

THESE DE DOCTORAT DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Présentée par

Monsieur Charyar MEHDI-SOUZANI

pour obtenir le grade de

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

Domaine :

MECANIQUE - GENIE MECANIQUE - GENIE CIVIL

Sujet de la thèse :

**Numérisation 3D intelligente d'objets de formes
inconnues basée sur des critères de qualité**

Thèse soutenue le 30 juin 2006 devant le jury composé de :

M. P. BOURDET	Professeur des universités-ENS Cachan	Président
M. G. RIS	Professeur des universités-Henri Poincaré	Rapporteur
M. J-F. FONTAINE	Professeur des universités-Bourgogne	Rapporteur
M. F. THIEBAUT	Maître de conférences universités-Paris XI	Examineur
M. T. GARNIER	Ingénieur MDTVision	Examineur
Mme C. LARTIGUE	Professeur des universités-Paris XI	Directeur de thèse



**Laboratoire Universitaire de Recherche
Production Automatisée**

Ecole Normale Supérieure de CACHAN
61, avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN CEDEX (France)

THESE DE DOCTORAT DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Présentée par

Monsieur Charyar MEHDI-SOUZANI

pour obtenir le grade de

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

Domaine :

MECANIQUE - GENIE MECANIQUE - GENIE CIVIL

Sujet de la thèse :

**Numérisation 3D intelligente d'objets de formes
inconnues basée sur des critères de qualité**

Thèse soutenue le 30 juin 2006 devant le jury composé de :

M. P. BOURDET	Professeur des universités-ENS Cachan	Président
M. G. RIS	Professeur des universités-Henri Poincaré	Rapporteur
M. J-F. FONTAINE	Professeur des universités-Bourgogne	Rapporteur
M. F. THIEBAUT	Maître de conférences universités-Paris XI	Examineur
M. T. GARNIER	Ingénieur MDTVision	Examineur
Mme C. LARTIGUE	Professeur des universités-Paris XI	Directeur de thèse



**Laboratoire Universitaire de Recherche
Production Automatisée**

Ecole Normale Supérieure de CACHAN
61, avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN CEDEX (France)

Remerciements

Les travaux exposés dans ce mémoire de thèse sont le fruit d'activités de recherches menées au sein du Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) de l'Ecole Normale Supérieure.

Je tiens tout d'abord à témoigner toute ma reconnaissance et à exprimer mes remerciements les plus chaleureux à Madame le Professeur Claire LARTIGUE. Ces années de thèse n'ont pas été sans difficultés mais elle a su m'apporter son expérience et sa claire voyance à chaque fois que cela fut nécessaire. Mais au-delà de son soutien scientifique, j'ai pu bénéficier de ces qualités humaines et de sa bonne humeur qui en font pour moi plus qu'un directeur de thèse mais une amie.

Je remercie les membres du jury et en premier lieu monsieur le Professeur Pierre BOURDET de m'avoir fait l'honneur d'accepter de le présider. Je remercie également Messieurs les Professeurs Gabriel RIS et Jean-François FONTAINE d'avoir bien voulu me faire profiter de leur expertise en rapportant cette thèse et de m'avoir consacré une partie de leur temps. Merci également à Monsieur Thierry Garnier de sa participation, de ses questions et de son intérêt pour mon travail.

Je remercie tout chaleureusement François THIEBAUT pour son soutien, sa disponibilité et pour ces réponses qui m'ont permis de résoudre bon nombre d'interrogations tout en m'apportant un gain de temps considérable.

Je remercie également Jean Jaques LESAGE de m'avoir accueilli au sein du LURPA.

Je n'oublie bien sûr pas l'ensemble de mes compagnons de route au laboratoire, « Marcus informatus » la clé de mes soucis informatiques, mon co-bureau d'hier et j'espère d'aujourd'hui Grec, mais également tous les amis doctorants (français, mexicains, syriens...), les chefs et les autres pour les discussions, les échanges nombreux et les moments de détente toujours très instructifs.

Enfin je terminerais ces quelques lignes en remerciant tout particulièrement mes parents de m'avoir apporté tout leur soutien et d'avoir su me donner les moyens de comprendre et de choisir. Sans vous ces travaux n'existeraient pas. Merci également à ma femme Sandrine d'avoir accepté de subir les aléas de ma thèse et de s'être quand même penché sur mes écrits pourtant si loin de ses centres d'intérêt.

Table des Matières

Introduction	1
---------------------------	----------

Chapitre 1

Problématique liée à la numérisation par capteur laser 3D	7
--	----------

1. Introduction à la numérisation sans contact	9
1.1. Technologie des capteurs 3D sans contact	9
1.2. Les capteurs basés sur le principe de la triangulation	10
1.3. Les capteurs basés sur le principe de la télémétrie	12
1.4. Traitement d'images	13
2. Système de numérisation 3D à base de capteur laser	13
2.1. Technologie et composants du capteur	14
2.1.1. L'émetteur : le laser	14
2.1.2. Le récepteur : la caméra CCD	16
2.2. Modélisation du système de numérisation	18
2.2.1. Modèle géométrique - modèle physique	20
2.2.2. Modèle géométrique de sténopé	20
2.2.3. Modèle géométrique de sténopé avec distorsion	23
2.2.4. Modèle géométrique du système de numérisation	25
2.3. Limites associées au système de numérisation	26
2.3.1. Limites liées aux composants	27
2.3.2. Limites liées aux modèles et algorithmes de traitement	30
3. Caractéristiques des données numérisées	32
3.1. Caractéristiques intrinsèques	33
3.2. Pré-traitement des données numérisées	35
3.3. Qualification des données numérisées	37
3.3.1. Les indicateurs de qualité	37
3.3.2. Indicateurs de qualité et stratégie de re-numérisation	38
4. Synthèse : Formulation de la problématique	39

Chapitre 2

Numérisation sans contact et automatisation	41
--	-----------

1. Introduction	42
2. Notion de visibilité et numérisation sans contact	43
2.1. Introduction à la visibilité	43
2.2. Visibilité : les approches continues	44
2.3. Visibilité : les approches discrètes	46
2.4. Visibilité et carte graphique	50

2.5.	Synthèse concernant la visibilité	51
3.	Numérisation automatique d'objets définis en CAO	52
4.	Numérisation automatique d'objets inconnus	55
5.	Conclusion.....	57

Chapitre 3

Qualification des moyens de mesure sans contact	59
--	-----------

1.	Introduction : Le besoin d'évaluation du moyen de mesure	60
2.	Sources d'incertitude et qualification des systèmes de numérisation sans contact.....	61
2.1.	Chaîne de numérisation et sources de perturbations	61
2.2.	Evaluation de la qualité : Normes ISO et Numérisation 3D	65
2.3.	Evaluation : outils de quantification.....	66
2.3.1.	Indicateurs intrinsèques : la densité	67
2.3.2.	Indicateurs intrinsèques : la complétude	68
2.3.3.	Indicateurs spécifiques : le bruit.....	69
2.3.4.	Indicateurs spécifiques : l'exactitude	70
2.3.5.	Synthèse	71
3.	Evaluation du système.....	72
3.1.	Description du système : les grandeurs significatives.....	72
3.2.	Mise en condition et réglage du protocole d'évaluation	75
3.3.	Evaluation du bruit en fonction de l'angle de numérisation	76
3.4.	Evaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation	81
3.4.1.	Distance : conséquence sur le bruit.....	81
3.4.2.	Distance et épaisseur de la trace.....	83
3.5.	Evaluation de la justesse	83
3.6.	Evaluation de la fidélité.....	87
3.7.	Evaluation de la procédure de calibration.....	89
3.8.	Synthèse du protocole	91
4.	Application : intégration de l'évaluation du système de numérisation	92
5.	Conclusion.....	94

Chapitre 4

Stratégie de numérisation intelligente	95
---	-----------

1.	Démarche globale.....	96
1.1.	Introduction : besoin et axes de réponse	96
1.2.	Démarche de numérisation intelligente d'objets inconnus	98
2.	Données d'entrée : génération du premier nuage de points	100
3.	Traitement automatisé du nuage de points	100
3.1.	Pré-traitement : modélisation volumique	100
3.1.1.	Le besoin	100
3.1.2.	La voxelisation du nuage de points	101
3.2.	Identification de lignes caractéristiques	103
3.2.1.	Identification des points caractéristiques par codage directionnel.....	104
3.2.2.	Construction des lignes caractéristiques	106
3.3.	Estimation de la qualité du nuage de points.....	106

3.3.1.	Evaluation de la qualité au sens de bruit	107
3.3.2.	Evaluation de la qualité au sens de la complétude	109
4.	Génération de trajectoire de numérisation intelligente	112
4.1.	Rappel sur la modélisation géométrique du système	112
4.2.	Situations admissibles pour la numérisation d'un voxel	115
4.3.	Génération de la trajectoire de numérisation des lignes caractéristiques	116
4.3.1.	Cas général	116
4.3.2.	Simplification possible pour la complétude	119
4.4.	Programmation de la trajectoire en automatique.....	120
5.	Application	120
5.1.	Première numérisation de l'objet	122
5.2.	Pré-traitement du nuage de points	122
5.3.	Numérisation intelligente	125
6.	Conclusion.....	127
 Conclusion		129
 Bibliographie		133
 Annexes		143

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure 1 : Classification des systèmes de numérisation 3D [BOU 98]	10
Figure 2 : Principe de la Triangulation.....	11
Figure 3 : Principe de la Télémétrie	12
Figure 4 : Système de numérisation	14
Figure 5 : Fonctionnement du système de projection laser	15
Figure 6 : Profil énergétique de la trace laser [STO]	16
Figure 7 : Schémas d'une caméra CCD	17
Figure 8 : Chaîne de circulation de l'information dans le processus de numérisation 3D.....	19
Figure 9 : Modèle de sténopé	21
Figure 10 : Principe du modèle de Sténopé.....	21
Figure 11 : Distorsions radiales causées par les lentilles [TOR 04].....	23
Figure 12 : Position et orientation relative des éléments du système de numérisation	25
Figure 13 : Visualisation de la non formation de la trace laser	27
Figure 14 : Fenêtre de mesure du capteur Zephyr.....	28
Figure 15 : Principe de l'algorithme de sub-pixel.....	31
Figure 16 : Dispersion d'un point 3D en fonction de l'incertitude liée à la calibration [CON 02b].....	32
Figure 17 : Typologie des nuages de points	34
Figure 18 : Indicateur de qualité en génération automatique de trajectoires [CON 02]	38

Chapitre 2

Figure 1 : Exemple de carte gaussienne [CHE 92]	44
Figure 2 : Exemple de cartes de visibilité [GAN 94]	45
Figure 3 : Exemple d'application de la décomposition par cône de visibilité [ELB 98]	47
Figure 4 : Calcul de visibilité et visualisation par coordonnées sphérique [ELL 05]	48
Figure 5 : Exemple de calcul de visibilité globale [DER 05].....	50
Figure 6 : Utilisation de carte graphique pour le calcul de la visibilité [BAL 00].....	51
Figure 7 : Trajet de numérisation par suivie de surface [MAR 05]	54
Figure 8 : Numérisation volumique et génération de trajectoire[PAP 97].....	56

Chapitre 3

Figure 1 : Sources d'imprécision pour chaque système	61
Figure 2 : Fenêtre de réglage de la calibration externe du capteur Zephyr	62
Figure 3 : Fenêtre de réglage du capteur Zephyr dans le logiciel d'acquisition Polygonia	64
Figure 4 : Application de l'indicateur ρ -densité à une numérisation réelle	67
Figure 5 : Système de numérisation schématisé.....	73
Figure 6 : Paramètres géométriques des positions capteur/pièce	74

Figure 7 : Influence de β sur le bruit δ -plan	75
Figure 8 : Fenêtre de mesure et distance de réglage	76
Figure 9 : Trace laser dans la matrice CCD et image correspondant dans le logiciel de numérisation Polygonia.....	77
Figure 10 : Artefact de variation de l'angle de numérisation.....	78
Figure 11 : Effet du démarrage et de l'arrêt capteur sur une passe de numérisation	79
Figure 12 : Répartition gaussienne des écarts	79
Figure 13 : Bruit de mesure en fonction de l'angle de numérisation α	80
Figure 14 : Evolution de δ -bruit en fonction de la distance de numérisation	82
Figure 15 : Relation entre la distance de numérisation et le plan laser	83
Figure 16 : Artefact de mesure de la justesse	84
Figure 17 : Evaluation de la justesse relative en fonction de d	87
Figure 18 : Evaluation de la procédure de positionnement.....	91
Figure 19 : Intégration de la qualification du système de numérisation dans une démarche de numérisation intelligente	93

Chapitre 4

Figure 1 : Voiture miniature : la Mini	96
Figure 2 : Figurine artisanale	97
Figure 3 : Démarche de numérisation intelligente d'objet inconnu	99
Figure 4 : Première numérisation : données d'entrée de l'algorithme	100
Figure 5 : Voxelisation et attributs.....	102
Figure 6 : Voxelisation de nuages de points denses.....	103
Figure 7 : Les différents types de points caractéristique [OST 02].....	104
Figure 8 : Méthode d'identification des points caractéristiques	105
Figure 9 : Approximation polygonale par calcul de l'erreur de corde [OST 02].....	105
Figure 10 : Visualisation des points caractéristiques bords de trous (Mini non poudrée)	106
Figure 11 : δ -bruit en fonction de l'angle de numérisation.....	107
Figure 12 : Représentation du bruit au travers de la voxelisation.....	108
Figure 13 : Complétude : triangulation et calcul de l'aire des trous de numérisation.....	110
Figure 14 : Modélisation des trous en vue de la re-numérisation	112
Figure 15 : Modèle géométrique pour la définition de la trajectoire de numérisation.....	113
Figure 16 : Trajectoire de numérisation et bande numérisée	114
Figure 17 : Cône des orientations admissibles	116
Figure 18 : Représentation de voxels contours successifs	117
Figure 19 : Trajet de numérisation et Minimisation des réorientations capteur.....	119
Figure 20 : Le Masque	121
Figure 21 : Première numérisation	122
Figure 22 : Résultat de la voxelisation à 4x4x4 mm.	123
Figure 23 : Identification des points caractéristiques.....	123
Figure 24 : Evaluation de la qualité au sens du bruit de mesure.....	124
Figure 25 : Identification des zones à re-numériser au sens de la complétude	124
Figure 26 : Calcul de trajectoire intelligente pour le contour de l'œil	126
Figure 27 : Calcul des normales et orientations capteur associées.	126
Figure 28 : Résultat de la re-numérisation intelligente	127

Introduction

Depuis plusieurs décennies, nous assistons à une réduction du cycle de vie des produits issus de l'industrie avec l'apparition sur le marché de produits innovants et toujours plus performants. Il ne s'agit plus de répondre aux besoins des consommateurs mais d'anticiper, voire de créer le besoin. Cet état de fait se traduit par une mise sur le marché de produits nouveaux à intervalles de plus en plus réduits. Cette accélération ne peut être réalisable que par une maîtrise de plus en plus poussée de l'ensemble de la chaîne de conception et de production.

L'apparition de nouvelles technologies a considérablement contribué à la réduction de ce temps de conception et de production. La démarche de numérisation 3D s'inscrit pleinement dans cette évolution, aussi bien au niveau technologique qu'au niveau du besoin. Les domaines d'utilisations de la numérisation sont très variés : mécanique, design, architecture, art... . En ce qui nous concerne nous nous intéressons à son application dans le domaine du génie mécanique pour des applications de rétro-conception (Reverse Engineering), copiage de formes ou encore inspection rapide.

La numérisation 3D consiste en l'acquisition des coordonnées d'un ensemble de points 3D représentatifs des surfaces de la pièce à numériser. Pour réaliser cette tâche, il existe de nombreuses technologies afin de prendre en considération des contraintes variées et ainsi de répondre aux différents besoins. La plupart des systèmes de numérisation utilisés ces dernières années s'appuient sur des technologies de capteurs sans contact au regard du nombre de points générés en un temps relativement court. Cette particularité a rendu les systèmes de numérisation sans contact très attractifs conduisant de nombreux industriels à s'équiper de tels systèmes. Cependant, si les données acquises sont nombreuses, il se pose encore le problème de la représentativité de ces données vis-à-vis de l'objet numérisé. Par ailleurs, la numérisation telle que pratiquée aujourd'hui repose essentiellement sur les connaissances de l'opérateur qui la réalise. Ainsi, malgré les facilités apparentes d'utilisation, la qualité des résultats d'une numérisation reste très sensible à la procédure utilisée. Il en résulte alors un besoin d'apporter une assistance à la numérisation par la définition de stratégies de numérisation adaptées pouvant conduire à une qualité attendue des données. S'il existe désormais des travaux axés sur la définition de stratégies de numérisation automatique pour les pièces dont les formes sont définies à l'aide d'un modèle numérique, peu d'études se sont concentrées sur la numérisation automatique de pièces dont les formes ne sont pas connues. Cette problématique s'avère cependant cruciale en particulier pour les applications

de rétro-conception et de copiage rapide de formes.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la numérisation 3D automatique des pièces d'objets de formes inconnues. Notre étude s'appuie sur un système de mesure utilisant un capteur laser plan. Malgré les concepts complexes à partir desquels fonctionnent ces capteurs, les avantages qu'ils procurent poussent de plus en plus d'industriels à les utiliser. Les avantages les plus significatifs résident dans la quantité de points générés en un temps relativement court et dans la facilité d'utilisation. Il faut en particulier noter que ces capteurs peuvent désormais être montés sur les têtes orientables des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), ce qui leur confère une grande accessibilité des surfaces à mesurer. Nous avons basé notre démarche sur la connaissance des capacités du système de numérisation pour la définition d'une stratégie de numérisation intelligente conduisant à une qualité attendue. En effet, l'identification des capacités du système de numérisation permet de définir un espace admissible des grandeurs liées à la génération de trajectoire (distance de numérisation, angle de numérisation et direction de balayage) au regard de la qualité attendue. L'objet n'ayant pas de définition numérique, nous avons considéré qu'une première numérisation pouvait jouer ce rôle. Ainsi, la qualité du nuage de points issus de la première numérisation peut être évaluée et il est possible de construire une stratégie de numérisation dite intelligente qui permettra d'en améliorer la qualité. Nous pouvons donc mettre en avant les deux problématiques auxquelles nous proposons quelques réponses :

- La notion de qualité d'un nuage de points issus de numérisation 3D
- La définition d'une stratégie de numérisation automatique d'objets inconnus

Pour la première problématique, nous appuyons nos travaux sur les travaux précédemment menés au LURPA par A. Contri dans le cadre de ses travaux de thèse [CON 02]. Nous reprenons en particulier la notion d'indicateur de qualité dont nous proposons des procédures d'évaluation plus simples et faciles à mettre en œuvre pour tout utilisateur. En ce qui concerne, la stratégie de numérisation, la méthode que nous proposons tire partie de l'étude des capacités du système de numérisation utilisé. Elle apporte en particulier une réponse simple à la complétude des nuages de points acquis vis-à-vis des surfaces des objets numérisés. Le présent mémoire est organisé comme suit.

Le chapitre 1 présente la problématique liée à la numérisation par capteur laser plan.

Après une rapide présentation des différentes technologies associées à la numérisation sans contact, le chapitre s'attache à présenter les modèles géométriques régissent les capteurs laser plan. Les limites d'utilisation de ces capteurs ainsi que les incertitudes qui en résultent sont détaillées. Une attention plus particulière est ensuite donnée aux caractéristiques des nuages de points résultants mettant en avant la nécessité d'étapes de pré-traitement et de qualification des données. Enfin une partie synthèse montre que la connaissance des capacités du système peut conduire à son utilisation performante.

Le chapitre 2 présente un bref état de l'art des travaux traitants des problématiques liées à l'automatisation de la procédure de numérisation. Ce chapitre met en avant le fait que les travaux autour de l'automatisation se décomposent en la résolution de deux problèmes : la génération des situations optimales capteur/surface assurant la numérisation des surfaces selon des critères donnés et la génération de la trajectoire à partir des situations capteurs. Nous reprendrons dans notre démarche cette décomposition en y incluant des critères de qualité.

Le chapitre 3 est consacré à l'évaluation des capacités du système de numérisation avec pour objectif de définir un protocole d'évaluation accessible à tout utilisateur. En ce sens, nous proposons un ensemble de procédures d'évaluation de la qualité basées sur la mesure d'artefacts. La qualité est évaluée au travers de l'indicateur bruit de numérisation et en terme de justesse. L'influence des grandeurs, telles l'angle et la distance de numérisation, est étudiée, conduisant à définir des domaines d'utilisation admissibles pour une qualité donnée. Nous montrons alors comment inclure cette étude dans une démarche de numérisation intelligente.

Le chapitre 4 détaille la démarche globale de numérisation intelligente que nous avons développée. La numérisation dite intelligente nécessite un nuage de points acquis au cours d'une première numérisation des surfaces de l'objet à partir duquel la stratégie de numérisation est construite de façon à atteindre une qualité requise. La démarche présentée se compose de deux étapes principales : le pré-traitement des données et la génération de trajectoire de numérisation intelligente. Le pré-traitement des données conduit à définir un modèle d'occupation spatiale (voxelisation) à partir duquel des attributs sont calculés. Ce modèle sert de support à la définition de la stratégie de numérisation. Après avoir définie, la situation admissible capteur/surface pour un voxel, nous construisons la trajectoire de numérisation sur une succession de voxels voisins formant une ligne caractéristique. Chaque

étape de la démarche est illustrée au travers d'exemples. Une application est proposée afin de valider l'utilisation de la démarche pour assurer la complétude d'un objet numérisé.

Le mémoire se termine par quelques conclusions et perspectives.

Nota Bene : Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une allocation de recherche du ministère de l'éducation nationale de l'enseignement supérieur et de la recherche. Elle a donné lieu à 2 communications internationales, 2 revues internationales dont une est en révision.

Chapitre 1

Problématique liée à la numérisation par capteur laser 3D

La mesure et l'acquisition de formes sont restées longtemps dépendantes du contact à établir entre l'instrument de mesure et l'objet étudié, toutefois cet état de fait n'est plus vrai de nos jours. En effet, l'évolution des technologies nous apporte aujourd'hui un nombre de plus en plus important d'outils permettant d'effectuer des mesures et des acquisitions sans contact. La diversité importante des technologies disponibles permet d'exploiter au maximum les points forts de chaque technologie et ainsi de répondre à un large panel de besoins en numérisation 3D.

Toute numérisation 3D s'appuie sur l'utilisation d'un capteur, dont la fonction est de recueillir un nombre d'informations suffisantes permettant d'obtenir un codage 1D, 2D ou 3D du monde réel. La sémantique du codage est fonction du capteur et de sa technologie. En conséquence les informations 2D récoltées subissent un certain nombre de traitements (géométriques, mathématiques, optiques...) transparents pour l'utilisateur pour aboutir à une représentation numérique 3D du monde physique. La problématique traitée dans ce mémoire est de fait indissociable des capteurs 3D. C'est pourquoi ce premier chapitre est consacré à la présentation de leurs principes de fonctionnement ainsi qu'aux problèmes liés à leur utilisation. Nous ne proposons pas dans ce chapitre un état de l'art sur les capteurs sans contact, sujet particulièrement abondant dans la littérature [DJE 98], [BER 02]. L'objectif est ici de faire ressortir l'ensemble des problèmes liés à un système de numérisation 3D par capteur laser-plan.

Le premier paragraphe débute par une introduction sur les principes physiques et géométriques reproduits par les différents capteurs. Nous proposons dans la suite une présentation non exhaustive des technologies les plus répandues dans le domaine du génie mécanique ainsi que celles dont les évolutions récentes apportent un réel gain dans ce domaine.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation complète des systèmes de numérisation à base de capteurs laser-plan 3D utilisés pour résoudre la problématique de cette thèse. Nous présentons en particulier les modèles géométriques qui les régissent et nous abordons les limites de leur utilisation et les incertitudes qui peuvent résulter sur les grandeurs mesurées.

Le troisième paragraphe est dédié aux données résultant de la numérisation. Nous présentons plus particulièrement les caractéristiques des nuages de points obtenus par capteur laser. Nous détaillons leurs caractéristiques intrinsèques et précisons les problématiques associées au pré-traitement et à l'évaluation de la qualité de données qui en résultent.

Enfin une partie synthèse montre que la connaissance du système et des données obtenues peut conduire à une utilisation performante des systèmes de numérisation par capteur laser-plan.

1. Introduction à la numérisation sans contact

1.1. Technologie des capteurs 3D sans contact

La littérature aborde la numérisation 3D en regroupant les capteurs en deux catégories, les systèmes dits passifs et ceux dits actifs [REM 04] [SCO 03].

Les systèmes passifs utilisent l'énergie ambiante dont ils mesurent l'intensité réfléchie par la surface de l'objet numérisé. La réception de l'énergie réfléchie se fait à l'aide d'un système de vision ou d'acquisition généralement composé de plusieurs cameras. Ces systèmes sont de fait très tributaires des conditions ambiantes et en particulier du contraste et de l'éclairage du lieu de mesure. A titre d'exemple nous pouvons citer la photogrammétrie dont la technologie reprend un principe très proche de celui de la vision humaine : la stéréovision.

Les systèmes actifs interagissent avec la scène à numériser. Dans ce sens ils sont composés d'un émetteur qui projette sur la scène à numériser une source d'énergie de type onde lumineuse, laser ou bien électromagnétique. Le résultat de l'interaction avec l'objet numérisé est mesuré à l'aide de récepteur(s) comparable(s) à ceux utilisés par les systèmes passifs. La connaissance des caractéristiques des éléments d'émission et de réception permet de reconstituer l'information 3D. Les systèmes actifs présentent l'avantage d'être bien plus indépendants des conditions d'éclairage et de contraste du lieu de mesure.

Parallèlement aux deux regroupements précédemment énoncés, il est possible d'apporter une classification des systèmes de mesure au travers du mode d'obtention des coordonnées 3D [BOU 98]. Nous nous appuyons sur l'organisation proposée sur la figure 1 afin d'aborder les différentes techniques utilisées par les systèmes de numérisation sans contact.

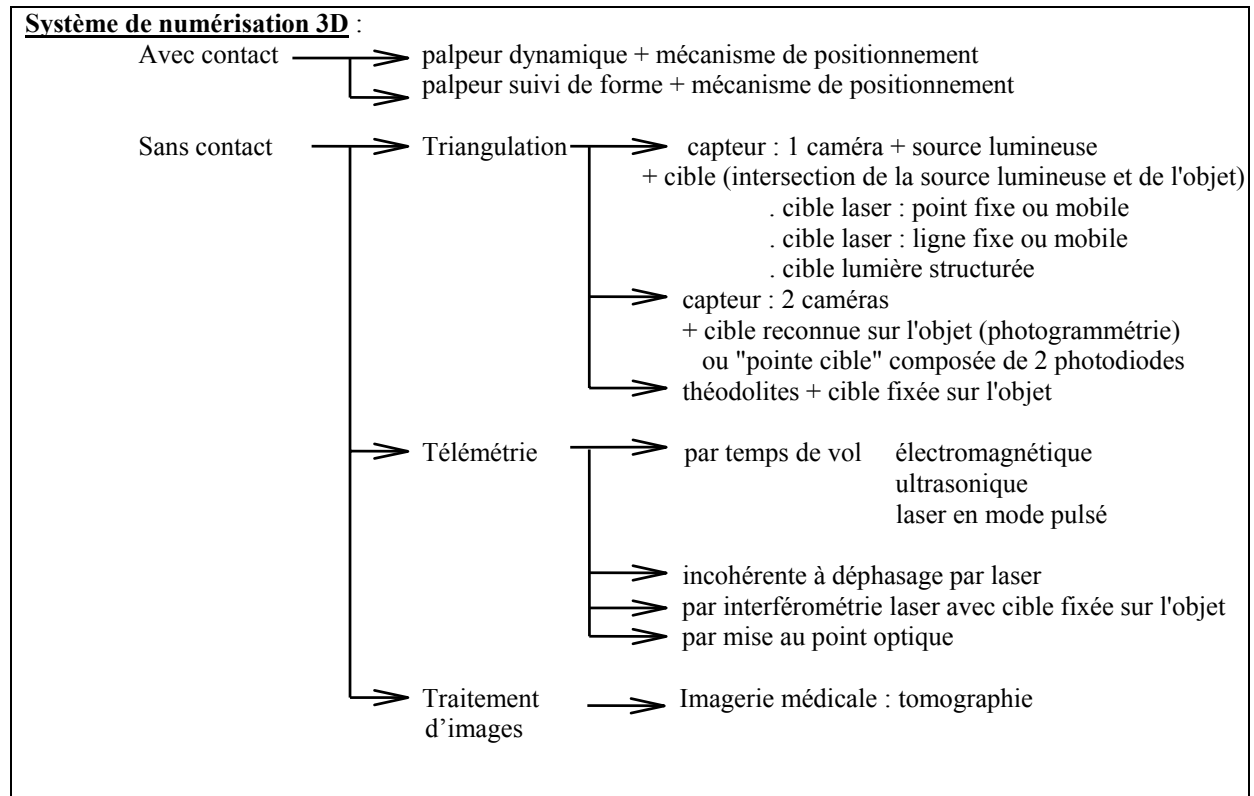


Figure 1: Classification des systèmes de numérisation 3D [BOU 98]

Il est essentiel de noter que la reconstruction complète en 3D d'un objet, nécessite que toutes les faces de l'objet soient accessibles par le capteur. Ainsi, le positionnement et les déplacements successifs du capteur autour de l'objet doivent être assurés à l'aide de mécanismes autorisant 5 degrés de liberté. Il s'agit en général de machines à mesurer 3D, machines-outils (3 translations plus 2 rotations) ou bien de bras articulés (5 rotations).

Afin de positionner nos travaux dans le domaine de la numérisation 3D à l'aide de capteur sans contact, il convient de balayer rapidement les technologies de numérisation les plus courantes dans le domaine du génie mécanique.

1.2. Les capteurs basés sur le principe de la triangulation

La triangulation exploite les propriétés géométriques du triangle connues depuis l'antiquité et énoncées à travers les lois trigonométriques. Nous pouvons citer le sextant comme l'un des outils les plus répandus et les plus anciens qui utilisent le principe de la triangulation. Par définition l'application de la triangulation nécessite l'existence d'un triangle. Dans le cas des systèmes de numérisation 3D les sommets du triangle sont définis par l'émetteur (E), le récepteur (R) et le point visé (M) sur la surface à numériser comme le montre la figure 2.

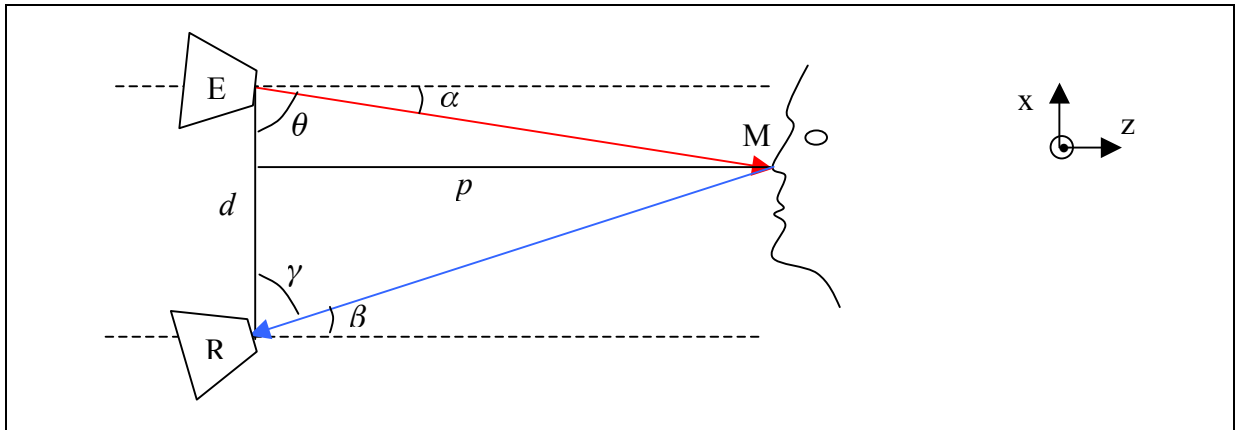


Figure 2 : Principe de la Triangulation

La triangulation est une technique qui permet un calcul unidirectionnel de la profondeur p correspondant en général à la coordonnée Z du point visé. La distance d entre le récepteur et l'émetteur doit être connue ainsi que l'angle de triangulation (α ou θ) et l'angle de réflexion (γ ou β). En fonction des grandeurs connues la profondeur p est obtenue par l'une des équations suivantes :

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

$$p = \frac{d}{\tan \beta + \tan \alpha} \quad (\text{Eq. 1.2})$$

Compte tenu des relations trigonométriques, il est fréquent de trouver ces formules écrites sous d'autres formes [MEY 02]. Il est à noter que les deux autres coordonnées (x et y) ne sont pas déterminées par triangulation.

La méthode de la triangulation est aussi bien utilisée par les systèmes passifs comme la photogrammétrie que par les systèmes actifs tels que les capteurs laser ou les capteurs à lumière structurée. La précision qui en résulte est en partie fonction de l'angle de numérisation et de la distance d . Il est possible d'atteindre une incertitude de mesure de l'ordre du dixième de micron. Ces caractéristiques en font une technologie très adaptée pour des besoins de grande précision et est très utilisée pour la numérisation de surfaces de petites à moyennes dimensions (de quelques cm^2 à quelques m^2).

Quelques exemples associés à cette technologie, telle la photogrammétrie sont proposés en annexe I. Les capteurs de type laser-plan qui utilisent le principe de la

triangulation sont quant à eux décrits en détail au paragraphe 2.

1.3. Les capteurs basés sur le principe de la télémétrie

Comme pour la triangulation la télémétrie est une méthode de mesure unidirectionnelle d'une distance euclidienne. La mesure est déterminée par la distance entre l'émetteur (E) et le point (M) de la surface de l'objet visé, comme le montre la figure 3.

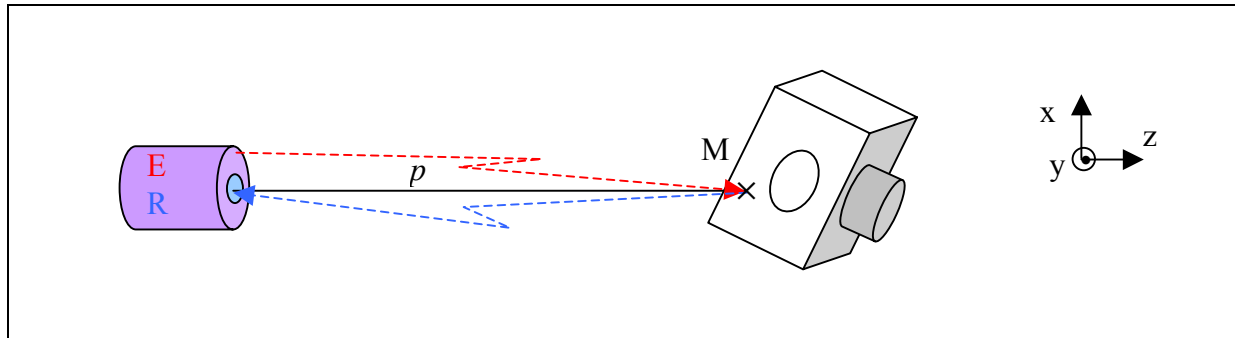


Figure 3 : Principe de la Télémétrie

Le support de la mesure de la distance p est une onde de type lumineux, infrarouge, hyperfréquence ou bien ultrason. Les instruments de mesure par télémétrie effectuent la mesure par deux méthodes: le calcul du temps de vol ou le calcul par différence de phase.

La mesure par temps de vol consiste à marquer le temps t_1 auquel une onde (en générale lumineuse) est émise et t_2 le temps auquel la réflexion de l'onde est enregistrée par le récepteur (E) du système télémétrique [WEI 04]. La connaissance du temps de parcours ainsi que celle de la vitesse V du signal permettent de déduire la distance p via l'équation 1.3 :

$$p = \frac{Vt}{2} \quad \text{avec} \quad t = t_2 - t_1 \quad (\text{Eq. 1.3})$$

Cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter une électronique sophistiquée. A titre d'exemple citons les radars, sonars ou les lidars qui utilisent le principe du calcul du temps de vol.

La mesure du déphasage entre l'onde émise et celle réfléchie est une variante du calcul du temps de vol. Le principe de fonctionnement reste le même que celui décrit dans la figure 3. Il consiste à moduler l'impulsion de l'onde émise suivant une fréquence déterminée. L'étude par comparaison des caractéristiques de l'onde captée par le récepteur permet de calculer la distance p grâce à l'équation 1.4 [CHA 98, chap1]:

$$\frac{\varphi}{2}\pi = \frac{2p}{\lambda} \quad \rightarrow \quad p = \frac{\lambda\varphi\pi}{4} \quad (\text{Eq. 1.4})$$

φ est le déphasage entre l'onde émise et celle reçue et λ représente la longueur d'onde de travail. L'onde utilisée doit être sinusoïdale, stationnaire. La fréquence utilisée, conditionne la précision et la profondeur de mesure. Ainsi Goulette [GOU 99] préconise une modulation suivant deux fréquences, l'une lente et l'autre élevée afin de combiner une bonne précision de mesure et une grande profondeur de champ. Le calcul par temps de vol permet d'atteindre une précision moins grande que la triangulation (de l'ordre du cm), cependant la précision est quasiment constante quelle que soit la distance, ce qui n'est pas le cas de la triangulation. Un exemple associé à cette technologie est proposé en annexe I.

1.4. Traitement d'images.

Le traitement d'image est une technique de numérisation 3D issue initialement des besoins en médecine. A ce titre la grande différence avec les autres technologies est que le traitement d'image permet l'obtention d'une numérisation de la structure interne du sujet d'étude. Les techniques de numérisation dites d'imagerie médicale exploitent les propriétés physiques de la matière. La pièce est exposée à un champ de rayonnement. La matière interagit avec le rayonnement en absorbant une partie. Le résultat de cette interaction est alors observé et enregistré. Les appareils destinés au traitement d'images ne calculent pas une grandeur telle que la profondeur, mais définissent les frontières des différents matériaux composant l'objet. L'application d'algorithmes informatiques et mathématiques d'imagerie sur ces données permet d'obtenir une numérisation 3D. A titre d'exemple nous pouvons citer la tomographie comme technique très répandue pour le traitement d'image (cf. annexe I).

2. Système de numérisation 3D à base de capteur laser

Malgré l'émergence de nouvelles technologies, l'utilisation des systèmes de numérisation à base de capteur laser reste prépondérante dans le domaine du génie mécanique. Nous abordons le système de numérisation sous l'optique proposée par Contri [CON 02] dans laquelle un système de numérisation est constitué de 3 sous-ensembles : un système d'acquisition ou capteur, un système de positionnement et/ou de déplacement, un système de traitement. Compte tenu de la configuration du système à notre disposition, le système de déplacement considéré est une MMT équipé d'une tête Renishaw PH10 orientable supportant un capteur de type laser-plan (figure 4).

Contrairement à un sentiment de facilité et d'évidence qui s'installe chez l'utilisateur au quotidien, les caractéristiques des systèmes de numérisation à base de capteur laser n'ont rien d'évident et il nous a semblé indispensable de consacrer un paragraphe à la description de la technologie et des caractéristiques des capteurs laser-plan. Nous tentons d'apporter au lecteur spécialiste ou non l'ensemble des éléments qui de notre point de vue sont nécessaires à la compréhension du fonctionnement et des limites de tels systèmes de numérisation.

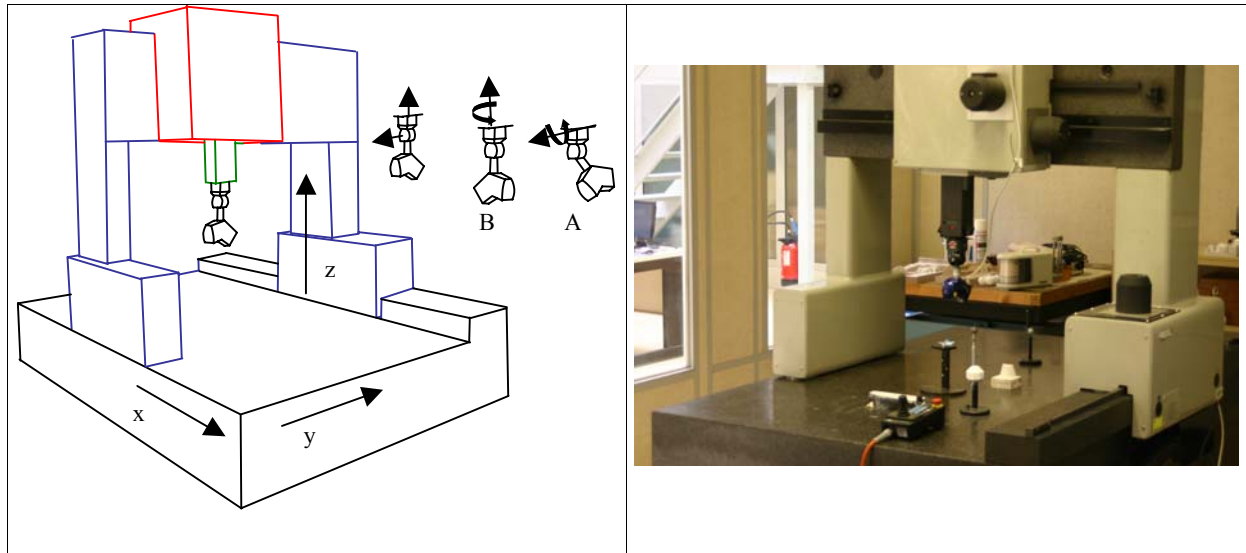


Figure 4 : Système de numérisation

2.1. Technologie et composants du capteur

Malgré la diversité des capteurs présents sur le marché, leur fonctionnement peut être abordé à travers deux ensembles : l'émetteur et le récepteur.

2.1.1. L'émetteur : le laser

Les systèmes de numérisation par capteur laser sont des systèmes actifs. Ils utilisent comme source d'énergie un laser qui est projeté sur la scène à numériser. Il existe deux variantes de capteur laser : ceux qui projettent le laser sous la forme d'un faisceau et ceux qui le projettent sous la forme d'un plan. Dans les deux cas le fonctionnement du système de projection reste identique, seule la quantité d'information récoltée change. Le laser est orienté sur la pièce à travers un jeu de miroirs qui permet de fixer l'angle de triangulation (cf. § 1.1). Dans le cas des capteurs laser-plan un système optique composé en général d'un miroir tournant (www.Metris.be) ou de lentilles cylindriques (www.Kreon3d.com) permet d'élargir le faisceau et d'obtenir une nappe lumineuse : le plan laser (figure 5). Le plan laser projeté dans la scène coupe l'objet à numériser. L'intersection, appelée trace, se traduit par une ligne

lumineuse de forte intensité visible dont la géométrie traduit les variations géométriques de la surface étudiée. Il suffit alors d'observer la ligne d'intersection pour obtenir une image de la surface de la pièce.

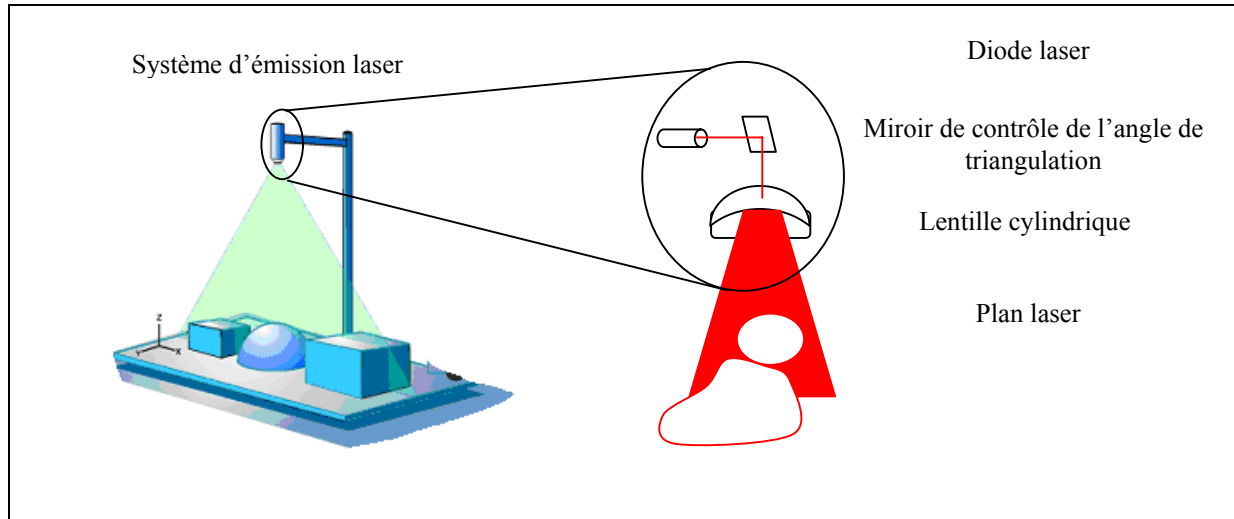


Figure 5 : Fonctionnement du système de projection laser

Chaque élément qui compose le capteur conditionne en partie la qualité de la numérisation. En ce qui concerne le laser c'est la qualité de la trace qui est essentielle, elle doit être en particulier la plus fine possible. La finesse de la trace dépend de l'épaisseur de la nappe laser générée. Cependant, celle-ci est supposée sans épaisseur et on parle de plan laser. Il convient de valider cette hypothèse ; une étude dans ce sens est décrite dans le chapitre 3. un bon compromis entre épaisseur du plan laser et profondeur de champ [RIO 87]. Cependant le profil gaussien pose des problèmes au niveau de l'intensité de la trace qui décroît sur les extrémités comme le montre la figure 6a. L'atténuation peut être corrigée en diminuant la distance entre la source laser et la surface à numériser ou/et en augmentant la puissance du laser. C'est cette dernière solution qui est proposée par les constructeurs. D'une façon générale, ces solutions entraînent une augmentation de l'épaisseur de la trace. Dès lors l'hypothèse de plan laser devient moins pertinente et de surcroît cela pose des problèmes au niveau du système de vision. En effet si la trace s'épaissit sur l'objet, son image dans la matrice CCD est moins précise du fait d'un étalement sur plusieurs rang de pixels.

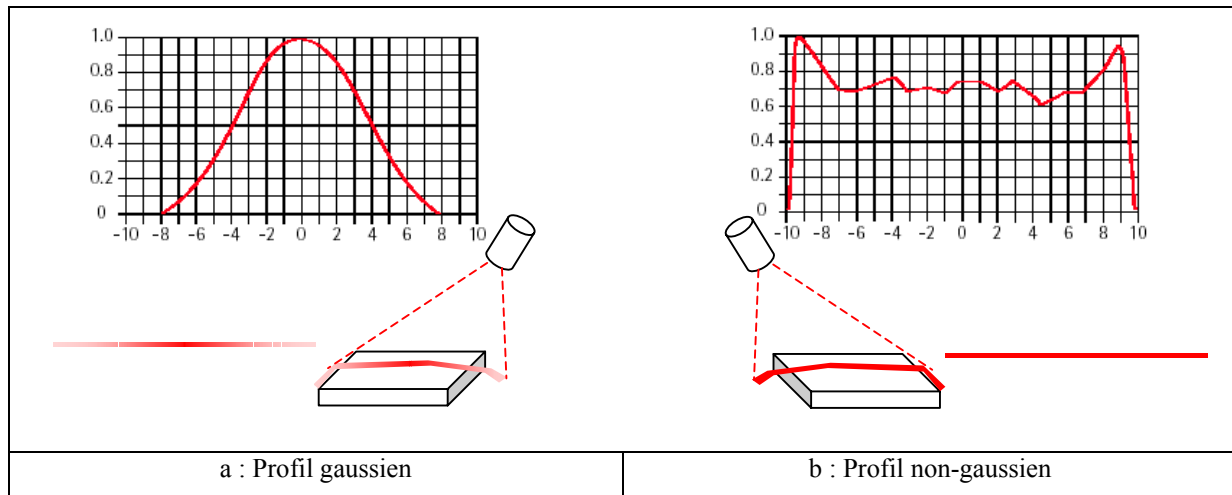


Figure 6 : Profil énergétique de la trace laser [STO]

D'autres solutions sont proposées, basées sur la modification du profil pour aboutir à un profil en créneau. Ainsi Stockeryale (www.stockeryale.com) propose une solution baptisée Lasiris qui utilise des lentilles de formes complexes permettant d'avoir une répartition linéaire de l'énergie (figure 6b) tout au long de la trace. Toutefois à notre connaissance aucun capteur laser-plan n'a intégré cette solution. Il faut préciser ici qu'il s'agit d'une modification du profil dans la longueur de la trace et non dans la largeur pour laquelle le profil d'énergie reste gaussien.

2.1.2. Le récepteur : la caméra CCD

Les systèmes de réception des capteurs laser-plan sont en général composés de caméra CCD (*Charge-Coupled Device*), dont le nombre peut varier de 1 à 3. Certains constructeurs proposent des capteurs munis de deux caméras afin de réduire les zones aveugles du champ de vision. Comme le montre la figure 7 les caméras CCD sont composées de deux sous-ensembles : l'objectif et la matrice CCD.

L'objectif est composé d'un ensemble de lentilles minces conçues de manière à ce que leurs axes de symétrie soient confondus. Le rôle de l'objectif est de permettre la convergence des rayons lumineux issus de la scène afin de constituer une image de l'objet numérisé sur le plan image CCD. Cependant les propriétés des lentilles usuelles ne permettent pas de former une image parfaitement focalisée sur le plan image. Ainsi les systèmes d'objectifs les plus performants sont composés d'au moins quinze lentilles pour permettre la formation d'une image géométriquement conforme au modèle observé [TOR 04]. Von Seidel a décrit dès 1850 les différentes distorsions causées par les lentilles : les aberrations sphériques, l'astigmatisme,

le coma, la courbure de champ et les distorsions radiales. Cependant, deux d'entre elles jouent un rôle plus important sur la qualité des images obtenues [GUE 03]: la distorsion radiale et la distorsion tangentielle. La première est causée par les défauts géométriques et plus particulièrement par la courbure des lentilles, alors que la deuxième est causée par le désalignement des centres optiques des lentilles composant l'objectif.

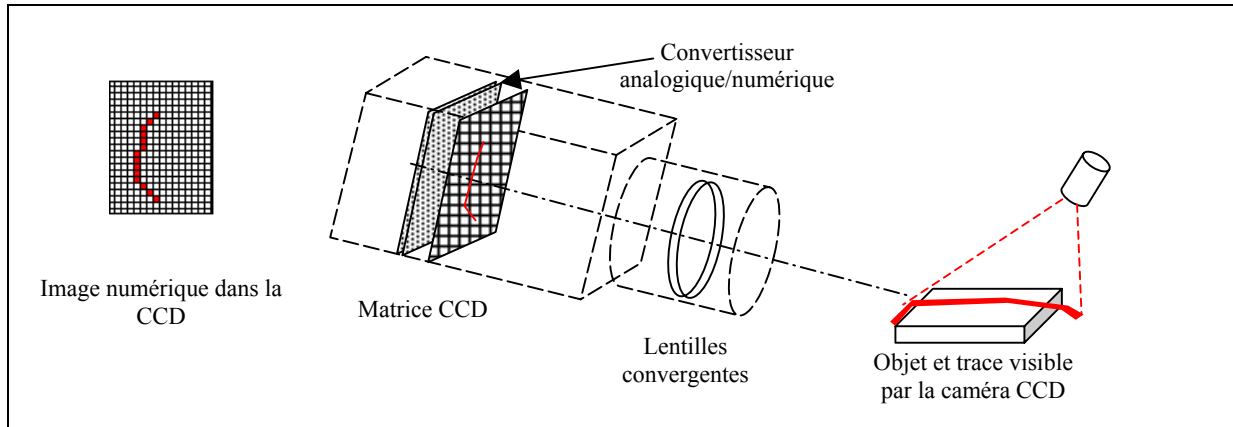


Figure 7 : Schémas d'une caméra CCD

Le deuxième sous-ensemble composant le système de réception d'un capteur plan-laser est la matrice CCD¹ qui joue le rôle du plan image du dispositif de vision du capteur. Il s'agit d'une plaque photosensible (ou barrette) décomposée en éléments unitaires appelés pixels (pour *picture element*). Chaque élément unitaire est un semi-conducteur en sandwich dans un condensateur électrique. Les pixels sont composés de deux zones : la zone exposée à la lumière (chargée négativement) et le puits de potentiel [OBS 04]. Le passage de la première zone à la deuxième nécessite de franchir un seuil énergétique appelé *Gap*. Les photons ascendants, provenant de la scène numérisée via l'objectif de l'appareil, interagissent avec le contenu de la zone exposée de chaque pixel en générant des photo-électrons. L'énergie apportée par les photons permet aux photo-électrons de passer dans le puits de potentiel et ainsi cumuler du courant. Finalement, le nombre d'électrons produits par chaque pixel est proportionnel au nombre de photons reçus, c'est-à-dire au temps de pose (appelé aussi temps d'intégration) et à la luminosité de la scène qui l'éclaire. Bien qu'il existe une très bonne linéarité (entre photon et électron), la proportionnalité a tout de même des limites. Au-delà d'une certaine quantité de photons reçus le pixel sature. Si l'exposition à la lumière perdure, le pixel déborde et le surplus d'électrons est versé sur ses pixels voisins. Ce phénomène porte le nom de blooming [IAS 05].

