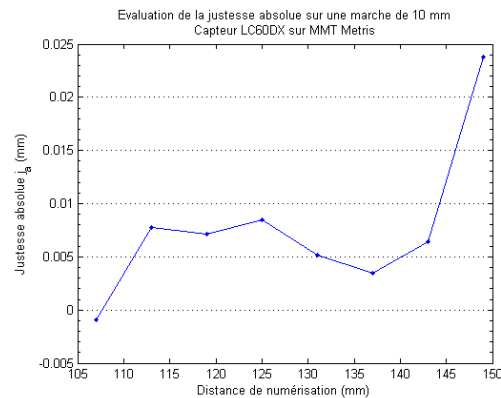
(b) LC60DX_{MMT}

Figure 2.52 – Justesse de mesure absolue en fonction de la distance de numérisation

Les résultats sur le capteur Kréon montrent que l'erreur de justesse augmente lorsque

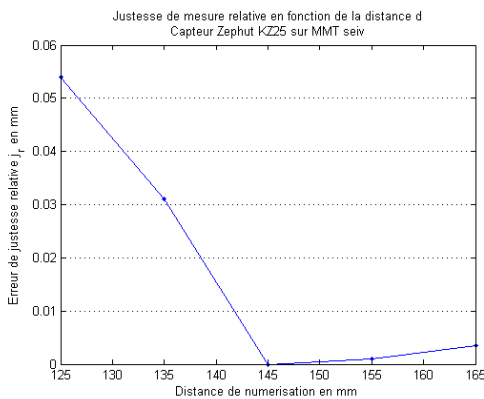
la taille de la marche augmente. Il n'est possible de garantir une faible erreur de justesse ($<0,01$ mm) qu'avec une marche de faible hauteur (3 mm). Les résultats sur le capteur Nikon montrent que l'erreur de justesse reste faible ($<0,01$ mm) dans une grande partie de la fenêtre de mesure.

À partir de ces données collectées, nous déterminons les distances de numérisation admissibles pour assurer une justesse suffisante des données en accord avec l'application réalisée.

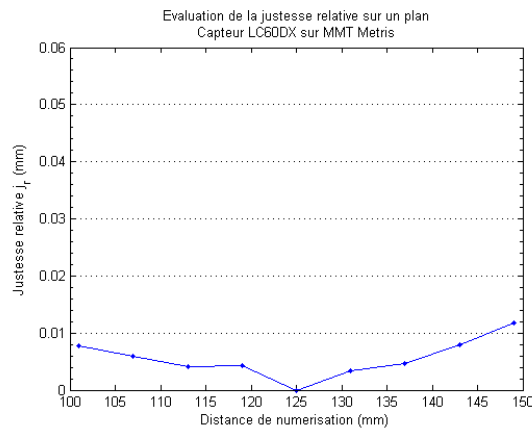
Notons ici que l'erreur de justesse est essentiellement due à la qualité de la matrice CCD du capteur. Le porteur a un mouvement très faible durant l'acquisition et les deux plans de la marche sont numérisés en même temps dans deux zones distinctes de la matrice CCD. C'est donc les défauts des cellules qui composent le capteur, couplé à l'algorithme de calibration qui permet de passer des coordonnées 2D du capteur aux données 3D qui engendrent les erreurs de justesse.

7.2.3 Justesse dite « relative »

La justesse relative a été évaluée sur une cale étalon numérisée à différentes distances de numérisation. La numérisation de référence a été prise comme étant celle réalisée au milieu de la fenêtre de mesure, zone préconisée en général par les constructeurs. Les résultats pour le capteur Kréon sont donnés sur la figure 2.53a et les résultats pour le capteur Nikon sur la figure 2.53b.



(a) KZ25



(b) LC60Dx_{MMT}

Figure 2.53 – Justesse de mesure relative en fonction de la distance de numérisation

Ces résultats de justesse relative ne permettent pas de déterminer la zone de la fenêtre de mesure à utiliser, en revanche ils permettent de mettre en évidence l'erreur de justesse

relative introduite entre deux numérisations réalisées dans des conditions différentes. En d'autres termes, cette erreur de justesse prend aussi en compte les défauts dus aux porteurs. S'il est nécessaire d'acquérir deux surfaces qui ne sont pas numérisables sans déplacement du capteur suivant son axe, les défauts du porteurs entrent en jeu et ne peuvent pas nécessairement être négligés.

7.3 Base de données qualifiées

À partir de la campagne de tests réalisée sur les différents systèmes de numérisation, nous avons implémenté la base de données qualifiées représentée par le tableau 2.4. Les lignes 1 et 2 (Qual.) représentent les valeurs de bruit et de justesse limite que l'on peut s'imposer en respectant les contraintes liées aux paramètres de numérisation (angles et distance de numérisation) (lignes 3, 4 et 5). Nous pouvons voir par exemple que le système KZ25/Seiv permet d'obtenir un bruit de numérisation inférieur à 0,009mm si $d \in [120, 145]$ et $\alpha \in [0, 20]$.

La base de données a été implémentée avec PhpMyAdmin 3.4.9 et est interrogée à l'aide de requêtes SQL, ce qui permet de sélectionner un système de numérisation en fonction de la qualité des données qu'il peut fournir (Chapitre III). Cette base de données qualifiées complète la base de données intrinsèques qui contient les données constructeur qui serviront également à la sélection des systèmes de numérisation.

Bien que nous ayons essayé de mettre en place un protocole générique simple à mettre en œuvre, les conditions de mise en œuvre diffèrent d'un laboratoire à l'autre et d'un utilisateur à l'autre. De plus, à l'heure actuelle il n'y a pas unicité des artefacts utilisés, chaque laboratoire utilise son propre matériel, il est donc difficile de comparer les résultats obtenus. L'utilisation d'artefacts uniques prêtés aux utilisateurs pour la mise en œuvre du protocole QualiPSO permettra à l'avenir de diminuer les sources d'imprécision.

	Capteur	KZ25	LC60Dx	LC60Dx	TP2	CL2	ATOS CS2M	OptiNum-RE	G-Scan RX2
	Porteur	Seiv	Nikon	MCAII-7axis	Seiv	Seiv	Trépied	Main	Sigma 2025
Qual.	Bruit δ	0,009	0,011	0,12	N/A	$3,66 \cdot 10^{-5}$	0,005 1	0,061	0,049
	Justesse e_t	0,01	0,01	0,04	0,003	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,003 4	0,017 4	
Contraintes	d qualifiée bruit (mm)	120-145	95-115	95-155	0	11-11.4	450-1 200	400-550	
	d qualifiée justesse (mm)	140-160	110-145	95-155	0	11-11.4	450-1,200	400-550	
	α qualifié (°)	0-20	35-60	-	-	-	-	-	

Tableau 2.4 – Base de données qualifiées

8 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté un protocole d'évaluation des systèmes de mesure optiques appelé QualiPSO. Ce protocole, inspiré de la littérature détaillée en début de chapitre, présente la particularité d'être adapté à la majorité des systèmes de mesure optiques, depuis les systèmes utilisant une MMT vers ceux utilisant des porteurs particuliers comme les bras polyarticulés et robotisés.

Le protocole QualiPSO peut être mis en œuvre de manière simple à partir d'artefacts de numérisation classiques, ce qui permet une mise à disposition pour les différents laboratoires et industriels qui nécessitent une évaluation de la qualité de leurs systèmes de numérisation optiques. Le protocole a par ailleurs été mis en œuvre en notre absence, par des « individus » sans tri, c'est-à-dire des utilisateurs qui ne connaissaient pas le protocole à l'avance.

La finalité de ce protocole est d'enrichir une base de données de systèmes qualifiés nécessaire à la sélection des systèmes de numérisation, étape majeure du processus d'inspection 3D multi-systèmes. Pour cela nous utilisons des artefacts similaires pour l'ensemble des systèmes étudiés, nous souhaitons à l'avenir que ces artefacts ne soit plus similaires, mais identiques, c'est donc le même artefact qui devra être utilisé par les différents utilisateurs. Les résultats ont permis de déterminer les plages de variation admissible pour les distances et angles de numérisation avec comme donnée une valeur du bruit et de la justesse correspondant. Ces éléments constituent la base de données des systèmes qualifiés, pour chaque système ses limites en termes de bruit et justesse sont renseignées ainsi que les contraintes en termes de distance et angles de numérisation associés. Le chapitre suivant présente l'étape de sélection des systèmes de numérisation dans un contexte de métrologie en s'appuyant sur la base de données ainsi créée.

Chapitre

III

INSPECTION AUTOMATIQUE MULTI-SYSTÈMES : CHOIX DES SYSTÈMES DE NUMÉRISATION

Sommaire

1	Introduction	124
2	Démarche d'inspection automatique multi-systèmes	124
3	Base de données systèmes	128
3.1	Organisation de la base de données	128
3.2	Base de données intrinsèques	129
3.2.1	Données intrinsèques capteur	129
3.2.2	Données intrinsèques porteur	132
3.3	Base de données systèmes qualifiés	133
3.3.1	Données de qualité	133
3.3.2	Données de performance	134
4	Choix des systèmes de numérisation	136
4.1	Partitionnement du modèle (A11)	137
4.2	Identification des systèmes admissibles (ASI) (A12)	139
4.2.1	Critères d'aptitude	141
4.2.2	Critères qualité	143
4.3	Sélection du système et configuration (A13)	147
4.3.1	Critères de performance	147
4.3.2	Fonction coût de numérisation	148
4.3.3	Exemple d'application	151
4.4	Implémentation logicielle	153
5	Conclusion	157

1 Introduction

Ce chapitre s'attache à détailler l'activité de choix de systèmes de numérisation pour l'application d'inspection 3D, activité majeure de la démarche globale d'inspection automatique multi-systèmes proposée au chapitre I (paragraphe 6). Cette activité, décomposée en 3 sous-activités, doit conduire au choix des systèmes de numérisation les plus adaptés en regard des spécifications à contrôler. Partant des surfaces à numériser, le choix des systèmes de numérisation s'appuie sur les notions d'aptitude, qualité et performance des systèmes que nous avons traduites selon le concept de complexité de numérisation. La complexité de numérisation permet de comparer les systèmes au travers de critères ou indices de coût. Ces derniers sont calculés ou renseignés grâce aux informations contenues dans la base de données systèmes qualifiés que nous avons mise en place.

Comme nous l'avons précisé au chapitre I, le contexte de notre étude peut être celui de l'inspection *on-line*, *off-line* ou encore *on-machine*. Ce contexte conditionne les paramètres à prendre en compte pour la sélection de systèmes de numérisation.

Nous présentons dans un premier temps l'activité de « choix de systèmes de numérisation » au sein du processus global d'inspection 3D automatique multi-systèmes, puis nous détaillons la base de données mise en place permettant de stocker les informations utilisées lors de l'activité de choix des systèmes, et enfin nous détaillons les trois sous-activités de l'activité de choix des systèmes de numérisation.

2 Démarche d'inspection automatique multi-systèmes

Nous avons proposé au chapitre I, une approche globale d'inspection 3D multi-systèmes composée de quatre activités majeures : Choix du système de numérisation (A1), Définition de la stratégie de numérisation (A2), Exécution des trajectoires (A3) et Traitement et analyse des données (A4). Rappelons que notre objectif est, étant donné un modèle CAO tolérancé, une pièce fabriquée et un ordre de contrôle, aboutir à un rapport d'inspection et à une représentation numérique de la pièce (Figure 1.42).

Comme nous l'avons souligné, l'un des apports principaux de notre approche par rapport aux travaux de la littérature [LIN01, ZHA09, ZHA10] est l'intégration de l'activité « Choix du système de numérisation ». Elle consiste à déterminer les systèmes de

numérisation (capteurs et porteurs) les mieux adaptés à chacune des surfaces de la pièce au regard de la spécification à vérifier, c'est-à-dire répondant à des critères d'aptitude, de qualité et de performance [AUD12].

En ce sens, l'activité est divisée en trois sous-activités A11 à A13 (Figure 3.1).

- Partitionnement du modèle CAO en surfaces élémentaires ;
- Identification des Systèmes Admissibles (ASI) ;
- Évaluation des Systèmes et Configurations associées (SEC).

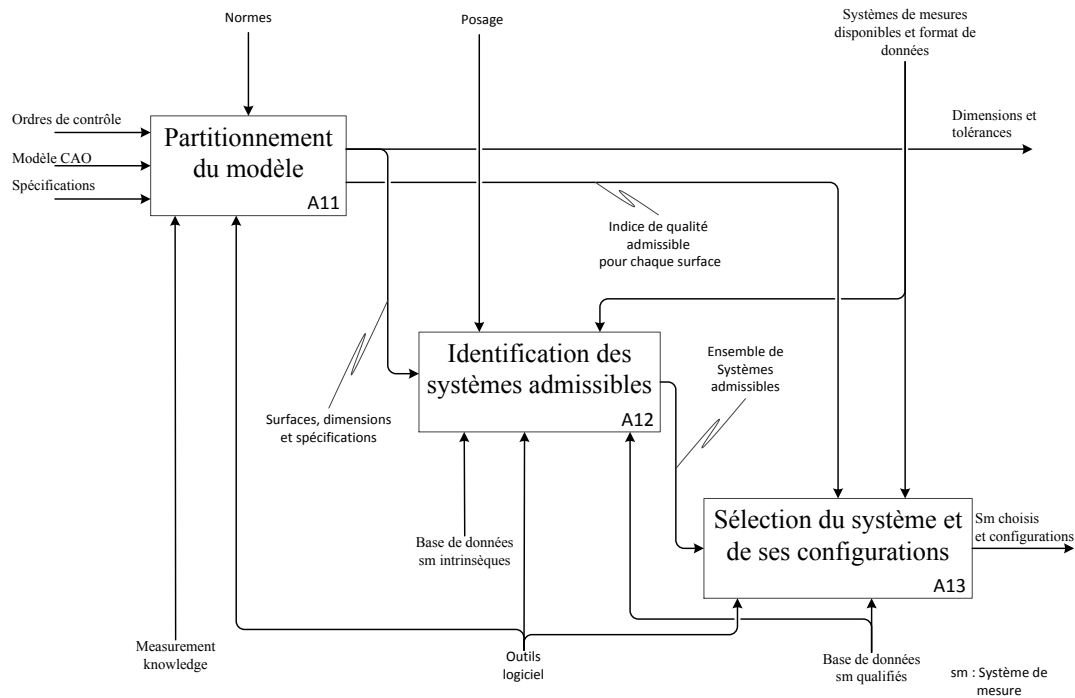


Figure 3.1 – SADT niveau A1

Lors de l'opération de partitionnement du modèle, chaque surface élémentaire est identifiée et toutes les spécifications géométriques et dimensionnelles pour lesquelles elle intervient lui sont associées. Les spécifications prises en compte sont celles pour lesquelles la surface étudiée définit l'élément tolérancé, mais aussi celles pour lesquelles la surface est un élément de référence. Ainsi, pour chaque surface élémentaire du modèle, la nature et l'intervalle de tolérance des spécifications concernées sont recensées. Ceci permet en particulier de déterminer la qualité admissible pour son acquisition.

Nous avons décomposé l'activité de sélection proprement dite en 2 étapes. Dans un premier temps, l'activité d'identification des systèmes admissibles (A12) est mise en œuvre selon des critères d'aptitude et de qualité des données en accord avec la qualité

requis déterminée lors de l'étape A11. L'aptitude des systèmes de numérisation est considérée en termes d'accessibilité, d'échelle de mesure, de rigidité pièce, ou encore de format de donnée ; la qualité est elle liée au bruit et à la justesse de mesure que peut produire le système de numérisation. Cette étape permet de réduire le nombre de systèmes, parmi les systèmes existants, aux systèmes dits admissibles.

Rappelons que nous avons défini un système de numérisation comme un couple porteur/capteur. Nous proposons dans cette étude une classification des systèmes de numérisation représentée sur la figure 3.2.

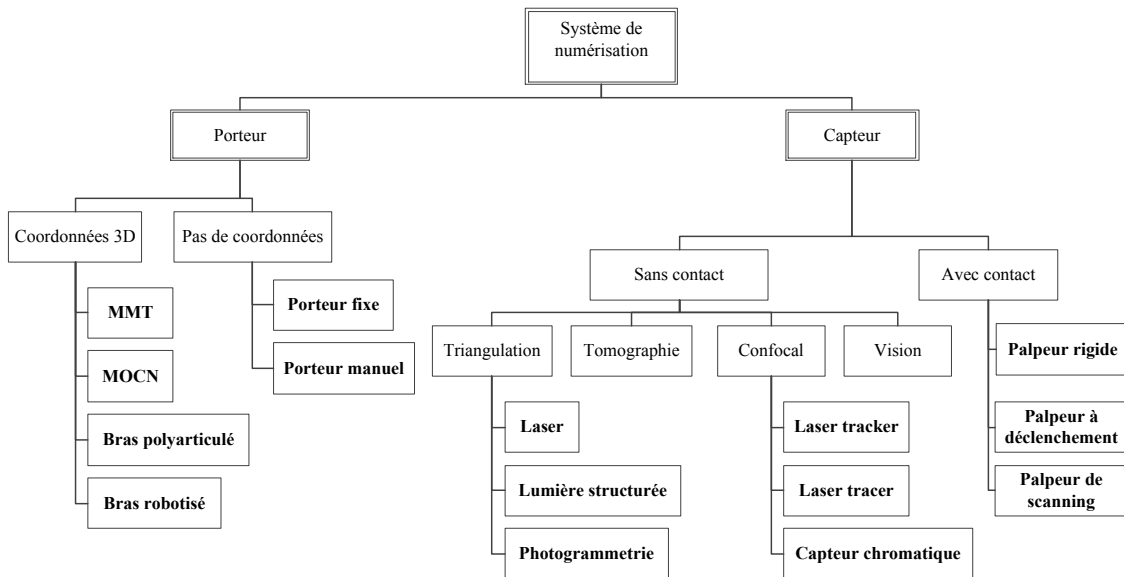


Figure 3.2 – Classification des systèmes de numérisation

Cette représentation dissocie le capteur du porteur. En effet, le capteur et le porteur étant identifiés indépendamment avec pour seule condition qu'ils soient compatibles, c'est-à-dire qu'ils puissent être utilisés ensemble, il apparaît plus approprié de les étudier séparément.

Notre approche est à l'heure actuelle applicable aux porteurs qui délivrent des coordonnées 3D directement, c'est-à-dire sans traitement des données par l'opérateur (la photogrammétrie est exclue par exemple). Ainsi, seuls les systèmes de numérisation avec des capteurs à contact ainsi que les systèmes à base de capteurs optiques actifs pouvant être évalués avec le protocole QualiPSO (Chapitre II) font partie du cadre de l'étude. Néanmoins nous posons le cadre qui devrait être applicables aux autres systèmes de numérisation à partir du moment où il est possible de les qualifier de manière comparable

aux autres systèmes.

Dans un deuxième temps, l'étape (A13) conduit à la sélection du système de numérisation et de ses configurations d'utilisation selon des critères de performance ; le meilleur système parmi les systèmes admissibles est le moins coûteux. En ce sens une fonction de coût est établie.

L'approche que nous proposons ici s'inspire de travaux issus de la littérature [KER09, ELM03, ELM04, ELM05] portant sur la notion de complexité de fabrication. Kerbrat [KER09] définit des indices de complexité en fabrication permettant de sélectionner un système de production pour une pièce donnée. La complexité en fabrication permet de classer les systèmes de production en utilisant des critères liés aux dimensions de la pièce à fabriquer, au matériau ou encore à l'état de surface à obtenir mis en relation avec les dimensions et performances des systèmes de production. Pour chaque critère un indice de complexité est calculé et associé à chaque système à choisir ; chacun des indices ainsi calculé est comparé pour tous les systèmes indépendamment.

Autour de la même notion, les travaux de ElMaraghy *et al* [ELM03, ELM04, ELM05] s'attachent également au problème de la complexité de fabrication et de son évaluation. Des indices de complexité sont déterminés pour chaque critère, ces indices sont ensuite sommés afin de déterminer le système pour lequel la complexité est minimale pour la fabrication d'une pièce.

L'approche que nous proposons s'inscrit dans un esprit de caractérisation d'une complexité en numérisation en classant les systèmes de numérisation en fonction de leurs performances au regard de la pièce à contrôler. À chaque performance, un indice de complexité de numérisation est défini et la sélection s'effectue par minimisation d'une fonction coût basée sur ces indices.

Ainsi, des données sur l'aptitude, la qualité et les performances¹ des systèmes sont nécessaires. Afin de stocker ces informations, nous avons développé une base de données des systèmes de numérisation constituée de deux volets : une base de données intrinsèques et une base de données qualifiées. La base de données intrinsèques concatène les caractéristiques relatives aux capteurs et aux porteurs, en général données par les fabricants. Ce sont des données génériques qui ne nécessitent pas d'évaluation des systèmes. La base de données qualifiées contient les données relatives à la qualité et aux performances des systèmes de numérisation, c'est-à-dire au couple capteur/porteur, ob-

1. voir définitions page 56

tenues après qualification du système de numérisation. Cette étape de qualification a fait l'objet du chapitre II. Avant de décrire chacune des activités constituant l'activité de choix de système, nous présentons de façon détaillée la base de données systèmes et son organisation.

3 Base de données systèmes

À partir de la classification des systèmes de numérisation, nous avons mis en place une base de donnée des systèmes de numérisation qui recense les caractéristiques des systèmes de numérisation en termes d'aptitude, de qualité et de performances.

3.1 Organisation de la base de données

La base de données est organisée comme le montre la figure 3.3 en trois parties : des données intrinsèques relatives au capteur, des données intrinsèques relatives au porteur et des données qualifiées relatives au système capteur+porteur.

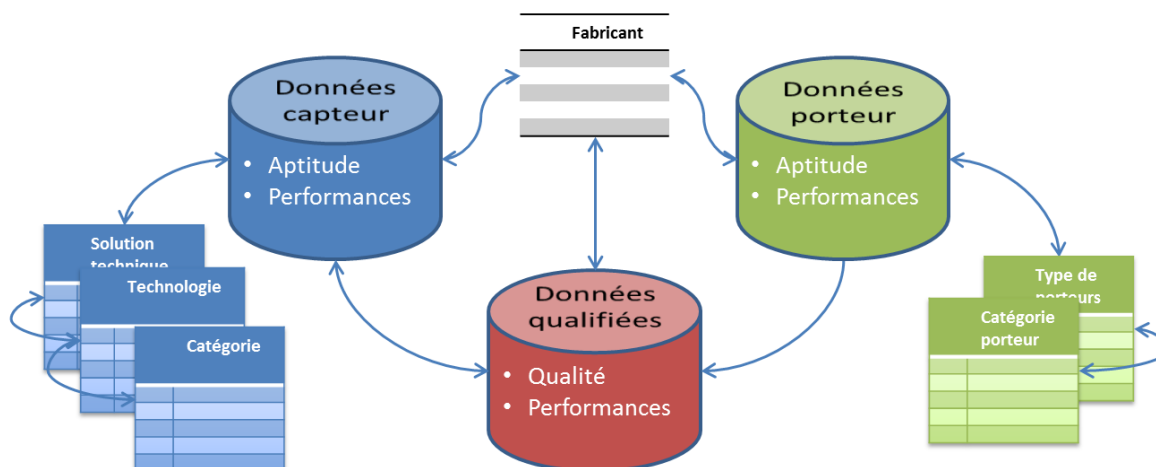


Figure 3.3 – Base de données des systèmes de numérisation

Les deux premières parties sont appelées données intrinsèques car elles sont disponibles sans phase d'évaluation du système ; ce sont essentiellement les données constructeur. En revanche, les données du capteur+porteur sont appelées données qualifiées car une étape de qualification du système est nécessaire ; les données qualifiées ne sont pas données par les fabricants.

Les données sont organisées en tables à différents niveaux afin d'éviter les redon-

dances et risques d'incohérence. Ainsi, toutes les propriétés relatives aux capteurs d'une même solution technique (laser-plan ou lumière structurée par exemple) sont renseignées dans la table « Solution technique » des capteurs et non répétées pour chaque capteur. Dans la table « Capteurs », l'information sur la solution technique est renseignée.

3.2 Base de données intrinsèques

La base de données intrinsèques regroupe des caractéristiques fournies par les fabricants, et qui permettent de qualifier l'aptitude² d'un système de numérisation pour l'acquisition d'une surface donnée d'une pièce mécanique à contrôler mais également ses performances³. Rappelons que l'aptitude a été définie comme la capacité intrinsèque du système à effectuer l'acquisition de la surface en fonction de caractéristiques physiques et géométriques de la pièce/surface et de l'échelle de numérisation. Quant aux performances, elles permettent de caractériser la capacité du système à atteindre l'objectif au moindre coût.

3.2.1 Données intrinsèques capteur

□ Données pour l'aptitude

Considérant la définition de l'aptitude, nous avons extrait parmi les données relatives à l'aptitude, les caractéristiques physiques et géométriques suivantes relatives à la surface, à la pièce, ainsi qu'aux spécifications :

- Flexibilité de la pièce à contrôler ;
- Accessibilité de la surface ;
- Échelle de la spécification à vérifier ;
- Format des données nécessaire à la vérification de la spécification.

Cette liste relative à l'aptitude est propre à l'application d'inspection 3D. Elle peut être complétée en fonction de l'application et/ou de la nature des spécifications à vérifier.

La base de données intrinsèques relatives aux capteurs permet donc de renseigner si un capteur peut numériser des pièces souples ou non. Typiquement les capteurs à contact seront à éviter dans le cas de pièces souples.

2. Aptitude : définition page 56

3. Performance : définition page 3

Concernant l'accessibilité d'une surface par un capteur donné. Cette donnée ne peut pas être écrite explicitement puisqu'une connaissance de la géométrie spécifique de la surface est nécessaire. Une étude au cas par cas est donc nécessaire. Néanmoins, l'accessibilité de la surface est associée à la technologie du capteur (triangulation, confocal, contact). Il est de ce fait impossible de numériser, à l'aide d'un capteur à triangulation, un cylindre intérieur pour lequel le rapport L/D est supérieur à un seuil qui dépend de l'angle de triangulation (cf Annexe H).

Enfin, la base de données permet de préciser si le capteur étudié est adapté pour des mesures micro-géométriques ou non ; il doit y avoir correspondance entre l'échelle des données fournies par le capteur, c'est-à-dire la résolution, et la nature de la spécification.

Comme nous l'avons évoqué, afin d'éviter les redondances certains de ces paramètres sont associés à la catégorie du capteur lorsque cela est possible. Prenons pour exemple la flexibilité de la pièce. Dans ce cas, seuls les capteurs sans contact peuvent acquérir des pièces souples sans déformation. Cette donnée est donc associée à la catégorie du capteur (contact, non contact).

□ Données pour les performances

Parmi les données intrinsèques, nous pouvons également citer les caractéristiques qui permettent de définir la vitesse d'acquisition de données. Ce sont donc des caractéristiques géométriques associées aux dimensions de la fenêtre de mesure (largeur FOV⁴, hauteur FOV), à la vitesse d'acquisition (nombre de points par seconde pts/s pour le capteur Kréon Zephyr KZ25 par exemple), ou encore le nombre de points par acquisition. Couplées aux données porteur, ces informations permettent d'établir le temps d'acquisition nécessaire à la numérisation d'une surface avec une densité surfacique donnée (cf paragraphe 3.3.2).

Un exemple de base de données intrinsèques capteur est proposé dans le tableau 3.1 regroupant différentes technologies et solutions techniques. Ces données étant les données fournies par les fabricants, elles ne sont pas nécessairement de même nature suivant les industriels ; certaines ne sont par ailleurs pas divulguées. Un certain nombre d'informations ne sont pas renseignées ici car inutiles pour notre étude mais peuvent être stockées dans la base de données pour différentes applications (justesse et répétabilité constructeur par exemple).

4. FOV : fenêtre de mesure (*Field Of View*)

Capteur	KZ25	LC60Dx	LJ-G200	G-Scan RX2	OptiNum-RE	ATOS cs 2M	CL2	TP2
Fabriquant	Kréon	Nikon	Keyence	Romer	Noomeo	GOM	Stil	Renishaw
Catégorie	Sans contact							contact
Technologie	Triangulation						Confocal	Déclenchement
Sol. technique	Laser-plan			Lumière structurée			Chromatique	Décl ^t statique
Format données*	Points 3D	Points 3D	Points 3D	Points 3D	Maillage 3D	Maillage 3D	Points 3D	Points 3D
Résolution	3 μm	60 μm	3 μm	100 μm	300 μm	21 μm	0.012 μm	N/A
Vitesse d'acqu.	30 000 pts/s	75 000 pts/s	200 000 pts/s	19 200 pts/s	500 000 pts/shoot	2 000 000 pts/shoot	1 000 pts/s	qq pts/s
Densité	1 000 pts/ligne	1 000 pts/ligne	800 pts/ligne	1 000 pts/ligne	500 000 pts/shoot	2 000 000 pts/shoot	N/A	N/A
Largeur FOV**	25 mm	60 mm	62 mm	110 mm	210 x 148,5 mm	520 x 520 mm	N/A	N/A
Hauteur FOV**	50 mm	60 mm	96 mm	98 mm	150 mm	750 mm	0,3 mm	N/A

* associé à un porteur adéquat.

** FOV : *Field Of View*

Tableau 3.1 – Base de données capteurs

Les case renseignées par N/A correspondent aux cases où l'information constructeur n'est pas connue ou non pertinente (largeur FOV pour un capteur 1D par exemple).

Il serait intéressant de considérer les propriétés de la surface pour l'aptitude. En effet, l'aptitude d'un capteur à numériser une surface brillante, absorbante ou poreuse pourrait être renseignée dans cette base de données afin de permettre de sélectionner uniquement des capteurs cohérents vis-à-vis de la pièce et de la spécification; les capteurs avec une caméra CCD sont en général très sensibles à ces paramètres de surface [ISH11]. De ce fait, un deuxième volet de perspectives au niveau des données capteur serait l'intégration de données de réglage afin d'utiliser le capteur dans des conditions optimales en fonction de la surface à acquérir. Les réglages sont cependant très différents d'un capteur à l'autre, même pour les capteurs de même technologie.

3.2.2 Données intrinsèques porteur

De la même manière que pour les capteurs, les données intrinsèques relatives aux porteurs permettent de réaliser l'identification des systèmes admissibles, en termes d'aptitude et de qualité. Les paramètres associés au cas de l'inspection 3D à prendre en compte pour l'identification des porteurs admissibles sont les suivants :

- Type d'inspection (*on-line*, *on-machine*, *off-line*);
- Volume de la pièce;
- Type de spécification à vérifier (micro-géométrie, macro-géométrie).

La catégorie de porteur est renseignée dans la base de données, ce qui permet de déterminer la capacité d'un porteur à réaliser l'inspection dans le contexte imposé. Une inspection *on-machine* ne peut par exemple être réalisée avec une MMT, la pièce devant rester sur la MOCN. Dans un second temps, le volume de travail du porteur est utile afin de vérifier la capacité à une numérisation complète de la pièce à contrôler. Enfin les informations sur la résolution des règles ou codeurs permettent de définir si un porteur est apte à la réalisation de mesures micro-géométriques ou macro-géométriques.

Toutes ces informations sont stockées dans la base de données porteur dont un extrait est donné par le tableau 3.2. De même que pour les capteurs, certaines informations ne sont pas délivrées par les fabricants, d'où les cases complétées d'un « ? ».

La vitesse maximale de déplacement permet par la suite de définir la vitesse de numérisation qui fait partie des critères de performance définis au paragraphe 3.3.2.

Nom du porteur	Seiv	MCAII-7axis	Sigma 2025	KR 30 HA
Fabriquant	Renault Automation	Nikon Metrology	Romer	KUKA
Type	MMT	Bras polyarticulé		Bras motorisé
Volume de travail	parallélépipède		portion de sphère	
— lxLxh ou r (mm)	2 000 x 1 000 x 1 000	1 800	2 500	2 000
Vitesse maximale	~100 mm/s	manuelle	manuelle	?
Résolution	0,2 μm	?	?	?

Tableau 3.2 – Base de données porteurs

3.3 Base de données systèmes qualifiés

Une fois qu'un capteur et un porteur ont été sélectionnés afin d'obtenir un système de numérisation, une étape de qualification des performances des systèmes de mesure optiques permet d'évaluer la qualité et les performances du système (QualiPSO, cf chapitre II).

Ces données sont classées en deux catégories :

- les données de qualité ;
- les données de performance.

Les données de qualité sont nécessaires à l'identification des systèmes de numérisation admissibles afin que le système sélectionné réponde aux contraintes de qualité liées à la spécification à vérifier. Les données de performances sont en revanche indispensables pour l'étape de sélection du système afin de minimiser le coût du contrôle de la pièce.

3.3.1 Données de qualité

Comme nous l'avons défini auparavant au chapitre I, la qualité d'un système est sa capacité à répondre au besoin en termes de bruit et de justesse. Ces deux aspects de la qualité ont été détaillés dans le chapitre II. Cependant d'autres critères pourraient être considérés.

Le **bruit de numérisation** représente l'erreur aléatoire essentiellement due aux parties optiques des capteurs sans contact, mais qu'il est nécessaire d'évaluer en considérant le porteur qui peut jouer un rôle important pour contrôler ce bruit. En effet, les principaux facteurs influents qu'il est possible de faire varier sont les configurations

capteur/pièce (angles et distances de numérisation) qui pourront être maîtrisées ou non en fonction du porteur. Le bruit de numérisation est influent pour toutes les spécifications à vérifier, mais est prépondérant pour la vérification de spécifications de forme, d'orientation ou d'état de surface pour lesquelles la justesse intervient peu, ainsi que pour les éléments de référence orientant pour les spécifications de localisation.

L'**erreur de justesse** est quant à elle associée à l'erreur systématique et dépend à la fois du capteur et du porteur, d'où l'impossibilité de dissocier les deux organes pour son évaluation et sa sélection. La justesse est importante dans le cadre de vérification de spécifications de localisation, pour l'élément tolérancé, ainsi que pour les éléments de référence positionnants.

L'évaluation de la qualité des systèmes de numérisation présentée au chapitre précédent a permis de déterminer des valeurs de bruit δ et de justesse e_t regroupées dans le tableau 3.3. Outre ces valeurs de bruit et justesse, l'évaluation a permis de déterminer des contraintes d'utilisation des systèmes de numérisation qui permettent de garantir ces valeurs de bruit et de justesse. Ces contraintes liées au respect de la qualité sont la profondeur de champ admissible pour le respect du bruit (Fdn , tableau 3.3, ligne 3), la profondeur de champ admissible pour le respect de la justesse (Fdt , tableau 3.3, ligne 4), ainsi que la plage de variation angulaire admissible (Ang , tableau 3.3, ligne 5). Ces données relatives à la qualité sont utilisées par la suite comme paramètres d'entrée de la fonction performance des systèmes de numérisation.

3.3.2 Données de performance

La performance d'un système a été définie comme étant sa capacité à donner le résultat optimal avec un coût minimal. De ce fait, les données relatives aux performances des systèmes permettent de sélectionner le système le moins coûteux pour la numérisation d'un objet donné. Les données prises en compte sont donc relatives à la vitesse d'acquisition.

Les données relatives à la vitesse d'acquisition sont divisées en deux catégories : les données qui correspondent à la vitesse de numérisation pour respecter un critère de complétude⁵ (Ds , tableau 3.3, ligne 6) et les données correspondant à la vitesse de numérisation pour assurer un critère de densité (Dsd , tableau 3.3, ligne 7). En effet,

5. La complétude caractérise le pourcentage de surface numérisée à partir d'un seuil de densité fixé permettant de distinguer les zones numérisées des trous de numérisation

	Capteur Porteur	KZ25 MMT	LC60Dx MMT	LC60Dx MCAII-7axis	TP2 MMT	CL2 MMT	ATOS CS2M Trépied	OptiNum-RE main	G-Scan RX2 Sigma 2025
Qual	Bruit δ (mm)	0,009	0,011	0,12	N/A	$3,66 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	0,061	0,28
	Justesse e_t (mm)	0,01	0,01	0,04	0,003	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,1	
Contr.	Fdn (mm)	120-145	95-115	95-155	0	11-11.4	450-1 200	400-550	124-222
	Fdt (mm)	140-160	110-145	95-155	0	11-11.4	450-1 200	400-550	124-222
	Ang (°)	0-20	35-60	-	-	-	-	-	-
Perf.	Ds (mm ² /s)	2 500	6 000	N/A	1 250	2 500	750 000	31 250	N/A
	Dsd (mm ² /s)	30 000/ ρ	75 000/ ρ	75 000/ ρ	1/ ρ	1 000/ ρ	2 000 000/ ρ	500 000/ ρ	19 200/ ρ

Tableau 3.3 – Base de données qualifiées

suivant les systèmes de numérisation utilisés, les temps d'acquisition sont très variables. L'utilisation d'un palpeur à déclenchement permet d'obtenir une densité relativement faible en un temps non négligeable (Figure 3.4a) alors que l'utilisation d'un capteur laser-plan sur le même porteur permet d'obtenir une densité de points plus importante en un temps relativement court (Figure 3.4b).

