

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

**SPECIALITE : GENIE MECANIQUE**

**THESE**

PRESENTEE PAR  
**Alexandre CONTRI**

POUR OBTENIR LE GRADE DE  
**DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

---

**Qualité géométrique de la mesure  
de surfaces complexes par moyens optiques**

---

**Thèse soutenue le 28 novembre 2002**

Président du jury : M. MARTIN  
Rapporteur : M. FONTAINE  
Rapporteur : M. RIS  
Examineur : M. PRIEL  
Examineur : Mme LARTIGUE  
Directeur de thèse : M. BOURDET



**Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée**

**Ecole Normale Supérieure de Cachan**

61, avenue du président Wilson - 94235 CACHAN Cedex







# REMERCIEMENTS

Les travaux de recherche exposés dans ce mémoire ont été effectués Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

Je remercie sincèrement Monsieur le Professeur Pierre Bourdet qui m'a accueilli au laboratoire et qui a accepté de prendre la direction de mes travaux.

Je remercie Claire Lartigue pour l'encadrement de ces travaux, ses conseils et le temps consacré aux nombreuses relectures de ce mémoire.

Je remercie les membres du jury qui ont eu la gentillesse de me consacrer une partie de leur temps.

Je remercie la société Kréon Technologies pour leur appui lors de la mise en œuvre du prototype sur lequel nos expérimentations ont portées.

Je tiens à remercier également l'ensemble des personnes du laboratoires pour leurs avis, conseils et appuis logistiques qui m'ont beaucoup aidé et plus particulièrement Manu, Droopy, Géo, Arnaud, Hélène, Bruno, Olivier, Maryvonne, Christel ainsi que Marie-France et Philippe sans qui certaines expérimentations n'auraient pas pu être réalisées.

Enfin, je remercie de tout cœur Tiana qui a passé beaucoup de son temps à comprendre et à relire ce mémoire, et qui m'a aidé à achever ce travail dans les meilleures conditions possibles.

*"Ubi materia, ibi geometria"*  
*Où il y a de la matière, il y a de la géométrie*

*Johannes Kepler (1571-1630)*

---

*à Tiana et Aurélien,  
à ma Famille.*

# Table des Matières

INTRODUCTION .....	8
<b><u>CHAPITRE 1</u></b>	
QUALIFICATION D'UN NUAGE DE POINTS ISSUS D'UN SYSTEME DE NUMERISATION 3D .....	12
1 POSITION DU PROBLEME, "IMAGE NUMERIQUE" .....	13
2 CARACTERISTIQUES DES DONNEES DISCRETES .....	15
3 MODELES DE REPRESENTATION .....	17
3.1 TYPOLOGIE DES MODELES DE REPRESENTATION [Bahi 97], [Tollenaere 98].....	17
3.2 CHOIX D'UNE REPRESENTATION ADAPTEE .....	21
4 NOTION DE QUALIFICATION D'UN ENSEMBLE DE POINTS .....	22
4.1 REPRESENTATION DE L'ERREUR .....	23
4.2 MODELISATION DE L'ERREUR .....	23
4.3 BESOINS DE LA QUALIFICATION DE LA MESURE PAR MOYENS MECANIQUES ET PAR MOYENS OPTIQUES.....	24
5 CONCLUSION, NOTRE APPROCHE .....	27
<b><u>CHAPITRE 2</u></b>	
LES SOURCES D'IMPRECISION DES SYSTEMES D'ACQUISITION OPTIQUE .....	28
1 FACTEURS INFLUANTS SUR LA QUALITE GEOMETRIQUE D'UN NUAGE DE POINTS.....	29
2 STRUCTURE D'UNE CHAINE D'ACQUISITION NUMERIQUE.....	31
2.1 FONCTION ACQUERIR .....	32
2.1.1 Technologies de numérisation .....	32
2.1.2 Exemples de technologies .....	35
2.2 FONCTION DEPLACER .....	36
2.3 FONCTION TRAITER .....	39
3 IMPRECISIONS ASSOCIEES A LA FONCTION ACQUERIR, POINT DE VUE MATRICE CCD ET SOURCE LASER.....	40
3.1 CONSTITUTION D'UNE CAMERA CCD.....	40
3.2 PROBLEMES LIES A L'EMPLOI D'UN LASER .....	43
3.2.1 Définition, principe [Dico web2] [Cohen 99] .....	43
3.2.2 Problèmes liés à la géométrie et à la nature de l'objet numérisé.....	44
4 PROBLEMATIQUE LIEE A LA FONCTION TRAITER, POINT DE VUE DE LA CALIBRATION.....	45
4.1 DEFINITION DE LA CALIBRATION .....	45
4.2 MODELES DE CALIBRATION.....	46
4.2.1 Modèle physique du sténopé.....	47
4.2.2 Modèle mathématique des n plans.....	48
4.3 INFLUENCE DES METHODES D'IDENTIFICATION POUR LA CALIBRATION DES CAMERAS CCD .....	50
5 PROBLEMATIQUE LIEE A LA FONCTION DEPLACER, POINT DE VUE DU PORTEUR.....	51
6 CONCLUSION .....	53
<b><u>CHAPITRE 3</u></b>	
QUALIFICATION DES MOYENS DE MESURE OPTIQUE : APPROCHES ASSOCIEES A LA LITTERATURE .....	54
1 ÉVALUATION GLOBALE DU MOYEN DE MESURE OPTIQUE PAR L'EMPLOI D'ARTEFACT.....	55
2 APPROCHES LIEES AUX DIFFERENTS CONSTITUANTS DE LA CHAINE DE NUMERISATION .....	59
2.1 APPROCHES ASSOCIEES A LA CALIBRATION.....	59
2.2 APPROCHES ASSOCIEES A L'INFLUENCE DU TYPE DE SURFACE NUMERISEE.....	62
2.3 APPROCHES ASSOCIEES A LA PLANIFICATION DE TRAJECTOIRES ET AUX STRATEGIES DE NUMERISATION .....	65
3 CONCLUSION .....	70

## **CHAPITRE 4**

<b>EXPERTISE DU NUAGE DE POINTS : DEFINITION D'INDICATEURS DE QUALITE .....</b>	<b>73</b>
<b>1 DEFINITION DES INDICATEURS DE QUALITE.....</b>	<b>74</b>
<b>2 INDICATEURS INTRINSEQUES.....</b>	<b>76</b>
2.1 INDICATEUR $\rho$ -DENSE [HOPPE 92].....	76
2.1.1 Définition de l'indicateur $\rho$ -dense .....	77
2.1.2 Evaluation de l'indicateur $\rho$ -dense .....	77
2.2 INDICATEUR $\kappa$ -COMPLETUDE.....	79
2.2.1 Définition de l'indicateur $\kappa$ -complétude.....	80
2.2.2 Evaluation de l'indicateur $\kappa$ -complétude.....	81
<b>3 INDICATEURS SPECIFIQUES .....</b>	<b>82</b>
3.1 INDICATEUR $\delta$ -BRUIT : .....	83
3.1.1 Définition de l'indicateur $\delta$ -bruit [Hoppe 92] .....	83
3.1.2 Evaluation de l'indicateur $\delta$ -bruit.....	83
3.2 INDICATEUR $\tau$ -EXACTITUDE .....	84
3.2.1 Définition de l'indicateur $\tau$ -exactitude .....	85
3.2.2 Evaluation de l'indicateur $\tau$ -exactitude .....	85
<b>4 SYNTHESE DES INDICATEURS DE QUALITE.....</b>	<b>86</b>
<b>5 CONCLUSION .....</b>	<b>88</b>

## **CHAPITRE 5**

<b>QUALIFICATION DU NUAGE DE POINTS : EXPERIMENTATIONS.....</b>	<b>89</b>
<b>1 PRELIMINAIRES.....</b>	<b>90</b>
1.1 PRESENTATION DU SITE EXPERIMENTAL .....	90
1.2 IDENTIFICATION DES PARAMETRES DE LA CAMERA : LA PROCEDURE DE CALIBRATION .....	91
1.3 INFLUENCE DU MATTIFIANT : EVALUATION EXPERIMENTALE DE SON EPAISSEUR .....	92
1.4 INFLUENCE DU TYPE DE MATERIAU .....	93
<b>2 UNE PREMIERE APPROCHE, EVALUATION GLOBALE PAR GRANDEURS CARACTERISTIQUES D'UN ETALON .....</b>	<b>94</b>
2.1 MESURE D'UNE SPHERE .....	94
2.2 UNE APPROCHE DE MESURE DE DISTANCE, ARTEFACT DE MESURE TRIPLAN .....	96
2.2.1 Description de l'artefact Triplan .....	97
2.2.2 Résultats .....	97
2.2.3 Influence du bruit sur la mesure absolue.....	99
2.3 CONCLUSION SUR L'EVALUATION GLOBALE .....	100
<b>3 DEUXIEME APPROCHE, UNE EVALUATION LOCALE AU NIVEAU DU NUAGE DE POINTS.....</b>	<b>101</b>
3.1 ETUDE DE L'INCIDENCE LASER .....	101
3.1.1 Pièce test "plans inclinés" .....	101
3.1.2 Analyse des résultats .....	102
3.1.3 Analyse systématique, barre sinus.....	103
3.2 APPLICATION DE L'ETUDE DE L'INCIDENCE LASER SUR DES FORMES TESTS .....	105
3.3 EVALUATION DE L'IMPACT DU BRUIT DE NUMERISATION SUR LA PROCEDURE DE CALIBRATION .....	108
3.3.1 Procédure de simulation.....	109
3.3.2 Validation expérimentale du modèle .....	114
3.4 EVALUATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE AU NIVEAU DE LA MATRICE CCD .....	114
<b>4 APPLICATION, SYNTHESE.....</b>	<b>117</b>
4.1 APPLICATION : EN VUE DE LA RETROCONCEPTION DE FORME .....	117
4.2 SYNTHESE DES INDICATEURS DE QUALITE PAR UNE REPRESENTATION ESPACE-VOXELS.....	119
<b>5 CONCLUSION .....</b>	<b>122</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>124</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>126</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>133</b>

## Liste des figures

### CHAPITRE 1

Figure 1 : De l'objet physique vers l'application	14
Figure 2 : Schéma de situation	14
Figure 3 : Une Typologie de données en fonction de la répartition	16
Figure 4 : Quelques exemples de représentation des données	19
Figure 5 : Une représentation solide à partir de données numérisées	20
Figure 6 : Notion de p-voisinage sur les voxels [Contri 00]	22
Figure 7 : Espace-voxels [Contri 00]	22
Figure 8 : Différentes composantes de l'erreur [Chollet 91]	23
Figure 9 : Objectifs de la connaissance de l'erreur [Chollet 91]	25
Figure 10 : Exemple de bruit de mesure supérieur à la dimension évaluée	26
Figure 11 : Problèmes liés à la nature locale du nuage de points en relation avec une application	26

### CHAPITRE 2

Figure 1 : Fonction Numériser un objet	29
Figure 2 : Diagramme d'Ishikawa	30
Figure 3 : Principaux constituants de la chaîne d'acquisition	31
Figure 4 : Fonction acquérir	32
Figure 5 : Classification des systèmes de numérisation 3D [Bourdet 98]	33
Figure 6 : Techniques de reconstruction du 3D	34
Figure 7 : Capteur à lumière structurée Optotop [www.breuckmann.com]	35
Figure 8 : Capteur à ligne laser Soisic scanner [www.mensi.com]	35
Figure 9 : Capteur à plan laser KLS51 [www.kreon3d.com]	36
Figure 10 : Capteur à temps de vol LMS-Z210 [www.riegl.co.at]	36
Figure 11 : Fonction déplacer	37
Figure 12 : Balayage d'une surface par un système de numérisation	37
Figure 13 : Structures cartésienne et polaire	38
Figure 14 : Exemples de porteur réalisant la fonction Déplacer	38
Figure 15 : Système de traitement	39
Figure 16 : Caméra CCD	42
Figure 17 : Principales sources de bruit en mesures optiques [TI Goure]	43
Figure 18 : Schéma de principe d'un laser [Cohen 99]	43
Figure 19 : Problèmes optiques de numérisation	44
Figure 20 : Calibration	46
Figure 21 : Illustration de la formation de l'image pour un modèle de sténopé [Dürer 1525]	46
Figure 22 : Modèles de lentille [Cahn 97]	47
Figure 23 : Modèle du sténopé	48
Figure 24 : Phénomène de distorsion [Weng 92]	48
Figure 25 : Modèle des 2 plans [Champleboux 92]	49
Figure 26 : Diagramme des sources d'erreurs affectant la précision de la machine [Rahman 00]	51
Figure 27 : Relevés de justesse avant correction	52
Figure 28 : Dérive thermique	52