¹ CCD est l'acronyme pour « *Charge-Coupled Device* » qui se traduit par dispositif à transfert de charge.

La lecture de l'image ainsi formée dans la matrice CCD se fait en déchargeant le courant contenu dans chacun des pixels. La charge de chaque pixel est tout d'abord amplifiée, puis passe dans un convertisseur analogique/numérique qui code sa valeur sur n bits (entre 4 et 16 bits). Le signal numérique est ensuite envoyé à l'ordinateur et l'image numérique est ainsi créée.

Les Matrices CCD sont essentiellement caractérisées à travers deux notions:

- La résolution qui est la capacité à distinguer les détails de la scène observée. Ce facteur est directement lié au nombre de pixels qui composent la matrice et à la taille de chacun d'eux. Les matrices CCD utilisées dans les capteurs laser-plan ont en général une résolution de l'ordre de 300 000 pixels et la taille des pixels est de quelques dizaines de microns (entre $5\ \mu m$ et $40\ \mu m$).
- Le rendement quantique qui est le rapport entre la quantité de photo-électrons générée et le nombre de photons reçus. Pour les CCD il est de l'ordre de 50% alors qu'en comparaison il est de 5% pour une plaque photo. Ce rapport est également décrit à travers la sensibilité lumineuse qui est définie par le quotient entre la variation de la réponse et la variation de l'éclairement lumineux [CON 02]. La sensibilité lumineuse est égale à la réponse en mV divisée par l'éclairement en Lux .

Le récepteur d'un capteur laser-plan est au final un élément complexe dont le fonctionnement est basé sur les principes de l'optique, de la physique et de l'électronique pour permettre la formation d'une image numérique.

2.2. Modélisation du système de numérisation

Un système de numération peut être décrit comme étant une chaîne de circulation de l'information géométrique. Comme le montre la figure 8, le point d'entrée est la géométrie de l'objet et l'information en sortie est l'ensemble des coordonnées 3D image de la surface.

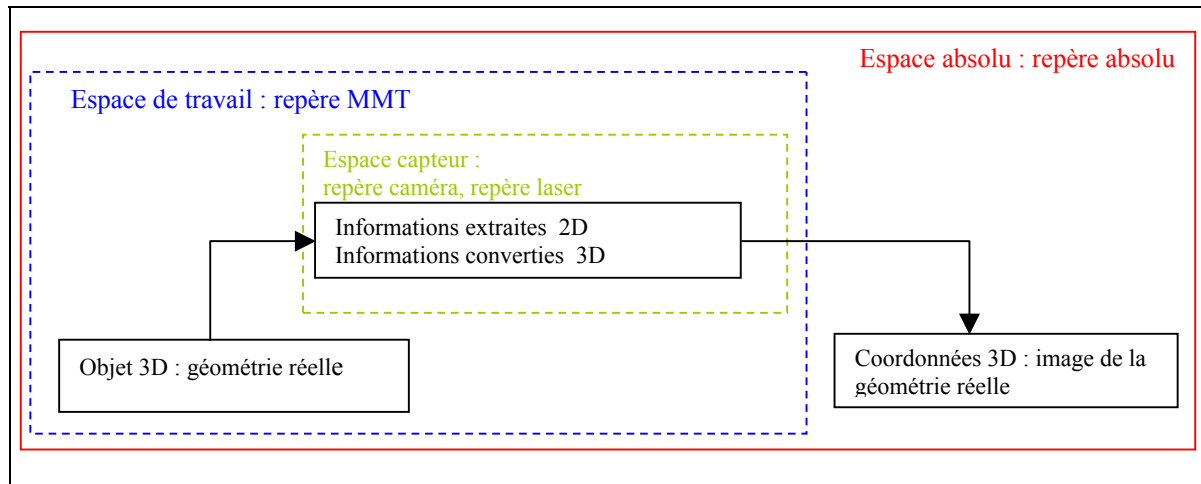


Figure 8 : Chaîne de circulation de l'information dans le processus de numérisation 3D

Le contrôle de la circulation de l'information se fait grâce à des modèles de fonctionnement du système. D'une manière générale on peut diviser en deux parties la démarche globale de modélisation :

- Choisir un modèle de fonctionnement du système
- Identifier les paramètres de fonctionnement du modèle

Le modèle de comportement permet d'exprimer à travers un nombre limité de paramètres le fonctionnement de la caméra dans le processus de formation de l'image et la transformation de celle-ci en coordonnées 3D. La modélisation la plus judicieuse est celle qui permet le meilleur compromis entre sa simplicité et le besoin de détails. Le niveau de modélisation d'un système doit donc être adapté au problème traité. Deux familles de modèles existent : les modèles géométriques et les modèles physiques [CHA 98]. Le premier est abondamment utilisé [WIL 01] pour les systèmes de numérisation alors que le deuxième répond plus au besoin des systèmes logiques.

L'étape d'identification des paramètres de fonctionnement est aussi appelée calibration du système. La calibration interne permet de déterminer les paramètres propres du capteur indépendamment de l'espace de travail [WIL 01] [CHA 05]. Cette calibration est directement liée au modèle de comportement choisi pour le capteur. La calibration externe, parfois appelée positionnement permet de déterminer les paramètres définissant la position et l'orientation du capteur dans l'espace de travail. On notera qu'il existe des méthodes de calibration qui ne distinguent pas les paramètres internes et externes [LAR 04]. Cependant une calibration ne peut être effectuée que si un modèle du comportement du capteur a été

défini.

2.2.1. Modèle géométrique - modèle physique

Les modèles physiques sont parfois appelés modèles de convolution. Il s'agit de modèles qui décrivent une variation temporelle ou spatiale d'un signal représentatif de la mesure effectuée par le système modélisé. Ce type de modèle convient par exemple au cas de mesure par télémètre laser dont le faisceau de mesure est un cône. Dans ce cas la trace laser sur la surface à numériser n'est pas un point mais une tache, le signal retour dépend donc d'un voisinage. Un mode de convolution spatial permet de prendre cet état de fait en compte en y apportant une solution adéquate. Par définition ces modèles conviennent plus particulièrement aux systèmes logiques et sont souvent utilisés en robotique. Le champ d'action de notre travail étant la numérisation 3D, nous ne détaillerons pas ces modèles.

Le deuxième ensemble de modèles est celui des modèles géométriques. Ils établissent une relation entre la grandeur physique mesurée et un point ou une direction de l'espace. Les modèles utilisés pour les caméras en numérisation 3D appartiennent à cette famille. En adéquation à notre problématique, nous détaillerons plus particulièrement ce type de modèle dans les deux paragraphes suivants.

2.2.2. Modèle géométrique de sténopé

Le modèle le plus utilisé pour les caméras en vision informatique n'est pas un modèle très innovant puisque son principe est connu depuis la renaissance (Léonard de Vinci, Cardan). Il porte le nom de modèle de sténopé¹ et répond parfaitement au besoin de la majorité des cas d'utilisation des capteurs laser-plan. Appelé aussi modèle *pin-hole* dans la littérature anglo-saxonne, il s'agit d'une modélisation simple et linéaire du processus de formation des images au sein d'une caméra. Ce modèle est basé sur les propriétés géométriques des lentilles minces et suppose que le système optique de la caméra respecte les conditions de Gauss (rayon parallèle à l'axe optique et traversant la lentille proche du centre optique).

¹ Sténopé : petit trou percé dans une plaque mince, faisant office d'objectif photographique (Larousse)

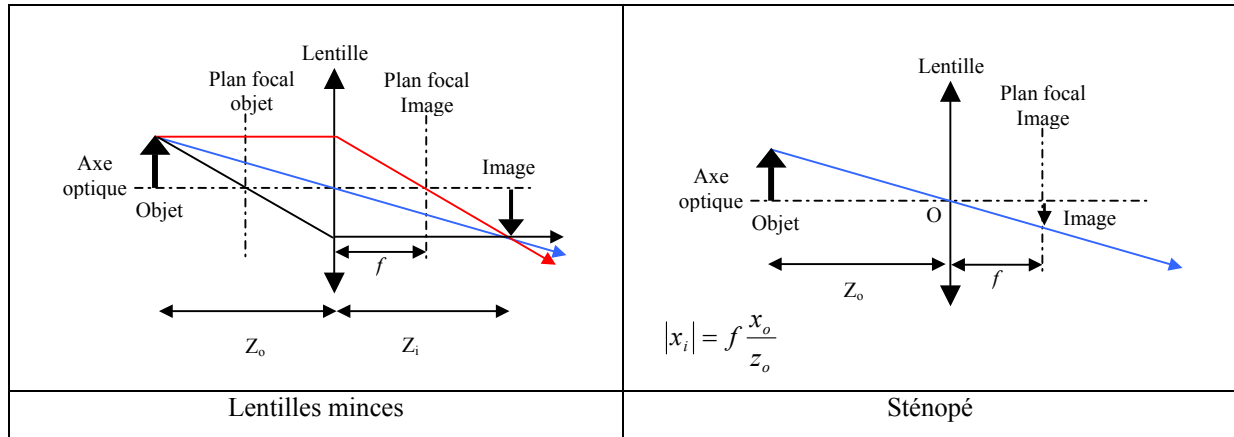


Figure 9: Modèle de sténopé

La transformation d'une scène tridimensionnelle par l'application du modèle de sténopé est obtenue par une projection en perspective sur le plan image placé à la distance focale. Les hypothèses de ce modèle sont l'orthogonalité des axes du plan de projection et la planéité de la surface [CON 02]. Il suppose en particulier que tous les rayons passent par le centre optique. La formation du point $m(l,c)$ image par la projection d'un point physique $M(X_o, Y_o, Z_o)$ visé, s'obtient en fait en deux étapes :

- Une projection du point objet dans le plan rétinien de la caméra
- Une transformation affine permettant le passage au plan image de la caméra (matrice CCD).

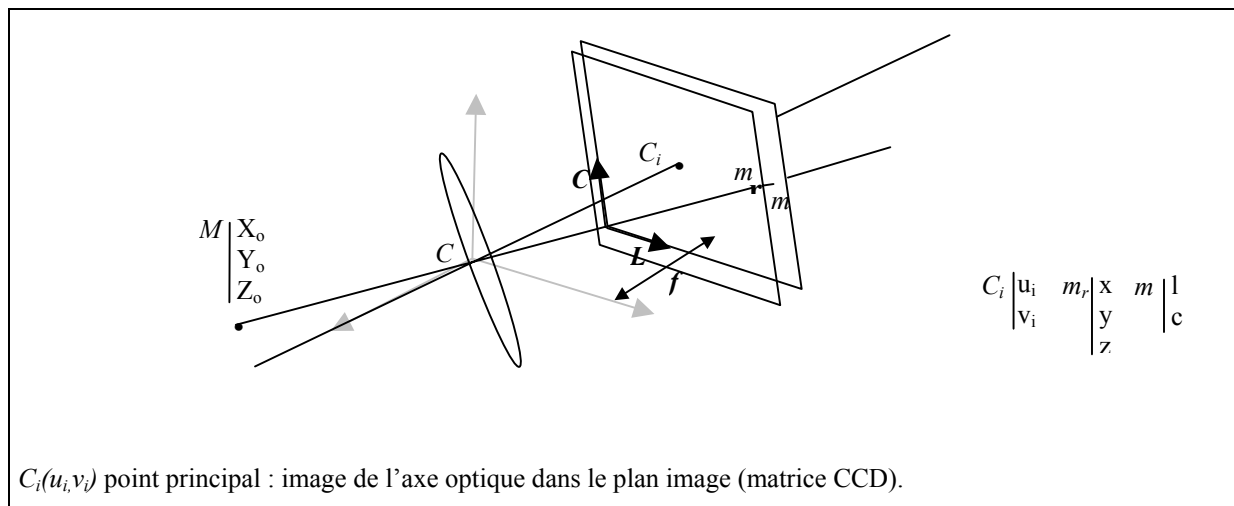


Figure 10 : Principe du modèle de Sténopé

Le point $m_r(x,y,z)$ est formé par l'intersection de la droite (MC) et le plan rétinien (perpendiculaire à l'axe optique) de la caméra situé à la distance f du centre optique C . On peut alors déduire la relation entre les coordonnées du point visé $M(X_o, Y_o, Z_o)$ et son image

$m_r(x,y,z)$:

$$\begin{aligned} x &= \frac{fX_o}{Z_o} \\ y &= \frac{fY_o}{Z_o} \\ z &= f \end{aligned} \quad (Eq. 1.5)$$

Il est possible d'exprimer ces relations sous une forme matricielle à l'aide de coordonnées homogènes $[M] (X_o, Y_o, Z_o, 1)^t$ et $[m_r] (x, y, z, 1)^t$:

$$Z_o \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{bmatrix} = [P] [M] \quad (Eq. 1.6)$$

L'unité de décomposition de la matrice CCD est le pixel, par conséquent les coordonnées du point image $m(l,c)$ doivent être exprimées en pixel. Le passage du plan rétinien au plan image est alors obtenu par une transformation affine de l'espace représentant un changement d'échelle et une translation. Le point image de coordonnées homogènes $[m](l, c, 1)^t$ est obtenu à partir de $[m_r] (x, y, z, 1)^t$ par :

$$\begin{bmatrix} l \\ c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & 0 & u_i \\ 0 & k_v & 0 & v_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = [K] [m_r] \quad (Eq. 1.7)$$

k_u et k_v sont les facteurs d'échelle horizontale et verticale exprimés en pixel/unité métrique. On précise que cette deuxième partie n'est à intégrer au modèle de sténopé que pour le cas d'une caméra avec matrice CCD.

En combinant les équations 1.6 et 1.7, il est possible d'obtenir le point m directement à partir des coordonnées du point visé M :

$$Z_o \begin{bmatrix} l \\ c \\ 1 \end{bmatrix} = [K] [P] [M] = \begin{bmatrix} k_u f & 0 & 0 & u_i \\ 0 & k_v f & 0 & v_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{bmatrix} = [T] [M] \quad (Eq. 1.8)$$

L'écriture matricielle en coordonnées homogènes donne ce qu'on appelle le modèle géométrique interne de la caméra. La matrice de transfert $[T]$ ainsi définie représente les paramètres intrinsèques de la caméra [CHA 05].

Il faut noter que le modèle géométrique ainsi défini décrit le fonctionnement de l'ensemble des composants de la caméra et non pas celui de la lentille seule. L'utilisation de ce modèle passe par l'identification de la matrice $[T]$ au travers de la procédure de calibration interne. En ce qui concerne les caméras utilisées dans les capteurs laser-plan, cette calibration interne est en général réalisée par le fabricant avant livraison. Il s'agit donc d'une étape transparente pour l'utilisateur.

2.2.3. Modèle géométrique de sténopé avec distorsion

L'optique des caméras présente des défauts qui altèrent la géométrie de l'image formée. Introduit au paragraphe 2.1.2, ces défauts sont causés par la géométrie ou l'assemblage des lentilles. Comme nous pouvons voir sur la figure 11, Tordoff [TOR 04] propose une étude sur l'impact de la distorsion radiale ainsi que le résultat de sa correction.



Figure 11: Distorsions radiales causées par les lentilles [TOR 04]

Une évolution peut être apportée au modèle géométrique de sténopé afin de prendre en compte les distorsions induites par l'optique de la caméra. Les distorsions induites sur l'image sont de nature non linéaire. Deux types de distorsions sont plus particulièrement décrites dans la littérature [GUE 03],[CHA 98] :

- Les distorsions radiales dont l'expression est donnée par:

$$\begin{aligned}\Delta u_r &= u(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 \dots) \\ \Delta v_r &= v(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 \dots)\end{aligned}\quad (Eq. 1.9)$$

avec $r^2 = u^2 + v^2$ et $a_1, a_2 \dots$ les coefficients de distorsion radiale.

- Les distorsions tangentielles, parfois appelées de décentrement, dont l'expression peut être donnée par :

$$\begin{aligned}\Delta u_t &= u \left[p_1 [r^2 + 2u^2] + 2p_2 uv \right] (1 + p_3 r^2) \\ \Delta v_t &= v \left[p_2 [r^2 + 2v^2] + 2p_1 uv \right] (1 + p_3 r^2)\end{aligned}\quad (Eq. 1.10)$$

avec $p_1, p_2 \dots$ les coefficients de distorsion tangentielle.

La distorsion globale est la somme des deux, et les coordonnées du point m_d deviennent :

$$\begin{aligned}u_d &= k_u x + u_0 + (\Delta u_r + \Delta u_t) \\ v_d &= k_v y + v_0 + (\Delta v_r + \Delta v_t)\end{aligned}\quad (Eq. 1.11)$$

On retrouve dans la littérature [CHA 92] [CHA 98] un autre modèle non linéaire, le modèle des n plans qui permet de prendre en compte les distorsions. Nous noterons que ce modèle est très peu utilisé et à notre connaissance aucun capteur laser-plan n'en fait usage. Par conséquent nous ne le détaillerons pas ici.

Ainsi, le modèle de sténopé reste le plus utilisé. Il est d'autant plus valable lorsque l'angle d'ouverture des caméras est petit et que la focale est grande. Ce qui est en général le cas pour les caméras utilisées dans les capteurs laser-plan. Pour des applications demandant la prise en compte des distorsions, le développement à l'ordre 1 du modèle est en général suffisant [LI 96]. Il est à noter que le modèle choisi peut être limité par les qualités du plan image de la caméra. Il est plus particulièrement ici question de la matrice CCD et de la taille des pixels la composant. Une solution pour repousser cette limitation est l'utilisation d'algorithmes dits de *sub-pixel*. Ces algorithmes permettent de calculer les coordonnées d'un point image dans la CCD en descendant en dessous de l'unité pixel (cf. § 2.3.2).

2.2.4. Modèle géométrique du système de numérisation

En numérisation 3D par capteur il est essentiel de modéliser géométriquement le système afin d'établir le lien entre les coordonnées 2D observées dans l'espace CCD et les coordonnées 3D. Dans ce sens il est nécessaire de décrire le système de numérisation au travers de repères attachés aux différents éléments composant le système [LAR 04].

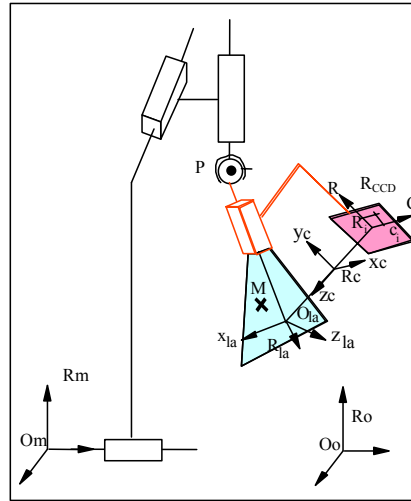


Figure 12: Position et orientation relative des éléments du système de numérisation

- Repère MMT : $R_m(O_m, X_m, Y_m, Z_m)$, dont les axes sont ceux de translation de la machine et l'origine O_m celle de la machine.
- Système de référence : $R_o(O_o, X_o, Y_o, Z_o)$, il s'agit du repère absolu attaché à l'objet à numériser dans l'espace de travail. L'origine O_o est un point remarquable de l'objet.
- Repère CCD : $R_{ccd}(O_i, L_i, C_i)$, il s'agit du repère ligne-colonne défini par la matrice CCD, plan image de la caméra.
- Repère caméra : $R_c(O_c, X_c, Y_c, Z_c)$, dont l'origine O_c est le centre optique et l'axe Z_c l'axe optique. Les axes X_c et Y_c sont les projections de L_i et C_i de la matrice CCD dans le plan normal à l'axe optique.
- Repère plan laser : $R_{la}(O_{la}, X_{la}, Y_{la}, Z_{la})$, l'origine O_{la} est formée par l'intersection de l'axe optique de la caméra et du plan laser. L'axe Z_{la} est défini par la normale au plan laser et X_{la} et Y_{la} sont définis par la projection de L_i et C_i dans le plan laser.

Compte tenu des repères ainsi définis, la position d'un point M de l'objet (appartenant également au plan laser) dans le repère objet peut alors s'écrire :

$$\overrightarrow{O_o M} = \overrightarrow{O_o O_m} + \overrightarrow{O_m P} + \overrightarrow{P O_{la}} + \overrightarrow{O_{la} M} \quad (Eq. 1.12)$$

Les paramètres associés à l'équation 1.12 sont à identifier grâce à une méthode de calibration. D'après Tsai [TSA 87] : *" dans le contexte de la vision 3D (artificielle), la calibration de caméras est le processus qui détermine la géométrie interne et les caractéristiques optiques de la caméra (paramètres internes) et/ou la position et l'orientation 3D du repère caméra par rapport à un repère absolu (paramètres externes) "*. Le processus de calibration suppose le choix d'un modèle de description, or comme nous l'avons vu le nombre de modèles pour les capteurs CCD est assez limité. Par contre on retrouve dans la littérature [HAR 92], [WIL95], [STE 97], [COL 99], un nombre important de méthodes et d'algorithmes de calibration basé sur le modèle de sténopé. Le sujet de notre travail n'étant pas la calibration, nous ne détaillerons pas ici ces méthodes. Pour le lecteur qui souhaite approfondir la question, on peut toutefois citer entre autres les travaux de Salvi qui propose une étude comparative des méthodes de calibrations les plus couramment utilisées ainsi qu'une évaluation de leurs performances [SAL 02].

Ce qui ressort de la définition de la calibration c'est l'existence de paramètres indépendants internes et externes. A ce titre il est possible de les déterminer séparément [WIL 01], [CHA 05] ou bien d'utiliser une calibration globale comme celle développée au LURPA [LAR 04].

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé la procédure préconisée par le fabricant de notre capteur. A ce titre nous avons uniquement réalisé la procédure de positionnement. Cette calibration externe a été répétée pour chaque nouvelle orientation du capteur par la numérisation d'une sphère étalon suivant les instructions du constructeur. En ce qui concerne la calibration interne, elle a été réalisée par le fabricant et conformément à ses instructions elle n'a pas été reproduite. Le modèle utilisé est sans doute le modèle de sténopé avec prise en compte de distorsion. Il est important de souligner qu'aucune information n'est fournie par le constructeur quant à l'incertitude associée aux méthodes de calibration des paramètres internes et externes du système. Or la qualité de la calibration conditionne la qualité des données numérisées [CON 02b].

2.3. Limites associées au système de numérisation

Le fonctionnement des capteurs est basé sur le principe de projection, réflexion et

observation de faisceaux de lumière. On peut alors dire que le fonctionnement du capteur est conditionné par les limites du matériel le composant. Par ailleurs comme nous l'avons vu la numérisation n'est possible que s'il existe un moyen cohérent de faire circuler l'information. C'est-à-dire par l'utilisation d'algorithmes et de modèles développés précédemment. C'est pourquoi il est nécessaire d'aborder les limites de fonctionnement des systèmes de numérisation 3D. Dans ce sens nous proposons de regrouper leurs limites en deux ensembles :

- les limites liées aux composants,
- Les limites liées aux modèles et aux algorithmes de traitement.

2.3.1. Limites liées aux composants

Les limites induites par l'optique utilisée dans les capteurs contraignent fortement le fonctionnement des systèmes de numérisation. En effet, le fonctionnement du capteur suppose que la lumière laser projetée puisse atteindre la surface de l'objet à numériser afin de former une trace visible par la caméra. Or il est parfois possible de se trouver dans des configurations qui ne permettent pas soit la formation, soit la visibilité de la trace laser.

Le plan laser peut être schématiquement décrit comme étant un ensemble de faisceaux localement parallèles. Lorsque le plan laser est projeté sur une surface sur laquelle il existe des arrêtes vives ou des plans qui ont une orientation parallèle aux faisceaux il n'y a pas formation d'une trace (figure 13a). En effet, le contact tangentiel des faisceaux avec la surface ne permet pas de former visiblement l'intersection théorique entre les deux plans.

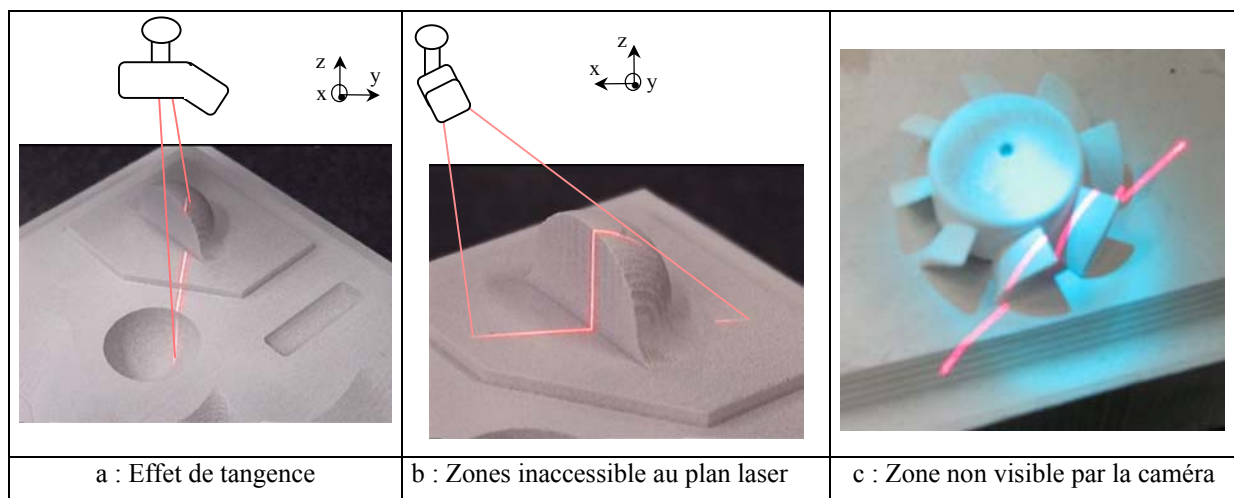


Figure 13: Visualisation de la non formation de la trace laser

L'absence de trace laser peut également être causée par un phénomène d'obstruction de la propagation du plan laser liée à un élément de la pièce ou de la scène à numériser (figure 13b). Il convient donc de projeter le plan laser sur la surface à numériser de manière à limiter au maximum les phénomènes de tangences et d'obstruction. La formation de la trace sur l'objet ne suffit pas à obtenir une image, faut-il encore qu'elle soit visible par la caméra [REM 02] [PRI 99]. La visibilité de la trace peut être contrariée dans deux cas : la non appartenance de la trace au champ de vision de la caméra ou l'existence de phénomènes d'ombre qui empêchent les rayons émanant de la trace d'atteindre l'objectif de la caméra (figure 13c).

La fenêtre de mesure (appelée également champ de vision) est la partie du plan laser visible par la caméra en l'absence de toute obstruction. La figure 14 présente les dimensions de la fenêtre de mesure du capteur Kréon Zephyr à champ moyen utilisé dans le cadre de notre travail. Comme le montre la figure 14a l'intersection entre le plan laser et la surface à numériser doit appartenir à la fenêtre de mesure, faute de quoi elle ne sera pas vue par la caméra (figure 14b). Le positionnement interne entre le laser et la caméra est figé ; la fenêtre de mesure est inchangée par rapport au plan laser quelle que soit la situation du capteur dans l'espace de travail. Il y a donc une conséquence immédiate sur le positionnement du capteur vis-à-vis de la surface.

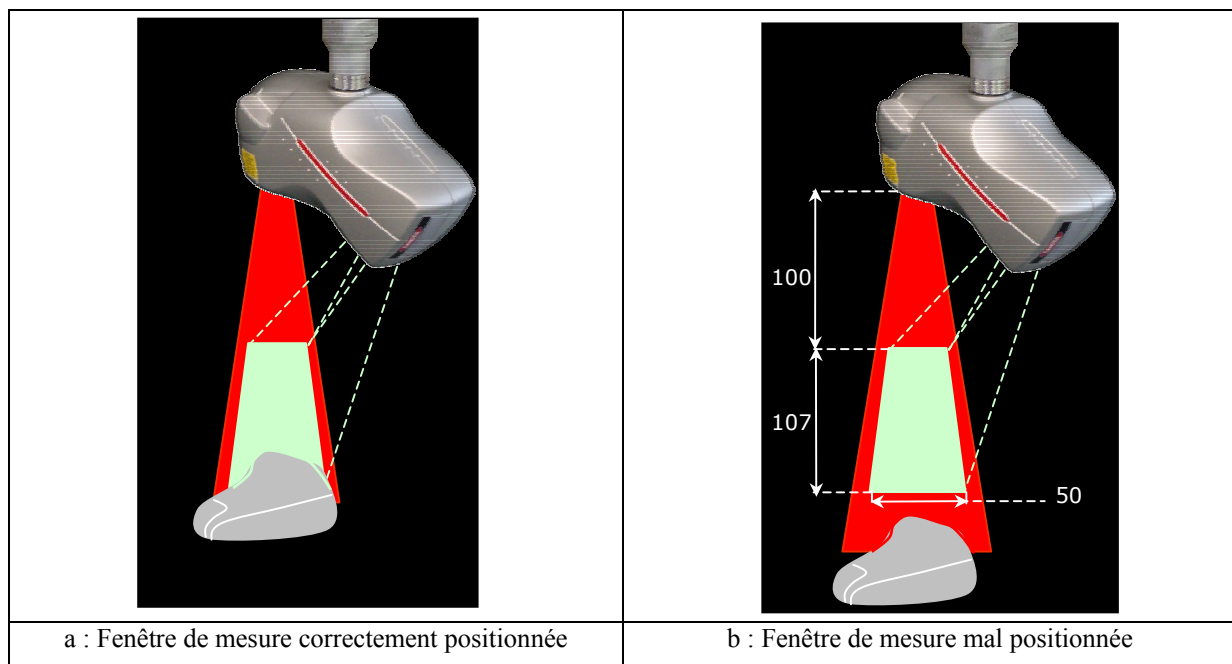


Figure 14: *Fenêtre de mesure du capteur Zephyr*

L'optique impose donc des limites au processus de numérisation liées à la situation relative capteur/surface. Certains auteurs, comme Prieto [PRI 03] proposent des méthodes de calcul d'orientation relative capteur/surface afin de pallier à ces problèmes optiques, méthodes basées sur une définition numérique de la géométrie de la pièce.

Les matériaux composant la surface de l'objet à numériser peuvent également poser des problèmes. En effet si la surface est trop absorbante l'intensité de la trace risque d'être inférieure au seuil de sensibilité de la caméra. Dans ce cas la trace ne sera pas visible. A titre d'exemple, on peut citer le cas des surfaces en verre. A l'opposé, une surface trop réfléchissante risque de propager de manière diffuse et très intense la trace laser. Dans ce cas un phénomène de saturation peut se produire. La matrice CCD est « aveuglée », l'acquisition d'une image cohérente devient impossible. Afin de gommer ces problèmes de réflexion et d'absorption, on retrouve souvent dans la pratique l'utilisation d'une poudre blanche (de type détecteur de fissure). Cependant l'ajout de ce type de produit modifie l'état de surface et l'épaisseur (et donc les dimensions) des surfaces. Les propriétés surfaciques des matériaux des pièces peuvent donc également être une limite pour les systèmes de numérisation.

Le comportement des pixels de la CCD face à la lumière est qualifié de très linéaire jusqu'à la saturation. Cependant le dysfonctionnement de l'un en phase de lecture bloque la lecture de toute la colonne : on parle de colonne morte. Par ailleurs, malgré l'absence de tout signal lumineux le détecteur délivre un courant appelé « courant d'obscurité ». Ce courant résulte de l'agitation thermique des porteurs de charge dans le détecteur, ce qui se répercute sur la précision des points mesurés.

Le faisceau laser est une lumière cohérente avec un profil d'énergie et une longueur d'onde donnée. Lorsque la lumière laser tombe sur une surface dont la rugosité est élevée par rapport à sa longueur d'onde. Il peut se produire une perturbation aléatoire sur la longueur d'onde des rayons réfléchis, ce phénomène est appelé *Speckle* [PRI 99]. La rugosité de la surface produit des variations non contrôlées de la longueur de parcours du laser ce qui modifie la régularité du profil gaussien du laser. L'utilisation de la poudre blanche, évoquée précédemment, affaiblit l'effet de speckle.

Le processus de la numérisation peut être perturbé par d'autres facteurs non détaillés dans ce paragraphe. On peut citer à titre d'exemple les perturbations causées par les phénomènes de vibration, de variation de la température ou encore la luminosité. Toutefois

l'influence de ces facteurs est moins marquée et il est même possible de s'en soustraire par l'utilisation de cellules de mesure isolées et climatisées.

2.3.2. Limites liées aux modèles et algorithmes de traitement

Le processus de numérisation impose une interaction entre le capteur, le milieu et l'objet à numériser. Il se pose alors le problème du déplacement et de la localisation du capteur durant le processus de numérisation. Ce problème est résolu par l'utilisation de systèmes mécaniques comme la MMT, bras articulés ou bien par un déplacement manuel dans un espace identifié. Cependant quel que soit le système utilisé, son envergure définit un espace de travail. Si un espace de travail délimité existe, il se pose alors le problème de la taille des pièces numérisées. L'espace de travail en regard de la taille des pièces peut constituer une limite dans l'utilisation des systèmes de numérisation [PRI 03]. Cependant, il est toujours possible de concevoir un système de positionnement/déplacement aussi grand que nécessaire, mais dans ce cas c'est le coût de fabrication qui en devient la limite.

Dans le processus d'interprétation de l'image observée dans la matrice CCD, la taille des pixels constitue une limite à la précision de la mesure. Cette taille est de l'ordre de quelques dizaines de micron (entre $6\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$). De plus à cause des caractéristiques physiques de la source laser, la trace est étalée sur plusieurs pixels dans la matrice CCD (figure 15a). Dans ces conditions, à chaque point 3D de l'objet on peut associer plusieurs points (L, C_i) dans l'espace CCD, pour lesquels seule la coordonnée colonne C_i varie. Pour pallier à cette difficulté, la plupart des capteurs laser-plan utilisent des algorithmes sub-pixel [IZQ 99]. Il s'agit de mettre à profit le profil gaussien transversal de la trace laser afin de calculer son pic énergétique (le pic de l'intensité lumineuse). La position colonne sub-pixel de ce pic définit la coordonnée colonne du point image dans la matrice CCD (figure 15b). La qualité de ce calcul dépend de la qualité du profil du signal lumineux reçu. Or comme nous l'avons vu précédemment ce profil peut être perturbé par l'état de surface ou bien par les matériaux composant la surface. Il est très difficile d'évaluer l'erreur associée à ce phénomène.

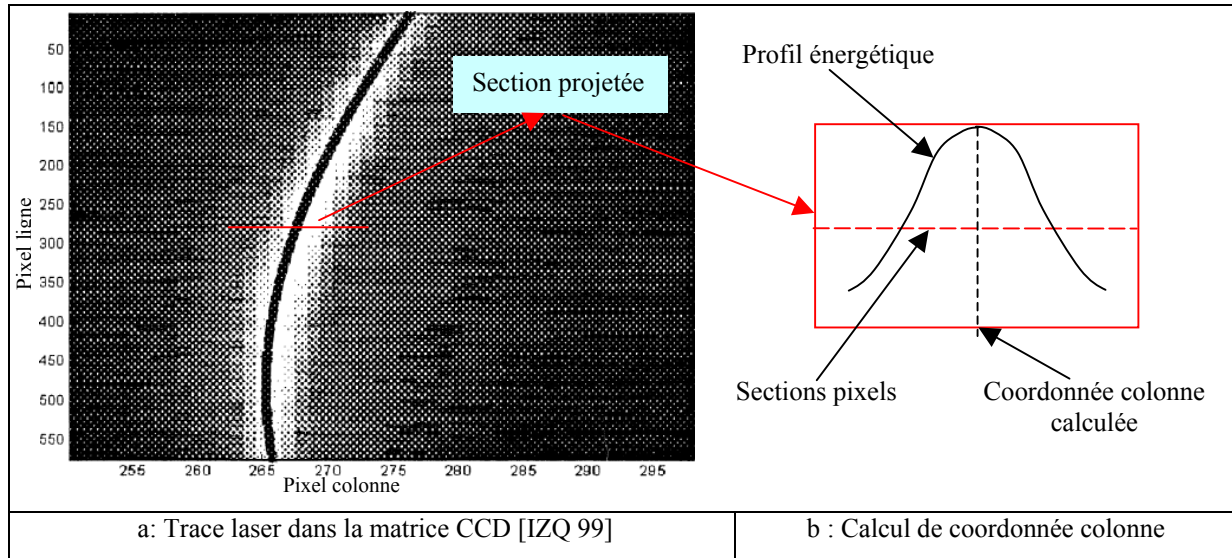


Figure 15: Principe de l'algorithme de sub-pixel

Comme nous l'avons présenté au paragraphe 2.2, la calibration du système de numérisation est une étape essentielle conditionnant fortement la qualité des données numérisées. Ainsi, le modèle de calibration doit constituer une bonne approximation du système [CON 02]. L'identification des paramètres du modèle est le plus souvent réalisée par la mesure d'un artefact [LAR 04]. La géométrie de cet objet doit dans ce cas être connue avec une grande précision (de l'ordre du micron) puisqu'il définit la référence (origine) de mesure. Quelle que soit la forme de l'artefact (sphère [CHE 00], sphère à facette, pyramide coplanaire [ZEX 05]) l'objectif est de faire la correspondance entre un point géométrique et son image obtenue par la mesure. Si la numérisation est nécessaire pour effectuer la calibration, il est légitime de dire que le bruit de mesure inhérent à toute numérisation influence la précision de la calibration. De plus la précision de la calibration est également conditionnée par le caractère anisotrope de la matrice CCD. Ainsi, Contri a montré qu'en fonction de la position du capteur, pour une orientation donnée, un même point géométrique peut correspondre à deux points différents dans la matrice CCD ne possédant pas la même incertitude de mesure. Dans ces conditions, plusieurs calibrations d'une même orientation peuvent conduire à l'identification de jeux de paramètres différents. En fonction des équations de calibration utilisées, le même point (L,C) de la matrice CCD n'aura pas les mêmes coordonnées (x,y,z) dans l'espace 3D [CON 02b].

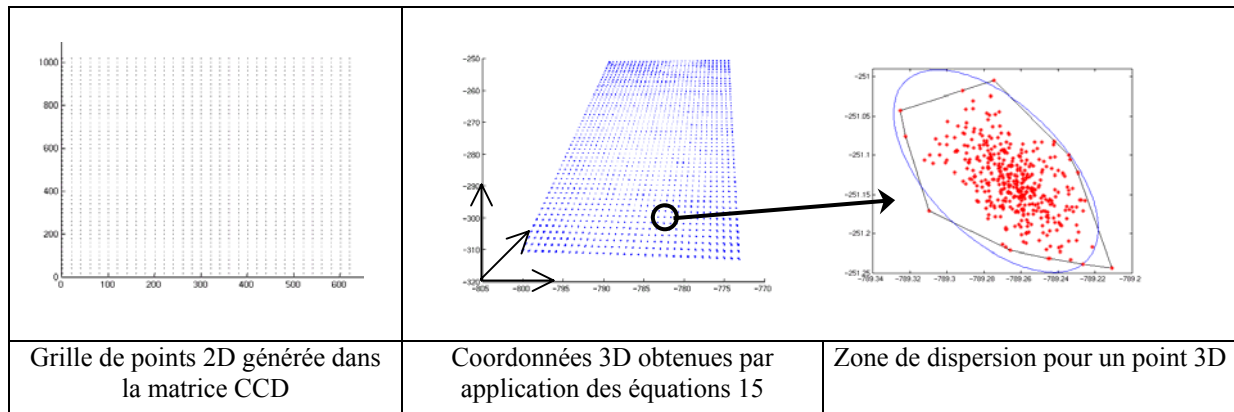


Figure 16: Dispersion d'un point 3D en fonction de l'incertitude liée à la calibration [CON 02b]

L'utilisation de procédures telle que la calibration ou d'algorithmes tel que le sub-pixel est indispensable à la numérisation 3D par capteur laser-plan. Les constantes identifiées et les valeurs calculées sont souvent peu répétables, ce qui peut conduire à une perte de robustesse du processus vis-à-vis de la répétition des procédures.

L'ensemble des limites évoquées précédemment a des conséquences sur les caractéristiques des données numérisées, en particulier sur la qualité des coordonnées 3D obtenues.

3. Caractéristiques des données numérisées

Les données obtenues par numérisation 3D se présentent sous la forme d'un ensemble de points 3D appelé nuage de points. La numérisation complète d'un objet par capteur laser résulte en effet d'une succession de numérisations de surfaces selon différentes situations relatives capteur/surface. Le nuage de points résultant est ainsi la superposition des différents nuages de points obtenus pour chacune des numérisations associées à chaque situation relative. Chaque numérisation est effectuée avec les limites précédemment développées. En conséquence, le nuage de points résultant est souvent qualifié de dense, inhomogène, bruité et présentant des lacunes de numérisation dues essentiellement aux problèmes optiques précédemment évoqués [LAR 01].

Dans ce paragraphe, nous nous proposons d'exposer les caractéristiques des données numérisées et les outils permettant de les qualifier. Nous essayons de dégager des pistes montrant comment la connaissance du système de numérisation et de ses performances permet d'améliorer la qualité des données.

3.1. Caractéristiques intrinsèques

La topologie définit un espace séparé comme étant : *"Un espace topologique E est dit séparé si pour tout couple (x, y) de $E \times E$, il existe un voisinage V_x de x et un voisinage V_y de y d'intersection vide : $V_x \cap V_y = \emptyset$ "* En supposant une extension de cette définition à un espace 3D, on peut alors dire que le nuage de points forme un espace séparé.

L'un des attraits du capteur laser-plan est la quantité d'information qu'il permet de numériser dans un laps de temps restreint ($> 20\,000$ points/s). Bien que la plupart des capteurs autorise un certain nombre de réglages (fréquence d'émission laser, vitesse de déplacement, nombre de points conservés) avant numérisation, le nuage de points résultant de la numérisation d'une surface est généralement très dense (plus de $1\,000\,000$ de points). Le problème qui en résulte est bien évidemment la difficulté de manipulation de cette quantité de données.

Il est fréquent de constater que le nuage de points obtenu pour une numérisation (avant superposition des différentes vues) présente un aspect très ordonné. En effet comme le montre la figure 17a, les lignes de numérisation constituent un ensemble régulier conséquence de la technologie des capteurs laser-plan. Une ligne de numérisation résulte de l'intersection du plan laser avec la surface de l'objet. La taille des pixels de la matrice CCD définit un échantillonnage régulier de la trace laser, ce qui conditionne le nombre de points acquis pour une ligne de numérisation. Ce nombre de points varie en fonction de la longueur de trace vue dans la matrice CCD. Il est ainsi de l'ordre de 480 pour une trace entièrement vue par la CCD dans le cas du Capteur Zéphyr (cf. chapitre 3). D'autre part, le déplacement du capteur selon la direction de numérisation définit une succession de lignes de numérisation distantes de la valeur du pas de numérisation, celui-ci étant rarement inférieur à $0,1$ mm. Il apparaît une anisotropie de la densité, pouvant être plus ou moins marquée. De plus, bien que l'ordonnancement reste visible localement, la superposition des différentes vues nécessaires pour l'obtention du nuage de points complet donne un caractère inhomogène bien plus significatif au nuage de points (figure 17b).

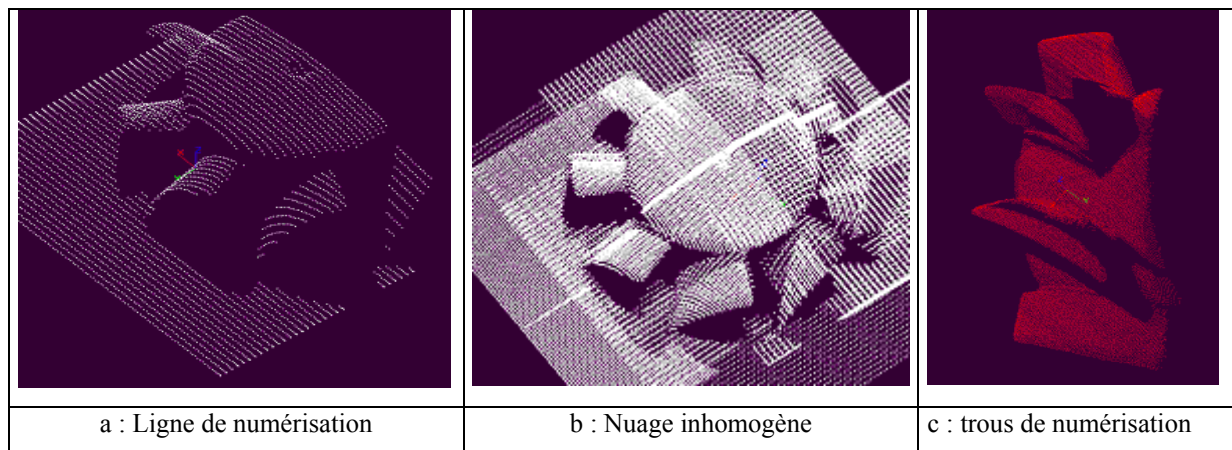


Figure 17 : Typologie des nuages de points

Nous avons vu au paragraphe 2.3 que le fonctionnement des capteurs nécessite la continuité pour la propagation des rayons dans le cycle d'émission laser et de réflexion vers la caméra. Lorsque ce cycle est interrompu, il en résulte dans le nuage de points un vide d'information appelé trou de numérisation (figure 17c). Dès lors que les formes présentent des variations significatives en courbure ou en tangence, les trous de numérisations sont en général inévitables dans la première numérisation d'un objet. La superposition de différentes vues permet dans la plupart des cas de combler ces lacunes de numérisation, dès lors qu'il existe une stratégie de numérisation adaptée. Ce point, largement traité dans la littérature sera abordé au chapitre 2.

Les limites de fonctionnement des composants du capteur influencent également le résultat de la numérisation. Les perturbations causées par le fonctionnement du système capteur/CAN sont regroupées sous le terme de bruit de numérisation. La conséquence du bruit de numérisation est la détérioration de la qualité de mesure des coordonnées 3D de chaque point contenu dans le nuage. Dès lors se pose la question de savoir si les points du nuage appartiennent ou non à la surface numérisée. On précise ici que quelles que soient les précautions prises, le nuage de points ne peut être entièrement exempt de bruit de mesure.

En conclusion, la numérisation conduit nécessairement à un nuage de points dense, inhomogène, bruité et présentant des lacunes de numérisation. Les données obtenues sont ainsi difficilement directement exploitables pour des applications telles la reconstruction de formes, le copiage de formes ou encore l'inspection rapide. En conséquence, l'étape, dite de pré-traitement, est une étape préalable à toute application basée sur la numérisation [VAR 97], [AZE 04], [HUA 00].

3.2. Pré-traitement des données numérisées

Tout nuage de points issu de numérisation 3D doit être représentatif de la géométrie de la surface de la pièce et doit être exploitable vis-à-vis d'une application. En particulier, le nuage de points doit être complet vis-à-vis de la surface numérisée et ne doit contenir que des zones significatives vis-à-vis de la géométrie réelle. Dans ces conditions une étape de pré-traitement du nuage de points devient indispensable [SCO 03] basé sur les opérations majeures suivantes :

- Filtrage et nettoyage de chaque nuage de points composant la numérisation
- Recalage des différentes vues
- Identification des lacunes de numérisation en terme d'absence de donnée
- Partitionnement

Afin d'apporter une cohérence entre le nuage de points et la surface qu'il représente, un filtrage et un nettoyage sont indispensables. L'opération de filtrage agit sur la densité du nuage de points. Elle peut se faire selon 2 optiques : soit diminuer le nombre de points, soit homogénéiser la densité. Des algorithmes de filtrage existent pour réduire la densité. Certains permettent de retirer un nombre de points fixe (1 point tous les n points), d'autres algorithmes s'appuient sur des critères de corde à partir d'une triangulation du nuage de points [LI 02]. Lorsqu'il s'agit d'homogénéiser la densité, ceci peut être fait en conservant un nombre de points donnés par unité de volume, ce dernier pouvant être sphérique ou cubique [CON 02].

L'opération de nettoyage permet de s'affranchir du problème associé à la représentativité des données vis-à-vis de la surface numérisée. En effet, la trace vue dans l'espace de la CCD résulte de l'intersection du plan laser avec toute surface d'objets présents dans la fenêtre de mesure. Ainsi, une partie de cette trace peut correspondre au support de l'objet à numériser (figure 17a). Le problème est alors de distinguer les points images de la surface numérisée des autres. L'opérateur est souvent amené à éliminer de manière interactive les points qui lui semblent non représentatifs de la surface à mesurer. Dans certaines zones frontières, où il est très difficile de faire la distinction entre le support et l'objet, le choix est laissé libre à l'utilisateur de garder ou non des points. Les erreurs associées à cette étape de nettoyage manuel ne sont donc pas négligeables, et il conviendrait de relier cette opération à une opération automatique de partitionnement du nuage de points [OST 02].

Une image 3D complète d'une pièce nécessite la numérisation suivant plusieurs vues. Afin d'avoir une cohérence entre les différentes vues, le recalage doit permettre d'exprimer tous les points numérisés dans un même repère. Ce problème peut être directement résolu par l'étape de calibration. Cependant, les recalages peuvent être logiciels. On peut ici citer les méthodes de type ICP, *Iterative Closest Point* [BES 92][FIS 04]. Il s'agit de méthodes itératives de recalage qui consistent à mettre en correspondance des attributs significatifs du modèle local et du modèle global courant, et à calculer la transformation 3D minimisant une mesure de différence donnée entre ces attributs [RES 05]. Elles peuvent fonctionner seules ou en complément de la calibration lorsque celle-ci n'est pas précise.

Les limites de l'optique engendrent des lacunes de numérisation dans le nuage de points. Ces lacunes sont visibles par une absence de donnée dans le nuage qu'on appelle trou de numérisation. Il faut dès lors identifier ces trous de numérisation et donc délimiter leur frontière afin d'envisager leur re-numérisation. La détection automatique des lacunes de numérisation peut être liée à l'étape automatique de partitionnement [OST 02] ou encore à l'étape de qualification des données (cf. § 3.3).

Le partitionnement apporte une réponse à la segmentation du nuage de points en sous-ensembles cohérents facilitant les applications de rétro-conception aussi bien que les applications de copiage de forme [OST 02]. Deux approches sont possibles : par recherche de frontières ou par croissance de surfaces [YAN 99][VAR 97]. L'approche par recherche de frontières est la plus répandue, puisqu'elle permet en particulier d'identifier les lignes dites caractéristiques : bords de trous, lignes de style, arêtes vives [MEY 04], [AZE 04b],[OST 02]. Si elles fonctionnent bien lorsque les données sont peu bruitées, la plupart de ces méthodes montrent des limites pour des données fortement bruitées et très inhomogènes. Cependant, la méthode de Osty, basée sur une représentation par voxels des données pallie en partie au problème du bruit de numérisation pour la recherche des contours 3D des pièces mécaniques. L'étape de pré-traitement doit être nécessairement complétée par une étape de qualification des données en fonction de l'application choisie (rétro-conception, copiage de formes ou encore inspection rapide).