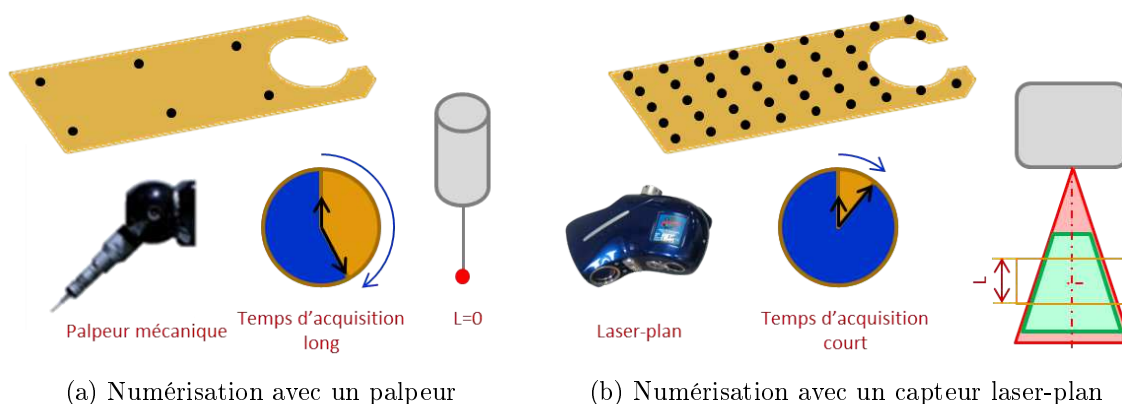


Figure 3.4 – Densité et temps d'acquisition avec différents capteurs

Pour le cas d'un critère de complétude, la vitesse de déplacement du porteur est prise en compte afin de déterminer le temps nécessaire à la numérisation d'une surface. Lorsque la densité est imposée, la vitesse d'acquisition du capteur détermine la vitesse d'avance à imposer au porteur. Ces données sont exprimées en mm^2/s , dans le cas où la densité est imposée, la valeur du tableau est à diviser par la densité attendue.

Ainsi en fonction de la spécification à contrôler, l'une ou l'autre de ces données est sélectionnée, associée aux données constructeurs, pour déterminer le système le plus performant au regard de la spécification à vérifier. Pour l'évaluation d'un défaut de forme ou d'une rugosité, la densité peut être imposée pour répondre au besoin, alors que dans le cas de l'évaluation d'un défaut d'orientation, la densité n'est pas un critère prépondérant, nous nous intéresserons donc plutôt à la complétude.

Les données de qualité et de performance constituent la base de données qualifiées représentées par le tableau 3.3.

4 Choix des systèmes de numérisation (A1) [AUD12]

Dans ce paragraphe, nous détaillons chacune des étapes proposées sur la figure 3.1. Nous avons choisi d'illustrer notre démarche au travers d'un exemple simple de contrôle

off-line de la pièce présentée sur la figure 3.5. Cette pièce est en acier mat. Nous considérons un ensemble de trois capteurs montés sur une même MMT : un capteur laser-plan (Zephyr KZ25), un capteur laser-plan (LC60Dx) et un palpeur mécanique (TP2), ainsi que le capteur LC60Dx monté sur un bras polyarticulé 7 axes (MCAII-7axis). Les caractéristiques qualifiées de ces quatre systèmes ont été renseignées dans la base de données proposée dans le tableau 3.3 (colonnes 1 à 4).

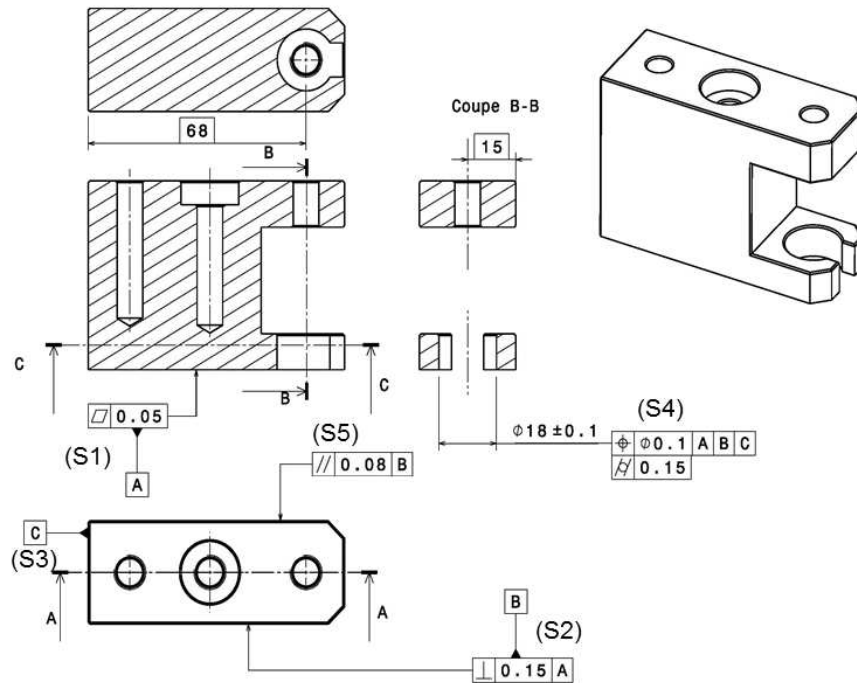


Figure 3.5 – Dessin de définition partiel de la pièce à contrôler

4.1 Partitionnement du modèle (A11)

L'étape de partitionnement du modèle consiste à isoler chacune des surfaces de la pièce et à y associer une incertitude de numérisation admissible. A partir du modèle CAO tolérancé de la pièce, toute surface élémentaire à laquelle est attachée une spécification est identifiée comme une surface à numériser. Les surfaces sont donc soit des surfaces tolérancées, soit des surfaces de référence. La décomposition est ainsi faite en surfaces élémentaires dont les types sont les types classiques de la métrologie 3D : plan, cylindre, sphère, cône et formes gauches. En fonction de la tolérance associée à la surface, une incertitude admissible de numérisation lui est associée. Les méthodes permettant de récupérer les surfaces d'un modèle CAO sont nombreuses, notamment à partir du format STEP. Le choix a été porté sur une décomposition en surfaces plutôt qu'en entité pour

des contraintes liées à la numérisation. En effet, la planification des trajectoires de numérisation pour l'acquisition de la pièce est réalisée surface par surface et non entité par entité.

En revanche associer une incertitude de numérisation admissible pour une surface à numériser reste une problématique à part entière. Mahmud *et al* proposent de définir l'incertitude admissible à partir de la donnée de l'intervalle de tolérance de la spécification. Celle-ci est définie à partir de la norme NF E02-204 [NFE02-204] aujourd'hui remplacée par la norme ISO 14253-1 [ISO14253-1] qui préconise qu'un résultat de mesure peut être accepté si la valeur mesurée est dans l'intervalle de tolérance IT restreint d'une valeur égale à l'incertitude élargie U de l'instrument de mesure. De ce fait il est admis que l'incertitude de l'instrument de mesure doit être inférieure à $\frac{IT}{8}$ afin que la zone d'incertitude sur le résultat de mesure reste de taille raisonnable devant l'intervalle de tolérance. De la même manière, Zhao *et al* utilisent comme critère une valeur de l'incertitude liée à la mesure inférieure à $\frac{IT}{5}$ ou $\frac{IT}{10}$, valeurs communément admises [ZHA12].

Nous nous sommes inspirés de cette approche dans la démarche proposée. Pour chacune des surfaces extraites, le type de spécification est déterminé dans un premier temps ainsi que l'appartenance ou non à un système de référence. Les types de spécifications que nous considérons sont : forme, position et orientation pour les spécifications macroscopiques, ainsi que les spécifications de rugosité surfaciques [ISO25178-2].

Pour chaque surface à numériser, l'incertitude admissible est alors évaluée considérant le plus petit intervalle de tolérance IT des spécifications associées cette surface. Prenons l'exemple de la surface S2, une spécification d'orthogonalité par rapport à A lui est associée avec un IT de 0,15. Cette surface est par ailleurs une surface de référence pour les spécifications de parallélisme de S5 avec un IT de 0,08 et de localisation de S4 avec un IT de 0,1. Pour la surface S2, l'incertitude admissible U_{ad} est donc évaluée à $U_{ad} = \frac{IT}{8} = \frac{0,08}{8} = 0,01$ mm.

A l'issue de cette activité, les informations sont stockées dans un tableau (exemple, tableau 3.4) qui recense les surfaces à numériser, les spécifications qui leurs correspondent ainsi que l'incertitude admissible qui en découle. Dans les colonnes « Spécification » et « Référence », un « 1 » est inscrit si la surface a une spécification du type concerné ou si elle est surface de référence pour une autre spécification. Dans la colonne U_{ad} l'incertitude admissible évaluée a été renseignée. Notons qu'à l'heure actuelle cette étape n'est pas automatisée, mais une étude à partir du modèle CAO tolérancé devrait permettre cette

automatisation.

Surface	Type de surface	Spécifications					Réf.	U_{ad} (mm)
		Forme	Pos.	Orient.	Dim.	Rugosité		
S1 (A)	Plan	1	0	0	0	0	1	$6,25 \cdot 10^{-3}$
S2 (B)	Plan	0	0	1	0	0	1	0,01
S3 (C)	Plan	0	0	0	0	0	1	$1,25 \cdot 10^{-2}$
S4	Cylindre int.	1	1	0	1	0	0	$1,25 \cdot 10^{-2}$
S5	Plan	0	0	1	0	0	0	0,01

Tableau 3.4 – Partition du modèle CAO et association de l’incertitude admissible

Une fois la pièce partitionnée et l’incertitude admissible évaluée, la sélection du système de numérisation est réalisée en deux étapes : l’identification des systèmes admissibles et l’évaluation des systèmes.

Les deux étapes de sélection des systèmes de numérisation sont basées sur le concept de complexité de numérisation inspiré des travaux de Kerbrat sur la complexité de fabrication [KER09].

4.2 Identification des systèmes admissibles (ASI) (A12)

À partir des travaux de Kerbrat sur la complexité de fabrication [KER09], nous proposons une méthode de sélection des systèmes de numérisation basée sur le principe de la complexité de numérisation en utilisant des indices de complexité. Afin de recenser les paramètres pouvant influencer sur cette complexité, le diagramme de cause-effet de la figure 3.6 a été dressé.

Les différents paramètres énoncés sur ce diagramme jouent un rôle pour l’identification des systèmes admissibles. Ce sont les paramètres à prendre en compte afin d’identifier l’admissibilité d’un système en termes d’aptitude et de qualité. L’étape suivante d’évaluation des systèmes est basée sur la performance et nécessite une connaissance des systèmes.

L’étape d’identification des systèmes admissibles permet de supprimer de la liste des systèmes à disposition, les systèmes non acceptables pour une surface donnée, tant en termes d’aptitude liée à la topologie de la surface et à la nature de la pièce, qu’en termes de qualité nécessaire au regard de l’incertitude admissible définie précédemment. Afin de mener à bien cette étape, trois paramètres importants sont à prendre en compte comme

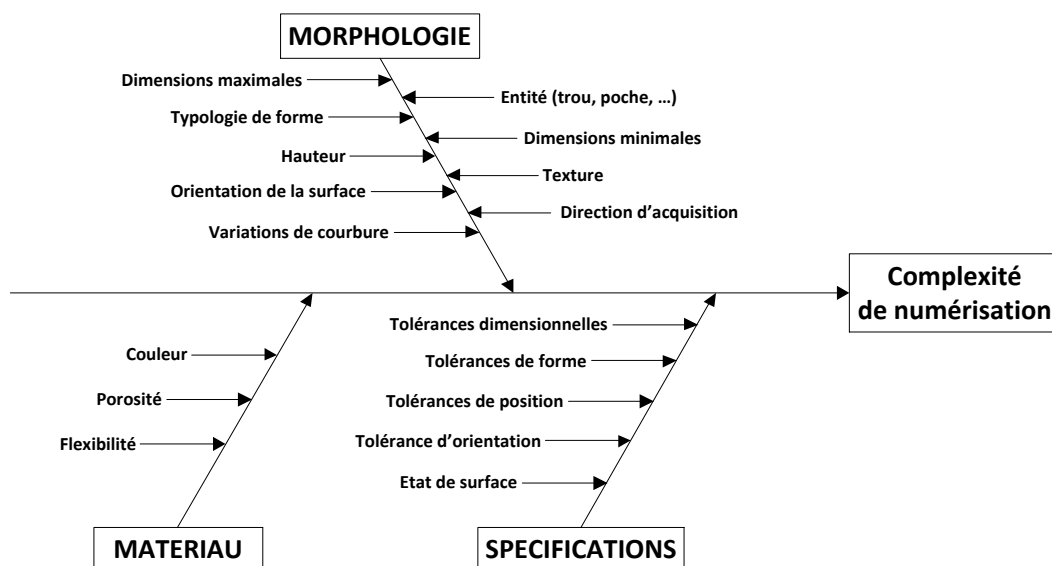


Figure 3.6 – Paramètres susceptibles d’influer sur la complexité de numérisation

le montre la figure 3.7 : le contexte industriel, la pièce à numériser et les spécifications à contrôler.

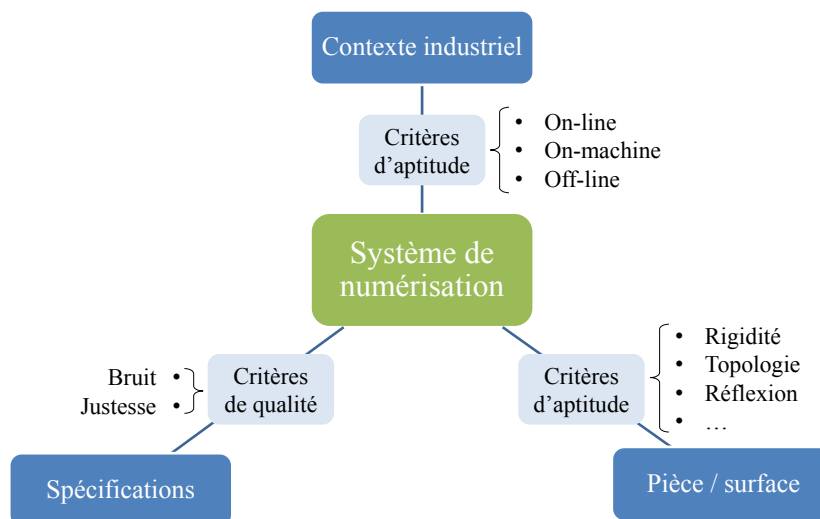


Figure 3.7 – Contexte de l’identification des systèmes admissibles

Le contexte industriel et la pièce concernent la partie aptitude du système alors que la spécification est liée directement à la qualité requise comme nous l’avons exposé au paragraphe précédent.

Dans la suite nous détaillons ces deux différentes phases de l’identification des systèmes admissibles. Ces dernières sont toutes les deux basées sur l’utilisation d’indices de

complexité tout-ou-rien (TOR), qui n'accepte donc que deux valeurs « 1 » ou « 0 », si le système est admissible ou non au sens d'un critère donné. Par la suite nous noterons $c_i \in \{0, 1\}$ pour les indices TOR et $c_i \in [0, 1]$ pour les indices pouvant prendre toutes les valeurs réelles dans l'intervalle $[0, 1]$.

4.2.1 Critères d'aptitude

À partir de la connaissance de la base de données générale et de la surface à numériser, des indices d'aptitude sont associés à chaque capteur et chaque porteur en fonction de leur aptitude à répondre à un besoin. Ces indices sont binaires, ils ne peuvent avoir que deux valeurs : « 1 » si le système est apte ou « 0 » si le système n'est pas apte. Le porteur est en général choisi en premier afin de répondre au besoin industriel (Figure 3.7). En effet, en ce qui concerne l'inspection en-ligne (*on-line Measurement*), les porteurs tels que les MOCN ou les bras robotisés peuvent généralement être préférés aux MMT et bras polyarticulés utilisés dans un contexte hors-ligne (*off-line measurement*). Ainsi des indices en ce sens ont été créés :

- c_{Off} pour l'inspection *off-line* ; l'indice vaut 1 pour les porteurs adaptés à l'inspection *off-line* (tous les porteurs à l'exception des MOCN et des robots) ;
- c_{OL} pour l'inspection *on-line* ; l'indice vaut 1 pour les porteurs adaptés à l'inspection *on-line* (tous les porteurs à l'exception des MOCN et des MMT non prévues pour le contrôle *on-line*) ;
- c_{OM} pour l'inspection *on-machine* ; l'indice vaut 1 pour l'ensemble des porteurs à l'exception des MMT qui ne permettent pas l'acquisition de la pièce sur la machine-outil.

Cet indice est donc associé directement au porteur, c'est un paramètre intrinsèque qui reste unique quelle que soit l'inspection à réaliser.

Après le choix des porteurs en fonction du type d'inspection, seuls les capteurs pouvant être utilisés avec les porteurs sélectionnés sont gardés. L'aptitude est alors évaluée au travers d'indices. Nous avons retenu :

- la flexibilité de la pièce (c_f) ;
- l'échelle de mesure (c_μ) ;
- l'accessibilité (c_a) ;
- le format des données (c_d).

Concernant la flexibilité de la pièce, l'indice c_f est choisi égal à « 1 » pour les capteurs sans contact et « 0 » pour les autres. Cet indice est intrinsèque à chaque catégorie de capteurs ; il n'est pas associé à un capteur dans la base de données, mais à la catégorie « contact » ou « sans contact ». Seuls les capteurs dont l'indice de flexibilité est cohérent avec la pièce à mesurer sont conservés.

L'indice de micro-géométrie c_μ est défini égal à 1 pour les capteurs de micro-géométrie uniquement. Ainsi un capteur avec une résolution de $0,1\mu\text{m}$ est sélectionné pour les spécifications de micro-géométrie, alors qu'un capteur laser-plan tel que le Zephyr KZ25 est sélectionné uniquement pour les macro-mesures.

L'accessibilité du capteur est ensuite étudiée (indice c_a). Les capteurs à triangulation sont en général non adaptés pour l'acquisition des surface difficilement accessibles comme les cylindres intérieurs. Contrairement aux indices présentés jusqu'à présent, l'indice d'accessibilité est dépendant du couple capteur/surface. Ainsi cette accessibilité ne peut être évaluée qu'en connaissance de la pièce à contrôler et des systèmes à disposition.

Système		KZ25_{MMT}	LC60Dx_{MMT}	LC60Dx_{bras}	TP2_{MMT}
Porteur	c_{OM}	0	0	1	0
	c_{OL}	0	0	1	0
	c_{Off}	1	1	1	1
Capteur	c_f	1	1	1	0
	c_μ	0	0	0	0
	c_a	----- Dépend de la surface -----			
	c_d	1	1	1	1

Tableau 3.5 – Indices de coût de numérisation évalués et critères de qualité

Finalement, seuls les capteurs qui fournissent un format de données en adéquation avec l'application choisie sont conservés (indice c_d). Nous n'utilisons que des systèmes qui fournissent directement des données 3D. Cet indice reste égal à « 1 » pour l'ensemble des spécifications géométriques et dimensionnelles pour ce type de systèmes de numérisation. L'utilisation de systèmes ne délivrant pas directement des données 3D, mais des images par exemple, engendrerait un indice $c_d = 0$ dans cet exemple.

Le tableau 3.5 recense les indices liés à l'aptitude des systèmes de l'exemple considéré. Comme nous l'avons précisé, l'indice d'accessibilité dépend de la surface. Pour notre exemple d'étude, l'accessibilité du cylindre intérieur n'est pas possible avec les capteurs laser-plan KZ25 et LC60Dx (cf Annexe H). En revanche, l'ensemble des surfaces planes sont accessibles avec tous les systèmes.

L'algorithme utilisé pour identifier les systèmes de numérisation capables au sens de l'aptitude définie ci-dessous est résumé sur l'algorithme 1. En dépit de leur simplicité de mise en œuvre, ces heuristiques permettent de sélectionner automatiquement dans la base de données intrinsèques, un jeu de systèmes de numérisation admissibles au sens de l'aptitude. Cette liste n'est probablement pas exhaustive et peut être enrichie pour l'application, voire pour d'autres applications.

Algorithme 1 Identification en fonction de l'aptitude

```

if Inspection on-line then
  if OMM then
    Conserver uniquement les porteurs tels que  $c_{OM} = 1$ 
  else
    Conserver uniquement les porteurs tels que  $c_{OL} = 1$ 
  end if
else
  Conserver les porteurs tels que  $c_{Off} = 1$ 
end if
Conserver les capteurs compatibles avec les porteurs
if Pièce rigide then
  Conserver les capteurs  $c_f = 1$ 
end if
if Mesure Micro-geometrique then
  Conserver les capteurs tels que  $c_\mu = 1$ 
else
  Conserver les capteurs tels que  $c_\mu = 0$ 
end if
Choisir les capteurs tels que  $c_a = 1$  (accessibilité)
Choisir les capteurs tels que  $c_d = 1$  (format des données)

```

Le résultat de l'identification des systèmes admissibles sur des critères d'aptitude est représenté par le tableau 3.6. Finalement pour l'exemple considéré, seuls les systèmes de numérisation à base de capteurs optiques ne sont pas admissibles pour la numérisation du cylindre intérieur au sens de l'aptitude. L'ensemble des autres surfaces peut *a priori* être numérisé par les différents systèmes.

4.2.2 Critères qualité

La seconde étape de l'identification des systèmes admissibles est basée sur des critères de qualité. En effet, une fois les systèmes aptes à l'acquisition de la pièce identifiés,

Surface	Type de surface	Systèmes								U_{ad} (mm)
		KZ25 _{MMT}		LC60Dx _{MMT}		LC60Dx _{bras}		TP2 _{MMT}		
		Apt.	Qual.	Apt.	Qual.	Apt.	Qual.	Apt.	Qual.	
S1 (A)	Plan	1		1		1		1		$6,25 \cdot 10^{-3}$
S2 (B)	Plan	1		1		1		1		0,01
S3 (C)	Plan	1		1		1		1		$1,25 \cdot 10^{-2}$
S4	Cyl. int.	0		0		0		1		$1,25 \cdot 10^{-2}$
S5	Plan	1		1		1		1		0,01

Tableau 3.6 – Résultat de l'identification des systèmes sur des critères d'aptitude

nous devons nous assurer que la qualité des données qu'ils fournissent est en adéquation à l'incertitude admissible. Deux indicateurs sont utilisés ici : δ_{sys} qui donne le bruit d'un système de numérisation et $e_{t,sys}$ qui correspond à l'erreur de justesse fournie par un système. La base de données qualifiée fait apparaître ces deux indicateurs pour chaque système obtenus selon la procédure QualiPSO. Par ailleurs, pour chaque surface à numériser, le bruit admissible (δ_{ad}) et la justesse admissible ($e_{t,ad}$) doivent être définis en fonction de la spécification à contrôler. Pour l'inspection d'une pièce mécanique, l'importance de chaque critère de qualité dépend de la nature de la spécification. En effet, pour une spécification de forme, la justesse joue un rôle mineur vis-à-vis du bruit de numérisation, alors que pour des spécifications de position, les deux critères sont importants.

Afin de ne sélectionner que les systèmes de numérisation qui répondent au besoin en termes de qualité, deux indices sont définis comme suit :

- $c_n \in \{0, 1\}$ traduit la capacité d'un système de numérisation à répondre aux besoins en termes de bruit (Équation 3.1).

$$c_n = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\delta_{sys}}{\delta_{ad}} \leq 1 \\ 0 & \text{if } \frac{\delta_{sys}}{\delta_{ad}} > 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

- $c_t \in \{0, 1\}$ traduit l'aptitude d'un système de numérisation à répondre aux exi-

gences en termes de justesse (Équation 3.2).

$$c_t = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{e_{t,sys}}{e_{t,ad}} \leq 1 \\ 0 & \text{if } \frac{e_{t,sys}}{e_{t,ad}} > 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

Finalement seuls les systèmes de numérisation pour lesquels le produit $c(n) \cdot c(t) = 1$ sont identifiés comme étant admissibles pour l'inspection de la pièce considérée. Pour l'exemple proposé, le tableau 3.7 illustre les indices liés à la qualité des quatre systèmes de numérisation à disposition.

Système	KZ25 _{MMT}	LC60Dx _{MMT}	LC60Dx _{bras}	TP2 _{MMT}
c_n	———— Dépend de la surface ————			
c_t	———— Dépend de la surface ————			
δ_{sys} (mm)	0,009	0,011	0,12	N/A
$e_{t,sys}$ (mm)	0,01	0,01	0,04	0,003

Tableau 3.7 – Indices de coût de numérisation évalués et critères de qualité

À partir de l'évaluation du bruit et de la justesse relatifs à chaque système, le tableau 3.8 recense les indices de bruit et de justesse pour chaque système et chaque surface pour laquelle l'incertitude admissible U_{ad} a été évaluée. Une fois la valeur de U_{ad} déterminée, $\delta_{ad} = U_{ad}$ et $e_{t,ad} = U_{ad}$, mais $e_{t,ad}$ n'a d'intérêt que pour les spécifications de localisation et les spécifications dimensionnelles, les autres ne faisant pas intervenir la justesse.

Le système **LC60Dx**_{MMT} est à la limite de l'incertitude admissible. En effet, le bruit étant de 0,011 mm, il ne peut être utilisé pour les spécifications dont l'intervalle de tolérance est inférieur à 0,08 mm. De ce fait, $c_n(\text{LC60Dx}_{MMT}) = 0$ pour les surfaces S1, S2 et S5.

Dans cet exemple, le système constitué d'un bras polyarticulé ne répond pas aux contraintes de qualité (cf Tableau 3.3), d'où la colonne de « 0 ». De même, les systèmes **KZ25**_{MMT} et **LC60Dx**_{MMT}, compte tenu de la qualité des données qu'ils fournissent, ne sont pas admissibles pour l'acquisition de la surface S1 pour laquelle l'incertitude

Surface	Type de surface	Systèmes								U_{ad} (mm)
		KZ25 _{MMT}		LC60Dx _{MMT}		LC60Dx _{bras}		TP2 _{MMT}		
		c_n	c_t	c_n	c_t	c_n	c_t	c_n	c_t	
S1 (A)	Plan	0	0	0	0	0	0	1	1	$6,25 \cdot 10^{-3}$
S2 (B)	Plan	1	1	0	1	0	0	1	1	0,01
S3 (C)	Plan	1	1	1	1	0	0	1	1	$1,25 \cdot 10^{-2}$
S4	Cyl. int.	-	-	-	-	-	-	1	1	$1,25 \cdot 10^{-2}$
S5	Plan	1	1	0	1	0	0	1	1	0,01

Tableau 3.8 – Indices de bruit et de justesse

admissible est faible ($6,25 \cdot 10^{-3}$ mm).

Enfin le palpeur mécanique TP2 est admissible pour l'ensemble des surfaces.

Partant de ces résultats, le tableau 3.9 donne la liste des systèmes admissibles pour l'exemple présenté, un système étant admissible si un « 1 » est inscrit dans les deux cases « Apt. » et « Qual ». La colonne relative à la qualité est remplie par un « 1 » si δ_{sys} et $e_{t,sys}$ sont inférieurs à U_{ad} conformément aux conditions explicitées par les équations 3.1 et 3.2.

Surface	Type de surface	Systèmes								U_{ad} (mm)
		KZ25 _{MMT}		LC60Dx _{MMT}		LC60Dx _{bras}		TP2 _{MMT}		
		Apt.	Qual	Apt.	Qual	Apt.	Qual	Apt.	Qual	
S1 (A)	Plan	1	0	1	0	1	0	1	1	$6,25 \cdot 10^{-3}$
S2 (B)	Plan	1	1	1	0	1	0	1	1	0,01
S3 (C)	Plan	1	1	1	1	1	0	1	1	$1,25 \cdot 10^{-2}$
S4	Cyl. int.	0	-	0	-	0	-	1	1	$1,25 \cdot 10^{-2}$
S5	Plan	1	1	1	0	1	0	1	1	0,01

Tableau 3.9 – Résultat de l'identification des systèmes admissibles

La dernière étape d'évaluation des systèmes permet de choisir entre les différents capteurs admissibles pour chaque surface celui dont l'utilisation est la moins coûteuse.

4.3 Sélection du système et configuration (A13)

Cette dernière étape est basée sur des critères de performance des systèmes de numérisation et permet, à partir du jeu de systèmes admissibles identifié, de déterminer le système le plus performant pour réaliser l'acquisition de chacune des surfaces de la pièce à contrôler. Elle permet entre autres, de déterminer les conditions d'utilisation du système sélectionné (configuration capteur/pièce).

4.3.1 Critères de performance

À cette étape, les capteurs à triangulation sont préférés aux palpeurs mécaniques lorsque cela est possible. En effet, les capteurs optiques délivrent en général une surface numérisée avec une grande densité en un minimum de temps. Cependant, une distinction peut être faite en fonction des exigences. En effet, d'un côté seule la complétude peut être nécessaire, et d'un autre côté la densité peut être imposée.

Ainsi les capteurs sont classés en fonction de la densité de données et du temps nécessaire à l'obtention de cette densité. Cinq catégories permettent de trier les capteurs :

- les palpeurs mécaniques ;
- les palpeurs dynamiques ;
- les capteurs confocaux et laser-ligne ;
- les capteurs laser-plan ;
- les capteurs à lumière structurée.

Concernant les palpeurs mécaniques, en dépit de la grande qualité des données délivrées, ces capteurs ont un coût important en termes de temps de numérisation.

Les palpeurs dynamiques, comme les capteurs confocaux et les capteurs laser-lignes, permettent de collecter des milliers de points par seconde, la vitesse de numérisation est donnée par le porteur. La densité obtenue est très grande dans la direction de numérisation, alors qu'un très long temps d'acquisition est nécessaire à l'obtention d'une densité importante dans la direction perpendiculaire à l'avance.

Pour les capteurs laser-plan, le temps de numérisation est donné par le porteur. Lorsque la densité est imposée, la fréquence d'acquisition étant fixée, la vitesse de déplacement est adaptée pour répondre aux besoins en termes de densité.

Enfin en ce qui concerne les capteurs à lumière structurée, le temps d'acquisition est quasi-instantané, il correspond au temps nécessaire à la prise d'une photo.

En prenant en compte ces hypothèses, pour le temps d'acquisition, les capteurs à lumière structurée sont préférés car ils délivrent un très grand nombres de points en un minimum de temps. Cependant, la rapidité d'acquisition variant souvent de manière inversement proportionnelle à la qualité des données acquises, ces systèmes sont en général éliminés lors de la phase d'identification des systèmes admissibles pour les spécifications qui nécessitent une grande qualité. Néanmoins, pour certaines applications, les systèmes « rapides » peuvent être de qualité suffisante [ZUQ12]. Ainsi, après les capteurs à lumière structurée, les capteurs laser-plan sont choisis, puis les capteurs confocaux, laser-ligne ou palpeurs dynamiques et enfin les palpeurs mécaniques. Afin de résoudre ce problème plus formellement, une fonction coût à minimiser a été proposée pour sélectionner le système le plus performant.

4.3.2 Fonction coût de numérisation

Dans le but de formaliser le problème, mais aussi pour choisir entre deux capteurs de la même catégorie, nous proposons une fonction coût de numérisation qui prend en compte les critères de vitesse et de complexité. La fonction coût proposée est constituée de cinq termes appelés indices de coût (CI) :

- l'indice de coût lié à la vitesse de numérisation pour un critère de complétude
($c_{Ds} \in [0, 1]$);
- l'indice de coût lié à la vitesse de numérisation pour un critère de densité
($c_{Dsd} \in [0, 1]$);
- l'indice de coût lié à la profondeur de champ pour un critère de bruit
($c_{Fdn} \in [0, 1]$);
- l'indice de coût lié à la profondeur de champ pour un critère de justesse
($c_{Fdt} \in [0, 1]$);
- l'indice de coût lié à la plage de variation de l'angle de numérisation
($c_{Ang} \in [0, 1]$);

Chaque indice est calculé comme le ratio entre la performance du capteur considéré et la meilleure performance des systèmes admissibles étudiés. Ainsi pour le capteur k , l'indice de coût relatif à la vitesse de numérisation pour un critère de complétude est défini par l'équation 3.3.

$$c_{Ds}(k) = \frac{Ds(k)}{\max_i Ds(i)} \quad (3.3)$$

où $Ds(k)$ est la vitesse de numérisation du capteur k en mm^2/s . De la même manière l'indice de coût lié à la densité est défini par l'équation 3.4.

$$c_{Dsd}(k) = \frac{Dsd(k)}{\max_i Dsd(i)} \quad (3.4)$$

où $Dsd(k)$ est la vitesse de numérisation en mm^2/s et correspond à la fréquence d'acquisition du capteur en pts/s divisée par la densité imposée en pts/mm^2 . Comme la densité est imposée pour le choix du système, l'indice de coût peut directement être évalué à partir des fréquences d'acquisition. L'indice de coût lié à la profondeur de champ pour un critère de bruit est défini par l'équation 3.5.

$$c_{Fdn}(k) = \frac{Fdn(k)}{\max_i Fdn(i)} \quad (3.5)$$

où $Fdn(k)$ est la profondeur de champ du capteur relatif au système k qui permet de satisfaire le critère de bruit de numérisation. L'indice de coût relatif à la profondeur de champ pour satisfaire le critère de justesse est défini par l'équation 3.6.

$$c_{Fdt}(k) = \frac{Fdt(k)}{\max_i Fdt(i)} \quad (3.6)$$

où $Fdt(k)$ est la profondeur de champ du capteur lié au système k qui permet de satisfaire le critère de justesse de mesure. Enfin l'indice de coût lié à la plage de variation de l'angle de numérisation est défini par l'équation 3.7.

$$c_{Ang}(k) = \frac{Ang(k)}{\max_i Ang(i)} \quad (3.7)$$

où $Ang(k)$ est la plage de variation de l'angle qui assure une qualité suffisante au regard de la spécification à contrôler.

Ces trois derniers indices sont des indices de complexité. Plus la profondeur de champ du système de numérisation est grande et plus il est facile de planifier les trajectoires de numérisation. De la même manière plus la plage de variation de l'angle de numérisation est grande, moins il y a de contraintes. Les deux indices relatifs à la vitesse de numérisation sont eux liés aux performances. L'ensemble de ces indices permet de minimiser le coût de numérisation en maximisant l'indice de performance global $c(k)$ (k représentant

le système de numérisation) défini par l'équation 3.8.

$$c(k) = \sum_{i \in Ds, Dsd, Fdn, Fdt, Ang} p_i \cdot c_i(k) \quad (3.8)$$

où p_i est le poids de l'indice c_i , $i \in Ds, Dsd, Fdn, Fdt, Ang$ et $\sum_i p_i = 1$. Cette fonction de pondération est à déterminer en fonction de la spécification à contrôler.

À titre d'exemple, une spécification de forme est plus sensible au bruit qu'à la justesse ; dans ce cas l'indice p_{Fdt} relatif à la justesse est choisi égal à 0 car non influent. Nous proposons une pondération pour chaque type de spécification géométrique, dimensionnelle et de rugosité de la norme ISO GPS, ainsi que pour les références orientantes et positionnantes (Tableau 3.10), la méthode proposée étant appliquée à la métrologie 3D. Il sera néanmoins possible de définir la pondération pour l'évaluation de caractéristiques géométriques différentes (jeux, affleurements, courbures, etc.) en prenant en compte le fait que la justesse soit importante ($p_{Fdt} = 1$) ou que la densité soit à imposer ($p_{Dsd} = 1$ et $p_{Ds} = 0$).