### CHAPITRE 3

Figure 1 : Mesure d'une sphère de référence [Feng 01]	56
Figure 2 : Artefacts de mesure [Luhmann 00]	57
Figure 3 : Objets tests pour évaluation de systèmes d'acquisition [El-Hakim 95]	58
Figure 4 : Artefact de mesure et résultats de l'intercomparaison [Martin Rabaud 98]	58
Figure 5 : Modèle pour la détection de coins dans une image [Brand 94]	60
Figure 6 : Erreur de mesure avec et sans modèle de distorsion [Aguilar 96]	60
Figure 7 : Projection inverse, critère NSCE [Weng 92]	61
Figure 8 : Modèle géométrique et erreur de forme théorique et expérimentale [Zhou 98]	63
Figure 9 : Spot laser à la surface d'un bloc de marbre	64
Figure 10 : Effet du diamètre du spot incident sur le bruit de mesure [Godin 01]	64
Figure 11 : Directions d'accessibilité locales (LAD) et globales (GAD) [Lee 00]	66
Figure 12 : Principe de l'actualisation du volume d'espace numérisé [Papadopoulos 97]	66
Figure 13 : Représentation des critères de visibilité et de qualité [Massios 98]	68
Figure 14 : Taux du volume du modèle initial par rapport au modèle reconstruit en fonction du nombre de vues de numérisation [Banta 93]	68
Figure 15 : Paramètres $\alpha$ et $\beta$ de l'orientation de la caméra [Prieto 99]	69

Figure 16 : Plannification de trajectoires [Prieto 99]	70
<b>CHAPITRE 4</b>	
Figure 1 : Une démarche de qualification pour deux groupes d'indicateurs de qualité	75
Figure 2 : Densité	77
Figure 3 : Indicateur $\rho$ -dense	77
Figure 4 : Représentation de densité	78
Figure 5 : Densité, évaluation simple et par espace-voxels	79
Figure 6 : Utilisation de l'indicateur $\rho$ pour une application de filtrage de données	79
Figure 7 : Changement d'orientation de capteur sur une pièce de test [Larue 00]	80
Figure 8 : Maillage	81
Figure 9 : Méthode d'évaluation de la complétude [Lartigue 02]	82
Figure 10 : Identification de $\kappa$ sur un exemple de numérisation	82
Figure 11 : Association d'un modèle des moindres carrés	84
Figure 12 : Observation d'un unique point 3D M selon différentes orientations de capteur	85
Figure 13 : Classifications et attributs des espace-voxels	87
Figure 14 : Synthèse des indicateurs de qualité ( $\delta$ , $\rho$ , $\tau$ , $\kappa$ )	87
<b>CHAPITRE 5</b>	
Figure 1 : Capteur 3D KLS51 et Machine à Mesurer Tridimensionnelle	91
Figure 2 : Sphère à facettes, artefact de calibration	92
Figure 3 : Identification de hauteur de marche	93
Figure 4 : Topographie de répartition du mattifiant sur une surface réputée plane	93
Figure 5 : Analyse qualitative de certains matériaux	94
Figure 6 : Identification du centre d'une sphère de référence selon 4 orientations de capteur	95
Figure 7 : Représentation de l'erreur sur la détermination du centre de la sphère de référence	95
Figure 8 : Problèmes d'accessibilité	96
Figure 9 : Artefact de mesure Triplan, distance étalon D	97
Figure 10 : Extraction du point PT1 sur l'artefact triplan	98
Figure 11 : Effet du bruit de mesure sur l'évaluation de grandeurs géométriques	99
Figure 12 : Taux d'erreur relatif sur la mesure de cales étalons	100
Figure 13 : Pièce de test plans inclinés	102
Figure 14 : Définition des indicateurs $\delta_{\text{plan}}$ et $\delta_{\text{droite}}$ caractérisant le bruit	102
Figure 15 : Evolution des indicateurs $\delta_{\text{droite}}$ et $\delta_{\text{plan}}$	103
Figure 16 : Dispositif expérimental	104
Figure 17 : Indicateurs $\delta_{\text{droite}}$ et $\delta_{\text{plan}}$ (barre sinus) et modèle	104
Figure 18 : Formes test concave et convexe	105
Figure 19 : Evaluation locale de la normale	106
Figure 20 : Effet de lissage	107
Figure 21 : Application de l'évaluation locale du bruit sur formes complexes	107
Figure 22 : Extraction d'un point d'intérêt dans l'espace 2D de la matrice CCD	109
Figure 23 : Image caméra CCD de la calibration, superposition des 18 acquisitions	110
Figure 24 : Evaluation de l'indicateur $\delta$ -bruit	110
Figure 25 : Simulation	111
Figure 26 : Identification	111
Figure 27 : Visualisation	112
Figure 28 : Evaluation de l'impact 3D	113
Figure 29 : Organigramme de la méthode d'évaluation de la calibration	113
Figure 30 : Validation expérimentale	114
Figure 31 : Méthode d'évaluation par parcours de la matrice CCD	115
Figure 32 : Evaluation de la zone d'incertitude	116
Figure 33 : Mise en œuvre expérimentale	116
Figure 34 : Application à la numérisation d'une forme complexe	117
Figure 35 : Génération des trajets	118
Figure 36 : Seuillage des données et résultat obtenu après renumérisation	119
Figure 37 : Evaluation des indicateurs de qualité densité et complétude	119
Figure 38 : Evaluation des indicateurs de qualité bruit et exactitude de mesure	120
Figure 39 : Exemple de fusion de 4 vues de numérisation	120
Figure 40 : Synthèse des indicateurs $\delta$ -bruit et $\tau$ -exactitude	121
Figure 41 : Synthèse globale, représentation $\delta + \tau_1 + \tau_2$	121



# INTRODUCTION

Dans le domaine de la mécanique, le processus de réalisation d'une pièce comprend de nombreuses étapes et fait intervenir de nombreuses compétences depuis l'intention du designer à la mise en situation effective de la pièce dans le produit final. Tout au long de ce processus, les différents acteurs se posent la question de la conformité de la pièce par rapport à l'étape précédente. L'intention du designer a-t-elle été correctement traduite par le maquetiste ? Les concepteurs du produit et du process qui possèdent des outils de représentation différents du maquetiste ont-ils pris en compte toutes les contraintes esthétiques de la pièce ? A l'issue de sa fabrication, respecte-t-elle l'ensemble des spécifications exigées ? Ce sont autant de questions qui préoccupent et que s'efforcent de résoudre les différents acteurs de l'industrie manufacturière. Ils ont à leur disposition toutes sortes de moyens de contrôle permettant la récupération et l'exploitation d'informations concernant la géométrie de la pièce. En particulier, l'utilisation de Machines à Mesurer Tridimensionnelles est bien maîtrisée et elles sont largement utilisées dans le milieu industriel. L'emploi et le respect de normes permettent de s'entendre sur des procédures, des protocoles de mesure et d'exploitation des résultats. Ceci permet un dialogue sans équivoque sur la réalisation d'une pièce, a fortiori d'un produit, entre les partenaires et sous-traitants qui interviennent dans le processus.

Aujourd'hui, les besoins fonctionnels des produits imposent de plus en plus la réalisation de pièces de formes complexes, rendues possibles par des procédés de fabrication performants. Le problème du contrôle ou plus généralement l'acquisition de la géométrie "réalisée" de la pièce se pose toujours en particulier dans le cas des surfaces complexes ou de lignes de style.

Les développements informatiques et les progrès d'intégration ont permis le développement de systèmes de numérisation 3D sans contact. Ces systèmes ont trouvé leur place dans toute application nécessitant une acquisition géométrique de la forme par un grand nombre d'informations en un temps non prohibitif. Ce choix se justifie d'autant plus pour la numérisation du moindre détail sur des surfaces complexes ou sur des matériaux pour lesquels le palpé mécanique ne peut être utilisé, matériaux souples ou environnement de mesure contraignant.

Pour la plupart des applications liées aux systèmes de numérisation 3D, il s'agit d'acquérir une « image numérique » de l'objet afin de la traiter informatiquement pour une application visée. Il se pose alors le problème de la conformité entre l'image numérique qui sert de référence aux traitements ultérieurs et l'objet physique initial. Nous situons les travaux de cette thèse au niveau de la qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par

moyens optiques. Au sens de la norme, la qualité est « *l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites* » [ISO-8402 94]. La plupart des travaux permettent de bien cerner aujourd'hui la qualité dimensionnelle des produits à l'aide de moyen de contrôle mécanique, comme les Machines à Mesurer Tridimensionnelles par exemple. Cependant, ce n'est pas toujours le cas pour les systèmes de numérisation de forme par moyens optiques, où l'ergonomie et l'attractivité de ces systèmes ont permis une entrée rapide dans l'industrie avant de maîtriser totalement l'impact d'une mesure sans contact pour une application donnée. L'objectif de nos travaux est de mettre en évidence les différentes caractéristiques de tels systèmes et de proposer une méthodologie qui permette la qualification des données restituées au regard d'une application donnée.

Nous exposons dans le chapitre 1 la problématique de nos travaux. Ce chapitre définit la place et les spécificités des données restituées par les systèmes de numérisation 3D, ainsi que les possibilités de qualification à l'aide de moyens conventionnels tels que les Machines à Mesurer Tridimensionnelles.

Le chapitre 2 introduit et définit ce que nous appelons la chaîne de numérisation. Nous détaillons notre typologie des différents constituants pour mettre en évidence les différentes sources d'incertitude, notamment pour les systèmes à base de caméras. L'objectif est de détailler plus précisément le système de numérisation afin d'identifier les sources influentes sur la qualité du nuage de points restitué.

Dans le chapitre 3, nous faisons le point au niveau de la littérature sur les approches les plus représentatives concernant la qualification des données issues de tels systèmes.

L'analyse et le classement de certaines de ces approches nous amènent à définir au chapitre 4 la notion d'indicateurs de qualité en relation avec l'application visée. Cette notion d'indicateurs nous paraît essentielle pour la qualification des données. Notre démarche s'appuie sur la définition de quatre indicateurs liés au bruit de numérisation, à la densité des points, à la complétude et à l'exactitude du point 3D restitué.

Une approche expérimentale au chapitre 5 expose nos travaux de recherche de manière plus pragmatique par la mise en place d'une méthodologie pour l'évaluation de la qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques. Nous montrons notamment dans ce chapitre la nécessité de compléter l'approche globale de qualification, couramment employée, par une approche locale pour prendre en compte les spécificités des moyens optiques de numérisation. Après avoir détaillé notre méthodologie d'évaluation des indicateurs de qualité, nous traitons deux exemples d'application. L'un concerne l'adaptation de la stratégie de numérisation et l'autre concerne la synthèse des indicateurs de qualité.

Notre apport dans le cadre de ces travaux se situe au niveau de la typologie d'une chaîne de numérisation et de la définition d'indicateurs de qualité lié à l'application pour mener à bien la qualification de données de numérisation 3D. Cette méthodologie est illustrée par l'emploi d'un capteur à plan laser. Notre démarche peut cependant se généraliser à tout moyen de numérisation à base de caméra par la connaissance du modèle de transformation de l'espace d'observation de la caméra en 2D vers l'espace d'expression des données numérisées en 3D.

# CHAPITRE 1

## QUALIFICATION D'UN NUAGE DE POINTS ISSUS D'UN SYSTEME DE NUMERISATION 3D

Ce chapitre présente la problématique associée à nos travaux concernant le traitement et la qualification de données discrètes issues d'un système de numérisation 3D.

L'objectif de l'activité de numérisation 3D est l'obtention d'une image numérique à partir d'un objet physique. Cette image numérique, généralement un nuage de points représentatif de la forme, peut être exploitée par de nombreuses applications telles que la rétroconception, l'inspection dimensionnelle, le copiage de forme ... L'image numérique obtenue nécessite la plupart du temps un certain nombre de prétraitements afin de la rendre exploitable par l'application visée. Une prémodélisation, ou le choix d'une représentation des données, est une étape importante dans ce processus puisque c'est cette représentation qui est exploitée par l'application proprement dite. L'objet physique initial est donc substitué par son image numérique. Nous nous interrogeons alors sur la pertinence d'un tel passage et surtout sur la conformité en terme de qualité géométrique du nuage de points obtenu vis à vis de l'objet physique initial. Ainsi, étant donné un système de numérisation 3D et un ensemble de données discrètes provenant de ce système, sommes nous capable de qualifier localement pour chacune des acquisitions son aptitude à répondre au besoin de l'application visée ? En d'autres termes, nous analysons la possibilité de qualifier chacune des données restituées par un moyen de numérisation 3D.

Nous devons tout d'abord situer l'étape de prétraitement dans le processus complet. Dans un second temps, nous positionnons les différents types de représentation des données pour une application utilisant les systèmes de numérisation 3D. L'objectif est ici de dégager certaines caractéristiques inhérentes à ces données. Enfin, nous analysons dans la dernière partie l'approche proposée pour la qualification d'un nuage de points en vue d'une application.

### **1 Position du problème, "image numérique"**

Dans le contexte de l'élaboration d'une image numérique d'un objet physique pour une application industrielle donnée, les systèmes de numérisation 3D sans contact sont aujourd'hui pleinement employés (Figure 1). En effet, leurs performances en terme de rapidité d'acquisition et l'ergonomie apportée par la mesure sans contact, rendent ces systèmes très attractifs face aux techniques existantes telles que le palpement mécanique. Dans ce cas, la restitution d'une image numérique passe par le traitement des données qui sont le plus souvent denses et inorganisées. Nous regroupons dans l'étape de prétraitement, l'ensemble des

opérations nécessaires au passage de l'objet numérisé vers l'application visée (Figure 2). En effet, les données brutes de numérisation ne sont généralement pas exploitables directement.