3.3. Qualification des données numérisées

3.3.1. Les indicateurs de qualité

Un nuage de points issu d'une numérisation 3D est conditionné par la procédure de numérisation mise en place. A ce titre la qualité de ce nuage dépend des limites du système de numérisation utilisé. Les besoins au niveau de la qualification du nuage de points sont essentiels et dépendent de l'utilisation qui en sera faite [LAR 02][AZE 04]. Ainsi une application d'inspection dimensionnelle nécessite de maîtriser l'exactitude de mesure des points acquis [GON 03], alors que l'opération de copiage de forme est affectée par la présence de trous de numérisation du nuage [CON 02]. La qualité de l'application finale dépendant de la qualité du nuage de points, il est donc indispensable de pouvoir évaluer cette qualité vis-à-vis d'une application donnée. Il existe dans la littérature des approches de qualification globale qui pointent les aptitudes d'un système à mesurer certaines géométries. Cependant peu de travaux se consacrent à présenter des démarches de numérisation qualité liées à l'application envisagée. Citons ici deux exceptions que sont les travaux de Prieto *et al* [PRI 03] qui proposent de lier le bruit de la numérisation à l'inspection, et ceux de Hoppe *et al* [HOP 92] qui proposent une application à la rétro-conception. De même peu de travaux normalisés portent sur l'évaluation de la qualité des données issues de numérisation 3D.

Il existe peu de travaux dans la littérature faisant état d'outil d'évaluation de la qualité d'un nuage de points. Hormis la notion de densité bien développée [HOP 92], à notre connaissance seul Contri propose un ensemble d'indicateurs permettant d'évaluer la qualité. Sa démarche est basée sur le lien entre qualité et application. La qualité d'un nuage de point peut être défini par « *le degré de fidélité avec lequel le nuage de points traduit les caractéristiques de la géométrie de l'objet dont il est l'image* ». Ainsi, mesurer la qualité d'un nuage de points revient à évaluer les perturbations qui affectent le nuage. Ainsi les travaux menés au LURPA ont conduit à l'élaboration de quatre indicateurs : ρ -densité, κ -complétude, δ -bruit, τ -exactitude. Les deux premiers traduisent les caractéristiques intrinsèques du nuage de points et sont indépendants des moyens d'acquisition mais dépendent de la méthode d'acquisition utilisée. A ce titre ils sont qualifiés d'indicateurs intrinsèques. L'exactitude (τ) de mesure est directement liée au système de numérisation alors que δ -bruit est lié non seulement au moyen de mesure mais également à la démarche adoptée. Le choix de ces indicateurs ainsi que les modifications nécessaires à l'adaptation de leur définition pour notre démarche seront précisés dans le chapitre 4.

3.3.2. Indicateurs de qualité et stratégie de re-numérisation

De par leur définition ces indicateurs permettent de mettre en évidence des singularités récurrentes comme la variation de la densité ou encore la dispersion du nuage de point par rapport à une entité géométrique donnée. Ces indicateurs donnent en particulier une quantification de la qualité d'un nuage de points acquis. Dans l'optique de la génération automatique de trajectoire de numérisation, l'existence d'une quantification des caractéristiques du nuage de points est essentielle. En effet au travers des indicateurs, il est possible d'évaluer l'impact de stratégie de numérisation sur l'accroissement de sa qualité.

Le lien qui existe entre qualification, indicateur et re-numérisation peut être illustré par l'exemple de l'utilisation que fait A. Contri de l'indicateur exactitude [CON 02]. Comme nous l'avons vu précédemment, la matrice CCD présente un caractère anisotrope. A. Contri montre en particulier dans ses travaux de thèse que l'indicateur τ -exactitude permet de quantifier la qualité des coordonnées 3D des points du nuage en fonction de la position des traces dans la matrice CCD : plus la trace s'éloigne du centre de la matrice CCD, plus la dispersion sur la position d'un point 3D augmente. Dans ce contexte, A. Contri montre qu'il est possible d'améliorer l'exactitude de mesure des points acquis en ramenant les barycentres des traces au centre de la matrice CCD. La figure 18a présente une superposition des lignes de numérisation ainsi que des barycentres calculés pour chaque ligne. Un calcul par modèle inverse des équations de calibration positionnant chaque barycentre dans une zone minimisant l'incertitude de mesure (figure 18b) permet de calculer une nouvelle trajectoire de numérisation. Le nouveau nuage de points présente un taux de 72% de points satisfaisants le critère de qualité imposé (τ -exactitude $< 0.05\text{mm}$) contre 43% pour le nuage initial.

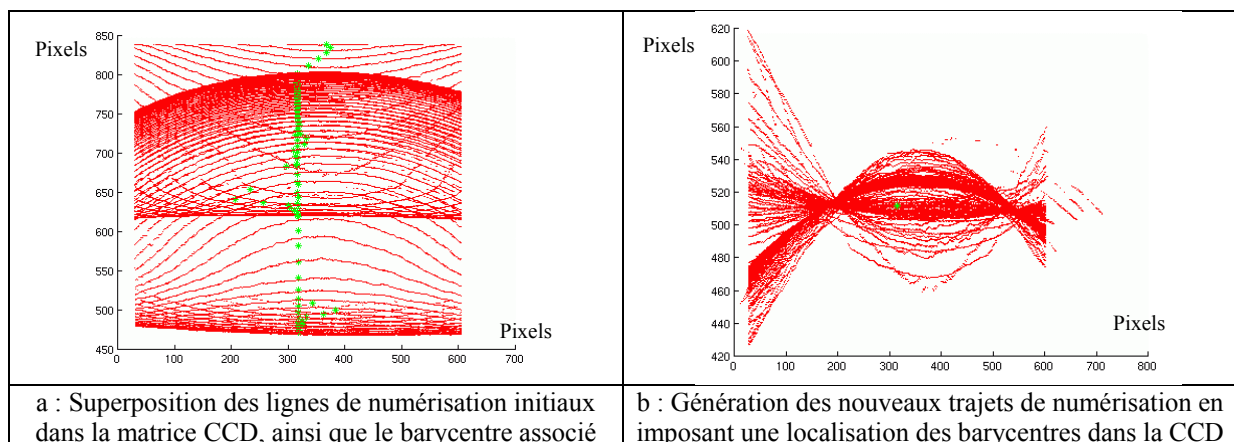


Figure 18: Indicateur de qualité en génération automatique de trajectoires [CON 02]

Cette technique s'appuie sur l'utilisation des coordonnées pixels (L , C) généralement non disponibles pour les systèmes de numérisation classiques, ce qui la rend difficile à mettre en œuvre. Cependant, cet exemple illustre le lien qui existe entre qualification du nuage et calcul optimal d'un trajet de re-numérisation, dans ce sens son principe reste valable.

C'est pourquoi notre travail de recherche s'inscrit dans la continuité de l'exploitation du lien qui existe entre qualification des données et stratégie de numérisation intelligente s'appuyant sur les performances du système de numérisation.

4. Synthèse : Formulation de la problématique

La technologie des capteurs laser-plan permet d'obtenir une grande quantité d'informations au travers d'un nuage de points systématiquement très dense. La nécessité de numérisation selon différentes vues vient accentuer le caractère inhomogène du nuage. La numérisation 3D est alors une image discrétisée de la surface réelle, sous forme d'un nuage de points dense, inhomogène et bruité. Dans ces conditions le nuage de points ne peut être directement exploité et il est nécessaire d'assurer une cohérence avec la géométrie réelle de l'objet. Il est donc indispensable de réaliser un pré-traitement du nuage de points.

Dans ce chapitre nous avons vu que la réalisation d'une numérisation par capteur laser-plan est fortement contrainte par les limites de fonctionnement du système. L'ensemble des éléments décrits ici met en avant des caractéristiques récurrentes de la numérisation qui conditionnent la qualité de son résultat. Cette qualité semble cependant dépendante du capteur, de l'environnement et de la stratégie choisie pour réaliser la numérisation. Ainsi, il semble possible de construire une stratégie de numérisation qui exploite au mieux les performances du système de numérisation. Dans ce contexte la problématique globale peut être formulée de manière suivante :

Comment faire évoluer la qualité d'un nuage de points issu d'une numérisation 3D par laser-plan à travers la stratégie de numérisation ?

Certains auteurs se sont penchés sur ce problème en particulier pour la numérisation d'objets dont le modèle CAO est connu. Nous nous positionnons dans le domaine de la numérisation d'objets de formes inconnues, pour lesquels peu de travaux existent. Nous aborderons ce point concernant la notion de stratégie de numérisation automatique ou encore intelligente dans le chapitre 2.

Faire évoluer la qualité est au centre de notre problématique, il convient alors de réfléchir au moyen d'évaluation de la qualité. Dans ce sens il faut définir des grandeurs mesurables, choisir les indicateurs adéquats et discuter de leur limites. Nous abordons ainsi au chapitre 3 les moyens d'évaluation de la qualité basés sur une analyse des performances du système de numérisation. Nous proposons en particulier un protocole d'évaluation d'indicateurs de qualité pertinents et facilement mesurables au travers de procédures simples. Nous en déduisons alors les capacités de l'outil de numérisation définissant le(s) domaine(s) admissible(s) dans le(s) quel(s) la stratégie de re-numérisation devra être pensée.

Nous appuyant sur les indicateurs de qualité, nous proposons dans le chapitre 4 une méthode de numérisation intelligente pour les objets de formes inconnues. A partir d'une première numérisation réalisée de manière arbitraire, nous élaborons la stratégie de re-numérisation intelligente conduisant à améliorer la qualité des points acquis. Cette stratégie peut être mise en œuvre pour l'ensemble du nuage de points ou simplement pour les lignes dites caractéristiques du nuage. Nous montrons en particulier comment il est possible grâce à la méthode proposée d'assurer la complétude d'un nuage de points vis-à-vis d'un objet réel.

Chapitre 2

Numérisation sans contact et automatisation

1. Introduction

L'automatisation de la numérisation trouve sa justification dans l'utilisation finale du nuage de points telles les applications d'inspection rapide, de Reverse-Engineering ou encore de copiage rapide. La numérisation telle que pratiquée aujourd'hui repose essentiellement sur les connaissances métier de l'opérateur qui la réalise [MAR 05]. La reproductibilité des résultats [NF 07-001] est donc beaucoup trop dépendante de l'opérateur. De plus, malgré les facilités apparentes d'utilisation, la qualité des résultats d'une numérisation reste très sensible à la procédure utilisée. En particulier, le nuage de point issu d'une numérisation présente en général un certain nombre de caractéristiques non désirées comme la présence de lacunes de numérisation. Ainsi, pour répondre au simple objectif de complétude du nuage de points, la procédure de numérisation peut s'avérer fastidieuse même pour un opérateur aguerri [PAP 97]. Il en résulte un besoin d'apporter une assistance dans la définition de la stratégie de numérisation.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la numérisation d'un objet passe par le balayage de la surface de l'objet par le capteur. Ainsi, la position et l'orientation du capteur vis-à-vis de la surface à numériser ont une influence directe sur la numérisation. Pour illustrer ce lien on peut citer par exemple la partie optique du capteur pour laquelle il est facile de comprendre que l'image formée est directement conditionnée par la position et l'orientation du capteur. Fort de ce constat et compte tenu de précédents travaux, la stratégie de numérisation influence la qualité du nuage de points [PAP 97][PRI 99][REM 04]. En d'autres termes, la situation relative du capteur par rapport à la surface (orientation et position) ainsi que trajectoire suivie par le capteur pour réaliser la numérisation conditionne la qualité des points acquis. Il est donc essentiel de mener une réflexion sur la définition d'une stratégie adaptée. Dans ce sens, l'automatisation consiste donc à systématiser l'application de numérisation par la prise en compte de règles et/ou de contraintes qui permettent de déterminer les situations et trajectoires optimales du capteur avec pour objectif l'amélioration de la répétabilité et la maîtrise de la qualité du nuage de points.

Ce chapitre est consacré à un état des lieux des différentes voix de recherches exploitées pour résoudre le problème de l'automatisation de la numérisation sans contact. Nous avons effectué en particulier une distinction entre l'ensemble des travaux basés sur l'exploitation des modèles CAO et ceux qui permettent de traiter les objets inconnus. Nous

verrons notamment que peu de solutions existent pour traiter le cas de pièces sans définition CAO.

La démarche d'automatisation consiste en deux étapes majeures : la recherche en automatique des situations relatives capteur/surface, et la définition automatique d'une trajectoire de numérisation. Dans ce contexte, la visibilité est en général le préambule à la détermination des orientations à donner au capteur. Ainsi nous débutons ce chapitre par un bref état de l'art des travaux sur la visibilité. Des notions telles la direction de vue, l'accessibilité ou bien la carte de visibilité seront entre autres présentées.

2. Notion de visibilité et numérisation sans contact

2.1. Introduction à la visibilité

La terminologie *visibilité* est utilisée par de nombreux auteurs dans la littérature, toutefois les notions qu'elle draine ne sont pas toujours les mêmes. L'idée générale est de déterminer si un point de l'objet est visible à partir d'un point de l'espace, mais la visibilité d'un point ne signifie pas qu'on puisse physiquement l'atteindre. C'est à partir de la prise en compte ou non de ce type de considération que les définitions varient d'un auteur à l'autre. La question de la visibilité s'impose naturellement pour la numérisation sans contact. Cependant, la notion de visibilité n'est pas une question exclusivement associée à la numérisation. Nous pouvons citer d'autres domaines où les problèmes liés à la visibilité doivent être pris en compte : l'usinage, à travers l'étude des trajectoires d'approche [BRE 06] ; la robotique, à travers l'analyse du déplacement du robot dans son environnement [SRI 04]; l'infographie à travers le calcul de la vue et du rendu d'une scène à partir d'un point de l'espace [BIT 03], et bien évidemment le domaine de la mesure [SPI 99]. On peut également citer les travaux de Chen et Hu [CHE 01] qui font appel à une méthode d'analyse de la visibilité pour des problèmes d'assemblage de pièces sur une chaîne de montage. La conformité des points d'assemblage est vérifiée à l'aide d'outils telles que les théodolites, et le placement optimal des outils de mesure est basé sur l'analyse de visibilité.

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

- Modéliser et discrétiser l'espace englobant l'objet et/ou l'objet
- Définir et choisir les outils mathématiques d'analyse des éléments
- Intégrer les contraintes : collision, éclairage, taille des organes terminaux, ...

La littérature propose de nombreuses approches pour résoudre ces différents problèmes. Nous les avons différencié selon trois familles : les approches dites continues qui ne nécessitent pas de discrétisation des éléments mis en jeu ; les approches basées sur une discrétisation ou une décomposition des surfaces ; les approches exploitant les capacités des cartes graphiques.

2.2. Visibilité : les approches continues

Malgré une certaine diversité dans les algorithmes traitant de la visibilité, un outil est fréquemment utilisé *la carte gaussienne (Gmap)*. Le concept de *la carte gaussienne* trouve ses origines en géométrie différentielle [DOC76]. Gauss introduit l'idée de cartographier les normales d'une surface sur la surface d'une sphère unitaire. Chaque point sur la sphère unitaire est le résultat de l'intersection de la normale à la surface étudiée (translatée au centre de la sphère unitaire), et de la surface de la sphère unitaire. Le résultat de cette construction est vulgarisé sous le nom de la carte gaussienne [DOC 76]:

Soit S une surface R^3 orientée par $\vec{n}$, la cartographie de $\vec{n} \in S$ dans R^3 est constituée de valeurs définies sur une sphère unitaire $S_2 = \{(x,y,z) \text{ tels que } x^2 + y^2 + z^2 = 1\}$. S_2 définit alors la carte Gaussienne de S .

La figure 1 illustre les cartes gaussiennes de quelques exemples de surfaces, cartes définies par les traces des normales sur la surface de la sphère unitaire englobante.

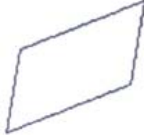
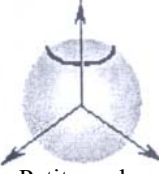
Type de surface	 Plan	 Cône	 Cylindre	 Sphère
Carte Gaussienne	 Un point	 Petit cercle	 Grand cercle	 Une sphère

Figure 1 : Exemple de carte gaussienne [CHE 92]

Les travaux de Koenderink [KOE79] sont parmi les premiers à s'intéresser à la mesure

de la visibilité. Il propose de définir la visibilité par un graphe appelé *graphe d'aspect*. Chaque nœud représente une vue possible de l'objet et les connexions représentent des transitions possibles entre deux vues. L'outil de base permettant d'identifier les vues admissibles est une sphère centrée sur l'objet et chaque vue est représentée par un point sur la sphère. Bien qu'il ne définisse pas cet outil comme la carte gaussienne, le concept est cependant très proche. Chen et Woo s'intéressent aux problèmes liés à la visibilité mais appliquée à l'usinage [CHE 92]. Dans ce sens, ils utilisent la carte gaussienne à partir de laquelle ils définissent la *carte de visibilité (Vmap)* [WOO 94]. Il s'agit en fait d'un enrichissement de la carte gaussienne qui prend en compte l'outil avec lequel la surface sera usinée. La carte de visibilité est alors représentée par un ensemble de points délimitant une zone de la sphère unitaire englobante. Les points ici ne représentent plus les extrémités des normales de la surface, mais un ensemble de directions de vue à partir desquelles l'ensemble de la surface est visible. L'angle maximal entre chacune des directions utilisées pour définir la carte de visibilité et chaque normale $\vec{n}_j$ de la surface S doit être au maximum de 90° . Notons qu'à travers cette définition apparaît l'idée d'accessibilité d'une surface par un objet extérieur à partir d'une zone de l'espace englobant l'objet. Il s'agit là d'un apport nouveau à la notion de la visibilité.

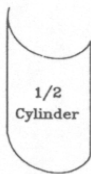
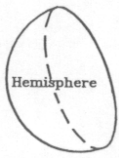
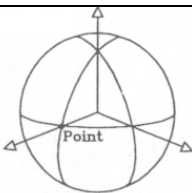
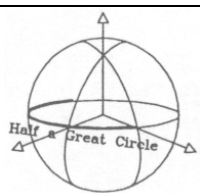
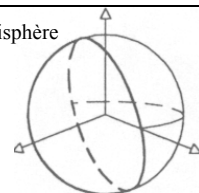
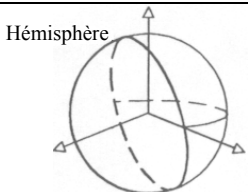
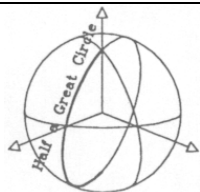
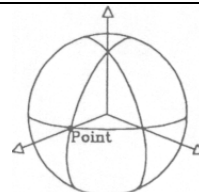
Type de surface			
Carte Gaussienne			
Carte de Visibilité			

Figure 2 : Exemple de cartes de visibilité [GAN 94]

Afin de définir la visibilité d'une surface S , la notion de la visibilité locale est utilisée. Ainsi, pour un point p_i appartenant à la surface S , la visibilité locale est définie par une zone

convexe sphérique dont le pôle est centré sur la normale de S en p_i . La carte de visibilité de toute la surface S est alors obtenue par l'intersection des cartes de visibilité de l'ensemble des points p_i la composant [GAN 94]. A titre d'exemple, la carte de visibilité d'un plan est un hémisphère et celle d'une demi-sphère est un point placé sur le pôle de la sphère unitaire.

Tseng et Joshi ont travaillé sur la définition de cône de visibilité pour des courbes et des surfaces de Bézier [TSE 91]. Dans cette même direction, Kim *et al* proposent d'étendre le concept de la carte de visibilité à des surfaces de Bézier [KIM 95]. Ils définissent des algorithmes permettant de calculer les tangentes, les normales et d'établir les cartes de visibilité des surfaces de Bézier régulières.

Des travaux comme ceux de Spyridi *et al* [SPY 90] ou ceux plus récents de Spitz *et al* [SPI 99] proposent des algorithmes basés sur les sommes de Minkowski. Il s'agit ici d'algorithmes permettant d'aboutir aux cônes de visibilité globale de la pièce. Cependant, si ces algorithmes fonctionnent assez bien pour des surfaces peu complexes, leurs limites sont rapidement atteintes dès lors qu'ils sont appliqués à des surfaces plus complexes. En effet le calcul des sommes de Minkowski pour les surfaces complexes devient rapidement long, et parfois n'aboutit pas.

Comme cela a été souligné précédemment, l'analyse de la visibilité appliquée à l'usinage est souvent qualifiée d'analyse d'accessibilité par les auteurs. Dans ce sens Stage et Roberts [STA 97] étudient l'accessibilité d'une surface à partir d'un point de vue pour un outil d'usinage. Ils proposent un algorithme basé sur l'exploitation des caractéristiques remarquables de l'entité à usiner. Une solution axée sur la compatibilité entre la géométrie de l'outil et la surface à usiner. Cette démarche a l'avantage d'aboutir à un résultat y compris pour les surfaces courbées sans faire appel à une discrétisation. Toutefois, la notion de visibilité ou d'accessibilité d'une surface reste étroitement liée à un outil donné.

2.3. Visibilité : les approches discrètes

Dans cette famille nous regroupons les approches qui proposent des solutions basées sur la discrétisation ou la décomposition des surfaces à traiter. Il est fréquent d'y retrouver les mêmes outils d'analyse et de calcul que ceux présentés dans le paragraphe précédent.

Elbert [ELB 98] propose une démarche appliquée aux surfaces complexes basée sur le calcul de cônes de visibilité utilisant le concept de la carte gaussienne. L'originalité de son

travail est l'intégration dans la démarche de l'angle limite de numérisation α imposé par les caractéristiques techniques du capteur laser utilisé. L'objectif est d'obtenir le nombre minimal d'orientations du capteur assurant la numérisation complète d'un objet tout en respectant la contrainte de limiter l'angle de numérisation par α . L'algorithme débute par la décomposition d'une sphère unitaire en un ensemble de régions sphériques couvrant la totalité de la sphère (figure 3a). Ces régions résultent de l'intersection de cônes C_{α}^i d'axe A^i et d'angle α avec la sphère unitaire et sont indépendants de la surface S à numériser. L'auteur calcule alors la carte gaussienne de S pour laquelle il détermine son enveloppe convexe dont il calcule la surface offset par une projection radiale d'angle α sur le plan $Z=1$ (figure 3b). Les axes A_i qui interceptent la surface Offset (figure 3c) représentent les orientations du capteur qui assurent une numérisation complète de la surface tout en respectant la contrainte d'angle de numérisation maximal imposé.

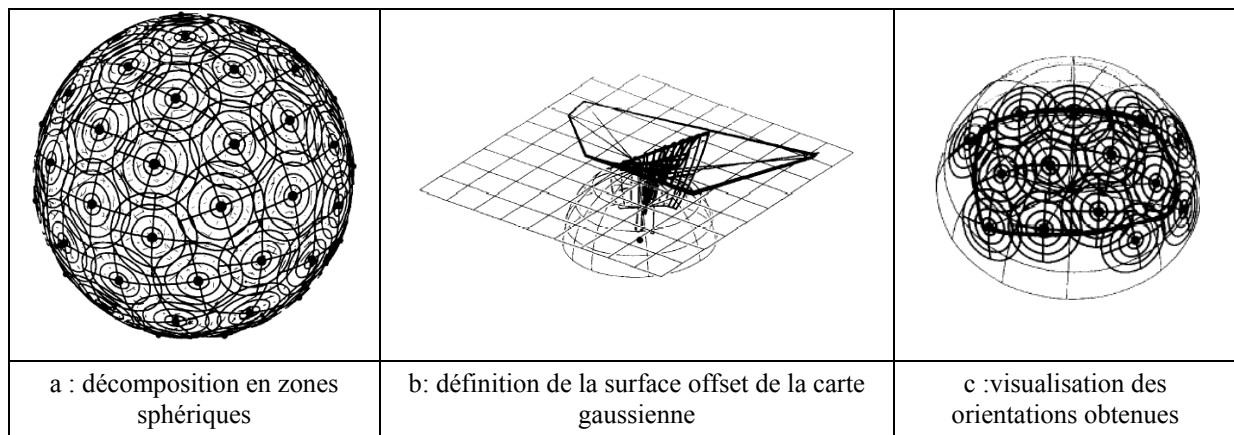


Figure 3 : Exemple d'application de la décomposition par cône de visibilité [ELB 98]

Toutefois, cette méthode traite la visibilité locale et non la visibilité globale, ce qui signifie que les problèmes d'ombre et de faces cachées ne sont pas pris en compte. Notons également que le choix de l'angle α maximal n'est pas basé sur un critère de qualité mais uniquement sur un critère de fonctionnement du capteur.

Trucco *et al* [TRU 97] présentent une solution de calcul de la visibilité appelé GASP (General Automatic Sensor Planning), également basée sur une discrétisation de l'espace et de la pièce. Les points de vue optimums sont définis comme étant une fonction de la visibilité des entités composant la pièce et de la fiabilité des mesures qui en découleront. La méthode débute alors par une décomposition du modèle de la pièce en un ensemble d'entités géométriques simples. L'espace englobant est modélisé par une sphère discrétisée par des triangles et centrée sur l'objet. Les normales aux triangles composant la sphère sont définies

comme les directions de visibilité potentielles. La visibilité de chaque entité est alors déterminée par le nombre de pixels de l'entité visibles pour chaque point de vue. Les auteurs établissent alors une carte binaire de visibilité qui associe les points de vue et les entités. Quant à la fiabilité des mesures, elle est définie comme étant dépendante des capacités du capteur et du logiciel qui seront utilisés. Le modèle du capteur intègre ces deux aspects. Dès lors, les auteurs choisissent les orientations optimales vis-à-vis de la visibilité et de la fiabilité des mesures. Cette approche a l'avantage de présenter une mesure de la visibilité quantitative.

Ellenrieder *et al* [ELL 05] proposent également une démarche basée sur la triangulation des surfaces. Les sommets des triangles sont projetés sur une sphère unitaire centrée sur le point dont la visibilité est étudiée. Les coordonnées sphériques θ et φ ($\rho \equiv 1$) des sommets projetés sont calculées. La sphère unitaire est alors partitionnée suivant θ et φ en intervalles réguliers ν . Les informations booléennes sur la présence de sommets projetés ou non sont ensuite regroupées dans une matrice (figure 4) appelée *visibility map* comparable à un graphe d'axes θ et φ .

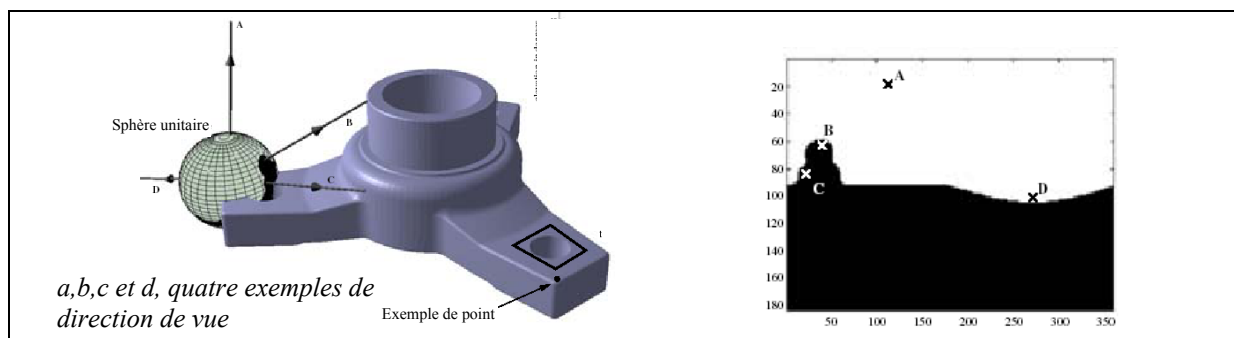


Figure 4 : Calcul de visibilité et visualisation par coordonnées sphériques [ELL 05]

Remy [REM 04] propose un algorithme appliqué à la numérisation 3D par capteur laser à ce titre il intègre les spécificités de ces capteurs. La démarche proposée se décompose en trois étapes : calcul de la visibilité locale, calcul de la visibilité globale et calcul de la visibilité réelle [REM 02]. La visibilité est étudiée pour un nombre fini de directions de vue. L'espace englobant est modélisé par une sphère unitaire discrétisée sous forme d'un modèle STL et les directions de vues sont les normales $\vec{n}_j$ des facettes. La surface S de la pièce est également discrétisée par un modèle STL. Il y a visibilité locale entre un triangle i de S et un point de vue j si l'angle entre $\vec{n}_i$ et $\vec{n}_j$ est inférieur à 60° , valeur issue des caractéristiques du capteur laser utilisé. Un tableau de visibilité locale est édité pour chaque face i de S . Puis un calcul de visibilité globale est réalisé considérant que la face doit être visible par le laser. Une

carte de visibilité globale est ainsi établie. Les directions $\vec{n}_j$ retenues, sont définies dès lors comme les directions laser. Pour chaque direction de vue $\vec{n}_j$ sélectionnée, la face doit être vue par au moins une des deux caméras du système. Cet aspect est pris en compte au travers de la visibilité réelle, qui conduit à définir une table de visibilité avec 2 dimensions supplémentaires associées à chacune des caméras. Les directions sont alors modélisées par les normales $\vec{n}_n$ des triangles de la sphère unitaire les contenant. La visibilité réelle est assurée si l'angle entre $\vec{n}_i$ et $\vec{n}_n$ est contenu dans l'intervalle correspondant au champ de vue de la caméra utilisée.

Dhaliwal *et al* [DHA 03] proposent une approche basée sur le calcul de cônes d'accessibilité. La surface de l'objet étudié est discrétisée par une triangulation. La sphère unitaire est également discrétisée par une triangulation sphérique. Chaque triangle sphérique représente un ensemble de directions de vue. L'étude de la visibilité est réalisée par l'identification de l'ensemble des directions à partir desquelles la facette de la pièce étudiée n'est pas accessible. Le résultat est présenté sous la forme d'une matrice de visibilité appelée *AccessStatus matrix*, dont les colonnes correspondent aux facettes de la pièce et les lignes aux triangles sphériques. Soient deux facettes planes de la surface f et f' , l'inaccessibilité de f associée à f' est calculée comme suit. Une sphère unitaire est centrée sur chacun des trois sommets de f et les sommets de f' y sont projetés. L'enveloppe convexe de la projection est définie, l'intérieur de cette enveloppe représentant l'ensemble des directions à partir desquelles f n'est pas accessible. Notons que ces travaux sont particulièrement adaptés aux surfaces concaves dont la forme pose souvent des problèmes d'accessibilité.

Derigent et Ris [DER 05] proposent une méthode de calcul de la visibilité qui reprend l'idée de cône de visibilité locale proche de celle développée par Spyridi [SPY 90]. Une méthode de détermination de la visibilité dont l'originalité est la prise en compte des directions d'occlusion et surtout la définition de volumes de visibilité appelés visibilité globale. Un cône de visibilité locale $L(S)$ d'une surface S est défini par la normale à la surface et un angle α défini en fonction de l'utilisation envisagée. On calcule ensuite le cône occultant de S appelé $C(S)$, qui correspond à l'ensemble des directions à partir desquelles la surface S n'est pas visible à cause d'éventuels obstacles O . On impose alors une translation des objets O suivant les vecteurs définissant les frontières de S . L'enveloppe du contour convexe des translations effectuées définit la base de $C(S)$. La visibilité globale de la face S est alors

définie par un volume $G(S) = L(S) - C(S)$. Notons que cette démarche nécessite la connaissance préalable des obstacles et de leur position et s'applique essentiellement pour des surfaces planes ce qui impose une décomposition préalable du modèle de l'objet étudié.

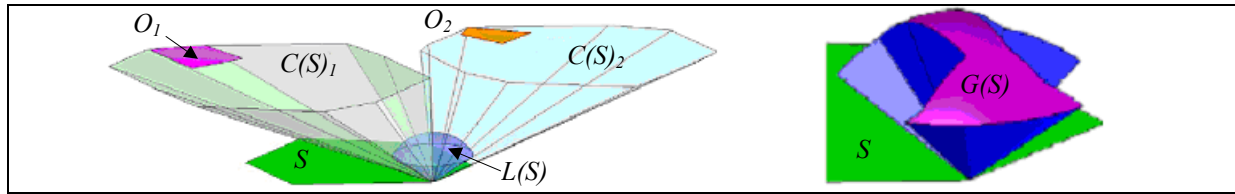


Figure 5 : Exemple de calcul de visibilité globale [DER 05]

2.4. Visibilité et carte graphique

Le développement des capacités des cartes graphiques a conduit un certain nombre de chercheurs à utiliser ces capacités pour le traitement des problèmes de visibilité. Les cartes graphiques fonctionnent en général sur la base d'un calcul de type Z-buffer [FOL 95]. Leur fonctionnement consiste à calculer les éléments non visibles d'une scène à partir d'un point d'observation donné. Les éléments ainsi identifiés sont alors soustraits de la scène et le résultat est affiché. Il s'agit toutefois d'une technique très liée à l'infographie où les besoins en terme d'accessibilité ne sont pas les mêmes qu'en numérisation de pièces. Balasubramaniam *et al* [BAL 00] proposent une démarche basée sur les spécificités des cartes graphiques pour le calcul de la visibilité dans le cadre de la génération de trajets d'usinage. Le modèle numérique de son objet doit être transformé en données compréhensibles par la mémoire vidéo. Dans ce sens les auteurs discrétisent le modèle grâce à une facettisation et affecte à chaque facette une couleur différente et modélisent ensuite l'espace englobant la pièce par une sphère de gauss. La discrétisation de cette dernière par une triangulation définit un ensemble fini d'orientations. Les codes couleur et les orientations sont donnés en entrée à la carte graphique qui calcule la visibilité des facettes pour chaque orientation par analyse de la mémoire vidéo. A partir de la visibilité ainsi définie une voxelisation basée sur les facettes est réalisée afin de calculer une visibilité volumique permettant d'identifier l'accessibilité d'outils à la surface à usiner.

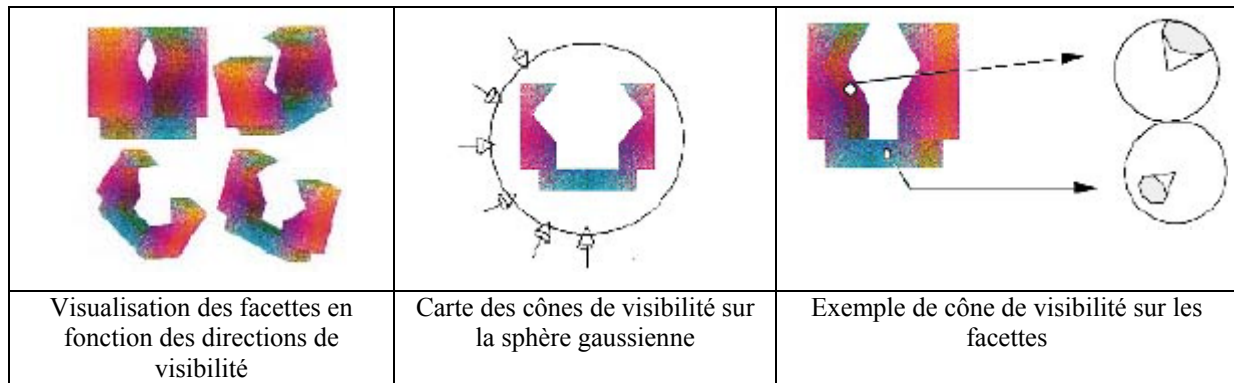


Figure 6 : Utilisation de carte graphique pour le calcul de la visibilité [BAL 00]

L'exploitation des capacités des cartes graphiques apporte un gain de temps particulièrement intéressant. Toutefois cette approche nécessite une modélisation adaptée des éléments mis en jeu qui est différente de celle utilisée en CAO. De plus ces techniques seules ne suffisent pas à prendre en considération toutes les contraintes liées au domaine spécifique de la numérisation.

2.5. Synthèse concernant la visibilité

Le travail bibliographique présenté dans ce paragraphe laisse apparaître une très grande diversité, aussi bien au niveau des solutions proposées pour le calcul de la visibilité que des domaines d'application des contraintes associées. La synthèse et le regroupement que nous avons choisis permettent de dégager les avantages et les points faibles des travaux présentés. Ainsi les travaux axés sur une démarche continue traitent la visibilité de manière globale sans discrétisation des surfaces. Elles sont en ce sens plus adaptées aux formes canoniques et aux surfaces de type Bézier. Elles atteignent leur limite lorsque les surfaces deviennent très complexes. Les travaux qui s'appuient sur une discrétisation des surfaces semblent mieux adaptés aux surfaces complexes. Toutefois cet avantage peut être limité par le temps de calcul qui s'allonge rapidement avec la finesse de discrétisation. Par ailleurs il faut noter que la discrétisation conduit à étudier non pas la visibilité de la surface réelle mais celle d'une surface approchée. Les travaux basés sur l'exploitation des caractéristiques des cartes graphiques apportent une réponse à l'optimisation du temps de calcul. Cependant les méthodes proposées ne sont pas adaptées à la prise en compte des contraintes spécifiques associées à la numérisation.

On peut cependant constater que la plupart des méthodes proposées s'appuient sur la connaissance d'un modèle CAO de l'objet à numériser. De plus elles se concentrent

essentiellement sur l'identification de la visibilité des surfaces à numériser et conduisent à un ensemble de directions de vue optimales assurant une numérisation complète des surfaces tout en respectant certaines contraintes. Quelques approches abordent en particulier le respect d'angles limites ou encore la définition d'orientations admissibles, celles-ci pouvant être associées à des critères de qualité.

Pour finaliser la définition d'une stratégie de numérisation automatique, le calcul des visibilité doit être complété par la génération de la trajectoire de numérisation. Nous abordons dans les paragraphes suivants les méthodes proposées dans la littérature pour la numérisation automatique par capteur-laser, en séparant les méthodes basées sur la connaissance a priori du modèle CAO de la pièce, et celles, peu nombreuses, qui traitent des objets de formes inconnues.

3. Numérisation automatique d'objets définis en CAO

Lee et Park proposent une méthode d'automatisation dans le contexte d'inspection rapide de formes complexes [LEE 00]. Le système de numérisation est une MMT équipé d'un capteur laser. Les axes de la machine assurent le déplacement du capteur ; un plateau tournant permet d'orienter la pièce par rapport au capteur. Les auteurs calculent de manière automatique les paramètres de balayage de la numérisation à partir du modèle CAO de la pièce. Ils définissent les paramètres de numérisation automatique comme étant la direction de balayage, le nombre de balayages et la trajectoire de balayage. Ils basent leur approche sur un maillage de surfaces paramétriques. Pour chaque point du maillage, ils calculent la direction admissible locale (LAD) à partir de contraintes telles que le champ de vue, la profondeur de la vue (DOF), et l'angle de vue. Les directions globalement accessibles (GAD) sont obtenues en effectuant des opérations booléennes sur les LADs. Le système de numérisation utilise une table rotative 3 axes afin de positionner la pièce selon chaque direction de balayage obtenue. Les auteurs ajoutent aux travaux précédents [SON 02], le concept de points critiques afin de diminuer le nombre de directions de balayage. Les points critiques sont des points qui ne peuvent pas être numérisés ensemble.

Xi et Shu [XI 99] formulent le problème de la façon suivante : comment trouver les situations optimales de la fenêtre de vue (FOV) afin de maximiser le balayage de la surface par le capteur. Ils proposent un découpage du modèle de CAO en tranches transversales parallèles les unes aux autres afin de diviser la surface en sections. Chaque section ainsi

définie représente une passe de numérisation. Le profil extérieur associé à chaque section est obtenu en projetant la surface sur un plan de projection perpendiculaire. Pour trouver la situation optimale de la FOV relativement au profil extérieur, le haut de la FOV est placé dans l'alignement de la frontière supérieure du profil extérieur. Les auteurs définissent alors la zone de couverture par un offset de la frontière supérieure de la valeur de la profondeur de la vue. Si la frontière inférieure appartient à la zone de couverture, alors un balayage extérieur entier de section est garanti. Le trajet de numérisation est ensuite obtenu en plaçant convenablement les limites de la section à l'intérieur de la fenêtre de mesure. Afin d'obtenir une numérisation complète, les trajets générés pour chaque section sont reliés via un déplacement en mode en zig-zag.

Prieto est un des premiers à intégrer la notion de critère de qualité pour définir une stratégie de numérisation [PRI 99]. Dans un contexte d'inspection automatique, l'auteur propose de définir une stratégie de numérisation permettant d'aboutir à une numérisation complète de l'objet garantissant une précision donnée. Une étude préalable des performances du capteur est alors nécessaire. L'auteur montre que le bruit de numérisation est fonction de l'angle de numérisation et de la distance de numérisation. En particulier, il montre que le bruit est réduit dès lors que la trace laser est la plus normale possible à la surface pour une distance donnée. A partir du modèle IGES des surfaces paramétriques de la pièce, l'auteur calcule les situations capteur (positionnement et orientation par rapport à la surface) optimales vis-à-vis des critères de qualité prédéfinis. Les orientations et les positions finales du capteur sont obtenues après une dernière étape de vérification de condition de non-occlusion. Pour cette tâche Prieto effectue une modélisation volumique de la pièce par voxelisation. Il devient ainsi possible d'identifier la présence d'éléments de surface entre une position capteur et un point numérisé. Bien que cette approche soit développée pour les modèles CAO, nous verrons au chapitre 4 que la démarche proposée est assez proche de celle de Prieto pour la numérisation d'objets de formes inconnues.

Remy [REM 04] s'appuie sur le concept de visibilité réelle (cf. § 2.3). Après avoir établi les cartes de visibilité il s'intéresse à l'étude des collisions capteur-pièce grâce à une modélisation du capteur sous forme d'une sphère et d'un segment. Les possibilités d'orientation du capteur ne sont pas exploitées dans ce travail pour lequel Remy propose différents posages de la pièce pour obtenir les orientations relatives capteur/pièce conduisant à une numérisation complète tout en minimisant le nombre de posage. La génération de

trajectoires est réalisée à l'aide du calcul de *bandes de scanning*. On notera cependant, que dans cette étude Remy s'attache également à étudier la capacité de sa cellule de numérisation mettant en avant les performances du système de numérisation afin de l'utiliser au mieux dans la démarche de numérisation automatique.

Plus récemment, Martins *et al* [MAR 05] proposent une méthode automatique pour laquelle le choix des directions de numérisation ainsi que la définition de la trajectoire de numérisation se font selon des critères de qualité. Sa démarche débute par l'identification des meilleurs points de vues pour la numérisation à partir d'une décomposition volumique de la pièce (voxelisation) à laquelle sont associées des informations issues du modèle STL. A ce stade son algorithme intègre des critères de visibilité classique (collision, visibilité, accessibilité) auxquels il ajoute des critères de qualité. Il définit une matrice binaire M appelée *measurability matrix* mettant en relation les triangles i et les points de vue j candidats pour la numérisation. Un point de vue est validé si et seulement si : l'axe ij est non interrompu (critère de visibilité); le point j ne présente pas de risque de collision (critère d'accessibilité); la normale $\vec{n}_i$ de i et la direction du laser $\vec{l}_j$ en j forme un angle inférieur à une valeur limite imposée (critère de qualité). Le choix final des points j parmi ceux validés est réalisé grâce à de nouveaux critères de qualité introduits par la fonction objectif $G(j) = w_s G_s(j) + w_{sc} G_{sc}(j)$. Les valeurs de $G_s(j)$ sont calculées à partir du contenu de M . $G_s(j)$ prend en compte le nombre d'éléments pouvant être numérisés à partir de j (critère de couverture de surface) et $G_{sc}(j)$ la surface totale pouvant être numérisée. A ce stade les points de vue les plus optimaux ainsi que les directions de numérisation (orientations du capteur) attachées sont définies.

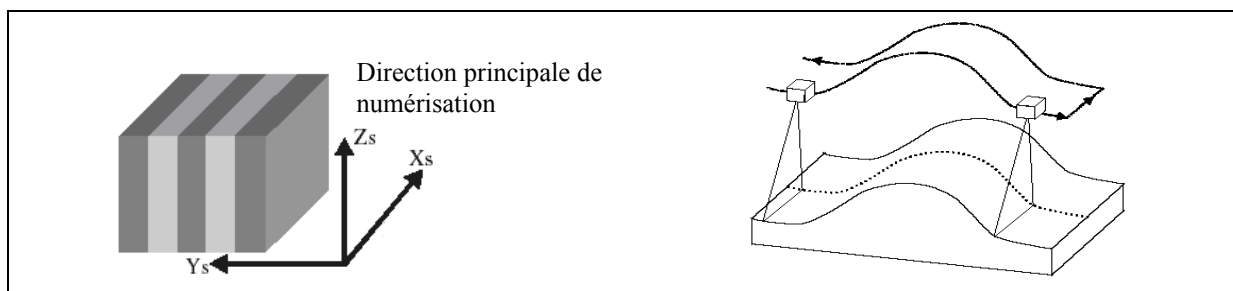


Figure 7 : Trajet de numérisation par suivie de surface [MAR 05]

Afin d'éditer le trajet de numérisation, un cube englobant la pièce est calculé. Ce dernier subit un découpage en tranche en fonction de la fenêtre de mesure du capteur. Le capteur est alors déplacé le long d'un trajet qui suit la surface à numériser. Le passage d'une tranche à l'autre se fait par zig-zag (figure 7).

4. Numérisation automatique d'objets inconnus

La plupart des approches développées dans la littérature concernant les objets de formes inconnues sont basées sur le choix de la « meilleure vue suivante », plus communément connue sous le nom de *Best Next View problem*. Dans la majorité des cas, l'objectif est d'aboutir à une numérisation complète de l'objet à partir de la connaissance des vues précédentes en minimisant le nombre de vues [LI 05]. Ces méthodes ont pour domaine principal d'application le domaine de la robotique et s'appuient sur la notion de visibilité. Ainsi, le choix de la Best Next View (BNV) est en général conditionné par la maximisation du nombre d'informations non vues qui peuvent être vues à la prise de mesure suivante.

Massios et Fisher [MAS 98] ont ajouté dans leur approche la prise en compte d'un critère de qualité afin d'automatiser le processus de choix de la BNV. Leur algorithme s'appuie sur une représentation de type d'occupation spatiale : *voxelmap* (appelée voxelisation dans ce travail). A partir des vues acquises, les auteurs établissent une voxelisation des données. Chaque voxel est marqué d'une des valeurs suivantes : Vide ; Vu ; Non-vu ; Occlusion. Chaque voxel qui est marqué *Vu* contient de plus des informations telles la normale à la surface (calculée à partir du best-fit d'un carreau 3x3 à la surface locale selon le critère des moindres carrés) ; la qualité locale d'acquisition et la qualité globale. La qualité locale est établie en considérant la direction de la normale comparativement à la direction de vue. La qualité globale est la valeur maximale de qualité locale du voxel considéré et de son 5-voisinage. La voxelisation est projetée sur la sphère unitaire discrétisée, pour laquelle seuls les points de vue atteignables sont conservés (contraintes de positionnement capteur par exemple). Les points de vue admissibles sont alors définis à l'aide de la fonction critère suivante : $f(v_j) = w_v f_{\text{visibilité}}(v_j) + w_q f_{\text{qualité}}(v_j)$. Le point de vue v qui donne la valeur de f la plus grande est le point de vue retenu. Le système de déplacement proposé pour cette application est restreint à un déplacement en translation du capteur et une rotation de l'objet. Nous pouvons retenir cependant que la notion de voxelisation associée à la notion d'attributs de qualité est une piste intéressante pour la numérisation automatique.

Dans ses travaux de thèse Papadopoulos appuie également sa démarche sur la voxelisation [PAP 97]. Sa démarche de planification, d'autant plus intéressante qu'elle a été développée spécifiquement pour des capteurs Kréon ancienne génération (KL 50), est composée de deux étapes majeures : gestion des collisions capteur/environnement/pièce à partir d'un modèle d'occupation spatiale de l'espace et choix de la prochaine vue. La première

étape permet de piloter la trajectoire en translation du capteur, alors que la seconde définit les orientations capteur. De la même manière que précédemment, il différencie les voxels vides des voxels pleins et introduit la notion de voxels inconnus pouvant correspondre à une occultation ou à une zone d'ombre. Dans cette première étude, l'auteur considère que seul un degré de liberté en rotation autour de l'axe Z est disponible. De plus, la numérisation est effectuée par couches perpendiculaires à Z et la détermination des voxels pleins et inconnus est réalisée par projection sur des images de profondeur.

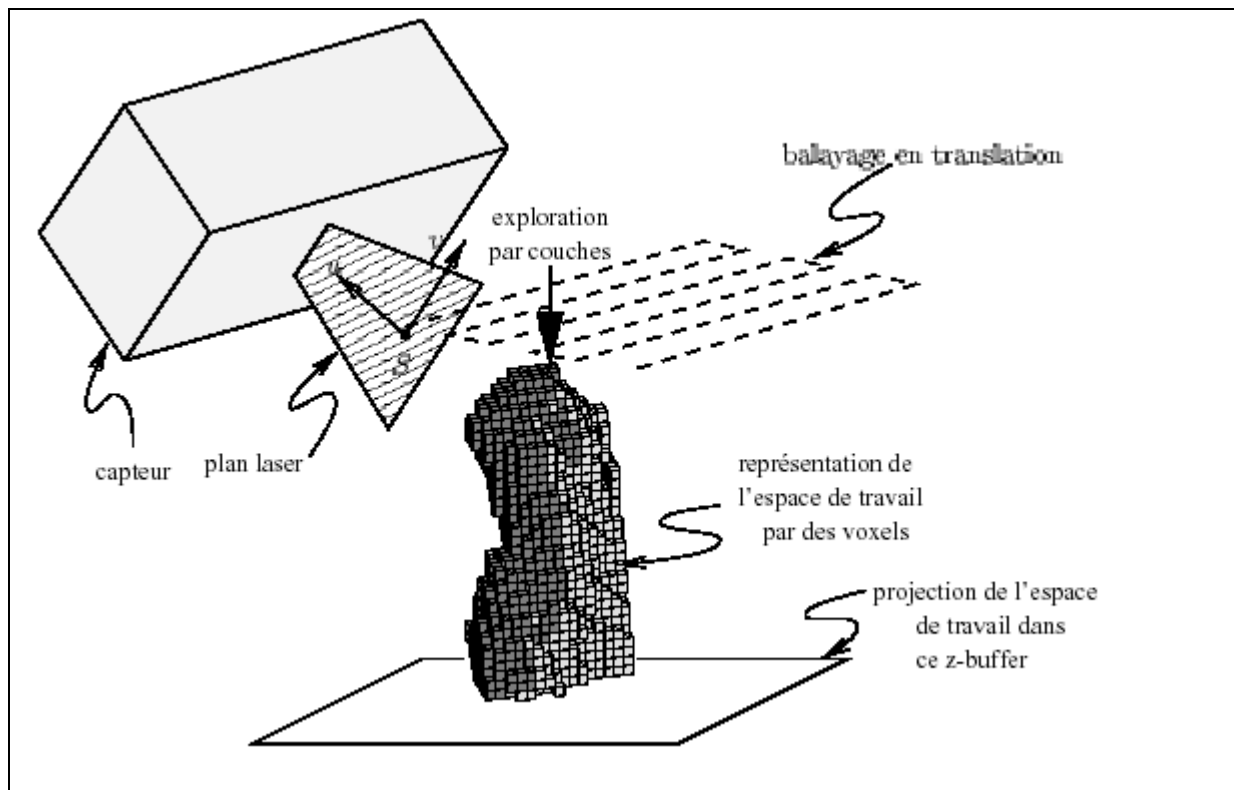


Figure 8 : Numérisation volumique et génération de trajectoire[PAP 97]

Parmi les quelques travaux associés au Reverse Engineering (RE), le travail de Zexiao *et al* est assez intéressant [ZEX 05]. En effet, les auteurs s'intéressent au problème complet de la numérisation dans le cadre du RE, mettant en avant l'importance de réaliser des mesures justes en particulier pour les arêtes ou des lignes de contour. Le système utilisé est une MMT équipée de plusieurs capteurs : un capteur à lumière structurée et un capteur à déclenchement. Les orientations relatives capteur/pièce sont réalisées à l'aide d'un plateau tournant positionné sur le marbre de la MMT. Le capteur optique permet d'obtenir une première numérisation de l'objet à partir de laquelle un modèle CAO est construit. Ainsi, la seule contrainte associée est l'obtention d'une numérisation complète de l'objet. Pour ce faire, les auteurs contrôlent que la fenêtre de vue du capteur, selon le point de vue considéré, intercepte une portion du volume

englobant de la pièce à numériser. Les arêtes sont obtenues par intersection des surfaces en CAO. Ce sont en général des zones nécessitant une très bonne exactitude de mesure. Les auteurs proposent de les mesurer à l'aide du palpeur à déclenchement. Parallèlement, les auteurs effectuent une analyse de la précision de leur système. Ils étudient en particulier les erreurs systématiques et aléatoires, ainsi que la répétabilité de leur capteur optique. Ils s'attachent également à estimer l'erreur de recalage des vues ou mesures effectuées à l'aide des différents capteurs. Les auteurs garantissent alors une exactitude de mesure à $\pm 0.033\text{mm}$.