	Forme	Pos.	Orient.	Dim.	Rugo.	Référence	
						orient.	pos.
p_{Ds}	0	1	1	1	0	1	1
p_{Dsd}	1	0	0	0	1	0	0
p_{Fdn}	1	1	1	1	1	1	1
p_{Fdt}	0	1	0	1	0	0	1
p_{Ang}	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 3.10 – Pondérations relatives suggérées pour les spécification ISO GPS

Les pondérations proposées dans le tableau 3.10 sont à diviser par la somme des pondérations de façon à obtenir la pondération relative à insérer dans la fonction coût :

$$p_i = \frac{p_i}{\sum_j p_j}$$

Notons que pour l'acquisition de l'ensemble des surfaces relatives à une même spécification à vérifier, il est indispensable d'utiliser un seul posage de la pièce et un seul repère de mesure. Ainsi, une surface tolérancée et une surface de référence pour la même spécification ne peuvent pas être numérisées d'une part avec un bras polyarticulé qui a

son propre repère de mesure et d'autre part avec une MMT qui possède un repère de mesure différent. Cette notion devrait être intégrée dans la fonction coût mais n'a pas été implémentée pour le moment. En effet, l'optimisation de la fonction coût proposée est une optimisation locale pour chaque surface. Une optimisation globale permettant de minimiser en plus les coûts de changement de système et de déplacement de la pièce permettrait de palier ce problème. Ceci n'a pas été mis en place à l'heure actuelle, il faudrait dans un premier temps évaluer les coûts de changement de système et de pose que nous n'avons pas été en mesure de réaliser. Le coût de changement dépend d'une part du temps nécessaire à la réalisation de ce changement, et d'autre part au coût de mise en cohérence des données acquises avec les différents systèmes. Une évaluation des temps de cycle avec les différents systèmes permettrait d'évaluer le coût en termes de temps. Quant au coût lié au recalage des données, celui-ci pourrait être négligé car la mise en correspondance des différents nuages peut être réalisée en temps masqué, dans le cas où le résultat n'influe pas sur la phase de fabrication suivante sur la chaîne de production. Ce coût est donc directement dépendant des deux systèmes utilisés et une étude générique ne paraît pas réalisable. Seule une étude au cas par cas semblerait convenir.

4.3.3 Exemple d'application

Pour l'exemple d'application que nous suivons, le tableau 3.11 reprend une partie des données qualifiées de la base de données et donne les indices de complexité évalués à partir des définitions données dans le paragraphe précédent. Les indices dépendant de la surface et des spécifications n'ont pas été renseignés ici (c_a , c_n , c_t).

À partir des différents indices de performance évalués, l'indice de performance globale peut être calculé pour chaque surface avec les pondérations correspondantes. Ainsi la surface S1, pour laquelle une spécification de forme est associée (planéité) et qui est référence orientante pour différentes spécifications, n'a pas de contrainte liée à la justesse. L'indice de performance globale d'un système k pour cette surface est donc donné par l'équation 3.9.

$$c_{S1}(k) = \frac{1}{3}(c_{Dsd} + c_{Fdn} + c_{Ang}) \quad (3.9)$$

Les pondérations pour chaque surface sont données dans le tableau 3.12.

Les indices évalués à partir de ces pondérations sont retranscrits dans les colonnes $c(k)$ du tableau 3.13 qui reprend les différentes sélections (aptitude, qualité et perfor-

		Système	KZ25 _{MMT}	LC60Dx _{MMT}	LC60Dx _{bras}	TP2 _{MMT}	
Base de données	Qual	bruit* δ (mm)	0,009	0,011	0,12	N/A	
		Justesse* e_t (mm)	0,01	0,01	0,04	0,003	
	Perf	Ds (mm ² /s)	2 500	6 000	6 000	1 250	
		Dsd (mm ² /s)	30 000/ ρ	75 000/ ρ	75 000/ ρ	1/ ρ	
Indices de complexité	Aptitude	Porteur	c_{OM}	0	0	1	0
			c_{OL}	1	1	1	1
			c_{Off}	1	1	1	1
	Capteur	c_f	1	1	1	0	
		c_μ	0	0	0	0	
		c_d	1	1	1	1	
	Performance	Système	c_{Fdn}	0,42	0,33	1	0
			c_{Fdt}	0,33	0,58	1	0
			c_{Ang}	0,22	0,28	1	1
			c_{Ds}	0,42	1	1	0,21
c_{Dsd}			0,4	1	1	$1,33 \cdot 10^{-5}$	

*pour une plage de configurations capteur/pièce donnée (cf QualiPSO - chapitre II)

Tableau 3.11 – Données qualifiées et indices de coût pour l'exemple traité

	S1 (A)	S2 (B)	S3 (C)	S4	S5
p_{Ds}	0	1	1	0	1
p_{Dsd}	1	0	0	1	0
p_{Fdn}	1	1	1	1	1
p_{Fdt}	0	1	1	1	0
p_{Ang}	1	1	1	1	1

Tableau 3.12 – Pondérations suggérées pour les spécification ISO GPS

mance) et donne donc le système de numérisation sélectionné pour chaque surface à numériser.

Surface	Système											
	KZ25 _{MMT}			LC60Dx _{MMT}			LC60Dx _{bras}			TP2 _{MMT}		
	Apt.	Qual	$c(k)$	Apt.	Qual	$c(k)$	Apt.	Qual	$c(k)$	Apt.	Qual	$c(k)$
S1 (A)	1	0	-	1	0	-	1	0	-	1	1	0.33
S2 (B)	1	1	0.35	1	0	-	1	0	-	1	1	0.30
S3 (C)	1	1	0.35	1	1	0.55	1	0	-	1	1	0.30
S4	0	-	-	0	-	-	0	-	-	1	1	0.30
S5	1	1	0.35	1	1	-	1	0	-	1	1	0.33

Tableau 3.13 – Résultat de la sélection des systèmes de numérisation

Les cases vertes représentent le système admissible le moins coûteux pour l'application donné, les cases orange représentent les systèmes admissibles et les cases rouge les systèmes non admissibles.

Dans cet exemple le système LC60Dx_{MMT} est suggéré pour être utilisé uniquement pour l'acquisition de la surface S3. Ce choix ne semble pas judicieux d'un point de vue global. En effet, l'étude est menée localement, surface par surface et le système le moins coûteux est sélectionné relativement à une surface.

4.4 Implémentation logicielle

À l'heure actuelle, nous avons mis en place toute la structure nécessaire à l'implémentation logicielle permettant d'automatiser l'ensemble du processus (Figure 3.8). À partir des données d'entrée, le modèle CAO tolérancé et la base de données, l'outil d'aide à la sélection de systèmes de numérisation D2Stool (*Digitizing System Selection tool*) renvoie les systèmes de numérisation admissibles avec un focus sur le système de numérisation le moins coûteux, au sens du temps et de la complexité de numérisation. Pour arriver aux informations en sortie, l'outil récupère les informations de la CAO et calcule les U_{ad} , incertitude admissible pour chacune des surfaces à numériser. La base de données est ensuite interrogée afin de réaliser l'identification des systèmes admissibles (ASI). Les informations récupérées permettent le calcul des indices de coût qui donnent le système de numérisation le moins coûteux pour chaque surface. Le choix final est laissé à l'utili-

sateur qui choisit l'ensemble des systèmes de numérisation pour la numérisation globale de la pièce. C'est à ce moment que le coût de changement de système est pris en compte, ce qui pourrait être automatisé à l'avenir.

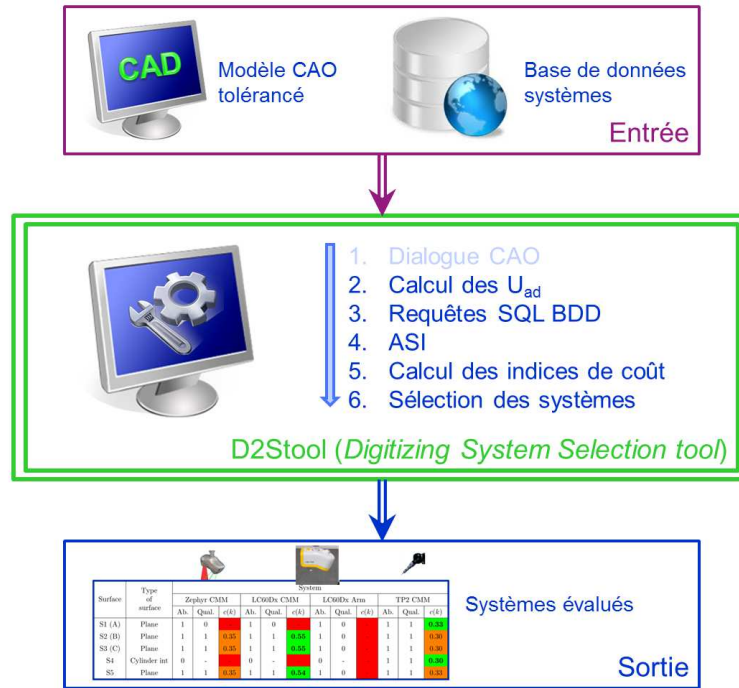


Figure 3.8 – Implémentation logicielle de l'outil d'aide à la sélection des systèmes de numérisation

La première étape du processus qui consiste à récupérer les surfaces et les spécifications depuis le modèle CAO n'est pas implémentée (couleur bleu clair sur la figure). Les informations sont inscrites manuellement dans un tableur. L'automatisation de cette partie représente une problématique purement technique, il est nécessaire de trouver un format d'échange de données commun entre le modèleur CAO et le tableur utilisé. Notons que CATIA V5 permet le dialogue VBA de même que le tableur Microsoft Excel, le lien entre ces deux logiciels constitue donc l'une des perspectives techniques de ces travaux. Il sera possible à partir de là de récupérer en automatique les géométries pièces ainsi que les spécifications présentes dans le modèle CAO tolérancé. Le calcul des U_{ad} qui découle directement des informations récupérées à partir du fichier CAO est actuellement réalisé à la main. L'identification de l'intervalle de tolérance le plus petit n'étant pas une opération longue, nous n'avons pas automatisé cette partie qui le sera lorsque les informations CAO seront rapatriées de manière logicielle.

La base de données a été implémentée à l'aide du logiciel PHPMyAdmin 3.4.9 et est interrogée à l'aide de requêtes SQL. La structure de la base de données, organisée

en différentes tables, est illustrée sur la figure 3.9. L'entrée dans la base de données d'un nouveau système est manuelle, nous pourrions néanmoins imaginer une inscription automatique des données qualifiées obtenues à partir de la mise en œuvre du protocole QualiPSO.

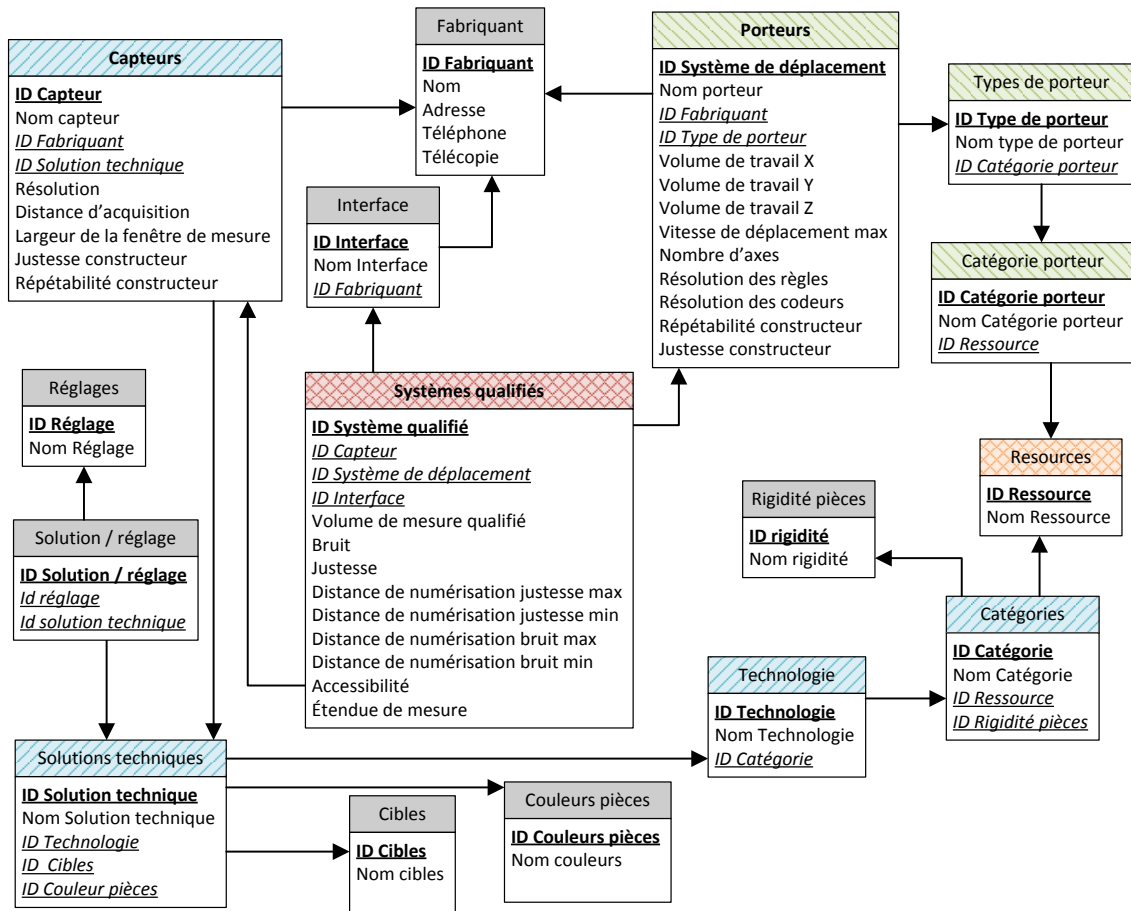


Figure 3.9 – Organisation de la base de données

La classification des systèmes de numérisation présentée en figure 3.2 permet de renseigner les informations à différents niveaux. La catégorie du capteur, qui est utilisée pour la sélection en fonction de la flexibilité de la pièce, est par exemple définie dans une table à laquelle chaque capteur fait référence (Figure 3.9). Cette structuration permet de ne pas introduire d'informations redondantes et de minimiser les risques d'erreur de saisie en diminuant le nombre d'informations à entrer pour un nouveau capteur.

La base de données regroupe volontairement beaucoup d'informations, plus que nécessaire pour notre application, ceci dans le but d'être utilisée dans le futur pour différents besoins, par d'autres utilisateurs.

Les requêtes permettant d'interroger la base de données ont été développées, elles

peuvent être générées automatiquement à partir d'une macro associée au tableur. Un exemple de requête permettant de sélectionner l'ensemble des systèmes dont la justesse qualifiée est inférieure à 0,05 mm est donné ci-dessous.

```

1 SELECT A1.'Nom capteur' , A3.'Nom porteur' , A4.'Nom Interface'
2 FROM 'systemes d'acquisition' A1, 'systemes qualifiés' A2, '
   systemes de déplacement' A3, 'interface' A4
3 WHERE A1.'Id Capteur' = A2.'Id capteur'
4 AND A3.'Id Systeme de déplacement' = A2.'Id porteur'
5 AND A4.'Id Interface' = A2.'Id Interface'
6 AND A2.'justesse qualifiée' < 0.05
7 AND A2.'Bruit surface mate' < 0.05
8 LIMIT 0 , 30

```

Cette requête fournit les noms des capteurs et porteurs correspondants, ainsi que les valeurs de bruit et justesse (Tableau 3.14). Toutes les informations utiles à l'identification des systèmes admissibles et à la sélection des systèmes étant stockées dans la base de données, il est possible d'interroger cette dernière pour ne récupérer que les systèmes qui répondent aux critères demandés.

Nom capteur	Nom porteur	Nom Interface	Bruit surface mate	justesse qualifiée
ZephyrKZ25	SEIV Renault	PH10	0.009	0.01
ATOS CS 2M	trépied	Pas d'interface	0.0051	0.0034
TP2	SEIV Renault	PH10	0	0.003
CL2	SEIV Renault	interface dediee	0.0000366	0.00045

Tableau 3.14 – Résultat de la requête pour l'ensemble des systèmes de notre base de données

À partir des informations récupérées dans la base de données lors de l'identification des systèmes admissibles, la requête permet d'obtenir également les données intrinsèques nécessaires à la sélection du système. Ces informations sont inscrites dans le tableur afin de réaliser le calcul des indices de coût, et ainsi d'identifier le système pour lequel le coût est minimal pour chacune des surfaces.

5 Conclusion

À partir d'un ensemble de systèmes de numérisation disponibles, qualifiés à l'aide du protocole QualiPSO présenté au chapitre II, ainsi que d'une pièce mécanique à contrôler et de son modèle tolérancé, nous avons proposé une approche dans le cadre de l'inspection 3D automatique multi-systèmes, pour la sélection du meilleur système de numérisation en termes de qualité (bruit, justesse) et de performances (vitesse de numérisation) pour chacune des surfaces à numériser.

La sélection du système est réalisée en deux parties : l'identification des systèmes admissibles d'une part, et la sélection du système d'autre part. L'identification des systèmes admissibles utilise des données d'aptitude (flexibilité pièce, accessibilité, échelle de mesure, etc.) ainsi que des données de qualité (bruit et justesse) afin de ne retenir que les systèmes admissibles. La sélection du système est ensuite réalisée par la minimisation d'une fonction coût de numérisation faisant intervenir des indices de coût prenant en compte la vitesse de numérisation (en imposant ou non une densité) et la complexité de numérisation (taille de la fenêtre de mesure). Cette étape devrait par la suite être complétée par l'interprétation d'indices de coût liés au changement de système de numérisation entre les acquisitions deux surfaces ou encore du changement de posage de la pièce.

Toutes les informations liées à la qualité et aux performances des systèmes de numérisation qualifiés sont stockées dans une base de données. Cette base organisée en différentes tables contient des caractéristiques intrinsèques données généralement directement par les différents fabricants, ainsi que des données qualifiées issues de la qualification des systèmes. L'organisation choisie permet d'éviter les redondances d'informations.

Nous avons donc proposé un processus qui permet de sélectionner notamment des systèmes de mesure sans contact lorsque cela est possible. Cependant les données fournies par ces systèmes ne peuvent généralement pas être utilisées directement et nécessitent un post-traitement. Le chapitre suivant présente l'étape de post-traitement et se focalise particulièrement sur la problématique du lissage des données bruitées.

Chapitre IV

TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES

Sommaire

1	Introduction	160
2	Recalage	161
2.1	Recalage global	163
2.2	Recalage local	165
2.3	Cartographie des écarts	169
3	Segmentation	170
4	Filtrage	173
4.1	Nécessité de filtrage	173
4.2	Méthodes de filtrage	178
4.3	Filtrage ondulatoire des données 3D	179
4.4	synthèse	185
5	Métriologie d'une pièce par capteur laser-plan	185
5.1	Segmentation	187
5.2	Filtrage	188
5.2.1	Spécification de forme	188
5.2.2	Spécification d'orientation	190
5.3	Synthèse	191
6	Conclusion	192

1 Introduction

Comme nous l'avons vu au chapitre I le traitement des données acquises est une des trois problématiques majeures de l'inspection 3D multi-systèmes. Au paragraphe 4 de ce chapitre, nous avons mis en avant le fait que les données acquises par les capteurs optiques sont en général fortement bruitées, de densité variable et incomplètes. Par ailleurs l'acquisition est réalisée de manière globale, le nuage de points obtenu est donc souvent représentatif d'un ensemble de surfaces non dissociées. Enfin, en acquisition multi-systèmes, multi-configurations, les acquisitions peuvent donner lieu à des nuages de points exprimés dans des repères différents. Ainsi les données brutes de numérisation sont rarement exploitables pour l'évaluation de caractéristiques géométriques sans opération de traitement, en particulier pour les applications de métrologie. De ce fait nous avons décomposé l'activité A4 de notre approche pour l'inspection 3D automatique multi-systèmes (Figure 1.42) en cinq sous-activités (Figure 4.1) :

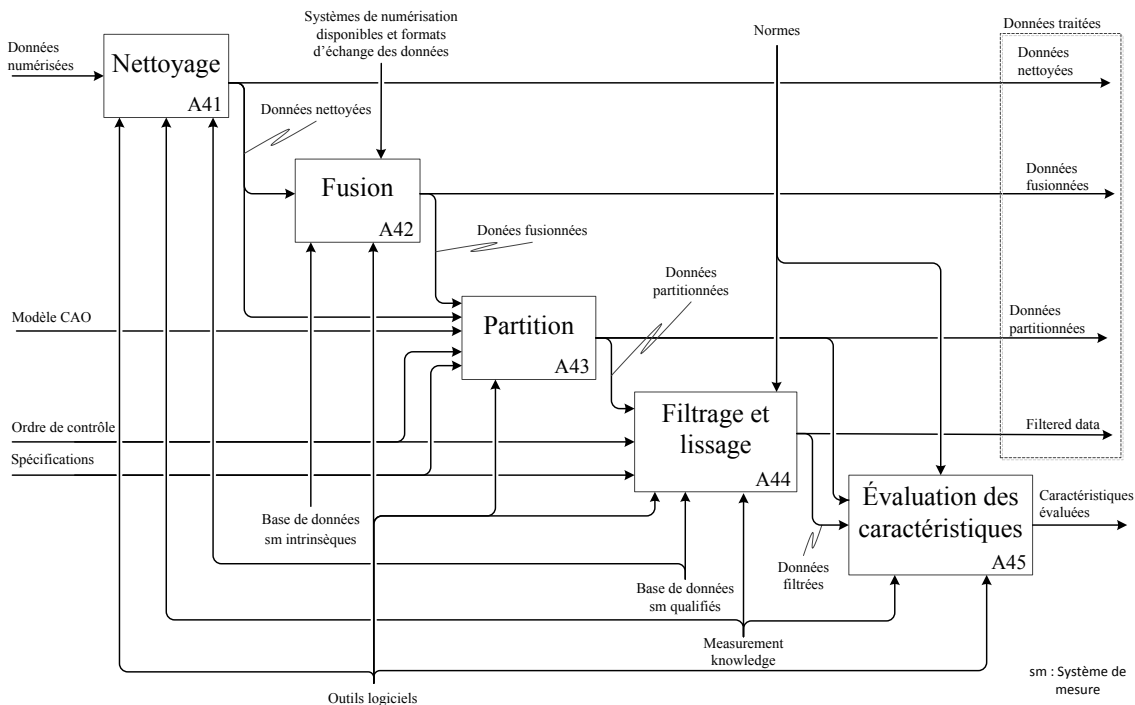


Figure 4.1 – SADT niveau A4 : Traitement et analyse des données

- Nettoyage ; consiste à retirer les données numérisées aberrantes ;
- Fusion ; permet de recalibrer et de fusionner les données provenant de différents systèmes de numérisation et/ou différentes configurations de numérisation [ZHA10] ;
- Partition ; réalise le partitionnement (ou la segmentation) des données en sous-

ensembles correspondant à chaque surface élémentaire afin que chacune d'elles soit traitée séparément [DIG10];

- Filtrage et lissage; élimine le bruit de numérisation et lisse les données [AUD11, AUD12a];
- Évaluation des caractéristiques; réalise l'évaluation des grandeurs correspondant aux spécifications géométriques à vérifier.

Dans la suite de ce chapitre nous portons une attention particulière au recalage des données, à la segmentation ainsi qu'au filtrage des données, qui représentent des activités indispensables dans le contexte d'évaluation des défauts des pièces numérisées avec des capteurs optiques, en métrologie 3D (Figure 4.2). Nous présentons en particulier une méthode de lissage des données basée sur le concept de longueur d'onde de défauts. Cette méthode conduit à un filtrage du bruit, permettant ainsi l'évaluation de grandeurs géométriques associées aux spécifications.

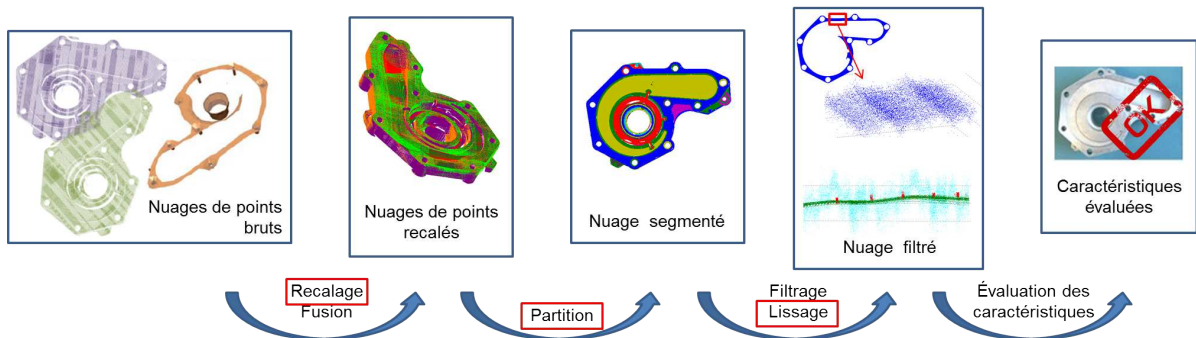


Figure 4.2 – Processus de traitement et analyse des données

2 Recalage

Le recalage des données permet de rendre cohérent l'ensemble des données acquises, c'est-à-dire les exprimer dans un même repère, mais il permet également de mettre en correspondance des données acquises et un modèle CAO. Dans le cadre de la vérification de spécifications, il peut en effet être intéressant de réaliser une cartographie d'écarts entre le modèle et les données numérisées. Ces écarts peuvent être purement dimensionnels (distance euclidienne entre un point du modèle et un point du nuage numérisé), mais ils peuvent également être géométriques (différence de courbures entre deux points par exemple).

Comme nous l'avons vu au chapitre I, l'algorithme de recalage le plus utilisé est l'al-

gorithme *Iterative Closest Point* (ICP) [BES92, CHE91]. L'algorithme consiste à mettre en correspondance des points homologues des différents ensembles de données à recaler à l'aide d'une transformation de corps rigide qui minimise une fonction distance entre les couples de points à mettre en correspondance. Cette méthode est rapide, cependant il n'est pas toujours aisé de trouver les paires de points à mettre en correspondance. Ainsi des méthodes de recalage dérivées de l'ICP ont vu le jour.

Shmukler et Fischer [SHM10] proposent une nouvelle méthode de recalage automatique de nuage de points sur un modèle CAO. Le recalage s'effectue en deux étapes, un recalage global dans un premier temps et un recalage local dans un second temps. Le recalage global se fait sur un nombre limité de points caractéristiques déterminés sur le nuage numérisé à partir d'un « multi-scale shape descriptor », que l'on associe aux points du modèle CAO.

Les auteurs ont pour point de départ de l'étude un maillage triangulaire du nuage numérisé sur lequel ils réalisent des calculs de courbure gaussienne discrète et de courbure moyenne absolue. La courbure discrète n'étant pas définie de manière normative, il existe plusieurs approches, basées sur les maillages, permettant de donner une estimation de la courbure [ZHA10]. Dans [SHM10], les auteurs utilisent le théorème de Gauss-Bonnet appliqué aux maillages triangulaires [DOC76] pour l'évaluation de la courbure gaussienne discrète qui donne l'équation 4.1

$$\int \int_M K dA = 2\pi - \sum_{j=1}^{nf} \theta_j \Rightarrow K = \frac{2\pi - \sum_{j=1}^{nf} \theta_j}{\frac{1}{3}A} \quad (4.1)$$

où K est la courbure gaussienne du point considéré v_i (Figure 4.3), A l'aire de l'ensemble des facettes ayant pour sommet v_i , θ_j l'angle de la facette j au sommet v_i et nf le nombre de facettes ayant pour sommet v_i .

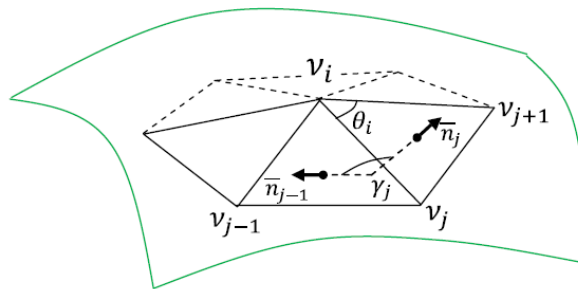


Figure 4.3 – Paramétrisation pour l'évaluation de la courbure discrète [SHM10]

Notons que la plupart des algorithmes calculent la courbure sur le 1 -voisinage du point considéré, mais ceci est très dépendant du bruit du nuage numérisé. Ainsi pour des nuages numérisés, donc fortement bruités, l'utilisation d'un n -voisinage du point est recommandée pour effectuer les calculs de courbure. La figure 4.4 présente le résultat du recalage local et global d'une pièce test dont l'acquisition est bruitée.

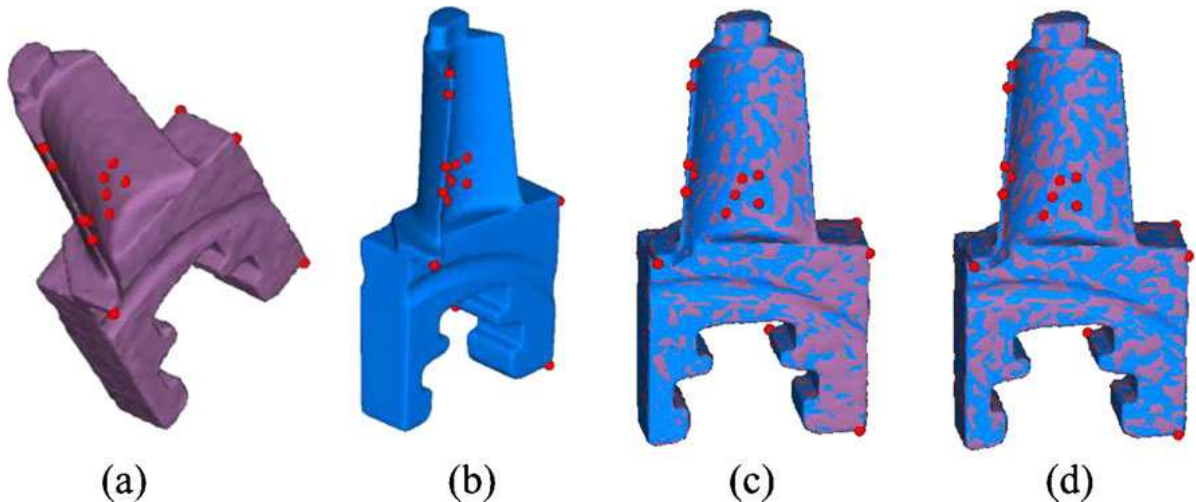


Figure 4.4 – Recalage sur un Modèle CAO [SHM10]. (a)Modèle CAO, (b)Nuage à recalier, (c)Recalage global, (d)Alignement local

Dans le même esprit que ces travaux, nous avons proposé une méthode de recalage d'un nuage de points sur modèle CAO. La méthode que nous proposons a pour avantage de ne pas nécessiter de maillage du nuage de points initial. Comme pour la méthode précédente, le recalage proposé est divisé en deux étapes : un recalage global et un deuxième recalage local [AUD10, MEH10]. Cette méthode permet de recalier rapidement un nuage sur un modèle discrétisé ou sur un autre nuage de points dans le but de réaliser une comparaison et de dresser une cartographie d'écarts, sans passer par le maillage de la surface.

2.1 Recalage global

Le recalage global est un recalage grossier qui consiste à faire coïncider approximativement les deux nuages ou le nuage et le modèle par l'intermédiaire de repères construits sur chacun des nuages et/ou modèles (Figure 4.5).

Afin de créer ces repères, le recalage global est basé sur l'utilisation d'un logiciel de CAO, dans notre cas il s'agit de ©CATIA V5. Un repère de dégauchissage est défini sur le nuage de points. Le repère est construit à partir de trois entités à choisir dans le

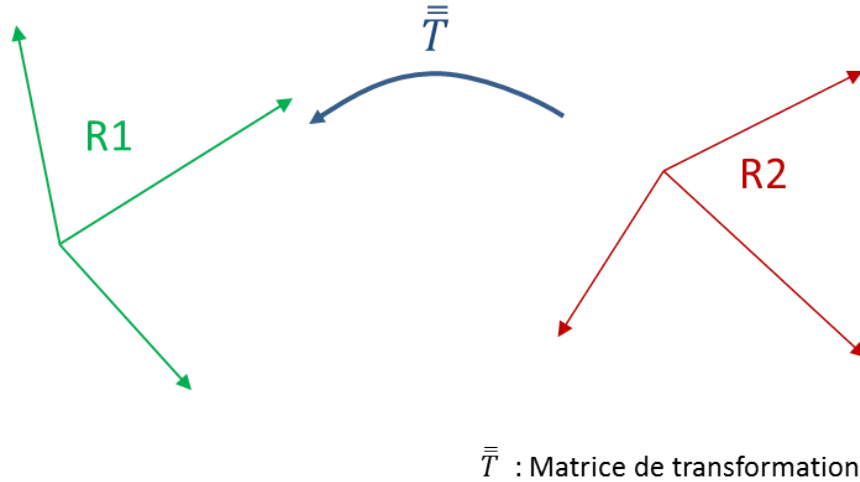


Figure 4.5 – Recalage global : mise en correspondance des repères

nuage de points. Ces trois entités doivent former le repère de dégauchissage en bloquant les six degrés de liberté : la première entité supprime 3 degrés de liberté (plan, sphère), la deuxième en élimine deux autres (droite, cercle) et la troisième supprime le dernier degré de liberté (point). La construction de ce repère est basée sur les entités associées aux entités extraites par la méthode des moindres carrés qui a pour avantage d'être simple à mettre en œuvre et rapide d'exécution. Un second repère est construit sur le modèle CAO à partir des mêmes entités (Figure 4.6a). La dernière phase du recalage global consiste à faire correspondre les deux repères. Nous obtenons ainsi un premier niveau de recalage du nuage de points par rapport à la définition CAO. Cette étape manuelle pourrait être automatisée, en particulier si la numérisation a au préalable été planifiée et exécutée à partir du modèle CAO.

Dans le cas où la construction du repère n'est pas possible ou pas unique (pièce axisymétrique par exemple), il convient de mettre en correspondance les surfaces qui peuvent l'être en bloquant un maximum de degrés de liberté. Les degrés de liberté restant sont dus aux propriétés géométriques de la pièce (axe de révolution par exemple) et ne posent *a priori* pas de problème, le résultat de la cartographie d'écarts n'en est pas dépendant.

Le recalage global permet donc un alignement rapide non optimal des données acquises sur le modèle CAO. Notons que dans notre cas le modèle CAO reste fixe, c'est le nuage de points qui est aligné au modèle.

Plusieurs études proposent une automatisation de ce recalage global. Zhao utilise

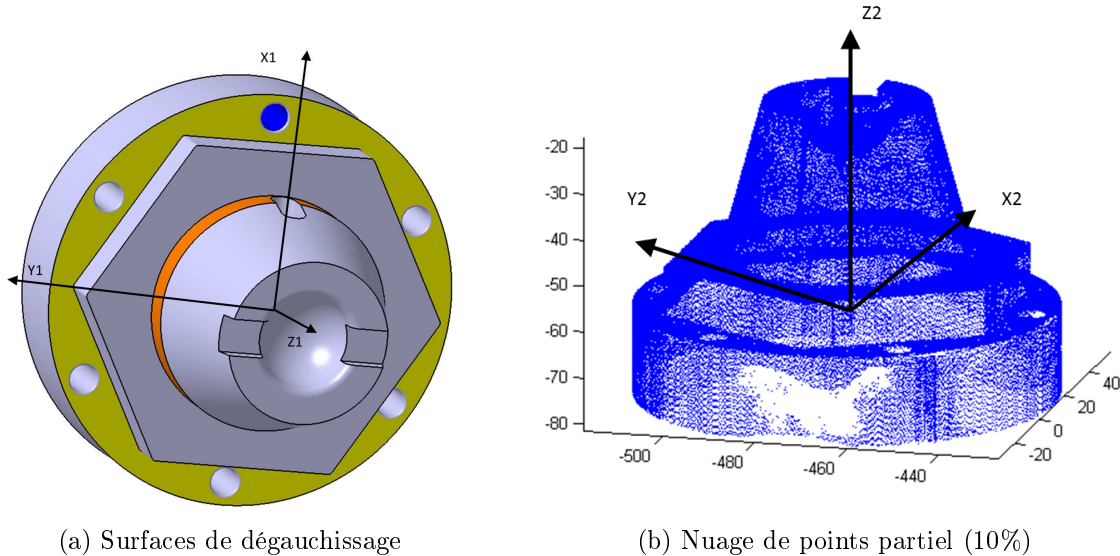


Figure 4.6 – Pièce test pour le recalage sur modèle CAO

une analyse PCA¹ permettant d'obtenir les axes principaux d'un nuage de points ou d'un maillage [ZHA10]. Cette analyse rapide a toutefois l'inconvénient de ne pas être robuste lorsque le nuage de points numérisé n'est pas complet.