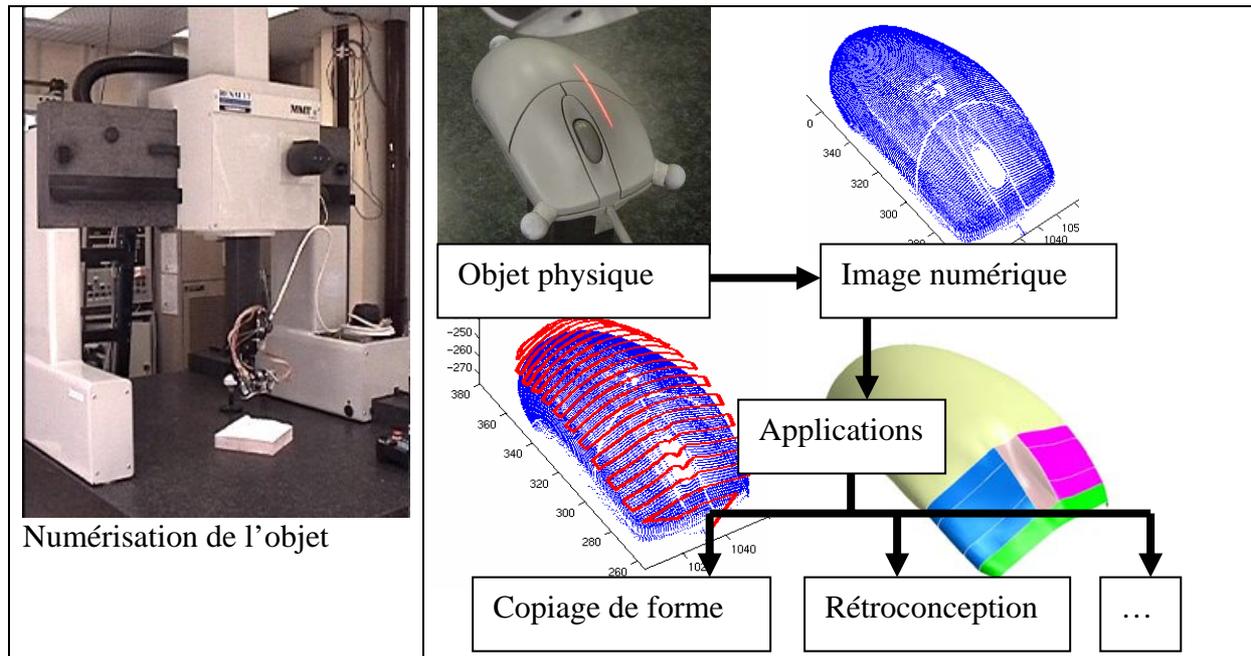


Figure 1 : De l'objet physique vers l'application

L'étape de prétraitement regroupe des opérations telles que la prémodélisation, le filtrage de données, la qualification des données, l'extraction de particularités géométriques ... [Osty 02]. La prémodélisation permet d'y substituer une représentation sur laquelle l'application peut être réalisée plus facilement par l'accès à des caractéristiques géométriques de plus haut niveau telles la courbure, la normale à la surface par exemple. Le filtrage des données permet d'homogénéiser et/ou d'alléger le nuage de points. L'extraction de particularités géométriques est une étape facilitant la reconstruction de surface [Osty 02].

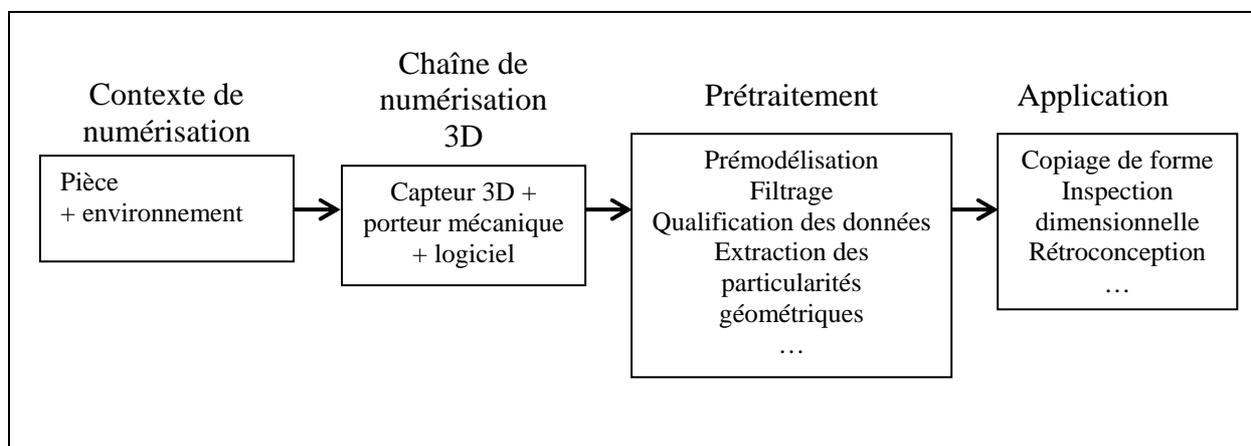


Figure 2 : Schéma de situation

La qualification des données permet d'assurer un certain niveau de concordance entre un modèle de représentation des données en tant qu'entrée de l'application visée et l'objet initial. Ainsi, nous formulons la qualification de ces données de la façon suivante :

*la qualification des données issues d'un système de numérisation 3D sous la forme d'un ensemble de points  $M_i, i = 1 \dots N$ , passe par la vérification de la conformité de cet ensemble de points à la surface physique relativement à un cahier des charges préalablement défini.*

En effet, la qualification des données se pose lorsque l'application visée nécessite un degré de conformité donné afin de restituer des résultats de traitement pertinents. Par exemple, une application de visualisation multimédia où les contraintes sont de nature esthétique est "géométriquement" moins exigeante qu'une application d'inspection dimensionnelle de pièce mécanique, où des contraintes fortes en terme d'exactitude de mesure sont demandées. Le cahier des charges reprend l'ensemble des spécifications nécessaires à l'application et permet de fixer le niveau de conformité voulu. Citons comme exemple : une densité de points minimale, une incertitude de position maximale, des temps de numérisation minimaux ...

La qualification des données s'appuie sur le choix d'une prémodélisation permettant la réalisation de traitements numériques. Cette prémodélisation remplace alors le nuage de points réels pour en donner une représentation compatible et exploitable par rapport à l'application. Bien souvent, cette prémodélisation impose une approximation des données initiales et une transformation de l'information géométrique.

La représentation sous forme de données discrètes peut constituer une prémodélisation. Nous devons cependant mettre en avant les caractéristiques d'une telle représentation afin de la situer par rapport aux autres. Nous analysons dans la suite les possibilités de modélisation des données issues de la numérisation 3D, depuis un point de vue ponctuel vers une modélisation volumique. Cette analyse débouche sur le choix d'une représentation mixte, à la fois de type voxel à l'échelle globale et ponctuelle à l'échelle locale : la représentation par espace-voxels.

## **2 Caractéristiques des données discrètes**

Le problème de la représentation de données se pose dès lors que l'on traite des informations. Dans notre cas, ces informations portent une sémantique de position permettant la localisation de points dans l'espace. D'un point de vue topologique, l'ensemble de ces

données forme un espace séparé. Par définition : " *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 :  $V_x \cap V_y = \emptyset$  " [Topologie 02].*

Les données restituées par les systèmes de numérisation 3D peuvent être décrites par un ensemble de triplets de coordonnées  $P = \{ (x, y, z) \mid x \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{R} \}$  sous la forme d'un nuage de points. Si ces données peuvent être ordonnées, elles sont en général non homogènes (Figure 3).

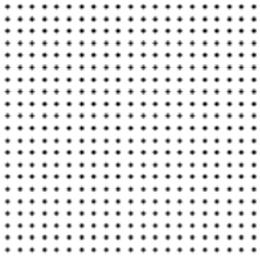
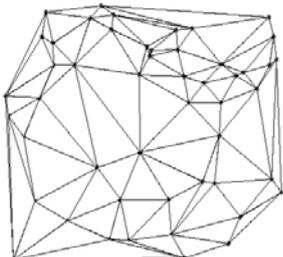
		
Répartition homogène, points ordonnés selon une grille 2D	Répartition non homogène, points ordonnés selon un maillage	Répartition non homogène, points répartis aléatoirement

Figure 3 : Une Typologie de données en fonction de la répartition

Rappelons ici certaines caractéristiques d'un ensemble de données provenant d'un système de numérisation :

- les données sont par nature discrètes et forment un espace séparé, les informations géométriques ne sont valables et identifiées que localement par un triplet de coordonnées,
- les données sont denses, cette densité permet de pallier à la nature discrète des données mais augmente considérablement le volume de données à traiter,
- les données sont souvent inorganisées, aucune hiérarchie n'est présente, il est très difficile d'accéder à des informations de voisinage,
- les données sont bruitées par diverses causes, bruit optique dû à l'imperfection des lentilles constituant la caméra, bruit électronique dû à l'imperfection des composants, bruit mécanique vibratoire dû aux différents jeux de fonctionnement dans les liaisons.

Remarquons qu'un nuage de points peut contenir d'autres informations qui ne sont pas liées directement à la géométrie de la pièce. Nous pouvons noter un sens d'accostage lié à une stratégie de palpage (dans le cas d'une MMT), un niveau de gris relatif à une source lumineuse projetée sur l'objet. Cependant, il n'y a aucun paramètre faisant référence à la qualité géométrique des données.

Le traitement direct des données s'avère ainsi complexe, la plupart des applications nécessitant des modèles de représentation riches en informations géométriques. Par exemple, pour une application de rendu de scène numérisée, la seule connaissance de la localisation de points 3D dans l'espace ne suffit pas, il faut lui adjoindre par calcul des caractéristiques différentielles telle la définition d'une normale en chacun des points considérés. Le calcul de cette caractéristique est facilité par l'emploi d'une représentation surfacique biparamétrée.

### 3 Modèles de représentation

Il existe de nombreux modèles de représentation des données issues de numérisation qui sont la plupart du temps basés sur des représentations continues au minimum  $C_0$  facilitant l'exploitation des données.

Notons que la représentation des données et leur traitement dépendent de l'application visée. Nous nous intéressons aux domaines suivants : rétroconception, inspection dimensionnelle, copiage de forme.

#### 3.1 Typologie des modèles de représentation [Bahi 97], [Tollenaere 98]

Nous avons organisé les différents modèles de représentation en définissant des niveaux de description classés en fonction de la richesse de l'information géométrique.

□ Niveau de description 0 : c'est le plus bas niveau de description de données géométriques. Le modèle ponctuel ou discret (Figure 4a): c'est le type de représentation minimale pour une description des données dans l'espace 3D. L'unique information restituée est une donnée de position dans l'espace 3D, définie par un ensemble de triplets de coordonnées  $E = \{ (x, y, z) \mid x \in \mathfrak{R}, y \in \mathfrak{R}, z \in \mathfrak{R} \}$ . Les systèmes de numérisation 3D délivrent des informations sous forme de modèles ponctuels.

□ Niveau de description 1 : le niveau précédent est enrichi par une organisation des données entre elles. Le modèle de représentation associé à un niveau de description 1 est essentiellement le modèle filaire.

Le modèle filaire : l'objet est décrit par une liste de sommets et d'arêtes les reliant. L'avantage principal est la rapidité d'affichage du squelette ainsi défini. Cependant cette représentation ne permet pas la définition de l'objet autrement que par la définition d'arêtes et de sommets. L'absence de caractéristiques surfaciques ne permet pas par exemple le rendu de l'objet. Cependant, ce modèle peut être adapté pour la description de lignes.

□ Niveau de description 2 : le niveau précédent est enrichi par la notion de surface. A ce niveau de description sont associés les modèles surfacique et polyédrique.

Le modèle surfacique (Figure 4d): l'objet est décrit par différents éléments de surface s'appuyant sur des contours délimités par des arêtes. Les types de surface rencontrés sont le plus souvent : les surfaces planes, les surfaces de révolution, les surfaces de Bézier [Bézier 77], les carreaux de Coons, les quadriques ... L'avantage d'une modélisation surfacique est le passage à une représentation continue où l'on peut exploiter les propriétés différentielles de la surface. Par contre, le principal inconvénient est la définition du modèle par rapport à l'ensemble initial de points. On remarque un comportement oscillatoire lors de l'approximation d'un ensemble de points par une courbe ou une surface qui est souvent contraignant pour l'application.

Le modèle polyédrique (Figure 4b): Il est constitué de nœuds reliés les uns aux autres en respectant un motif appelé maille. Généralement, la maille est de type triangulaire. Selon [Boissonnat 95], « un polyèdre est une 2-triangulation orientable dont le bord est vide ». Un modèle polyédrique peut être construit à partir de données 3D et d'une triangulation de Delaunay pour une maille triangulaire. Les avantages de cette représentation sont l'accès rapide au voisinage sur un ensemble de points, la rapidité et la facilité d'emploi d'une telle représentation. Son principal inconvénient est "l'approximation linéaire" et la facétisation qu'elle peut provoquer.

□ Niveau de description 3 : dernier niveau incluant la notion de volume. Il existe plusieurs modèles de représentation associés à ce niveau qui permettent notamment la représentation du volume complet et pas seulement la surface le délimitant.

Le modèle "d'occupation spatiale" (Figure 4c): cette représentation est basée sur un pavage de l'espace en cubes de taille fixe (voxels) ou en découpage récursif en cubes de tailles variables, organisés hiérarchiquement en arbre (octrees) [Meagher 82]. Cette modélisation est particulièrement adaptée aux traitements de grands nuages de points, denses et inorganisés par la définition d'un pseudo-voisinage [Osty 99].