5. Conclusion

La numérisation automatique peut se décomposer en deux grandes étapes : la recherche des situations relatives capteur/surface et la génération de trajectoires de numérisation à partir des situations précédentes.

La recherche des situations relatives capteur/surface est le plus souvent basée sur un concept de visibilité permettant de définir un ensemble de directions de vue optimales. Il s'agit d'assurer une numérisation complète des surfaces tout en respectant certaines contraintes. En particulier certains auteurs proposent des contraintes liées au respect de critères de qualité.

De nombreuses démarches sont proposées pour la numérisation automatique d'objets dont les formes sont définies à partir d'un modèle CAO dans un contexte d'inspection rapide. Le modèle CAO sert de support au calcul des directions de balayage admissibles. La gestion des collisions capteur/environnement/surface est un des critères essentiels, que ce soit dans le choix des directions admissibles aussi bien que pour la génération du balayage. Les trajectoires de numérisation sont généralement définies simplement en modes zig-zag. De nombreux auteurs ajoutent la qualité de numérisation comme critère. Citons à ce propos les travaux de Prieto [PRI 99] qui cherche à définir les directions de vue de façon à minimiser le bruit de numérisation du nuage de points acquis.

Les méthodes associées à la numérisation d'objets de formes inconnues sont moins nombreuses. Les travaux majeurs sont ceux issus de la robotique dans la recherche de la *Best Nest View* pour la vision d'un objet ou d'une scène. Les travaux qui retiennent le plus notre attention sont ceux de Massios et Fisher [MAS 98] qui définissent les points de vue admissibles à l'aide de la fonction critère basée sur la visibilité et la qualité du point de vue.

Leur démarche basée sur une voxelisation enrichie par des *informations* (rappelant fortement la notion d'attributs développée au LURPA [OST 02][CON 02]) apporte un certain nombre de réponses aux problèmes d'occlusion et de gestion des collisions.

Les performances en terme de qualité et d'exactitude des capteurs laser sans contact sont moindres que celles d'autres techniques tels les palpeurs à contact. L'utilisation de critère de qualité en numérisation automatique semble une solution pour atteindre une qualité donnée. Comme nous venons de le voir, les démarches de numérisation automatique proposées dans la littérature intègrent de plus en plus la notion de qualité pour construire leurs solutions. Cette notion de qualité est étroitement liée aux capacités du système de numérisation utilisé. C'est pourquoi, avant de développer notre démarche de numérisation automatique intelligente, nous proposons un protocole d'évaluation des performances du système de numérisation détaillé au chapitre suivant.

Chapitre 3

Qualification des moyens de mesure sans contact

1. Introduction : Le besoin d'évaluation du moyen de mesure

L'élargissement des domaines d'utilisation des systèmes de numérisation à base de capteurs optiques s'accompagne de la nécessaire évaluation de la performance de tels systèmes. On constate en effet que les systèmes de numérisation à base de capteurs optiques sont de plus en plus utilisés pour la mesure et l'inspection de conformité [GAL 04]. Dès lors nous sommes dans le domaine de la métrologie dimensionnelle, et il est essentiel d'analyser, voire de quantifier, les sources d'erreurs et d'incertitude de mesure. Les indications dites de *précision* fournies par le constructeur concernent le plus souvent le capteur utilisé seul dans les meilleures conditions et ne rendent pas compte de la qualité de la numérisation finale.

Peu d'études ont été menées dans le domaine de l'évaluation des données restituées après numérisation 3D par moyens optiques. Quelques auteurs suggèrent des procédures d'évaluation de l'exactitude de mesures basées sur la mesure de formes spécifiques [ELH 95]. La qualité de la numérisation est également évaluée de manière globale, par la mesure d'artefacts, en intégrant les effets liés à la distance de numérisation et à l'angle de vue, ce qui met en avant l'importance de la stratégie de numérisation [FEN 01] [REM 04] [PRI 99]. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la connaissance de la performance du système de numérisation permet de choisir au mieux la stratégie de numérisation afin de minimiser les sources d'incertitudes.

Ainsi, la qualification des moyens de mesure doit permettre de définir un domaine d'utilisation à l'intérieur duquel la stratégie de numérisation peut être élaborée pour répondre à un critère de qualité donné.

Dans ce chapitre, nous revenons brièvement sur les sources d'incertitudes associées aux systèmes de numérisation sans contact, et en particulier aux systèmes à base de capteur laser-plan. Nous présentons également les moyens de qualification dont disposent les utilisateurs de tels systèmes afin d'en évaluer les performances, en mettant en avant qu'il n'existe pas actuellement de moyens de qualification normalisés. Les difficultés sont à la fois liées à la nature des grandeurs à évaluer et à la mise en œuvre de procédures simples d'évaluation de ces grandeurs. Nous proposons alors à tout utilisateur de systèmes de numérisation sans contact, un protocole d'évaluation des performances de son système. Les performances sont évaluées en partie à travers la notion d'indicateurs de qualité introduite par

Contri [CON 02]. Les procédures que nous présentons associées à ce protocole d'évaluation des performances sont faciles à mettre en oeuvre, basées sur la mesure d'artefacts géométriques de forme simple, et reproductibles d'un système capteur laser-plan à l'autre.

2. Sources d'incertitude et qualification des systèmes de numérisation sans contact

La principale exigence face à un système de numérisation par capteur laser est qu'il restitue une image numérique 3D la plus fidèle possible de l'objet numérisé. Fort de ce constat tout facteur ou élément qui puisse altérer le résultat de la numérisation sera considéré comme une source de perturbation. Cependant, compte tenu de la complexité de fonctionnement et de la diversité des technologies participant à la réalisation de la numérisation 3D (optique, laser, électronique...), il est souvent difficile d'isoler la source de chaque perturbation. Il est cependant indispensable de pouvoir évaluer l'influence des perturbations sur la qualité des résultats d'une numérisation.

2.1. Chaîne de numérisation et sources de perturbations

La chaîne de numérisation conduisant à l'obtention d'un nuage de points peut se décomposer en trois systèmes (système de déplacement, système d'acquisition, système de traitement) chacun d'eux étant potentiellement une source d'erreur de mesure. Des études antérieures nous ont conduit à synthétiser les sources d'imprécisions associées à chacun des systèmes (figure 1) [LAR 04B] [CONT 02].

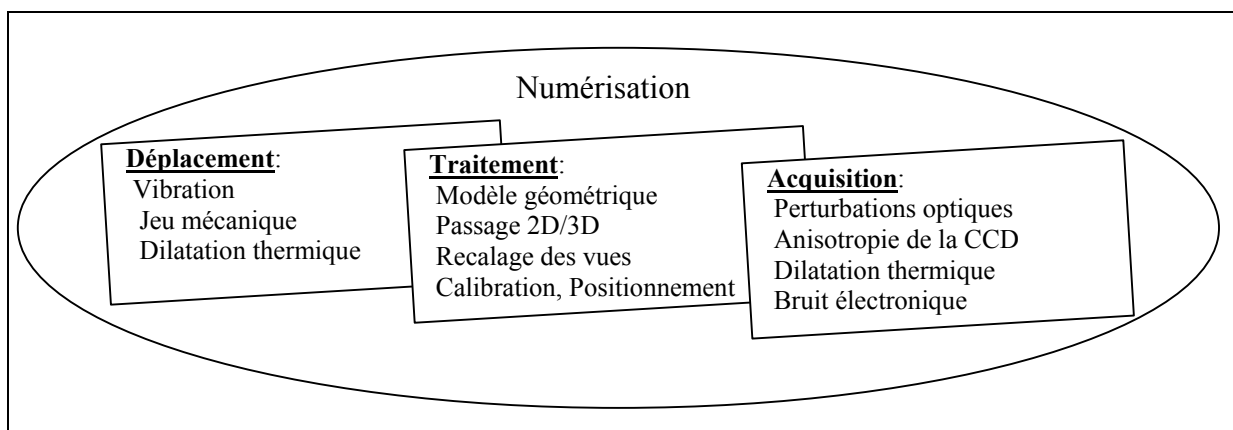


Figure 1 : Sources d'imprécision pour chaque système

Le système de déplacement : les imprécisions associées au système de déplacement sont essentiellement liées aux défauts des éléments mécaniques et peuvent être mesurés et corrigés, en particulier lors de l'utilisation d'une MMT [BOU 87]. Or l'usage de la MMT est désormais courant en numérisation 3D. De ce fait nous supposons ces défauts négligeables ou corrigés. Cependant, l'utilisateur doit s'assurer que cette hypothèse est vérifiée.

Le système de traitement : l'étape de traitement permet de restituer des données 3D à partir des données 2D. Comme nous l'avons vu au §2.2.4 du chapitre 1, le passage des données 2D en données 3D est obtenu par l'utilisation d'une matrice de transformation. L'identification des coefficients de la matrice se fait au travers d'une procédure de mesure qui est basée en général sur la mesure d'une sphère étalon. Cette étape de calibration externe est une source d'erreurs, d'une part par le choix du modèle utilisé et d'autre part par les méthodes d'identification des paramètres du modèle. De ce fait bien que la stratégie de numérisation de cette procédure soit bien définie (bien que semblable elle reste spécifique à chaque modèle de capteur), elle reste une source d'incertitudes aussi bien pour l'estimation de la position du plan laser que pour celle de son orientation. L'importance de cette calibration externe est d'autant plus grande qu'elle conditionne également le recalage des différents nuages de points. Cependant l'utilisateur n'a qu'un rôle d'exécutant face à la procédure de la calibration dictée par le constructeur. Toutefois, dans sa démarche l'utilisateur doit valider sa calibration.

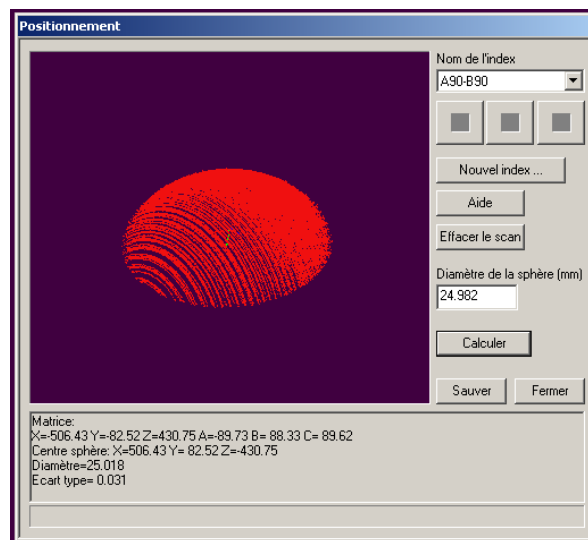


Figure 2 : Fenêtre de réglage de la calibration externe du capteur Zephyr

A titre d'exemple, la calibration externe du capteur Zéphyr utilisé dans ce travail propose une validation de l'étape de calibration par calcul d'un *écart type*.

A l'issue de la numérisation de la sphère étalon, le logiciel calcule l'écart type (σ) qui représente la dispersion des points numérisés par rapport à la sphère des moindres carrés calculée. La validation est obtenue par une comparaison de la grandeur à un intervalle de validité donné par le constructeur.

L'absence d'information sur la signification et la provenance de l'intervalle de validité, empêche toute analyse cohérente sur les conséquences et la pertinence de la valeur de σ . De plus une expérimentation menée au LURPA montre une faible répétabilité de la valeur de σ . Cet état de fait a été récemment confirmé par d'autres utilisateurs du milieu industriel. L'ensemble de ces éléments renforce notre point de vue sur la nécessité de pouvoir évaluer les conséquences des erreurs de l'étape de calibration sur les données numérisées (cf. § 3.7).

Le système d'acquisition ou capteur : La complexité et la diversité des technologies utilisées dans un capteur sont facteurs de multiplication des sources de perturbation de la mesure. Les perturbations qui en découlent sont essentiellement associées aux composants optiques et électroniques (distorsions, défauts des lentilles, effets spéculaires...) dont nous regroupons les conséquences sous l'appellation *bruit de mesure*.

On précise ici que les constructeurs de capteur de numérisation laser-plan proposent en général un ensemble de trois réglages destinés à diminuer l'influence d'une partie du bruit de mesure. Il s'agit de réglages qui permettent de prendre en compte les propriétés physiques des matériaux vis à vis du rayonnement lumineux.

Le premier réglage permet la modulation de la puissance du laser en fonction de la capacité d'absorption de la lumière par la surface à numériser. Ce réglage correspond indirectement à la notion d'ouverture en photographie : plus la puissance est élevée plus la caméra est sensibilisée. En réalité, il n'y a aucune action sur la partie caméra du capteur. En effet, l'augmentation de la puissance entraîne une augmentation de l'intensité lumineuse du laser ce qui se traduit par un épaissement de la trace laser sur la surface à numériser. L'entité que doit voir la caméra (la trace) devient plus visible.

Le deuxième élément de réglage est le temps d'intégration qui permet de moduler le temps d'exposition des pixels de la matrice CCD à la lumière provenant de la scène numérisée. Il s'agit d'un réglage comparable à la notion de vitesse en photographie qui permet de rendre plus sensible la caméra. Cependant il ne faut pas oublier qu'un temps

d'intégration trop long sur une surface non absorbante peut entraîner une saturation des pixels (cf. § 2.3.1).

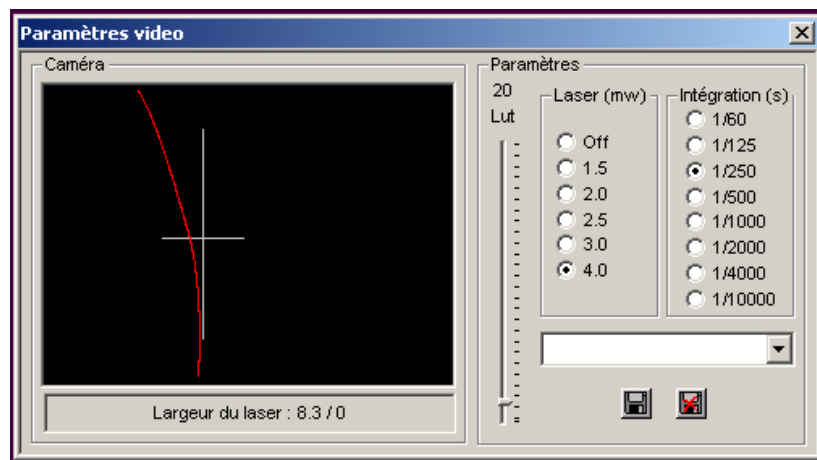


Figure 3 : Fenêtre de réglage du capteur Zephyr dans le logiciel d'acquisition Polygonia

Le troisième réglage permet de faire varier le seuil de sensibilité de la caméra. Le réglage dit LUT (Look Up Table) permet de régler le seuil d'intensité à partir duquel une trace provenant de l'objet devra être prise en compte. Ce réglage doit permettre d'éliminer les points parasites dus à la lumière ambiante ou à la réflexion sur la surface de l'objet.

Il est important de noter que bien que ces trois réglages permettent d'éliminer une partie des perturbations liées aux propriétés physiques des matériaux, ainsi un mauvais réglage peut accroître le bruit de mesure. Cet aspect doit d'autant moins être négligé que la validité d'un réglage est entièrement laissée libre à l'appréciation de l'opérateur.

Pour terminer cette analyse des sources d'imprécisions du capteur, on notera que de nombreux autres facteurs participent également aux incertitudes de mesure tels que les variations de température, la fréquence d'émission du plan laser et d'acquisition des lignes, la synchronisation de la saisie d'une ligne par le capteur et de la saisie de la position du capteur dans l'espace de la MMT, le contrôle de la vitesse de déplacement, l'épaisseur de la poudre déposée sur la surface (cf. § 2.3 chapitre 1).

Nous précisons par ailleurs que les expérimentations que nous avons menées sont réalisées dans un environnement contrôlé en température, humidité et vibration.

2.2. Evaluation de la qualité : Normes ISO et Numérisation 3D

La prise en compte des perturbations dans le résultat d'une numérisation suppose une évaluation de ces perturbations. Dans ce sens on peut se poser la question de l'utilisation de l'incertitude de mesure. Il nous semble donc intéressant de citer la norme NF ENV 13005 qui traite de l'expression de l'incertitude de mesure. Celle-ci telle que définie dans la norme, ne s'applique qu'à une grandeur physique (le mesurande) qui peut être caractérisée en première approximation par une valeur unique.

Incertitude de mesure : *" paramètre associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande "*

La numérisation aboutit toujours à la représentation discontinue d'une surface sous forme d'un nuage de points et il est difficile d'appliquer l'expression de l'incertitude de mesure telle que définie dans la norme au résultat direct d'une numérisation. Fort de ce constat, il ne nous apparaît pas opportun d'appuyer directement notre réflexion sur l'utilisation de la norme NF ENV 13005.

La norme ISO 10360-4 traite de la vérification périodique d'une MMT dans le cadre d'une mesure par « scanning » à l'aide d'un palpeur à contact. Dans ce sens elle propose de valider les performances du système en fonction de deux paramètres ; l'erreur de palpation T_{ij} et le temps d'acquisition τ . L'erreur de palpation est définie comme étant :

"l'étendue des rayons entre le centre mesuré et tous les points issus du scanning évalués, c'est à dire la différence absolue entre les résultats de mesure maximal et minimal "

L'ensemble de la procédure est basé sur la mesure d'une sphère d'essai en acier de diamètre nominal 25 mm. Le système est certifié conforme si ces deux paramètres sont inférieurs à la valeur annoncée par le fabricant ou celle définie par l'utilisation dans le cas d'une vérification périodique. L'ensemble du protocole de mesure est spécifié dans la norme. Malheureusement le terme de scanning dans l'intitulé de cette norme ne renvoie pas à l'utilisation d'un capteur laser mais d'un palpeur à contact continu ce qui ne permet pas son utilisation directe pour notre problématique.

Que ce soit au niveau de l'évaluation de l'outil de mesure, de la procédure de numérisation ou au niveau de l'évaluation du nuage de points, il n'existe aucune norme à

notre connaissance qui traite directement de la numérisation 3D par capteur laser. Cependant le besoin d'évaluation reste entier [GON 03]. Il convient donc de déterminer les outils de quantification qui nous permettent de cerner les limites de fonctionnement du système de numérisation. Le besoin de connaissance de l'outil de numérisation est d'autant plus important pour notre travail que la solution que nous proposerons au chapitre 4 s'appuie sur les performances de l'outil de numérisation utilisé. Il nous semble indispensable d'évaluer le système par des indicateurs dont la définition est la plus proche possible des notions établies par les normes de métrologie. Nous faisons en particulier appel à la norme NF X07-001 qui définit les termes utilisés en métrologie.

2.3. Evaluation : outils de quantification

La qualité du nuage de points peut être évaluée grâce à l'utilisation d'indicateurs de qualité tels ceux proposés par Contri dans des études précédentes [CON 02] [LAR 02]. Contri a proposé une série de quatre indicateurs basés sur l'analyse des caractéristiques des nuages de points obtenus par numérisation 3D. Ces indicateurs, bien adaptés à la qualification des données issues de numérisation sans contact, sont classés selon deux groupes :

- les indicateurs intrinsèques
- les indicateurs spécifiques

Les indicateurs intrinsèques, la densité et la complétude, apportent une qualification globale du nuage de points. A ce titre ils permettent une analyse générale du nuage de points. Leur définition est indépendante du moyen de numérisation et ils peuvent être évalués directement à partir du nuage de points. Ce qui par ailleurs ne signifie pas que le moyen de numérisation ou la procédure de numérisation n'influence pas la valeur de ces indicateurs. Ces indicateurs rendent compte de la quantité et de la répartition de l'information discrétisée contenue dans le nuage de points et permettent de mettre en évidence l'importance des lacunes de numérisation. Dans ce sens on peut parler d'indicateurs qualifiant la représentativité géométrique du nuage de point vis à vis de l'élément numérisé.

Les indicateurs spécifiques, le bruit et l'exactitude de mesure permettent d'apporter une expertise locale du nuage de points. La détermination de ces indicateurs nécessite une connaissance du moyen de numérisation. Ils rendent compte à la fois des imprécisions dues à l'optique et aux différents composants employés, mais également à celles dues à la calibration

et au recalage.

2.3.1. Indicateurs intrinsèques : la densité

La numérisation complète d'un objet nécessite en général plusieurs acquisitions. Les différentes acquisitions sont caractérisées par différents placements relatifs du capteur par rapport à la surface à numériser. La superposition et le recalage des différentes vues aboutissent à un nuage très inhomogène caractérisé par des variations de densités locales. Hoppe a en particulier montré l'importance de la densité pour l'étape de reconstruction de surface [HOP 92]. Remy [REM 04] s'intéresse à la densité d'une ligne de numérisation 2D et définit un nombre de points seuil en deçà duquel la numérisation doit être réitérée. Dans notre cas nous utilisons une définition de la densité proche de celle proposée par Hoppe qui peut se décrire de manière suivante :

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 .

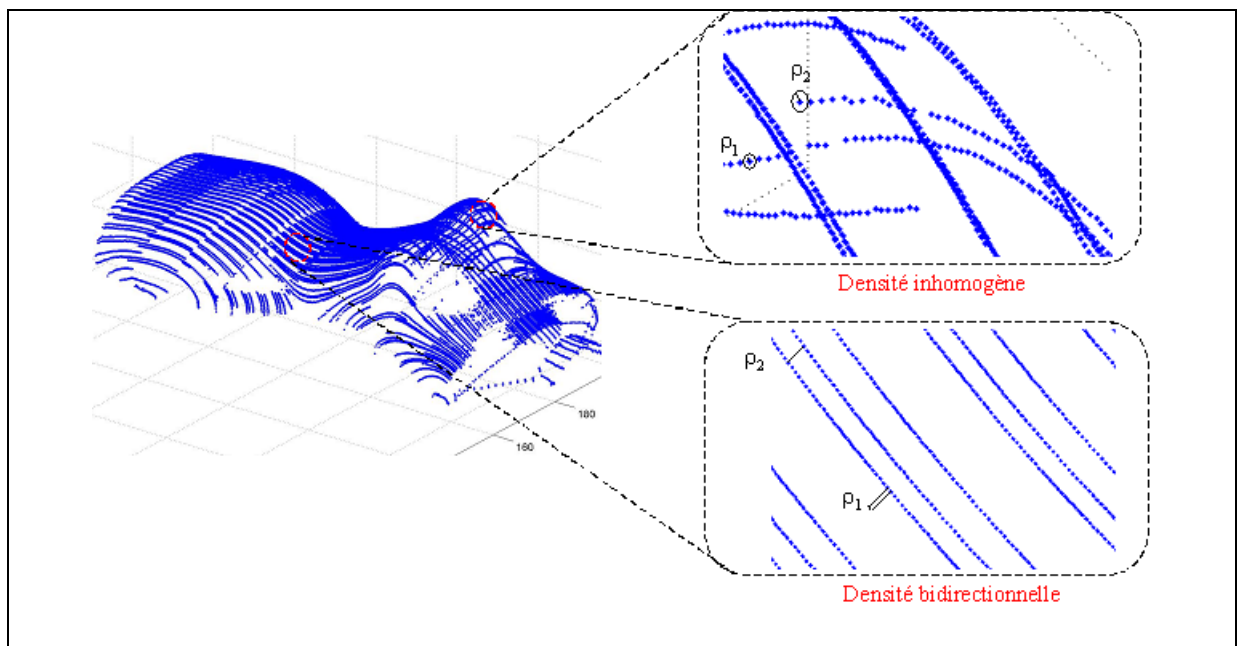


Figure 4 : Application de l'indicateur ρ -densité à une numérisation réelle

Le besoin auquel doit répondre la définition et le calcul de l'indicateur ρ -densité peut être formulé de la manière suivante :

Soit $X = \{(e_1, \dots, e_n) \mid e_k = (x_k, y_k, z_k)\}$ un ensemble de points constituant une partie ou

la totalité du nuage de points, ρ_k doit être l'indicateur relatif à la densité au point k qui apporte une information concrète sur la dispersion des points les plus proches de k .

L'indicateur ρ -densité au point k se calcule alors par [CON 02]:

$$\forall i \in [1, n], \forall k \neq i, \quad \rho_k = \min(dist_{ik})$$

$$\text{avec } dist_{ik} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2} \quad (Eq. 3.1)$$

L'indicateur ainsi défini, permet d'apporter une analyse du nuage de points en identifiant des zones de densité similaire, ou bien en définissant une valeur moyenne destinée à qualifier le nuage de points pour une utilisation donnée comme par exemple le cas d'un copiage rapide par usinage direct du nuage de points [BRE 06].

Bien que des facteurs du processus de numérisation tels que le pas de numérisation ou la vitesse de numérisation affectent directement la densité du nuage de points, de par la définition de l'indicateur ρ -densité, il n'est pas possible de conclure sur les performances de l'outil de numérisation à travers la valeur de la densité du nuage de points. Par contre, la connaissance des performances permettra d'agir de manière à contrôler la valeur de l'indicateur ρ -densité afin de garantir la conformité du nuage de points vis-à-vis d'une application donnée. On peut citer comme exemple le cas de l'utilisation du nuage de points pour un copiage de forme direct où une densité uniforme devient un facteur primordial.

2.3.2. Indicateurs intrinsèques : la complétude

Une représentation discrète de la surface d'un objet peut laisser apparaître des lacunes de numérisation, caractérisées par une absence d'information. Ces zones correspondent à des parties de la surface non numérisées ou bien à des trous réels sur la surface de l'objet (cf. § 3.1 chapitre 1).

La définition de la complétude d'un univers discret est paradoxale, puisque par nature un univers discret est constitué d'une infinité de discontinuités. La notion de complétude est ici liée à la notion de densité. En effet, Contri [CON 02] définit une "incomplétude" par un changement local brusque de densité dont on aura fixé le seuil. Afin de pouvoir quantifier cette variation, la complétude est définie par :

$$\kappa_{\%} = \left(1 - \frac{\sum Aires_{seuill\acute{e}es}}{\sum Aires_{num\acute{e}ris\acute{e}es}}\right) * 100 \quad (Eq. 3.2)$$

La grandeur κ traduit le taux de recouvrement de la surface num\acute{e}ris\acute{e}e par rapport \`a une densit\acute{e} donn\acute{e}e. La densit\acute{e} choisie est prise en compte dans l'\acute{e}quation 3.2 \`a travers la somme des *Aires seuill\acute{e}es* qui correspond \`a l'aire totale des zones dont l'aire est plus grande que la valeur seuil choisie.

La compl\acute{e}tude traduit une caract\acute{e}ristique intrins\`eque du nuage de points, et \`a ce titre cet indicateur n'identifie ni la nature ni les causes des lacunes de num\acute{e}risation. Par contre, la compl\acute{e}tude est une cons\acute{e}quence du choix de la strat\acute{e}gie de num\acute{e}risation. Au m\^eme titre que la densit\acute{e}, la compl\acute{e}tude est un indicateur essentiel, en particulier pour tout le travail d'analyse et de g\acute{e}n\acute{e}ration de trajectoire intelligente de num\acute{e}risation que nous d\acute{e}taillerons au chapitre suivant.

2.3.3. Indicateurs sp\`ecifiques : le bruit

La notion de bruit de mesure regroupe en g\acute{e}n\acute{e}ral un ensemble de nuisances et de parasites de sources diverses. Il est g\acute{e}n\acute{e}ralement admis d'envisager le bruit comme une erreur al\`eatoire et additive inh\`erente \`a la mesure physique. Hoppe [HOP 92] d\acute{e}crit le bruit sous la forme  $M_i = a_i + e_i$ , o\`u M_i est le point num\acute{e}ris\acute{e}, a_i est un point de l'objet consid\acute{e}r\acute{e} et e_i est un vecteur d'erreur dont la norme est \acute{e}gale \`a la distance euclidienne entre M_i et l'objet consid\acute{e}r\acute{e}. Le vecteur d'erreur ainsi d\acute{e}fini traduit l'alt\acute{e}ration subie par les donn\acute{e}es r\acute{e}sultantes de la num\acute{e}risation. Nous pouvons alors r\acute{e}aliser une analyse du nuage de points afin de mettre en \acute{e}vidence les caract\acute{e}ristiques de bruit d\`u au syst\`eme de num\acute{e}risation.

A partir de la d\acute{e}finition de Hoppe, l'indicateur δ -bruit a \acute{e}t\acute{e} propos\acute{e} comme quantificateur du bruit. L'indicateur est d\acute{e}fini par :

Soit $M = \{(M_1, ..., M_n) \mid M_k = (x_k, y_k, z_k)\}$ l'ensemble des points num\acute{e}ris\acute{e}s et E le mod\`ele th\`eorique correspondant \`a la surface nominale attendue. Soit d_i le vecteur d'\acute{e}cart entre M_i et l'\acute{e}l\acute{e}ment associ\acute{e} au sens des moindres carr\acute{e}s, la num\acute{e}risation sera dite δ -bruit\acute{e}e si $\forall i, |d_i| \leq \delta$.

La répartition des écarts obtenus obéissant à une loi gaussienne d'écart type σ , l'indicateur δ -bruit est calculé par [CON 02]:

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (Eq. 3.3)$$

avec $d_i = d(x_i, E)$ et $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$

où k est le facteur d'élargissement tel que $k \in \{1, 2, 3\}$. Nous nous appuyons sur ce mode de calcul de δ -bruit, en choisissant $k=1$.

De par sa définition l'indicateur δ -bruit peut être utilisé pour transcrire et évaluer les performances de l'outil de numérisation. Pour la phase d'évaluation du capteur, le choix d'élément géométrique connu s'impose. Ainsi, l'indicateur δ -bruit se révèle être facilement accessible puisque directement calculable après la numérisation de l'élément géométrique connu. De ce fait, nous nous sommes particulièrement intéressés à cet indicateur comme facteur d'évaluation direct de la performance du système de numérisation utilisé. Nous y reviendrons en détail dans le paragraphe 3.

2.3.4. Indicateurs spécifiques : l'exactitude

L'exactitude est liée à la sémantique de la métrologie et permet de rendre compte de la dispersion d'une mesure par rapport à un résultat attendu. Ainsi la norme NF X07-001 définit l'exactitude d'une mesure par :

" étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande "

A ce titre l'exactitude devient une caractéristique importante à associer au système de numérisation dès lors qu'on s'intéresse à l'aspect dimensionnel de l'objet numérisé. Les travaux menés précédemment au LURPA ont permis de définir un indicateur nommé τ -exactitude dont l'objet est de quantifier l'écart de position associé à un point numérisé [CON 02]. Il est défini par :

Soit $X = \{e_1, \dots, e_n\}$ un ensemble de points numérisés. Soit x le point réel de la surface visé et e_i le point numérisé, on évalue τ avec : $\|e_i x\| = \tau_i$.

Contri utilise dans ses travaux τ -exactitude afin de montrer l'influence de la position d'observation dans la matrice CCD sur la position des points dans l'espace 3D. La procédure d'évaluation de l'exactitude est alors complexe et spécifique au moyen de mesure utilisé. Elle nécessite en particulier la connaissance des données 2D (L,C) dans l'espace de la matrice CCD. Or ces informations ne sont pas accessibles à un utilisateur ordinaire. Dès lors, il nous faut définir une autre procédure d'obtention de l'exactitude en accord avec notre besoin.

Par ailleurs l'exactitude est un critère qui englobe dans le cas de ce type de capteur optique trois aspects : la justesse, la répétabilité (ou la fidélité de l'instrument de mesure) et le bruit. Dans ces conditions, si on définit un unique critère d'exactitude global le résultat obtenu sera difficilement interprétable et ne permettra pas de distinguer l'ensemble des caractéristiques de ce type de capteur. Afin de pallier à ce manque de détails, nous proposons de définir deux procédures bien distinctes permettant une mise en évidence de deux grandeurs composant l'exactitude : la justesse et la fidélité. L'objectif est la quantification de ces deux grandeurs au sens de la norme NF X07-001 :

La justesse : *" aptitude d'un instrument à donner des indications exemptes d'erreur systématique "*

La fidélité : *" aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure "*

2.3.5. Synthèse

Nous avons détaillé 4 indicateurs permettant de quantifier des caractéristiques du nuage de points. Nous avons vu en particulier les indicateurs dits intrinsèques qui se calculent indépendamment de l'outil de numérisation et ceux dont la définition est liée à l'outil de numérisation. L'avantage d'utiliser ces indicateurs est d'avoir à sa disposition les outils nécessaires pour réaliser une analyse locale ou globale de la qualité en fonction des besoins.

Les indicateurs ρ -densité et de κ -complétude permettent plus particulièrement de rendre compte de l'influence de la stratégie de numérisation sur le nuage de points. A ce titre ils représentent les outils d'analyse pour la génération de trajectoires de numérisation. Il devient ainsi possible de contrôler la numérisation et la qualité des données du nuage de points.

Les indicateurs spécifiques δ -bruit et τ -exactitude que nous avons décomposé en « justesse » et en « fidélité » sont par définition le lien entre la performance de l'outil de mesure et la qualité du résultat. Dans ces conditions il nous semble judicieux de baser l'évaluation de l'outil de mesure sur ces indicateurs.

Ainsi, le paragraphe suivant est consacré à la présentation du protocole d'évaluation des performances de l'outil de mesure utilisé au travers des indicateurs de qualité. L'ensemble de la méthode de génération de trajectoire intelligente introduite au chapitre suivant est articulé autour de cette analyse des performances du système de numérisation.

3. Evaluation du système

Le protocole d'évaluation de la performance d'un système de numérisation sans contact est constitué d'un ensemble de procédures simples et facilement accessibles à tout utilisateur, basées sur la mesure d'artefacts de type sphère ou plan. L'exploitation des résultats de mesure fait appel à des algorithmes d'association d'éléments géométriques idéaux aux nuages de points acquis selon le critère des moindres carrés. L'ensemble des calculs ont été développés sous Matlab puis reproduits à l'aide du tableur Excel ce qui rend leur utilisation très accessible.

Toute numérisation débute par le positionnement relatif du capteur par rapport à l'objet. La numérisation est alors obtenue par un balayage de l'ensemble des surfaces de la pièce étudiée réalisé par le déplacement du capteur par rapport à la surface. La numérisation complète est obtenue par la superposition des différentes vues numérisées. Or, comme de nombreuses études l'ont montré, le positionnement relatif capteur/objet est un des éléments majeurs influents sur la qualité des données acquises. Ainsi, tout protocole d'évaluation de performances doit s'appuyer sur une description du système de numérisation utilisé, définissant l'ensemble des paramètres géométriques liés à la situation relative capteur/objet. Il sera alors possible de choisir les plus pertinents pour mener l'évaluation du système par un déplacement contrôlé du capteur.

3.1. Description du système : les grandeurs significatives

Le capteur utilisé pour effectuer nos expérimentations est le modèle Zephyr de Kréon-technologie, composé d'une source laser plan et d'une unique caméra. Ce capteur est monté sur une tête de mesure orientable (suivant deux angles A et B) de type PH10 Renishaw

équipant une MMT DEA Brown&Sharpe.

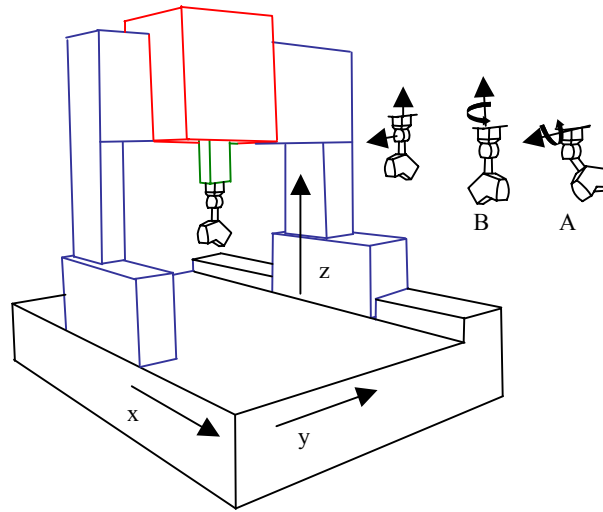


Figure 5 : Système de numérisation schématisé

Soit M un point appartenant à la courbe définie par l'intersection du plan laser et la surface de la pièce, les paramètres qui définissent la position relative du capteur par rapport à la pièce (figure 6) sont définis par :

- d , distance de numérisation,
- $\vec{n}$, normale à la surface numérisée au point M ,
- $\vec{n}_i$, vecteur unitaire dont la direction et le sens sont donnés par la projection de $\vec{n}$ dans le plan laser,
- α , angle de numérisation, c'est-à-dire l'angle entre la normale $\vec{n}$ et le plan laser,
- β , angle secondaire, c'est-à-dire l'angle entre le vecteur $\vec{n}_i$ et le rayon laser passant par le point M
- γ , angle de vue, c'est-à-dire l'angle entre la normale à la surface et l'axe optique

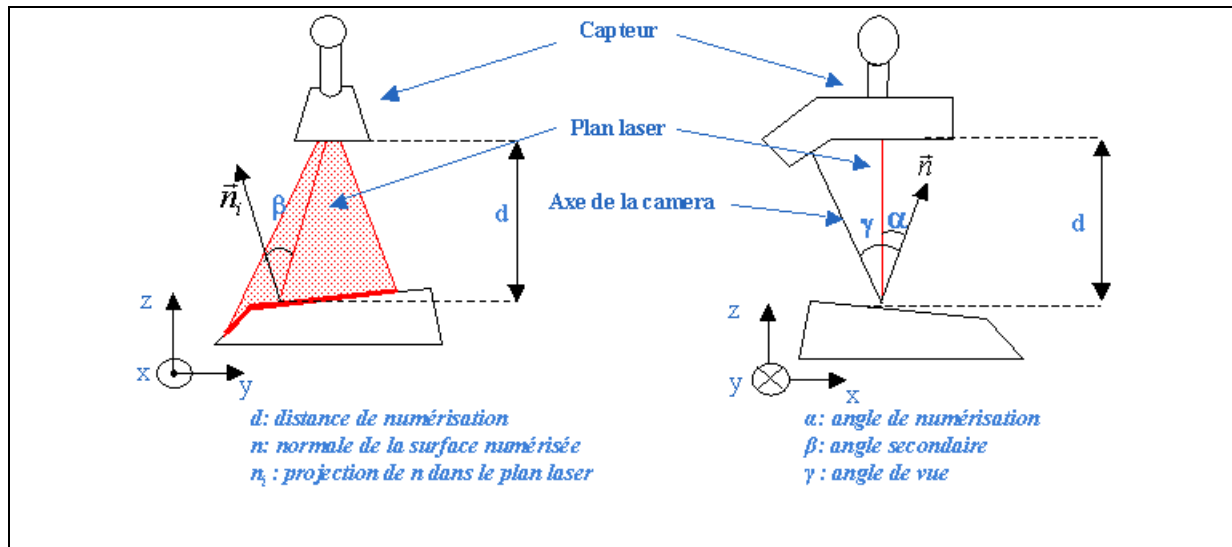


Figure 6 : Paramètres géométriques des positions capteur/pièce

Parmi les six paramètres relatifs à la mise en position trois d'entre eux peuvent être utilisés comme facteur d'asservissement de la position du capteur : la distance d , l'angle α et l'angle β . Nous avons donc à priori 3 facteurs à étudier.

Si nous affectons à d 10 paliers de mesures et 6 paliers respectivement à α et β (entre 0 et 90° avec un pas de 15°) nous sommes alors conduits à effectuer 10*6*6, soit 360 expériences ! Evidemment ce chiffre est irréalisable et il nous faut donc le réduire, pour cela un plan d'expérience peut être utilisé. La matrice d'expérience compte alors en entrée 7 facteurs : les trois facteurs d'asservissement plus leurs combinaisons. Mais il est encore possible de réduire le nombre d'expériences. En effet des études précédentes [SOU 05], [CON 02], [PRI 99] ont mis en avant l'influence prépondérante de la distance d et de l'angle de numérisation α sur la qualité du nuage de point. Quant à l'angle β , il semble que son influence soit réduite [PRI 99]. Une réflexion s'impose sur la conservation ou non de β dans la procédure d'évaluation. Pour y répondre nous avons mené en préambule une étude sur l'influence de l'angle secondaire sur le bruit de numérisation. Les résultats représentés sur la figure 7 montrent que la valeur de δ_{plan}^1 peut être considérée comme constante sur la majeure partie de l'intervalle de variation de β . Nous en concluons que le bruit varie peu avec l'angle β , sur l'intervalle [0°, 75°]. L'angle secondaire n'est donc pas utilisé dans cette étude comme facteur d'évaluation du capteur, et est donc retiré de la liste des facteurs d'asservissement du capteur.

¹ δ_{plan} est calculé à l'aide de l'équation 3 avec $k=1$: $\delta_{plan} = \sigma$

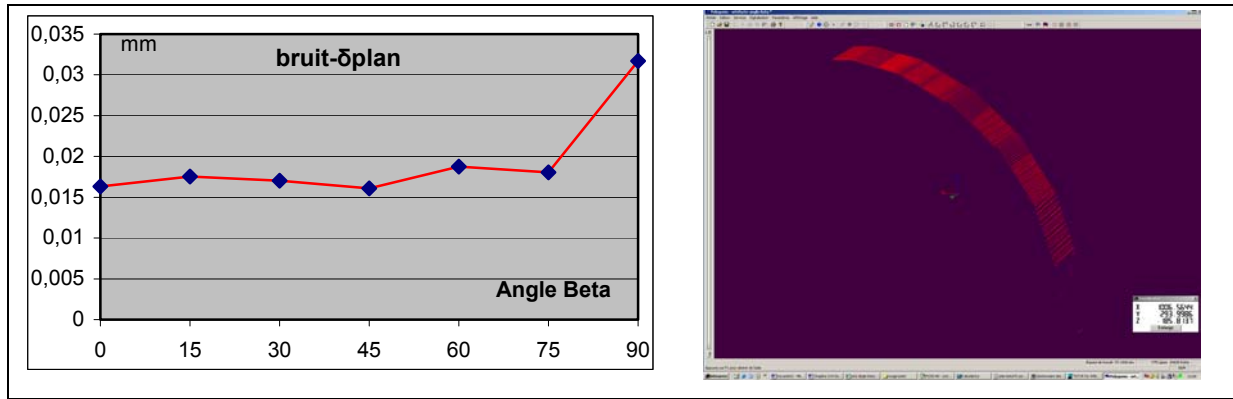


Figure 7 : Influence de β sur le bruit δ -plan

La procédure d'évaluation sera donc basée uniquement sur les facteurs d et α . La variation de distance de numérisation se traduit par un déplacement selon l'axe Z de la MMT ce qui correspond à un déplacement de la ligne de numérisation dans le plan laser. La variation de l'angle de numérisation est liée à la variation d'orientation du capteur, ce qui correspond à une modification des angles A et B.

3.2. Mise en condition et réglage du protocole d'évaluation

Option de réglage constructeur :

Lors des expérimentations l'ensemble des paramètres accessibles sera fixé ; seul le facteur à étudier devra varier. Il s'agit donc ici de fixer les valeurs des réglages autorisés par le capteur autres que les paramètres d'étude utilisés. Les réglages optiques : LUT, puissance laser et temps d'intégration, sont fixés aux valeurs conseillées par le constructeur. Dans le cas de notre étude ces paramètres prennent les valeurs :

- LUT : 15
- Puissance laser : 4 mV
- Temps d'intégration : 1/250

Pour être en accord avec les instructions constructeur de notre capteur, ces réglages doivent permettre d'atteindre une épaisseur de la trace comprise entre 7 et 9 μm .

La vitesse de numérisation, le pas de numérisation et la fréquence d'émission du laser doivent être choisis de manière à obtenir une densité cohérente dans le nuage de points. Compte tenu des algorithmes de calcul que nous utilisons (critère des moindres carrés), un grand nombre de points ne pénalisera pas énormément le temps de calcul. Cependant les

formes géométriques simples utilisées ne nécessitent pas un nuage de points trop dense. Ainsi, les nuages de points obtenus pour notre application contiennent entre 1000 et 4000 points. Le choix de ces paramètres est parfois facilité par les constructeurs qui proposent par exemple d'adapter automatiquement la fréquence d'émission du plan laser. Quelle que soit la vitesse utilisée, il est indispensable qu'elle soit constante tout au long d'un balayage. Il est ainsi possible de limiter les effets dus aux accélérations ou décélérations (le démarrage et l'arrêt) entraînées par des variations de la vitesse. Dans le cas de notre application, le potentiomètre est positionné sur 2 et le joystick du contrôle du déplacement emmené en butée pour chaque balayage. Quelles que soient les valeurs de ces paramètres elles doivent être conservées durant toute la procédure.

Fenêtre de mesure :

L'intervalle de variation du facteur de contrôle choisi doit être adapté à chaque capteur en fonction de la position de la zone visible sur son plan laser. Ainsi, par exemple la distance de numérisation devra varier de manière à rester à l'intérieur de la fenêtre de mesure.

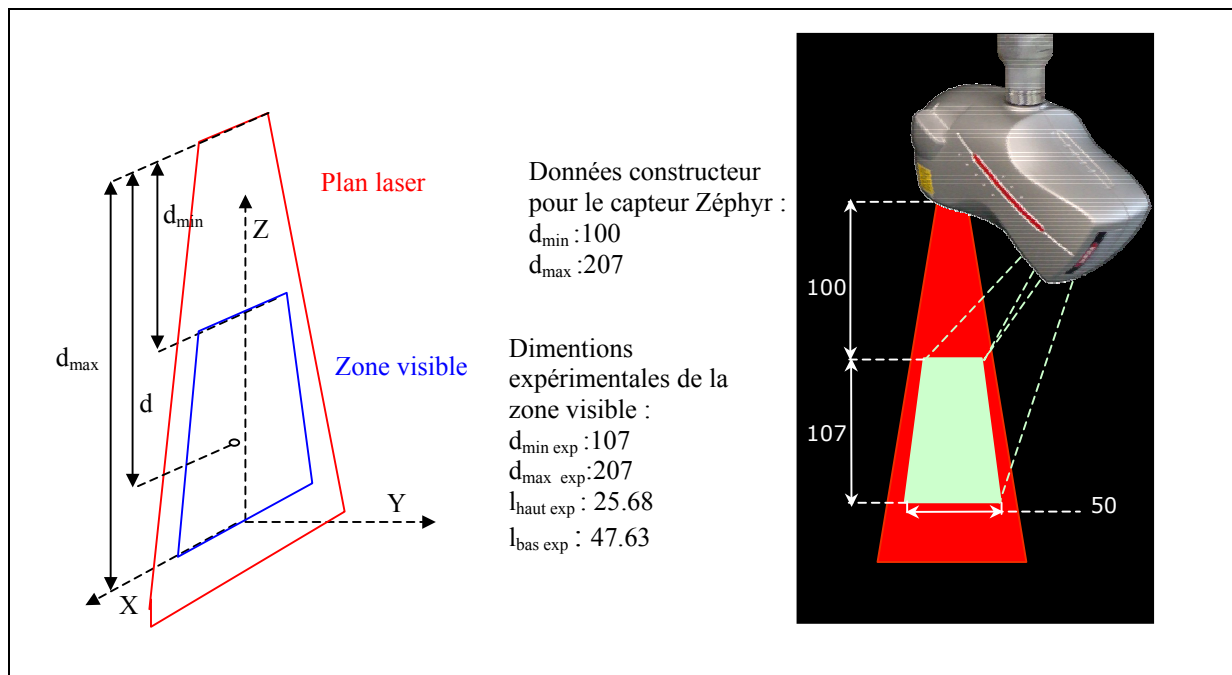


Figure 8 : Fenêtre de mesure et distance de réglage

3.3. Evaluation du bruit en fonction de l'angle de numérisation

Choix de la distance de numérisation :

Pour évaluer l'influence de l'angle de numérisation, le capteur doit être positionné à

une distance de numérisation constante quelle que soit l'orientation. La distance retenue est celle préconisée par le constructeur, ce qui correspond à une ligne de numérisation centrée dans l'espace de la caméra de la CCD ($d = 157\text{mm}$). Au cas où le constructeur ne préconise aucune distance de numérisation, compte tenu du caractère anisotrope des matrices CCD courantes, la distance choisie sera celle correspondant à un positionnement de la trace centrée dans l'espace de la caméra CCD (vérification visuelle).

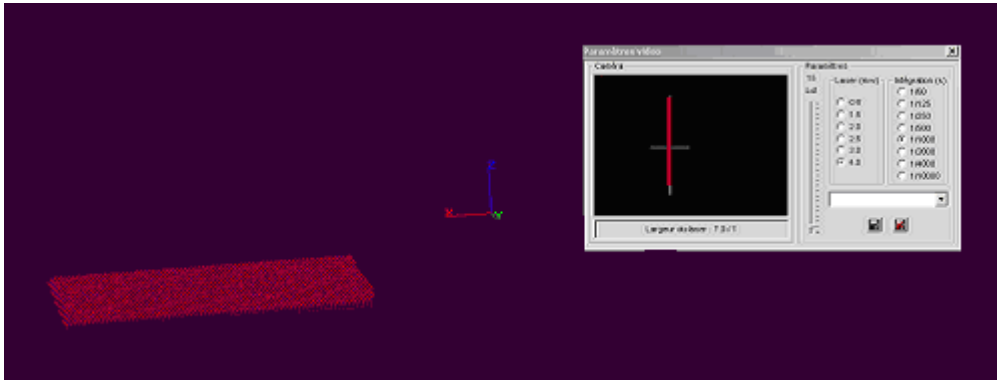


Figure 9 : Trace laser dans la matrice CCD et image correspondant dans le logiciel de numérisation Polygonia

Mode de variation de l'angle de numérisation :

D'une façon générale, la variation de l'angle de numérisation correspond à une modification de l'orientation du capteur. Cependant, il n'est pas conseillé de faire varier l'orientation du capteur puisque chaque nouvelle orientation du capteur entraîne une nouvelle procédure de positionnement (calibration externe). Dans ces conditions chaque nouvelle numérisation serait réalisée avec de nouveaux paramètres de calibration, ce qui est en contradiction avec l'obligation de n'avoir qu'un seul facteur de variation à la fois. Contri a proposé un artefact de mesure afin de maîtriser les variations de l'angle de numérisation α [CON 02].

L'artefact de mesure utilisé (figure 10) est composé de faces planes dont l'orientation de la normale varie de 0 à 90° avec un pas de 15° d'une face à l'autre [MEH 05].



Figure 10 : *Artefact de variation de l'angle de numérisation*

L'orientation du capteur dans l'espace de la MMT est fixée de manière à ce que le plan laser soit perpendiculaire au plan du marbre, ce qui se traduit par : $A = 0$; $B = 0$ (figure 5).

Nota Bene : l'artefact de mesure spécifique utilisé ici, peut aisément être remplacé par une cale étalon montée sur une règle sinus permettant de faire varier l'orientation de la face vis à vis du capteur.

Génération des données et traitement :

Chaque face est numérisée par l'intermédiaire de lignes obtenues par une translation du capteur par rapport à la surface selon une direction constante. Les lignes numérisées composant le plan sont idéalement des droites puisqu'elles correspondent à des courbes d'intersection entre la face plane et le plan laser (supposé plan)¹. Lors de la numérisation il y a une phase d'accélération au démarrage et une phase de décélération à la fin de la numérisation. Il en résulte une phase d'instabilité sur les données comme le montre la figure 11. Afin de soustraire notre évaluation de toute perturbation due à cette phase de stabilisation nous retirons 10% des lignes numérisées au début et à la fin de la surface avant tout calcul. La sélection des lignes à retirer peut être faite visuellement dans le logiciel de capture des données. Fort d'une étude sur la part moyenne du nuage de point subissant les perturbations (annexe II), on peut estimer à une dizaine de pourcents les lignes à retirer. De plus, nous avons relevé une déformation de la rectitude des lignes numérisées en leurs extrémités. Cette singularité apparaît sur les données (L,C) (non représentées pour des problèmes d'échelle) associées à la matrice CCD. On retrouve ces déformations sur les données 3D, ce qui confirme le caractère anisotrope des matrice CCD [CON 02]. Idéalement, une fenêtre de

¹ La planéité de la trace du plan laser mesurée reste inférieure à $1/10\mu\text{m}$; le plan laser est considéré sans épaisseur (voir § 3.4.2)

mesure peut être définie dans chaque nuage de points dont le contenu seul sera utilisé pour effectuer les calculs.