Le recalage global servant de support au recalage local qui fait intervenir tous les points numérisés, il est préférable d'adopter une méthode de recalage global robuste et rapide telle que celle présentée ci-dessus.

2.2 Recalage local

À la suite du recalage global, le recalage local consiste à minimiser la distance de chaque point du nuage à recaler par rapport au point correspondant dans le nuage de référence (de la CAO ou d'un autre nuage de points). La minimisation de la distance de chaque point est réalisée par déplacement rigide de l'ensemble des données à recaler en utilisant la méthode du torseur des petits déplacements (TPD) [BOU96].

L'utilisation de la méthode du TPD permet entre autres d'avoir un algorithme robuste, simple à mettre en œuvre et numériquement très stable. Cette méthode consiste à appliquer un petit déplacement \mathbf{D}_{M_i} à chaque point M_i du nuage issu de la numérisation afin que l'ensemble du nuage de points approche au mieux le modèle CAO selon un critère d'optimisation, comme le critère des moindres carrés par exemple. Soit M_{thi} le point du nuage de référence correspondant au point M_i du nuage à recaler, on note

1. PCA : *Principal Component Analysis*

ξ_i la distance entre \mathbf{M}_{thi} et \mathbf{M}_i . Chaque point \mathbf{M}_i est déplacé d'un vecteur $\mathbf{D}_{\mathbf{M}_i}$ et on note e_i l'écart défini par l'équation 4.2 :

$$e_i = \xi_i + \mathbf{D}_{\mathbf{M}_i} \cdot \mathbf{n}_i \quad (4.2)$$

où \mathbf{n}_i est la normale définie comme étant le vecteur unitaire de direction $\mathbf{M}_{\text{thi}}\mathbf{M}_i$ (Figure 4.7).

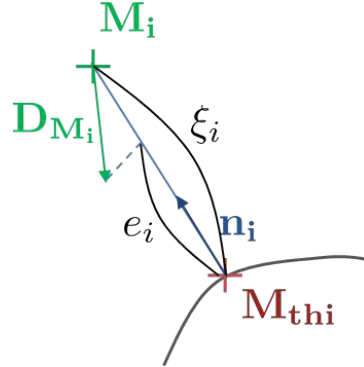


Figure 4.7 – Distance entre le point numérisé et son homologue théorique

L'hypothèse des petits déplacements et des petites rotations est vérifiée grâce au premier recalage global qui permet d'approcher qualitativement les deux nuages. Cette hypothèse permet d'affirmer que le champ de déplacement $\mathbf{D}_{\mathbf{M}_i}$ est un champ de moment qui peut être décrit à l'aide du déplacement d'un point quelconque \mathbf{O} $\mathbf{D}_{\mathbf{O}}(u, v, w)$ ainsi que par un vecteur de rotation $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma)$ du nuage. Nous pouvons ainsi écrire (Equations 4.3) :

$$e_i = \xi_i + (\mathbf{D}_{\mathbf{O}} - \mathbf{O}\mathbf{M}_i \times \mathbf{R}) \cdot \mathbf{n}_i \quad (4.3)$$

$$= \xi_i + \mathbf{D}_{\mathbf{O}} \cdot \mathbf{n}_i + (\mathbf{O}\mathbf{M}_i \times \mathbf{n}_i) \cdot \mathbf{R} \quad (4.4)$$

$$= \xi_i + \mathcal{T}_{\mathbf{O}} \odot \mathcal{P} \quad (4.5)$$

où \mathcal{T} est le torseur des petits déplacements, $\mathcal{T} = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{R} \\ \mathbf{D} \end{array} \right\}_o$, \mathcal{P} est le torseur des coordon-

nées plückériennes du point \mathbf{M}_i , $\mathcal{P} = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{O}\mathbf{M}_i \times \mathbf{n}_i \end{array} \right\}_o$, et \odot représente le comoment des deux torseurs.

Le problème consiste à déterminer $(\alpha, \beta, \gamma, u, v, w)$ tels que $W = \sum e_i^2$ soit minimal.

L'identification est obtenue par la résolution d'un système linéaire de six équations à six inconnues [BOU96]. Nous obtenons ainsi le recalage local du nuage de points sur le modèle CAO.

Afin d'implémenter cette méthode de recalage local il est nécessaire de discrétiser le modèle CAO. Cette discrétisation doit permettre d'obtenir un nuage de point dense de manière à déterminer dans ce dernier les points théoriques correspondant à chaque point du nuage à recaler. Pour ce faire, nous proposons de construire un maillage sur le fichier CAO avec une forte densité de sommet : distance entre sommet égale à 0,01 mm. Les sommets du maillage obtenu constituent un nuage de points de référence. Nous considérons ici que les erreurs introduites par le maillage du modèle sont négligeables devant les écarts à observer, puisque nous n'utilisons que les sommets du maillage construits sur la surface initiale du modèle CAO. Les écarts sont donc uniquement dus aux arrondis numériques. Les points issus de la CAO sont utilisés par la suite pour trouver le point de la CAO le plus proche de chaque point du nuage et ainsi calculer l'ensemble des distances entre les points du modèle et ceux du nuage numérisé.

Du fait des performances des PC classiques pour la recherche, la densité du nuage de points créé à partir de la CAO ne peut pas être aussi grande que la densité du nuage de points numérisé avec un capteur laser-plan par exemple, le point théorique \mathbf{M}_{thi} correspondant au point \mathbf{M}_i ne fait donc pas partie des points du nuage issu de la CAO. Nous proposons donc de considérer comme point théorique \mathbf{M}_{thi} , le projeté orthogonal du point \mathbf{M}_i sur le plan formé par les k plus proches voisins dans la nuage CAO du point \mathbf{M}_i du nuage à recaler. Pour des raisons de temps de calcul, et du fait que le nuage modèle n'est pas bruité nous utilisons une valeur de $k = 3$. Ainsi, le plan formé par les k plus proches voisins permet de définir la normale \mathbf{n}_i . Dans le cas où les trois plus proches voisins sont alignés, nous supprimons le point \mathbf{M}_i . Cependant, cela ne concerne que moins de 1% des points.

La recherche des voisins a été réalisée avec matlab. Afin d'accélérer cette recherche et ne pas calculer l'ensemble des distances entre chaque point \mathbf{M}_i et tous les points du modèle, nous avons utilisé des kd-trees [FIN08]. Cette méthode consiste à subdiviser l'espace en cubes appelés *kd-tree* contenant les points du nuage de points du modèle. Chaque kd-tree contient le même nombre de points. Ainsi en fonction de la densité variable, tous les kd-trees n'ont pas les mêmes dimensions. Un exemple 2D est donné sur la figure 4.8.

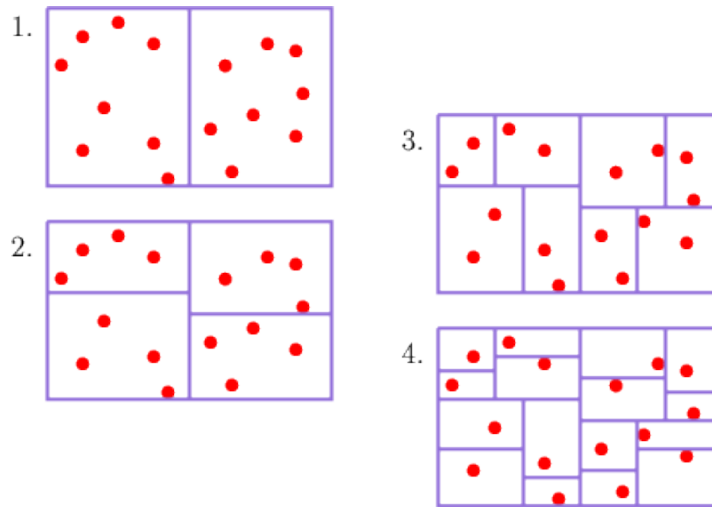


Figure 4.8 – Exemple de kd-trees en 2D [STA00]

L'utilisateur définit au préalable le nombre de points que doit contenir chaque kd-tree. Le temps de création des kd-trees est inversement exponentiel avec le nombre de points de chaque cube, mais le temps d'exécution de la recherche des voisins est lui proportionnel au nombre de points dans chaque cube. En effet, pour un point \mathbf{M}_i pour lequel on cherche les voisins, on détermine à quel kd-tree appartient \mathbf{M}_i puis on ne cherche ses plus proches voisins potentiels que dans les kd-trees directement voisins, ce qui limite le nombre de calculs.

L'algorithme que nous avons développé pour le recalage à partir du TDP s'appuie sur la librairie Matlab développée par Tagliasacchi [TAG08] pour la construction des kd-trees et la recherche des voisins. Nous avons ensuite développé un algorithme permettant le recalage par la méthode du TPD. La construction d'un kd-tree est longue : environ 5 heures pour un nuage de 170 000 points environ sur un ordinateur classique de laboratoire. Toutefois, cette étape n'est à réaliser qu'une fois et les kd-trees peuvent être utilisés pour recaler différents nuages de points sur un même modèle.

Le recalage permet une cartographie des écarts par rapport à un modèle, mais permet également la segmentation par identification des frontières. En effet, à chaque point du nuage sont associés k points du nuage de la CAO appartenant à une surface identifiée. Il est alors possible d'associer à chaque point du nuage la même information d'appartenance à une surface.

2.3 Cartographie des écarts

Une fois les deux étapes de recalage terminées les écarts résiduels e_i peuvent alors être interprétés comme les écarts entre la pièce numérisée et son modèle nominal. Une cartographie des écarts est alors établie à partir de l'évaluation des e_i avec l'équation 4.2.

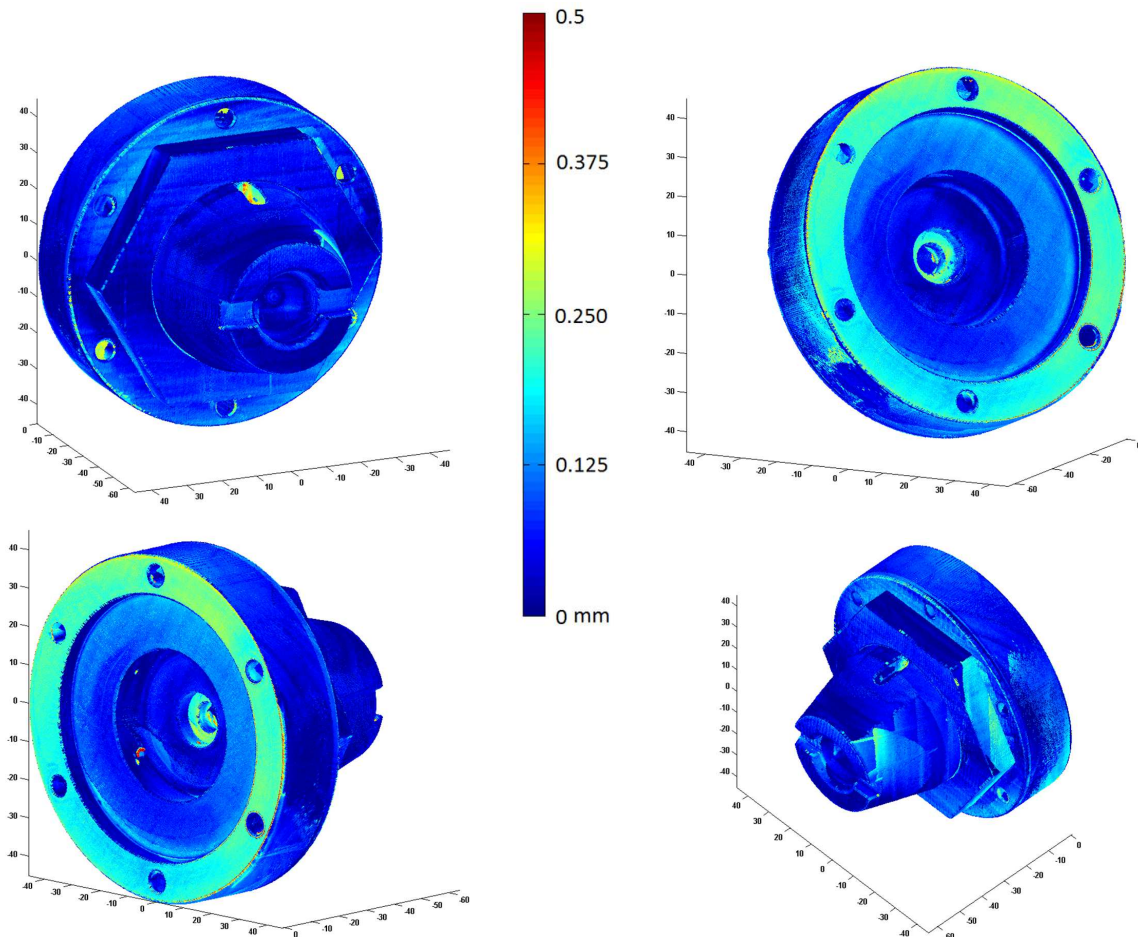


Figure 4.9 – Cartographie d'écarts entre le modèle CAO et la pièce numérisée

La figure 4.9 montre une cartographie d'écarts entre un nuage de points numérisé et le modèle CAO, appliquée à une pièce mécanique. La numérisation a délivré un nuage d'environ 2 200 000 de points pour lesquels l'ensemble des distances ont été calculées afin d'établir la cartographie. Nous avons considéré que les points pour lesquels l'écart calculé est supérieur à 0,2 mm ne sont pas significatifs et reflètent vraisemblablement des erreurs associées à la numérisation. Ce sont en effet les points proches des arêtes de la pièce, zones pour lesquels le bruit de numérisation est amplifié du fait de la variation forte variation des angles de numérisation. Cette information fournit une première évaluation des défauts des pièces

3 Segmentation

Les nuages de points issus de la numérisation 3D forment un ensemble de points discontinu et sans lien intrinsèque. Or lorsqu'une pièce est numérisée il est souvent nécessaire de décomposer le nuage en sous-ensembles en fonction d'un dénominateur commun qui dépend de l'application envisagée. Dans les applications mécaniques (rétro-conception, inspection en ligne, métrologie, etc.) on peut parler de segmentation du nuage de points en entités géométriques [DIG10a, MEH10].

Comme évoqué au paragraphe 4.2 du chapitre I, il existe différentes méthodes de segmentation des données :

- Recherche de frontières ;
- Recherche d'entités ;
- Approches hybrides.

La plupart de ces méthodes s'appuient sur un maillage des données. Il existe dans la littérature, de nombreuses méthodes de maillage telles que les méthodes de type « ensemble de niveau » [HOP92, KAZ05, KAZ06, ALL07] ou bien de type « α -shape » [BER99a, EDE94]. La plupart de ces méthodes ne peuvent être appliquées sur des données issues d'une numérisation, le bruit de numérisation pouvant conduire à des instabilités numériques. Les méthodes classiques de maillage ne peuvent être utilisées que sur des nuages de points propres et non bruités [DIG10], ce qui signifie qu'il faut faire un lissage des points obtenus. Or le lissage conduit certes à une diminution des variations locales et globales du nuage de points mais n'apporte aucune garantie sur la conservation des singularités géométriques les plus petites de la pièce réelle. La conformité topologique et géométrique du nuage de points peut donc être remise en cause.

Fort de ce constat, une collaboration a été mise en place avec le CMLA² dans le cadre d'un projet FARMAN³ GII⁴. Ce projet a eu pour objectif de définir une méthode robuste de segmentation de nuages de points s'appuyant sur le nuage brut numérisé, c'est-à-dire bruité, inhomogène et pouvant présenter des trous de numérisation. Dans le cadre de ce projet, nous avons apporté notre expertise en numérisation. À travers une campagne de numérisations menée au LURPA, nous avons participé à la mise au point et à la validation des algorithmes [DIG11a, DIG11, DIG10b, MEH10].

2. Centre de mathématiques et de leurs applications, ENS Cachan www.cmla.ens-cachan.fr

3. Institut FARMAN : www.farman.ens-cachan.fr

4. GII : Géométrie Inverse pour l'Industrie

La méthode de segmentation proposée conserve l'ensemble des points bruts de numérisation. Un maillage par triangulation est construit à l'aide de la méthode *Scale Space* (espace échelle). Cette méthode consiste à calculer le mouvement par courbure moyenne sur le nuage (Equation 4.6) :

$$\frac{dP}{dt} = H(P) \cdot \vec{n}(P) \quad (4.6)$$

avec P un point du nuage maillé, $H(P)$ sa courbure moyenne et $\vec{n}(p)$ la normale au point P . Une application itérative permet d'aboutir à des données lisses pour lesquelles la construction du maillage ne pose plus de problème d'instabilité numérique. Notons qu'à ce stade tous les points initialement obtenus sont conservés et que le mouvement itératif appliqué permet de conserver la position initiale de chaque point. La recherche des éléments caractéristiques est alors réalisée sur ces données lissées avant rétro-projection du maillage. En effet, grâce à un opérateur de type « back-propagation », les points ainsi que les éléments géométriques construits sur le nuage lissé sont re-projetés dans leur position initiale.

Le calcul de la courbure moyenne est obtenu grâce à une projection de chaque point sur son plan de régression local suivant la direction de la normale au point traité [DIG11] (Exemple Figure 4.10). En effet cette projection permet d'obtenir un mouvement tangent au mouvement de courbure moyenne. Il devient ainsi facile d'implémenter le *Scale Space* et d'obtenir la courbure moyenne à chaque étape d'itération. Ainsi, le calcul classique de la courbure nécessitant le calcul de dérivées secondes de la surface (mal adapté pour cause d'instabilité aux données bruitées) est remplacé par des calculs d'intégrales bien plus stables compte tenu de la qualité du nuage de points.

Nous obtenons alors un nuage de points structuré et lissé grâce à un maillage ainsi que la courbure pour chaque point et pour chaque étape d'itération, autrement dit, nous avons la courbure multi-échelle de la surface. La recherche des entités géométriques par extraction est plus facile à mettre en œuvre sur les données filtrées. Une fois les données filtrées, c'est-à-dire que le bruit de numérisation a été éliminé, l'identification de lignes caractéristiques est effectuée grâce à un algorithme inspiré de la théorie de l'analyse en lignes/ensembles de niveau utilisée en traitement d'image. Il s'agit d'un algorithme de sélection de lignes de niveau adapté aux surfaces maillées 3D le « Maximally stable Extremal Regions » [MAT04]. L'application de cet algorithme aboutit à l'identification des lignes caractéristiques [DIG10] sous forme d'un ensemble de points. Il ne reste plus

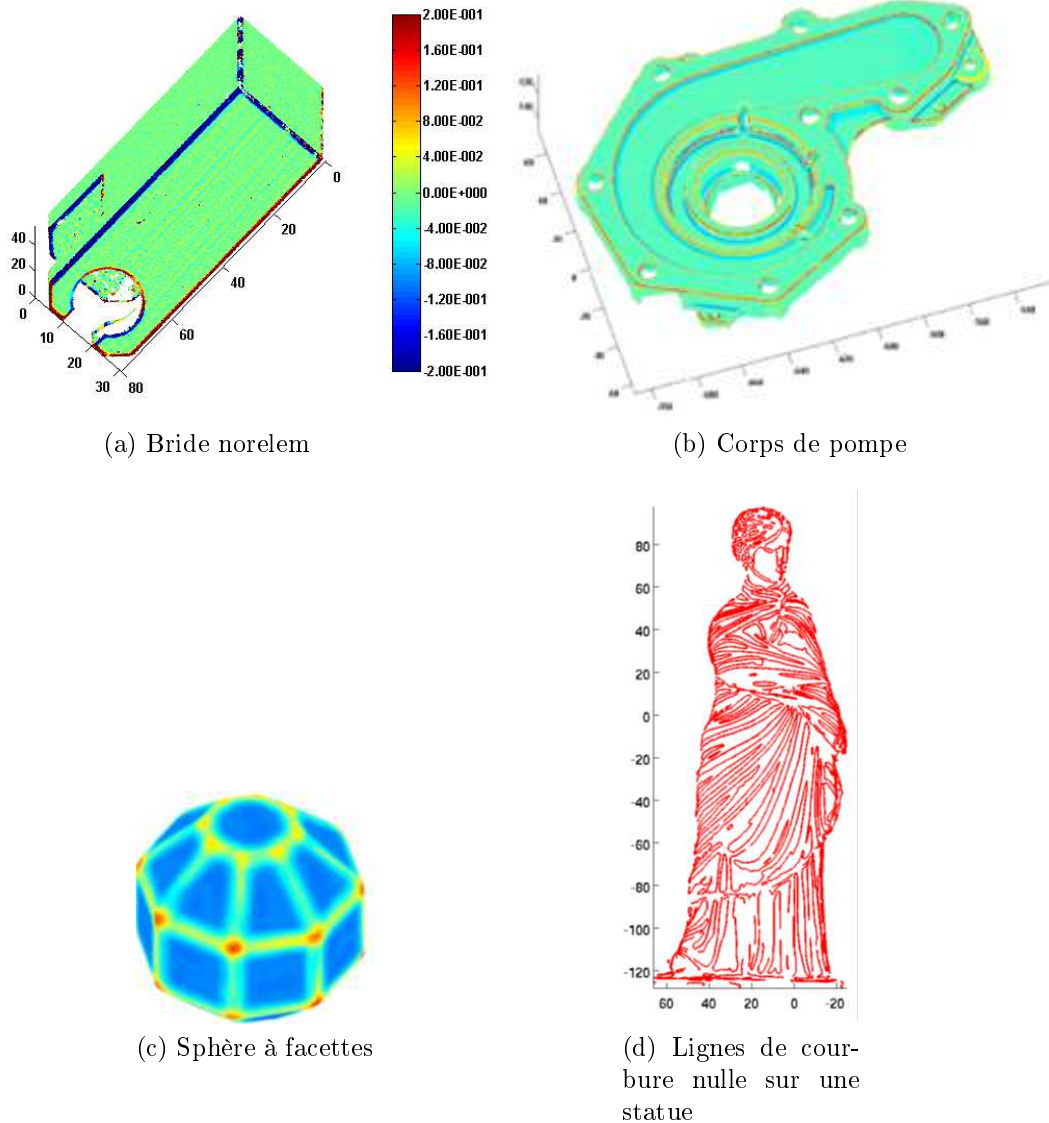


Figure 4.10 – Exemples de résultats de courbures

qu'à relier ces points par une étude du voisinage et de courbure afin de construire des frontières délimitant les différentes entités géométriques. L'utilisation de l'opérateur de « back-propagation » permet ainsi d'obtenir l'extraction d'entités géométriques sur le nuage de points d'origine. Les singularités géométriques sont donc conservées.

La figure 4.11 présente le résultat de l'algorithme de segmentation testé sur différents nuages de points.

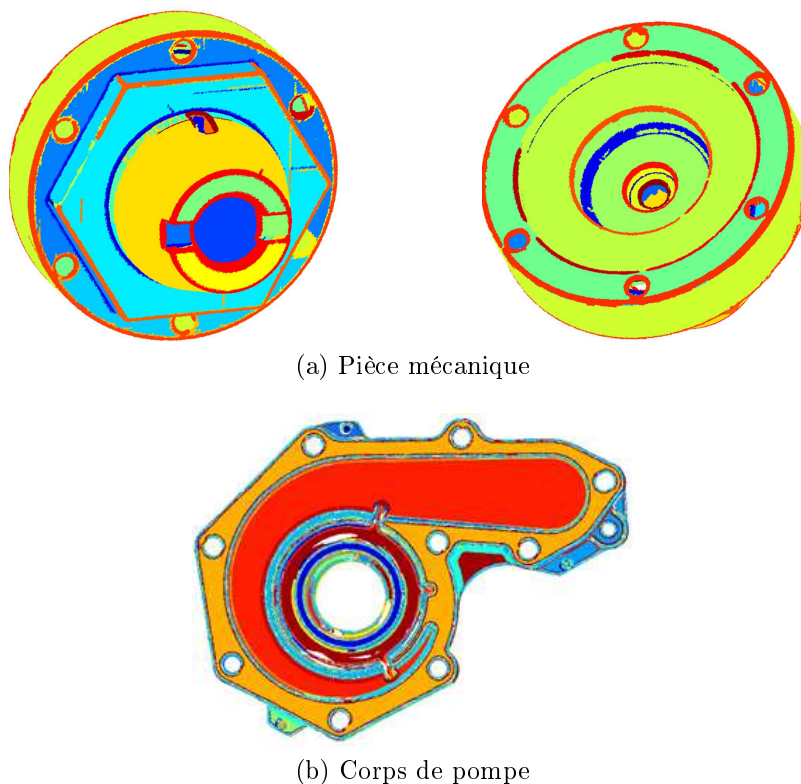


Figure 4.11 – Résultat de la segmentation différentes pièces

4 Filtrage

Une fois les données nettoyées, recalées et segmentées, chaque surface peut être extraite pour réaliser les calculs métrologiques nécessaire à la vérification des spécifications étudiées. Cependant, lorsque l'on utilise des capteurs optiques tels que les capteurs laser-plan, le bruit de numérisation ne permet pas d'évaluer les défauts sur les données brutes. Pour la vérification de spécifications géométrique dont l'intervalle de tolérance (IT) est faible (0,01 mm par exemple), une opération de lissage des données est donc indispensable.

Ainsi, nous proposons dans cette partie un filtre permettant d'éliminer le bruit de numérisation. La démarche est proposée dans le cas de l'utilisation d'un capteur laser-plan, avec pour objectif de réduire le bruit de numérisation de façon à réaliser des mesures métrologiques avec ce type de capteur.

4.1 Nécessité de filtrage

Dans ce paragraphe, nous mettons en avant le besoin de filtrage au travers de la vérification d'un défaut de planéité par capteur laser-plan. D'après les normes ISO

GPS [ISO8015, ISO1101] ainsi que la norme ISO spécifique à l'évaluation de la planéité [ISO12781-1], pour qu'une spécification de planéité soit vérifiée, la surface extraite représentant l'élément tolérancé doit être contenue à l'intérieur du volume défini par deux plans parallèles distants de la valeur de l'intervalle de tolérance.

La méthode classiquement mise en œuvre pour la vérification de la spécification consiste à associer au nuage de points acquis un plan théorique qui minimise le défaut de forme (selon le critère de Tchebychev). Si e_i représente l'écart d'un point \mathbf{M}_i au plan associé, le défaut de planéité d_p est défini par l'équation 4.7 :

$$d_p = \left| \max_i e_i - \min_i e_i \right| \quad (4.7)$$

La spécification est vérifiée si l'équation 4.8 est vérifiée dans laquelle IT représente l'intervalle de tolérance.

$$d_p \leq IT \quad (4.8)$$

Le site expérimental du laboratoire est composé d'un capteur laser plan monté sur une MMT. La numérisation du plan matérialisé par une règle en marbre est donc obtenue par balayage du capteur sur la surface grâce à un mouvement de translation suivant un axe de déplacement de la MMT (direction de numérisation, Figure 4.12). Il en résulte deux directions d'influence principales dans le nuage de points : celle du plan laser et celle de la direction de numérisation qui est orthogonale à la première.

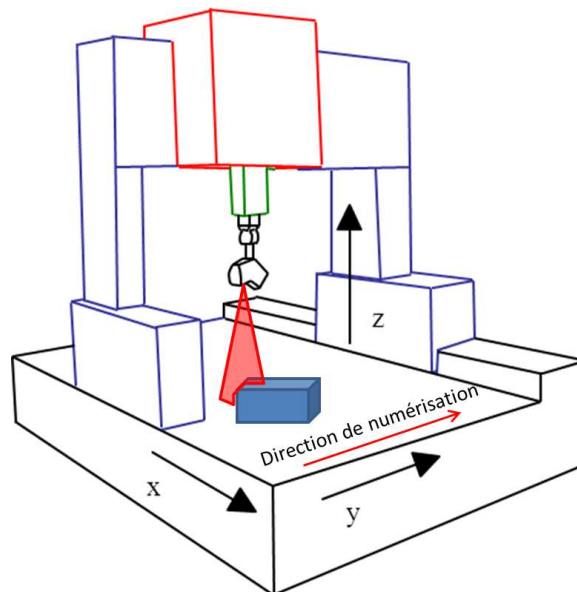
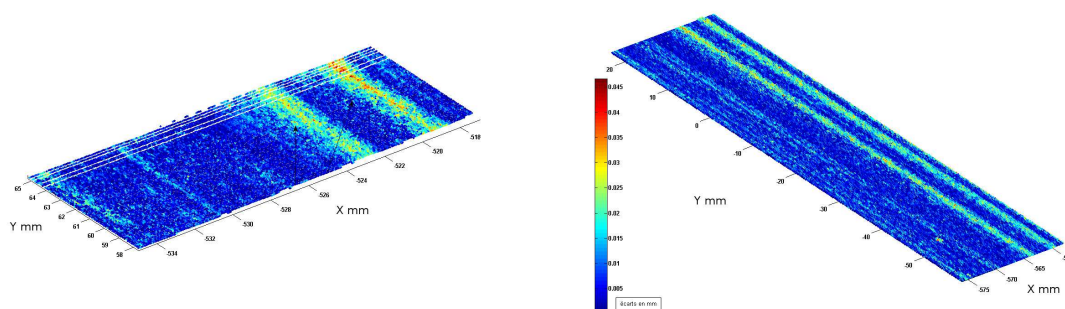
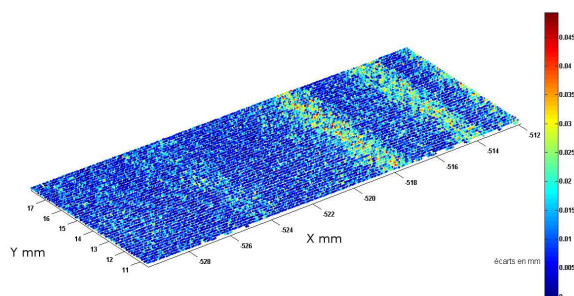


Figure 4.12 – Capteur laser-plan et MMT : Direction de numérisation

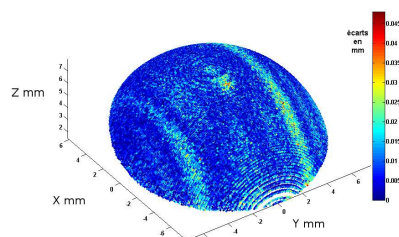
La figure 4.13 montre le résultat de la numérisation de différents artefacts avec le même système de numérisation (capteur laser-plan Kréon monté sur MMT seiv Renault). Les numérisations ont été réalisées dans des conditions optimales, les distances et angles de numérisation ont été choisis afin de minimiser le bruit. Aux nuages obtenus ont été associées des surfaces idéales par le critère de moindres carrés. La distance de chaque point à la surface associée a été évaluée et retranscrite sous forme d'une échelle de couleur sur le nuage de points. Nous avons utilisé une cale étalon matifiée numérisée avec deux directions de numérisation différentes (Figure 4.13a). Nous constatons que des défauts répétitifs qui forment des lignes colorées sur le nuage de points dépendent de la direction de numérisation, il ne s'agit donc pas d'un défaut de la cale étalon ou de l'opération de matification. Le test a également été réalisé sur une cale céramique (Figure 4.13b) ainsi que sur la sphère de calibration du capteur Kréon utilisé (Figure 4.13c). Les résultats obtenus sur ces deux autres artefacts montrent également des lignes colorées de défauts qui sont donc inhérents au système de numérisation et non aux surfaces acquises.



(a) Cale étalon matifiée



(b) Cale céramique



(c) Sphère étalon

Figure 4.13 – Identification de l'origine des défauts de numérisation sur différents artefacts

Forts de ce constat nous avons poursuivi les expérimentations dans ce sens. La

figure 4.14 représente le nuage de points numérisés à l'aide du capteur laser-plan ainsi que les points obtenus par palpation mécanique pour l'acquisition d'une règle en marbre. Les données palpées, qui constituent la référence pour notre étude, ont été acquises à l'aide d'un palpeur de type TP2 Renishaw ; 52 points ont été palpés. Le capteur laser-plan Kréon Zephyr KZ25 a permis d'obtenir environ 600 000 points en une seule passe sur le plan numérisé.

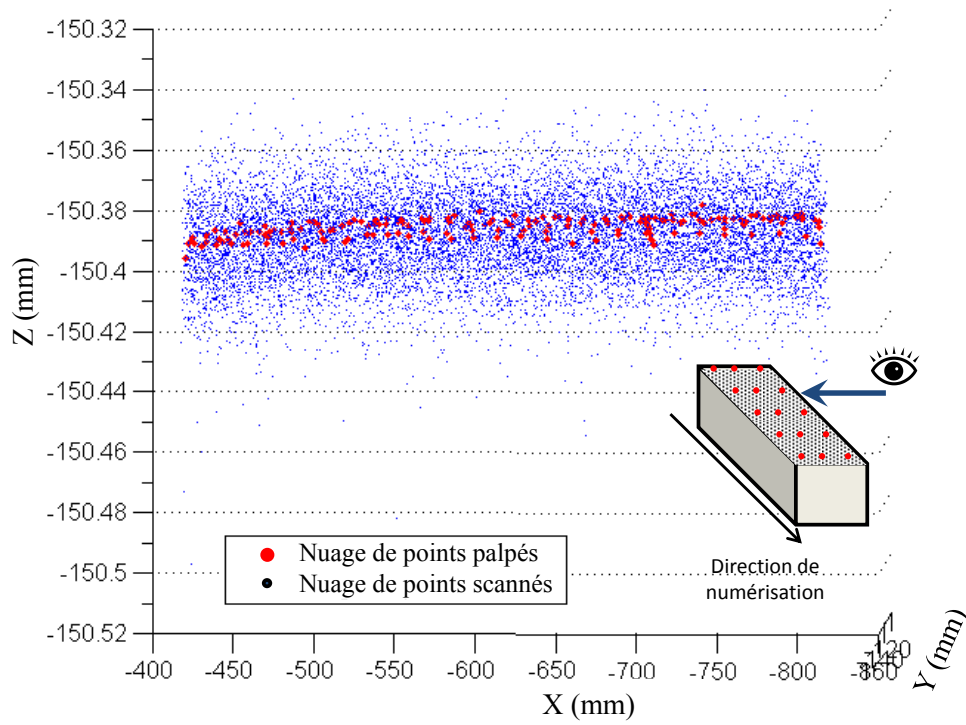
Les points issus de la numérisation laser sont bruités. Cependant le bruit est différent selon la direction ; le bruit le long de la direction de numérisation semble gaussien (Figure 4.14a) alors que le bruit dans la direction orthogonale à la direction de numérisation semble présenter une partie ondulatoire qu'il est nécessaire de filtrer (Figure 4.14b). En effet, lorsque l'on évalue le défaut de forme suivant les recommandations de la norme pour les données palpées et pour le nuage de points numérisé, les résultats diffèrent d'un facteur 10 (Tableau 4.1).

Système de numérisation	Planéité évaluée
KZ25 _{MMT} (Laser-plan)	0,152 mm
TP2 _{MMT} (Contact)	0,015 mm

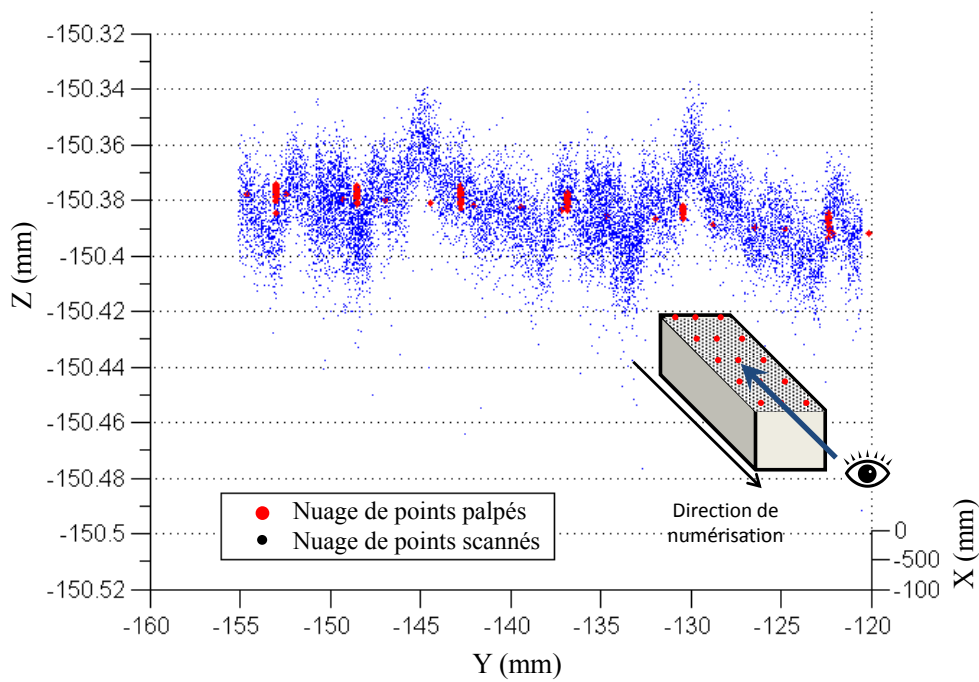
Tableau 4.1 – Résultats de l'évaluation de la planéité sur une règle en marbre

Compte-tenu des résultats présentés, il apparaît que les données issues de la numérisation avec le capteur laser-plan ne peuvent être utilisées brutes en appliquant les recommandations de la norme. En effet, compte-tenu du bruit, l'utilisation du critère min-max n'a pas de sens physique s'il est appliqué sur les données brutes. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode de filtrage des données afin d'éliminer le bruit de numérisation.