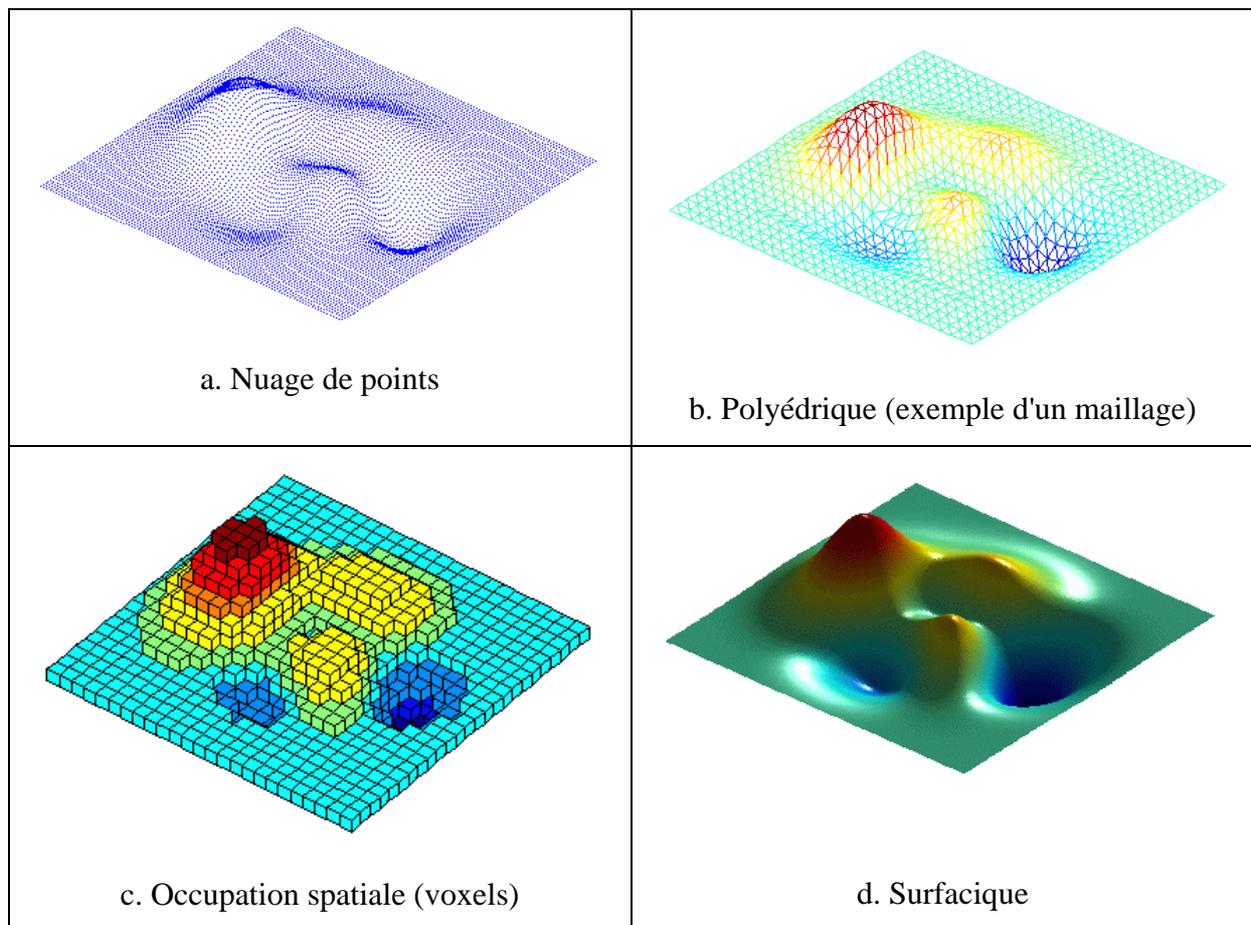


Figure 4 : Quelques exemples de représentation des données

Le modèle CSG (Constructive Solid Geometry): ce modèle décrit un objet à l'aide de primitives géométriques volumiques (parallélépipèdes, cylindres, cônes, sphères, ...) liées entre elles par des opérations booléennes (union, intersection, ...) et de positionnement. Cette représentation, dans le cas de traitement de grands nuages de points, suppose une décomposition en sous ensembles élémentaires d'un point de vue topologique. L'identification

est alors une opération complexe. L'utilisation d'algorithmes de partitionnement peut faciliter cette tâche [Goulette 97] (Figure 5).

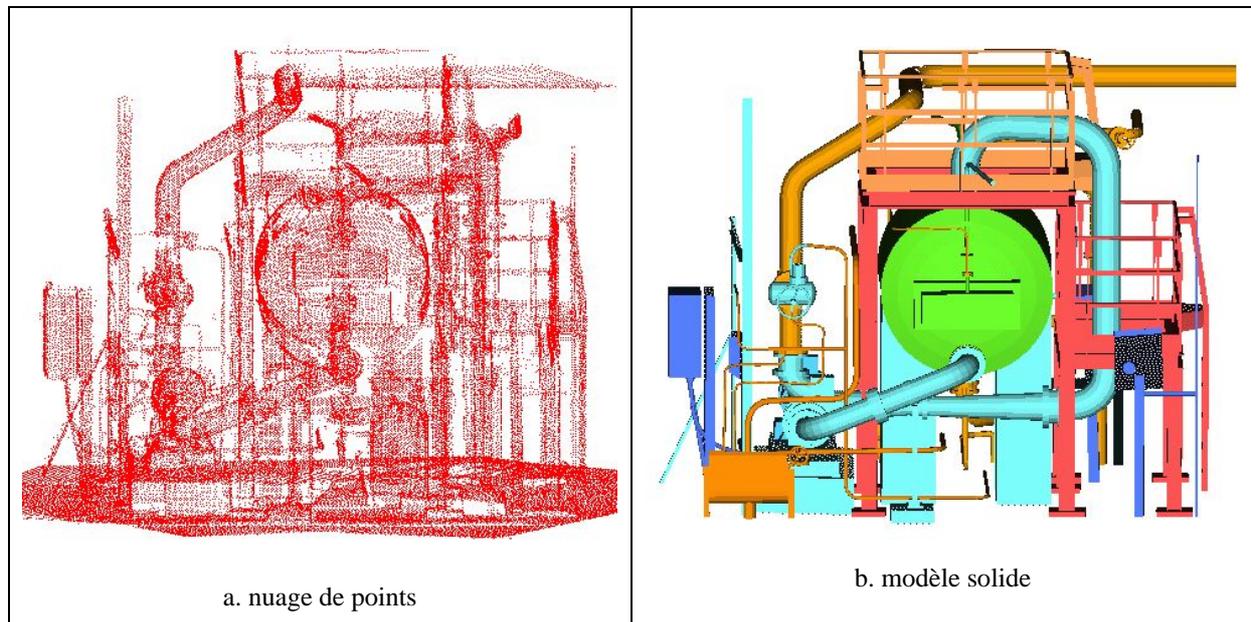


Figure 5 : Une représentation solide à partir de données numérisées

Le modèle B-REP (Boundary Representation): l'objet est représenté par son enveloppe surfacique, hiérarchiquement ordonnée pour définir un volume clos.

Les deux derniers modèles cités constituent des représentations de haut niveau couramment employés dans les logiciels CAO. Nous les citons ici pour mémoire, car ils sont peu utilisés en prémodélisation face à d'autres représentations.

Nous pouvons remarquer que plus le niveau de description est grand plus le degré d'approximation avec le nuage de points initial est important. Inversement, un modèle de plus bas niveau respecte la conformité aux données numérisées.

Afin d'évaluer la pertinence et les propriétés d'une représentation des données, un certain nombre de critères sont définis tels que : [Moron 96] [Brown 81]

*Capacité* : quels types d'objets peut-on représenter ?,

*Accessibilité* : peut-on obtenir facilement un modèle à partir d'une image ?,

*Concision* : peut-on décrire les objets efficacement ?,

*Unicité* : la description de l'objet est-elle unique ?,

*Stabilité* : peut-on calculer les paramètres du modèle avec une méthode numérique stable ?,

*Sensibilité* : le modèle permet-il de distinguer deux objets proches ?

Concernant notre problématique, nous avons besoin d'une représentation pouvant décrire tout type de géométrie (de forme complexe), c'est la notion de capacité. De plus, elle doit être accessible afin d'interagir avec le modèle, c'est la notion d'accessibilité. Nous nous sommes attachés dans la suite à définir le modèle le plus adapté pour la prémodélisation dans le cadre de la qualification des données, le modèle espace-voxels.

### 3.2 Choix d'une représentation adaptée

Le choix d'une représentation n'est généralement pas à mener de manière isolée mais en relation avec l'application souhaitée. Il n'est pas nécessaire de représenter les données avec un haut niveau de description si l'application ne le nécessite pas.

D'autre part, les données issues du système de numérisation doivent être le moins possible transformées ou approximées.

En ce qui nous concerne, dans l'optique de qualifier au mieux un nuage de points, nous devons respecter plusieurs contraintes. Les données originales issues du système de numérisation doivent être conservées afin de garantir la fidélité à la forme mesurée. De plus la représentation, par une organisation spatiale des données, doit donner accès à une information de voisinage.

La définition de caractéristiques géométriques et topologiques n'est pas toujours possible suivant la représentation choisie. L'accès à des caractéristiques différentielles est possible sur des représentations de type continue, mais n'est pas possible directement sur une représentation de bas niveau de type discrète. Il faut alors adopter des approximations locales comme par exemple l'approche de détermination de normales sur une représentation par voxels [Papier 98].

Intégrant ces différentes contraintes et remarques, le modèle d'occupation spatial par voxel semble être le modèle le plus adapté pour une représentation des données discrètes issues de la numérisation 3D. En effet, il ne nécessite pas d'approximation du nuage de points et présente l'avantage d'organiser le nuage de points à l'échelle de description des voxels, cette représentation des données fait l'objet d'une description enrichie de type espace-voxels où l'on associe à chaque voxel la portion d'espace qu'il délimite, c'est à dire l'ensemble des points contenus dans l'espace du voxel [Osty 99][Contri 00]. Cette représentation permet outre la définition d'un p-voisinage (Figure 6), de conserver les points issus de la numérisation (Figure

7). Cependant, elle implique un grand volume d'informations en fonction des données à traiter, ce qui ne pose pas de problèmes majeurs au regard des performances des matériels informatiques actuels.

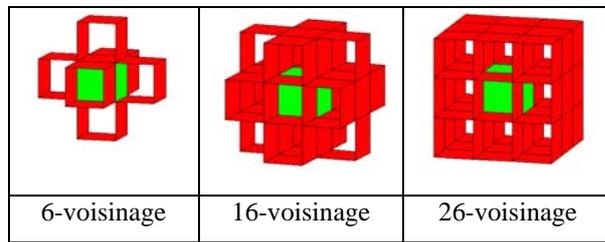


Figure 6 : Notion de p-voisinage sur les voxels [Contri 00]

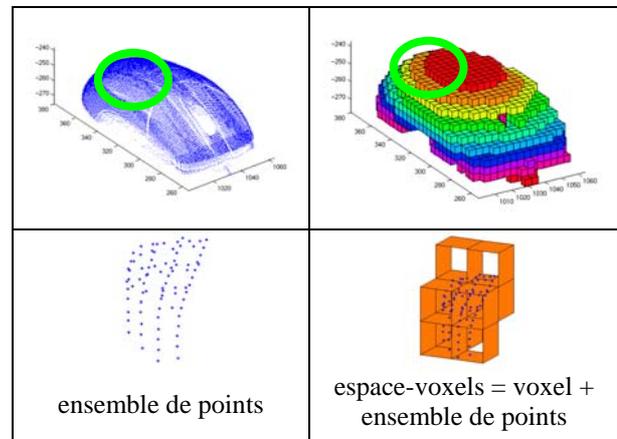


Figure 7 : Espace-voxels [Contri 00]

Cette représentation du nuage de points issu de la numérisation par espace-voxels nous permet d'effectuer la synthèse et la visualisation des différents indicateurs nécessaires à la qualification du nuage de points, cet aspect sera traité dans le chapitre 5.

#### 4 Notion de qualification d'un ensemble de points

Les applications utilisant aujourd'hui des moyens de numérisation 3D sont très répandues dans tous les secteurs industriels, notamment dans le domaine mécanique [Ebenstein 96][Kosmopoulos 01]. Les besoins de la qualification des données issues de moyens optiques sont différents de ceux exprimés en palpement mécanique. Cependant dans l'objectif de la vérification de la conformité vis à vis de l'objet initial numérisé, nous devons nous intéresser au problème géométrique de la position "vraie" d'un point dans l'espace. En d'autres termes, il faut pouvoir définir pour un point l'erreur entre la mesure réalisée et la position réelle effective de celui-ci. Nous abordons ici l'approche classique de la qualification des données issues de moyens de palpement mécanique de type MMT. Cette représentation globale dans le cas des Machines à Mesurer Tridimensionnelles ne prend pas en compte toutes les particularités des moyens d'acquisition optique et nous pousse vers une approche locale de la qualification.

#### 4.1 Représentation de l'erreur

La définition de "l'erreur de la mesure d'un point" est une notion largement évoquée dans le domaine de la mesure par coordonnées utilisant les Machines à Mesurer Tridimensionnelles.

Par définition, l'erreur (de mesure) est le résultat d'un mesurage moins une valeur vraie d'un mesurande [VIM 93, §(3.10)].