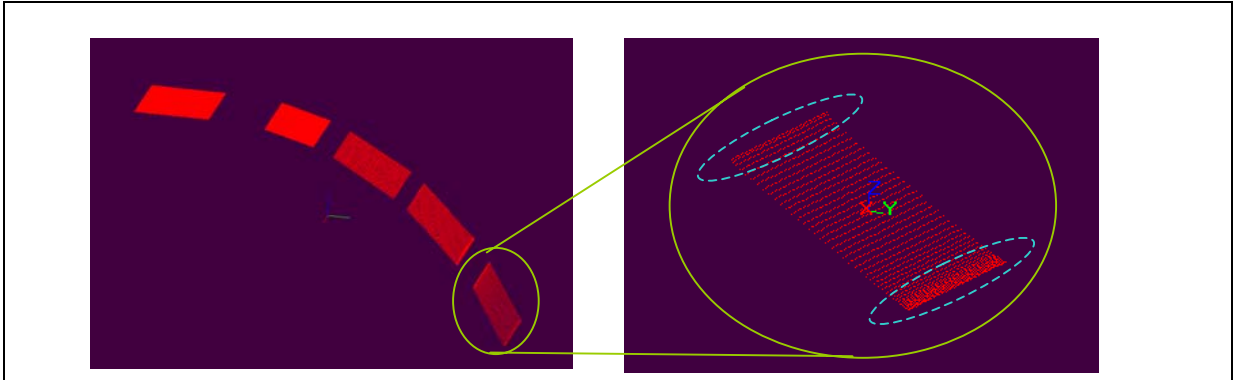


Figure 11 : Effet du démarrage et de l'arrêt capteur sur une passe de numérisation

Le bruit δ_{plan} est obtenu après calcul du plan associé à chaque face plane numérisée, selon le critère des moindres carrés. Le bruit δ_{plan} calculé correspond, conformément à la définition (Chap.3 - Eq. 3), à l'écart type $1x\sigma$ des écarts des points acquis au plan idéal associé. Par ailleurs, comme le montre la figure 12, la représentation des écarts aboutit bien à une répartition de type gaussienne.

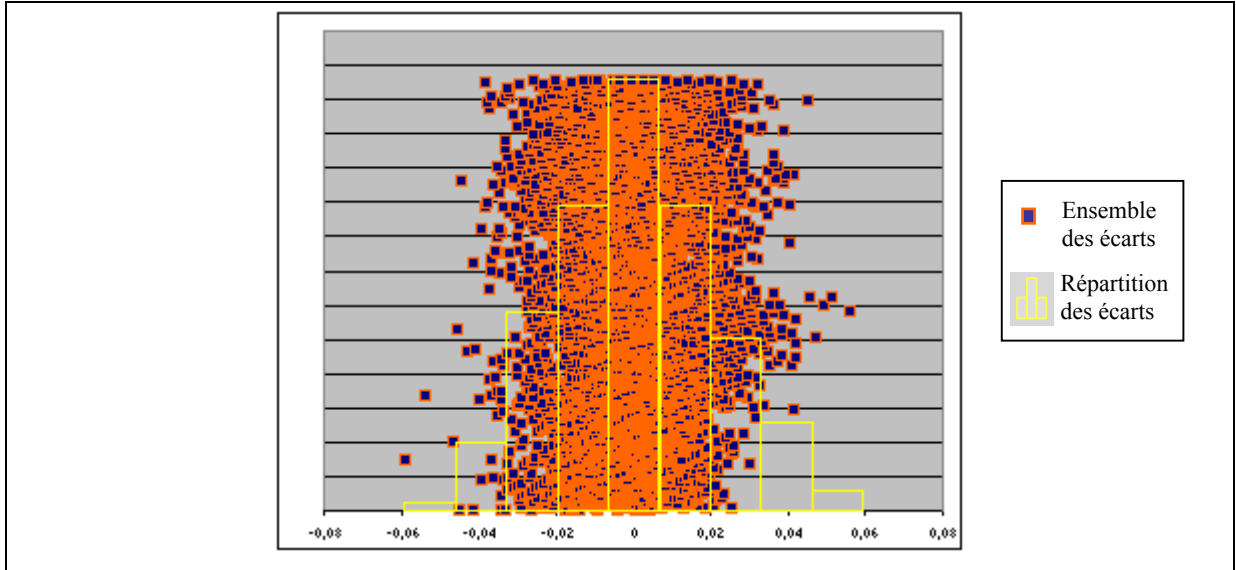


Figure 12 : Répartition gaussienne des écarts

Le bruit δ_{droite} est obtenu après calcul de la droite associée, selon le critère des moindres carrés, à chaque ligne numérisée. La valeur de δ_{droite} calculée correspond conformément à la définition à l'écart type σ des écarts des points acquis à la droite idéale associée. Pour chaque ligne de numérisation L_j , on calcule $(\delta_{droite})_j$, bruit associé à la ligne de numérisation projetée dans le plan laser. δ_{droite} correspond alors à la moyenne des bruits

$(\delta_{droite})_j$ composant une face plane numérisée.

Le calcul de δ_{droite} et δ_{plan} est répété pour chaque angle de numérisation étudié. En fonction de l'utilisation envisagée, il est possible de ne réaliser l'évaluation qu'à travers le calcul de l'un des deux indicateurs.

A la différence des travaux précédents [CON 02], le calcul est effectué à partir des coordonnées 3D obtenues lors de la numérisation de chacune des faces planes.

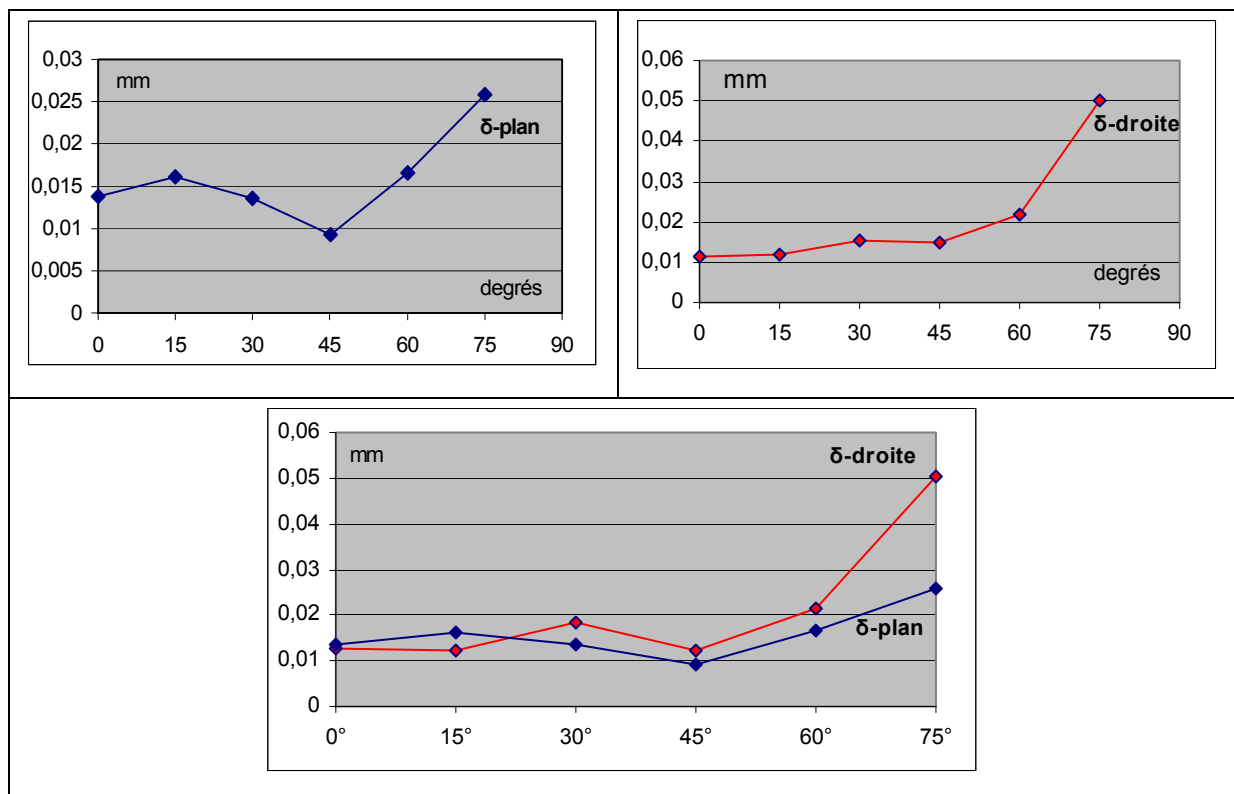


Figure 13 : Bruit de mesure en fonction de l'angle de numérisation α

Les valeurs obtenues dans le cas de l'application de la procédure d'évaluation à notre système de numérisation sont présentées sur la figure 13. Nous constatons une corrélation entre δ_{droite} et l'angle de numérisation, mais surtout la présence de deux zones de comportement du bruit dont la frontière se situe à 60° . Ce qui confirme des observations précédentes [CON 02][PRI 99].

La variation de δ_{plan} semble quant à elle moins dépendante de l'angle de numérisation, bien que l'on constate à nouveau l'existence de deux zones de comportement. Nous avons une zone admissible pour $\alpha < 60^\circ$ qui présente une valeur de bruit quasi constante proche de 0,015mm. Sur la deuxième partie de la courbe, correspondant à $\alpha > 60^\circ$, on constate un rapide

et importante détérioration du bruit en fonction de l'angle de numérisation. On notera un point de bruit minimum égal à 0.01 mm relevé pour un α à 45°.

Ces constatations sont globalement conformes à la littérature [PRI 99] [PAP 97]. Par ailleurs nous précisons que nous nous basons sur les travaux de Prieto qui conclut sur l'absence d'interférence entre les différents facteurs d'influence du bruit. Nous ne vérifierons donc pas cette indépendance et l'absence de corrélation.

Il est à noter que les meilleurs résultats obtenus pour le bruit δ_{plan} par rapport à δ_{droite} , nous permettent de conclure que ce type de capteur présente une meilleure aptitude à la numérisation surfacique (capteur en mouvement) que linéaire (capteur fixe) . Une information plus générale sur la numérisation statique et dynamique est disponible en annexe III.

3.4. Evaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation

3.4.1. Distance : conséquence sur le bruit

Choix de l'angle de numérisation :

Nous venons de constater qu'il existe un lien entre le bruit de mesure et l'angle de numérisation. Compte tenu du fait que ce paragraphe est consacré à l'influence de la distance de numérisation sur le bruit, il est donc nécessaire de fixer la valeur de l'angle de numérisation tout au long de l'expérimentation. Afin d'isoler au maximum les sources de variation du bruit, α doit être choisi de manière à minimiser son influence. Ainsi, l'angle de numérisation est fixé à 0°, ce qui se traduit par $A=0$; $B=0$.

Mode de variation de la distance de numérisation :

Pour l'orientation donnée, la variation de d est obtenue grâce à un déplacement uniquement le long de l'axe Z du capteur dans l'espace de la MMT. Ce déplacement a pour conséquence de déplacer la position de la ligne de numérisation dans la matrice CCD. A titre d'exemple la figure 14 montre la trace dans la matrice CCD reconstituée, de la ligne de numérisation pour trois valeurs de d (180 mm, trace de gauche ; 150 mm, trace au centre ; 120mm, trace de droite).

Génération des données et traitement :

Les plans numérisés sont acquis par l'intermédiaire de lignes numérisées, obtenues par une translation du capteur par rapport à la surface, selon une direction constante parallèle à Y. La surface à numériser est constituée d'une cale étalon¹ unique.

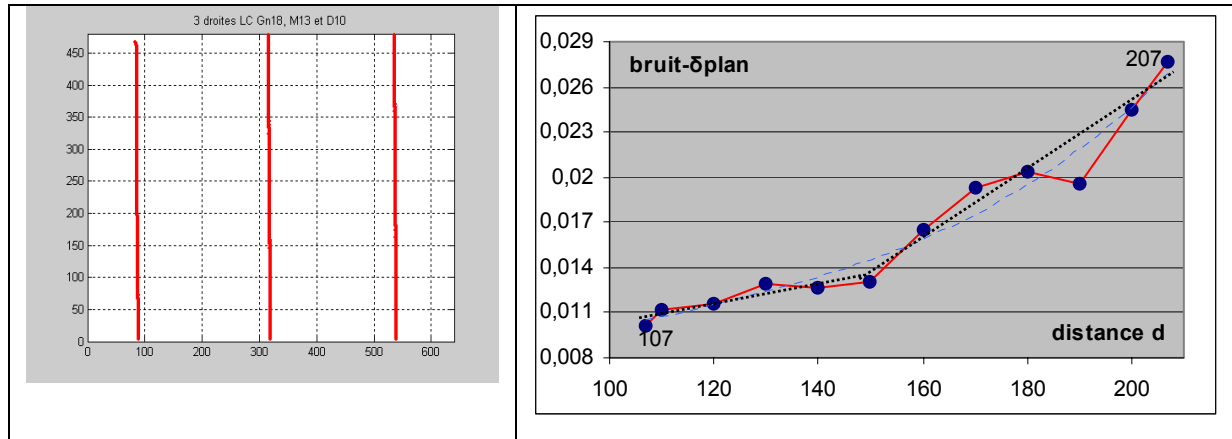


Figure 14 : Evolution de δ -bruit en fonction de la distance de numérisation

Un plan théorique est associé à chaque nuage de points généré selon le critère des moindres carrés. Le bruit δ_{plan} (représenté sur la figure 14) correspond alors, conformément à l'équation 3 de ce chapitre, à l'écart type $1x\sigma$ des écarts des points acquis au plan idéal associé. La représentation des résultats se traduit par une courbe croissante qui peut être approximée par une courbe polynomiale de degré 3 :

$$\delta(d) = 9.10^{-9}d^3 - 3.10^{-6}d^2 + 4.10^{-4}d - 0.0105 \quad (Eq. 3.4)$$

Mais une analyse plus détaillée, nous permet de distinguer deux zones. Pour une distance $d < 150$, la courbe peut être modélisée par une droite de faible pente (6.10^{-5}), ce qui signifie que le bruit varie peu en fonction de d sur cette zone. En revanche, pour $d > 150$ on constate une augmentation plus importante du bruit (pente de 2.10^{-4}) en fonction de la distance de numérisation :

$$\begin{aligned} \delta(d) &= 6.10^{-5}d - 0.0041 && \text{pour } d < 150 \\ \delta(d) &= 2.10^{-4}d - 0.0193 && \text{pour } d > 150 \end{aligned} \quad (Eq. 3.5)$$

Le bruit minimal est obtenu avec la distance de numérisation la plus faible permise

¹la cale est une cale de métrologie préalablement poudrée

par les caractéristiques du capteur (107 mm dans notre cas). Elle correspond à une trace située dans la partie la plus haute de la fenêtre de mesure du plan laser. Ce qui signifie que plus le capteur est proche de la surface à numériser moins le bruit sera important. Nous obtenons ici une conclusion qui est en contradiction avec ce qui est préconisé par le constructeur qui propose une distance de numérisation optimale correspondant à une trace au milieu de la CCD, c'est à dire $d=150\text{mm}$.

3.4.2. Distance et épaisseur de la trace

Dans les algorithmes de traitement utilisés dans les systèmes de numérisation le plan laser est considéré comme un plan parfait et sans épaisseur. Cependant, nous constatons que la variation de " d " entraîne une variation visuelle de l'épaisseur du plan laser émis par le capteur. Il nous a donc semblé intéressant de vérifier l'hypothèse de plan théorique. La figure 15 montre δ_{droite} calculé pour des droites projetées dans le plan (X,Y), perpendiculaires au plan laser.

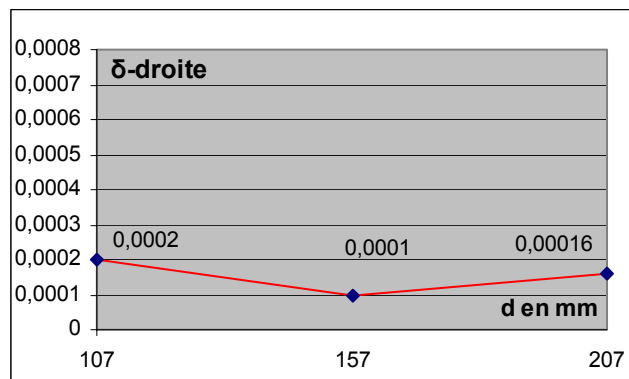


Figure 15 : Relation entre la distance de numérisation et le plan laser

Les résultats obtenus confirment l'hypothèse de fonctionnement des algorithmes utilisés puisque la valeur de δ_{droite} est de l'ordre du dixième de micron, valeur qui peut être négligée. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que la variation de " d " n'a pas d'influence sur la partie émettrice du capteur.

3.5. Evaluation de la justesse

L'objectif est ici d'évaluer le capteur vis à vis de la justesse telle que définie par la norme NF X07-001 (cf. § 2.3.4) : "*aptitude d'un instrument à donner des indications exemptes d'erreur systématique*". Dans ce sens nous définissons la procédure de manière à évaluer les performances du capteur vis à vis de la mesure d'une longueur connue en fonction

de la distance de numérisation.

Choix de l'angle de numérisation :

Conformément aux résultats issus de l'étape détaillée dans le paragraphe 3.3, α est choisi égal à 0° afin de réduire au minimum le bruit dû à l'angle de numérisation.

Mode de variation de la distance de numérisation :

La variation de d est obtenue grâce à un déplacement le long de l'axe Z du capteur dans l'espace de la MMT.

Génération des données et traitement :

La mesure s'effectue sur un artefact constitué par un empilement de deux cales étalons. Les surfaces planes des deux cales sont distantes d'une valeur h de référence et doivent être vues simultanément par la caméra CCD du capteur (figure 16). La première procédure consiste alors à mesurer la hauteur de marche ainsi définie [BOU 05].

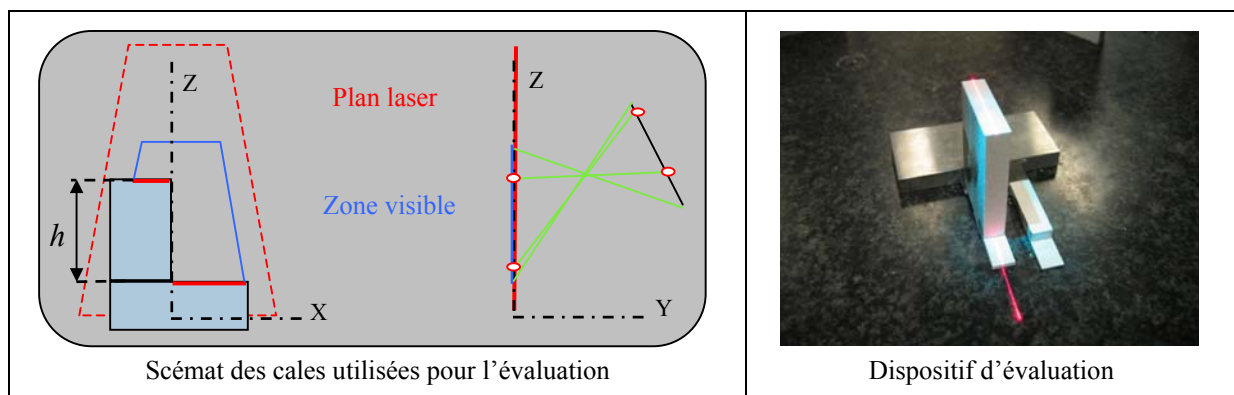


Figure 16 : Artefact de mesure de la justesse

Trois hauteurs de marche sont étudiées. Elles correspondent à des cales de 5, 50 et 100mm. La hauteur des cales utilisées est choisie de manière à pouvoir couvrir l'ensemble de la fenêtre de mesure. Elles correspondent à :

- la distance minimisant le bruit,
- la distance correspondant à une trace située au milieu de la matrice CCD,
- la distance maximale de numérisation.

Dans le cas de notre capteur les distances de numérisation sont donc 112, 157 et

207mm par rapport à la surface basse des cales. Un nuage de points est généré pour chaque hauteur de marche et chaque distance. La justesse est calculée à partir d'éléments idéaux associés aux nuages de points ce qui permet de limiter l'influence du bruit. Un plan des moindres carrés est associé à chacun des nuages de points acquis. On calcule alors la distance h_m entre le barycentre du nuage de points le plus bas et le plan des moindres carrés associé au nuage de points le plus haut. La justesse est alors définie par :

$$J = h - h_m \quad (Eq. 3.6)$$

Les résultats, présentés dans le tableau 1 montrent une justesse de l'ordre de quelques microns pour la mesure d'une distance de 5mm entre deux plans nominalemt parallèles et matérialisés par la cale de 5. Cette justesse se détériore légèrement avec l'augmentation de la distance de numérisation. On constate en revanche que la justesse évolue plus défavorablement en fonction de la hauteur de marche et de la distance de numérisation pour les cales de 50 et de 100.

		Dimensions mesurées				
Cale		5 mm		50 mm		100 mm
d de S sup	107					
d de S inf	112	5,0038				
d de S sup	152		107			
d de S inf	157	5,0063	157	49,9232		
d de S sup	202		157		107	
d de S inf	207	5,0074	207	49,9025	207	99,9479

Tableau 1: Evaluation de la hauteur de marche en mm

Nous pouvons faire ici un parallèle avec la figure 14 dont l'analyse peut nous apporter des informations sur l'ordre de grandeur et la tendance de la variation de la justesse attendue. En effet, on peut s'attendre à ce que la valeur de la justesse évaluée par mesure d'une distance entre deux plans parallèles corresponde à la somme des bruits associés à la mesure de chaque plan en fonction de sa distance de numérisation.

Considérons la cale de 5 mm, pour laquelle on peut considérer que la distance de numérisation pour chaque surface est identique. Dans ce cas, d'après la courbe de la figure 14, la justesse associée à la hauteur de marche de 5mm devrait se détériorer en fonction de d . Ce qui est en partie vérifié par les valeurs évaluées dans le tableau 1. Si nous regardons les autres hauteurs de marche, on constate que la mesure de la hauteur de 100mm est plus « juste » que

celle de 50mm mesurée à $d=207\text{mm}$. Ce résultat peut paraître surprenant. Cependant, la cale de 50mm voit sa surface supérieure numérisée à $d=157\text{mm}$, alors que celle de la cale de 100mm est numérisée à $d=107\text{ mm}$. D'après la courbe de la figure 14 le bruit attendu doit être plus important pour la surface supérieure de la cale de 50 que celle de 100. Fort de cette analyse et compte tenu du fait que la surface basse est numérisée à la même distance pour les deux cales, il est alors cohérent d'avoir une meilleure justesse pour la mesure de la cale de 100. Cette analyse croisée de la courbe de la figure 14 et des résultats du tableau 1 nous permet de conclure sur la cohérence de la procédure présentée dans ce paragraphe vis à vis de l'évaluation de la justesse du capteur.

Cette procédure est un moyen d'évaluer de la justesse du capteur. Mais elle reste difficile à mettre en place (collage des deux cales, uniformité du matifiant sur les deux surfaces...) et a surtout le désavantage d'être basée sur la numérisation de deux surfaces différentes. Dans l'optique de l'utilisation des résultats issus de l'évaluation pour la génération de trajectoires intelligente, nous proposons une deuxième procédure plus simple et plus fiable. Cette procédure alternative est basée sur la numérisation d'une surface unique (cale étalon) à des altitudes différentes. Idéalement l'ensemble des points numérisés appartient à la même surface. Il n'existe plus ici de grandeur connue faisant office de référence. Nous sommes dès lors plus proche des conditions d'utilisation standard du capteur où les objets à numériser sont en général inconnus. La première numérisation est réalisée avec une distance de numérisation optimale égale à d_{min} . Un plan des moindres carrés lui est alors associé qui définit le plan de référence. La justesse est alors définie comme la distance entre le barycentre de chaque plan et le plan de référence. Nous mesurons ainsi une distance relative, ce qui a pour conséquence de rendre beaucoup moins influent tous défauts de la surface.

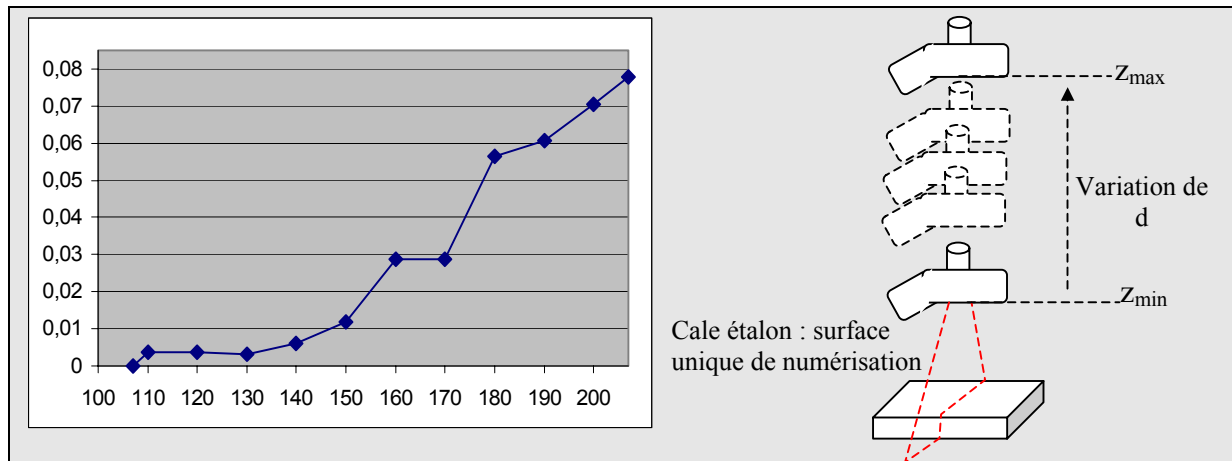


Figure 17 : Evaluation de la justesse relative en fonction de d

Les résultats obtenus pour notre capteur se traduisent par une courbe (figure 17) croissante laissant apparaître deux zones bien distinctes. Sur la première partie de la courbe, pour $d < 150$, la justesse reste quasi constante. La deuxième partie de la courbe correspondant à $d > 150$ présente une forte détérioration de la justesse en fonction de la distance de numérisation. Ainsi l'écart mesuré à 207mm est de -0.078mm est comparable à celui obtenu précédemment pour une hauteur de marche 100mm (tableau 1). Nous retrouvons globalement les résultats de justesse obtenus lors de la mesure des différentes hauteurs de marche, mais la procédure reste ici plus simple et moins sujet à des perturbations. De plus cette deuxième procédure permet d'évaluer la variation de justesse suivant l'axe Z (ou justesse relative) sur toute la hauteur de la fenêtre de mesure.

Il nous est ainsi possible de conclure sur l'identification de l'intervalle de la fenêtre le plus optimal au regard de la justesse. Nous pouvons donc dire que dans le cas de notre capteur l'intervalle d'utilisation optimale est compris entre $d=107\text{mm}$ et $d=150\text{mm}$. Le respect de cet intervalle pourra avoir un caractère prioritaire dans la détermination de la trajectoire de numérisation en fonction de l'application envisagée.

Notons ici qu'il est possible d'utiliser la courbe de la figure 17 à d'autres fins. En effet les informations contenues dans cette courbe permettent d'envisager une correction sur les mesures effectuées. Il peut donc jouer le rôle d'un abaque de correction des mesures à condition que les valeurs de la courbe soit validées vis-à-vis de d'autre condition de mesure.

3.6. Evaluation de la fidélité

L'objectif est ici d'évaluer le capteur vis à vis de la fidélité telle que définie par la

norme NF X07-001. Dans ce sens nous définissons la procédure de manière à évaluer les performances du capteur vis à vis de la numérisation répétée d'une surface en fonction de la distance de numérisation.

Choix de l'angle de numérisation :

Conformément aux résultats précédents, α est choisi égal à 0° afin de réduire au maximum le bruit dû à l'angle de numérisation.

Mode de variation de la distance de numérisation :

La variation de d est obtenue par un déplacement le long de l'axe Z du capteur dans l'espace de la MMT. Nous utilisons ici trois distances de numérisation, les mêmes que celles utilisées pour l'évaluation de la justesse (107, 157, 207).

Génération des données et traitement :

Pour chaque distance de numérisation une cale étalon est numérisée plusieurs fois. Les dimensions doivent être choisies telles que toute la trace laser soit contenue sur la surface de la cale. Cette précaution a pour objet d'éviter les perturbations dues à un effet de bord. La numérisation est réalisée sans déplacement du capteur, on obtient ainsi une ligne image. Une droite j des moindres carrés est associée à chaque ligne. La fidélité est calculée à partir des éléments idéaux, ce qui permet d'éliminer l'influence du bruit. Nous projetons les points extrêmes de chaque ligne numérisée sur la droite j associée, la distance l_j entre ces deux points est calculée. Nous définissons alors la fidélité f_d pour une distance de numérisation donnée par l'équation :

$$f_d = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (l_j - \bar{l}_d)^2} \quad (Eq. 3.7)$$

avec $l_j = d(\text{extremum})$ et $\bar{l}_d = \frac{1}{n} \sum_1^n l_j$

Les résultats présentés dans le tableau 2 nous permettent de conclure que notre capteur présente une très bonne fidélité puisque les valeurs obtenues sont de l'ordre de 10^{-5} mm. Compte tenu de la faiblesse des valeurs, on peut même conclure à l'indépendance de la valeur de la fidélité vis à vis de la distance de numérisation.

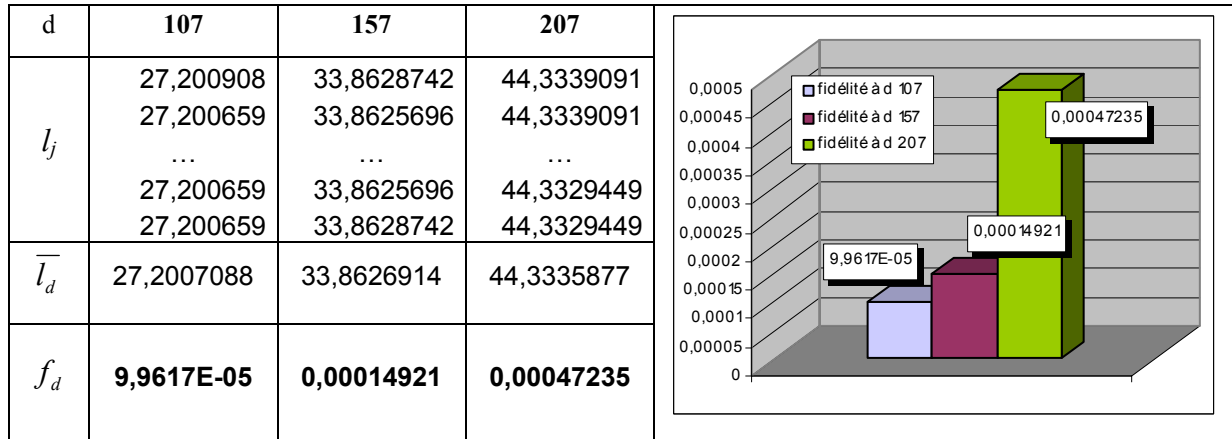


Tableau 2 : *Evaluation de la fidélité en fonction de la distance de numérisation*

Il est à noter que la variation de la distance de numérisation entraîne une variation de la longueur de la trace laser sur la surface de numérisation. Par conséquent, les distances $\overline{l_d}$ calculées seront très différentes. Cette différence attendue, n'a aucune influence sur les résultats de cette évaluation. La fidélité est définie à partir de l'écart type et les conclusions ne reposent donc pas sur les longueurs mesurées.

3.7. Evaluation de la procédure de calibration.

La procédure de la calibration externe (ou positionnement) passe par la numérisation d'un artefact de mesure, généralement sphérique. Cette procédure qui doit être répétée pour chaque nouvelle orientation permet de déterminer l'orientation du capteur par rapport au repère associé à la MMT et de définir l'origine du repère capteur dans le quel les points numérisés seront exprimés. L'origine du repère de mesure est défini par le centre calculé de l'artefact numérisé. Le positionnement permet ainsi de définir la matrice de passage du repère capteur à celui de la MMT, à ce titre il a une influence directe sur la qualité des données qui seront numérisées. Il est donc primordial de prévoir une procédure simple d'évaluation afin d'apporter un regard critique sur la validité de la matrice de transformation utilisée dans le traitement des données. Cette évaluation est d'autant plus importante que l'ensemble des procédures énumérées dans les paragraphes précédentes sont tributaires de la matrice de passage issue du positionnement.

Une erreur dans le calcul de la position relative des points par rapport au centre de la sphère se traduit par une translation du nuage de points. Ce type d'erreur crée un décalage

entre les nuages de points obtenus avec différentes orientations. Si une erreur accompagne le calcul de l'orientation du capteur, alors la projection dans le repère de la MMT des points acquis dans le plan laser sera également entachée d'erreur. La procédure d'évaluation consiste à numériser une sphère étalon (de diamètre 24.982 dans notre cas) ayant une position fixe dans l'espace de travail plusieurs fois. Chaque nouvelle numérisation est réalisée avec la même orientation capteur mais à des distances différentes. Ce qui permet de changer la position relative du centre de la sphère dans le plan laser.

Choix de l'angle de numérisation :

Conformément aux résultats des paragraphes précédents, α est choisi égal à 0° afin de réduire au maximum le bruit dû à l'angle de numérisation.

Mode de variation de la distance de numérisation :

La variation de d est obtenue par un déplacement le long de l'axe Z du capteur dans l'espace de la MMT. Trois distances de numérisation doivent être utilisées. Ils doivent permettre de numériser la sphère étalon dans la partie basse, milieu et haut de la fenêtre de mesure du plan laser (zone bleue de la figure 18a). Le réglage des distances de numérisation se fait en positionnant le plan laser dans le plan médian de la sphère (figure 18a). Dans notre cas les distances de numérisation correspondent à 107, 150 et 195 mm

Génération des données et traitement :

Une numérisation est réalisée pour chaque position du capteur. Une sphère théorique de rayon imposé (correspondant au rayon de la sphère étalon qui doit être connu) est associée à chaque nuage de points suivant le critère des moindres carrés. La sphère étalon mesurée a une position fixe durant toute la procédure, par conséquent l'ensemble des points acquis durant les différentes numérisations devraient idéalement appartenir à la même sphère. Dans ce sens il nous faut donc calculer le centre de chaque sphère numérisée. L'analyse des dispersions éventuelles nous permettra de conclure sur la validité du positionnement réalisé.

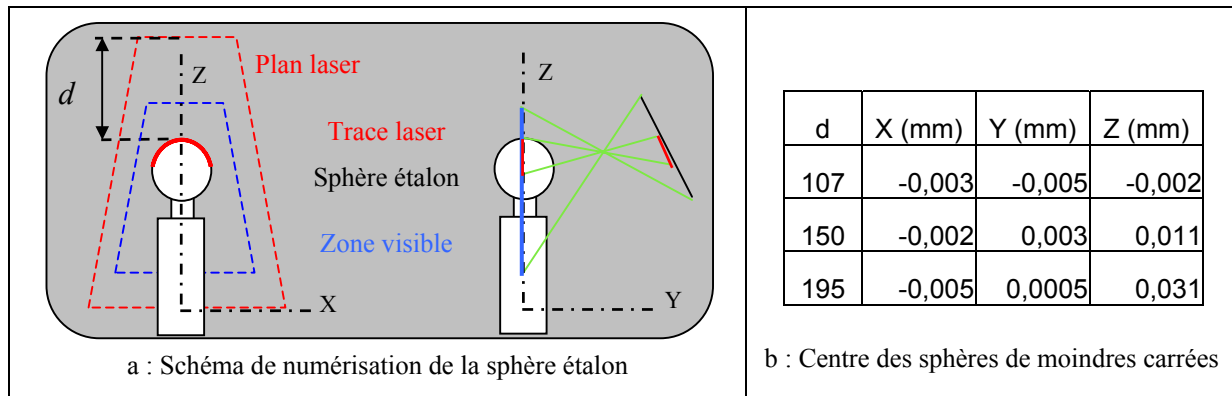


Figure 18 : Evaluation de la procédure de positionnement

Les résultats obtenus (figure 18b) montrent que les valeurs de X et Y varient très peu, ce qui signifie que la projection des centres dans le plan XY ne présente quasiment aucune dispersion. En ce qui concerne la projection suivant Z , on constate une variation croissante en fonction de la distance de numérisation, ce qui est conforme au résultat de justesse obtenu au paragraphe 3.5.

La mise en place de cette procédure en préambule à l'ensemble des procédures d'évaluation du capteur, permet de valider le calcul de l'orientation du capteur dans l'espace de la MMT¹. On peut ainsi exclure toute erreur de projection due à un mauvais calcul de l'orientation dont les conséquences seraient imputées à la justesse du système.

3.8. Synthèse du protocole

Le protocole proposé permet d'aboutir à une évaluation du système de mesure. Il permet en particulier de quantifier la conséquence de la variation de certains paramètres de réglage qui interviennent dans la mesure. On aboutit ainsi à une évaluation des capacités du système. Le protocole proposé se compose des étapes suivantes :

- La modélisation du système : il s'agit en particulier de formaliser les paramètres liés au fonctionnement du système.
- Le réglage du système : il s'agit de fixer les paramètres de contrôle électronique proposés par le constructeur en particulier au niveau du laser et de la caméra (LUT, fréquence d'acquisition, temps d'intégration).
- Identification et évaluation du bruit en fonction des paramètres retenus après la modélisation du système : il s'agit en particulier d'évaluer le bruit vis-à-vis de

¹ On peut aussi visualiser les défauts de positionnement par la mesure d'une même sphère avec 3 (ou n) orientations capteur. Il s'agit alors de valider « l'homogénéité » du nuage de points recalé [MAK 06].

l'angle de numérisation et de la distance de numérisation (α , β , et d).

- Evaluation de la justesse : deux méthodes sont développées afin de prendre en compte les difficultés de fonctionnement du système
- Evaluation de la fidélité
- Evaluation de la procédure de la calibration externe.

L'exécution du protocole proposé permet d'aboutir à l'identification des domaines de fonctionnement admissibles du capteur. Nous obtenons ainsi des domaines admissibles pour les grandeurs évaluées et il est alors possible d'utiliser le capteur en fonction de la qualité recherchée. Ainsi s'il existe une exigence sur une valeur seuil du bruit de mesure à ne pas dépasser, par exemple 0,02mm le domaine des grandeurs utilisables est alors dépendant de cette valeur :

- $\delta\text{-bruit} \leq 0.02\text{mm}$ impose $d \leq 170\text{mm}$
- $\delta\text{-bruit} \leq 0.02\text{mm}$ impose $\alpha \leq 60^\circ$

Ce protocole n'est pas une méthode de connaissance absolue du système mais il permet de connaître sa capacité vis-à-vis des grandeurs choisies. Il pourrait être complété par une étude croisée de l'influence des paramètres α , β et d au travers d'un plan d'expérience par exemple.

4. Application : intégration de l'évaluation du système de numérisation

Les procédures d'évaluation présentées dans ce chapitre peuvent être utilisées afin de connaître les capacités du système à numériser selon une qualité donnée. Il est ainsi possible de comparer différents systèmes ou bien d'effectuer un suivi périodique. L'évaluation permet également une analyse plus détaillée des résultats issus de la numérisation. Cependant, c'est une évaluation passive car il n'y a pas d'interaction entre numérisation et connaissance du capteur : on numérise et ensuite on analyse. Afin de répondre à la problématique traitée dans cette thèse nous proposons d'intégrer l'évaluation du système dans la démarche de numérisation intelligente.

Le principe de la numérisation intelligente proposée au chapitre suivant est une démarche d'analyse en boucle qui repose sur l'analyse qualité d'un premier nuage de points

utilisé comme le point de départ de l'algorithme. Rappelons que nous nous intéressons à la numérisation automatique d'objets dont le modèle CAO n'est pas connu. Lorsque le modèle CAO est connu, la connaissance du modèle couplée à l'analyse des capacités du système permet de définir à priori une stratégie de numérisation intelligente pouvant conduire à un nuage de points de qualité donnée [PRI 99]. Ainsi, nous devons nous appuyer sur une première numérisation pour conduire notre démarche. Le nuage de points issu de la première numérisation, réalisée de manière arbitraire, joue le rôle du modèle à partir duquel il est possible de calculer les situations relatives capteur/surface et la trajectoire de numérisation pour garantir une qualité donnée. La démarche proposée, illustrée sur la figure 19 est largement détaillée dans le chapitre 4.

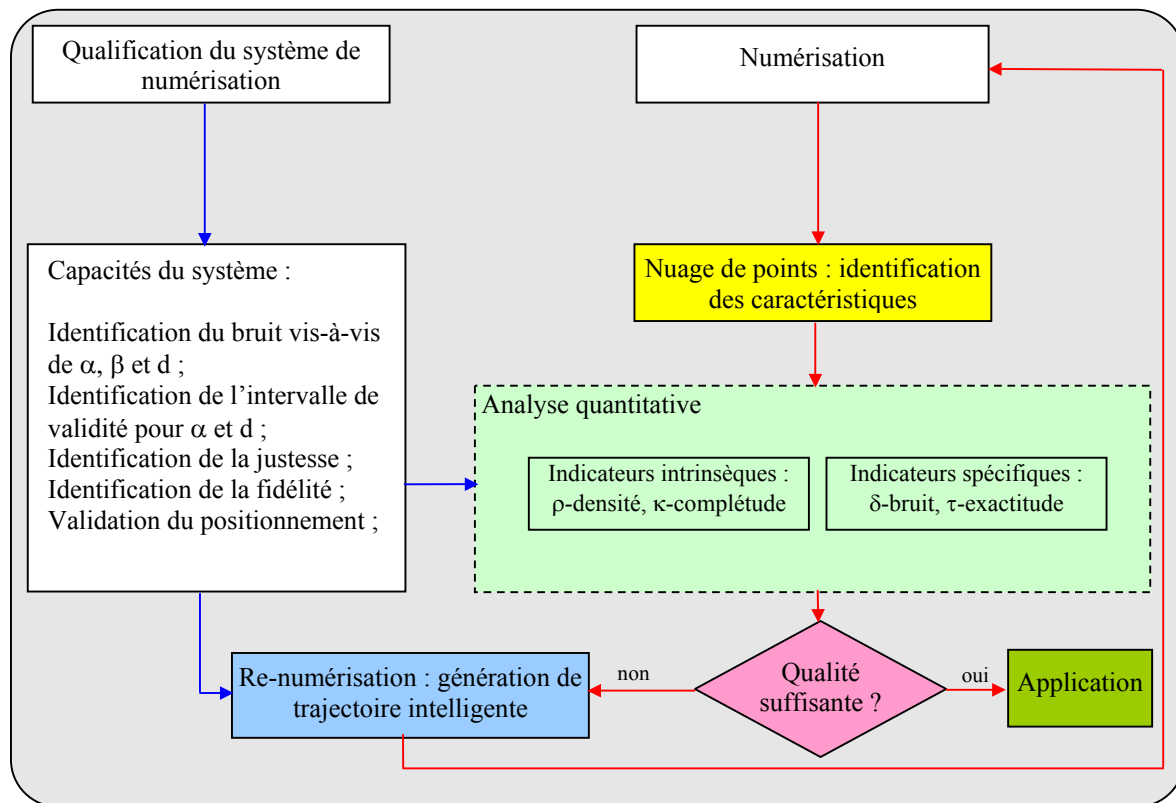


Figure 19 : *Intégration de la qualification du système de numérisation dans une démarche de numérisation intelligente*

La qualification du système de numérisation en amont de la numérisation permet d'une part de définir l'espace des possibilités pour les trajectoires de numérisation en fonction des capacités du système et d'autre part d'accroître la qualité du nuage qui en résultera.

5. Conclusion

Nous avons présenté au cours de ce chapitre un travail d'analyse du besoin d'outils et de procédures de qualification du système de numérisation. Dans ce sens nous avons repris les outils de qualification de type indicateurs intrinsèques et indicateurs spécifiques introduits par Contri [CON 02]. Nous avons discuté de leurs pertinences et de leurs domaines de validité vis-à-vis de l'évaluation du système à mettre en place. Ce premier travail nous a permis de cibler le besoin et de définir les outils à notre disposition.

Dans un deuxième temps, un protocole d'évaluation des capacités d'un système de numérisation au travers d'un ensemble de procédures. Ces procédures sont basées sur la mesure d'artefacts de type plan ou sphère et rendent compte de l'influence de la variation des paramètres les plus significatifs de la numérisation. Ainsi, nous avons introduit des procédures permettant d'évaluer l'influence de l'angle et de la distance de numérisation sur le bruit de mesure. D'autres procédures permettent l'évaluation de la justesse et de la justesse relative du capteur. Les hypothèses telle que l'épaisseur nulle de la trace laser ont été vérifiées. Compte tenu du rôle essentiel de la procédure de positionnement et de l'utilisation systématique des résultats qui en découle, nous avons présenté une procédure de validation du positionnement.

L'ensemble du travail présenté dans ce chapitre peut trouver son application auprès des usagers des systèmes de numérisations indépendamment du reste du contenu de ce mémoire. Il est ainsi possible d'utiliser les procédures de qualification présentées ici afin de valider les capacités d'un système vis-à-vis d'une application (inspection rapide, copiage de forme, RE), d'effectuer un suivi des dérives éventuelles des capacités du système dans le temps, d'effectuer une étude comparative... Dans le cadre de la problématique globale à laquelle nous essayons d'apporter une réponse, les résultats issus de ce chapitre sont intégrés à la démarche de numérisation intelligente de pièces inconnues. Les relations reliant les grandeurs significatives aux facteurs tels que le bruit seront ainsi utilisées pour mener une analyse des nuages de points générés. La phase de re-numérisation s'appuiera sur les intervalles de validité des différentes grandeurs étudiées permettant d'obtenir des nuages de points présentant une qualité donnée.

Le chapitre quatre s'attache à détailler les différentes étapes de cette application des résultats de la qualification des systèmes de numérisation à base de capteur-laser.

Chapitre 4

Stratégie de numérisation intelligente

1. Démarche globale

1.1. Introduction : besoin et axes de réponse

Réaliser une numérisation peut paraître très simple : il suffit de déplacer le capteur autour de la pièce et l'on finit par obtenir un nuage de points ressemblant à l'objet qu'on a sous les yeux. Dans les faits cela est bien plus complexe. Pour illustrer cet état de fait nous avons réalisé la numérisation par tâtonnement d'un objet qui a priori ne présente pas de difficultés particulières. Il s'agit du modèle réduit d'une voiture qui bien qu'ayant des surfaces complexes présente un aspect général assez parallélépipédique (figure 1). On peut penser qu'il suffit de quatre orientations différentes pour obtenir le nuage de points complet. Or, il nous a fallu réaliser plus de dix différentes numérisations pour aboutir à une numérisation que nous estimons complète.

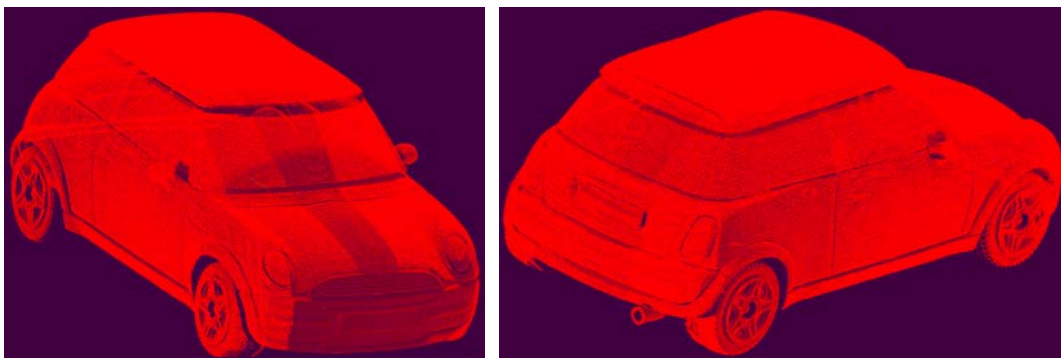


Figure 1 : Voiture miniature : la Mini

Les zones les plus problématiques sont situées au niveau des rétroviseurs et du pare-choc arrière. La numérisation complète a nécessité près d'une journée sans compter le temps alloué à la procédure de calibration externe de chaque nouvelle orientation capteur. La numérisation par tâtonnement peut aboutir pour des cas simples mais sa réalisation est difficile, longue et sans démarche structurée. Le traitement d'objets plus complexes est quant à lui plus problématique.

Nous avons réalisé la même démarche de numérisation par tâtonnement sur une statue en bois représentant un homme assis. L'artisan a reproduit de nombreux effets de texture (peaux, barbe, vêtement...) sur la surface de l'objet qui de plus présente de nombreuses zones cachées, des contres dépouilles, des trous... (figure 2). Malgré un nombre important d'orientations du capteur il ne nous a pas été possible d'aboutir à un nuage de points complet dans un délai raisonnable.

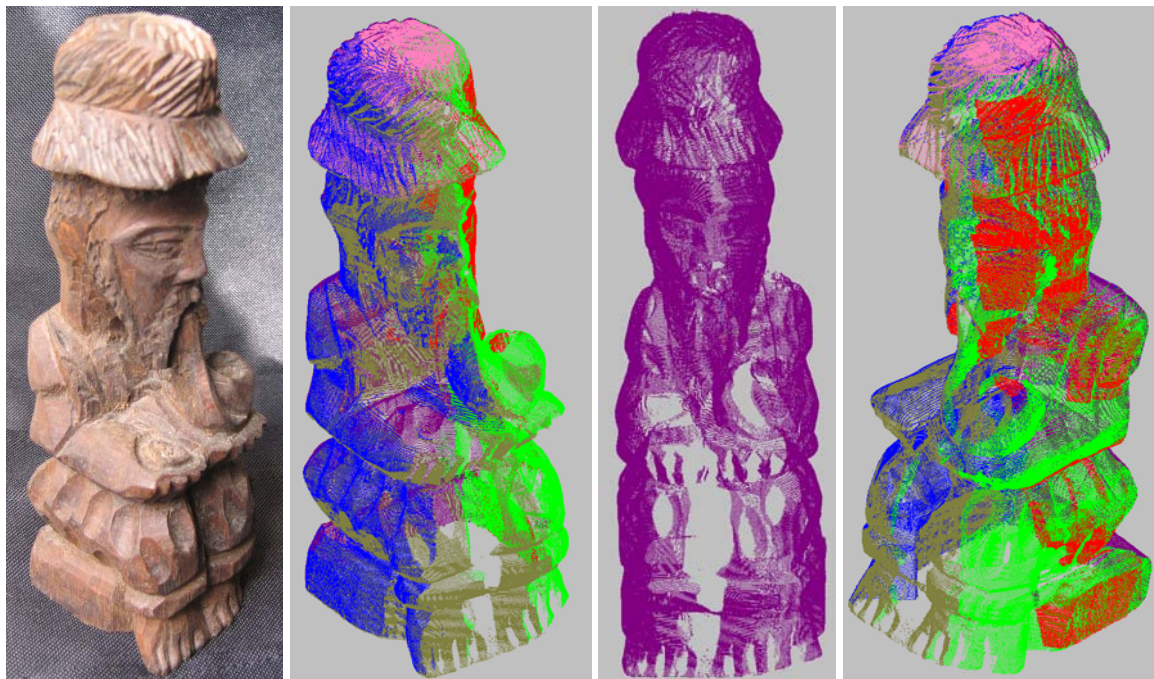


Figure 2 : Figurine artisanale

Notons de plus que pour les exemples proposés, seul le critère de complétude du nuage de points est pris en compte et ce de manière visuelle. Il n'est en effet pas possible de réaliser une numérisation par tâtonnement d'un objet selon un critère de bruit par exemple. Ce type de critère ne peut se satisfaire d'une vérification visuelle de l'opérateur. Dans ces conditions l'utilisation d'une démarche réfléchie s'impose.