Nous proposons une méthode d'extraction des données bruitées basée sur un lissage du nuage de points à l'aide d'un filtre passe bas 3D détaillé dans les paragraphes suivants [AUD12a].



(a) Direction de numérisation



(b) Direction orthogonale

Figure 4.14 – Nuages de points issus de la numérisation laser et du palpage mécanique suivant différentes vues

4.2 Méthodes de filtrage

Le filtrage des données est généralement utilisé pour éliminer un bruit purement gaussien. Différentes méthodes de filtrage ont été proposées pour le *Reverse Engineering* [CAR01], pour la segmentation des maillages [JAG07] ou pour la fusion des données avec les filtres de Kalman [HUA09]. Ohtake *et al* [OHT02] proposent une méthode de lissage des maillages basée sur l'utilisation d'un filtre gaussien adaptatif et anisotrope.

Nous avons pu remarquer que le nuage de points présentait des profils de longueurs d'onde différentes dans la direction de numérisation et dans la direction perpendiculaire (Figure 4.14b). Fort de ce constat il devient pertinent d'envisager de séparer le nuage de points en fonction des longueurs d'onde et ainsi de supprimer le profil qui correspondrait au bruit de mesure. Il s'agit d'une opération que l'on peut qualifier de filtrage ondulatoire.

La littérature dédiée à l'analyse ondulatoire présente un nombre important de méthodes de filtrage [MAT03, SAG99]. Toutefois les domaines d'application ne correspondent pas à la mesure mécanique. C'est pourquoi nous proposons une solution basée sur l'utilisation d'une norme en vigueur dans le domaine de la mesure d'état de surface, à savoir la norme ISO 11562 [ISO11562]. Afin de garder le défaut de forme intact, et de ne supprimer que le bruit, nous proposons l'utilisation d'un filtre analogue aux filtres à phase correcte utilisés pour les mesures d'états de surface, définis dans la norme [ISO11562]. Ces filtres sont basés sur la périodicité des profils. Le choix d'une longueur d'onde de coupure permet de séparer les profils de grande et de courte longueurs d'onde (défaut de forme et rugosité).

Le principe de ces filtres est de lisser les données de façon à conserver la composante à grande longueur d'onde en déplaçant chaque point sur le barycentre de son voisinage pondéré par la fonction de pondération définie par l'équation 4.9.

$$s(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_{co}} e^{-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_{co}}\right)^2} \quad (4.9)$$

avec $\alpha = \frac{\ln 2}{\pi}$ et λ_{co} la longueur d'onde de coupure. Chaque point du voisinage se voit donc attribuer un poids en fonction de sa distance au point à déplacer. La fonction de pondération est illustrée sur la figure 4.15.

Cette opération est appliquée à l'ensemble des points du profil à évaluer.

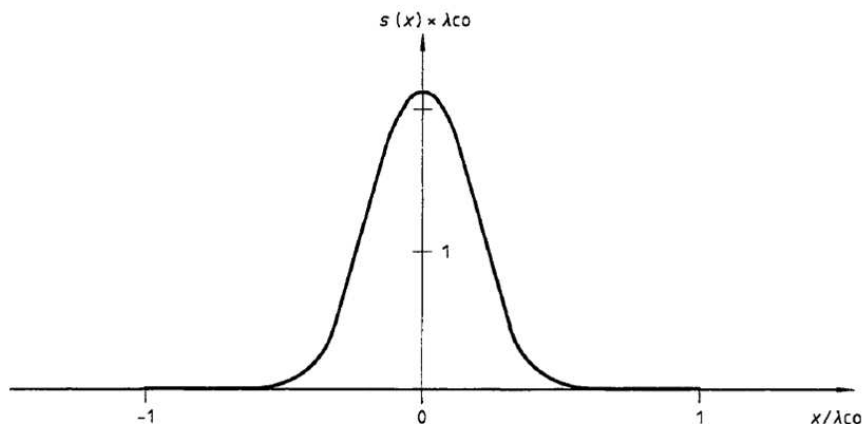


Figure 4.15 – Représentation de la fonction de pondération du filtre de profil [ISO11562]

4.3 Filtrage ondulatoire des données 3D

Nous avons mis en évidence que le bruit de numérisation peut dans certains cas s'apparenter à un profil périodique. Nous proposons donc d'adapter les filtres 2D de la norme sur l'évaluation des états de surface [ISO11562]. En effet, nous considérons que le bruit de numérisation peut s'apparenter à des défauts géométriques de longueurs d'onde courte et moyenne mais qui restent inférieures à la longueur d'onde d'un défaut d'ondulation de la pièce.

Nous proposons d'utiliser deux longueurs d'onde de coupure différentes pour les deux directions précédemment citées, la direction du plan laser et la direction de numérisation. Il est nécessaire de connaître la direction d'avance de la numérisation. En effet, le défaut de la surface dans la direction d'avance est principalement dû au défaut de rectitude de l'axe de déplacement de la MMT. Ce défaut engendre un défaut de très grande longueur d'onde et de faible amplitude sur la pièce (quelques μm), qui n'est en général pas significatif pour la mesure d'une pièce de dimensions cohérentes avec la MMT utilisée, ce qui est d'autant plus le cas lors de l'utilisation de capteurs optiques. Nous prendrons donc une longueur d'onde de coupure dans cette direction égale à 5 mm, qui permet de filtrer le bruit de numérisation sans dégrader l'ondulation de la surface de la pièce (Figure 4.14a). En revanche, la longueur d'onde de coupure dans le plan laser est à déterminer en fonction du capteur utilisé.

Nous proposons le filtre défini par une fonction de pondération s donnée par l'équation 4.10. Pour une surface de normale générale \mathbf{Z} et pour un point \mathbf{M} à déplacer, l'influence du voisinage de \mathbf{M} est pris en compte par la fonction de pondération moyenne

$s(x, y)$. Comme dans le cas 2D du filtre à phase correcte cette fonction affecte un poids à chaque point voisin en fonction de la distance en x et y vis-à-vis du point \mathbf{M} considéré :

$$s(x, y) = \frac{1}{\alpha \lambda_{coeq}} e^{-\pi \left(\frac{x^2 + y^2}{(\alpha \lambda_{coeq})^2} \right)} \quad (4.10)$$

avec $\alpha = \frac{\ln 2}{\pi}$. Afin de prendre en compte la forme différente du bruit de numérisation dans les deux directions (Figure 4.14) nous utilisons une longueur d'onde différente dans chacune de ces deux directions et proposons une longueur d'onde de coupure équivalente λ_{coeq} en chaque point. Cette longueur d'onde de coupure équivalente est définie par l'équation 4.11 :

$$\lambda_{coeq} = \frac{x^2 \lambda_{cox} + y^2 \lambda_{coy}}{x^2 + y^2} \quad (4.11)$$

La figure 4.16 représente la fonction de pondération 3D que nous venons de définir.

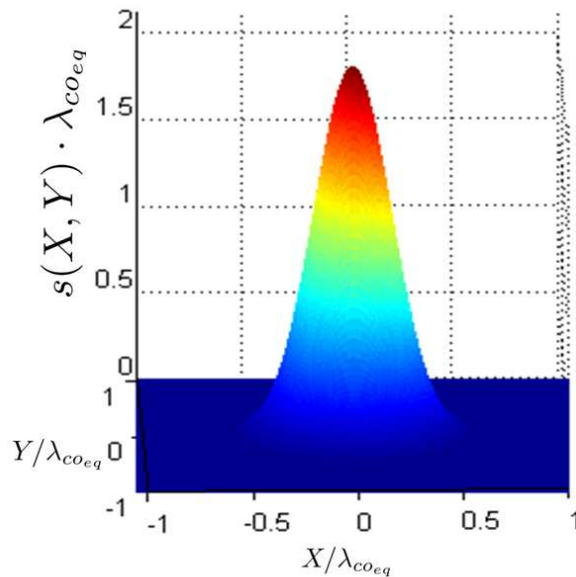


Figure 4.16 – Représentation de la fonction de pondération en deux dimensions

Les coordonnées du point filtré Z' sont données par la moyenne pondérée suivante :

$$Z' = \frac{\sum_{i=1}^n s(x_i, y_i) \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^n s(x_i, y_i)} \quad (4.12)$$

Ce filtre à phase correcte réalise donc une moyenne pondérée de l'altitude des points du

voisinage du point considéré. Les points situés à une distance supérieure à la moitié de la longueur d'onde de coupure ne sont pas influents (Figure 4.16), leur poids est très proche de 0.

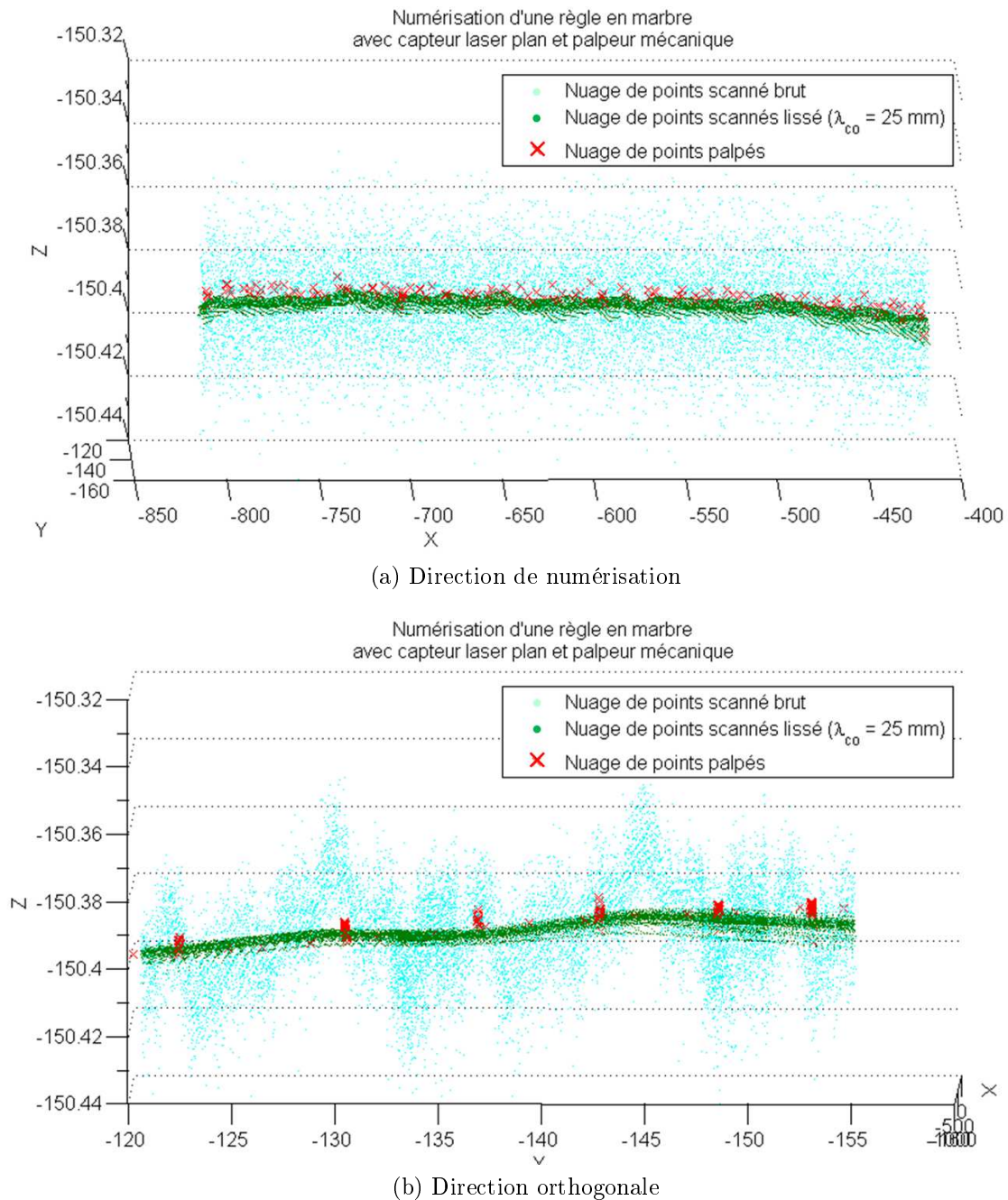


Figure 4.17 – Nuages de points avant et après lissage superposés aux données palpées

Afin d'illustrer le filtrage proposé, reprenons le cas de l'évaluation de la planéité de la règle en marbre. Le marbre a tendance à absorber la lumière projetée dessus ce qui est une forte source de perturbation pour les capteurs laser sans contact. Ceci contribue à la différence notable entre l'évaluation du défaut avec un capteur optique et un palpeur mécanique (Tableau 4.1), mais l'amplitude du bruit de numérisation n'est pas gênante

dès lors que l'on réalise un filtrage ondulatoire. La figure 4.17 représente les nuages de points brut et lissé avec une longueur d'onde de coupure de 25 mm suivant la direction orthogonale et 1 mm suivant la direction de numérisation. Les données palpées sont également représentées sur la figure de manière à montrer la performance de ce filtrage.

La figure 4.18 présente l'évolution de la valeur calculée du défaut de forme pour cette même règle en marbre en fonction de la longueur d'onde de coupure.

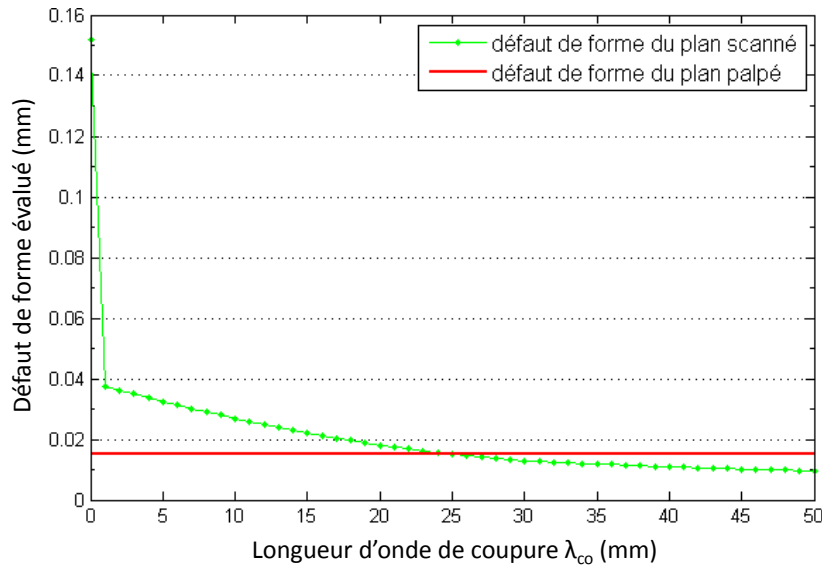


Figure 4.18 – Évolution de la planéité évaluée en fonction de la longueur d'onde de coupure

Nous constatons une forte baisse du défaut évalué à partir de 1 mm de longueur d'onde de coupure. Cette baisse rapide est due au fait que le marbre génère beaucoup de bruit, et en particulier quelques points isolés qui se retrouvent lissés rapidement. La valeur de 15 μm obtenue à partir des points palpés avec le critère de Tchebyshev a été reportée sur la figure et représente la référence à atteindre pour le filtre. Il reste donc à trouver la longueur d'onde optimale pour le filtre.

La figure 4.19 représente un zoom sur la figure précédente. Nous constatons que la courbe d'évolution de la planéité coupe la référence autour de 25 mm et qu'entre 20 et 30 mm, l'erreur entre les données lissées et les données palpées est inférieure à 3 μm (zone encadrée sur la figure).

La norme ISO 4288 [ISO4288] donne des tables permettant le choix de la longueur d'onde de coupure en fonction de l'état de surface de la pièce. Dans le cas des surfaces ayant un défaut d'état de surface important, la longueur d'onde de coupure préconisée

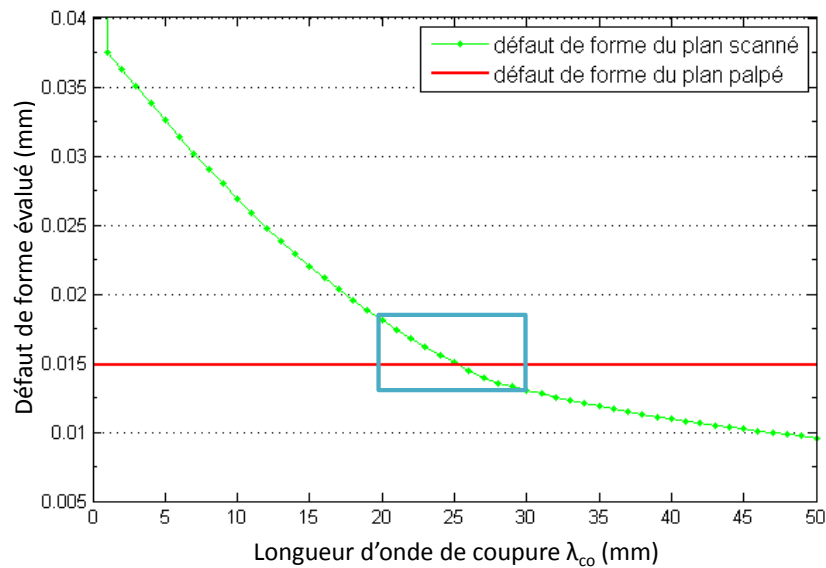


Figure 4.19 – Identification de la plage de variation admissible de la longueur d’onde de coupure

est de 40 mm. Fort de ce constat, nous pouvons en déduire que l’ordre de grandeur des longueurs d’onde de coupure admissibles que nous avons déterminé est cohérent. Par la suite nous considérons que cette plage de variation de longueur d’onde est la plage de variation optimale.

Il est important de souligner que le filtre proposé élimine le bruit de numérisation sans altération du défaut de forme. La figure 4.20 représente le bruit de numérisation résiduel après filtrage en fonction de la longueur d’onde de coupure dans le plan laser. Le bruit est évalué comme l’écart-type de la répartition des écarts au plan des moindres carrés associé aux données.

Les calculs ont été réalisés à l’aide d’un code matlab que nous avons développé spécifiquement pour cette application. Les temps de calcul sont de l’ordre de l’heure pour un nuage d’environ 10 000 points, mais le principal frein est la nécessité de décimer le nuage de points pour que le calcul puisse être réalisé. Néanmoins le résultat du filtrage est probant et le code pourrait être optimisé dans un autre langage par exemple.

Nous constatons que dans la plage de variation précédemment déterminée ($\lambda_{co} \in [20, 30]$) le bruit résiduel est inférieur à 2 μm . Notons qu’à cette échelle, et compte-tenu du défaut de forme de la règle en marbre, si faible soit-il (évaluer à 15 μm avec le TP2), le défaut évalué est autant du défaut de forme que du bruit. En d’autres termes le bruit a été éliminé par le filtre, un tel capteur ne peut pas évaluer des défauts de l’ordre du

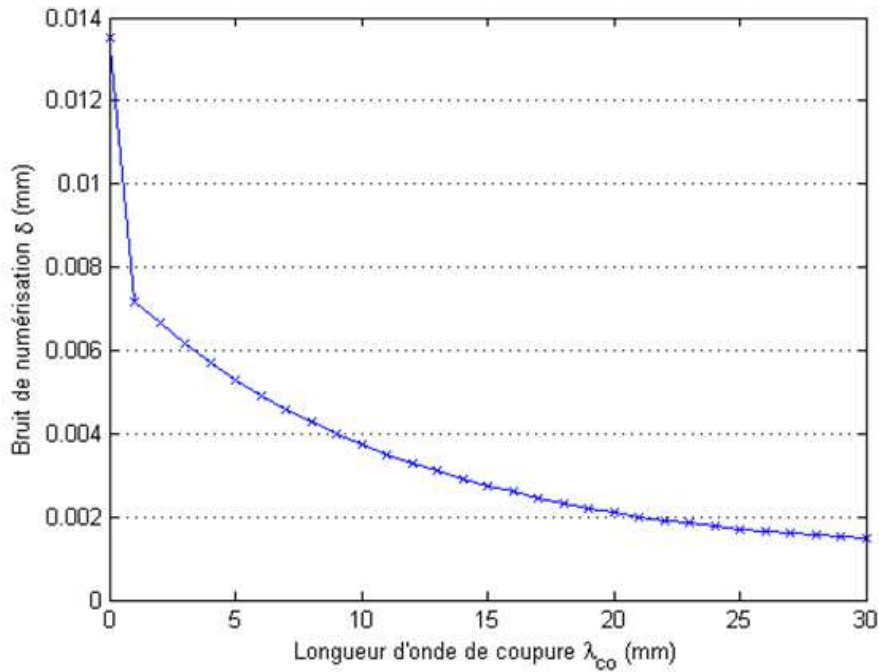


Figure 4.20 – Évolution du bruit de numérisation résiduel après lissage en fonction de la longueur d'onde de coupure

micron, il est normal d'obtenir une évaluation du bruit non nulle, même après filtrage, qui provient des défauts capteur mais aussi des défauts de la pièce.

Afin de déterminer la longueur d'onde de coupure à utiliser pour un capteur, nous proposons la démarche suivante :

1. Acquérir une règle en marbre (ou un artefact de référence plan de référence) avec un système de mesure de référence (palpeur mécanique sur MMT par exemple) ;
2. Calculer le défaut de forme avec ces données ;
3. Numériser le même artefact avec le capteur dont on souhaite filtrer les données ;
4. Filtrer les données en utilisant une longueur d'onde de coupure variant de 0 à 50 mm tous les 10 mm ;
5. Évaluer le défaut de forme pour tous les nuages ainsi créés et déterminer la longueur d'onde qui donne le résultat le plus proche de la référence ;
6. Filtrer ensuite les données avec une longueur d'onde variant tous les mm dans une zone de ± 10 mm de la longueur d'onde déterminée au point précédent ;
7. La longueur d'onde optimale est celle qui donne le résultat de défaut de forme le plus proche de la valeur de référence évaluée au point 2.

Cette démarche peut être adaptée à différentes échelles en fonction de la résolution

des capteurs, on prendra des pas de longueur d'onde plus petits pour les capteurs de micro-géométrie et des pas plus grands pour les capteurs de macro-géométrie.

4.4 synthèse

Le filtre proposé permet d'éliminer le bruit de numérisation considéré comme ondulatoire, tout en conservant le défaut de forme de la surface numérisée. Le filtre à phase correcte 3D que nous avons développé nécessite la connaissance d'une longueur d'onde de coupure relative au bruit généré qui est donc relative au capteur utilisé. Les tests sur le capteurs laser-plan Kréon Zephyr KZ25 ont permis de mettre en évidence une plage de variation optimale de la longueur d'onde de coupure qui permet d'assurer un bruit inférieur à $2\ \mu\text{m}$ pour la numérisation d'une règle en marbre, ainsi que de proposer une démarche de détermination de la longueur d'onde de coupure optimale pour d'autres capteurs.

Les limites de la méthode résident dans le fait qu'elle n'a été testée que pour les capteurs laser-plan et que le nombre de points du nuage que l'on peut prendre en compte est à l'heure actuelle très restreint. En effet, les capteurs laser-plan sont utilisés entre autres pour la grande quantité de points qu'ils fournissent, une optimisation du code du filtrage est donc indispensable. Une étude sur des capteurs à lumière structurée devrait être réalisable de la même façon que pour les capteurs laser-plan, ce qui permettrait d'élargir le champ d'application du filtre proposé.

Dans le paragraphe suivant nous proposons un exemple d'application de l'ensemble des étapes de traitement des données pour l'évaluation de caractéristiques métrologiques.

5 Métrologie d'une pièce par capteur laser-plan

Pour appliquer nos algorithmes, nous avons choisi de reprendre l'exemple du chapitre III. Il s'agit d'une bride norelem pour laquelle nous avons créé une cotation non fonctionnelle permettant d'illustrer notre propos. Le dessin de définition partiel est redonné sur la figure 4.21. Reprenons le tableau de sélection des systèmes (Tableau 4.2).

Notre étude porte ici sur les spécifications suivantes :

- une spécification de planéité ;

Surface	Système											
	KZ25 _{MMT}			LC60Dx _{MMT}			LC60Dx _{bras}			TP2 _{MMT}		
	Apt.	Qual	<i>c(k)</i>	Apt.	Qual	<i>c(k)</i>	Apt.	Qual	<i>c(k)</i>	Apt.	Qual	<i>c(k)</i>
S1 (A)	1	0	-	1	0	-	1	0	-	1	1	0.33
S2 (B)	1	1	0.35	1	0	-	1	0	-	1	1	0.30
S3 (C)	1	1	0.35	1	1	0.55	1	0	-	1	1	0.30
S4	0	-	-	0	-	-	0	-	-	1	1	0.30
S5	1	1	0.35	1	1	-	1	0	-	1	1	0.33

Tableau 4.2 – Résultat de la sélection des systèmes de numérisation

– une spécification de parallélisme.

Pour ces spécifications l'influence du bruit est notable, puisque l'élément tolérancé doit être contenu entre deux plans parallèles distants de la valeur de l'intervalle de tolérance. Or le bruit engendre quelques points situés loin de la surface numérisée.

L'étude de sélection des systèmes a montré que le plan A n'était pas « cohérent » pour une mesure avec le système KZ25_{MMT}, or l'étude précédente sur le filtrage a montré que l'on peut réduire le bruit de numérisation d'un tel système. Nous comparons donc les résultats obtenus par palpage avec un palpeur à contact TP2 et les résultats obtenus par numérisation avec le système laser-plan KZ25_{MMT}.

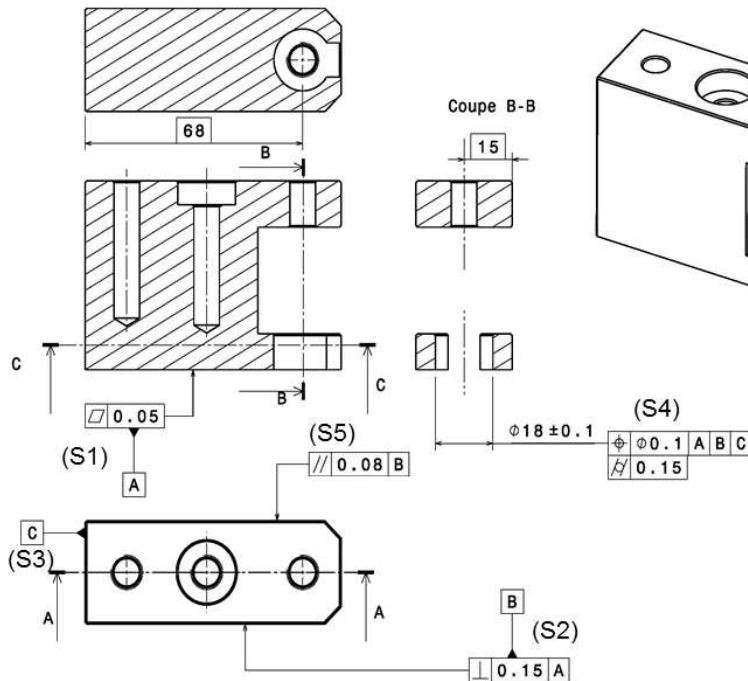


Figure 4.21 – Dessin de définition partiel de la pièce à contrôler

Les données ont été acquises avec le système KZ25_{MMT} selon plusieurs orientations.

Les différentes surfaces ont été numérisées dans les conditions optimales de bruit, c'est-à-dire avec une incidence du laser normale et une distance de numérisation minimale (120 mm), le bruit de numérisation doit être de l'ordre de 0,009 mm (cf Tableau 2.4). Les données acquises sont recalées entre-elles grâce à la calibration externe du système sur une même sphère d'étalonnage dans toutes les configurations nécessaires à l'acquisition de la pièce. Nous considérons ici qu'un recalage logiciel n'est pas nécessaire. L'évaluation du système de numérisation a en effet montré qu'en réalisant une calibration externe à chaque remise en position du système, l'erreur de recalage devient négligeable (cf Paragraphe 4.3 du chapitre II). Ici la justesse n'est pas étudiée, elle n'intervient pas dans les spécifications de planéité et de parallélisme.

Les mesures par palpage mécanique ont été réalisées en réalisant la calibration du système de mesure par palpage sur la même sphère d'étalonnage que le système $KZ25_{MMT}$. Les mesures ont été réalisées comme pour la métrologie classique sur MMT, le défaut de planéité et de parallélisme ont ainsi été évalués.

Afin d'évaluer les défauts de planéité et de parallélisme sur données numérisées, nous présentons les résultats de la segmentation puis de nos algorithmes de filtrage.

5.1 Segmentation

La numérisation conduit au nuage brut nettoyé de 1 400 000 points (Figure 4.22a). Compte tenu des configurations de numérisation le bruit de numérisation attendu est de 0,009 mm. L'application de la méthode de segmentation décrite au paragraphe 3 conduit à isoler les nuages des cinq surfaces (Figure 4.22b).

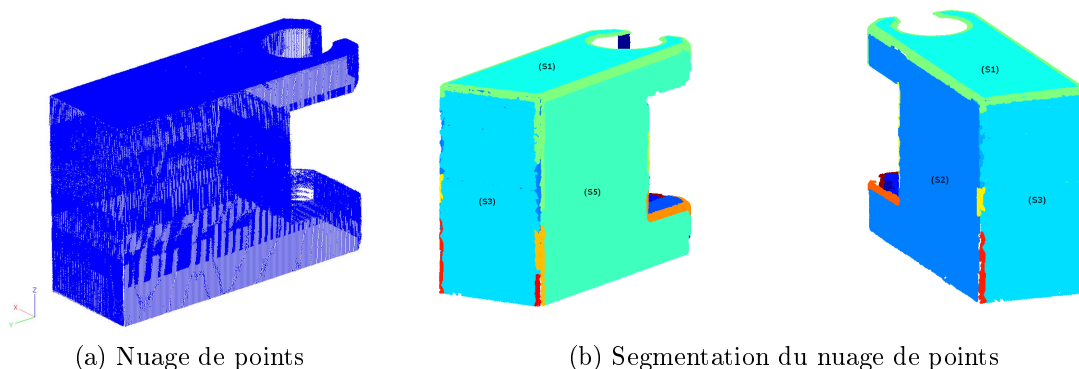


Figure 4.22 – Segmentation de la pièce norelem

5.2 Filtrage

5.2.1 Spécification de forme

L'intervalle de tolérance de la spécification de planéité est de 0,05 mm ; l'ensemble des points de l'élément dérivé extrait, doit être contenu entre deux plans parallèles distants de 0,05 mm. Lorsque l'on applique cette définition au nuage de points brut, nous obtenons un défaut de forme également de 0,05 mm. La pièce peut donc être validée, mais compte tenu de l'incertitude liée à la numérisation avec un système de mesure sans contact, nous souhaitons évaluer le défaut de forme avec moins d'incertitude. La valeur obtenue à partir du palpé des points est de 0,026 mm. Nous notons une différence d'un facteur de l'ordre de 2. Les écarts évalués sur la règle en marbre (paragraphe 4.3) étaient beaucoup plus importants, ce qui est dû au fait que le marbre est une surface très absorbante donc génératrice de bruit, alors que la surface de la pièce numérisée est une surface peinte beaucoup moins absorbante.

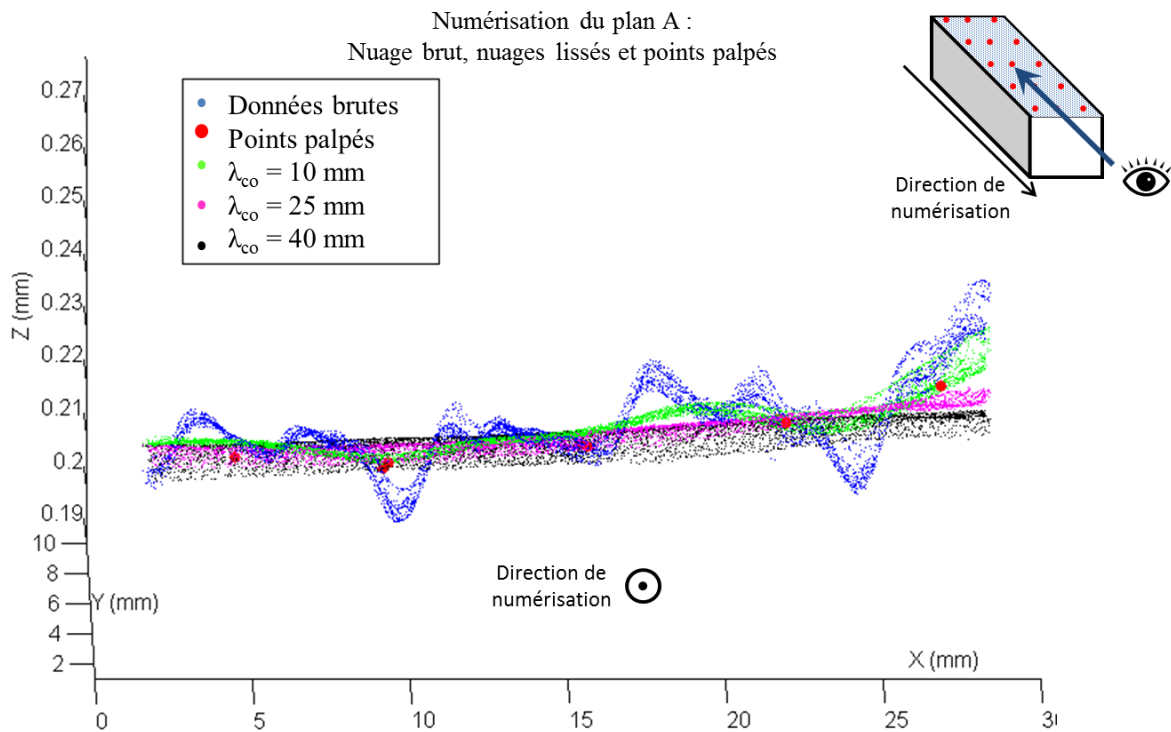


Figure 4.23 – Nuages de points avant et après filtrage pour le plan A : influence de la longueur d'onde de coupure du filtre

La figure 4.23 représente les nuages de points filtrés avec différentes longueurs d'onde de coupure, ainsi que les points palpés. Nous constatons qu'une longueur d'onde de coupure de 10 mm n'est pas suffisante et qu'une longueur d'onde de coupure de 40 mm semble trop grande et conduit à un lissage trop fort. Ces constatations concordent avec

les résultats obtenus sur la règle en marbre qui donne un intervalle de $[20, 30]$ mm pour λ_{co} .

L'application du filtre à phase correcte sur le nuage de points permet donc de diminuer significativement l'erreur sur l'évaluation du défaut de forme (Figure 4.24). Une longueur d'onde choisie entre 20 et 30 mm donne une erreur par rapport au résultat obtenu par palpation inférieure à $3 \mu\text{m}$.