L'erreur qui est appelée *erreur globale* [Chollet 91] peut s'exprimer en deux composantes : une composante aléatoire et une composante systématique tel que  $E_g = E_s + E_a$  (Figure 8).

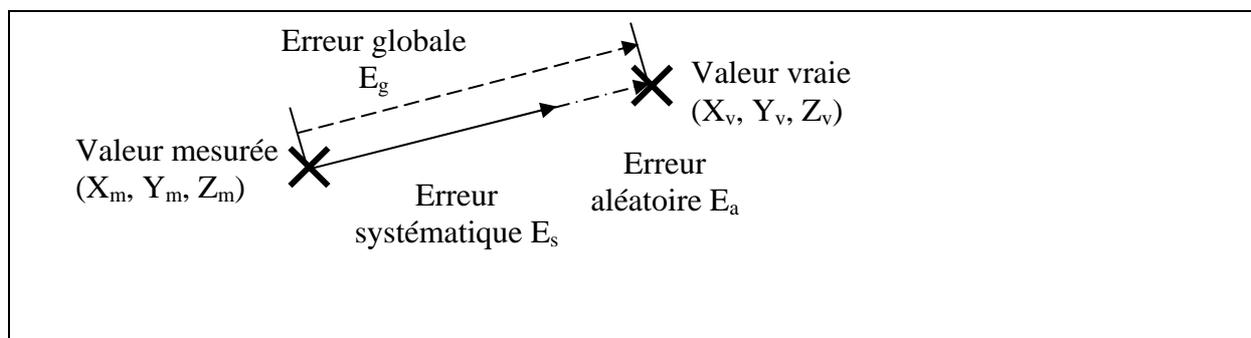


Figure 8 : Différentes composantes de l'erreur [Chollet 91]

La composante aléatoire ou erreur aléatoire a une espérance mathématique égale à zéro et provient de variations temporelles et spatiales non prévisibles de grandeurs d'influence.

La composante systématique ou erreur systématique se produit sur un résultat de mesure à partir d'un effet reconnu d'une grandeur d'influence. Si cet effet peut être quantifié et qu'il est significatif par rapport à l'exactitude requise par le mesurage, une correction peut être appliquée. On suppose alors qu'après correction l'espérance mathématique de l'erreur systématique est nulle.

#### 4.2 Modélisation de l'erreur

Afin de déterminer expérimentalement l'erreur due au moyen de mesure, il convient de lui attribuer une valeur numérique. Il faut bien noter que la mesure est seulement une estimation de la valeur du mesurande en raison de l'incertitude provenant des effets aléatoires et de la correction imparfaite du résultat pour les effets systématiques.

On définit alors deux méthodes d'évaluation de l'incertitude par estimation de l'écart type associé au résultat de mesure, on parle alors d'incertitude-type de type A ou de type B.

Selon la norme, nous pouvons définir les termes suivants [NF X07-020 96] :

*Évaluation de type A de l'incertitude-type*

Elle utilise une méthode d'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries

d'observations. On définit la moyenne arithmétique  $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$  ainsi que la variance

expérimentale des observations qui estime la variance  $\sigma^2$  de la loi de probabilité de q, par :

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 .$$

D'autre part la meilleure estimation de la variance de la moyenne est  $s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n}$ .

*Évaluation de type B de l'incertitude-type*

Elle utilise une méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique de séries d'observations (comme précédemment).

Les informations peuvent être les suivantes :

- des résultats de mesures antérieures,
- l'expérience ou la connaissance générale du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés,
- les spécifications du fabricant,
- les données fournies par des certificats d'étalonnage ou autres certificats,
- l'incertitude assignée à des valeurs de référence provenant d'ouvrages et manuels.

Remarquons que les évaluations de type A ou de type B ne sont que deux façons de calculer l'incertitude sur la mesure. En général, une estimation de type B peut être aussi fiable qu'une estimation de type A si le nombre d'observations statistiquement indépendantes est relativement faible.

Pour notre application de la qualification des données numérisées, nous employons l'expression de l'évaluation de type A de l'incertitude type comme outil quantitatif de l'erreur.

#### 4.3 Besoins de la qualification de la mesure par moyens mécaniques et par moyens optiques

Dans le domaine de la mesure par coordonnées à l'aide de palpeurs mécaniques, la connaissance et l'évaluation des différentes composantes de l'erreur ont un double objectif

[Chollet 91] (Figure 9). D'une part elles permettent de déterminer la classe de précision de la machine : c'est l'étalonnage. D'autre part, dans un contexte d'amélioration de la précision, on cherche à compenser les erreurs systématiques (ou une partie) : c'est la correction logicielle.

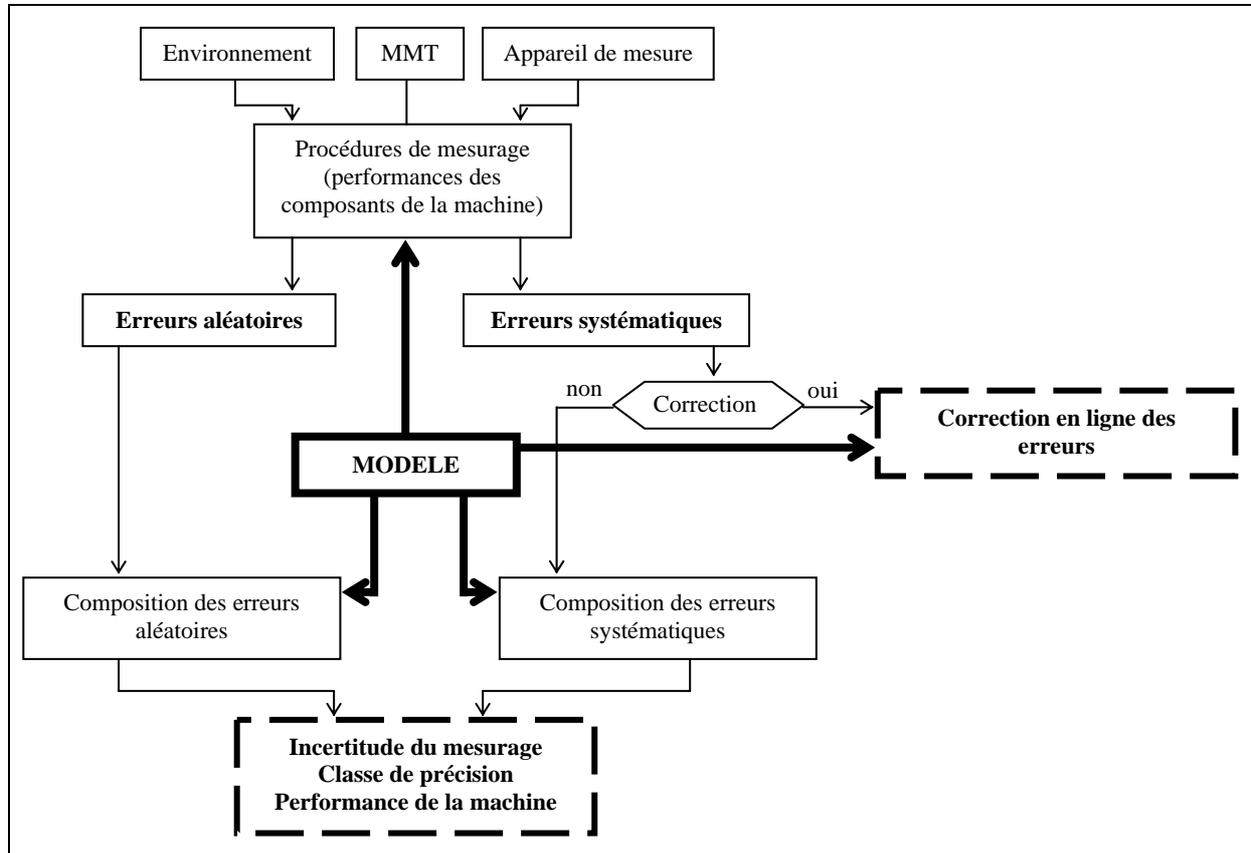


Figure 9 : Objectifs de la connaissance de l'erreur [Chollet 91]

La correction logicielle est assurée aux travers de l'élaboration de matrice de compensation volumique prenant en compte un modèle des 21 défauts [Bourdet 87][Sartori 95]. Nous ne détaillerons pas ici les aspects liés à la correction des données, qui dépassent le cadre de notre étude qui concerne leur qualification.

En ce qui concerne les systèmes de numérisation 3D sans contact par moyen optique, la seule connaissance d'une incertitude de mesure globale dans tout le volume de mesure n'est pas suffisante. Le nuage de points est la première représentation numérique sur laquelle l'ensemble des traitements ultérieurs vont s'effectuer, c'est le *modèle de référence* de plus bas niveau. Aussi, il convient de prêter attention à l'étape de qualification. Le besoin de la qualification des données numérisées pour une application est essentiel si l'on désire évaluer la conformité à l'objet initial. Un nuage de points qui présente un bruit de numérisation de

l'ordre de 0.1 mm ne pourra être exploité raisonnablement pour une inspection dimensionnelle que pour une tolérance minimale de l'ordre de 1 mm (Figure 10).

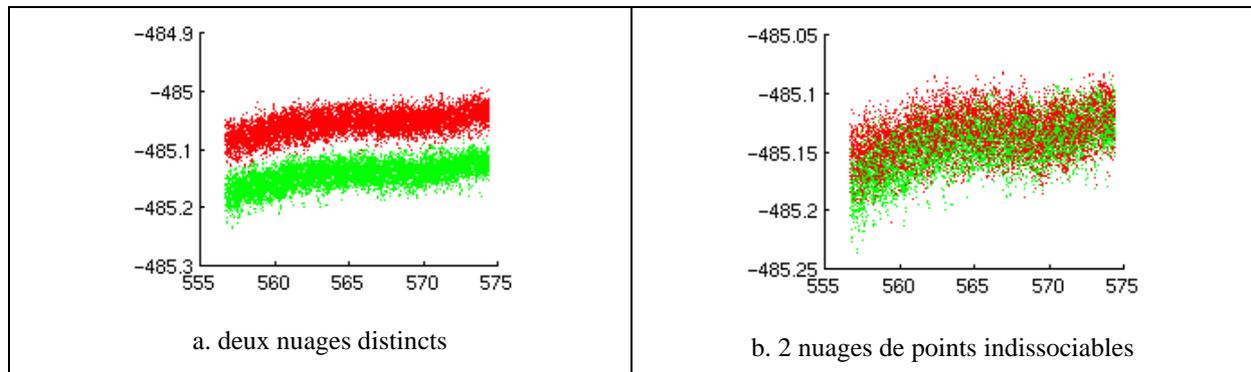


Figure 10 : Exemple de bruit de mesure supérieur à la dimension évaluée

Les exemples illustrés Figure 11 montrent deux applications qui sont tributaires du comportement local du nuage de points. En effet, plusieurs phénomènes peuvent rendre un nuage de points impropre à l'application. La Figure 11a montre un comportement oscillatoire local dans une application de rétroconception. L'information géométrique est dégradée par simplification ou approximation au travers du choix d'un modèle peu pertinent compte tenu de la qualité du nuage de points initial. Ici le nuage de point était fortement bruité localement. Dans le cas d'une application de copiage de forme, la Figure 11b met en évidence l'influence d'un nuage de points incomplet qui provoque une génération de trajectoire non conforme.

En conclusion, de nombreuses applications ne peuvent pas se contenter uniquement d'une qualification globale en terme d'exactitude de mesure selon un seul paramètre. Il est nécessaire d'enrichir la qualification, par la définition d'indicateurs de qualité au niveau local.

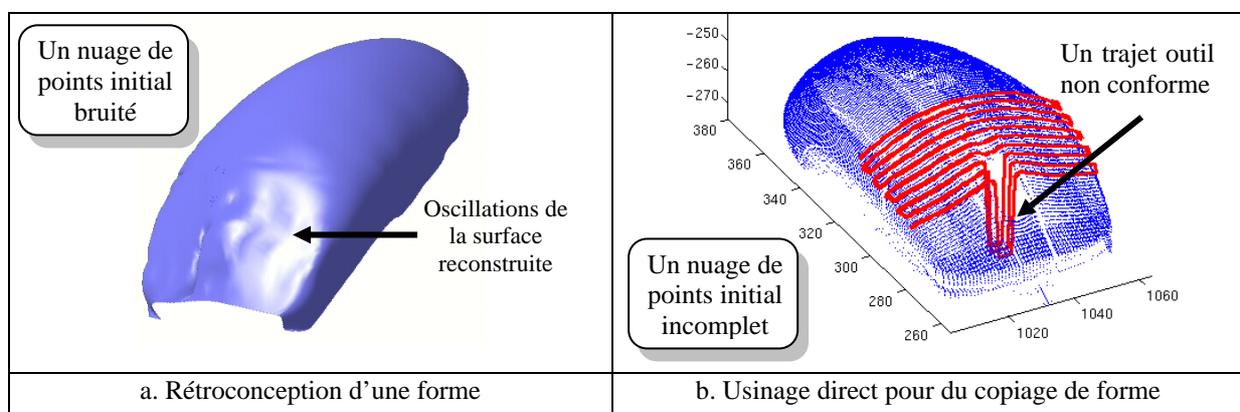


Figure 11 : Problèmes liés à la nature locale du nuage de points en relation avec une application

Ces indicateurs de qualité peuvent prendre en compte un plus grand nombre de facteurs susceptibles de quantifier le niveau de dégradation de la numérisation vis à vis de l'application visée. On peut ainsi s'intéresser au bruit associé aux données, à la notion de complétude du nuage de points, à leur densité ainsi qu'à l'exactitude de position. Autant d'indicateurs qui peuvent être associés à la représentation initiale des données. Ils sont alors pris en compte dans une prise de décision concernant les traitements ultérieurs. Si le bruit sur les données est trop important, la modélisation sera d'autant plus difficile, nous pouvons adopter une stratégie différente pour renumériser la zone concernée par exemple.