Dans les chapitres précédents nous avons exposé les principes et les techniques qui régissent le fonctionnement des capteurs sans contact. Il nous a alors été possible de formuler la problématique liée au besoin d'une numérisation cohérente pour aboutir à un résultat en accord avec l'utilisation envisagée. Bien que les applications varient le besoin de la qualité au niveau du nuage de points demeure. Forts de ce constat nous proposons dans ce chapitre une démarche intelligente de numérisation basée sur l'accroissement de qualité du nuage de points. Notons que le besoin de qualité n'est pas le même d'une application à l'autre. Ainsi la rétro-conception nécessite un nuage de points complet représentant l'ensemble de la pièce numérisée sans trou de numérisation alors que le copiage direct de forme requiert un nuage de points complet et homogène en terme de densité. Quant à la métrologie elle est beaucoup plus exigeante en terme d'exactitude de mesures sur les éléments à contrôler. C'est pourquoi le travail exposé intègre également la prise en compte de l'application par l'utilisation d'outil d'analyse et de prises de décision modulables en fonction des besoins. Cependant, deux critères de qualité sont particulièrement utilisés dans notre travail : la complétude et le bruit de mesure. En effet l'accroissement de qualité du nuage vis-à-vis de ces deux critères est un préalable au besoin de la majeure partie des applications de la mécanique.

Comme nous l'avons vu au chapitre deux, de nombreux travaux proposent des solutions aux différentes problématiques posées par la numérisation automatique. Toutefois l'essentiel des approches développées supposent l'existence d'une définition numérique de l'objet à numériser (modèle C.A.O). Il existe certes quelques travaux qui abordent le cas de pièces inconnues mais ces derniers constituent des réponses ponctuelles et ne proposent pas de solution globale. C'est pourquoi nous avons concentré notre travail de recherche vers la définition d'une démarche de numérisation globale pour les objets de formes inconnues. Notons que la démarche proposée peut cependant s'appliquer dans une large partie à des objets dont le modèle numérique existe.

1.2. Démarche de numérisation intelligente d'objets inconnus

L'approche qualifiée de globale peut être divisée en deux étapes principales : le pré-traitement des données et la génération de trajectoire intelligente de numérisation. Ces deux parties sont liées par une étape de test. Le point d'entrée de la démarche est une première numérisation dont la réalisation est libre. Il s'agit d'obtenir un nuage de point qui permette d'entamer la phase d'analyse et de traitement. A ce stade, le nuage de points issu de la première numérisation subit alors l'étape de pré-traitement :

- Modélisation volumique du nuage à l'aide d'une représentation par voxel
- Identification de points et de lignes caractéristiques
- Estimation de la qualité du nuage de points.

Cette étape est suivie de l'étape de test : analyse des résultats et de prise de décision sur l'aptitude ou non du nuage de points à répondre aux exigences (en terme de qualité) de l'application envisagée.

La phase de génération de trajectoire intelligente est envisagée si nécessaire. Cette phase aboutit à la définition d'un ensemble de positions et d'orientations du capteur qui permettront de réaliser une nouvelle numérisation. Le résultat de la nouvelle numérisation donnera un nuage de points dont la qualité sera accrue.

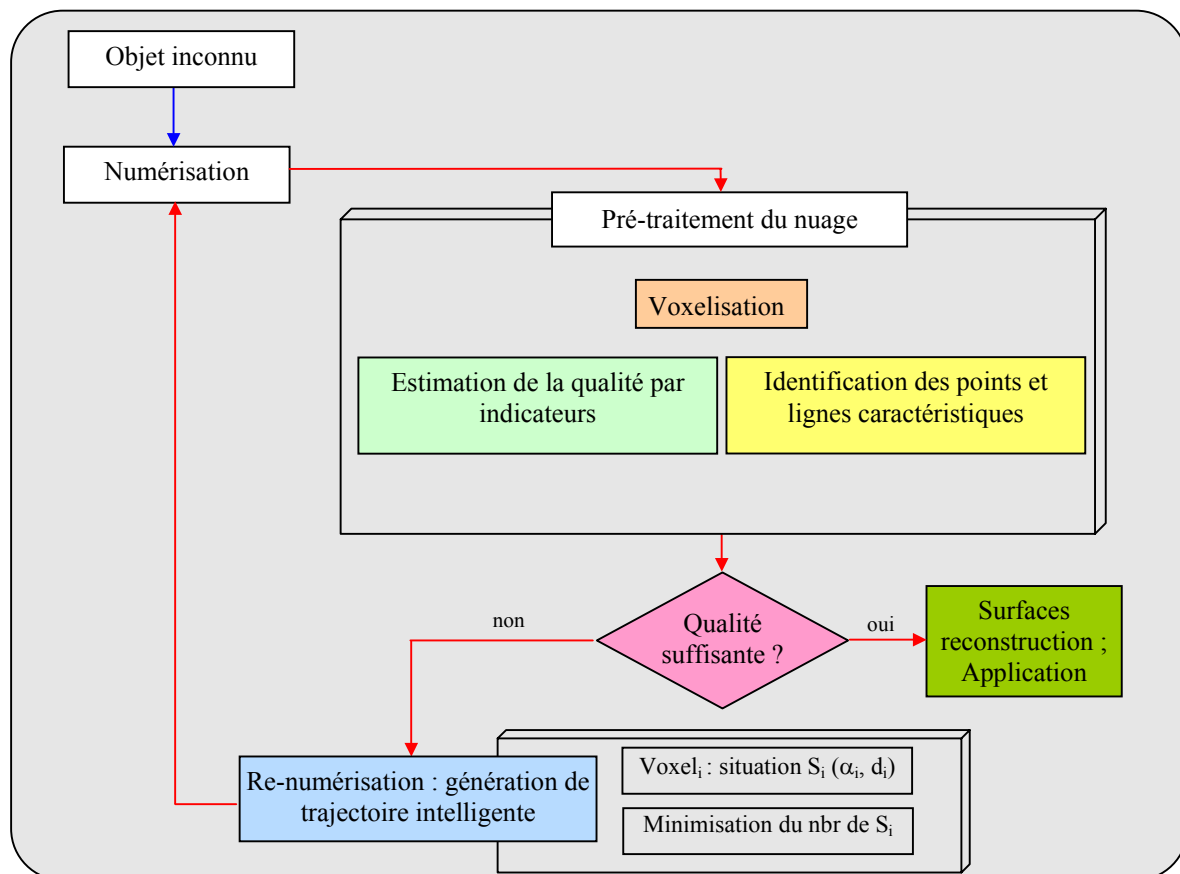


Figure 3 : *Démarche de numérisation intelligente d'objet inconnu*

Toute la démarche est réalisée en accord avec les limites de fonctionnement du système de numérisation utilisé (cf. chapitre 3). En particulier, la génération de la trajectoire de re-numérisation se fera dans l'espace des grandeurs admissibles défini à partir des résultats de qualification du système. Cette boucle est alors répétée jusqu'à ce que la qualité du nuage

de point soit en accord avec l'utilisation envisagée.

2. Données d'entrée : génération du premier nuage de points

La première numérisation est réalisée par l'opérateur manuellement avec pour objectif de couvrir au mieux l'objet à numériser. Le positionnement du capteur prend simplement en considération les directives du constructeur pour son réglage : intensité laser, valeur LUT... (cf. chapitre 3 § 3.2).

De façon à balayer l'objet le plus simplement possible, l'orientation conseillée est celle qui permet d'avoir la normale au plan laser parallèle à l'un des deux axes de la MMT : X ou Y. Dans le cas de notre système l'orientation la plus simple correspond à $A=0^\circ$ et $B=0^\circ$ (cf. chapitre 3 §3.1) orientant la normale au capteur selon l'axe X et définissant la direction de balayage selon l'axe Y.

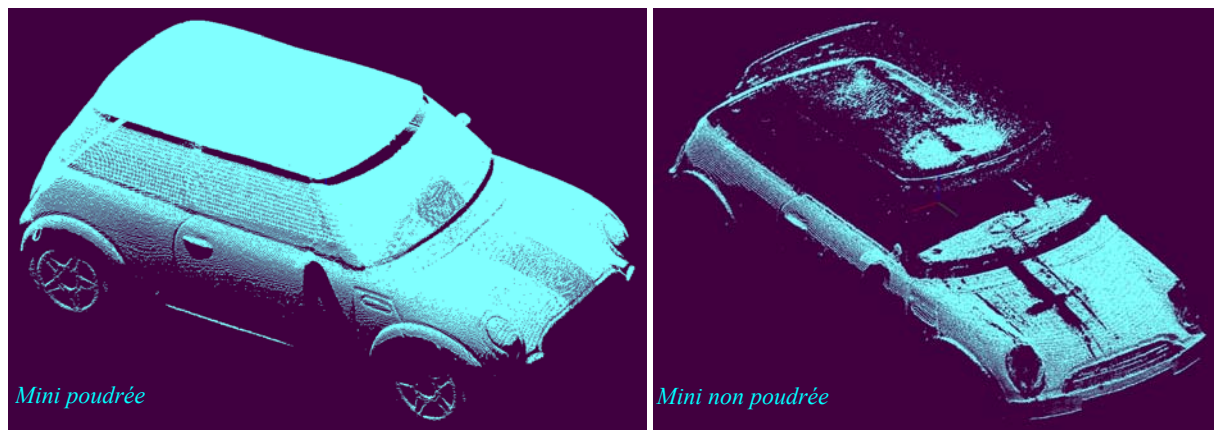


Figure 4 : Première numérisation : données d'entrée de l'algorithme

3. Traitement automatisé du nuage de points

3.1. Pré-traitement : modélisation volumique

3.1.1. Le besoin

Le nuage de points représente une image discontinue et inhomogène des surfaces mesurées. Dans le cadre de la génération de trajectoire ces aspects engendrent des approximations au détriment de la qualité du nuage qui sera obtenue après re-numérisation. Afin de réduire ces difficultés, un certain nombre de travaux réalisent directement une reconstruction surfacique du nuage. La surface ainsi reconstruite est directement substituée au nuage de points pour le reste de l'étude. Le problème de cette solution est qu'elle introduit

une approximation. De plus la reconstruction surfacique n'apporte pas de réponse au problème de gestion de la matière au sens volumique (obstacle) pour la génération de trajectoire.

Dans notre démarche, nous proposons de structurer le nuage de points en y apportant une organisation. Dans ce sens nous réalisons une modélisation spatiale du nuage de points sous forme d'une voxelisation enrichie par la définition d'attributs [OST 02][CON 02]. Cette démarche a le double avantage de conserver l'information originelle et de donner une pseudo-continuité au nuage de points facilitant la création d'un trajet continu. De plus la modélisation volumique apporte une connaissance sur le volume occupé par l'objet pouvant ainsi permettre de gérer les problèmes de collision et d'occlusion.

3.1.2. La voxelisation du nuage de points

Un voxel peut être défini comme un pixel 3D. C'est en général un cube élémentaire dont la dimension peut s'adapter au contexte d'utilisation. Cette dimension doit toutefois être choisie de manière cohérente vis-à-vis du pas de numérisation utilisé et de la densité de points recueillis. En effet une longueur d'arête inférieure au pas de numérisation réduira l'intérêt de la voxelisation et pourra même être une source d'erreur pour l'analyse du nuage. Les voxels construits à partir du nuage de points sont classés selon deux types [PAP 97]:

- Les voxels vides ; ne contenant pas de points mesurés
- Les voxels non-vides ; contenant des points M_i du nuage de points

La voxelisation, outre l'organisation qu'elle apporte, permet de traiter individuellement chaque voxel non vide. Il est ainsi possible d'associer à chaque voxel non-vide des attributs définis à partir des caractéristiques des points qui s'y trouvent [OST 02]. Ces attributs rendent compte à la fois de propriétés géométriques de l'ensemble de points inclus et de critères de qualité [CON 02]. Pour notre étude, trois attributs sont essentiellement utilisés la densité, le barycentre et la normale.

Attribut densité : La densité représente le nombre de points $N_{\text{vox}j}$ contenus dans le voxel j .

Attribut barycentre : Soit le voxel j et N_{voxj} sa densité de points M_i , le barycentre G_{voxj} est défini par :

$$\overrightarrow{OG_{voxj}} = \frac{1}{N_{voxj}} \sum_{i=1}^{N_{voxj}} \overrightarrow{OM_i} \quad (Eq. 4.1)$$

Attribut normale : Soit le voxel j défini par les points M_i , sa densité N_{voxj} et son barycentre G_{voxj} l'attribut normale associée au voxel j est alors défini par la normale locale $\vec{n}_{voxj}$ au plan des moindres carrés associé aux points M_i . Notons qu'un nombre réduit de points contenus dans un voxel non-vide peut conduire à un mauvais calcul de la normale. De ce fait les voxels contenant moins de quatre points sont considérés comme vides.

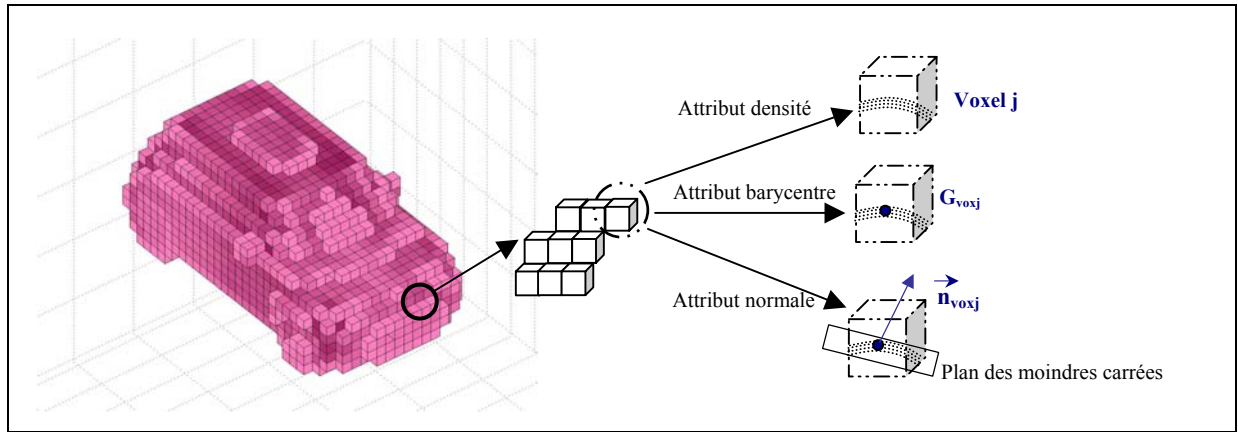


Figure 5 : Voxelisation et attributs

Afin d'illustrer la voxelisation, nous avons réalisé une voxélisation sur le nuage de points issus de la numérisation de la Mini. Compte tenu de la densité du nuage (plus de 2000000 points) la taille des voxels choisie est de 1mm afin de visualiser au mieux l'effet de continuité et d'organisation qu'apporte la voxelisation. On obtient 13168 voxels représentatifs du nuage initial. Notons qu'à partir de cette étape chaque voxel j est représenté par ses attributs, en particulier par le couple $(G_{voxj}, \vec{n}_{voxj})$. Cette représentation sera largement utilisée pour les étapes suivantes puisqu'elle permet un allégement du nombre de données traitées.

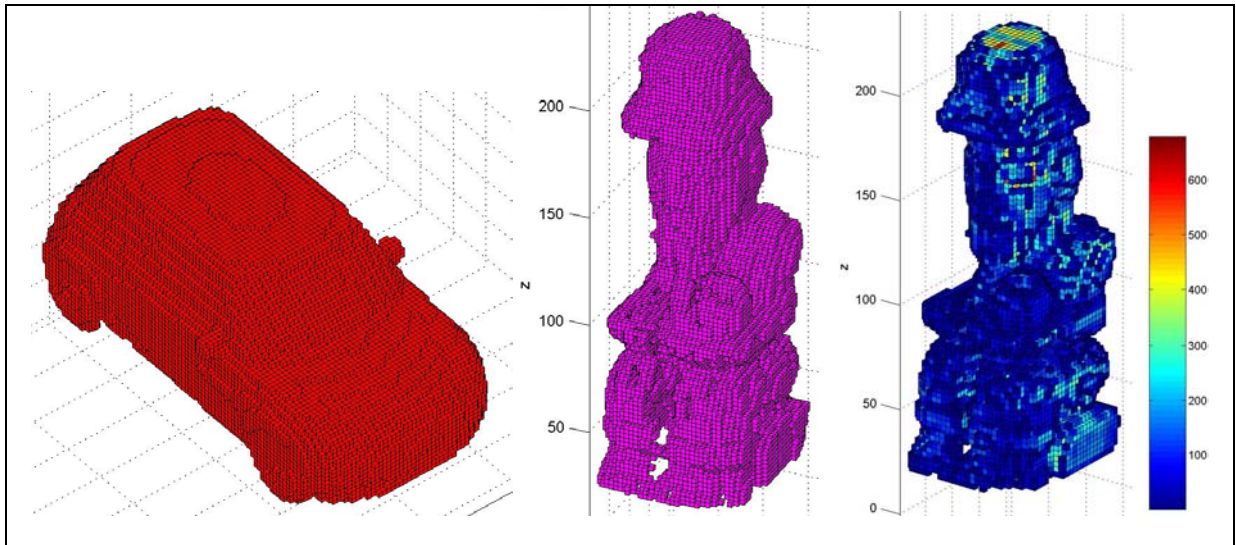


Figure 6 : Voxelisation de nuages de points denses

3.2. Identification de lignes caractéristiques

Le nuage de points est une image de la géométrie réelle de l'objet étudié. Cependant les caractéristiques géométriques de la surface numérisée n'apparaissent pas de manière évidente dans le nuage de points, en partie à cause de son caractère discontinu. Toutefois quel que soit le domaine d'utilisation du nuage (rétro-conception, copiage de forme, inspection...) il est indispensable d'être capable de retrouver les caractéristiques de la géométrie réelle de la pièce (ligne de courbure, arêtes, frontière, ligne caractéristique...). La littérature propose de nombreuses méthodes d'identification d'éléments géométriques remarquables pour les nuages de points [MEY 02] [YAN 99][BAH 97]. Dans la définition de notre démarche nous utilisons celle mise en place au LURPA par Osty et qui s'attache à identifier les lignes caractéristiques [OST 98]. Une ligne caractéristique est définie par un ensemble de points caractéristiques, image de singularités de la surface numérisée. Lorsqu'un plan coupe une surface géométrique il se forme alors sur le plan un profil 2D image de la surface. Lorsque l'entité est un nuage de points le profil est une succession de points. Les singularités des contours 3D se reconnaissent en 2D par leurs caractéristiques : changement de pente, changement de concavité, extrémités... On s'intéresse alors aux deux questions suivantes :

- Comment identifier sur le profil 2D discontinu les points caractéristiques ?
- Comment associer ces points pour construire les lignes caractéristiques ?

3.2.1. Identification des points caractéristiques par codage directionnel

Les points singuliers du profil 2D correspondent aux variations de courbure, aux ruptures d'angles, aux points d'inflexion de la surface ou encore aux points représentatifs des extrémités. Pour l'étude des profils 2D, les plans de coupe les plus judicieux sont ceux perpendiculaires au contour. Cependant un balayage par des plans de coupe parallèles permet d'obtenir une première image significative des points caractéristiques du contour 3D. Six types de points caractéristiques sont définis (figure 7) :

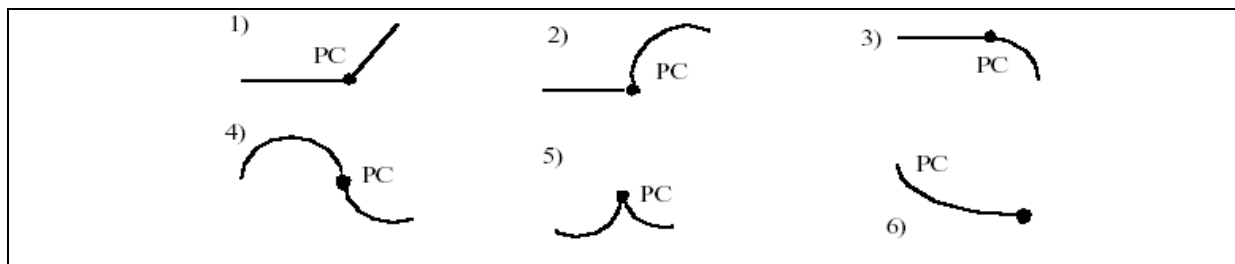


Figure 7 : Les différents types de points caractéristique [OST 02]

L'identification des points caractéristiques est obtenue par l'application d'un algorithme de codage directionnel en quatre étapes : découpage par les plans et projection ; approximation polynomiale ; codage directionnel ; analyse et identification.

Un balayage du nuage de points est réalisé par une succession de plans de coupe parallèles dont l'espacement régulier est en accord avec le pas de numérisation. La direction de propagation des plans est en général celle de la direction de numérisation. En se basant sur les caractéristiques des données discrètes, une coupe est alors définie par l'ensemble des points compris entre deux plans parallèles successifs. Si p est le pas de numérisation, le profil 2D est obtenu par projection sur le plan de coupe de tout point 3D dont la distance au plan n'excède pas $p/2$. Afin de ne travailler que sur des portions pseudo-continues, la distance entre 2 points successifs du profil est calculée. Lorsque la distance entre deux points dépasse une valeur seuil A imposée, le profil est découpé en deux domaines DC_i étudiés séparément (figure 8).

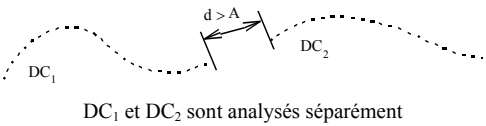
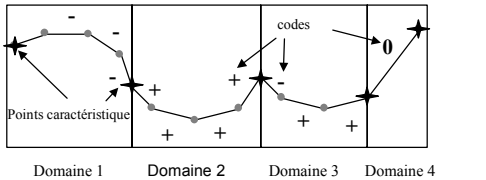
Séquence	Nature de la singularité	Type	Profils 2D
	Extrémité	1	
...0	0...	2	
...0	+---... -++...	3	
...0	---... +++...	4	Séquence de codes = « --- + + + + - + + 0 » 
...---	+++...	5	
...+++	+++... +---...	6	

Figure 8 : Méthode d'identification des points caractéristiques

Afin d'effectuer un filtrage du bruit le domaine DC_i subit une approximation polygonale. Il s'agit d'une méthode de type division, basée sur le calcul de l'erreur de corde E_∞ testée par comparaison avec une valeur seuil B . Comme le montre la figure 9, lorsqu'un point est tel que l'erreur de corde dépasse la valeur B il y a segmentation en ce point. A ce stade, le profil peut être représenté sous forme d'un ensemble de segments de droites ordonnées.

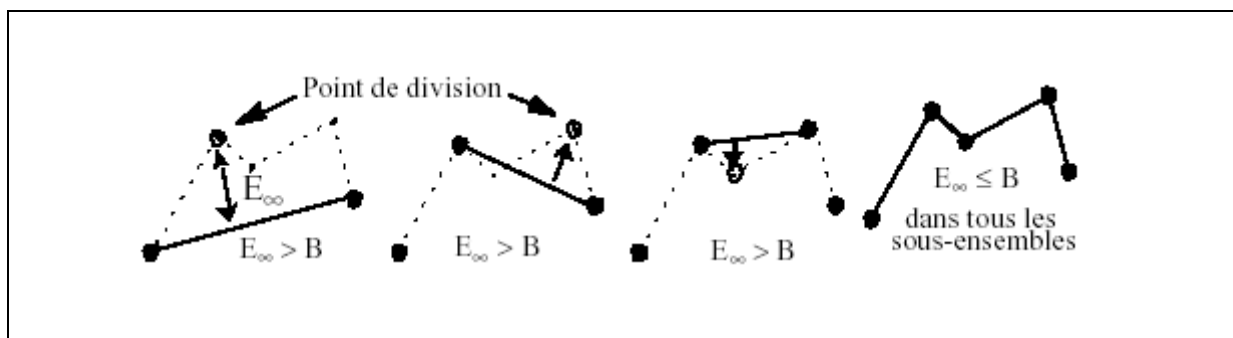


Figure 9 : Approximation polygonale par calcul de l'erreur de corde [OST 02]

L'étape de codage directionnel permet d'associer à chaque segment un indice +, - en fonction de son orientation par rapport au segment qui le précède ou 0 en fonction de sa longueur. Un segment est affecté de l'indice 0 si sa longueur est supérieure à un seuil défini. L'indice - est affecté au segment qui tourne dans le sens anti-trigonométrique et l'indice + à celui qui tourne dans le sens trigonométrique par rapport au segment qui le précède.

La dernière étape est l'identification des points caractéristiques qui est réalisée par l'analyse du codage directionnel. Les discontinuités géométriques de type C^1 et C^2 représentées par un changement d'indice représentent les points caractéristiques. L'expertise du codage sur chaque paquet permet alors d'identifier les points caractéristiques ; l'exemple

de la figure 8 aboutit à l'identification de cinq points caractéristiques séparant 4 domaines de même convexité.

3.2.2. Construction des lignes caractéristiques

Afin de simplifier la construction des lignes caractéristiques, une solution pour une première approche consiste à appliquer l'identification uniquement sur les barycentres G_{voxj} . Lorsque le barycentre d'un voxel est identifié comme un point caractéristique le voxel est alors qualifié de *voxel contour*. La construction des lignes caractéristiques est alors réalisée par l'union des voxels contours. Deux critères sont imposés pour la croissance de la ligne : celui de la concordance de la nature de la propagation (l'appartenance à une courbe de degré 3 pour assurer la continuité C^2) et un critère de proximité. Afin que ces deux critères soient respectés la croissance de la ligne caractéristique doit se faire suivant la tangente aux extrémités. Ainsi, par exemple, les bords de trous sont identifiés à travers la réunion de points caractéristiques de type 1 (figure 10).

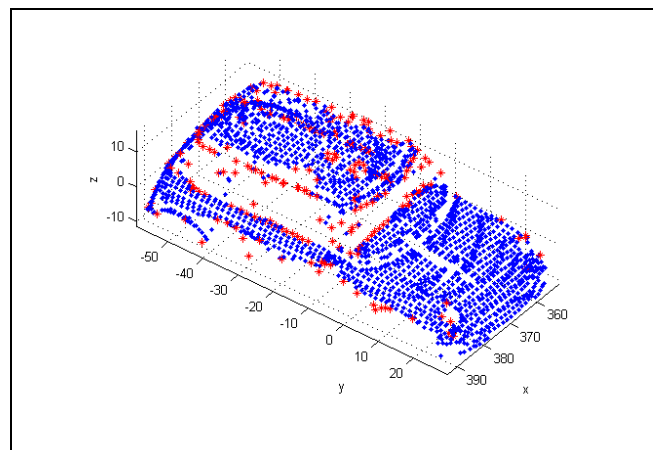


Figure 10 : Visualisation des points caractéristiques bords de trous (Mini non poudrée)

La numérisation intelligente peut être appliquée à la re-numérisation des lignes caractéristiques afin d'apporter ainsi un gain de qualité sur l'identification et l'exactitude de ces lignes. Ce qui est prépondérant dès lors que l'on s'intéresse à la complétude du nuage de points. En effet, l'identification des lignes caractéristiques « bords de trous de numérisation » est essentielle pour la planification d'une numérisation devant combler ces lacunes de numérisation.

3.3. Estimation de la qualité du nuage de points

Les données d'entrée de notre démarche sont les points issus d'une première

numérisation. Il est possible d'estimer la qualité des données acquises au travers des indicateurs de qualité. Comme nous l'avons précisé en introduction, nous avons restreint dans ce travail les indicateurs de qualité au bruit et à la complétude. Les paragraphes suivants montrent comment ces grandeurs sont affectées au nuage de points. La même approche pourrait être développée pour d'autres indicateurs de qualité.

3.3.1. Evaluation de la qualité au sens de bruit

Comme nous avons vu au chapitre précédent le bruit est directement lié à la situation relative capteur/surface. En particulier, nous avons vu que le bruit est lié à la distance d et à l'angle α de numérisation (cf. chapitre 3 figure 13 et 14). La première numérisation est réalisée sans directive particulière sur l'orientation du capteur par rapport à la surface à numériser. Cependant, la numérisation est réalisée avec une orientation constante et à une altitude Z constante dans le repère machine. De ce fait l'angle et la distance de numérisation α et d ne peuvent pas être optimales vis-à-vis du bruit de numérisation pour toutes les parties de la surface numérisée.

Concernant la distance de numérisation, il n'est pas toujours simple d'évaluer son influence. Cependant, l'évaluation de la qualité du nuage de points vis-à-vis du bruit de mesure peut être réalisée en fonction de l'angle de numérisation α . L'indicateur qualité δ -bruit tel que défini dans les chapitres précédents ne peut être utilisé à cette étape de l'algorithme puisque sa définition n'intègre pas α . Le bruit de mesure en fonction de α est déduit de la courbe de la figure 11 établie à partir des procédures d'évaluation du capteur détaillées au chapitre 3.

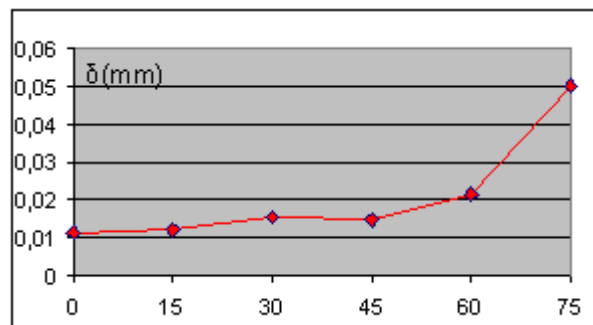


Figure 11 : δ -bruit en fonction de l'angle de numérisation

Dans ce sens, nous nous appuyons sur la voxelisation et nous calculons l'angle de numérisation pour chaque voxel non-vidé.

Soit $R_s(O_s, \vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ le repère lié au capteur laser défini tel que $\vec{w}$ est la normale au plan laser, $\vec{v}$ est l'axe de symétrie de la fenêtre de mesure du capteur et $\vec{u} = \vec{v} \wedge \vec{w}$. L'angle de numérisation est alors donné par :

$$\cos \alpha_j = \frac{(\vec{n}_{voxj} - (\vec{n}_{voxj} \cdot \vec{u}) \cdot \vec{u}) \cdot \vec{v}}{\|\vec{n}_{voxj} - (\vec{n}_{voxj} \cdot \vec{u}) \cdot \vec{u}\|} \quad (Eq. 4.2)$$

Dans le cas de la première numérisation, le plan laser est orienté par sa normale $\vec{Y}$ et les rayons composant le plan sont suivant $\vec{Z}$. Pour chaque voxel j l'angle de numérisation α_j est alors obtenu par :

$$\cos \alpha_j = \frac{(\vec{n}_{voxj} - (\vec{n}_{voxj} \cdot \vec{x}) \cdot \vec{x}) \cdot \vec{z}}{\|\vec{n}_{voxj} - (\vec{n}_{voxj} \cdot \vec{x}) \cdot \vec{x}\|} \quad (Eq. 4.3)$$

La valeur δ_j correspondant à α_j est alors affectée au voxel j . Nous pouvons alors définir la représentation par voxel du bruit comme le montre la figure 12.

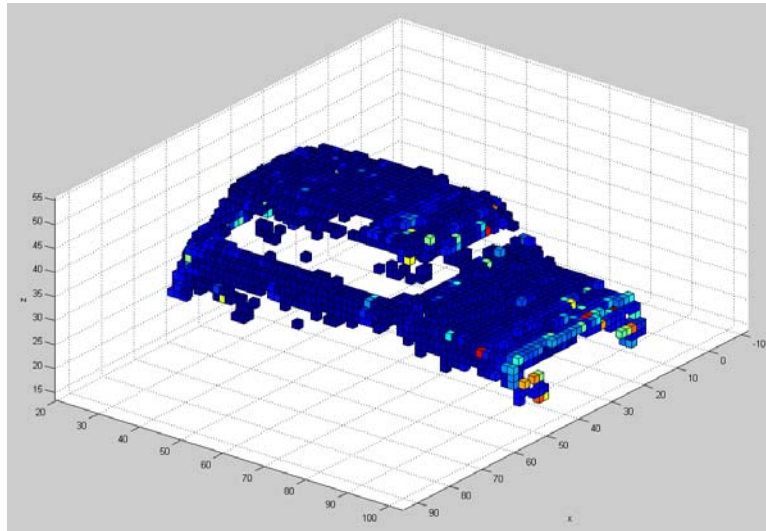


Figure 12 : Représentation du bruit au travers de la voxelisation

La représentation par voxel du bruit permet d'avoir une visualisation simple mais très parlante de la répartition du bruit dans le nuage de points. Dans le cas de l'exemple de la figure 12, bien que sur une grande partie du nuage la valeur de δ soit comprise entre 0.01mm et 0.02mm, il existe des zones fortement bruitées dont la valeur atteint 0.07mm.

Une fois l'indicateur bruit calculé pour chaque voxel, nous comparons les valeurs obtenues à une valeur seuil δ_{th} choisie en fonction des besoins de l'application envisagée. Suite à cette analyse il apparaît deux régions sur la carte des voxels : celle conforme à la qualité souhaitée et celle dont la qualité doit être améliorée.

L'analyse du bruit peut également être faite à l'aide d'autres outils et en particulier à l'aide de matrice binaire comparable à celle utilisée dans les algorithmes de visibilité. Dans cette matrice les lignes représentent les voxels alors que les colonnes représentent l'ensemble des orientations possibles du capteur. Les orientations capteur sont calculées en fonction des capacités du système, ce qui dans notre cas signifie une incrémentation angulaire de 7.5° pour A variant de 0° à 105° et pour B variant de 0° à 360° . On obtient ainsi $14 \times 48 = 672$ orientations possibles. L'angle de numérisation est alors calculé pour chaque orientation et chaque voxel à partir de l'équation 2. Si la valeur du bruit affecté à un voxel et à une orientation est en accord avec la valeur seuil δ_{th} , la case correspondant dans la matrice est affectée de la valeur 1. La somme sur les colonnes permet de hiérarchiser les orientations en fonction du bruit de mesure. Cette organisation permet une analyse globale de la visibilité. Cependant cette façon de procéder ne nous est pas nécessaire et nous n'en ferons donc pas usage dans notre travail.

3.3.2. Evaluation de la qualité au sens de la complétude

La numérisation selon une seule vue d'un objet est rarement exempte de trous de numérisation. Il convient alors d'identifier ces trous de numérisation, de discuter de leur nature et éventuellement d'envisager de combler le manque d'information par une nouvelle numérisation. Dans ce cadre, ce paragraphe présente l'évaluation de la qualité du nuage de points au sens de la complétude.

Définition et calcul de la complétude :

Le calcul de la complétude nécessite l'identification des trous, or le nuage de points étant par définition discret, il est par nature « couvert de trous ». C'est pourquoi il convient de ne pas confondre les trous dus à la nature discontinue du nuage de points des trous de numérisation. Afin de prendre en considération l'écart qui existe entre un point et son voisinage, une polygonisation est appliquée au nuage de points. Dans ce sens nous réalisons une triangulation de Delaunay que nous nommons *DT* (figure 13a). L'algorithme de Delaunay

étant une triangulation 2D, nous construisons une facettisation du nuage de points en exprimant les sommets de chaque triangle par ses coordonnées 3D (figure 13b). Pour chaque facette triangulaire F_i nous calculons son aire A_{Fi} . Les facettes constituant des trous sont alors identifiées par rapport à une valeur seuil A_{max} telle que :

$$\forall F_i \in DT, F_i \text{ est un trou, si } A_{Fi} > A_{max} \quad (Eq. 4.4)$$

Compte tenu du fait que les nuages de points sont inhomogènes et que la triangulation de Delauney est obtenue à partir de la projection 2D du nuage, l'aire de certaines facettes triangulaires 3D peut dans certains cas ne pas être représentative d'un trou ou au contraire certains trous peuvent ne pas être identifiés (facettes étirées). Ce problème peut être en partie résolu si la triangulation de Delaunay est réalisée à partir des barycentres des voxels.

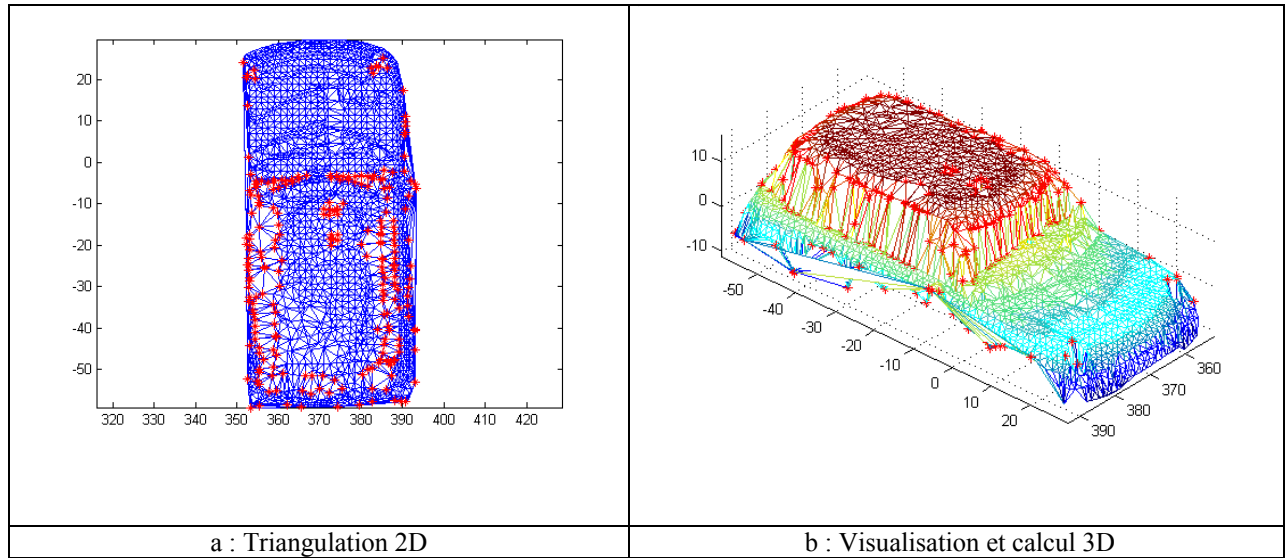


Figure 13 : Complétude : triangulation et calcul de l'aire des trous de numérisation

La valeur de A_{max} est définie à partir de la valeur moyenne des aires de toutes les facettes, ce qui permet d'analyser l'existence d'un trou en prenant en compte la densité générale du nuage. A_{max} est alors définie par :

$$A_{max} = \lambda A_{moy} \quad (Eq. 4.5)$$

$$\text{avec } A_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Fi}}{n} \quad ; \quad \lambda \in \mathbb{N} \quad ; \quad n \text{ nombre total de triangles}$$

La variable λ est un facteur d'élargissement qui permet de moduler la dimension des trous à identifier en tant que telle. Plus la valeur de λ choisie est grande, plus le nombre de zone du nuage identifié comme des trous de numérisation sera faible. λ est choisi en fonction de l'application envisagée ainsi que de la dimension des voxels. Pour l'exemple de la figure 13 la valeur de λ a été choisie égale à 4 et A_{moy} est égale à 2.7907 mm² pour une voxelisation à 2.5*2.5*2.5 du nuage issu de la première numérisation.

Après analyse des données, les trous de numérisation sont identifiés grâce à l'équation 4.5. La figure 13b montre les sommets des triangles identifiés comme étant des trous. A ce stade de l'algorithme les informations disponibles ne permettent pas de conclure sur la nature de ces trous. Il s'agit donc des zones du nuage dont la qualité au sens de la complétude n'est pas satisfaite, il convient alors d'envisager leur re-numérisation.

Identification du polygone enveloppe des trous de numérisation :

Comme on peut le voir sur la figure 13 les triangles identifiés comme des trous sont en général entourés d'autres triangles de même nature. Il est donc nécessaire de regrouper ces triangles afin d'identifier l'enveloppe de chaque zone composée de plusieurs triangles. Le regroupement des triangles est obtenu à l'aide d'un algorithme d'analyse du voisinage :

Soit F_i et F_j deux triangles qui conformément à l'équation 4.4 sont identifiés comme étant des trous. Si F_i et F_j possèdent une arête en commun ils sont alors regroupés dans un ensemble nommé $T^{(k)}$.

Cet algorithme de recherche d'arêtes communes est appliqué à chaque triangle identifié jusqu'à la constitution des différentes zones. Lorsque tous les ensembles $T^{(k)}$ sont constitués, le polygone définissant leur contour doit être identifié. La résolution de cette étape passe par l'application de l'algorithme suivant :

Soit $F_i \in T^{(k)}$, si F_i possède une arête en commun avec un triangle $F_p \notin T^{(k)}$ ou si F_i possède une arête libre, alors les sommets P_{i1} et P_{i2} de cette arête appartiennent à la frontière de $T^{(k)}$.

L'application de cet algorithme à tous les triangles de $T^{(k)}$ permet d'identifier le polygone frontière de la zone $T^{(k)}$.

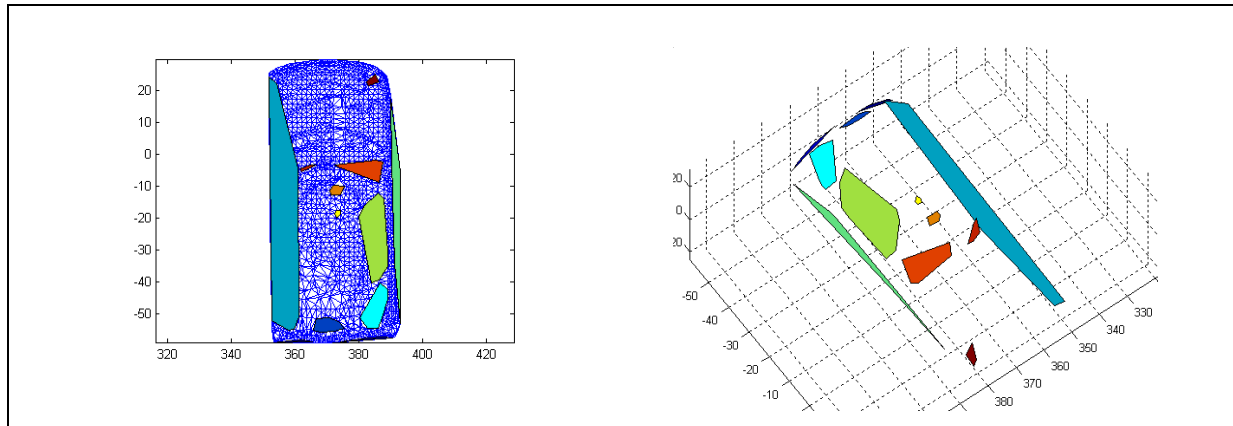


Figure 14 : Modélisation des trous en vue de la re-numérisation

L'accroissement de la qualité au sens de la complétude passe par une re-numérisation susceptible de combler les trous identifiés. Dans ce sens un plan des moindres carrés est associé à chaque $T^{(k)}$ à partir des barycentres constituant sa frontière (figure 14). Nous calculons alors la normale à ce plan qui permettra de définir l'orientation capteur dans la suite de la démarche.

4. Génération de trajectoire de numérisation intelligente

Après avoir évalué la qualité du nuage de points vis-à-vis des différents critères (complétude, bruit...) en fonction des besoins de l'utilisation envisagée, nous avons identifié les zones du nuage nécessitant un accroissement de qualité. La génération de la trajectoire intelligente de numérisation consiste à déterminer un ensemble successif de situations relatives capteur/surface qui permettent d'accroître la qualité du nuage et/ou de répondre à l'exigence de complétude. Le calcul des positions capteur doit se faire dans le respect des performances du système de numérisation, tout en tenant compte des possibilités de déplacement de la MMT. Ainsi, pour une orientation donnée du capteur, le trajet de numérisation est composé d'un ensemble successif de positions capteur. Contraint par la technologie de notre capteur, l'orientation du capteur demeure fixe au cours du déplacement de ce dernier. Avant d'entamer la définition de la trajectoire intelligente, nous allons rappeler le modèle géométrique du système qui sert de support à la définition de la trajectoire.

4.1. Rappel sur la modélisation géométrique du système

Le modèle géométrique du système a été détaillé au chapitre 1 § 2.2.4. Nous présentons donc dans ce paragraphe les éléments du modèle contribuant à la définition de la trajectoire. Dans ce sens il est nécessaire de rappeler les repères attachés aux différents

éléments qui interviennent dans le positionnement du capteur.

Soit $R_m(O_m, \vec{X}_m, \vec{Y}_m, \vec{Z}_m)$ le repère attaché à la MMT, dont les axes sont ceux de translation de la machine et l'origine O_m celle de la machine. Soit $R_s(O_s, \vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ le repère lié au capteur laser défini tel que $\vec{w}$ est la normale au plan laser, $\vec{v}$ est l'axe de symétrie de la fenêtre de mesure du capteur et $\vec{u} = \vec{v} \wedge \vec{w}$ (figure 15).

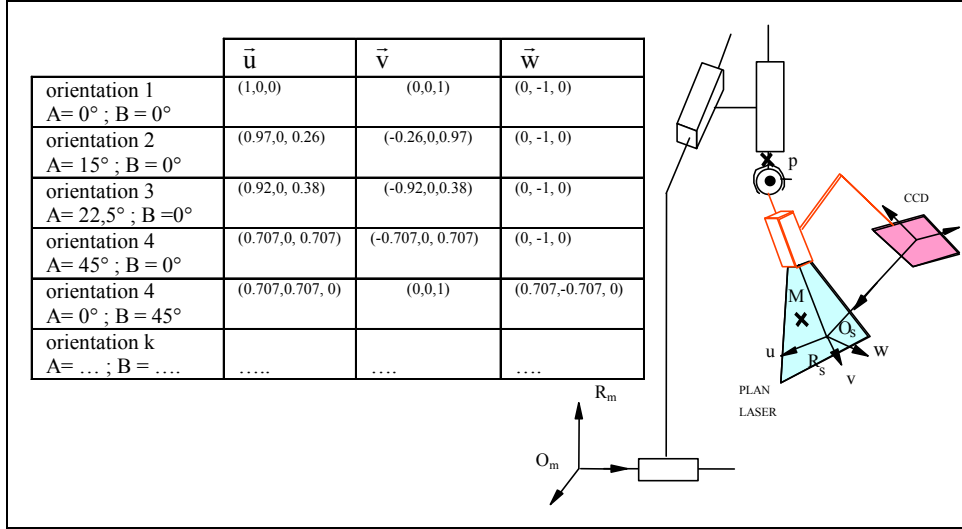


Figure 15 : Modèle géométrique pour la définition de la trajectoire de numérisation

Soit p le point qui définit le capteur dans le trajet de numérisation et M le point de la surface numérisée. Les coordonnées 3D (X,Y,Z) du point M sont mesurées directement sur la machine et le vecteur position de M vérifie l'équation suivante :

$$\overrightarrow{O_m M} = \overrightarrow{O_m p} + \overrightarrow{p O_s} + \overrightarrow{O_s M} \quad (Eq. 4.6)$$

Dans cette équation, le vecteur $\overrightarrow{O_s M}$ exprime la position de M dans le repère du capteur R_s défini par les coordonnées (u,v,w) . La position du capteur est donnée par le vecteur $\overrightarrow{O_m p}$. Les coordonnées (x_s, y_s, z_s) du vecteur $\overrightarrow{p O_s}$ exprimées dans le repère R_s sont constantes.

Pour chaque orientation du capteur, l'orientation du plan laser change dans le repère R_m , et il nous faut connaître les coordonnées des vecteurs $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ qui définissent cette orientation. La phase de positionnement (ou calibration externe) du capteur qui est nécessairement réalisée avant la numérisation permet d'établir la liste des vecteurs $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$

pour toutes les orientations admises par le système (figure15).

La trajectoire de numérisation est donc définie par les positions successives p_i du capteur. La génération automatique de cette trajectoire s'appuie sur la représentation par voxel du nuage de points. Nous l'avons décomposée en trois étapes :

- Recherche des situations admissibles S_{adj} du capteur pour la numérisation d'un voxel seul
- Génération des situations successives $\{S_i\}$ pour la numérisation d'un ensemble de voxels
- Génération de la trajectoire « optimale »

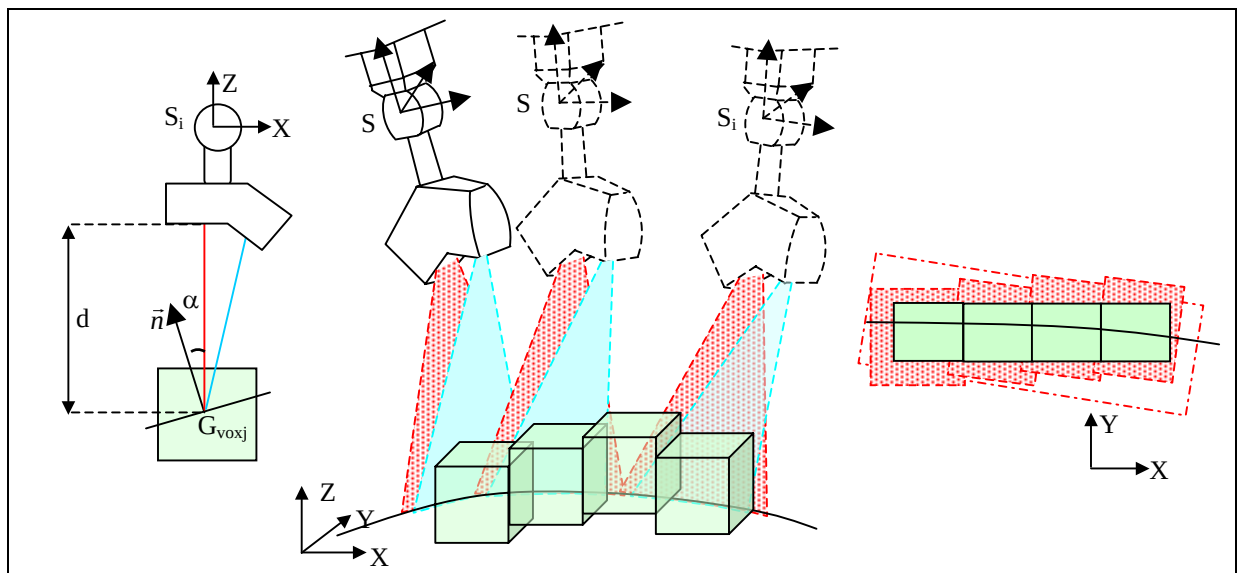


Figure 16 : Trajectoire de numérisation et bande numérisée

La première étape s'attache à définir pour chaque voxel j à re-numériser l'ensemble des distances d et des angles α de numérisation admissibles vis-à-vis de la situation du voxel définie par $(\vec{n}_{voxj}; G_{voxj})$. A l'issue de cette première étape, il est possible d'établir pour chaque voxel j un cône d'orientations admissibles.

La deuxième étape construit à partir d'une ligne caractéristique un ensemble discret de situations successives du capteur. Cette étape s'appuie sur l'étape précédente et s'attache à rechercher pour les voxels successifs les orientations admissibles permettant de numériser les voxels d'une même ligne caractéristique. La trajectoire dite « optimale » est alors générée en minimisant le nombre de changements d'orientation capteur et le balayage est réalisé suivant la direction générale de la ligne caractéristique (figure 16). Dans certains cas, il est également

possible de dégénérer la trajectoire en un balayage simple.

Nous présentons dans les paragraphes suivants le détail de l'algorithme de génération de trajectoire intelligente de numérisation.

4.2. Situations admissibles pour la numérisation d'un voxel

Chaque voxel j est ici représenté par son couple d'attributs $(\vec{n}_{voxj}; G_{voxj})$. L'objectif de cette étape consiste à trouver le vecteur $\overrightarrow{O_m p}$ qui permettra de numériser l'ensemble du voxel j selon la qualité attendue. Dans ce sens il nous faut déterminer les situations relatives capteur/voxel qui respectent les contraintes suivantes :

- La distance de numérisation d doit appartenir à l'intervalle admissible :
 $d \in [107\text{mm}, d_{\max}]$
- L'angle d'incidence γ doit appartenir à l'intervalle admissible : $\gamma \in [0, \gamma_{\max}]$
- Le point numérisé doit être contenu dans la fenêtre de mesure

De façon à minimiser pour cette étude l'influence de la distance de numérisation, nous avons choisi $d_{\max} = 150\text{mm}$.