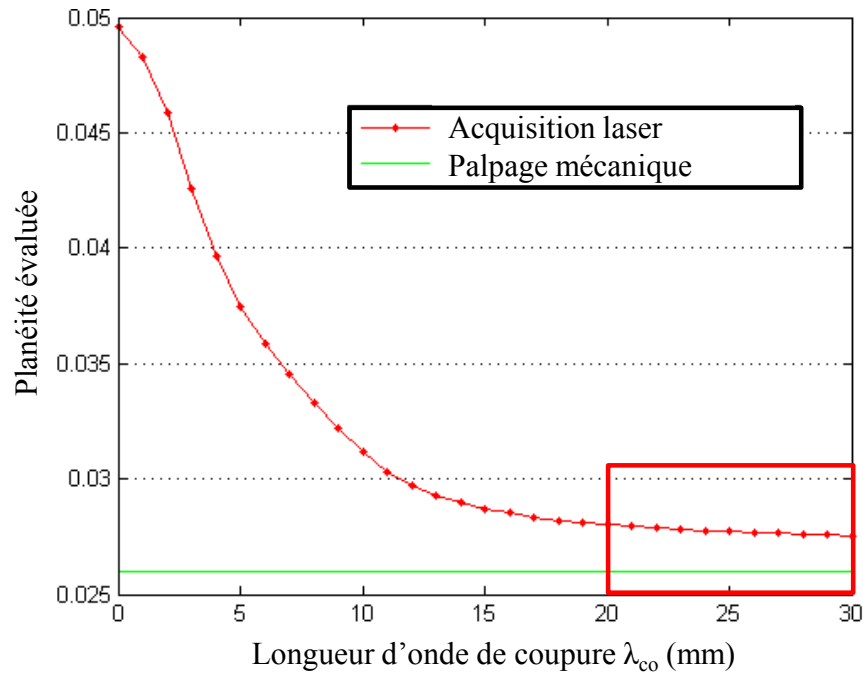


Figure 4.24 – Évolution de la planéité évaluée en fonction de la longueur d'onde de coupure λ_{co}

Notons que les résultats de défaut de planéité obtenus par lissage des points numérisés restent supérieurs au résultat obtenu par palpation mécanique. Le palpement mécanique génère un nombre limité de points, bien moins important que celui obtenu par numérisation sans contact. Il est donc tout-à-fait cohérent de considérer que les points obtenus par palpation ne contiennent pas forcément les points réels de la surface les plus défavorables vis-à-vis du calcul du défaut. Les points dont il est question sont ceux les plus éloignés et qui sont en contact avec les deux plans parallèles les plus proches possible englobant tous les points. La valeur du défaut de forme calculée à partir des points palpés constitue donc une borne inférieure du défaut de forme de la surface, ce qui justifie que l'on trouve un résultat plus grand pour la mesure d'un défaut de forme avec un capteur optique.

Finalement, en utilisant la valeur de 25 mm comme longueur d'onde de coupure pour le filtrage des nuages de points obtenus avec notre système de numérisation, l'erreur sur le défaut de forme évalué est de 0,002 mm, elle était de 0,024 mm sur le nuage brut.

Dans ces conditions nous pouvons conclure au respect de la spécification de planéité du dessin de définition (Figure 4.21). Nous retiendrons donc de ces résultats que l'utilisation du capteur laser-plan Kréon Zephyr KZ25 sur MMT est possible pour l'évaluation d'un défaut de forme d'une pièce dont le matériau n'est pas trop absorbant, moyennant une étape de filtrage décrite ci-dessus.

5.2.2 Spécification d'orientation

Dans le cadre de la norme ISO 8015 [ISO8015], la zone de tolérance d'une spécification de parallélisme d'intervalle de tolérance 0,08 mm est comprise entre deux plans parallèles au plan de référence (ici B) distants de 0,08 mm. La référence spécifiée B est le plan tangent extérieur matière qui minimise le défaut de forme (plan obtenu par association avec le critère minmax ou Tchebyshev). Il est donc une fois de plus inapproprié d'utiliser le nuage de points brut pour lequel la position et l'orientation de la surface de référence ne seront pas garanties.

Le défaut de parallélisme a été également évalué à partir des données palpées en utilisant le critère d'association minmax comme préconisé dans la norme. ces données donne un résultat de défaut de parallélisme de 0,065 mm. La valeur obtenue sur les données brutes, pour la surface de référence et la surface tolérancée est de 0.095 mm.

Le filtre proposé a donc été appliqué aux données relatives aux deux plans : l'élément de référence et l'élément tolérancé. La figure 4.25 présente le résultat de l'évaluation du parallélisme en fonction des paramètres de filtrage.

Nous avons fait varier les longueurs d'onde de coupure pour le filtrage des deux plans entre 0 et 30 mm afin de valider notre méthode de filtrage pour les spécifications d'orientation.

Nous constatons que l'augmentation de la longueur d'onde de coupure pour le plan tolérancé diminue la valeur du défaut calculé, alors que pour l'élément de référence, l'évolution du défaut de parallélisme calculé a une forme de cuvette. Le défaut diminue entre 0 et 20 mm, puis il augmente par la suite. Ceci est dû au fait que pour le plan de référence, ce n'est pas le défaut de forme qui est important, mais l'orientation du plan. De ce fait, lorsque les données sont trop lissées, ou pas suffisamment, l'orientation du

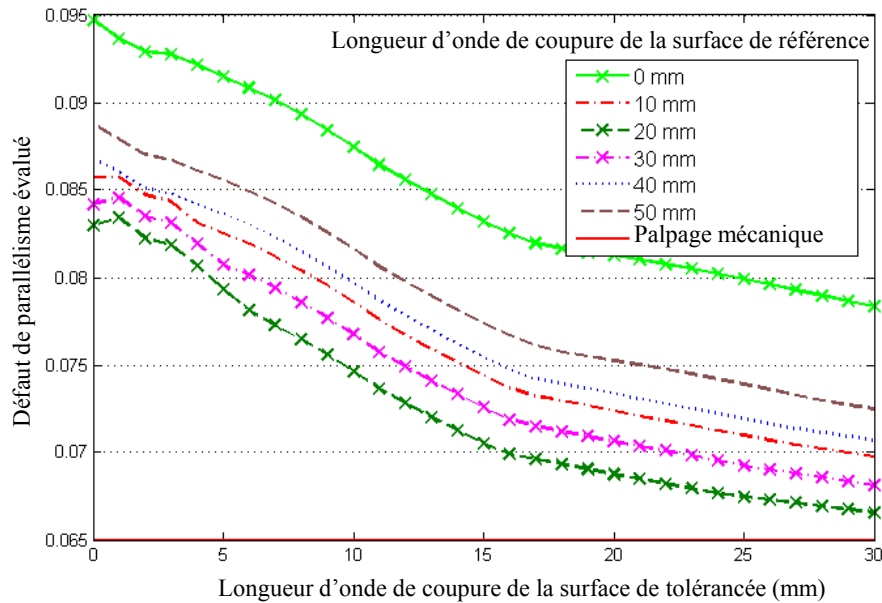


Figure 4.25 – Évolution de la valeur calculée du défaut de parallélisme en fonction des longueurs d'onde de coupure du plan de référence et du plan tolérancé

plan associé n'est pas conforme à l'orientation réelle du plan.

Pour une longueur d'onde comprise entre 20 et 30 mm pour chacun des plans, l'erreur par rapport aux résultats obtenus par palpé est inférieure à $6 \mu\text{m}$, ce qui paraît acceptable pour un système de numérisation avec un capteur laser-plan. Finalement, le défaut de parallélisme évalué sur les données brutes supérieur à l'intervalle de tolérance est évalué conforme à la spécification avec le filtrage proposé ainsi qu'à l'aide du palpé mécanique. En conséquence, il apparaît indispensable de filtrer les données obtenues avec des capteurs optiques, et le filtre que nous proposons semble être adapté pour le calcul de défauts d'orientation.

5.3 Synthèse

Nous pouvons donc conclure, pour les spécifications de planéité et de parallélisme, que l'utilisation du nuage de points brut issu de la numérisation par capteur optique n'est pas envisageable si l'on souhaite respecter les critères d'association définis par la norme ISO 8015 [ISO8015]. Il est donc nécessaire d'utiliser une représentation filtrée du nuage brut. Pour cela nous avons mis en place un filtre des données basé sur le filtre à phase correcte de la norme sur l'évaluation des états de surface [ISO11562] afin d'éliminer le bruit et les défauts dus au capteur dans le nuage de points, tout en gardant le défaut

d'ondulation de la surface. Après cette étape de filtrage, les nuages de points peuvent être utilisés comme s'ils étaient issus d'une acquisition par palpation à contact, avec pour différence majeure leur grande densité qui confère une très bonne représentativité de la peau de la surface.

6 Conclusion

Les caractéristiques des nuages de points issus de la numérisation sans contact font qu'ils sont difficiles à exploiter sans opérations préalables. Nous avons proposé trois opérations indispensables pour l'utilisation du nuage de points en inspection 3D : recalage des données, segmentation et filtrage des données.

Nous avons montré d'une part la nécessité de recalage des données acquises afin que les données soient cohérentes ou afin de recaler les données sur un modèle. Une méthode permettant de dresser rapidement une cartographie d'écart par rapport à un modèle CAO a été proposée. Cette méthode est basée sur l'utilisation du torseur des petits déplacements [BOU87] qui permet d'être implémentée et exécutée rapidement sur un logiciel de calcul tel que matlab.

La segmentation permet de partitionner les données en surfaces élémentaires traitées séparément par la suite. Dans une démarche d'inspection 3D automatique multi-systèmes, les méthodes de segmentation automatiques prennent tout leur sens. Nous avons décrit dans ce chapitre une méthode développée avec le CMLA permettant de segmenter les grands nuages de points bruités tels que ceux obtenus avec des capteurs laser-plan.

Enfin le filtrage des données bruitées est indispensable dans un but métrologique. En effet, afin de respecter la norme pour l'évaluation des défauts géométriques, les données bruitées ne sont pas exploitables. Nous avons donc proposé un filtre basé sur l'aspect ondulatoire des données afin d'éliminer le bruit de numérisation sans altérer le défaut de forme de la surface. Le filtre proposé s'appuie sur le filtre à phase correcte de la norme ISO [ISO11562], et a été testé sur les données bruitées pour l'évaluation d'un défaut de planéité et un défaut de parallélisme. Par la suite, les performances du filtre proposé devront être évaluées sur des spécifications de position, des spécifications avec des systèmes de référence, ainsi que sur des surfaces non planes.

La démarche mise en place permet donc à partir de spécifications géométriques de

réaliser un choix des systèmes de numérisation pour l'acquisition de la pièce. Ce choix est rendu possible à partir de la qualification des systèmes de mesure présenté au chapitre II. À partir des données numérisées, l'évaluation des caractéristiques nécessite une étape de traitement et analyse des données, en particulier les trois opérations décrites ci-dessus. L'opération finale d'évaluation des caractéristiques métrologiques (évaluation du défaut de forme, de parallélisme) est alors possible sur les données traitées, cohérentes avec les besoins métrologiques (nuages de points recalés, segmentés et bruit de numérisation éliminé).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans un contexte d'inspection et de contrôle 3D des pièces mécaniques dans lequel l'utilisation de systèmes de mesure sans contact est de plus en plus répandue, nous avons répondu à différentes problématiques engendrées par ces moyens de mesure. Nous avons proposé une approche globale permettant de définir les différentes activités du processus d'inspection 3D multi-systèmes, le but étant d'avoir pour entrée une pièce mécanique à contrôler et son modèle CAO tolérancé, afin d'obtenir en sortie un rapport de contrôle et une représentation numérique de la pièce. Nous avons en particulier mis en place une base solide pour répondre aux problématiques liées à la métrologie 3D multi-systèmes.

Pour répondre à la demande industrielle réelle qui résulte de l'absence de normes sur les spécifications techniques des moyens de mesure sans contact, notre contribution a permis la définition de méthodes et de procédures pour l'évaluation des performances des systèmes optiques. Nous avons ainsi mis en place une standardisation des indicateurs de la qualité des données obtenues avec des systèmes de numérisation sans contact ainsi qu'un protocole de qualification (nommé « QualiPSO ») permettant l'évaluation de ces indicateurs pour la plupart des systèmes de numérisation sans contact optiques actifs. Ainsi, le bruit de numérisation et la justesse sont les deux indicateurs de la qualité des données pris en compte, ce sont en effet les facteurs prépondérants dans la qualité des données acquises avec des systèmes de mesure optiques. Différents indicateurs relatifs aux systèmes de numérisation ont également été proposés et définis tels que la qualité de la calibration du système, l'influence des défauts de remises en position, etc. Ces indicateurs permettent de réaliser des choix pour la stratégie de numérisation (minimisation du nombre d'orientations capteur, recalibration du système à chaque remise en position). Pour chacun de ces indicateurs, un protocole d'évaluation a été mis en place permettant de s'adapter aux différents couples capteur/porteur (fenêtre de mesure 1D, 2D ou 3D, et porteurs pilotables, non pilotables et ayant plusieurs configurations articulaires possibles pour une configuration capteur/pièce). Le protocole QualiPSO peut être mis en œuvre de manière simple à partir d'artefacts de numérisation classiques, ce qui permet une mise

à disposition pour les différents laboratoires et industriels qui nécessitent une évaluation de la qualité de leurs systèmes de numérisation optiques. Le protocole a ainsi été mis en œuvre et validé par différents utilisateurs⁵ en autonomie, sur différents systèmes (bras, MMT, lumière structurée, laser-plan, etc.). Les retours d'expérience ont permis d'améliorer la généralité de l'approche.

La finalité du protocole QualiPSO est d'enrichir une base de données de systèmes qualifiés interrogée par la suite pour sélectionner des systèmes selon un critère de qualité. Notre contribution à travers ces travaux a donc été la définition et le développement d'une base de données dans laquelle sont stockées des données intrinsèques aux capteurs et porteurs, essentiellement issues des documents constructeur, ainsi que les données qualifiées déterminées lors de la qualification des systèmes. La base est organisée en tables, ce qui permet une structuration des données évitant les redondances d'information et donc les erreurs de saisie. La base de données ainsi élaborée a pour but d'être instanciée au fil du temps avec les données obtenues avec les différents utilisateurs du protocole QualiPSO, et peut être interrogée rapidement à l'aide de requêtes SQL.

La qualité des systèmes étant connue, et une base de données contenant ces informations étant disponible, l'une des étapes majeures du processus d'inspection 3D multi-systèmes est le choix du ou des systèmes de numérisation pour l'acquisition de la pièce. La contribution de ces travaux réside dans la proposition d'une démarche de sélection du meilleur système de numérisation en termes de qualité (bruit, justesse) et de performances (vitesse de numérisation) pour chacune des surfaces à numériser. Cette activité est basée sur l'utilisation de la base de données présentée ci-dessus. La sélection du système est réalisée en deux temps. Dans un premier temps, les systèmes admissibles sont identifiés. L'admissibilité est considérée en termes d'aptitude du système à acquérir la surface (flexibilité pièce, accessibilité, échelle de mesure, etc.) ainsi qu'en termes de qualité des données fournies (bruit et justesse) afin de mettre à l'écart les systèmes inadaptés à l'application. Dans un second temps une optimisation permet de sélectionner le système le moins coûteux pour la numérisation. Le coût de numérisation est obtenu à partir d'indices de coût liés à la vitesse de numérisation (en imposant ou non une densité) et la complexité de numérisation (taille de la fenêtre de mesure). Nous avons donc mis en place une démarche permettant de sélectionner notamment des systèmes de mesure sans contact lorsque cela est possible (plus rapides, donc souvent moins coû-

5. LURPA, Le2i, IRCCyN

teux). Cependant les données fournies par ces systèmes ne peuvent généralement pas être utilisées directement et nécessitent un post-traitement.

L'activité de traitement et analyse des données apparaît donc comme une autre étape majeure du processus d'inspection 3D multi-systèmes. En effet, les données brutes denses, bruitées, exprimées dans différents repères (plusieurs systèmes de numérisation, plusieurs posages) nécessitent un traitement en vue de l'évaluation des caractéristiques géométriques et dimensionnelles. Les trois opérations que nous avons détaillées sont le recalage des données entre elles, la segmentation ainsi que le lissage des données.

Nous avons montré d'une part la nécessité de recalage des données acquises afin de les rendre cohérentes ou dans le but de recaler les données sur un modèle. Une méthode permettant de dresser rapidement une cartographie d'écarts par rapport à un modèle CAO a été proposée. Cette méthode est basée sur l'utilisation du torseur des petits déplacements permettant une implémentation et une exécution rapides sur un logiciel de calcul tel que matlab.

La segmentation proposée a permis de partitionner les données en surfaces élémentaires traitées séparément pour l'évaluation des caractéristiques. Dans une démarche d'inspection 3D automatique multi-systèmes, les méthodes de segmentation automatiques prennent tout leur sens. Nous avons décrit une méthode développée avec le CMLA permettant de segmenter les grands nuages de points bruités, notamment obtenus avec des capteurs laser-plan.

Enfin le lissage des données bruitées est indispensable dans un but métrologique. En effet, si l'on souhaite respecter les recommandations de la norme pour l'évaluation des défauts géométriques, les données bruitées ne sont pas exploitables. Nous avons donc élaboré un filtre permettant d'éliminer le bruit en conservant le défaut de forme de la surface. Ce filtre est basé sur l'aspect ondulatoire des données, le défaut de forme est assimilé à un profil de grande longueur d'onde et le bruit est assimilé à un profil de courte longueur d'onde que l'on peut supprimer. Le filtre proposé s'appuie sur le filtre à phase correcte de la norme ISO [ISO11562], et a donné des résultats probants sur les données bruitées pour l'évaluation d'un défaut de planéité et un défaut de parallélisme. Ainsi nous avons montré qu'il devient possible de réaliser de la métrologie 3D avec des systèmes de mesure optiques moyennant une étape de lissage des données. À ce niveau notre contribution a été l'élaboration, la mise en œuvre, et la validation de ce filtre de lissage.

Les perspectives relatives à ces travaux se situent au niveau de chacune des activités présentées.

Le protocole QualiPSO pourra être étendu aux systèmes utilisant des capteurs optiques passifs voire des capteurs sans contact différents. La mise en œuvre actuelle du protocole nécessite l'emploi d'artefacts classiques (cales étalon, sphères), mais chaque utilisateur utilise ses propres artefacts. La comparaison des résultats obtenus par les différents utilisateurs est donc biaisée. Nous suggérons par la suite que les artefacts recommandés dans le protocole soient uniques et disponibles pour une utilisation dans les différents laboratoires, ce qui permettrait de réduire le biais dans la qualification des systèmes de mesure.

La démarche de sélection des systèmes de numérisation a également ses limites, elle ne prend pas en compte à l'heure actuelle le coût lié au changement de système de numérisation ou au changement de posage de la pièce entre les numérisations de deux surfaces différentes. Pour ce faire, un premier axe d'amélioration serait de réaliser l'étude en termes d'entités métrologiques et non plus en surfaces, choix que nous avons écarté jusqu'à présent car la planification des trajectoires de numérisation est réalisée surface par surface et non entité par entité. Le second axe d'amélioration serait d'évaluer le coût réel de changement de système en évaluant le temps de changement ainsi que le coût lié au traitement des données issues de systèmes différents. Concernant la sélection des systèmes, une automatisation complète de l'outil constitue une perspective à court terme, les problématiques étant purement techniques et non théoriques.

Enfin pour le traitement des données, en particulier pour le lissage, la méthode devra être testée pour des surfaces non planes, dans un premier temps avec de faibles courbures, puis sur des sphères. La méthode de choix de la longueur d'onde de coupure devra être optimisée pour les différents types de capteurs et les différentes surfaces. L'évaluation des caractéristiques métrologiques sur des plans devra également être testée pour des spécifications de localisation ainsi que des spécifications présentant un système de références.

RÉFÉRENCES

Sommaire

Bibliographie	200
Normes	216

Bibliographie

- [AGU96] Juan-José AGUILAR, F. TORRES et M.A. LOPE : Stereo vision for 3d measurement : accuracy analysis, calibration and industrial applications. *Measurement*, 18(4):193 – 200, août 1996.
- [AIN00] I. AINSWORTH, M. RISTIC et D. BRUJIC : Cad-based measurement path planning for free-form shapes using contact probes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(1):23–31, janvier 2000.
- [ALL07] P. ALLIEZ, D. COHEN-STEINER, Y. TONG et M. DESBRUN : Voronoi-based variational reconstruction of unoriented point sets. *In Proceedings of the fifth Eurographics symposium on Geometry processing*, SGP '07, pages 39–48, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2007. Eurographics Association.
- [ALR00] Abdalla ALRASHDAN, Saeid MOTAVALLI et Behrooz FALLAHI : Automatic segmentation of digitized data for reverse engineering applications. *In IIE transactions*, volume 32, pages 59–69, janvier 2000.
- [ARA11] K. ARÁMBULA, H. R. SILLER, L. DE CHIFFRE, C. A. RODRÍGUEZ et A. CANTATORE : Evaluation of metrology technologies for free form surfaces. *In 15ème congrès international de métrologie*, 2011.
- [AUD09] Nicolas AUDFRAY : Numérisation intelligente basée sur des critères qualité. Mémoire de Master, École Normale Supérieure de Cachan, 2009.
- [AUD10] Nicolas AUDFRAY, Charyar MEHDI-SOUZANI, Nabil ANWER, Haibin ZHAO et Claire LARTIGUE : Méthodes d'identification de caractéristiques géométriques d'un nuage de points issu de la mesure 3d sans contact. *In GTMG 2010*, 2010.
- [AUD11] Nicolas AUDFRAY, Charyar MEHDI-SOUZANI et Claire LARTIGUE : Traitement des données issues de la numérisation 3d pour des applications en métrologie. *In 15ème Congrès International de Métrologie*, Paris, octobre 2011.
- [AUD12] Nicolas AUDFRAY, Charyar MEHDI-SOUZANI et Claire LARTIGUE : Assistance to automatic digitizing system selection for part inspection. *In ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design And Analysis*, Nantes (France), juillet 2012.

- [AUD12a] Nicolas AUDFRAY, Charyar MEHDI-SOUZANI et Claire LARTIGUE : A novel approach for 3d part inspection using laser-plane sensors. *In 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, Huddersfield (UK), 2012.
- [BAR11] Basilio Ramos BARBERO et Elena Santos URETA : Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design*, 43(2): 188 – 206, 2011.
- [BAR91] Réjean BARIBEAU et Marc RIOUX : Influence of speckle on laser range finders. *Applied Optics*, 30(20):2873–2878, juillet 1991.
- [BEL05] Alexander BELYAEV et Elena ANOSHKINA : Detection of surface creases in range data. *In Springer Berlin / HEIDELBERG, éditeur : Mathematics of Surfaces XI*, volume 3604/2005, pages 50–61, 2005.
- [BEN01] Pál BENKŐ, Ralph R. MARTIN et Tamás VÁRADY : Algorithms for reverse engineering boundary representation models. *Computer-Aided Design*, 33(11):839 – 851, 2001.
- [BEN04] Pál BENKŐ et Tamás VÁRADY : Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects. *Computer-Aided Design*, 36(6):511 – 523, 2004.
- [BER07] Alain BERNARD, F. LAROCHE, S. AMMAR-KHODJA et N. PERRY : Impact of new 3d numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1):143 – 148, 2007.
- [BER99a] Fausto BERNARDINI, Joshua MITTLEMAN, Holly RUSHMEIER, Cláudio SILVA et Gabriel TAUBIN : The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4):349–359, octobre 1999.
- [BES92] P. J. BESL et N. D. MCKAY : A method for registration of 3d shape. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, février 1992.
- [BLA92] W. Dale BLAIR, Theodorre R. RICE, Brendan S. MCDOLE et E. M. SPROUL : Least-squares approach to asynchronous data fusion. *Proceedings of the SPIE*, 1697(130):130–141, 1992.
- [BOU87] Pierre BOURDET : Contribution à la mesure tridimensionnelle : Modele d'identification des surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, correction géo-

- metrique des machines à mesurer tridimensionnelles. thèse d'état de l'Université de Nancy I, 1987.
- [BOU98] Pierre BOURDET, Claire LARTIGUE et Alexandre CONTRI : Les capteurs 3d état de l'art, problématique liée à la précision des systèmes de numérisation 3d. *In 3ème Congrès Numérisation3D/Human Modelling*, Paris, 27-28 mai 1998.
- [BOU96] Pierre BOURDET, Luc MATHIEU, Claire LARTIGUE et Alexandre BALLU : The concept of the small displacement taylor in metrology. *Advanced Mathematical Tools in Metrology II*, 40:110–122, 1996. Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences.
- [BOU05] Pierre BOURDET, François THIEBAUT, Claire LARTIGUE et Pierre BRETEAU : Évaluation des performances de la mesure par capteur optique sur machine à mesurer tridimensionnelle. *In 12ème Congrès International de Métrologie*, Lyon, juin 2005.
- [BRE06] C BRECHER, Mirco VITR et Jochen WOLF : Closed-loop capp/cam/cnc process chain based on step and step-nc inspection tasks. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 19:570–580, février 2006.
- [CAR01] V. CARBONE, V. CAROCCI, E. SAVIO, G. SANSONI et L. DE CHIFFRE : Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17:263–271, janvier 2001.
- [CHA01] V. H. CHAN, C. BRADLEY et G. W. VICKERS : A multi-sensor approach to automating co-ordinate measuring machine-based reverse engineering. *Computers in Industry*, 44(2):105 – 115, mars 2001.
- [CHA98] Florent CHAVAND et Etienne COLLE : *Perception de l'environnement en robotique*. Hermès, 1998. collection robotique.
- [CHE91] Y. CHEN et G. MEDIONI : Object modeling by registration of multiple range image. *In IEEE Conference on Robotics and Automation*, 1991.
- [CHE95] Wei-Lun CHENG et Chia-Hsiang MENQ : Integrated laser/cmm system for the dimensional inspection of objects made of soft material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 10(1):36–45, 1995.
- [CHO02] M.-W. CHO et T.-I. SEO : Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on cad/cam/cai integration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19:607–617, 2002.

-
- [CHO04] Myeong-Woo CHO, Honghee LEE, Gil-Sang YOON et Jin-Hwa CHOI : A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement – Part II : Local inspection planning –. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 18(8): 1358–1367, 2004.
- [CHO05] Myeong-Woo CHO, Honghee LEE, Gil-Sang YOON et Jinhwa CHOI : A feature-based inspection planning system for coordinate measuring machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(9-10):1078–1087, 2005.
- [CHR04] R. CHRISTOPH et H. NEUMANN : Multisensor coordinate metrology : Measurement of form, size, and location in production and quality control. *verlag moderne industrie*, 2004.
- [CON02a] A. CONTRI, P. BOURDET et C. LARTIGUE : Quality of 3d digitised points obtained with non-contact optical sensors. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1):443 – 446, 2002.
- [CON02] Alexandre CONTRI : *Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [CON01] Alexandre CONTRI et Claire LARTIGUE : Une méthode d'évaluation des incertitudes de mesure des surfaces complexes par moyens optiques. *In 7ème Colloque PRIMECA '01*, La Plagne, 2-4 avril 2001.
- [COS07] Renaud COSTADOAT : Implantation d'un capteur stil dans une cellule de mesure multi-capteurs. Mémoire de Master, École Normale Supérieure de Cachan, 2007.
- [DEM07] Kris DEMARSIN, Denis VANDERSTRAETEN, Tim VOLODINE et Dirk ROOSE : Detection of closed sharp edges in point clouds using normal estimation and graph theory. *Computer-Aided Design*, 39(4):276 – 283, 2007.
- [DER07] William DERIGENT, Emilie CHAPOTOT, Gabriel RIS, Sébastien REMY et Bernard ALAIN : 3d digitizing strategy planning approach based on a cad model. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(1):10–19, 2007.
- [DER05] William DERINGENT, Emilie CHAPOTOT et Gabriel RIS : Contrôle de pièce par capteur laser - définition de fonctions d'aide à la numérisation. *In CPI'2005 Casablanca, Morocco*, 2005.
- [DIG10b] J. DIGNE, J.-M. MOREL, N. AUDFRAY et C. LARTIGUE : High Fidelity Scan Merging. *In Olga SORKINE et Bruno LEVY, éditeurs : SGP10 : Eurographics Sym-*
-

- posium on Geometry Processing*, pages 1643–1651, Lyon, France, 2010. Eurographics Association.
- [DIG10a] Julie DIGNE : *Inverse Geometry : from the Raw Point Cloud to the 3D Surface – Theory and algorithms*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, novembre 2010.
- [DIG11a] Julie DIGNE, Nicolas AUDFRAY, Claire LARTIGUE, Charyar MEHDI-SOUZANI et Jean-Michel MOREL : Farman Institute 3D Point Sets - High Precision 3D Data Sets. *Image Processing On Line*, 2011.
- [DIG10] Julie DIGNE, Jean-Michel MOREL, Nicolas AUDFRAY et Charyar MEHDI-SOUZANI : The level set tree on meshes. *In 3DPTV 2010*, Paris, France, mai 2010.
- [DIG11] Julie DIGNE, Jean-Michel MOREL, Charyar-Mehdi SOUZANI et Claire LARTIGUE : Scale space meshing of raw data point sets. *Computer Graphics Forum*, 30(6):1630–1642, 2011.
- [DOC76] Manfredo P. do CARMO : *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Prentice-Hall, Rio de Janeiro, Brazil, 1976.
- [DUR88] Hugh F. DURRANT-WHYTE : Sensor models and multisensor integration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 7(6):97–113, décembre 1988.
- [DUR10] Alexandre DURUPT, Sébastien REMY et Guillaume DUCCELLIER : Reverse engineering of a piston using knowledge based reverse engineering approach. *In 20th CIRP Design Conference*, 2010.
- [EDE94] Herbert EDELSBRUNNER et Ernst P. MÜCKE : Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 13(1):43–72, janvier 1994.
- [ELM04] W.H. EIMARAGHY et R.J. URBANIC : Assessment of manufacturing operational complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1):401 – 406, 2004.
- [ELM05] H.A. ELMARAGHY, O. KUZGUNKAYA et R.J. URBANIC : Manufacturing systems configuration complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1):445 – 450, 2005.
- [ELM03] W.H. ELMARAGHY et R.J. URBANIC : Modelling of manufacturing systems complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1):363 – 366, 2003.

-
- [FAN98] Kuang-Chao FAN et Ming C. LEU : Intelligent planning of cad-directed inspection for coordinate measuring machines. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 11(1-2):43 – 51, mai 1998.
- [FEN01] Hsi-Yung FENG, Yixin LIU et Fengfeng XI : Analysis of digitizing errors of a laser scanning system. *Precision Engineering*, 25(3):185 – 191, 2001.
- [FER08] Pedro FERNÁNDEZ, J. Carlos RICO, Braulio J. ÁLVAREZ, Gonzalo VALIÑO et Sabino MATEOS : Laser scan planning based on visibility analysis and space partitioning techniques. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(7-8):699–715, novembre 2008.
- [FIN08] Andrew O. FINLEY et Ronald E. MCROBERTS : Efficient k-nearest neighbor searches for multi-source forest attribute mapping. *Remote Sensing of Environment*, 112(5):2203–2211, mai 2008. Earth Observations for Terrestrial Biodiversity and Ecosystems Special Issue.
- [FLE03] Shachar FLEISHMAN, Iddo DRORI et Daniel COHEN-OR : Bilateral mesh denoising. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):950–953, juillet 2003.
- [FOU06] M. FOURNIER, Dischler J.-M. et D. BECHMANN : Filtrage adaptatif des données acquises par un scanner 3d et représentées par une transformée en distance volumétrique. In J.-C. GONZATO et J.-P. JESSEL, éditeurs : *Journées AFIG - Bordeaux*, 2006.
- [GAN94] Jacob Gah-Kok GAN, Tony C. WOO et K TANG : Spherical maps : Their construction, properties, and approximation. *Journal of Mechanical Design*, 116(2):357–363, juin 1994.
- [GOM] GOM - SOCIÉTÉ DE MESURES PAR MÉTHODES OPTIQUES : www.gom.com.
- [GOU97] Jean-Pierre GOURE et Gérard BRUN : Bruit dans les mesures optiques. In *Techniques de l'ingénieur R358*. Techniques de l'ingénieur, 10 mars 1997.
- [GU96] P. GU et K. CHAN : Generative inspection process and probe path planning for coordinate measuring machines. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(4):240 – 255, 1996.
- [GUE03] Philippe GUERMEUR et Jean LOUCHET : An evolutionary algorithm for camera calibration. In *Proceedings of the International Conference on Robotics Distance Learning & Intelligence Communication Systems (ICRODIC'03)*, pages 799 – 804, Rethymno, Greece, octobre 2003.
-

- [GUM01] Stefan GUMHOLD, Xinlong WANG et Rob MACLEOD : Feature extraction from point clouds. *In 10th International Meshing Roundtable*, 2001.
- [HEI03] Michael HEIZMANN et Fernando Puente LEÓN : Imaging and analysis of forensic striation marks. *Optical Engineering*, 42(12):3423, 2003.
- [HEP09] Peng HEPING et Jiang XIANGQIAN : Evaluation and management procedure of measurement uncertainty in new generation geometrical product specification (gps). *Measurement*, 42(5):653 – 660, 2009.
- [HIL98] A. HILTON, A.J. STODDART, J. ILLINGWORTH et T. WINDEATT : Implicit surface-based geometric fusion. *Computer Vision and Image Understanding*, 69(3):273 – 291, 1998.
- [HOP92] Hugues HOPPE, Tony DEROSE, Tom DUCHAMP, John McDONALD et Werner STUETZLE : Surface reconstruction from unorganized points. *Computer Graphics*, 26(2):71–78, 1992.
- [HUA09] Yunbao HUANG, Xiaoping QIAN et Shiliang CHEN : Multi-sensor calibration through iterative registration and fusion. *Computer-Aided Design*, 41(4):240 – 255, 2009.
- [HUB00] Andreas HUBELI et Marku MEYER, Kuno ands Gross : Mesh edge detection. *In Workshop Lake Tahoe*, janvier 2000.
- [HWA04] C.-Y. HWANG, C.-Y. TSAI et C.A. CHANG : Efficient inspection planning for coordinate measuring machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(9-10):732–742, février 2004.
- [ISH11] Ahmed ISHEIL, Jean-Pierre GONNET, David JOANNIC et Jean-François FONTAINE : Systematic error correction of a 3d laser scanning measurement device. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(1):16 – 24, 2011.
- [JAG07] Anupama JAGANNATHAN et Eric L. MILLER : Three-dimensional surface mesh segmentation using curvedness based region growing approach. *In IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, volume 29, pages 2195–2204, décembre 2007.
- [JIA09] Jun JIANG, Jun CHENG et Xinglin CHEN : Registration for 3-d point cloud using angular-invariant feature. *Neurocomputing*, 72(16 - 18):3839 – 3844, 2009.

- [KAZ05] Michael KAZHDAN : Reconstruction of solid models from oriented point sets. *In Proceedings of the third Eurographics symposium on Geometry processing*, SGP '05, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2005. Eurographics Association.
- [KAZ06] Michael KAZHDAN, Matthew BOLITHO et Hugues HOPPE : Poisson surface reconstruction. *In Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, SGP '06, pages 61–70, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2006. Eurographics Association.
- [KER09] Olivier KERBRAT : *Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2009.
- [KO07] Tae Joe KO, Jung Whan PARK, Hee Sool KIM et Sun Ho KIM : On-machine measurement using a noncontact sensor based on a cad model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32:739–746, 2007. 10.1007/s00170-005-0383-4.
- [KOE92] Jan J. KOENDERINK et Andrea J. van DOORN : Surface shape and curvature scales. *Image and Vision Computing*, 10(8):557 – 564, 1992.
- [KREON] KREON : www.kreon.fr.
- [KUKA] KUKA ROBOTICS : www.kuka-robotics.com.
- [KUM07] Sanjeev KUMAR, Aydin NASSEHI, Stephen T. NEWMAN, Richard D. ALLEN et Manoj K. TIWARI : Process control in CNC manufacturing for discrete components : A STEP-NC compliant framework. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6):667 – 676, décembre 2007. 16th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing.
- [KWE98] Soonki KWEON et D. J. MEDEIROS : Part orientations for cmm inspection using dimensioned visibility maps. *Computer-Aided Design*, 30(9):741 – 749, 1998.
- [LAG10] Raphaël LAGUIONIE : *Intégration de la programmation basée entités pour la fabrication sur machines à commandes numériques dans un contexte multi-process*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, novembre 2010.
- [LAR08] Sören LARSSON et J.A.P. KJELLANDER : Path planning for laser scanning with an industrial robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(7):615 – 624, 2008.