En résumé, l'objectif de la qualification des données est d'adjoindre un certain nombre de critères ou paramètres à la représentation initiale afin de guider et de maîtriser les traitements ultérieurs.

### **5 Conclusion, notre approche**

L'activité de numérisation 3D permet l'obtention de données discrètes représentatives d'un objet physique initial dont la géométrie doit être exploitée pour une application donnée. Il est nécessaire d'évaluer la qualité de ces données afin de les utiliser de façon pertinente. Une étape de prémodélisation nécessaire à la représentation des données peut donner lieu à de nombreux choix et hypothèses fonction de l'application (§3.1). Il nous paraît utile d'enrichir cette représentation des données par un choix d'indicateurs de qualité. Ces indicateurs prennent en compte des caractéristiques à la fois globales et locales liées au nuage de points.

Nos travaux ont pour objectif de définir des indicateurs liés au cas de la numérisation des formes complexes par moyen optique. Notre approche s'inspire à la fois des méthodes classiques associées au palpement mécanique, mais s'appuie également sur la connaissance de sources d'erreurs plus spécifiques aux moyens optiques. La connaissance d'autres erreurs ou indicateurs d'erreurs liés aux moyens optiques complète la seule caractéristique d'incertitude de mesurage.

Notre démarche s'articule autour de trois étapes principales. Tout d'abord, nous analysons les différentes sources d'incertitudes de ce que nous nommons la chaîne de numérisation au travers de l'analyse de chacun de ses constituants. Puis nous analysons les méthodes existantes de qualification du nuage de points pour aboutir à la définition de quatre indicateurs de qualité relatifs au bruit, à la densité, à la complétude et à l'exactitude de mesure. Enfin, au travers d'exemples et de procédures expérimentales d'évaluation, nous effectuons la synthèse des indicateurs de qualité par une représentation des données par espace-voxels.

## **CHAPITRE 2**

### **LES SOURCES D'IMPRECISION DES SYSTEMES D'ACQUISITION OPTIQUE**

Le passage de l'objet physique à la représentation numérique de la forme s'effectue au travers de la chaîne d'acquisition numérique. Cette chaîne d'acquisition est composée de plusieurs sous-ensembles, qui permettent de réaliser la fonction "numériser un objet" en respectant un certain nombre de contraintes exprimées par l'utilisateur au travers d'un cahier des charges prenant en compte les différentes spécifications liées à l'application (Figure 1).

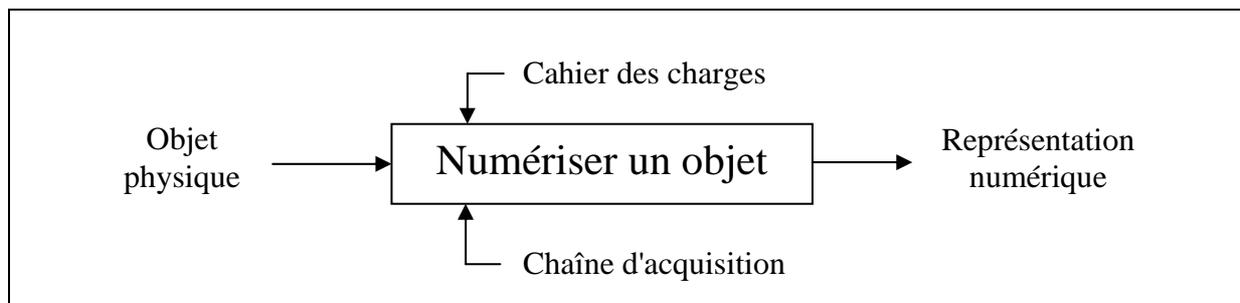


Figure 1 : Fonction Numériser un objet

Nous avons évoqué la nécessité pour une application de qualifier l'ensemble des données restituées. Cette évaluation passe par l'analyse des sous-ensembles de la chaîne de numérisation. En effet, une somme de facteurs de nature complètement différente peut être à l'origine d'imprécisions en bout de chaîne d'acquisition. Ces facteurs peuvent être de nature mécanique, électronique, optique, logiciel, environnemental ... Nous allons décrire dans ce chapitre les différents types de facteurs pouvant influencer la qualité de la numérisation au travers de ces sous-ensembles. Nous traitons essentiellement les systèmes de numérisation 3D sans contact à base de caméras CCD compte tenu de leur utilisation très répandue. Cette étude nous amènera à formuler un certain nombre d'hypothèses concernant la configuration expérimentale employée lors de nos essais.

## 1 Facteurs influants sur la qualité géométrique d'un nuage de points

La qualité d'un nuage de points issu de numérisation 3D peut être analysée sous la forme d'un diagramme Ishikawa montrant les cinq sources principales de facteurs influants (Figure 2).

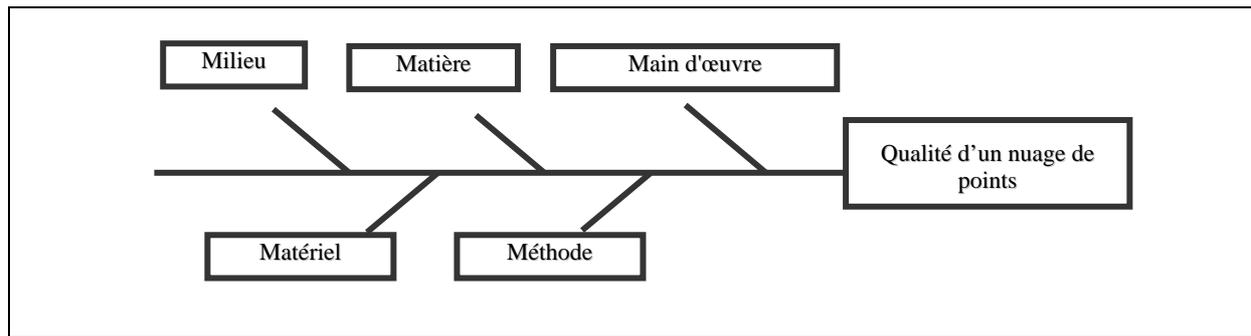


Figure 2 : Diagramme d'Ishikawa

Nous regroupons ici deux types de facteurs qui sont des causes potentielles d'incertitudes [Contri 01] : les paramètres liés à l'environnement (Milieu, Matière, Main d'œuvre) et les paramètres liés au matériel employé (Matériel et Méthode).

En ce qui concerne l'environnement, nous avons les sources d'imprécisions associées :

□ **Milieu**

Ce sont les conditions optiques, le contraste, les conditions vibratoires, les variations ou gradient de température, et plus généralement, tout paramètre variant spatialement ou temporellement sur l'environnement proche de la mesure.

□ **Matière**

L'état de surface micro géométrique de la pièce à numériser peut générer le phénomène de speckle (voir §3.2.2). La nature de la surface est caractérisée par l'indice d'albédo qui définit le rapport du flux diffusé par un corps sur le flux d'un rayonnement incident [Dico web1]. Cet indice a son importance pour les systèmes de numérisation actif où l'absorption de l'intensité lumineuse émise par le capteur peut avoir des conséquences sur des zones numérisables ou non.

□ **Main d'œuvre**

La main d'œuvre permet de mettre en relation l'aptitude opérateur avec le processus de numérisation. C'est un facteur qui ne peut pas être évalué facilement et qui prend en compte des choix opérationnels autres que la stratégie de numérisation proprement dite.

Nous considérons dans notre étude expérimentale que les paramètres liés à l'environnement sont soit négligeables soit stabilisés. Pour les facteurs liés au matériel nous avons :

□ **Matériel**

L'aspect matériel comprend essentiellement le capteur 3D et son système de mise en position relative avec l'objet. Ainsi tous les paramètres liés au capteur tels que la résolution, la répétabilité, le pouvoir d'inspection, etc... sont des paramètres influants sur la qualité du nuage de points obtenu.

□ **Méthode**

La méthode regroupe l'ensemble des procédures nécessaires à l'activité de numérisation. Nous trouvons alors la définition de la stratégie, les différentes méthodes de calibration et algorithmes employés.

Nous nous intéressons plus particulièrement aux aspects liés au matériel et à la méthode au travers de la description de la structure d'une *chaîne d'acquisition numérique*.

## 2 Structure d'une chaîne d'acquisition numérique

La structure d'une chaîne d'acquisition numérique se compose de constituants matériels et logiciels [Contri 01]. Nous distinguons d'une manière générale deux sous-ensembles physiques (matériel), le système d'acquisition et le système de déplacement, et un système de traitement (méthode) contenant la partie logicielle. Les différents constituants communiquent les uns avec les autres afin de délivrer une représentation numérique de la forme de l'objet physique numérisé (Figure 3).

Nous détaillons chacun de ces sous ensembles au travers des fonctions qui leurs sont associées : fonction Acquérir, fonction Déplacer et fonction Traiter.

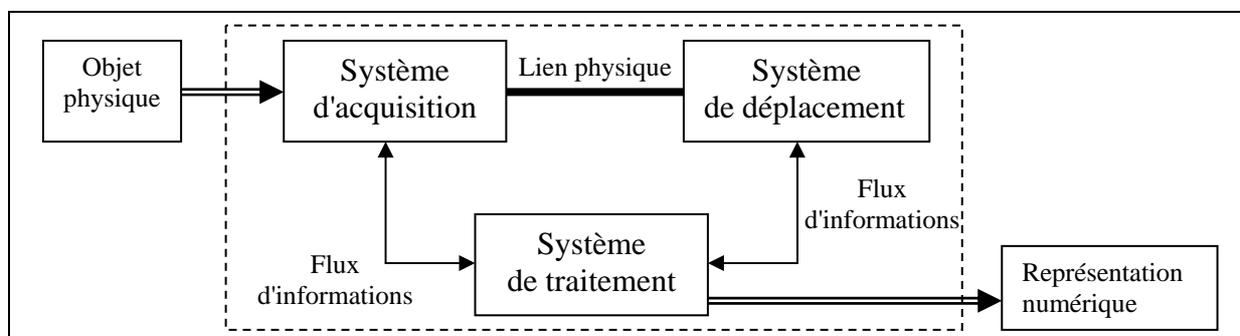


Figure 3 : Principaux constituants de la chaîne d'acquisition

### 2.1 Fonction Acquérir

Cette fonction est réalisée par le système d'acquisition au travers d'un capteur 3D qui est le cœur du système de numérisation, il donne les informations nécessaires à l'acquisition. Il permet l'observation de la scène et sa numérisation. Dans le cas des capteurs à base de caméra CCD, une information analogique de luminance est convertie en une information numérique (Figure 4). Ce type de capteur est aujourd'hui très largement répandu, mais d'autres technologies très différentes suivant les cas peuvent être employées (voir §2.1.1).

Nous analyserons plus en détail la nature et la constitution d'une caméra CCD au §3.

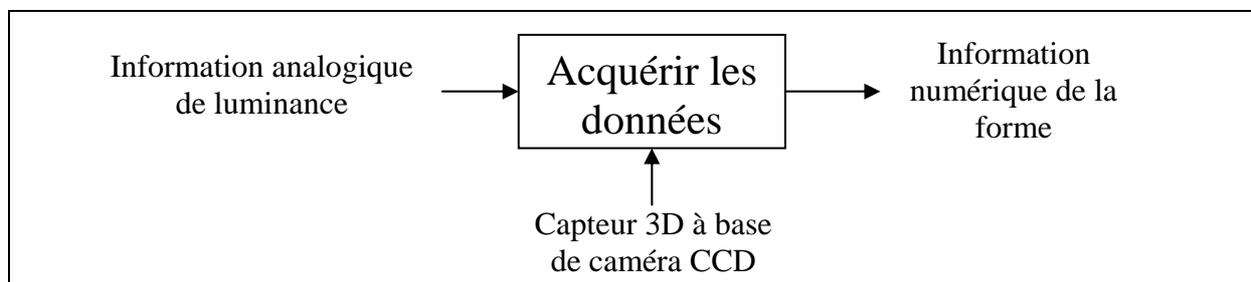


Figure 4 : Fonction acquérir

Les technologies employées pour l'acquisition des données peuvent être regroupées au travers de deux types de méthodes : les méthodes actives (les plus répandues) et les méthodes passives [Papadopoulos 97]. Nous y associons une classification en fonction de la technique de reconstruction du 3D.

#### 2.1.1 Technologies de numérisation

Le marché de la numérisation 3D avec ou sans contact est très diversifié, les technologies et les principes physiques employés sont variés. Le champ des applications employant de tels systèmes couvre l'ensemble des secteurs industriels : automobile, aéronautique, multimédia, médical, confection textile, industries manufacturières, etc ...

La classification de ces systèmes de numérisation est abordée dans la littérature en deux type : les systèmes de numérisation passif et actif.