L'angle d'incidence γ correspond à une combinaison linéaire de α et de β . Compte tenu de l'influence moindre de β sur la qualité du nuage, nous imposons comme intervalle admissible de γ , celui identifié pour α : $\gamma \in [0, \alpha_{\max}]$.

Les trois contraintes précédemment établies permettent de trouver l'ensemble des $(\overrightarrow{O_m p})_{\text{adm}}$ admissibles qui peuvent être exprimées dans R_s . En effet :

- La distance d est directement liée à v , imposer un intervalle admissible à d revient à imposer un intervalle à v , $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$
- L'angle d'incidence est lié à l'angle entre la normale du voxel et $\vec{v}$:
 $(\vec{n}_{vox} \cdot \vec{v}) \in [\cos(\gamma_{\max}), 1]$
- L'appartenance du point numérisé à la fenêtre de mesure est assurée par :
 $u \in [u_{\min}, u_{\max}]$

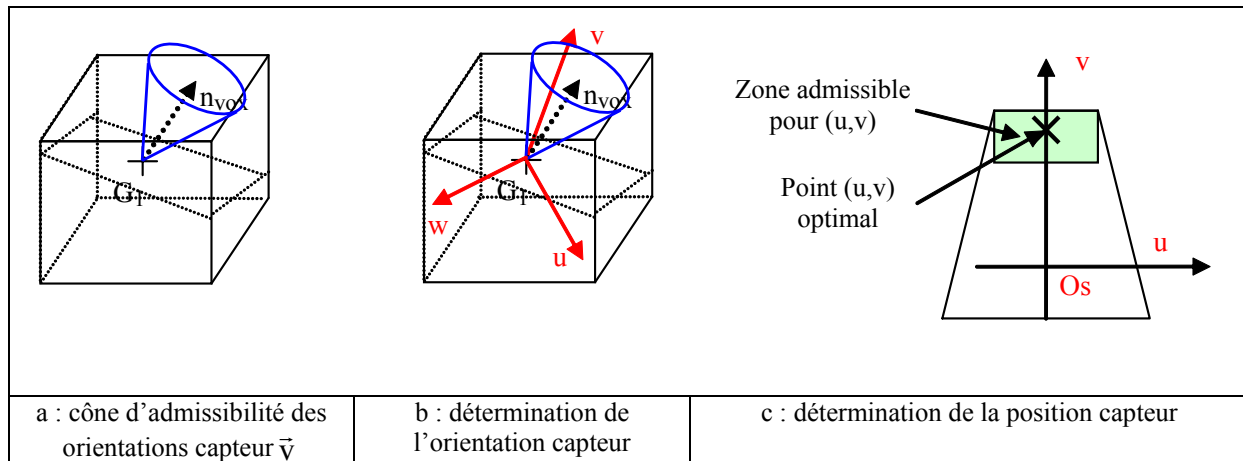


Figure 17 : Cône des orientations admissibles

Afin de respecter les contraintes énumérées, il nous faut d'abord identifier l'ensemble des orientations admissibles parmi toutes les orientations capteur possibles. Une orientation capteur est admissible au sens de la contrainte de l'angle d'incidence si le vecteur $\vec{v}$ qui lui est associé permet de respecter: $(\vec{n}_{vox} \cdot \vec{v}) \in [\cos(\gamma_{max}), 1]$. La zone ainsi définie et qui contient l'ensemble des orientations capteur admissible est donc formée par un cône d'axe $\vec{n}_{vox}$ et d'angle au sommet γ_{max} (figure 17a). Lorsqu'il n'y a pas d'autres contraintes, les orientations qui donnent l'angle d'incidence les plus faibles sont choisies (figure 17b). Une fois l'orientation capteur déterminée, la position du capteur est alors déterminée à travers le respect de la contrainte sur la distance de numérisation comprise entre 107mm et 150mm ce qui impose la valeur de v . Afin de respecter la dernière contrainte, le barycentre G_{vox} du voxel j est positionné au milieu de la fenêtre de mesure ce qui se traduit par $u=0$ (figure 17c).

Le capteur est alors déplacé suivant la direction $\vec{w}$ afin de numériser tout le voxel. Il faut noter que cette méthode est efficace pour les voxel de petite taille par rapport à celle de la fenêtre de mesure.

4.3. Génération de la trajectoire de numérisation des lignes caractéristiques

4.3.1. Cas général

Une ligne caractéristique qui doit être re-numérisée correspond à la numérisation d'un ensemble ordonné de voxels. Ainsi la démarche énumérée dans le paragraphe précédent doit être répétée pour chaque voxel composant la ligne caractéristique. L'identification des points caractéristiques est plus efficace si les plans de projection 2D sont perpendiculaires à la ligne

caractéristique. Dans ce sens, la trajectoire doit être générée de telle sorte que le plan laser soit autant que possible normale à la ligne caractéristique. Nous imposons alors $\vec{w}$ quasi colinéaire à la direction générale de la ligne définie par la position des barycentres successifs des voxels ordonnés (figure 18).

Pour deux voxels successifs j et $j+1$, la direction générale est approximée par $\overrightarrow{G_j G_{j+1}}$. L'angle entre la direction de la ligne et le plan normale est défini par :

$$\cos \theta = \frac{\vec{w} \cdot (\overrightarrow{G_j G_{j+1}})}{\|\overrightarrow{G_j G_{j+1}}\|} \quad (Eq. 4.7)$$

La nouvelle contrainte d'orientation est assurée au mieux en imposant une valeur minimum à $\cos \theta$. Le respect de cette contrainte se traduit par l'existence d'un nouveau cône, d'axe $\overrightarrow{G_j G_{j+1}}$ et d'angle au sommet θ_{max} , qui définit l'ensemble des directions $\vec{w}$ admissible (figure 18).

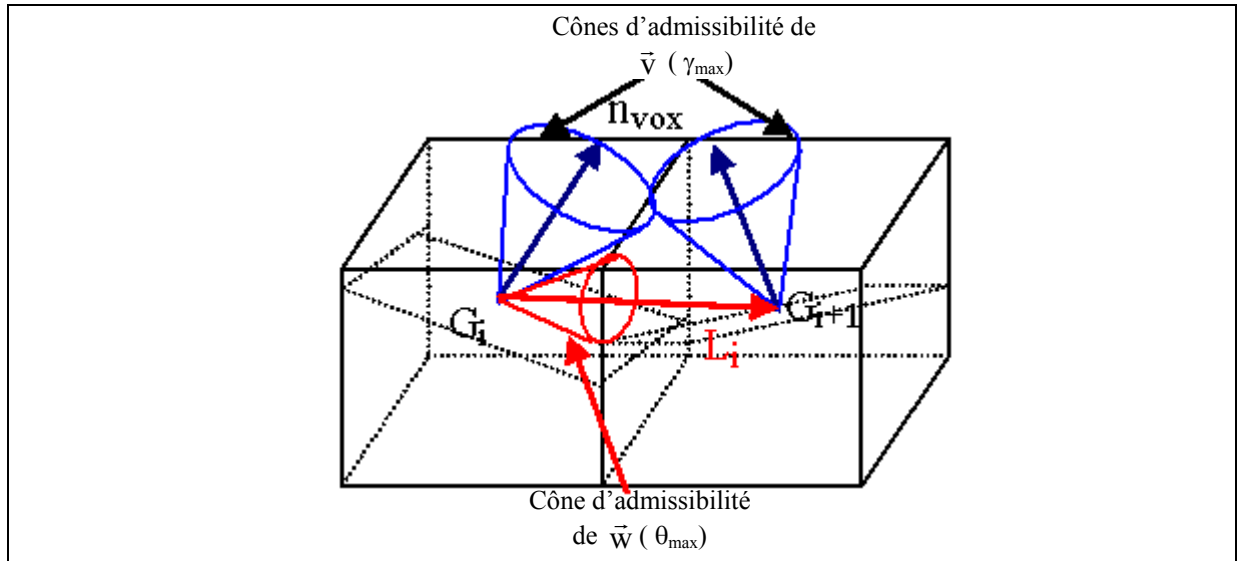


Figure 18 : Représentation de voxels contours successifs

Les différentes étapes de la méthode de génération de la trajectoire sont :

- Choix du premier point G_j de la ligne caractéristique
- Calcul de la direction locale de la ligne : $\vec{L}_j = \overrightarrow{G_{j+1} G_j} / \|\overrightarrow{G_{j+1} G_j}\|$
- Calcul des orientations capteur qui garantissent la numérisation de l'ensemble

des voxels $((\vec{n}_{\text{vox}} \cdot \vec{v}) \in [\cos(\gamma_{\text{max}}), 1])$ et qui respectent la contrainte imposée par la direction de la ligne, c'est à dire : $|\vec{L}_j \cdot \vec{w}| \in [\cos(\theta_{\text{max}}), 1]$.

Alors que l'ensemble des contraintes est respecté entre deux voxels successifs, le point suivant ainsi que les contraintes qui en découlent sont à leur tour prises en compte. Nous obtenons ainsi l'ensemble des orientations capteur admissible pour les n voxels successifs considérés. Les n positions successives du capteur sont alors déterminées en imposant u et v tels que les points caractéristiques soient positionnés au point optimal de la fenêtre de mesure.

A ce stade, les situations S_i (orientation et position) du capteur pour la numérisation de chaque ligne sont connues. Toutefois étant donné qu'une trajectoire est définie par la succession des S_i , ceci suppose que pour chaque nouvelle S_i le capteur soit réorienté. Ainsi si la ligne caractéristique est définie par n voxels, il y a potentiellement $n-1$ réorientations à réaliser, ce qui est incompatible avec la contrainte de minimisation du nombre de réorientations.

Afin de réduire le nombre de réorientations, nous calculons l'intersection des cônes d'admissibilité des voxels à numériser. L'ensemble des voxels consécutifs ayant une intersection non vide de leur cône d'admissibilité sont numérisés avec la même orientation. Soit deux voxels consécutifs Vox_1 et Vox_2 à numériser, nous commençons par calculer l'intersection de leur cône d'admissibilité. Si le résultat de l'intersection est l'ensemble vide, alors la réorientation de capteur est obligatoire. Dans le cas contraire, $\vec{v}_1$ est choisie conformément à l'ensemble des contraintes préalablement citées mais de plus il devra être contenu dans le volume résultant de l'intersection des cônes. La numérisation de Vox_1 et Vox_2 est alors réalisée sans réorientation du capteur. Ainsi, la numérisation des voxels de la ligne caractéristique ne nécessitera pas de réorientation tant que $\vec{v}_1$ appartiendra à l'intersection des cônes d'admissibilités des voxels successifs.

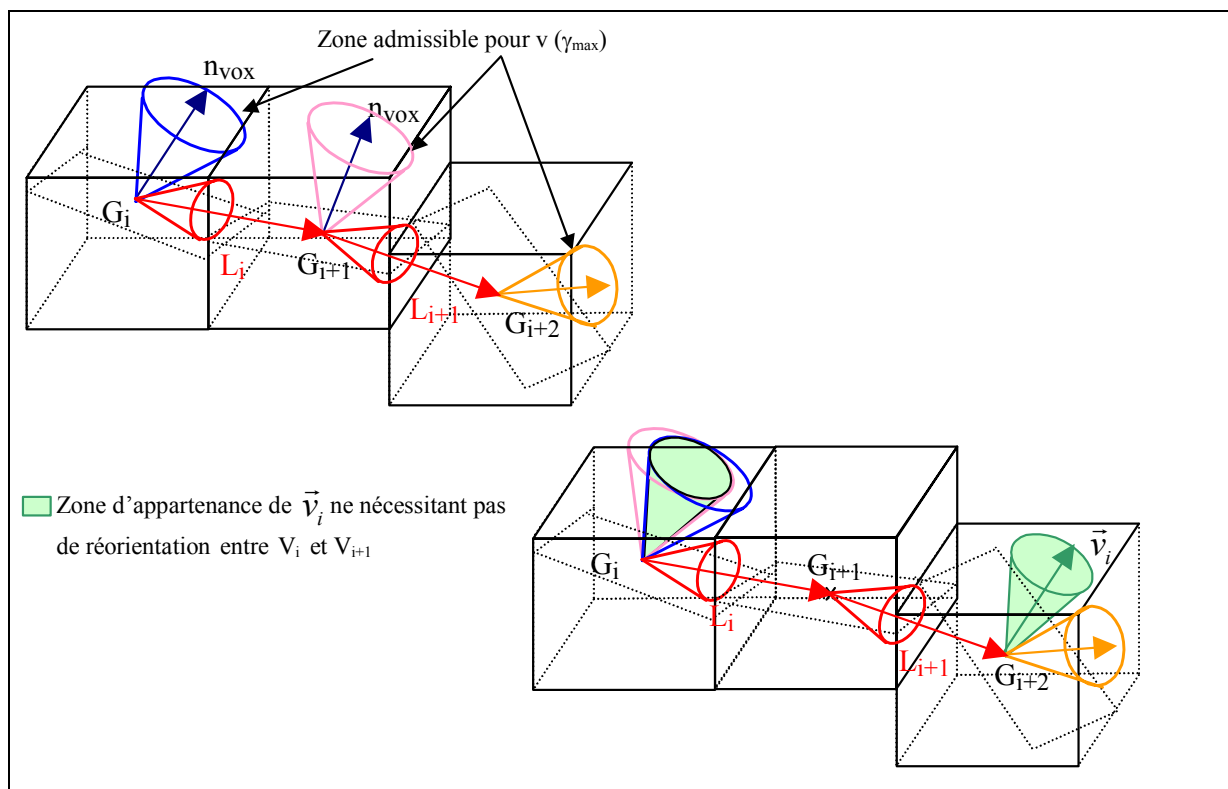


Figure 19 : Trajet de numérisation et Minimisation des réorientations capteur

La figure 19 illustre le cas général. Le volume issu de l'intersection non vide des cônes d'admissibilités des voxels i et $i+1$ est représenté en vert, nous l'appelons CV_1 . Nous calculons une nouvelle intersection, celle de CV_1 et du cône d'admissibilité (de $\vec{v}_i$) du voxel $i+2$. Si l'intersection est non vide, on obtient alors le nouveau volume CV_2 qui doit contenir $\vec{v}_i$. Ce raisonnement est répété tant qu'il existe une intersection non vide. L'ensemble des voxels ainsi regroupés est numérisé à l'aide d'une seule orientation $\vec{v}_i$. La figure 19 présente un cas où les voxels i et $i+1$ seront numérisés avec la même orientation appartenant au volume vert, alors que la numérisation du voxel $i+2$ nécessitera une réorientation. Le voxel $i+2$ sera le point de départ d'une nouvelle étude.

4.3.2. Simplification possible pour la complétude

Cet algorithme peut être simplifié pour les trous de faibles dimensions comparés à la longueur de la trace laser numérisée. En effet, imposer au plan laser de rester autant que possible normale à la ligne définissant le bord des trous (voxels contour), peut conduire à la définition d'un nombre élevé de position/orientation capteur alors qu'un seul balayage de la zone par le capteur peut suffire. Il est donc nécessaire de comparer l'aire du trou identifié à l'aire de la zone qui peut être numérisée par le capteur durant une seule passe. Dans ce sens il

faut relier les barycentres des voxels contour qui définissent les lignes caractéristiques. Ce problème peut être résolu en utilisant les algorithmes présentés au paragraphe 3.3.2 et regroupés sous l'intitulé : *identification du polygone frontière des trous*. Cette simplification est illustrée au travers de l'application développée au paragraphe 5.

4.4. Programmation de la trajectoire en automatique

A ce stade l'ensemble des données nécessaires à la re-numérisation intelligente est définie. Pour boucler notre algorithme il faudrait pouvoir réaliser en automatique la numérisation suivant la trajectoire générée. Pour ce faire, la programmation de la trajectoire doit idéalement être réalisable automatiquement via une interface. Or, nous ne disposons pas à l'heure actuelle d'outils logiciels permettant une intégration directe de la trajectoire du capteur à partir des données calculées. En effet, dans le cas de notre installation la gestion de la numérisation est du capteur est réalisée à l'aide du logiciel Kreon (Polygonia) alors que le déplacement du capteur est réalisé à l'aide d'un autre logiciel (Tutor). Notons toutefois que la programmation de la trajectoire est un problème de communication entre machine. Ce qui ne remet pas en cause la validité de l'algorithme proposé¹. L'intégration de notre algorithme à un logiciel tel Prélude Inspection (MDTvision) est une perspective qu'il nous faut envisager, tant du point de vue pilotage des trajectoires que du point de vue traitement des données numérisées. Cette intégration devrait permettre l'automatisation de la numérisation intelligente. Notons toutefois que la réalisation automatique de la numérisation suivant la trajectoire générée nécessitera de prendre en compte les problèmes de gestion des collisions et des trajectoires hors numérisation.

5. Application

Afin de tester notre approche nous avons choisi de l'appliquer sur une pièce représentant un masque de visage (figure 20). Le choix de cet objet a été dicté par la simplicité des formes proposées, même si elles sont complexes. En effet, la forme peut s'apparenter à une nappe. Cependant, l'objet présente des trous réels dont le contour doit être clairement identifié. On notera que la surface du masque présente une grande neutralité face à la lumière, absence de phénomène de réflexion ou d'absorption. En conséquence, il ne nous a pas été nécessaire d'utiliser de poudre blanche.

¹ Le déplacement du capteur suivant la trajectoire générée peut être réalisé manuellement.



Figure 20 : *Le Masque*

La démarche est celle proposée sur la figure 3 :

- Première numérisation de l'objet
- Pré-traitement du nuage de points :
 - Voxelisation
 - Identification des lignes caractéristiques
 - Estimation de la qualité
- Numérisation intelligente :
 - détermination des situations admissibles capteur/surface pour chaque voxel
 - définition de la trajectoire de numérisation d'une ligne caractéristique
 - optimisation de la trajectoire

Nous nous plaçons dans le cas d'une application de rétro-conception pour laquelle, la complétude doit être garantie et le bruit de numérisation doit être limité à $\delta_{th} = 0.02mm$. Par ailleurs, les lignes caractéristiques à identifier sont ici les lignes « bord » des trous réels permettant de limiter les zones à modéliser.

5.1. Première numérisation de l'objet

L'orientation retenue pour la première numérisation est celle définie au paragraphe 2 : $A=0^\circ$; $B=0$, soit une orientation du plan laser $\vec{w} = \vec{Y}$ et un balayage selon la direction Y (figure 21). Compte tenu des dimensions de l'objet (volume englobant $L \times l \times h$: $230 \times 130 \times 80 \text{ mm}$), la distance d choisie lors de la première numérisation est telle que le haut du nez soit à 107 mm . Compte tenu de la largeur de la fenêtre de mesure de notre capteur nous avons effectué huit passes pour balayer toute la surface. Le pas de numérisation est de 0.1 mm et la fréquence d'émission est de 35 Hz . Il en résulte un nuage composé de plus de 917000 points. A ce stade il n'est pas possible de distinguer les trous réels de la pièce de ceux dus à des phénomènes d'occlusion ; ils seront donc traités de la même manière. Le nuage utilisé et présenté sur la figure 21 n'a subi aucun filtrage, seul quelques rares points appartenant à la table de numérisation ont été retirés.

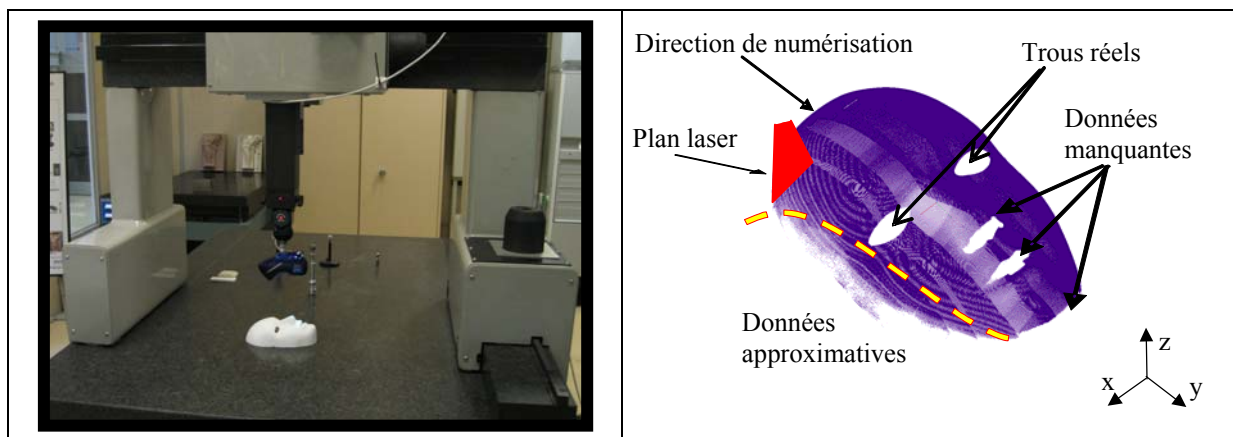


Figure 21 : Première numérisation

5.2. Pré-traitement du nuage de points

La voxelisation est appliquée au nuage de points en utilisant des cubes de dimension 4 mm , il en résulte 3524 voxels (figure 22). La dimension des voxels a été choisie en fonction de la densité du nuage de points de sorte que pour chaque voxel non-vide la normale associée puisse être calculée (cf. § 3.1.2)

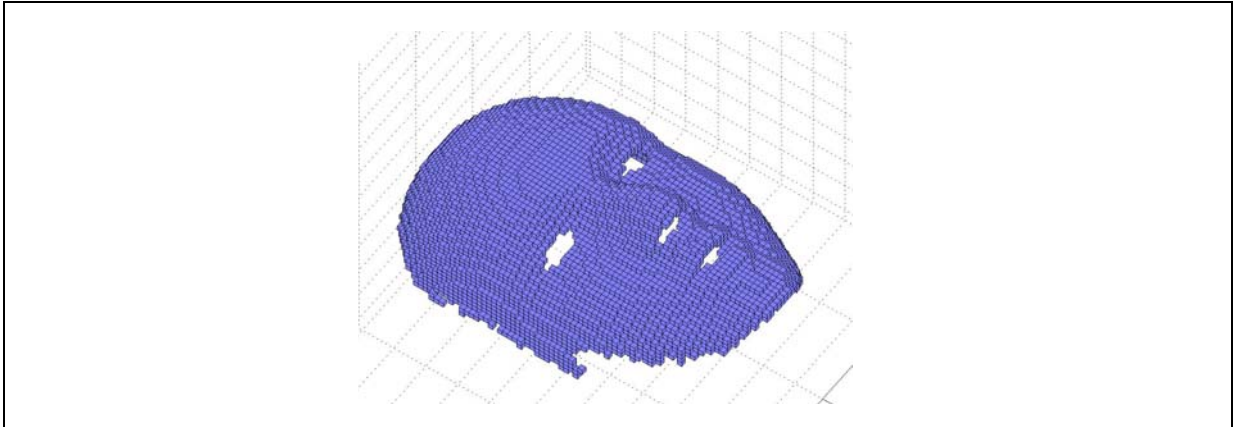


Figure 22 : Résultat de la voxelisation à 4x4x4 mm.

L'identification des lignes caractéristiques est réduite dans cette étude à l'identification des bords 3D : bords de trous ou encore bords de pièce. Ainsi, seuls les points caractéristiques de type 6 sont recherchés sur le nuage de points des barycentres. Le résultat de l'application de l'algorithme est présenté sur la figure 23 avec une valeur seuil $A_{max} = 22.524 \text{ mm}^2$ définie à partir de la taille du plus petit trou réel à identifier.

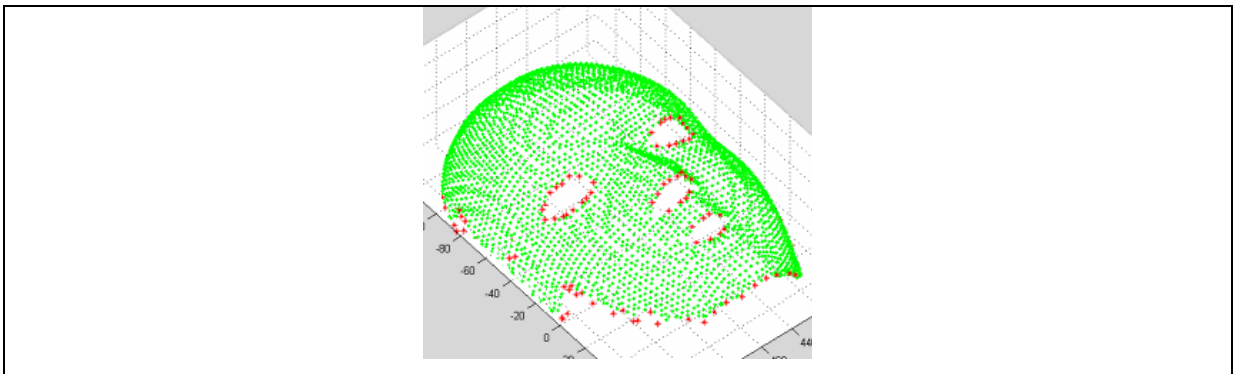


Figure 23 : Identification des points caractéristiques

On constate que les points caractéristiques correspondent aux contours attendus. En particulier, on note que les contours des trous réels, au niveau des yeux sont clairement identifiés.

L'algorithme d'évaluation de la qualité au sens du bruit de mesure a été appliqué. La figure 24 montre le résultat de l'évaluation. On constate qu'une grande partie de la surface présente des valeurs de δ -bruit acceptables, de l'ordre de 0.01mm à 0.02mm. Comme cela était attendu, ce sont les voxels des régions les plus au bord de la surface (normale parallèle à X) qui sont les plus bruités, jusqu'à 0.07 mm pour certaines. Comme le montre la figure 24, l'application de la valeur seuil δ_{th} permet de distinguer les zones ne satisfaisant pas à

l'exigence de qualité au sens du bruit (en rouge foncé sur la figure 24b).

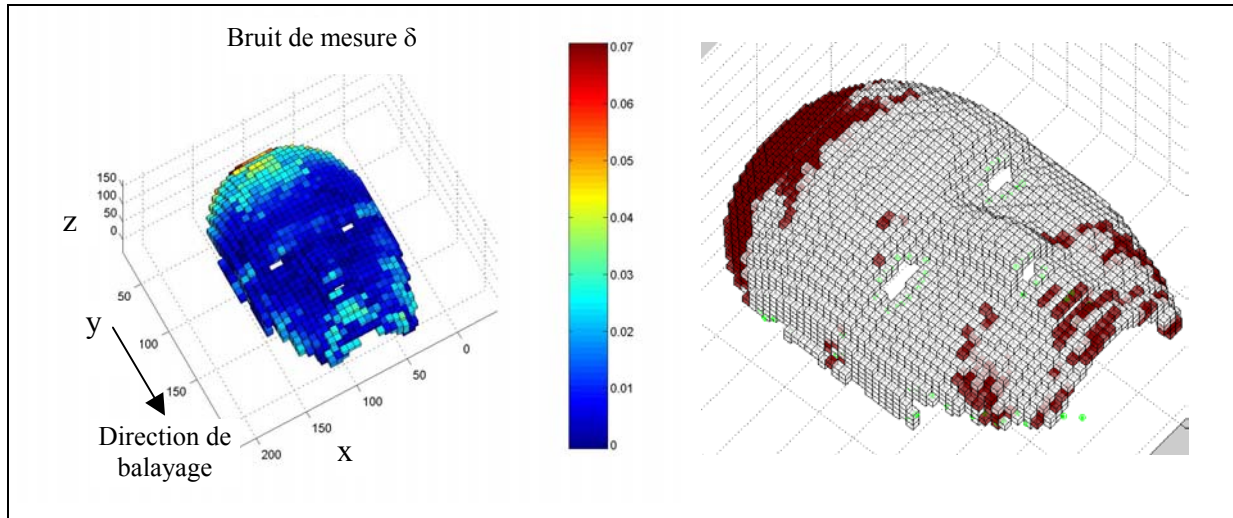


Figure 24 : *Evaluation de la qualité au sens du bruit de mesure*

Nous réalisons ensuite l'évaluation de la qualité au sens de la complétude. Nous appliquons la triangulation telle que définie au §3.3.2. Il en résulte 3524 triangles dont l'aire moyenne calculée est de $A_{moy} = 5.631 \text{ mm}^2$. Conformément à l'équation 4.4, la valeur de A_{max} a été calculée par : $A_{max} = \lambda \cdot A_{moy}$, avec $\lambda = 4$. Le coefficient d'élargissement λ a été choisi en fonction de la taille du plus petit trou réel de la pièce. Comme le montre la figure 25 nous avons identifié huit zones ne satisfaisant pas l'exigence de complétude imposée.

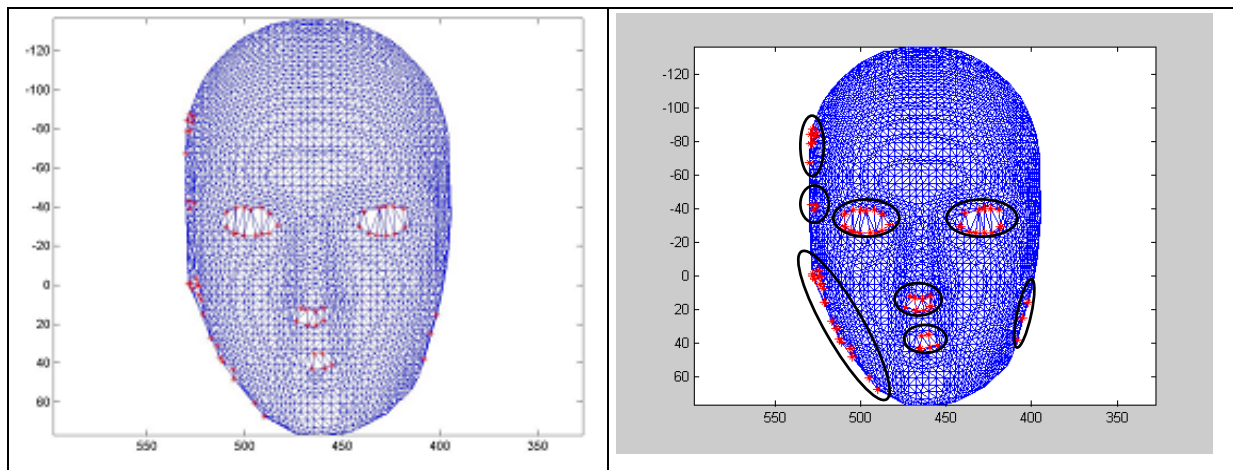


Figure 25 : *Identification des zones à re-numériser au sens de la complétude*

Nous avons appliqué à chacune de ces zones, la numérisation intelligente avec pour objectif principal de garantir la complétude pour ces zones tout en limitant le bruit de numérisation à la valeur seuil. Il faut noter que cette étude devrait être complétée d'une numérisation intelligente des zones ne satisfaisant pas au critère de qualité au sens du bruit.

La démarche en serait identique.

5.3. Numérisation intelligente

La figure 26 présente le résultat de l'application de l'algorithme aux voxels contours délimitant le contour de l'œil gauche du masque. Lorsque l'on parcourt les 14 voxels de la ligne caractéristique, hormis le voxel 10 pour lequel la normale semble aberrante, l'orientation selon la normale n_{vox1} permet de respecter $\alpha < 60^\circ$, et ainsi le critère de bruit (tableau 1). Ce qui nous permet d'en déduire la trajectoire de numérisation. Cependant, compte tenu de la largeur des trous au regard de la largeur de la bande de numérisation, il semble plus judicieux ici de réaliser la numérisation intelligente selon la méthode simplifiée.

	Nx=Vx	Ny=Vy	Nz=Vz	Lx	Ly	Lz	A	B
1	0.2513	0.6307	0.7357	-0.7433	-0.3568	0.5658	42.6351	68.2740
2	0.3070	0.4810	0.8218	-0.9545	0.0242	0.2971	34.7322	57.4551
3	0.2461	0.5300	0.8115	-0.9683	0.2001	0.1495	35.7581	65.0938
4	0.2223	0.5481	0.8063	-0.9197	-0.1192	0.3741	36.2607	67.9269
5	0.2145	0.6329	0.7445	-0.8361	0.5193	-0.1767	41.8820	71.2789
6	0.1789	0.6302	0.7566	-0.5555	0.7786	-0.2921	40.8321	74.1526
7	0.3246	0.1873	0.9291	0.7471	0.6299	-0.2122	21.7018	29.9851
8	0.2038	-0.0926	0.9750	0.9652	0.2147	-0.1496	12.8315	24.4416
9	0.1488	-0.0154	0.9888	0.9800	0.1271	-0.1529	8.5730	5.9237
10	0.1237	-0.5371	0.8606	0.9596	-0.0076	-0.2811	30.6162	77.0315
11	0.2839	-0.1909	0.9412	0.9159	-0.1523	-0.3715	19.7393	33.9137
12	0.4339	0.0225	0.9023	0.8565	-0.3041	-0.4171	25.5320	2.9666
13	0.3830	0.0309	0.9296	0.7208	-0.6052	-0.3380	21.6313	4.6049
14	0.4044	0.0306	0.9149	-0.0053	-0.9035	0.4286	23.8144	4.3339

Tableau 1 : Normales aux voxels et directions des lignes caractéristiques

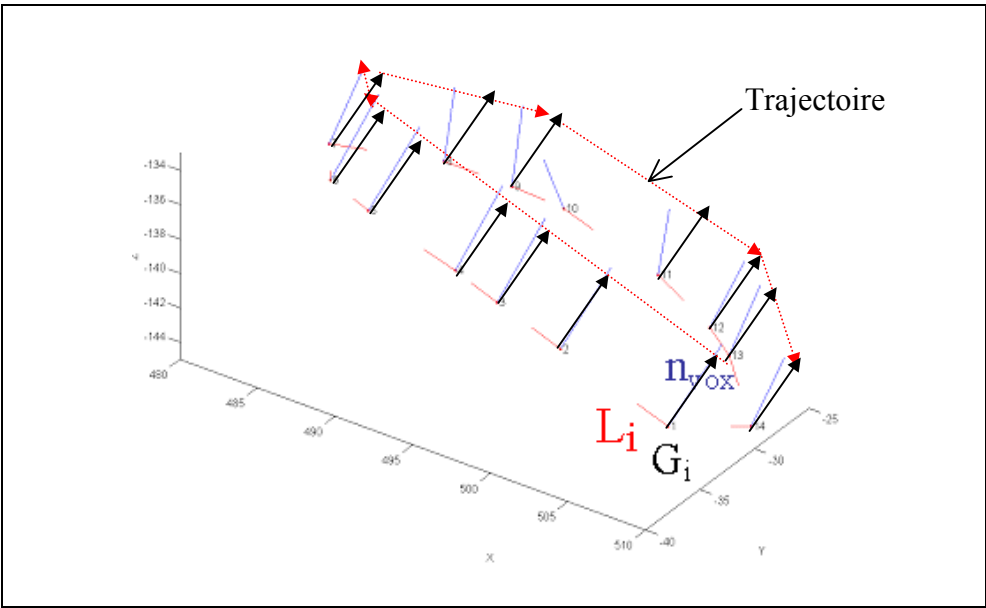


Figure 26 : Calcul de trajectoire intelligente pour le contour de l'œil

Pour chacune des régions concernées, le plan des moindres carrés est associé au barycentre $\{G_{ij}\}$ délimitant le contour de la région (figure 27b). Le tableau de la figure 27a regroupe les coordonnées des normales calculées pour chaque zone.

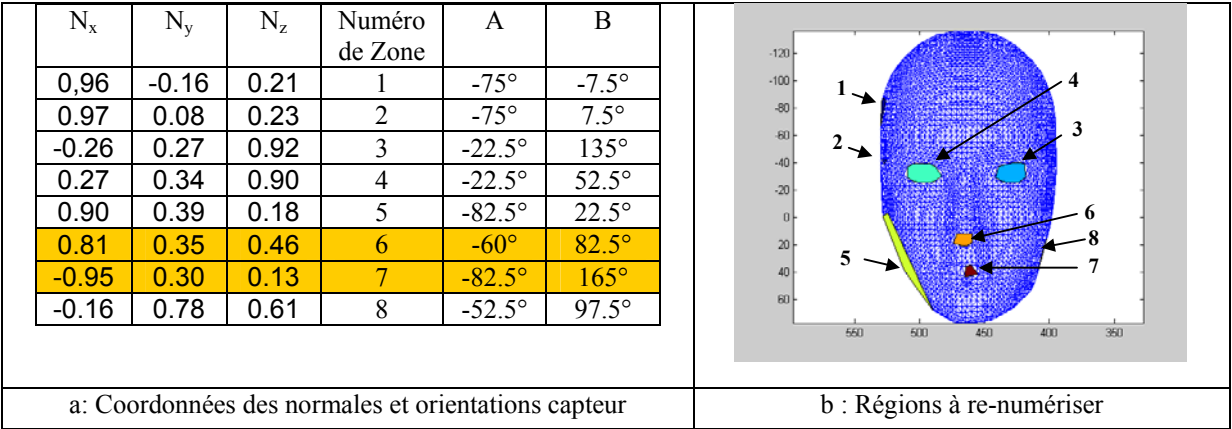


Figure 27 : Calcul des normales et orientations capteur associées.

Pour chaque orientation capteur calculée une nouvelle numérisation devrait être réalisée. Cependant le résultat conduit à huit nouvelles orientations, ce qui n'est pas compatible avec la contrainte de minimisation du nombre de réorientations capteur. Dans l'objectif d'optimiser la trajectoire, nous cherchons le nombre minimum d'orientations qui permettent de respecter les contraintes de chaque trou. Il en résulte deux orientations qui permettent de re-numériser l'ensemble des huit trous. Il s'agit des orientations calculées pour les régions 6 et 7.

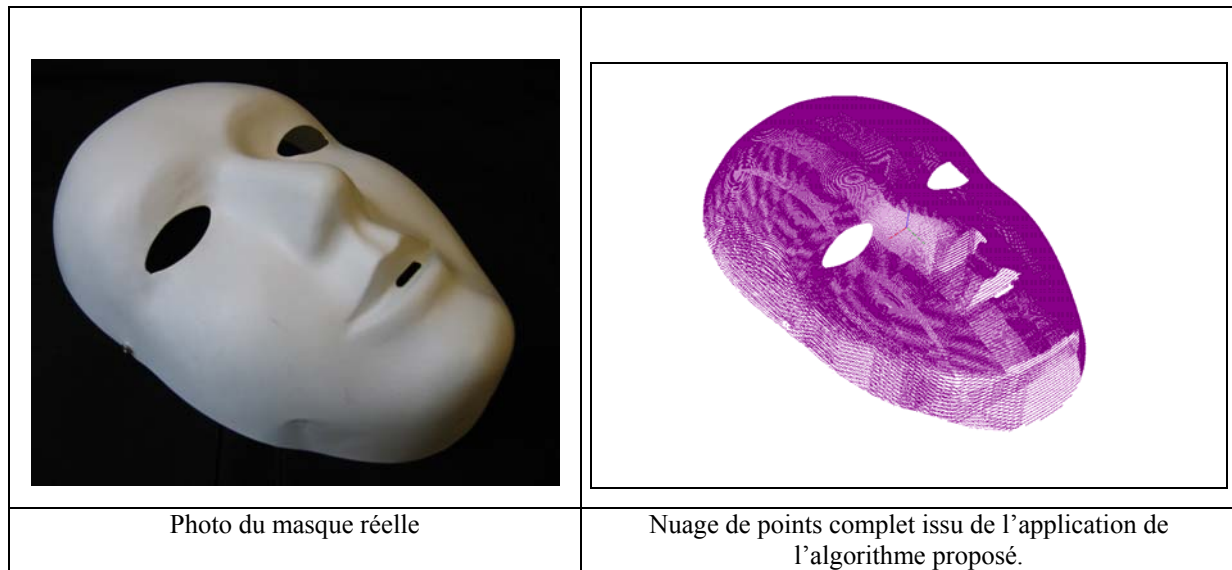


Figure 28 : Résultat de la re-numérisation intelligente

Après la réalisation de la nouvelle numérisation suivant la trajectoire de numérisation établie, il est facile de constater que les lacunes de complétude sont comblées. Les seuls trous encore visibles correspondent à des trous réels du masque.

Il faut ici noter que si la majorité des calculs sont réalisés de manière automatique, les prises de décision restent pour l'instant à l'initiative de l'opérateur. De même, le système de numérisation dans son état actuel ne permet pas la gestion des trajectoires de façon simple par le logiciel de numérisation. Celles-ci sont donc réalisées manuellement et de manière discontinue à partir des situations relatives capteur/surface calculées. Ces différents points devront bien évidemment être développés par la suite.

6. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons introduit une démarche globale de numérisation d'objet inconnu. Cette démarche se base sur une première numérisation quelconque du nuage de points. L'objectif est alors d'amener une amélioration de la qualité du nuage de points issu de cette première numérisation. La réflexion menée se base sur les caractéristiques du système de numérisation utilisé : une MMT équipée d'un capteur laser plan monté sur une tête orientable. Ainsi, le déplacement du capteur se fait à orientation fixe.

La démarche présentée se compose de deux étapes principales : le pré-traitement des données et la génération de trajectoire de numérisation intelligente. Ainsi, au cours de l'étape de pré-traitement, le nuage de points résultant de la première numérisation est structuré selon

une modélisation volumique par voxelisation. Chaque voxel reconnu non vide contient un ensemble de points numérisés à partir desquels on calcule un ensemble d'attributs tels le barycentre et la normale au plan associé aux points du voxel selon le critère des moindres carrés. Ainsi, il est possible de substituer chaque voxel est par ses deux attributs. Le nuage de points est ensuite qualifié vis-à-vis du bruit de numérisation et de la complétude. Parallèlement, il est possible d'effectuer une recherche des points caractéristiques définissant les lignes de style, les arêtes vives ou encore les bords de trous Une analyse est alors menée pour identifier les zones du nuage nécessitant une re-numérisation vis-à-vis d'un critère de qualité donnée. Une attention plus particulière est donnée aux lignes caractéristiques.

La génération de la trajectoire de numérisation intelligente conduit à la définition de position et d'orientation du capteur garantissant une qualité donnée. Dans cette étude, nous avons envisagé plus spécifiquement la qualité en terme de complétude et de bruit de numérisation. Une situation admissible du capteur est définie parmi les situations atteignables dans l'espace de la MMT par son orientation optimale ainsi que par son vecteur positionnement. Afin de répondre au besoin de qualité, l'orientation du capteur est contrainte par l'angle et la distance de numérisation vis-à-vis de chaque voxel à re-numériser. La position optimale du capteur est alors obtenue en positionnant le barycentre du voxel sur l'axe de symétrie de la fenêtre de mesure à une distance d en accord avec l'intervalle admissible de la distance de numérisation. La re-numérisation d'une ligne caractéristique passe par la re-numérisation des voxels contour la contenant. Ainsi la trajectoire de numérisation intelligente est définie par la succession des positions et orientations optimales calculées pour chaque voxel. Deux algorithmes pour le calcul de la trajectoire ont été présentés. Un premier d'application générale et un deuxième simplifié destiné aux nuages de points présentant des trous d'une taille réduite par rapport à la trace laser.

Une application nous a permis d'illustrer les deux algorithmes montrant leur bon fonctionnement. Cependant, comme nous l'avons précisé, ce travail doit être complété par une réelle automatisation de la démarche qui passe par son intégration dans des logiciels permettant le pilotage en automatique du capteur. Il faudra alors s'intéresser à la gestion des collisions et des trajectoires capteur hors numérisation.

Conclusion

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire se situent dans le cadre de la numérisation 3D d'objets de formes inconnues à l'aide de capteurs laser plan. Nous nous sommes placés du point de vue de l'utilisateur d'un système de numérisation sans contact qui doit exploiter au mieux les performances de son système pour la numérisation de formes. Ainsi, dans un premier temps nous avons essayé de répondre aux deux problèmes suivants :

- Comment évaluer simplement la capacité d'un système de numérisation sans contact à numériser au mieux selon une qualité donnée.
- Comment utiliser la connaissance des capacités du système dans la définition de stratégie de numérisation automatique d'objets inconnus.

Pour l'évaluation des performances du système de numérisation, nous proposons un protocole expérimental d'évaluation des capacités d'un système de numérisation au travers d'un ensemble de procédures. Ce protocole débute par une étape de modélisation du système qui permet de mettre en avant les grandeurs significatives et les paramètres de réglage influant sur les performances. Les procédures alors présentées permettent une identification et une évaluation du bruit de numérisation en fonction de l'angle et de la distance de numérisation définissant ainsi des domaines de fonctionnement admissibles. Le protocole est complété par des procédures d'évaluation de la justesse, de la justesse relative et de la fidélité. Ceci permet d'avoir une estimation de l'exactitude du système utilisé selon un point de vue plus métrologique. Compte tenu du rôle essentiel de la procédure de positionnement et de l'utilisation systématique des résultats qui en découle, nous avons présenté une procédure de validation de cette étape. Il est essentiel de noter ici que les procédures expérimentales proposées sont volontairement simples, basées sur la mesure d'artefacts de type plan ou sphère et reproductibles d'un système de numérisation à l'autre. Elles permettent en outre de rendre compte de l'influence de la variation des paramètres les plus significatifs de la numérisation.

L'ensemble du travail présenté peut trouver son application auprès des usagers des systèmes de numérisations. Il est ainsi possible d'utiliser les procédures de qualification présentées ici afin de valider les capacités d'un système vis-à-vis d'une application (inspection rapide, copiage de forme, retro-conception), d'effectuer une suivie des dérives éventuelles des capacités du système dans le temps, d'effectuer une étude comparative...

Dans le cadre de la problématique générale de cette thèse les résultats précédents sont intégrés à la démarche de numérisation intelligente de pièces inconnues. Nous avons en effet basé notre démarche sur la connaissance des capacités du système de numérisation pour la définition d'une stratégie de numérisation intelligente conduisant à une qualité attendue. A partir du protocole, il est en effet possible de définir un espace admissible des grandeurs liées à la génération de trajectoire (distance de numérisation, angle de numérisation et direction de balayage) au regard de la qualité attendue. Le point d'entrée de la démarche est une première numérisation dont la réalisation est libre conduisant à un nuage de points qui permette d'entamer la phase d'analyse et de traitement. L'analyse consiste à évaluer la qualité du nuage de points en terme de complétude et de bruit de numérisation. Cette analyse s'appuie sur une modélisation volumique du nuage par voxels. L'étape de test consiste en l'évaluation du nuage de points vis à vis de l'exigence de qualité attendue.

La phase de génération de trajectoire intelligente, envisagée si l'exigence qualité n'est pas atteinte, permet de définir la succession de situations admissibles capteur/surface permettant de numériser une succession de voxels. Une situation admissible du capteur est définie parmi les situations atteignables dans l'espace de la MMT par son orientation optimale ainsi que par son vecteur position. Afin de répondre au besoin de qualité, l'orientation du capteur est contrainte par l'angle de numérisation et la distance de numérisation vis-à-vis de chaque voxel à re-numériser. La trajectoire de numérisation intelligente est générée selon les lignes dites « lignes caractéristiques », qui sont en général des lignes de style, lignes de contour ou encore bords de trous. Nous avons montré que dans le cas des trous de numérisation de faibles dimensions, la trajectoire peut être simplifiée sous forme d'un balayage simple pour une orientation capteur aussi normale que possible au plan défini par le trou considéré.

Ainsi, l'utilisateur dispose d'outils et de procédures associées au traitement des nuages de points acquis par numérisation sans contact :

- Modélisation volumique des données : représentation par voxels et attributs associés
- Evaluation de la précision du système : justesse, justesse relative et fidélité
- Evaluation des paramètres influents sur le bruit de numérisation : angle et distance de numérisation

- Evaluation de la complétude : identification des lacunes de numérisation et des orientations optimales de re-numérisation
- Planification de trajectoires intelligentes sur lignes caractéristiques

Les perspectives de ce travail sont diverses, que ce soit au niveau de la partie consacrée à l'évaluation de la qualité qu'à celle consacrée à la numérisation intelligente. Dans le premier cas, il s'agit d'une part de valider la pertinence du protocole d'évaluation des performances des systèmes et d'autre part de compléter le protocole par la prise en compte de nouveaux indicateurs ou encore par l'expertise de l'influence croisée des grandeurs. Pour valider la pertinence du protocole, il devra être testé par d'autres utilisateurs. Le domaine d'application qu'est l'inspection en ligne nous semble particulièrement intéressant à creuser. Il serait en particulier opportun d'envisager une formalisation plus en adéquation avec les capacités de la numérisation sans contact du besoin de la qualité dans ce domaine.

Concernant la numérisation intelligente, la perspective majeure est l'intégration de la procédure proposée dans une démarche d'automatisation. Nous devons par ailleurs nous attacher à la robustesse des algorithmes utilisés de façon à compléter nos phases de tests en particulier concernant la re-numérisation basée sur un critère de bruit.

Bibliographie

- [AMA 01] M.C. Amann, T. Bosch, R. Myllyla, M. Rioux, "*Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement*". Optical Engineering, volume 40, issue 1, pp. 10-19, 2001.
- [AZE 04] S. Azernikov, A. Fisher, "*Surface reconstruction of freeform objects based on multiresolution volumetric method for distributed CAD*", Methods and Tools for Co-operative and Integrated Design, pp. 105-117, 2004.
- [AZE 04b] S. Azernikov, A. Fisher, "*Efficient surface reconstruction method for distributed CAD*", Computer-aided Design, volume 36, pp. 799-808, 2004.
- [BAH 97] A.Bahi, "*Segmentation de surfaces représentées par les nuages de points non organisés*", Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, 16 juillet 1997.
- [BAL 00] M. Balasubramaniam, P. Laxmiprasada, S. Sarmaa, Z. Shaikhb, "*Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation*", Computer-Aided Design, volume 32, pp. 261-277, 2000.
- [BER 02] A.Bernard, S.Remy, G.Ris, "*Etat d l'art des systèmes de numérisation 3D*". Acte numérisation 3D/ Human Modeling, Paris, France, avril 2002.
- [BES 92] P. J. Besl and N. D. McKay, G.Ris, "*A method for registration of 3-d shapes*". IEEE Trans. Pat. Anal. and Mach. Intel. Volume 14, issue 2, pp. 239-256, Feb 1992.
- [BIT 03] J. Bittner, P. Wonka, "*Visibility in Computer Graphics*", Journal of Environment and Planning B: Planning and Design, volume 30, issue 5, pp.729-725, 2003.
- [BOU 05] P. Bourdet, F. Thiebaut, C. Lartigue, P. Breteau, "*Evaluation des performances de la mesure par capteur optique sur Machine à Mesurer Tridimensionnelle*". 12ème Congrès International de Métrologie, Lyon, France, 20-23 juin 2005.
- [BOU 98] P. Bourdet, C. Lartigue, A. Contri, "*Les capteurs 3D état de l'art, problématique liée à la précision des systèmes de numérisation 3D*". 3ème Congrès Numérisation 3D/ Human Modeling, Paris, 27-28 mai 1998.
- [BOU 87] P.Bourdet, "*Contribution à la mesure tridimensionnelle : Modèle d'identification géométrique des surfaces, Métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, Correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles*", Thèse de doctorat Es-sciences, Université de Nancy 1, 23 juin 1987.
- [BRE 06] P. Breteau, F. Thiebaut, P. Bourdet, C. Lartigue, "*Towards an approach for rapid copying of free-form surfaces in 5-axis machining*", IDMME06, CD-Rom paper, Grenoble, France, 17-19 mai 2006.