- [LAR04] Claire LARTIGUE et Pierre BOURDET : Qualité des données issues de numérisation 3d : sources d'imprécision et qualification. *In 10ème Assises Européennes de Prototypage Rapide*, 2004.
- [LAR02] Claire LARTIGUE, Alexandre CONTRI et Pierre BOURDET : Digitised point quality in relation with point exploitation. *Measurement*, 32:193–203, 2002.
- [LAR07] Claire LARTIGUE, Christophe TOURNIER, François THIÉBAUT et Mohanad MAKKI : Reverse-engineering et copiage rapide de nuage de points numérisés. *In 18ème Congrès Français de Mécanique [CMF2007]*, LURPA-ENS de Cachan, 61 avenue Président Wilson, 94235 CACHAN Cedex, FRANCE, août 2007.
- [LAV05] Guillaume LAVOUÉ, Florent DUPONT et Atilla BASKURT : A new cad mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis. *Computer-Aided Design*, 37(10):975 – 987, 2005.
- [LEE04] Honghee LEE, Myeong-Woo CHO, Gil-Sang YOON et Jin-Hwa CHOI : A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement – part I : Global inspection planning –. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 18(8):1349–1357, 2004. 10.1007/BF02984249.
- [LEE00] Kwan H. LEE et Hyun-pung PARK : Automated inspection planning of free-form shape parts by laser scanning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(4):201 – 210, 2000.
- [LI04] Yadong LI et Peihua GU : Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design*, 36(13):1395 – 1417, novembre 2004.
- [LI05a] Y.F. LI, B. HE et Paul BAO : Automatic view planning with self-termination in 3d object reconstructions. *Sensors and Actuators A : Physical*, 122(2):335 – 344, 2005.
- [LIN01] Z.-C. LIN et J.-J. CHOW : Integration planning model of ideo and step product data representation methods in a cmm measuring system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17:39–53, 2001.
- [LIU08a] Yu LIU et Youlun XIONG : Automatic segmentation of unorganized noisy point clouds based on the gaussian map. *Computer-Aided Design*, 40(5):576 – 594, 2008.
- [LOR09] Benjamin LORIOT : *Automatisation de l'Acquisition et des Post-traitements en Numérisation 3D*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 2009.

- [LU12] K. LU, W. WANG, Y. WU, Wei Y. et Chen Z. : An adaptive sampling approach for digitizing unknown freeform surfaces based on advance path detecting. *In Proceedings of the 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 2012.
- [MAH07] Mussa MAHMUD : *Outil d'aide au contrôle de spécifications géométriques de pièces mécaniques par la mesure 3D sans contact*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, décembre 2007.
- [MAH11] Mussa MAHMUD, David JOANNIC, Michaël ROY, Ahmed ISHEIL et Jean-François FONTAINE : 3d part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty. *Computer-Aided Design*, 43(4):345–355, 2011.
- [MAK06] Ameesh MAKADIA, Alexander PATTERSON IV et Kostas DANILIDIS : Fully automatic registration of 3d point clouds. *In CVPR '06 : Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006.
- [MAR10] Susana MARTÍNEZ, Eduardo CUESTA, Joaquin BARREIRO et Braulio ÁLVAREZ : Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5-8):621–629, janvier 2010.
- [MAR10a] Susana MARTÍNEZ, Eduardo CUESTA, Joaquin BARREIRO et Braulio ÁLVAREZ : Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(12):1238 – 1246, 2010.
- [MAR08] Susana MARTÍNEZ, Eduardo CUESTA, Joaquin BARREIRO et P. FERNÁNDEZ : Testing the capabilities of the three-spheres alignment method for laser triangulation sensors. *In Proceedings of the 6th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering*, Tallinn, Estonia, avril 2008.
- [MAS98] Nikolaos A. MASSIOS et Robert B. FISHER : A best next view selection algorithm incorporating a quality criterion. *In 9th British Machine Vision System*, Southampton, U.K., 1998.
- [MAT04] J. MATAS, O. CHUM, M. URBAN et T. PAJDLA : Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions. *Image and Vision Computing*, 22(10):761 – 767, 2004. British Machine Vision Computing 2002.

- [MAT03] Joseph MATHEW, Richard LECHNER, Holger FOYSI, Joern SESTERHENN et Rainer FRIEDRICH : An explicit filtering method for large eddy simulation of compressible flows. *Physics of Fluids*, 15(8):2279–89, 2003.
- [MEH06] Charyar MEHDI-SOUZANI : *Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2006.
- [MEH10] Charyar MEHDI-SOUZANI, Julie DIGNE, Nicolas AUDFRAY, Claire LARTIGUE et Jean-Michel MOREL : Feature extraction from high-density point clouds : toward automation of an intelligent 3d contact less digitizing strategy. *Computer-Aided Design & Applications*, 7(6):863–874, juin 2010.
- [MEH08] Charyar MEHDI-SOUZANI et Claire LARTIGUE : Contact less laser-plane sensor assessment : toward a quality measurement. In *IDMME-Virtual Concept*, numéro 41, Beijing (China), 2008.
- [MEH06a] charyar MEHDI-SOUZANI, François THIÉBAUT et Claire LARTIGUE : Scan planning strategy for a general digitized surface. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 6(4):331–340, décembre 2006.
- [ROMER] Romer Hexagon METROLOGY : www.romer.eu.
- [MIT04] Niloy J. MITRA, Natasha GELFAND, Helmut POTTMANN et Leonidas GUIBAS : Registration of point cloud data from a geometric optimization perspective. In *SGP '04 : Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 22–31, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [NAS97] Marilyn NASHMAN, Billibon YOSHIMI, Tsai Hong HONG, William G. RIPPEY et Martin HERMAN : Unique sensor fusion system for coordinate-measuring machine tasks. In Paul S. SCHENKER et Gerard T. MCKEE, éditeurs : *Sensor Fusion and Decentralized Control in Autonomous Robotic Systems*, volume 3209, pages 145–156. SPIE, octobre 1997.
- [NEW95] Timothy S. NEWMAN et Anil K. JAIN : A survey of automated visual inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(2):231 – 262, 1995.
- [NOOME0] NOOME0 - 3D MADE EASY : www.noomeo.eu.
- [OBS04] OBSERVATOIRE DE PARIS : Projet campus numérique : fenêtre sur l'univers, septembre 2004. consulté le 24/04/2012.

-
- [OHT02] Yutaka OHTAKE, Alexander BELYAEV et Hans-Peter SEIDEL : Mesh smoothing by adaptive and anisotropic gaussian filter. *In Vision, Modeling, and Visualization*, pages 203–210, Erlangen, Germany, 2002. Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH.
- [OHT04] Yutaka OHTAKE, Alexander BELYAEV et Hans-Peter SEIDEL : Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting. *In SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pages 609–612, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [OST02] Guillaume OSTY : *Extraction de particularités sur données discrètes issues de numérisation 3D. Partitionnement de grands nuages de points*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [PAP97] Dimitri PAPADOPOULOS-ORFANOS : *Numérisation géométrique automatique à l'aide d'un capteur 3D de précision à profondeur de champ réduite*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications, février 1997.
- [PAR09] Sang C. PARK et Minho CHANG : Reverse engineering with a structured light system. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4):1377 – 1384, 2009.
- [PIT96] Richard PITO : A sensor based solution to the “next best view” problem. *In ICPR'96*, pages 941–945, 1996.
- [POT04] Helmut POTTMANN, Stefan LEOPOLDSEDER et Michael HOFER : Registration without icp. *Computer Vision and Image Understanding*, 95(1):54 – 71, 2004.
- [PRI99] Flavio PRIETO : *Métriologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1999.
- [PRI00a] Flavio PRIETO, Richard LEPAGE, Pierre BOULANGER et Tanneguy REDARCE : Inspection of 3d parts using high accuracy range data. *In SPIE Conference on Electronic Imaging : Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII (EI' SPIE)*, volume 3966, pages 82 – 93, San Jose, USA, janvier 2000.
- [PRI03] Flavio PRIETO, Richard LEPAGE, Pierre BOULANGER et Tanneguy REDARCE : A cad-based 3d data acquisition strategy for inspection. *Machine Vision and Application*, 15(2):76–91, 2003.
- [PRO07] Fred PROCTOR, Bill RIPPEY, John HORST, Joe FALCO et Tom KRAMER : Interoperability testing for shop floor measurement. *In Proceedings of the 2007 Work-*
-

- shop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, PerMIS '07, pages 275–279, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [QUI12] Yann QUINSAT et Christophe TOURNIER : In situ non-contact measurements of surface roughness. *Precision Engineering*, 36(1):97 – 103, 2012.
- [RAB06] Tahir RABBANIA, Frank A. van den HEUVELB et George VOSELMANC : Segmentation of point clouds using smoothness constraint. *In Proceedings of IAPRS*, volume 36, pages 248–253, 2006.
- [REM04] S. REMY : *Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes à l'aide d'un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique*. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré de Nancy, 2004.
- [MAR05] Fernando António RODRIGUES MARTINS, Jaime Gómez GARCÍA-BERMEJO, Eduardo ZALAMA CASANOVA et José. R. PERÁN GONZÁLEZ : Automated 3d surface scanning based on cad model. *Mechatronics*, 15(7):837 – 857, septembre 2005.
- [SAG99] P. SAGAUT et R. GROHENS : Discrete filters for large eddy simulation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 31(8):1195–1220, 1999.
- [SAN11] Jorge SANTOLARIA, Juan-José AGUILAR, David GUILLOMÍA et Carlos CAJAL : A crenellated-target-based calibration method for laser triangulation sensors integration in articulated measurement arms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(2):282 – 291, avril 2011.
- [SAN08] Jorge SANTOLARIA, Juan-José AGUILAR, José-Antonio YAGÜE et Jorge PASTOR : Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 32(4):251 – 268, 2008.
- [SAN09] Jorge SANTOLARIA, David GUILLOMÍA, Carlos CAJAL, José A. ALBAJEZ et Juan J. AGUILAR : Modelling and calibration technique of laser triangulation sensors for integration in robot arms and articulated arm coordinate measuring machines. *Sensors*, 9(9):7374–7396, 2009.
- [SAV07] E. SAVIO, L. DE CHIFFRE et R. SCHMITT : Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2):810 – 835, 2007.
- [SCH02] Heinrich SCHWENKE, Ulrich NEUSCHAEFER-RUBE, Tilo PFEIFER et Horst KUNZMANN : Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(2):685 – 699, 2002.

- [SHA98] Craig M. SHAKARJI : Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 103(6):633–641, novembre 1998.
- [SHE01] Tzung-Sz SHEN, Jianbing HUANG et Chia-Hsiang MENQ : Multiple-sensor planning and information integration for automatic coordinate metrology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(2):167–179, 2001.
- [SHM10] Alex SHMUKLER et Anath FISCHER : Verification of 3d freeform parts by registration of multiscale shape descriptors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49:1093–1106, 2010.
- [SON02] Seokbae SON, Hyunpung PARK et Kwan H. LEE : Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(8):889 – 897, 2002.
- [SPC09] SPC FRANCE : Les limites de la mesure dimensionnelle, juin 2009. http://www.spc.fr/SPC5/dossier_fichier/101FT_P_004_M%E9trotologie_nv_x_logo.pdf consulté le 25/04/2012.
- [STA00] STANFORD COMPUTER GRAPHICS LABORATORY : CGAL basic library reference manual, janvier 2000. <http://graphics.stanford.edu>.
- [STIL] STIL S.A. : Sciences et techniques industrielles de la lumière. www.stilsa.com.
- [STY04] Georgios STYLIANOU et Gerald FARIN : Crest lines for surface segmentation and flattening. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10:536–544, 2004.
- [SUN08] V.B. SUNIL et S.S. PANDE : Automatic recognition of features from freeform surface cad models. *Computer-Aided Design*, 40(4):502 – 517, 2008.
- [TAG08] Andrea TAGLIASACCHI : kd-tree for matlab, 2008. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21512>.
- [TAN04] Jim TANG, Jason GU et Zixing CAI : Data fusion with different accuracy. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2004)*, 2004.
- [TAU95] Gabriel TAUBIN : A signal processing approach to fair surface design. In *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '95, pages 351–358, New York, NY, USA, 1995. ACM.

- [TON01] Hans Kurt TÖNSHOFF et Ichiro INASAKI : *Sensors in Applications : Volume One; Sensors in Manufacturing*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001.
- [TOR04] Ben TORDOFF et David W. MURRAY : The impact of radial distortion on the self-calibration of rotating cameras. *Computer Vision and Image Understanding*, 96(1):17 – 34, 2004.
- [VAN09] Nick VAN GESTEL, Steven CUYPERS, Philip BLEYS et Jean-Pierre KRUTH : A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3-4):336 – 342, 2009.
- [VAR97] Tamás VÁRADY, Ralph R MARTIN et Jordan COX : Reverse engineering of geometric models—an introduction. 29(4):255 – 268, 1997.
- [WEC09] A. WECKENMANN, X. JIANG, K.-D. SOMMER, U. NEUSCHAEFER-RUBE, J. SEEWIG, L. SHAW et T. ESTLER : Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2):701 – 721, 2009.
- [WOO94] Tony C. WOO : Visibility maps and spherical algorithms. *Computer-Aided Design*, 26(1):1–6, janvier 1994.
- [YAU00] Hong-Tzong YAU, Chun-Yan CHEN et Robert G. WILHELM : Registration and integration of multiple laser scanned data for reverse engineering of complex 3d models. *International Journal of Production Research*, 38(2):269–285, 2000.
- [YOS05] Shin YOSHIZAWA, Alexander BELYAEV et Hans-Peter SEIDEL : Fast and robust detection of crest lines on meshes. *In SPM '05 : Proceedings of the 2005 ACM symposium on Solid and physical modeling*, pages 227–232, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [ZEX05] Xie ZEXIAO, Wang JIANGUO et Zhang QIUMEI : Complete 3d measurement in reverse engineering using a multi-probe system. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(12-13):1474 – 1486, octobre 2005.
- [ZHA10] Haibin ZHAO : *Multisensor Integration and Discrete Geometry Processing for Coordinate Metrology*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, janvier 2010.
- [ZHA12] Haibin ZHAO, Jean-Pierre KRUTH, Nick VAN GESTEL, Bart BOECKMANS et Philip BLEYS : Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe. *Measurement*, 45(5):1057 – 1066, 2012.

- [ZHA09a] Yaoyao Fiona ZHAO : *An Integrated Process Planning System for Machining and Inspection*. Thèse de Doctorat, University of Auckland, 2009.
- [ZHA09] Yaoyao Fiona ZHAO, Xun XU et Shane Q. XIE : Computer-aided inspection planning—the state of the art. *Computers in Industry*, 60(7):453 – 466, 2009.
- [ZHO98] L. ZHOU, A. WAHEED et J. CAI : Correction technique to compensate the form error in 3d profilometry. *Measurement*, 23(2):117 – 123, 1998.
- [ZUQ12] Alexandre ZUQUETE GUARATO, Charyar MEHDI-SOUZANI, Yann QUINSAT, Claire LARTIGUE et Leila SABRI : 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*, juillet 2012.

Normes

- [ISO10303-219] ISO 10303-219 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration – représentation et échange de données de produits, 2007.
- [ISO14649] ISO 14649 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration - commande des dispositifs physiques - modèle de données pour les contrôleurs numériques informatisés.
- [ISO14649-16] ISO 14649-16 : Data model for Computerized Numericam controllers – Part 16 : Data for touch probing based inspection, 2004.
- [DMIS] ISO 22093 : Industrial automation systems and integration – Physical device control – Dimensional Measuring Interface Standard (DMIS), 2011.
- [NFE02-204] NF E02-204 : Vérification des tolérances de produits – Déclaration de conformité, 1993.
- [ISO1101] NF EN ISO 1101 : Spécification géométrique des produits (GPS) – Tolérancement géométrique – Tolérancement de forme, orientation, position et battement, 2006.
- [ISO11562] NF EN ISO 11562 : Spécification géométrique des produits (GPS) – état de surface : méthode du profil – Caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte., 1998.
- [ISO12781-1] NF EN ISO 12781-1 : Spécification géométrique des produits (GPS) – Planéité – Partie 1 : vocabulaire et paramètres de planéité, 2011.
- [ISO14253-1] NF EN ISO 14253-1 : Spécification géométrique des produits (GPS) – Vérification par la mesure des pièces et équipements de mesure – Partie 1 : Règles de décision pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification, 1999.
- [ISO25178-2] NF EN ISO 25178-2 : Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : surfacique – Partie 2 : termes, définitions et paramètres d'états de surface, 2012.
- [ISO4288] NF EN ISO 4288 : Spécification géométrique des produits (GPS) - état de surface : méthode du profil - règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface.
- [ISO8015] NF EN ISO 8015 : Spécification géométrique des produits (GPS) – Principes fondamentaux – Concepts, principes et règles, 2011.

[VIM] NF ISO/CEI GUIDE 99 : Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), 2011.

ANNEXES

Sommaire

A	Caractérisation de la fenêtre de mesure	I
B	Évaluation des remises en position capteurs et porteurs	III
C	Évaluation du recalage des données acquises avec différentes configurations	V
D	Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation	VII
E	Bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation	IX
F	Justesse de mesure en fonction de la distance de numérisation	XI
G	Justesse de mesure dite « relative » en fonction de la distance de numérisation	XIII
H	Détermination de l'accessibilité d'un capteur optique	XV

A Caractérisation de la fenêtre de mesure

1 Définition

Les capteurs optiques ont un espace de travail appelé aussi fenêtre de mesure. Pour les capteurs confocaux ou laser-ligne il s'agit d'un segment, pour les capteurs laser-plan c'est un plan limité et pour les capteurs à lumière structurée un volume limité (Figure A.1).

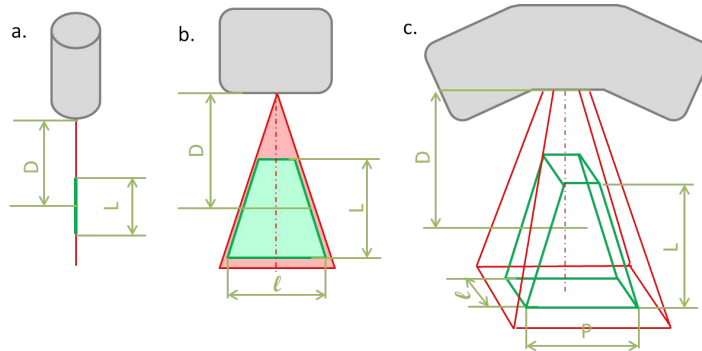


Figure A.1 – Paramètres des fenêtres de mesure : a. fenêtre 1D, b. fenêtre 2D, c. fenêtre 3D

Du fait des parties optiques qui composent le capteur, des distorsions apparaissent. Il est donc intéressant de caractériser la fenêtre de mesure, afin de visualiser l'allure générale des défauts dus à la position des points numérisés dans cette fenêtre. La visualisation des écarts sur l'acquisition d'un plan supposé parfait permet déjà d'avoir une idée du caractère anisotrope de la fenêtre de mesure.

2 Evaluation

2.1 Matériel et artefacts

L'artefact de numérisation est **une surface plane** de faible défaut de forme. Cet artefact doit occuper une grande partie du champs de vue du capteur, en particulier pour les capteurs à fenêtre de mesure 3D. Cet artefact est positionné à l'aide d'un empilement de cales étalon afin de faire varier la distance de numérisation sans déplacer le capteur. Si besoin, cet artefact peut être matifié afin d'être numérisable par le capteur, il est néanmoins préférable d'utiliser des artefacts non matifiés.

Tableau A.1 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan	- Jeu de cales étalon	- d variable - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe - Capteur fixe



Figure A.2 – Cales étalon

2.2 Protocole d'évaluation

Pour cette partie du protocole, seul le capteur est évalué, indépendamment de son porteur. De ce fait le capteur est fixé de manière à rester immobile pour toute la mesure. Ainsi le protocole est identique quel que soit le type de porteur utilisé.

1. Placer l'artefact plan sur un plan dégauchi dans l'espace de travail.
2. Placer le capteur au-dessus de l'artefact à la distance d_{max} .
3. Réaliser l'acquisition d'une seule image (point, ligne, surface en fonction du capteur). Nommer ces données $PT_fen_d_{max}$, $DR_fen_d_{max}$ ou $PL_fen_d_{max}$ en fonction du type d'entité numérisée.
4. Rehausser l'artefact de $\frac{L}{10}$ à l'aide d'un jeu de cales étalon **sans déplacer le capteur**. La cale est alors rapprochée du capteur sans que la position de ce dernier n'ait changé (Figure A.3).
5. Réaliser une nouvelle acquisition d'une seule image. Nommer ces données $PT_fen_d_i$, $DR_fen_d_i$ ou $PL_fen_d_i$ en fonction du type d'entité numérisée, avec d_i la distance de numérisation.
6. Répéter les opérations de rehausse et d'acquisition jusqu'à la limite inférieure de la fenêtre de mesure (d_{min}).
7. Les données obtenues sont composées de N images (point, ligne, surface en fonction du capteur) représentatives de la fenêtre de mesure.
8. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

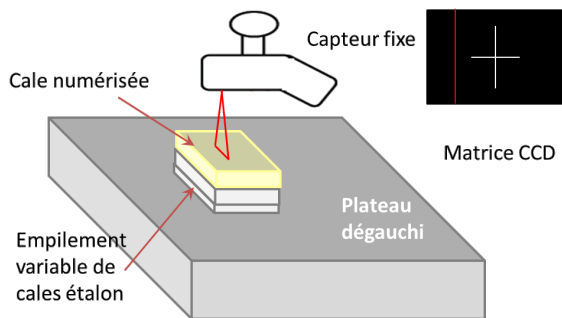


Figure A.3 – Protocole pour la qualification de la fenêtre de mesure

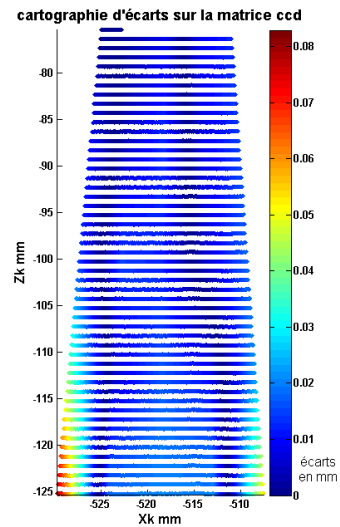


Figure A.4 – Résultats pour un capteur laser plan

3 Calculs

3.1 Cas 1D

1. Fusionner l'ensemble des données ;
2. Associer une droite des moindres carrés à l'ensemble obtenu ;
3. Relever le défaut de forme de l'élément.

3.2 Cas 2D

1. Fusionner l'ensemble des données ;
2. Associer un plan des moindres carrés à l'ensemble obtenu ;
3. Relever le défaut de forme de l'élément (Figure A.4).

3.3 Cas 3D

1. Associer un plan des moindres carrés à chaque entité numérisée ;
2. Relever le défaut de forme de chaque entité ;

B Évaluation des remises en position capteurs et porteurs

1 Définition

Suivant le type de systèmes de numérisation, certaines parties peuvent nécessiter des remises en position (tête rotative PH10 sur MMT, remise en position d'un bras de mesure, changement d'outil sur MOCN, etc.). La présente partie propose un protocole d'évaluation de l'incertitude de ces remises en position à travers la numérisation d'une sphère plusieurs fois après réorientation du système de numérisation, sans réétalonnage du système.

Cette partie se veut qualitative pour permettre à l'utilisateur de connaître l'ordre de grandeur des défauts engendrés par les remises en position.

2 Évaluation

2.1 Matériel et artefacts

Pour cette évaluation, seule une sphère de faible défaut de forme est nécessaire (Figure B.1).

Tableau B.1 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Sphère de rayon R_0 connu		- $d = d_{opt}$ fixe - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe

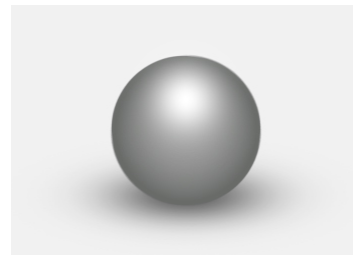


Figure B.1 – Type d'artefact

2.2 Protocole porteurs pilotables

La numérisation est réalisée toujours dans les mêmes configurations capteur/artefact. La distance de numérisation est choisie égale à la distance qui minimise l'erreur de justesse. Si l'évaluation de cette distance optimale n'a pas été réalisée, utiliser la distance préconisée par le fabricant du capteur.

1. Si besoin, étalonner le système de numérisation dans la position désirée.
2. Numériser dix fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_0_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Effectuer un remise en position du système sans réétalonnage.
4. Numériser à nouveau cinq fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_1_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
5. Répéter les opérations de remise en position et de numérisation plusieurs fois. Nommer les nuages $SP_repet_j_i$ en incrémentant j à chaque remise en position et i à chaque numérisation.
6. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3 Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas des porteurs non pilotables, la distance de numérisation utilisée est celle qui place la surface de la sphère au milieu de la fenêtre de mesure. Cette position est obtenue grâce au guide visuel de capteur.

1. Si besoin, étalonner le système de numérisation dans la position désirée.
2. Numériser dix fois la sphère à distance constante proche de d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_0_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Effectuer un remise en position du système sans réétalonnage.
4. Numériser à nouveau cinq fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_1_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
5. Répéter les opérations de remise en position et de numérisation plusieurs fois. Nommer les nuages $SP_repet_j_i$ en incrémentant j à chaque remise en position et i à chaque numérisation.
6. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4 Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Dans le cas des bras robotisés ou polyarticulés, l'influence des différentes configurations articulaires est mise en avant dans cette partie.

1. Numériser dix fois la sphère à distance constante proche de d_{opt} dans une configuration articulaire qui varie peu. Nommer les nuages $SP_repet_0_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
2. Changer de configuration articulaire et numériser à nouveau cinq fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_1_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Répéter les opérations de changement de configuration articulaire et de numérisation plusieurs fois. Nommer les nuages $SP_repet_j_i$ en incrémentant j à chaque remise en position et i à chaque numérisation.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

3 Calculs

Le calcul revient ici à un calcul de justesse relative avec une notion de répétabilité.

1. Associer une sphère des moindres carrés à chaque nuage obtenu.
2. Évaluer la répétabilité de la mesure d'une sphère en relevant la moyenne P_{moy} et l'écart-type σ_{pos} de la position des centres des sphères des 10 premières acquisitions.
3. Pour chaque numérisation suivante, relever la distance entre le centre de la sphère associée au nuage et P_{moy} .
4. L'étendue et l'écart-type des distances calculées permet de connaître l'influence de la remise en position du système en termes de justesse de mesure relative.

C Évaluation du recalage des données acquises avec différentes configurations

1 Définition

Pour la plupart des systèmes de numérisation, lorsqu'une acquisition est réalisée suivant plusieurs vues différentes, le recalage des données est réalisé par le système de traitement à partir de la procédure de calibration externe du système. Ce recalage est une boîte noire pour l'utilisateur, il est donc proposé ici une procédure permettant de quantifier l'erreur de recalage des données obtenues avec plusieurs configurations du système.

2 Évaluation

2.1 Matériel et artefacts

Pour cette évaluation, seule une sphère de faible défaut de forme est nécessaire, le diamètre réel de cette dernière doit être connu.

Tableau C.1 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Sphère de rayon $R0$ connu		- $d = d_{opt}$ fixe - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe

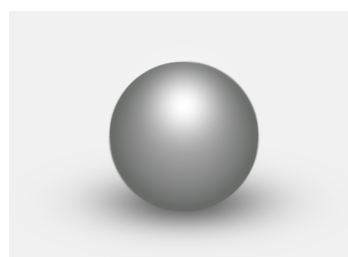


Figure C.1 – Type d'artefact

2.2 Protocole porteurs pilotables

La numérisation est réalisée toujours dans les mêmes configurations capteur/artefact. La distance de numérisation est choisie égale à la distance qui minimise l'erreur de justesse et les angles de numérisation sont fixés à 0° . Si l'évaluation de cette distance optimale n'a pas été réalisée, utiliser la distance préconisée par le fabricant du capteur.

Le terme « calibrer » présent par la suite désigne la calibration externe, parfois appelée étalonnage par les fabricants.

1. Calibrer si possible le système de numérisation dans la position verticale.
2. Numériser 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_Z + _i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Orienter le système de manière à positionner le capteur suivant l'axe $X+$.
4. Calibrer si possible le système de numérisation dans cette position.
5. Numériser à nouveau 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_X + _i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
6. Répéter les opérations de réorientation et de numérisation selon les axes $X-$, $Y+$ et $Y-$.
Nommer les nuages $SP_recal_j_i$ $j \in \{X-, Y+, Y-\}$ en incrémentant i à chaque numérisation.
7. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3 Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas des porteurs non pilotables, la distance de numérisation utilisée est celle qui place la surface de la sphère au milieu de la fenêtre de mesure. Cette position est obtenue grâce au guide visuel de capteur.

1. Calibrer si possible le système de numérisation dans la position verticale.
2. Numériser 5 fois la sphère à distance constante proche de d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_Z + _i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Orienter le système de manière à positionner le capteur suivant l'axe X+.
4. Calibrer si possible le système de numérisation dans cette position.
5. Numériser à nouveau 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_X + _i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
6. Répéter les opérations de réorientation et de numérisation selon les axes X-, Y+ et Y-.
Nommer les nuages $SP_recal_j_i$ $j \in \{X-, Y+, Y-\}$ en incrémentant i à chaque numérisation.
7. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4 Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Dans le cas des bras robotisés ou polyarticulés, l'étalonnage à chaque orientation n'est pas possible.

1. Positionner le capteur dans la position verticale
2. Numériser 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_Z + _i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Orienter le système de manière à positionner le capteur suivant l'axe X+.
4. Numériser à nouveau 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_X + _i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
5. Répéter les opérations de réorientation et de numérisation selon les axes X-, Y+ et Y-.
Nommer les nuages $SP_recal_j_i$ $j \in \{X-, Y+, Y-\}$ en incrémentant i à chaque numérisation.
6. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

3 Calculs

Le calcul consiste à évaluer le défaut de forme du nuage global ainsi que la dispersion des positions des centres sphère de chacun des nuages obtenus.

1. Associer une sphère des moindres carrés de rayon imposé $R0$ à chaque nuage obtenu.
2. Évaluer l'erreur de position des différents nuages en relevant la moyenne P_{moy} et l'écart-type σ_{pos} de la position des centres des sphères.

1. Concaténer tous les nuages.
2. Associer une sphère des moindres carrés de rayon imposé $R0$ au nuage obtenu.
3. Relever le défaut de forme et l'écart-type de la répartition des points à la sphère des moindres carrés

D Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation

1 Définition

Le bruit de numérisation ne fait pas l'objet d'une norme, mais l'indicateur δ -bruit proposé dans la littérature [HOP92], permet de quantifier ce bruit. Soit M_i un point acquis avec un système de numérisation et P_i le point théorique qu'il représente, le point M_i peut s'écrire $M_i = P_i + e_i$ où e_i représente un vecteur erreur de position. Sur l'ensemble d'un nuage de points, il est possible de calculer l'écart-type σ de la répartition des e_i . Afin d'évaluer ce bruit, les points P_i étant inconnus, ils sont considérés comme les projections orthogonales des points M_i sur la surface idéale associée par le critère des moindres carrés (Figure D.1). L'indicateur δ -bruit est ensuite donné par l'équation D.1.

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

où k représente un facteur d'élargissement choisi ici égal à 1, p_i le poids de chacun des points et \bar{e}_i la moyenne des écarts. Dans le cas d'une association avec le critère des moindres carrés, les p_i sont égaux à 1 et la valeur moyenne \bar{e}_i est nulle [SHA98].

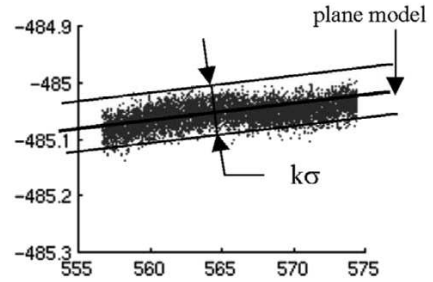


Figure D.1 – Représentation du bruit

Cette partie propose l'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation d .

2 Evaluation

2.1 Matériel et artefacts

L'évaluation du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation est réalisée sur un **artefact référence de planéité**, ce qui permet de maîtriser cette distance en plaçant le capteur normal à la surface. Si le capteur le permet, cet artefact peut être une cale étalon classique qui possède un très faible défaut de forme.

Tableau D.1 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan		- d variable - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe

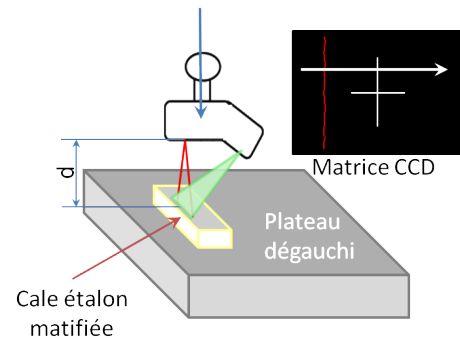


Figure D.2 – Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation

2.2 Protocole porteurs pilotables

1. Placer l'artefact sur un plan dégauchi de l'espace de travail.
2. Placer le capteur à la distance d_{max} de l'artefact.
3. Numériser le plan à cette distance d_{max} . Le nuage obtenu est $PL_{d_{max}}$.
4. Répéter l'opération en diminuant d d'une valeur $pas = \frac{L}{10}$ jusqu'à d_{min} . Les différents nuages obtenus sont PL_{d_i} , $i = \{d_{max}, \dots, d_{max} - k \cdot pas, \dots, d_{min}\}$.
5. Exporter les points au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

La valeur de pas est choisie arbitrairement ; le fait de prendre une dizaine de distances différentes donne une bonne évaluation de la variation du bruit.

2.3 Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas d'un porteur non pilotable, la distance de numérisation est estimée qualitativement à partir du repère lumineux émis par le capteur qui détermine la distance préconisée par le constructeur (Figure D.3).

1. Placer l'artefact sur un plan dégauchi de l'espace de travail.
2. Placer le capteur à une distance proche de d_{max} .
3. Numériser le plan à cette distance d_{max} . Le nuage de points obtenu est appelé $PL_{d_{max}}$.
4. Répéter l'opération au milieu $d \simeq D$ (nuage PL_D) et à l'autre extrémité de la fenêtre de mesure d_{min} (nuage $PL_{d_{min}}$).
5. Exporter les points au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

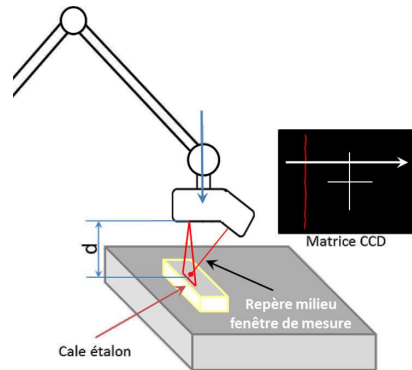


Figure D.3 – Position du capteur pour un porteur non pilotable

2.4 Protocole d'évaluation pour les porteurs avec plusieurs configurations articulaires possibles

Dans le cas des porteurs ayant plusieurs configurations articulaires possibles pour une configuration capteur/pièce, comme les bras polyarticulés et les bras robotisés, il est nécessaire de faire varier les configurations articulaires à chaque acquisition, et ainsi réaliser plusieurs acquisitions à chaque distance de numérisation.

Le protocole est le même que dans les cas précédents, à choisir en fonction du caractère pilotable ou non du porteur, mais à chaque distance de numérisation, il est nécessaire de réaliser plusieurs acquisitions en modifiant les configurations articulaires. Les nuages obtenus sont appelés $PL_{d_i_j}$, avec j le numéro de l'acquisition pour une distance donnée.

3 Calculs

Le calcul du bruit est réalisé de la manière suivante sur chacun des nuages obtenus.

1. Associer un plan des moindres carrés au nuage.
2. Relever l'écart-type σ de la répartition des e_i .
3. Multiplier σ par le facteur d'élargissement k , $\delta = k \cdot \sigma$.

E Bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation

1 Définition

Le bruit de numérisation ne fait pas l'objet d'une norme, mais l'indicateur δ -bruit proposé dans la littérature [HOP92], permet de quantifier ce bruit. Soit M_i un point acquis avec un système de numérisation et P_i le point théorique qu'il représente, le point M_i peut s'écrire $M_i = P_i + e_i$ où e_i représente un vecteur erreur de position. Sur l'ensemble d'un nuage de points, il est possible de calculer l'écart-type σ de la répartition des e_i . Afin d'évaluer ce bruit, les points P_i étant inconnus, ils sont considérés comme les projections orthogonales des points M_i sur la surface idéale associée par le critère des moindres carrés (Figure E.1). L'indicateur δ -bruit est ensuite donné par l'équation E.1.