Les systèmes passifs n'interagissent pas avec le milieu. Généralement composés de plusieurs caméras, ces systèmes mesurent l'énergie ambiante réfléchiée par la scène et sont

généralement sensibles aux conditions de contraste et d'éclairage de la scène. Citons par exemple l'analogie entre un système de photogrammétrie et la vision humaine.

Les systèmes actifs émettent de l'énergie qui est mise en forme spatialement, spectralement ou temporellement et mesurent son interaction avec la surface. La connaissance des caractéristiques de l'émetteur et du récepteur ainsi que l'interprétation du rayonnement réfléchi permettent de remonter à l'information 3D.

Nous complétons cette classification par l'organisation des différentes technologies de numérisation en fonction du mode de calcul d'un point 3D [Bourdet 98]. Nous en distinguons trois : la triangulation, la télémétrie, la reconstruction par traitement d'images (Figure 5).

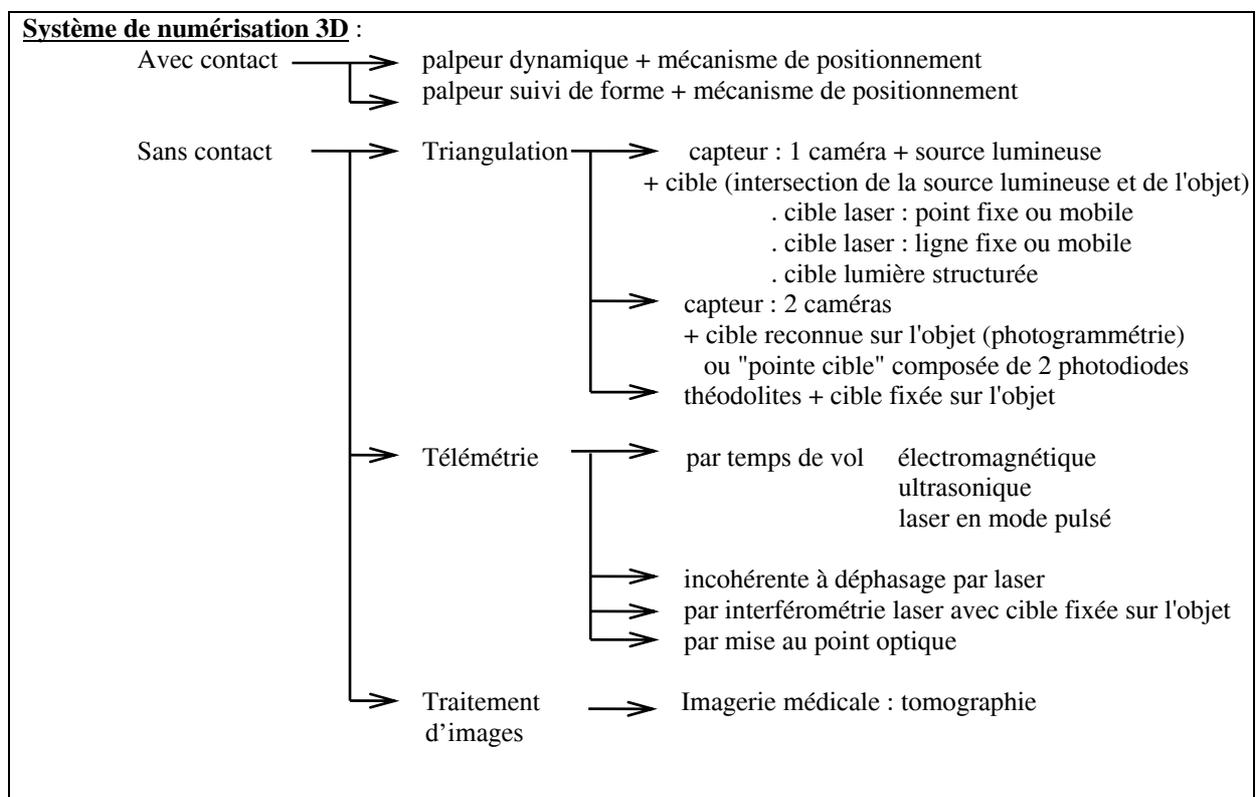


Figure 5 : Classification des systèmes de numérisation 3D [Bourdet 98]

La **triangulation** est une technique déjà employée par les premiers navigateurs, qui à l'aide de sextant se repéraient par rapport aux étoiles sur les océans. Cette technique permet la reconstruction d'une dimension à l'aide de données angulaires et de longueurs par simple calcul trigonométrique (Figure 6a). Plus généralement, la triangulation consiste en l'observation d'une scène ou d'un objet fixe selon un ou plusieurs points de vue, réalisée le

plus souvent par une ou plusieurs caméras. Nous trouvons ici à la fois des systèmes actifs (laser, lumière structurée) et des systèmes passifs (photogrammétrie, stéréovision).

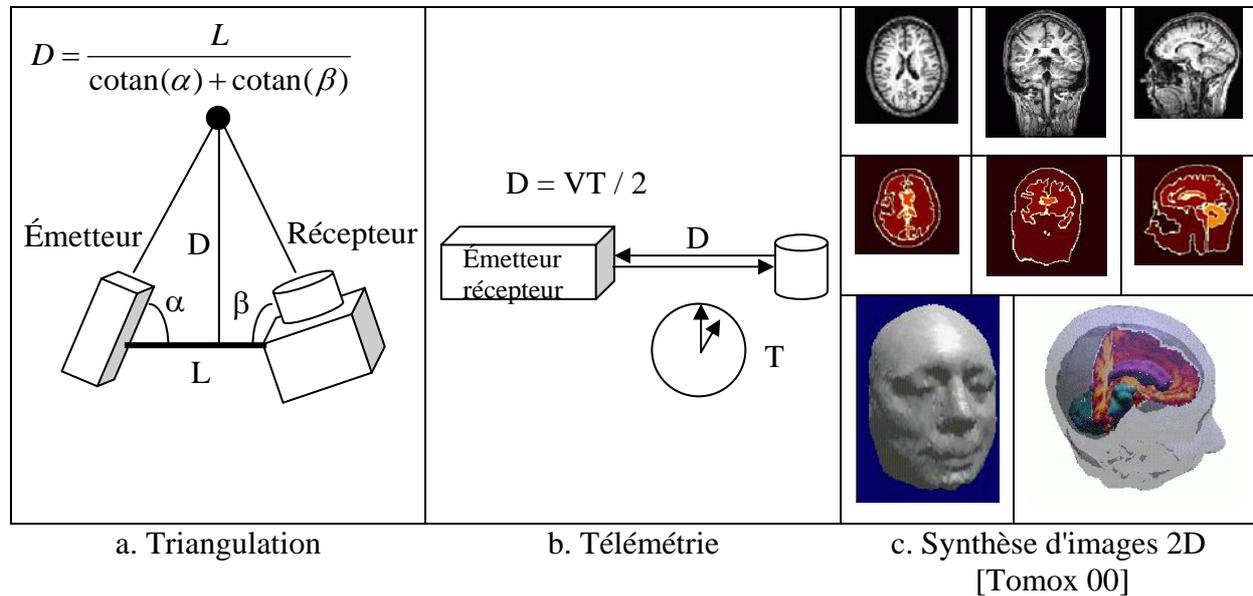


Figure 6 : Techniques de reconstruction du 3D

La **télémétrie** est une technique de mesure unidimensionnelle d'une distance entre un émetteur et un récepteur, c'est le principe de base des systèmes radar. Les radars électromagnétiques datent de 1903 lorsque Hulsmeyer expérimenta la détection d'ondes radio réfléchies par des bateaux. L'équation fondamentale des radars liant le temps à la distance est :  $V.T=2.D$ , où  $V$  est la vitesse de propagation du signal,  $D$  la distance à un objet réfléchissant et  $T$  le temps de parcours de l'onde, depuis l'émetteur radar jusqu'à l'objet réfléchissant puis au récepteur radar<sup>1</sup> (Figure 6b). Ce sont des systèmes actifs.

**L'imagerie** (traitement d'images) est une technique à part entière dans le domaine de la numérisation 3D. Issu du monde médical, le principe est le suivant : la reconstruction 3D du modèle est réalisée à partir de coupes 2D issues des différentes technologies employées, généralement un bombardement de rayons X (Figure 6c). Ces coupes en deux dimensions sont alors analysées par traitement d'images afin de réaliser un modèle tridimensionnel. L'avantage majeur vis à vis des techniques de triangulation ou de télémétrie est l'obtention de la structure interne de l'objet, absolument nécessaire en imagerie médicale. L'utilisation de

<sup>1</sup> Radar: Christian Hulsmeyer, Allemagne, 1903, radar limité à une distance de 1 mile; Sir Robert Watson-Watt, Angleterre, 1934, une première application du radar, radio détection et mesure de distance.

cette technique permet des contrôles non destructifs de pièces. Cependant la qualité de la numérisation obtenue est fortement dépendante des techniques de traitement d'images employées.

### 2.1.2 Exemples de technologies

Nous présentons ici quelques systèmes de numérisation 3D basés sur le principe de la triangulation active par lumière structurée, ligne laser, plan laser et sur le principe de la télémétrie par temps de vol.

Ces techniques présentent ici des applications de reconstruction de surface pour de l'anthropométrie, de la modélisation d'usine pour de la simulation d'opérations de maintenance, de copiage de forme, de génie civil pour de la sauvegarde de patrimoine historique.

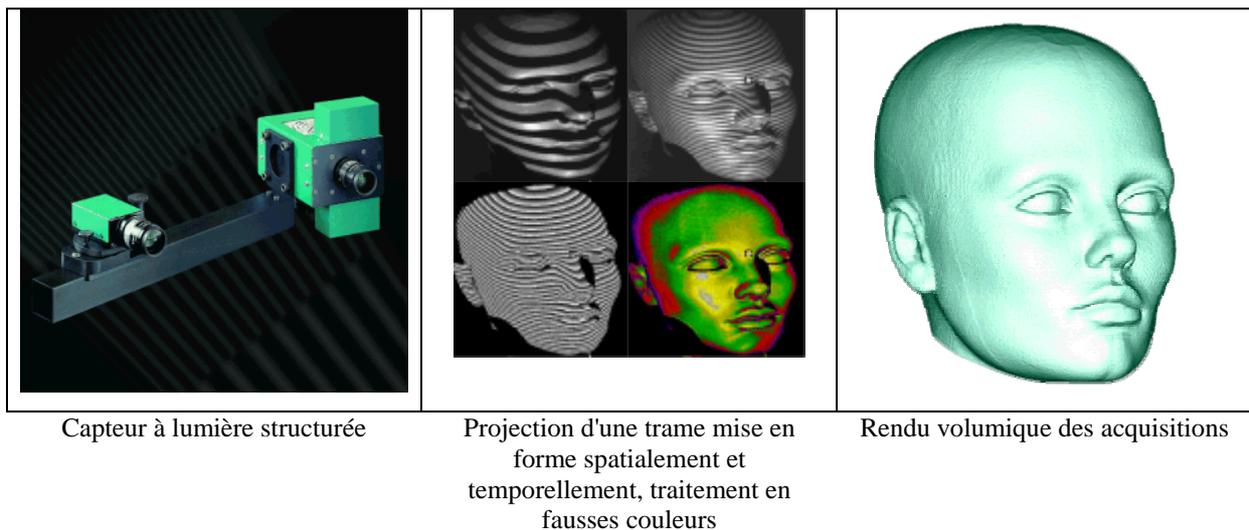


Figure 7 : Capteur à lumière structurée Optotop [www.breuckmann.com]

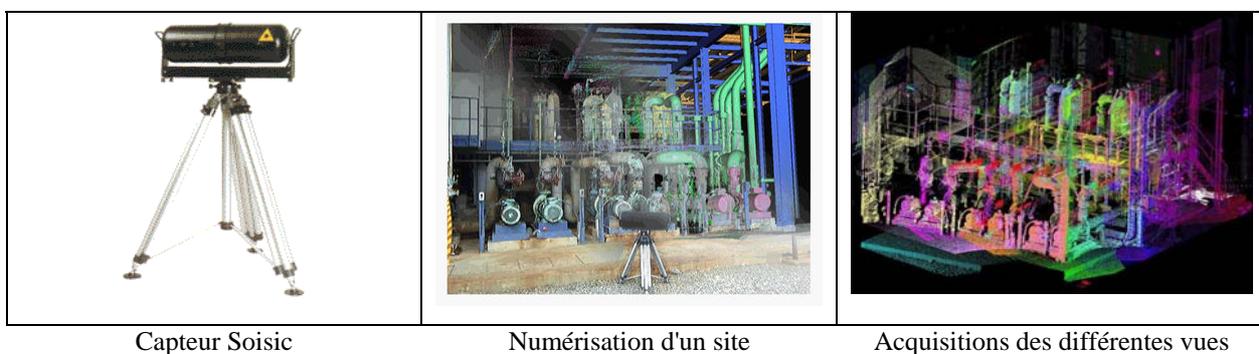


Figure 8 : Capteur à ligne laser Soisic scanner [www.mensi.com]