- [CHA 05] M. Chaumont, B. Beaumesnil *"Robust and Real-time 3D-Face model extraction"*. Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'05), 2005.
- [CHA 92] G. Champleboux, S. Lavallée, P. Sautot, P. Cinquin *"Accurate calibration of cameras and range imaging Sensors: The NPBS Method"*. Proceeding of IEEE International Conference on Robotics & Automation, Nice, France, May 1992.
- [CHA 98] F. Chavand, E. Colle, *"Perception de l'environnement en robotique"*, Editions Hermès, 1998.
- [CHE 00] C. Che, J. Ni, *"A ball-target-based extrinsic calibration technique for high-accuracy 3-D metrology using off-the-shelf laser-stripe sensors"*. Precision Engineering, volume 24, issue 3, pp. 210-219, 2000.
- [CHE 92] L.L. Chen, T.C. Woo, *"Computational geometry on the sphere with application to automated machining"*. Journal of Mechanical Design, volume 114, pp. 288-295, 1992.
- [CHE 01] H.K. Chen, S.J. Hu, T.C. Woo, *"Visibility Analysis and Synthesis for Assembly Fixture Certification Using Theodolite Systems"*, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, volume 123, issue 1, pp. 83-89, 2001.
- [COL 99] R. Collins, Y. Tsin, *"calibration of an outdoor active camera system"*. Proceeding of IEEE Conference on computer vision and Pattern Recognition (CVPR'99), pp. 528-534, 1999
- [CON 02] A.Contri, *"Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques"*, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 28 novembre 2002.
- [CON 02b] A.Contri, P. Bourdet, C. Lartigue *"Quality of 3D digitised Points Obtained with Non-contact optical Sensor"*, Annals of the CIRP, volume.51, issue 1, pp. 443-446, 2002.
- [COR 04] H. Cornelius, R. Sara, D. Martinec, T. Pajdla, O. Chum, J. Matas *"Towards Complete Free-Form Reconstruction of Complex 3D Scenes from an unordered Set of Uncalibrated Images"*. SMVP 2004, LNCS 3247, Springer, pp. 1-12, 2004.
- [DAS 02] D. Dastarac *"Industrial X-ray tomography: services and industrial applications"*. Acte numérisation 3D/ Human Modeling, Paris, France, avril 2002.
- [DER 05] W. Derigent, R. Harik, G. Ris *"Détermination des directions de visibilité par opérations volumiques"*. 9^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, France, 5-8 avril 2005.
- [DHA 03] S. Dhaliwal, S.K. Gupta, J. Huang, A. Priyadarshi, *"Algorithms for Computing Global Accessibility Cones"*, ASME Journal of Computing and Information Science In Engineering, volume 3, issue 3, pp. 200-209, 2003.

- [DJE 98] Djeapragache, " *Les capteurs 3D état de l'art*". 3ème Congrès Numérisation 3D/ Human Modeling, Paris, 27-28 mai 1998.
- [DOC76] M.P. DoCarmo, " *Differential Geometry of Curves and Surfaces* ", Prentice-Hall, 1976.
- [ELB 98] G. Elber, E. Zussman, " *Cone visibility decomposition of freeform surfaces* ", Computer-Aided Design, volume 30, issue 4, pp. 315-320, 1998.
- [ELH 95] S.F. El-Hakim, J.-A. Beraldin and F. Blais, " *A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-D vision systems*", Proc.: St. Petersburg great Lakes Conference on Digital Photogrammetry and Remote Sensing, St. Petersburg, Russia (in press, SPIE), 1995
- [ELL 05] M.M. Ellenrieder, L. Krüger, D. Dtössel, M.Hanheide, " *A Versatile Model-based Visibility Measure for Geometric Primitives*", 14 th SCIA, Lecture Note in Computer Science, Springer, volume 3540, pp 669-678, 2005.
- [FEN 01] H.Y. Feng, Y. Liu, F. Xi, " *Analysis of digitizing errors of a laser scanning system*", Precision Engineering, volume 25, pp. 185-191, 2001.
- [FIS 04] R. B. Fisher, " *Applying knowledge to reverse engineering problems*", Computer-Aided Design, volume 36, pp. 501-510, 2004.
- [FLI 02] A. Flisch, J. Hofmann, A. Obrist, T. Lüthi, P. Thurner, P. Wyss. " *3D Digitizing based on X-ray computed Tomography: state of Art and Evolution*", Acte numérisation 3D, Paris, France, avril 2002.
- [FOL 95] J. Foley, " *Computer graphics: principals and practice. Reading* ", MA: Addison-Wesley, 1995.
- [FRA 05] R. Fransens, C. Strecha, L. van Gool, " *Parametric Stereo for Multi-Pose Face Recognition and 3D-Face Modeling* ", IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Face and Gestures, ICCV-2004, Beijing China, October 2005.
- [GAL 04] L.M. Galantucci, G. Percoco, " *Registration of point clouds by means of genetic algorithms* ", 4th CIRP Int. Sem.-Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME '04), Sorrento, Italia, pp. 657-662, 30 June-2 July 2004.
- [GAN 94] J.G Gan, T.C. Woo, K. Tang, " *Spherical maps: Their construction, Properties and Approximation* ". ASME Journal of Mechanical Design, Volume 116, pp. 257-263, 1994.
- [GON 03] J-P Gonnet, J-F Fontaine, D. Joannic, " *Nouvelle approche du contrôle tridimensionnel par mesurage sans contact* ", 16^{ème} Congrès Française de Mécanique, Nice, France, 1-5 septembre 2003.

- [GOU 99] F. Goulette, "*Modélisation 3D automatique, outils de géométrie différentielle pour la construction automatique de modèles CAO*". Science Mathématique et Informatique, Les presses de l'Ecole des Mines de Paris, 1997.
- [GUE 03] P. Guermeur, J. Louchet. "*An Evolutionary Algorithm for Camera Calibration*". Proceeding of International Conference on Robotics Distance Learning & Intelligence Communication Systems (ICRODIC'03), Rethymno, Greece, pp. 799-804, October 2003.
- [HAR 92] C. Harris, "*Camera Calibration*", Tech. Rep., Roke Manor Research, Siemens, UK 1992.
- [HOP 92] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, W. Stuetzle, "*Surface Reconstruction from Unorganized Points*", Computer Graphics, volume 26, issue 2, pp. 71-77, 1992.
- [HUA 00] MC. Huang, CC. Tai, "*The Pre-Processing of Data Points for Curve Fitting in Reverse Engineering*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 16, pp. 635-642, 2000.
- [IAS 05] Institut d'Astrophysique spatiale, Université de Paris XI, CNRS.
mise en ligne le 5 janvier 2005
Consultable sur : <http://www.ias.u-psud.fr/erard/taf/docs>
Consulté le 14 décembre 2005.
- [IZQ 99] M.A.G. Izquierdo, M.T. Sanchez, A. Ibañez, L.G. Ullate, "*Sub-pixel measurement of 3D surfaces by laser scanning*". Sensors and Actuators A: Physical, volume 76, issues 1-3, pp. 1-8, Elsevier, 30 August 1999.
- [KIM 95] D.S. Kim, P. Y. Papalambros, T. C. Woo, "*Tangent, normal, and visibility cones on Bézier surfaces*". Computer Aided Geometric Design, volume 12, issue 3, pp.305-320, 1995.
- [KOE 79] J. J. Koenderink and A. J. van, "*The internal representation of solid shape with respect to vision*", Biol. Cybern, volume 32, pp. 151-158, 1979.
- [KOS 01] D.Kosmopoulos, T. Varvarigou, "*Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular reflection*", Computers in Industry, volume 46, pp. 49-63, Elsevier, 2001.
- [LAR 01] C. Lartigue, "*Processus de réalisation des pièces de forme complexe. Une approche géométrique, de la conception à la fabrication*". Habilitation à diriger les recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.
- [LAR 02] C. Lartigue, A. Contri, P. Bourdet, "*Digitised point quality in relation with point exploitation*", Mesurments, volume 32, pp 193-203, Elsevier, 2002.
- [LAR 04] C. Lartigue, P. Bourdet, L. Mathieu, C. Mehdi-Souzani, "*Algorithms for the Calibration of Laser-Plane Sensor on CMMS*", Advanced Mathematical and

- Computational Tools in Metrology VI, volume 66, pp. 82-97, World Scientific, 2004.
- [LAR 04b] C. Lartigue, P. Bourdet, "*Qualité des données issues de numérisation 3D par moyens optiques : sources d'incertitudes et qualification*", 10ème Assises Européennes du Prototypage Rapide, Paris (France), 14-15 septembre 2004 Prototypage rapide.
- [LAZ 03] D. LAZARO, "*Validation de la plate-forme de simulation GATE en Tomographie d'Émission Monophotonique et application au développement d'un algorithme de reconstruction 3D complète*", thèse de doctorat, UNIVERSITE BLAISE PASCAL, 30/10/2003.
- [LEE 00] K. Lee, H.P. Park, *Automated inspection planning of free form shape parts by laser scanning*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, volume 16, pp. 201-210, 2000.
- [LI 96] M. Li, J.M. Lavest, "*Some aspects of Zoom lens Camera Calibration*". IEEE Transaction on PAMI, volume 18, issue 11, pp. 1105-1110, 1996.
- [LI 02] L. Li, N. Schemenauer, X. Peng, Y. Zeng, P. Gu, "*A reverse engineering system for rapid manufacturing of complex objects*", Robotics and Computer Integrated Manufacturing, volume 18, pp. 53-67, Pergamon, 2002.
- [LI 05] Y.F. Li, B. He, P. Bao, "*Automatic view planning with self-termination in 3D object reconstructions*", Sensors and Actuators A, 122, pp. 335-344, 2005.
- [LOR 87] W. Lorensen, H.E. Cline, "*Marching Cubes: a high resolution 3D Surface Construction Algorithm*", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'87), volume 21, pp.163-169, 1987.
- [MAR 05] F.A.R. Martins, J.G. Garcia-Bermejo, E.Z. Casanova, J.R.P. Gonzalez, "*Automated 3D surface scanning based on CAD model*", Mechatronics, vol 15, pp. 837-857, 2005.
- [MAS 98] N. Massios, R. Fisher, "*A best Next view algorithm incorporating a quality criterion*", Proceeding of 9th British Machine Vision Conference, Southampton, U.K, 1998.
- [MEH 05] C. Mehdi-Souzani, C. Lartigue, F. Thiébaud, P. Bourdet, "*Evaluation de la performance des systèmes optiques de numérisation 3D – Application à la numérisation automatique intelligente*", Acte 3D Modelling, Paris, France, 27-28 septembre 2005.
- [MEN 98] P. Ménégazzi, S. Henriot, A. Dupont, N. Martineau, "*Utilisation de la tomographie scanner X pour le contrôle et l'analyse de pièces moteur complexe*", Acte numérisation 3D, Paris, France, Mai 1998.

- [MEY 02] A.Meyer, *"Segmentation de nuage de points suivant les lignes caractéristiques"*, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 07 juin 2002.
- [MEY 04] A.Meyer, P. Marin, *"Segmentation of 3D triangulated data points using edges constructed with a C1 discontinuous surface fitting"*, Computer-Aided Design, volume 36, pp. 1327-1337, 2004.
- [OBS 04] L'Observatoire de Paris, Astrophysique sur mesure " *Projet campus numérique : fenêtre sur l'univers* ". mise en ligne septembre 2004
Consultable sur : <http://media4.obspm.fr/public/FSU>
Consulté le 14/12/2005.
- [OST 98] G. Osty, C.Lartigue, *"Partition of 3D digitised data for CAD modelling"*. International Journal of CAD/CAM and Computers Graphics , volume 13, issue 4-5-6, pp 263-272, 1998.
- [OST 02] G. Osty, *"Extraction de particularités géométrique sur données discrètes issues de la numérisation : partitionnement de grand nuage de points"*, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 10 janvier 2002.
- [PAP 97] D. Papadopoulos, *"Numérisation géométrique automatique à l'aide d'un capteur 3D de précision à profondeur de champ réduite"*, thèse de doctorat, ENST, 14 février 1997.
- [PRI 03] F. Prieto, R. Lepage, P. Boulanger, T. Redarce, *"a CAD-based 3D data acquisition strategy for inspection"*, Machine Vision and Applications, volume 15, pp. 76-91, 2003.
- [PRI 99] F. Prieto, *"Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact"*, Thèse de doctorat, INSA, Lyon, 13 décembre 1999.
- [REM 02] S.Remy, A. Bernard, G. Ris, *"numérisation automatique basée sur le concept de visibilité"*, IDMM, CD-Rom paper, Clermont-Ferrand, France, 14-16 mai 2002.
- [REM 04] 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, Nancy I, 25 juin 2004.
- [RES 05] J. A. Restrepo Specht, *"Modélisation d'objets 3D par construction incrémentale d'un maillage triangulaire, dans un contexte robotique"*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 31 janvier 2005.
- [RIO 87] M. Rioux, G.H Bechthold, D.G. Taylor, M.D. Duggan, *"Design of a large depth of view three-dimensional camera for robot vision"*, Optical Engineering, volume 26, issue 12, pp. 1245-1250 1987.
- [SAL 02] J. Salvi, X. Armangué, J. Batlle, *"A comparative review of camera calibration methods with accuracy evaluation"*. Pattern Recognition, N° 35 (1), pp. 1617-1635, Elsevier Science, 2002.

- [SCH 02] N. Schuhmann, L.I. Bolboaca, "*Industrial Computed Tomography for Reverse Engineering Application*". Acte numérisation 3D/ Human Modeling, Paris, France, avril 2002.
- [SCO 03] W. Scott, G. Roth, J.F. Rivest, "*View Planning for Automated 3D object Reconstruction and Inspection*". The ACM Computing Surveys, 35 (1), pp 64-96. 03/2003, NRC 45866.
- [SON 02] S. Son, H. Park, K.H. Lee , *Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, volume 42, pp. 889-897, 2002.
- [SPI 99] S.N Spitz, A.J. Spyridi, A.A.G. Requicha, " *Accessibility Analysis for Planning of Dimensional inspection With Coordinate Measuring Machines* ", IEEE Transaction on Robotics and Automations, volume 15, issue 4, pp. 714-727, 1999.
- [SPY 90] A.J. Spyridi, A.A.G. Requicha " *Accessibility for the automatic inspection of mechanical parts by coordinate measuring machines* ", IEEE International Conference on Robotics & Automation,, pp.1284-1289, Cincinnati (Ohio, USA), 13-18 mai 1990.
- [SRI 04] K. Sridharan, T. K. Priya, " *A parallel algorithm for constructing reduced visibility graph and its FPGA implementation* ", Journal of Systems Architecture, volume 50, issue 10, pp. 635-644, 2004.
- [STA 97] R. Stage, C. Roberts, " *A Framework for Representing and Computing Tool Accessibility* ", Proceedings of DETC'97, September 14–17, Sacramento, California, USA, 1997
- [STE 97] G. Stein, "*Lens distortion calibration using point correspondences*", Proc. IEEE Conference on computer Vision and pattern Recognition (CVPR'97), pp. 602-608, 1997.
- [STR 04] C. Strecha, R. Fransens, L. van Gool" *A Probabilistic Approach to Large Displacement Optical Flow and Occlusion Detection*". SMVP 2004, LNCS 3247, Springer, pp. 71-82, 2004.
- [TOR 04] B. Tordoff, D.W. Murray, " *The impact of radial distortion on the self-calibration of rotating cameras* ", Computer Vision and Image Understanding, volume 96, pp.17-34, Elsevier, 2004.
- [TRU 97] E. Trucco, M. Umasuthan, A. M. Wallace, V. Roberto, " *Model-Based Planning of Optimal Sensor Placements for Inspection* ", IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 13, issue 2, pp. 182-194, 1997.
- [TSA 87] R.Y. Tsai, " *A versatile camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Camera and Lens* ", IEEE journal of robotics and automation, volume RA-3, issue 4, 1987.

- [TSE 91] Y.J. TSENG, S. JOSHI, " *Determining feasible tool-approach directions for machining Bezier curves and Surfaces* ", Computer-Aided Design, volume 23, issue 5, pp. 367-379, 1991.
- [VAR 97] T. Varady, R. Martin, J. Cox, " *Reverse Engineering of geometric models-an introduction*". Computer-Aided Design, volume 29, issue 4, pp. 255-256, 1997.
- [WEI 04] J.W. Weingarten, G. Gruener, R. Siegwart, " *A state of art 3D sensor for Robot Navigation*". Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & system (IROS'04), volume 3, pp. 2155-2160 , 2004.
- [WIL 01] M. Wilczkowiak, E. Boyer, P. Sturm, " *Camera Calibration from Single Images Using Parallelepipeds*". Proceeding of the 8th Conference on computer vision, volume 1, pp. 142-148, Vancouver, Canada, 2001.
- [WIL 95] A.G. Wiley, K.W. Wong, " *Geometric calibration of zoom lenses for computer vision metrology* ", Photogrammetric Engineering and Remote sensing, Volume 61, issue 1, pp. 69-74, 1995.
- [WOO 94] T.C. Woo, " *Visibility Maps and Spherical Algorithms* ". Computer Aided Design, Volume 26, issue 1, pp. 1-6, 1994.
- [YAN 99] M. Yang, E. Lee, " *Segmentation of measured point data using parametric quadric surface approximation*". Computer-Aided Design, volume 31, pp. 449-457, 1999.
- [XI 99] F. Xi, C. Shu, " *CAD-based path planning for 3-D line laser scanning*, Computer-Aided Design, volume 31, pp. 473-479, 1999.
- [ZEX 05] X. Zexiao, W. Jianguo, Z. Qiumei " *Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system*". International journal of Machine Tools & Manufacture, volume 45, pp. 1474-1486, Elsevier, 2005.
- [TOM] Tomo Adour: www.tomoadour.com
- [GEO] Geodetic Services inc: www.geodetics.com
- [STO] Stockeryale: www.stockeryale.com
- [RIE 05] Riegl: www.riegl.com

Normes ISO

- NF ENV 13005 : " *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* ", indice de classement : X 07-020, août 1999.
- NF EN ISO 10360-4 : Spécification géométrique des produits (GPS)," *Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT)-Partie 4 : MMT utilisées en mode scanning*", indice de classement : E 11-150-4, août 2000.

NF X07-001 : Normes fondamentales" - *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* ", indice de classement : X 07-001, décembre 1994.

Annexes

ANNEXE I

Exemples des technologies de numérisation

1. Exemples de capteurs basés sur la triangulation

La **photogrammétrie** utilise la photographie comme support de mesure. La photographie reste un procédé qui transpose le monde réel 3D en une image 2D, le passage se faisant avec la perte de l'information de la profondeur. La photogrammétrie permet de remédier à cette perte d'information en recalculant la profondeur pour un point donné. Dans ce sens la même scène doit être photographiée à partir d'un minimum de deux points de vue. Idéalement un système muni de deux appareils photos ou de caméras synchronisées permettrait d'obtenir les deux points de vue simultanément et ainsi de conserver les mêmes conditions de lumière et de contraste pour l'ensemble des clichés. Ce dispositif forme un triangle dont les sommets sont composés du point recherché et des deux appareils photo. Nous avons ainsi une application du principe de la stéréovision.

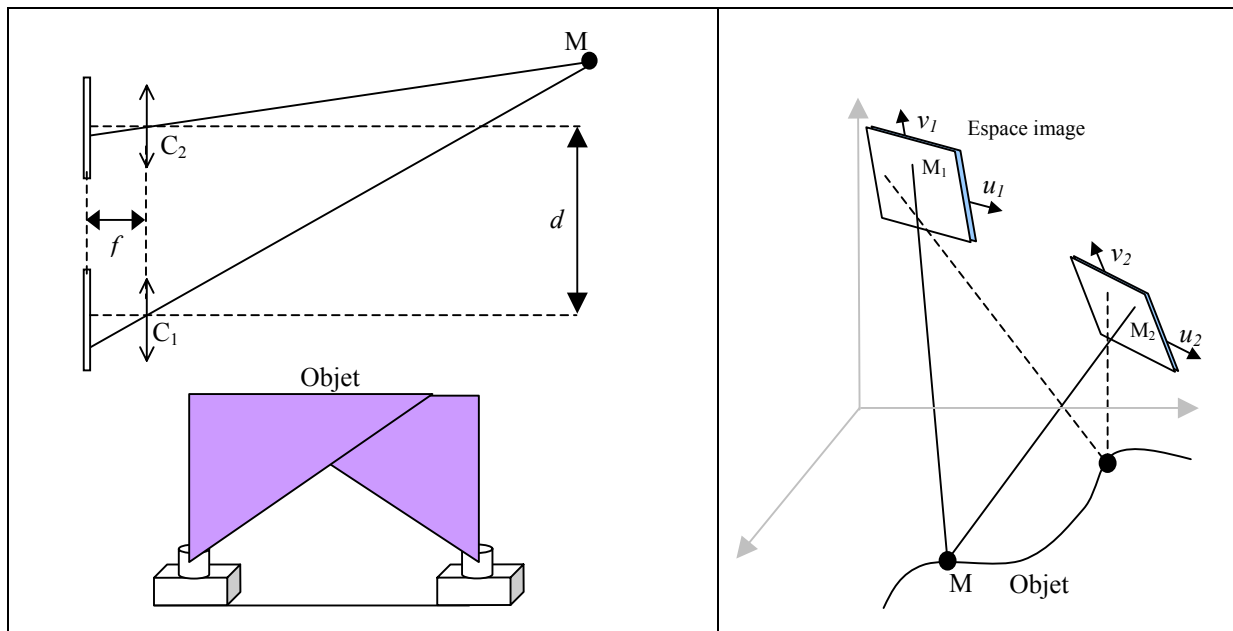


Figure 1 : Points M de l'espace observés par stéréovision

Le calcul de la position 3D du point M passe par deux étapes, la reconnaissance sur les n clichés des points M_n , image projetée du point physique M , puis le calcul des coordonnées spatiales. La première phase porte le nom d'*appariement* ou de *mise en correspondance des*

images. Une fois les points M_i repérés, leurs coordonnées (u,v) sont mesurées sur les clichés. La qualité de l'identification des M_i conditionne la qualité des coordonnées 3D déterminées par la suite. Des travaux récents [STR 04] [COR 04] [FRA 05], souvent dérivés du domaine de reconnaissance de visage, permettent une automatisation robuste de la phase d'appariement. L'automatisation est d'autant plus facilitée que la totalité des systèmes utilisent des appareils numériques générant les photos directement sous forme numérique.

La deuxième phase passe par le calcul des droites $C_n M_n$ (C_n désignant le centre optique de chaque appareil n) dont l'intersection correspond au point M recherché. Cette phase nécessite l'utilisation d'un modèle géométrique pour la caméra utilisée. A partir de plusieurs couples de coordonnées-cliché (u,v) et de la connaissance des positions respectives des appareils d'observation lors des prises de vue, les coordonnées spatiales du point M sont alors données par les équations suivantes :

$$x = d \frac{u_1 + u_2}{2\delta} \quad y = \frac{dv_1}{\delta} \quad z = \frac{df}{\delta} \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec $\delta = u_1 - u_2$ la disparité entre les abscisses mesurées [GOU 99]. Même si théoriquement deux points de vue suffisent, il n'est pas rare d'utiliser plusieurs clichés. Le problème devient alors sur-contraint et la solution est obtenue par une méthode de minimisation des paramètres de type moindres carrés. En utilisant des marquages de points caractéristiques sur l'objet à numériser ou dans la scène de mesure, il est possible de déterminer la position respective des caméras sans avoir recours à des instruments externes au système. A titre d'exemple, on peut citer Kosmopoulos qui présente une application de cette technique pour mesurer les jeux d'affleurement sur la carrosserie automobile [KOS 01] .

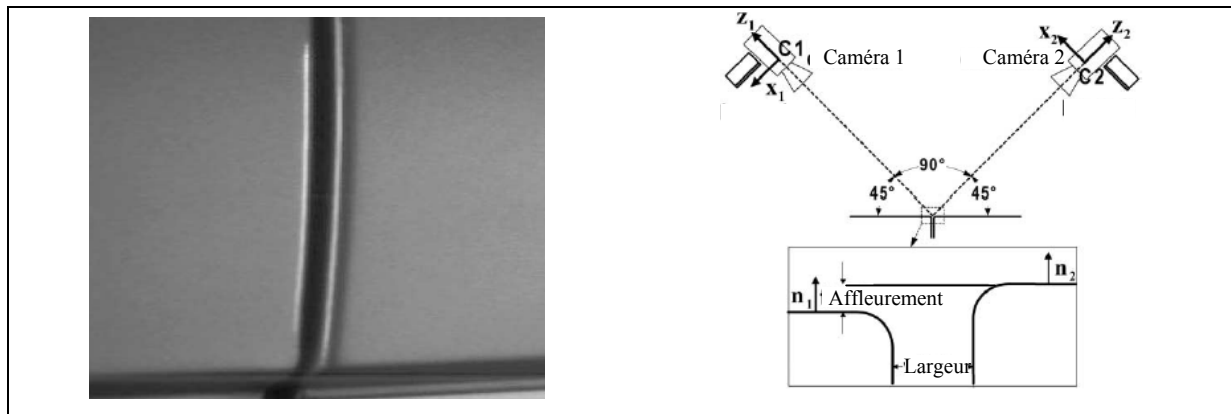


Figure 2 : Application de la photogrammétrie à la mesure de jeux d'affleurement[KOS 01]

Les **systèmes à lumière structurée** sont quant à eux basés sur l'analyse de la projection sur l'objet d'une lumière porteuse d'information géométrique [KIM 06][MEY 02]. Ces systèmes sont composés d'une source lumineuse émettrice et d'un récepteur à matrice CCD. Une lumière enrichie par adjonction de trame, de grille ou de franges est projetée sur la scène étudiée (Figure 3). La projection peut être décrite comme une image 2D composée de caractéristiques géométriques simples (bande clair-foncé...) et parfaitement connues. Le relief de la surface modifie les caractéristiques de la lumière projetée. L'image de la réflexion recueillie est alors composée d'un ensemble de courbes dont la variation d'épaisseur et d'espacement est fonction de la hauteur de la surface. L'analyse de ces variations à l'aide de la triangulation permet de déduire les coordonnées des points de la surface. Il est également possible de projeter une mire d'intensité binaire ou sinusoïdale.

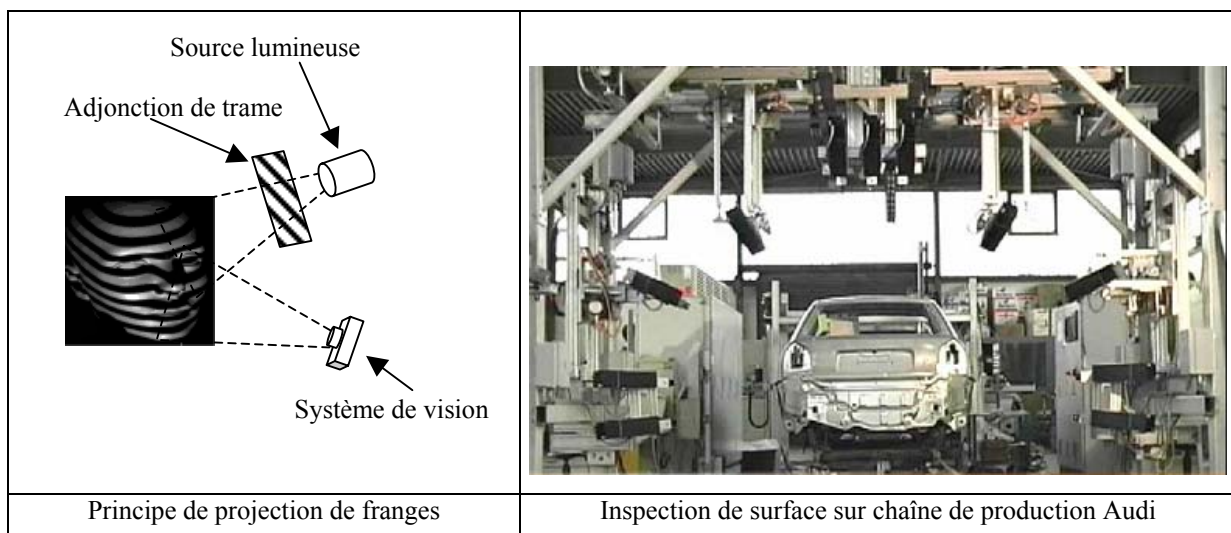


Figure 3: Capteurs à lumière structurée

L'avantage de ces systèmes est qu'ils ne nécessitent pas de déplacement du capteur si la taille de l'objet le permet : une seule prise suffit à numériser l'ensemble. Toutefois ils ont

des capacités limitées dès lors que l'objet à numériser présente une variation importante de courbure ou possède des ruptures de surface de type escalier. Il apparaît alors des zones non visibles nécessitant plusieurs numérisations. Il est intéressant de noter que ces systèmes sont déployés dans l'industrie pour le contrôle en ligne de production de grande série. On peut citer le cas de Audi qui les utilise pour des contrôles systématiques d'état de surface de la carrosserie en chaîne d'assemblage.

2. Exemples de systèmes basés sur la télémétrie

La stabilité des mesures vis-à-vis des grandes distances en fait une technique très bien adaptée pour la numérisation à grande distance [SCO 03] [AMA 01] en architecture ou pour des relevés topographiques de grande dimension. Dans le domaine du génie mécanique ils trouvent leur application pour la numérisation d'objet de grande taille tels que les avions ou des mécanismes volumineux telles que les tuyauteries de centrale atomique.

	
Capteur par temps de vol	Nuage de points coloré issu de numérisation par capteur télémétrique [RIE 05]

Figure 4 : Capteurs par temps de vol

1) Exemple de systèmes à base de tomographie (traitement d'images)

L'étymologie du mot tomographie vient du grec tomos (section) et graphein (écrire). Le principe de ce type de système est l'acquisition d'un ensemble d'images de différentes sections de l'objet étudié. Les images obtenues sont des images plans 2D d'une coupe de l'objet. La combinaison spatiale des images 2D obtenues avec différents angles de vue permet de construire une image 3D (figure 5). La qualité de l'image 3D restituée dépend directement de la taille des images 2D, de l'épaisseur des coupes, de l'espacement entre deux sections consécutives [MEN 98] et de l'algorithme de construction 3D.

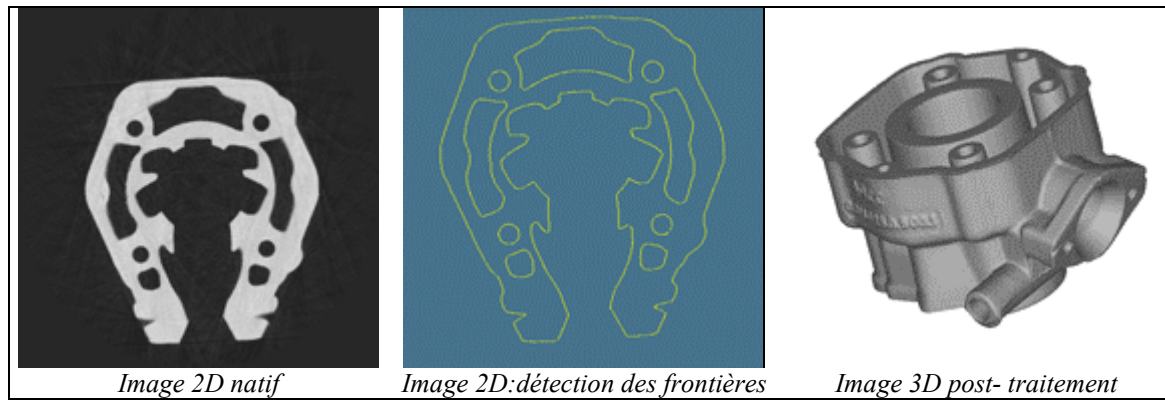


Figure 5 : Images obtenues par tomographie[TomoAdour]

Il existe différentes technologies exploitant le principe de la tomographie. Elles se différencient en particulier par le type de rayonnement utilisé, rayon X (*scanner*), rayonnement radioactif (*TEM*), onde acoustique, rayonnement électromagnétique [LAZ 03].

Dans le domaine du génie mécanique, c'est la tomographie par rayon X qui est la plus couramment utilisée. Durant la phase d'acquisition, une source émet des rayons X qui sont projetés sur l'objet à travers un collimateur dont le rôle est de sélectionner les rayons arrivant sur l'objet selon une incidence donnée [LAZ 03]. Une partie des rayons est absorbée en fonction de la densité de la matière. Le détecteur placé diamétralement à l'opposé de la source recueille les rayons atténués au travers de la pièce donnant ainsi une image 2D (figure 6).

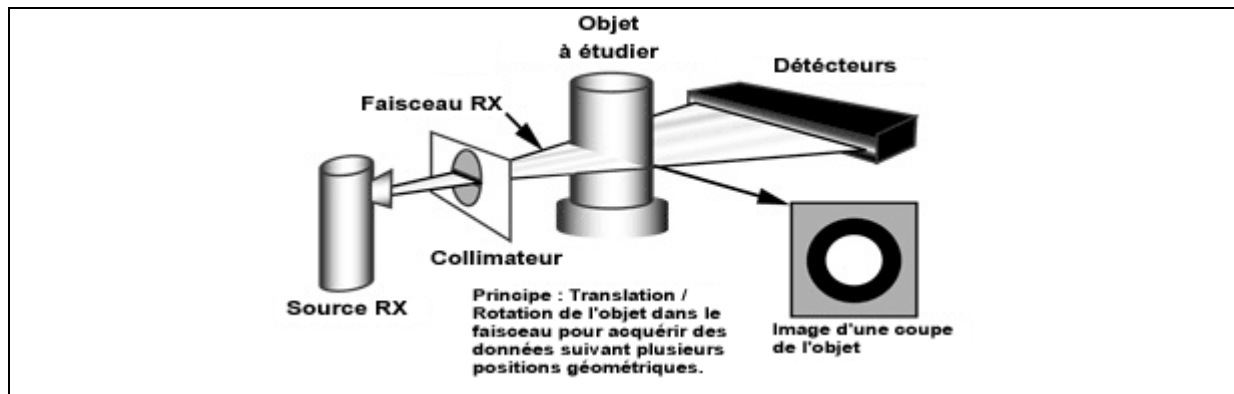


Figure 6 : Schémas de fonctionnement d'un scanner à rayon X

Le passage à l'espace 3D se fait grâce à l'utilisation de différents types d'algorithmes tels que le "marching cubes" développé par Lorensen [LOR 87]. La tomographie X est un mode de numérisation 3D sans contact non destructrice et surtout pénétrant. Il permet d'avoir une vision 3D non seulement de la géométrie externe mais également une image complète de la géométrie interne de la pièce [SCH 02]. A ce titre il est utilisé en particulier pour effectuer l'expertise des pièces obtenues par fonderie [DAS 02] [MEN 98]. Les évolutions récentes

permettent d'envisager dans certains cas de remplacer les détecteurs linéaires par des détecteurs plans. Dans ce cas, leur association à des sources d'émission capables de générer un faisceau conique permet d'obtenir des images volumiques de section 3D [FLI 02]. Ces progrès associés à l'amélioration des algorithmes de traitement d'images augmentent la résolution des appareils tomographiques. On constate ainsi un élargissement de leur champ d'utilisation dans le domaine de la mécanique, en particulier pour les pièces de petites dimensions [DAS 02]. En fonction de leur puissance énergétique (de 50 KeV à plus de 460 KeV), les scanners permettent de traiter des pièces d'épaisseur très variée (de 1mm à plus 1 m) avec une résolution pouvant atteindre le micron [FLI 02].

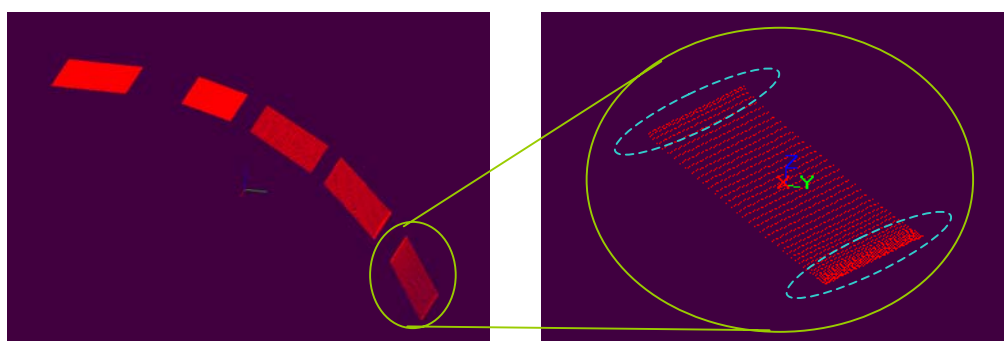
ANNEXE II

Influence de la phase d'accélération et de ralentissement du capteur sur une acquisition

Lors d'une passe de numérisation, la vitesse de déplacement du capteur varie. Cette variation peut être volontaire (obtenir une densité plus forte sur une zone donnée de la surface) ou bien la conséquence des lois de fonctionnement (électroniques, inertie de la MMT...) de la machine. Lors d'une numérisation classique (sans variation de vitesse souhaitée), le comportement de la vitesse peut être divisé en trois phases :

- La phase d'accélération : *passage de $v=0$ à $v=ct$*
- La phase de déplacement à vitesse constante : $v=ct$
- La phase de ralentissement : *passage de $v=ct$ à $v=0$*

La conséquence de cette variation est immédiatement visible sur une numérisation. Quels que soient les paramètres de réglage du capteur choisis (pas, fréquence...), on constate sur le nuage de points issu de la numérisation deux zones plus denses que le reste du nuage, le début et la fin.



Forts de ce constat nous avons souhaité quantifier l'influence de cette variation de vitesse non contrôlée sur la qualité du nuage. Dans ce sens, nous avons réalisé la numérisation d'une surface réputée plane. Le capteur a été réglé de manière suivante :

- LUT : 15
- Puissance laser : 4 mV
- Temps d'intégration : 1/250
- Distance de numérisation : 157 mm
- Angle de numérisation : 15°
- Fréquence d'émission laser : 35Hz
- Pas de numérisation : 0.5

Un seul balayage de la surface est réalisé à l'aide de la commande manuelle dont le potentiomètre est positionné sur 5. Le joystick du contrôle du déplacement est emmené en butée dès le début de la numérisation. Il en résulte un nuage composé de plus de 3800 points et d'une centaine de lignes. Nous avons alors divisé le nuage en sous-ensembles de 10 lignes. Nous avons obtenu dix sous-ensembles dont le dernier ne contient que 4 lignes.

	a	b	c	d	bruit δ -plan (mm)
plan15° (1)	-0,03034912	0,2421324	0,96976851	-84,4682809	0,0149
plan15° (2)	-0,03011157	0,26248648	0,96446573	-82,8138517	0,0143
plan15° (3)	-0,03025597	0,27065146	0,96220183	-81,9620349	0,0128
plan15° (4)	-0,03059277	0,26771422	0,96301262	-81,9639063	0,0131
plan15° (5)	-0,03059183	0,26756125	0,96305518	-81,9639063	0,0130
plan15° (6)	-0,03057979	0,26755988	0,96305594	-81,9639063	0,0134
plan15° (7)	-0,03070027	0,2663864	0,96337811	-81,963923	0,0136
plan15° (8)	-0,03073437	0,2687716	0,96271356	-81,7456329	0,0143
plan15° (9)	-0,03084771	0,2672097	0,96314454	-81,7457224	0,0190
plan15° (10)	-0,03089443	0,28550169	0,95788012	-80,2740494	0,0191
plan filtré	-0,03053197	0,27331685	0,96143976	-81,5171644	0,0137

Tableau 1: Plans des moindres carrés associés à chaque ensemble de points

Un plan des moindres carrés est associé à chaque ensemble de points (tableau 1). Le bruit de mesure δ -plan est alors calculé pour chacun des sous-ensembles et le résultat est

reporté sur le tableau 1. On constate que la valeur de $\delta\text{-plan}$ est plus élevée au début et à la fin du nuage de points. Il nous semble donc judicieux de filtrer le nuage de points en lui retirant des lignes au début et à la fin. Dans ce sens il nous faut chiffrer la quantité de ligne à retirer.

Nous associons un plan des moindres carrés à l'ensemble du nuage et nous calculons le bruit sur toute la surface :

$$\delta\text{-plan}_{\text{non-filtré}} = 0,0162 \text{ mm}$$

L'ensemble des plans possédant un bruit inférieur de 10% de $\delta\text{-plan}_{\text{non-filtré}}$ est conservé, les autres sont retirés du nuage de points :

Soit P_i un sous-ensemble du nuage de points $S_{\text{non-filtré}}$ tel que $S : \{P_1, P_i, \dots, P_n\}$, si $\delta\text{-plan}_i > (\delta\text{-plan}_{\text{non-filtré}} - 10\% \delta\text{-plan}_{\text{non-filtré}})$ alors $P_i \notin S_{\text{filtré}}$

Les sous-ensembles 1, 9 et 10 ont un bruit supérieur à 0.0146 mm, ils sont donc retirés du nuage de points. Un nouveau plan des moindres carrés est alors associé au nuage restant conduisant à $\delta\text{-plan}_n = 0,0137 \text{ mm}$. Nous calculons δ_m la valeur moyenne des $\delta\text{-plans}$ des sous-ensembles retenus, tant que l'écart entre δ_m et $\delta\text{-plan}_n$ reste supérieur à 10% le calcul est répété. Ceci conduit à $\delta_m = 0.0135 \text{ mm}$ pour les sous-ensembles retenus, c'est à dire les numéros 2 à 8. Comme la différence entre $\delta_m = 0.0135 \text{ mm}$ et $\delta\text{-plan}_n = 0,0137 \text{ mm}$ est inférieur à 10%, le filtrage s'arrête et les sous-ensembles 2 à 8 forme le nuage filtré :

$$\delta\text{-plan}_{\text{filtré}} = \delta\text{-plan}_n = 0,0137 \text{ mm}$$

Ainsi, un retrait de près de 10% au début et à la fin du nuage de points permet de réduire de 15% le bruit associé au nuage de points. Il faut toutefois remarquer que les phases d'accélération et de ralentissement ont une durée quasi-constante alors que la durée du balayage effectué peut varier. De ce fait, la part du nuage de points perturbé par la variation de la vitesse n'est pas constante. Plus le temps de balayage est grand plus le pourcentage de points à enlever sera faible. Cependant, la valeur d'une dizaine de pourcents reste valable pour nos expérimentations car la surface test a été de 150 mm ce qui est une grandeur compatible avec les dimensions des pièces que nous avons numérisées par la suite.

ANNEXE III

Comparaison de la numérisation dynamique et statique

L'étude présentée ici porte sur l'aptitude du capteur utilisé à numériser en statique et en dynamique. Nous réalisons dans ce sens une étude comparative entre les deux types de numérisation. L'indicateur choisi pour effectuer la comparaison est δ_{bruit} .

La démarche générale consiste en la numérisation d'un même plan en deux phases:

- La numérisation dynamique : une numérisation est réalisée par balayage, il en résulte un nuage de points contenant n lignes de numérisation.
- La numérisation statique : une série de numérisation est réalisée. Elles consistent à positionner le capteur au-dessus de la surface et à lancer une acquisition sans déplacer le capteur. Il en résulte un nuage de points contenant une seule ligne. Après avoir répété cette démarche sur toute la surface nous obtenons m nuages de points contenant chacun une ligne.

Le capteur est réglé de manière suivante :

- LUT : 15
- Puissance laser : 4 mV
- Temps d'intégration : 1/250
- Distance de numérisation : 157 mm
- Angle de numérisation : de 0° à 75° avec un pas de 15°
- Fréquence d'émission laser : 35Hz
- Pas de numérisation : 0.5

Les lignes de numérisations du nuage issu de la première numérisation sont séparées. Chaque ligne est projetée dans le plan laser (ZX). Une droite des moindres carrés est associée à chacune des lignes projetées sur ZX. Il est alors possible de calculer le bruit δ_i de chaque ligne de numérisation i . La valeur moyenne δ_d est calculée à partir de l'ensemble des δ_i .

	Equation des droites des moindres carrés			δ bruit par ligne (mm)	Bruit moyenne δ_d
	a	b	c		
Plan0° (1)	0,00207163	0,99999785	-125,384687	0,0134	0,0127 mm
Plan0° (2)	0,00149552	0,99999906	-124,967296	0,0119	
Plan0° (k)	...	...	...	...	

Tableau 1 : Exemple de bruit calculé sur le nuage issu d'un plan numérisé à 0° lors de la première phase

Le même procédé est appliqué aux lignes issues de la deuxième série de numérisation et la valeur moyenne du bruit δ_s est calculée.

	Bruit moyenne δ_s (mm)
Droite à 0°	0,0154
Droite à 15°	0,0137
Droite à 30°	0,0194
Droite à 45°	0,0191
Droite à 60°	0,0176
Droite à 75°	0,0398

Tableau 2 : Valeurs moyenne du bruit des lignes de numérisation issues de la deuxième phase

La comparaison entre δ_d et δ_s permet de conclure sur les capacités du capteur vis-à-vis de la numérisation statique et dynamique qui donne de meilleurs résultats en dynamique.

Nous avons également souhaité prendre en compte l'influence de l'angle de numérisation. Dans ce sens la procédure a été répétée (aussi bien pour la numérisation dynamique que statique) sur une série de plans inclinés. Afin de conserver au maximum les mêmes conditions de numérisation, la variation de l'angle de numérisation est obtenue à l'aide d'un artefact de mesure. L'orientation du capteur dans le repère de la MMT est fixe, en conséquence de quoi aucune nouvelle calibration externe n'est nécessaire. L'artefact de mesure utilisé (figure 1) est composé de faces planes dont l'orientation de la normale varie de 0 à 90° avec un pas de 15° d'une face à l'autre.

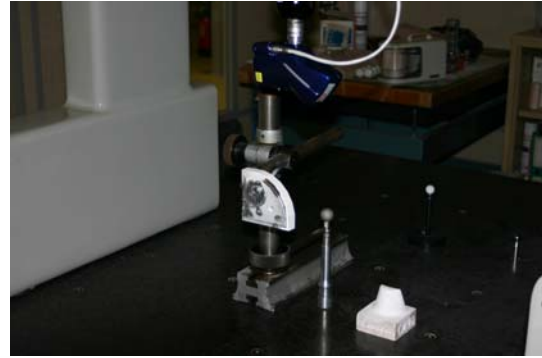


Figure 1 : Artefact de variation de l'angle de numérisation

L'orientation du capteur dans l'espace de la MMT est fixée de manière à ce que le plan laser soit perpendiculaire au plan du marbre, ce qui se traduit par : $A = 0$; $B = 0$.

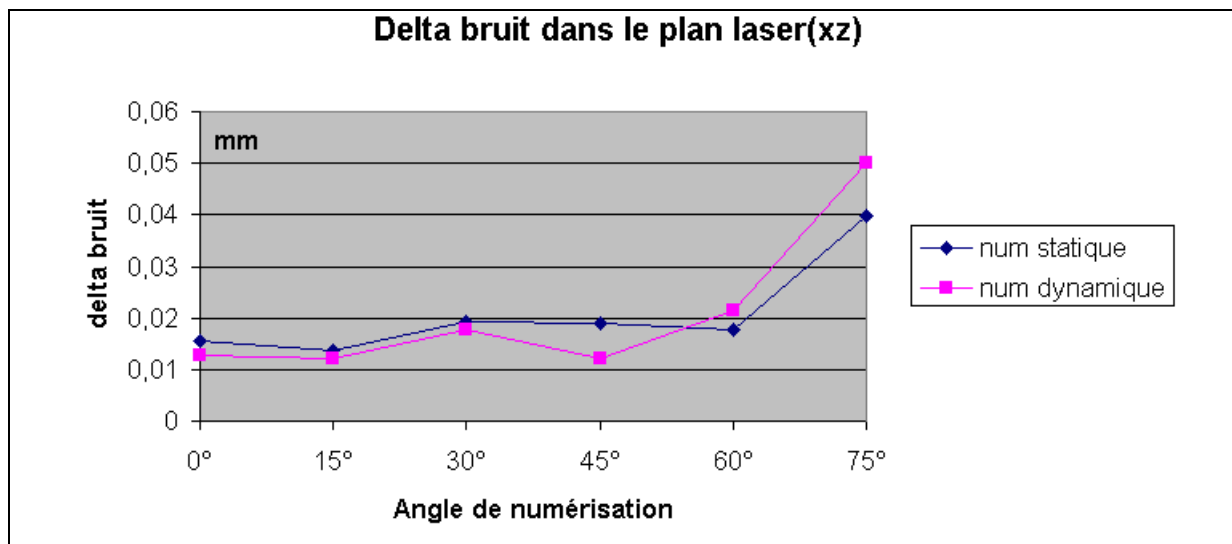


Figure 2 : Bruit statique et dynamique en fonction de l'angle de numérisation

Bien que sur l'intervalle $[0^\circ, 60^\circ[$ le bruit statique reste supérieur au bruit dynamique la différence entre les deux courbes reste faible, à part pour une orientation à 45° pour laquelle la différence est plus marquée. Sur l'intervalle $[60^\circ, 75^\circ]$ le bruit dynamique devient supérieur au bruit statique.

Le capteur est réputé être destiné à la numérisation dynamique, nous pouvions alors supposer que le bruit en numérisation statique pourrait être détérioré, or nos résultats ne montrent pas de différence significative. Bien que sur l'intervalle de l'angle de numérisation le plus utilisé $[0^\circ, 60^\circ]$ le bruit dynamique reste légèrement plus faible. La réalisation d'une numérisation statique pourrait cependant être utilisée si nécessaire.

Résumé

Les travaux de recherche exposés dans cette thèse sont consacrés à la numérisation 3D d'objets de formes inconnues à l'aide de capteur laser plan sans contact. Il est en particulier question d'accroître la qualité du nuage de points issu d'une numérisation grâce à une démarche de génération de trajectoire intelligente de numérisation. Pour ce faire, l'ensemble des paramètres intervenant dans le positionnement relatif du capteur par rapport à la pièce ainsi que la conséquence de leur variation sur la qualité du nuage issu de la numérisation sont étudiés. Une partie importante est entre autres consacrée à l'identification des performances de l'outil de numérisation utilisé. Ainsi un protocole expérimental d'évaluation des capacités du système de numérisation vis-à-vis du bruit de mesure en fonction de la distance et de l'angle de numérisation est proposé. Le protocole est complété par des procédures d'évaluation de la justesse, de la justesse relative et de la fidélité. Ce protocole, basé sur un ensemble de procédures de mesure simples à mettre en œuvre, donne à tout utilisateur un moyen d'évaluation des capacités de son système de mesure optique. Cette étape permet également d'identifier l'espace admissible à l'intérieur duquel la trajectoire intelligente doit être définie. La démarche de génération de trajectoire intelligente qui est ensuite proposée s'appuie sur une première numérisation de l'objet dont le modèle CAO n'est pas connu. La qualification des données 3D obtenues est proposée tirant partie de l'étude précédente. Cette étape met en avant les zones de qualité insuffisante (en terme de bruit et de complétude principalement) qui doivent être renumérisées. La trajectoire, définie comme une succession de positionnements relatifs capteur/pièce, est alors recalculée de façon à ce que les paramètres (angle et distance de numérisation) définissent un positionnement capteur appartenant à l'espace admissible précédemment établi. La démarche de numérisation 3D intelligente est illustrée au travers de différents exemples.

Mots clefs: Numérisation 3D, Qualité, Trajectoire intelligente, Capteur laser

Abstract

Research works exposed in this thesis are devoted to 3D digitalization of unknown objects by using a laser plane sensor. In particular, the work deals with a new approach of intelligent automated scanning trajectory based on a quality criterion. In this direction, all the parameters allowing the relative positioning sensor/part as well as the consequence of their variation on the data point quality are studied. A main part of the work is dedicated to performance assessment of the digitizing system used. Therefore an experimental protocol is proposed, in order to evaluate system capacities regarding to digitizing noise in function of the digitizing angle and the digitizing distance. The protocol is supplemented by procedures of evaluation of the accuracy, the relative accuracy and fidelity. The protocol is based on very simple measuring procedures, giving each user of optical digitizing system a mean to assess system performances. On the other hand, this step highlights the admissible space in which the intelligent scanning trajectory must be defined.

The approach proposed for intelligent scanning of unknown object relies on a first scanning of the object surfaces. The quality of the resulting point cloud is evaluated taking advantages of the result of the previous step. As a result, zones for which the expected quality (in terms of digitizing noise and completeness) is not reached are identified. For this zones, the intelligent scanning trajectory, defined as a succession of relative positioning sensor/part is generated. so that the parameters (angle and distance of digitizing) provide a sensor positioning belonging to the admissible space previously defined. The whole approach of intelligent 3D scanning is illustrated through several examples.

Keywords: 3D digitising, Quality, Intelligent trajectory, Laser sensor