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

où k représente un facteur d'élargissement choisi ici égal à 1, p_i le poids de chacun des points et \bar{e}_i la moyenne des écarts. Dans le cas d'une association avec le critère des moindres carrés, les p_i sont égaux à 1 et la valeur moyenne \bar{e}_i est nulle [SHA98].

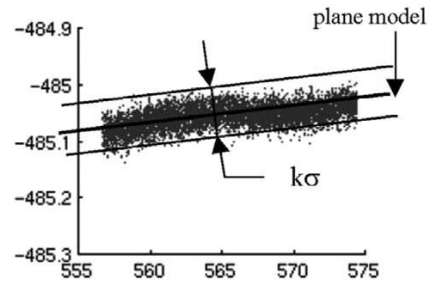


Figure E.1 – Représentation du bruit

Cette partie propose l'évaluation du bruit de numérisation en fonction de l'angle α (et β pour les capteurs à triangulation).

2 Evaluation

2.1 Matériel et artefacts

Pour l'évaluation de l'influence des angles de numérisation, un **artefact référence de planéité** permet de maîtriser les différents angles, les cales étalons sont donc aussi préconisées.

Afin de faire varier les angles de numérisation, l'utilisation d'une règle sinus permet un contrôle simple de ces paramètres.

Tableau E.1 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan	- règle sinus - jeu de cales étalon	- d fixe optimale - α variable - β variable

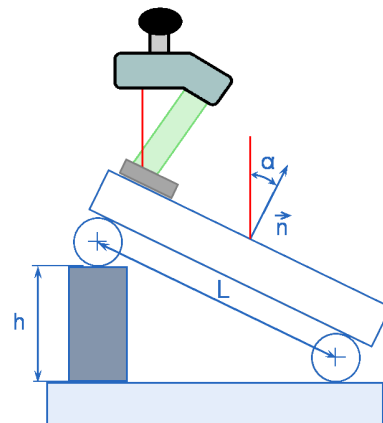


Figure E.2 – Protocole d'évaluation du bruit en fonction de l'angle α

2.2 Protocole porteurs pilotables

L'évaluation de l'influence des angles de numérisation est réalisée en numérisant à distance constante en faisant varier les angles α et β . La distance est choisie égale à d_{opt} , distance de numérisation évaluée qui minimise le bruit. À défaut de connaître cette valeur, utiliser la valeur préconisée par le constructeur.

1. Placer l'artefact sur le plan dégauchi d'une règle sinus posée dans l'espace de travail.
2. Placer le capteur à la distance d_{min}
3. Numériser le plan à cette distance constante d_{min} . Le nuage obtenu est nommé PL_a0 .
4. Incliner la règle sinus par l'ajout d'une cale étalon de dimension connue h sous la règle (Figure E.2) de telle sorte que l'angle α_i augmente de 5° .
5. Numériser à nouveau la cale à distance constante d_{min} . Le nuage obtenu est nommé $PL_a\alpha_i$, $\alpha_i = \{0, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_{max}\}$.
6. Répéter l'opération en inclinant la règle jusqu'à son maximum.
7. Répéter ensuite le tout en faisant varier l'angle β et nommer les nuages $PL_b\beta_i$.
8. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.
Nota : l'utilisation d'une table sinus peut permettre de ne pas déplacer le dispositif et de faire varier les deux angles.

2.3 Protocole porteurs non pilotables

De la même manière qu'il n'est pas possible de maîtriser la distance de numérisation, il n'est pas non plus possible de maîtriser les angles de numérisation. L'évaluation de leur influence est réalisée qualitativement.

1. Placer l'artefact sur le plan dégauchi d'une règle sinus posée sur le marbre de la machine.
2. Placer le capteur à la distance d_{min} de la surface.
3. Numériser le plan à distance constante. Le nuage obtenu est nommé PL_a0
4. Incliner la règle sinus par l'ajout d'une cale de dimension connue h sous la règle (Figure E.2) de telle sorte que l'angle entre la normale à la surface et le plan laser soit d'environ 30° .
5. Numériser à nouveau l'artefact à distance constante d_{min} . Le nuage obtenu est nommé PL_a30
6. Répéter l'opération en inclinant la règle à 60° . Le nuage obtenu est nommé PL_a60
7. Répéter ensuite le tout en faisant varier l'angle β et nommer les nuages $PL_b\beta_i$.
8. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.
Nota : l'utilisation d'une table sinus peut permettre de ne pas déplacer le dispositif et de faire varier les deux angles.

2.4 Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Dans le cas des bras polyarticulés et bras robotisés, il n'est pas intéressant de faire varier indépendamment les différents angles de numérisation tant l'incertitude due aux codeurs est importante. De ce fait, de la même manière que pour l'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation, la configuration articulaire du porteur est modifiée plusieurs fois par configuration capteur/pièce.

Pour chacun des deux cas (porteur pilotable ou non), numériser avec différentes configurations articulaires à chaque configuration capteur/pièce et nommer les nuages $PL_a\alpha_j$ (resp. $PL_b\beta_j$), avec j le numéro de l'acquisition pour un angle α_i (resp. β_i). donné.

3 Calculs

Le calcul du bruit est réalisé de la manière suivante sur chacun des nuages obtenus.

1. Associer un plan des moindres carrés au nuage.
2. Relever l'écart-type σ de la répartition des e_i .
3. Multiplier σ par le facteur d'élargissement k , $\delta = k \cdot \sigma$.

F Justesse de mesure en fonction de la distance de numérisation

1 Définition

La justesse de mesure est évaluée par la mesure d'une distance connue entre deux plans. L'erreur de justesse j_a est donnée par la différence entre la valeur mesurée de la distance et la valeur considérée comme vraie de cette distance. Cette valeur considérée comme vraie peut être donnée par la certification de l'artefact à numériser ou par la mesure à l'aide d'un système de mesure considéré comme plus juste.

La figure F.1 représente un artefact de référence avec deux plans distants de h_0 , ainsi que le nuage issu de l'acquisition de ces deux plans.

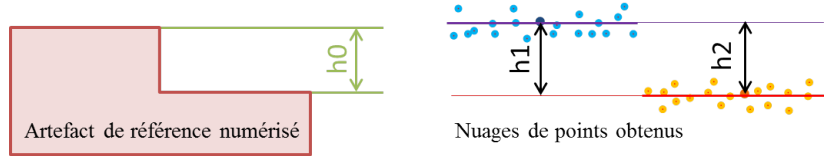


Figure F.1 – Calcul de la justesse de mesure sur une hauteur de marche

Le calcul de l'erreur de justesse de mesure est réalisé de la manière suivante. Les points du nuage sont divisés en deux parties : d'une part les points représentant le plan supérieur et de l'autre les points représentant le plan inférieur. Les points pour lesquels il est difficile de décider de leur appartenance à un plan sont éliminés. Il en résulte donc deux nuages de points $M_{sup} = \{M_{sup,1}, \dots, M_{sup,n}\}$ et $M_{inf} = \{M_{inf,1}, \dots, M_{inf,n}\}$. \bar{M}_{sup} (resp. \bar{M}_{inf}) est le barycentre du nuage M_{sup} (resp. M_{inf}) et \vec{N}_{sup} (resp. \vec{N}_{inf}) est la normale du plan associé au nuage M_{sup} (resp. M_{inf}). Les plans sont associés avec le critère des moindres carrés [BOU05]. La hauteur h_1 est la distance entre le barycentre du nuage M_{sup} et le plan associé au nuage M_{inf} . La hauteur h_2 est la distance entre le barycentre du nuage M_{inf} et le plan associé au nuage M_{sup} . La distance h calculée entre les deux plans est la moyenne de h_1 et h_2 . On obtient l'erreur de justesse de mesure j_a grâce à l'équation F.1.

$$j_a = h - h_0 = \frac{h_1 + h_2}{2} - h_0 = \frac{|(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{inf}| + |(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{sup}|}{2} - h_0 \quad (F.1)$$

2 Evaluation

2.1 Matériel et artefacts

Idéalement la marche doit être réalisée en une seule pièce certifiée afin de garantir la meilleure justesse de la hauteur de marche. Toutefois s'il n'est pas possible d'obtenir un tel artefact, celui-ci peut être recréé à l'aide d'un empilement de cales étalon de dimensions connues. S'il est nécessaire de matifier l'artefact ainsi créé, il est très important de matifier l'ensemble des deux cales dans un même temps afin de ne pas ajouter de matière entre les deux cales en contact. Des exemples d'empilement de cales sont donnés sur la figure F.2.

Tableau F.1 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Marche $h_0 = L$		- d variable
- Marche $h_0 = \frac{L}{2}$		- $\alpha = 0$ fixe
- Marche $h_0 = \frac{L}{10}$		- $\beta = 0$ fixe



Figure F.2 – Artefacts marches

2.2 Protocole porteurs pilotables

La justesse de mesure est évaluée en utilisant des marches qui occupent une place plus ou moins grande de la fenêtre de mesure. La numérisation est réalisée de telle sorte que l'artefact soit contenu en entier dans la fenêtre de mesure (Figure F.3).

1. Placer les trois artefacts sur un plan dégauchi de l'espace de travail.
2. Numériser chacun des trois artefacts en positionnant le capteur à d_{max} par rapport aux plans inférieurs des artefacts. Nommer les nuages $PL_h_inf_d_{max}$ et $PL_h_sup_d_{max}$ où h est la hauteur de marche nominale.
3. Répéter les numérisations en diminuant la distance d de $\frac{L}{10}$ pour obtenir suffisamment de résultats, jusqu'à d_{min} . Seuls les artefacts dont les deux plans restent dans la fenêtre de mesure sont numérisés. Nommer les nuages $PL_h_inf_d_i$ et $PL_h_sup_d_i$ où d_i est la distance de numérisation.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3 Protocole porteurs non pilotables

En ce qui concerne les systèmes avec des porteurs non pilotables, de la même manière que pour l'évaluation du bruit, il n'est pas possible de piloter la distance de numérisation. Ainsi, les numérisations réalisées sont qualitativement à des distances égales à d_{min} , D et d_{max} .

1. Placer les trois artefacts sur un plan dégauchi dans l'espace de travail.
2. Placer le capteur approximativement à la distance d_{min} de la surface supérieure.
3. Numériser les artefacts. Nommer les nuages $PL_h_inf_d_{min}$ et $PL_h_sup_d_{min}$ où h est la hauteur de marche nominale.
4. Répéter l'opération en plaçant la marche au milieu de la fenêtre de mesure (distance D), puis en plaçant le plan inférieur à la deuxième extrémité de la fenêtre (distance d_{max}). Nommer les nuages $PL_h_inf_d_i$ et $PL_h_sup_d_i$, $d_i \in [d_{min}, D, d_{max}]$
5. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4 Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Pour chacune des acquisitions, 4 scans doivent être réalisés de manière à modifier complètement les configurations articulaires du bras. Il est toutefois très important de conserver une distance de numérisation constante durant les quatre scans. Nommer les différents nuages $PL_h_inf_d_i_j$ et $PL_h_sup_d_i_j$ où j est le numéro de l'acquisition pour une distance de numérisation d_i fixée.

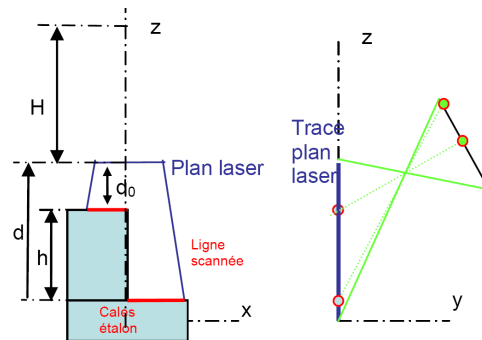


Figure F.3 – Justesse relative [BOU05]

3 Calculs

Le calcul de la justesse de mesure est réalisé de la manière suivante sur chacun des couples de nuages obtenus.

1. Associer un plan des moindres carrés PL_inf au nuage inférieur.
2. Calculer la distance moyenne $h1$ entre les points du nuage supérieur et le plan PL_inf .
3. Associer un plan des moindres carrés PL_sup au nuage supérieur.
4. Calculer la distance moyenne $h2$ entre les points du nuage inférieur et le plan PL_sup .
5. L'erreur de justesse est donnée par $j_a = \frac{h1 + h2}{2} - h0$.

G Justesse de mesure dite « relative » en fonction de la distance de numérisation

1 Définition

La justesse relative est évaluée sur un artefact de référence comme la différence entre la position calculée d'une surface numérisée (plan, sphère, etc.) et sa position théorique. La distance calculée est donc la distance entre deux surfaces extraites de nuages de points représentant la même surface physique, la distance nominale entre les surfaces est donc nominale nulle. La figure G.1 illustre les différents nuages de points obtenus lors de la numérisation d'une unique surface plane de référence.

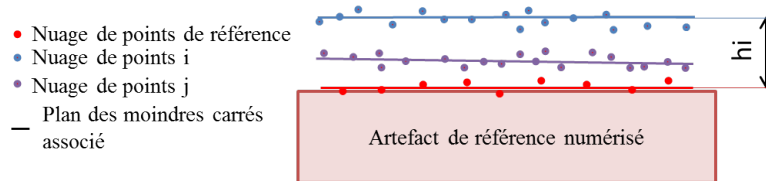


Figure G.1 – Justesse relative : position des plans associés par rapport au plan considéré comme référence

La surface de référence est établie par une première numérisation (en rouge sur la figure G.1), les hauteurs hi entre les différents nuages et le plan de référence sont évaluées de la même façon que pour la justesse absolue. La différence est que tous les nuages sont une représentation discrète de la même surface. Soit $M_{ref} = \{M_{ref,1}, \dots, M_{ref,n}\}$ le nuage de point de référence et $M_i = \{M_{i,1}, \dots, M_{i,n}\}$ les différents nuages de points acquis avec de la même façon \bar{M}_i et \vec{N}_i les barycentres des différents nuages et normales de leurs plans associés, l'erreur de justesse relative j_r est donnée par l'équation G.1.

$$j_r = hi = \frac{hi1 + hi2}{2} = \frac{|(\bar{M}_i - \bar{M}_{ref}) \cdot \vec{N}_{ref}| + |(\bar{M}_i - \bar{M}_{ref}) \cdot \vec{N}_i|}{2} \quad (G.1)$$

avec $hi1$ et $hi2$ les distances calculées d'un barycentre au plan associé au deuxième nuage et vice versa.

2 Evaluation

2.1 Matériel et artefacts

La justesse relative est évaluée en comparant la position relative des surfaces associées à des nuages de points représentant la même surface physique, mais ayant été obtenus à différentes distances de numérisation. Pour ceci, deux tests sont proposés. Le premier consiste à numériser une **sphère de faible défaut de forme** (sphère d'étalonnage capteur par exemple) à des distances différentes, les coordonnées calculées du centre de la sphère sont comparées en prenant pour référence la première numérisation.

Le second test consiste à numériser un **artefact plan**. La position du plan associé au nuage est comparée à la position du même plan numérisé avec un capteur plus juste ayant le même repère de mesure, ou obtenu lors de la première numérisation.

Tableau G.1 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan		- d variable
- Sphère		- $\alpha = 0$ fixe
		- $\beta = 0$ fixe

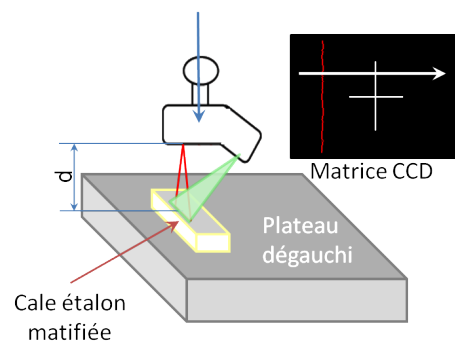


Figure G.2 – Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation

2.2 Protocole porteurs pilotables

2.2.1 Test avec la sphère

1. Placer le capteur à la distance d_{min} .
2. Numériser la sphère à distance constante. Nommer le nuage obtenu $SP_{d_{min}}$.
3. Répéter la numérisation en éloignant le capteur de $\frac{L}{10}$. Nommer les nuages obtenus SP_{d_i} , avec d_i la distance.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.2.2 Test avec le plan

1. Placer l'artefact plan sur un plan.
2. Placer le capteur à la distance d_{min} .
3. Numériser l'artefact à distance constante. Nommer le nuage $PLjr_{d_{min}}$.
4. Répéter la numérisation en éloignant le capteur d'une valeur de $\frac{L}{10}$ jusqu'à d_{max} . Nommer les nuages $PLjr_{d_i}$, avec d_i la distance de numérisation.
5. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3 Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas de porteurs non pilotables, seules trois distances caractéristiques sont utilisées pour chacun des deux protocoles.

2.3.1 Test avec la sphère

1. Placer le capteur à une distance proche de d_{min} de la sphère.
2. Numériser la sphère à distance constante. Nommer le nuage obtenu $SP_{d_{min}}$.
3. Répéter la numérisation aux distances D et d_{max} . Nommer les nuages obtenus SP_D et $SP_{d_{max}}$.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3.2 Test avec le plan

1. Placer l'artefact plan sur un plan.
2. Placer le capteur à une distance proche de d_{min} de la surface plane
3. Numériser l'artefact à distance constante. Nommer le nuage $PLjr_{d_{min}}$.
4. Répéter la numérisation aux distances approximatives D et d_{max} . Nommer les nuages $PLjr_D$ et $PLjr_{d_{max}}$.
5. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4 Cas des bras robotisés ou polyarticulés

De la même manière que pour l'évaluation de l'influence de la distance sur le bruit de numérisation, pour chacune des acquisitions, quatre scans doivent être réalisés de manière à modifier complètement les configurations articulaires du bras. Il est toutefois très important de conserver une distance pièce-/capteur constante durant les quatre scans. Nommer chacun des scans $SP_{d_i}_j$ ou $PLjr_{d_i}_j$ avec j le numéro de l'acquisition pour une distance d_i .

3 Calculs

3.1 Calculs pour la sphère

1. Associer une sphère des moindres carrés $SP_{mc}_{d_i}$ à chaque nuage;
2. Calculer la distance moyenne h_i entre le centre C_i de la sphère $SP_{mc}_{d_i}$ et le centre C_0 de la sphère $SP_{mc}_{d_{min}}$;
3. $j_r = \|C_i - C_0\|$.

3.2 Calculs pour le plan

1. Associer un plan des moindres carrés $PL_{mc}_{d_i}$ à chaque nuage;
2. Calculer la distance moyenne $h1$ entre les points du nuage $PLjr_{d_i}$ et le plan $PL_{mc}_{d_{min}}$;
3. Calculer la distance moyenne $h2$ entre les points du nuage $PLjr_{d_{min}}$ et le plan $PL_{mc}_{d_i}$;
4. $j_r = \frac{h1 + h2}{2}$.

H Détermination de l'accessibilité d'un capteur optique

Cette annexe détaille un calcul simple qui permet d'évaluer l'accessibilité d'un capteur optique pour l'acquisition d'un cylindre intérieur. Le calcul est détaillé pour un capteur à triangulation, les capteurs confocaux pouvant être considérés dans ce cas comme un cas particulier des capteurs à triangulation avec un angle de triangulation nul.

1 Données d'entrée

Les données d'entrée pour ce calcul sont les suivantes :

- l'angle de triangulation γ , angle entre la source lumineuse et la caméra (ou le récepteur) ;
- l'angle α_{max} , angle de numérisation maximum pour respecter les contraintes de qualité ;
- l'angle β_{max} , angle de numérisation secondaire maximum pour respecter les contraintes de qualité ;
- Le rapport $\frac{L}{D}$ du cylindre, c'est-à-dire le rapport entre la longueur et le diamètre du cylindre.

Ces données permettent de déterminer, pour un cylindre donné, le taux de couverture maximum qu'il est possible d'obtenir avec un capteur à triangulation donné, ainsi que le nombre d'orientations capteur nécessaires à l'acquisition dans le cas de l'utilisation d'une MMT équipée d'une tête rotative de positionnement du capteur.

2 Calculs

La figure H.1 présente la zone accessible d'un cylindre intérieur pour un capteur laser-plan avec une seule orientation capteur. Le capteur utilisé pour l'étude est le Zephyr KZ25 de Kréon Technologies. Il possède un angle de triangulation de 34° . L'angle α_{max} a été évalué à 60° et l'angle β s'est avéré peu influent sur la qualité et donc non contraint. Les calculs ont été implémentés avec Matlab 7.2.0.232.

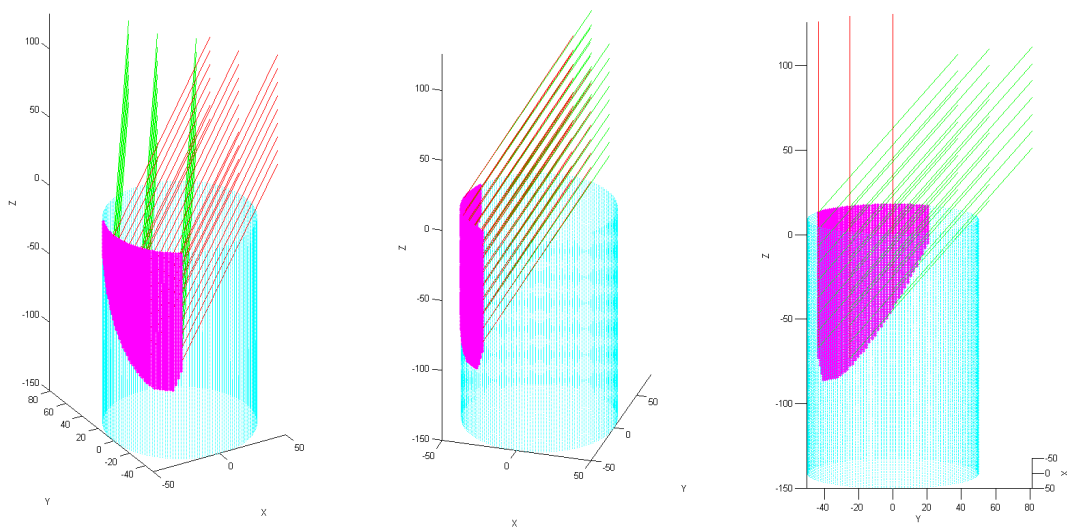


Figure H.1 – Représentation des rayons laser (rouge) et caméra (vert) pour l'acquisition d'un cylindre intérieur avec un capteur laser-plan

Sur cette figure les rayons issus de la source laser sont représentés en rouge et les rayons réfléchis dans la caméra sont représentés en vert. Cette figure est obtenue avec les calculs présentés ci-après.

2.1 Hypothèses

Pour le calcul, les hypothèses suivantes ont été introduites :

- La largeur et la profondeur de la fenêtre de mesure ne sont pas prises en compte, le calcul est réalisé dans le cas d'un capteur laser ligne. Nous considérons que ses dimensions ne peuvent être que bénéfiques au problème d'accessibilité par rapport à un capteur laser-plan, le présent calcul donne donc un minorant de la surface réellement couverte.
- Le cylindre a un axe parallèle à l'axe Z de la machine centré en $(0,0)$. Nous nous plaçons dans le cas d'une mesure sur MMT, l'angle β est donc l'angle entre l'axe laser et un plan orthogonal à l'axe du cylindre. L'angle α est donné entre la projection de l'axe laser sur un plan orthogonal à l'axe du cylindre et la normale de la surface au point considéré (Figure H.2).
- La face supérieure du cylindre a pour altitude $Z = 0$.
- Nous considérons que l'axe de la source laser est parallèle au plan XZ de la machine, et que la seule partie potentiellement accessible par le capteur avec une seule orientation est le demi-espace $X < 0$.

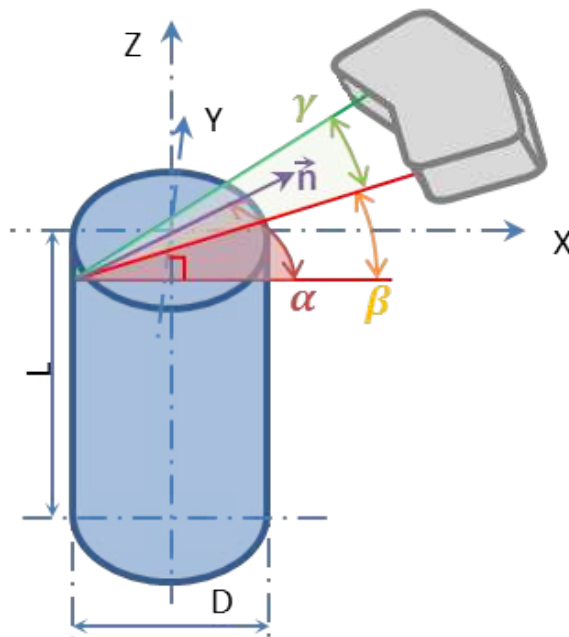


Figure H.2 – Paramétrisation pour le calcul de l'accessibilité d'un capteur à triangulation laser dans un cylindre intérieur

2.2 Respect des contraintes de qualité

L'angle β choisi inférieur à β_{max} fixe l'orientation du capteur dans l'espace. Afin de respecter cette contrainte, le capteur, dont l'axe est initialement orienté suivant Z , subit une rotation autour de l'axe Y . La matrice de rotation dépendant de l'angle β est donnée par l'équation H.1.

$$ROT_Y = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) & 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) & 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta & 0 & \cos \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \beta & 0 & \sin \beta \end{bmatrix} \quad (\text{H.1})$$

À partir des hypothèses énoncées il est possible de calculer si un point est accessible ou non par le capteur étudié. Soit $C(i) = (X_i, Y_i, Z_i)$ un point du cylindre C étudié de diamètre D . L'accessibilité au sens du respect de l'angle α est vérifiée si $C(i)$ répond à l'équation H.2.

$$X_i < -0.5 \cdot D \cdot \cos \alpha_{max} \quad (\text{H.2})$$

L'accessibilité au sens de l'angle β est respectée si $C(i)$ respecte l'équation H.3.

$$Z_i > -D \cdot \tan \beta \quad (\text{H.3})$$

2.3 Visibilité capteur

L'orientation de l'axe de la source lumineuse est donnée par l'équation H.4.

$$las = ROT_Y \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ 0 \\ \sin \beta \end{bmatrix} \quad (\text{H.4})$$

Pour que l'acquisition puisse être réalisée, la source lumineuse doit atteindre la surface à numériser. De ce fait, et compte tenu des hypothèses énoncées, le demi cylindre $X > 0$ n'est pas visible par la source. De la même manière, il est nécessaire de supprimer les points que la caméra ne peut pas voir. Pour ceci nous déterminons l'orientation de l'axe caméra grâce à l'équation H.5.

$$cam = ROT_Y \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma \\ \sin \gamma \\ \sin \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (\text{H.5})$$

Afin de trouver ces points qui dépendent de l'angle de triangulation, nous évaluons l'angle de triangulation projeté dans le plan XY , c'est-à-dire l'angle entre les projections des axes source et récepteur dans ce plan. Cet angle γ_{proj} est donné par l'équation H.6

$$\gamma_{proj} = \arccos(cam(1)) = \arccos(\cos \beta \cos \gamma) \quad (\text{H.6})$$

De la même manière que nous avons déterminé que les points du demi espace $X > 0$ ne sont pas visibles par la source lumineuse, nous pouvons déterminer parmi les points restants ceux qui ne sont pas visibles par la caméra. Le système d'équations H.7 permet de déterminer les points non visible par la caméra.

$$\begin{cases} X_i < -0.5 \cdot D \cdot \sin \gamma_{proj} \\ Y_i > 0 \end{cases} \quad (\text{H.7})$$

Parmi tous les points restants du cylindre et considérés comme potentiellement ac-

cessibles, une deuxième phase d'élimination de points pour des contraintes de visibilité est réalisée. En chacun des points un rayon source et caméra sont testés, chacun d'eux ne doit pas intersecter une autre partie du cylindre. Afin de réaliser cette vérification nous résolvons en 2 dimensions le problème de l'intersection entre une droite et un cercle. Étant donné que le point considéré est l'une des deux solutions du problème, la seconde solution donne les coordonnées (X'_i, Y'_i) de l'éventuel point d'intersection entre le rayon et une partie du cylindre non désirée. Connaissant l'équation des droites il ne reste qu'à vérifier que le point en question est bien situé au dessus du cylindre. Dans le cas de la source lumineuse, du fait que son axe est contenu dans un plan parallèle au plan XZ la solution du problème d'intersection est simple : Soit $C(i) = (X_i, Y_i, Z_i)$ l'un des points potentiellement accessible par le capteur, le point $C'(i) = (X'_i, Y'_i, Z'_i)$ intersection du cylindre par la source lumineuse passant par $C(i)$ est donné par l'équation H.8.

$$C'(i) = \begin{bmatrix} -X_i \\ Y_i \\ Z_i + \frac{\text{las}(3) \cdot (-2X_i)}{\text{las}(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_i \\ Y_i \\ Z_i - 2X_i \tan \beta \end{bmatrix} \quad (\text{H.8})$$

La condition de visibilité d'un point $C(i)$ est donc donnée par $Z_i - 2X_i \tan \beta > 0$.

En ce qui concerne la visibilité de la caméra, afin de trouver l'intersection $C'(i)$ nous résolvons l'équation H.9 où k est l'inconnue.

$$C'(i) = C(i) + k \cdot \text{cam} \quad (\text{H.9})$$

$C'(i)$ est sur le cylindre si la relation H.10 est vérifiée.

$$X_i'^2 + Y_i'^2 = \frac{D^2}{4} \Leftrightarrow ak^2 + bk + c = 0 \quad (\text{H.10})$$

avec a , b et c donnés par l'équation H.11.

$$\begin{cases} a = \text{cam}^2(1) + \text{cam}^2(2) = \cos^2 \beta \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \\ b = 2(X_i \cdot \text{cam}(1) + Y_i \text{cam}(2)) = 2(X_i \cos \beta \cos \gamma + Y_i \sin \gamma) \\ c = X_i^2 + Y_i^2 - \frac{D^2}{4} = 0 \text{ par définition car } C(i) \text{ est un point du cylindre} \end{cases} \quad (\text{H.11})$$

La résolution de cette équation donne deux racines, $k_1 = 0$ et $k_2 \neq 0 = -\frac{b}{a}$. Il reste à vérifier que la coordonnée en Z de $C'(i) = C(i) + k_2 \cdot \text{cam}$ soit positive, c'est-à-dire que la relation H.12.

$$Z'_i = Z_i + k_2 \sin \beta \cos \gamma = Z_i - \frac{X_i \sin 2\beta \cos^2 \gamma + Y_i \sin \beta \sin 2\gamma}{\cos^2 \beta \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma} > 0 \quad (\text{H.12})$$

2.4 Synthèse

Finalement, afin de déterminer l'ensemble des points accessibles en une seule orientation du capteur par rapport au cylindre, le système d'équations H.13 doit être résolu.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i < -0.5 \cdot D \cdot \cos \alpha_{max} \\ Z_i > -D \cdot \tan \beta \\ Z_i - 2X_i \tan \beta > 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{respect angle } \alpha_{max} \\ \text{respect angle } \beta \\ \text{visibilité source} \end{array} \quad (H.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i < -0.5 \cdot D \cdot \sin \gamma_{proj} \\ Y_i > 0 \\ Z_i - \frac{X_i \sin 2\beta \cos^2 \gamma + Y_i \sin \beta \sin 2\gamma}{\cos^2 \beta \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma} > 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \\ \\ \text{visibilité caméra} \end{array}$$

3 Résultats

Les tests sur l'accessibilité ont été réalisés pour le capteur Kréon Zephyr KZ25. La figure H.3 représente l'évolution de la zone couverte d'un cylindre intérieur dont le

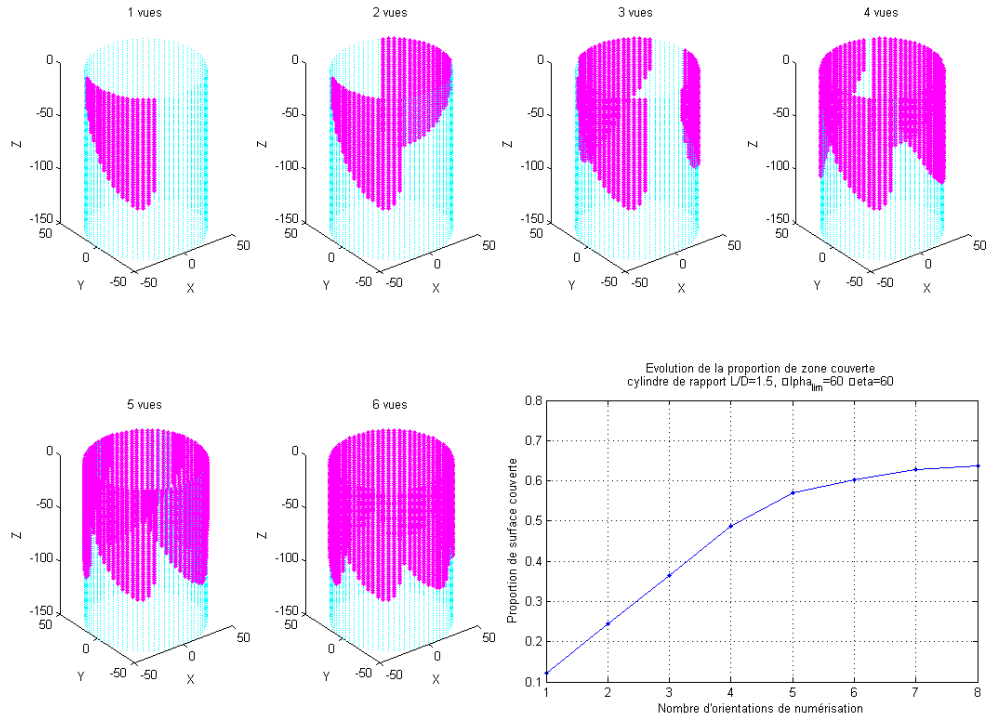


Figure H.3 – Évolution de la zone couverte d'un cylindre intérieur en fonction du nombre d'orientations

rapport $\frac{L}{D} = 0,5$ en fonction du nombre d'orientations du capteur. L'angle β choisi pour cette étude est de 60° . Différents angles β ont été testés mais celui-ci donne les meilleurs résultats. Les différents paramètres $\frac{L}{D}$, β , nombre d'orientations ont été testés.

L'évolution du taux de couverture du cylindre en fonction du rapport $\frac{L}{D}$ et du nombre d'orientations pour un angle $\beta = 60^\circ$ sont représentés sur la figure H.4.

Ces résultats permettent de déterminer si un cylindre peut être entièrement numérisé ainsi que le nombre d'orientations nécessaires.

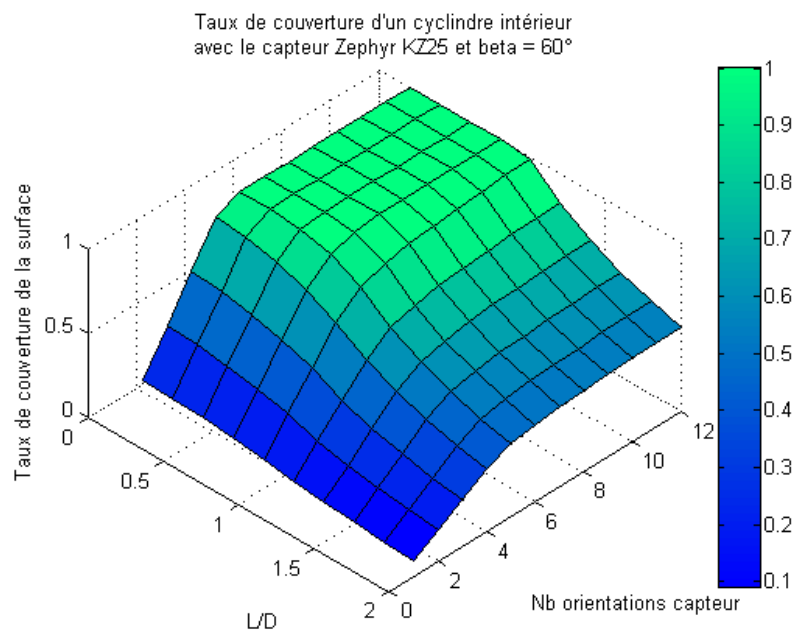


Figure H.4 – Évolution du taux de couverture d'un cylindre intérieur en fonction du nombre d'orientations et du rapport $\frac{L}{D}$