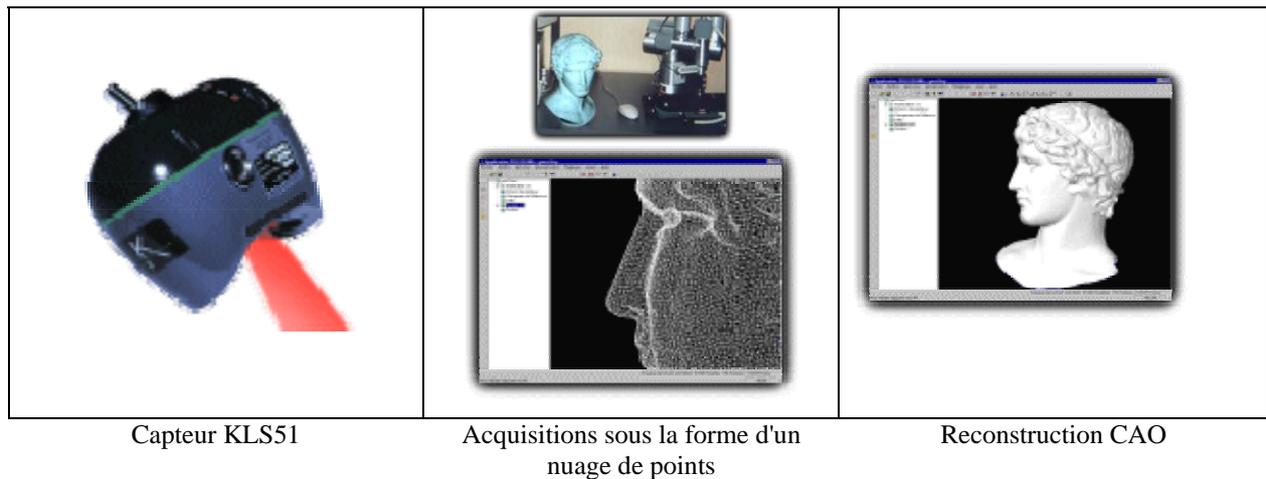


Figure 9 : Capteur à plan laser KLS51 [www.kreon3d.com]



Figure 10 : Capteur à temps de vol LMS-Z210 [www.riegl.co.at]

## 2.2 Fonction Déplacer

Le problème de l'accessibilité se pose très souvent lors de la numérisation exhaustive d'un objet [Garric 96][Papadopoulos 97]. En effet, afin d'obtenir une "image" représentative de l'objet, il est nécessaire d'effectuer un déplacement relatif du capteur 3D par rapport à l'objet. Le nombre de degrés de liberté (ddl) nécessaires pour atteindre toutes les positions de l'espace est variable en fonction du type de capteur employé.

La solution retenue est l'ajout d'un système de déplacement supportant le système d'acquisition et/ou la pièce à numériser avec ou sans mesure du déplacement. Le système de déplacement permet d'introduire des degrés de liberté supplémentaires (ddl) nécessaires à la numérisation complète de l'objet.

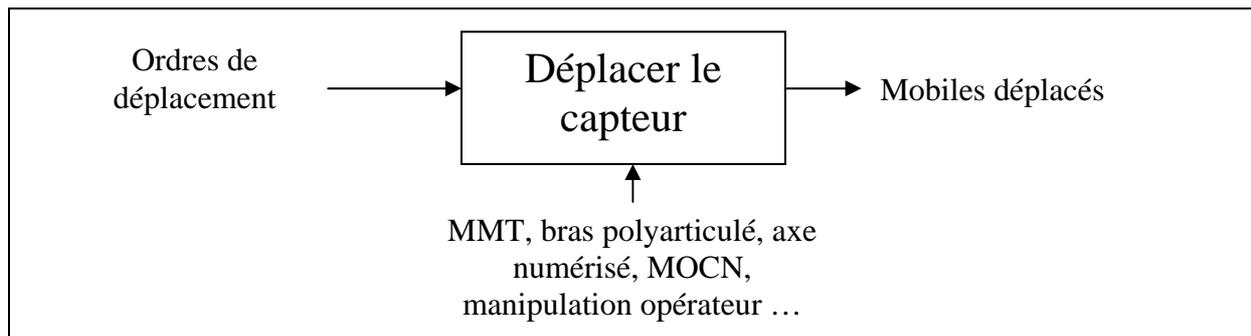


Figure 11 : Fonction déplacer

Par exemple, le balayage d'une surface nécessite au minimum 2 ddl supplémentaires pour un capteur à ligne laser, 1 pour un capteur à plan laser, et théoriquement 0 pour les capteurs à lumière structurée numérisant une vue par acquisition (Figure 12). En pratique, les limitations dues aux profondeurs de champ, à l'accessibilité et au champ de vision des moyens optique, obligent souvent à augmenter le nombre de degrés de liberté [Bourdet 98] [Papadopoulos 97].

De nombreuses études portent sur la détermination des accessibilités par rapport à la réalisation d'une tâche en robotique mobile, en contrôle dimensionnel, en planification de trajectoires, en visualisation [Tarabanis 95].

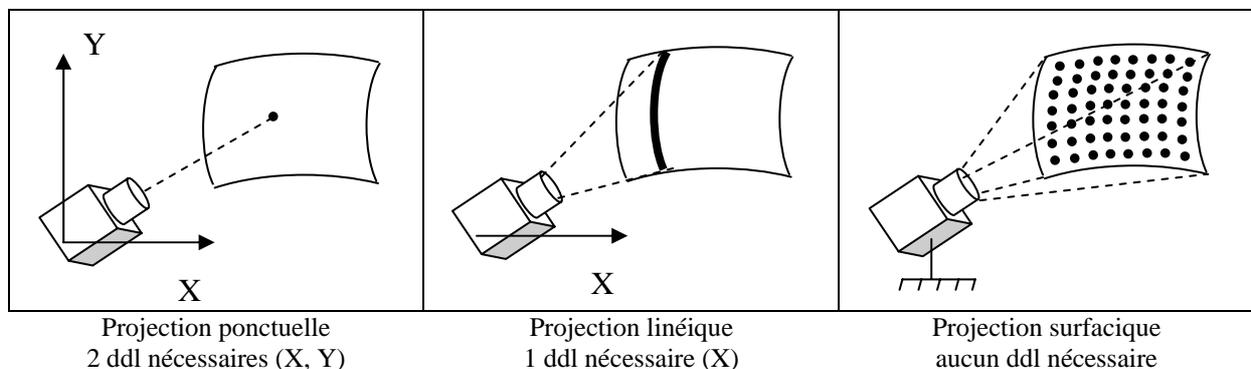


Figure 12 : Balayage d'une surface par un système de numérisation

Deux principaux types de structures peuvent être utilisés : les structures polaires (bras polyarticulés, robots, plateaux tournant) et cartésienne (typiquement une Machine à Mesurer Tridimensionnelle) (Figure 13). Les systèmes de déplacement offrent des géométries et des classes de précision très différentes (de quelques 0.1 mm à quelques  $\mu\text{m}$ ) (Figure 14).

On adjoint généralement aux systèmes à déplacements cartésiens des rotations supplémentaires soit au niveau du capteur par un système articulé (exemple: tête motorisée,

ou bloc de positionnement manuel) soit au niveau de la pièce en la déposant sur un plateau tournant.

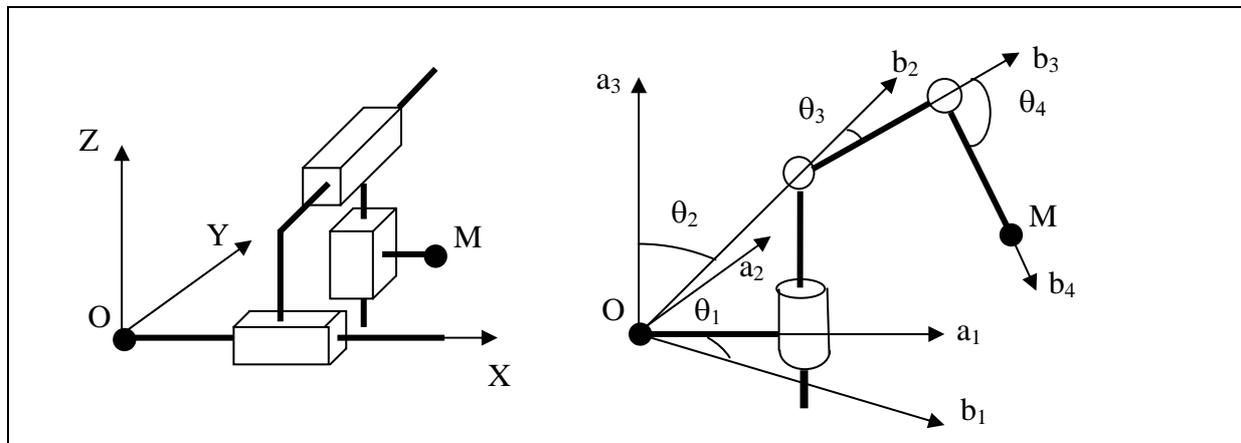


Figure 13 : Structures cartésienne et polaire

L'utilisation d'une Machine à Mesurer Tridimensionnelle offre de nombreux avantages en terme de qualité sur le positionnement du capteur. Les résolutions des règles de mesure ( $0.4 \mu\text{m}$ ) permettent des déplacements précis. De plus, de nombreuses études ont été menées en ce qui concerne la surveillance, le diagnostic et la correction des MMT [Bluteau 99]. Différentes méthodes de mesure des erreurs géométriques du porteur permettent d'évaluer et de corriger celui-ci [Teeuwsen 89] [Sartori 95]. Notre choix s'est porté sur une telle structure afin de pouvoir évaluer et maîtriser les conséquences géométrique et cinématique du porteur sur la numérisation proprement dite (§5).

<p>MMT Mistral Brown &amp; Sharpe (2-3<math>\mu\text{m}</math>)</p>	<p>Bras polyarticulé Faro (0.05 mm à 0.2 mm)</p>	<p>Machine outil Huron KX20 (environ 0.01 mm)</p>	<p>Model maker Cyberware (environ 0.1 mm)</p>

Figure 14 : Exemples de porteur réalisant la fonction Déplacer

Certaines technologies de numérisation ne nécessitent pas de systèmes de déplacement. C'est le cas par exemple des systèmes à suivi de cibles par photodiodes à l'aide de caméras fixes, en supposant que le champ de vision des caméras couvre la scène à observer.

### 2.3 Fonction Traiter

Le système de traitement rempli deux objectifs. D'une part, il gère la communication entre les différents sous-systèmes, et effectue la synchronisation du système de déplacement avec le système d'acquisition. D'autre part, il traite les données issues du capteur pour une mise en forme adéquate pour l'utilisateur (Figure 15).

En effet, le plus souvent, les données restituées sont fonction de la technologie employée et ne sont que très rarement tridimensionnelles. Le logiciel de traitement a pour fonction d'établir la relation de passage entre des données 1D/2D et 3D correspondantes. Cette étape est issue du processus de *calibration* effectué suivant une procédure spécifique à la technologie employée (voir chapitre 3).

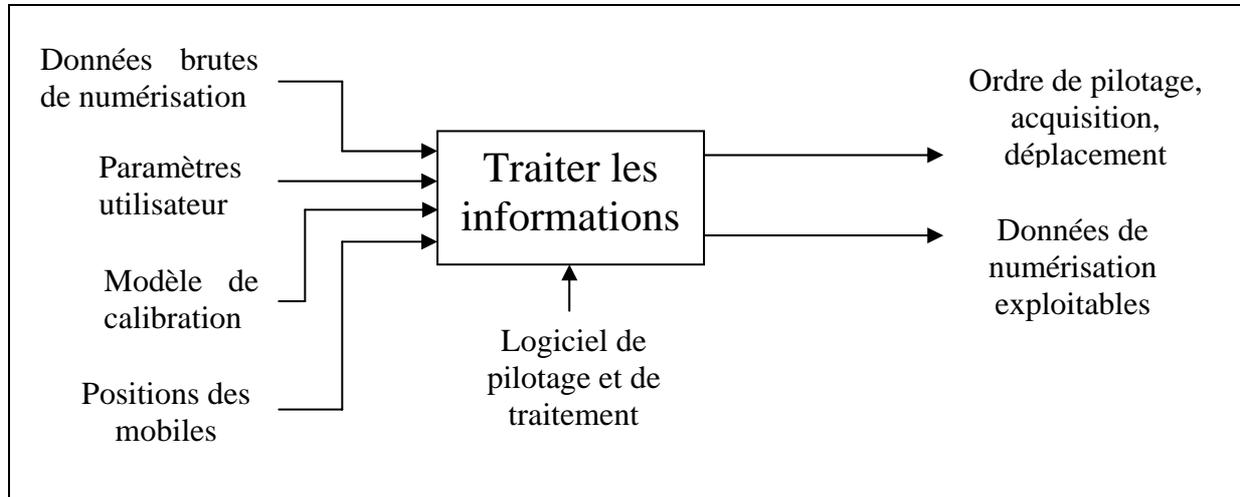


Figure 15 : Système de traitement

Le logiciel de traitement est nécessaire pour le recalage de vues associées aux différentes orientations de capteur. De nombreuses techniques sont employées allant du recalage manuel à l'appariement automatique de vues, de l'extraction de points ou lignes d'intérêt à la mise en correspondance de modèles polyédriques [Besl 92]. Le problème du recalage simple face au recalage global a été évoqué par Ben Jemaa [Ben Jemaa 98]; une

approche de recalage simple, uniquement entre deux fenêtres de numérisation, ne permet pas de gérer toutes les interactions dues aux recouvrements mutuels. Les erreurs s'accumulent et se propagent entre les surfaces recalées. Un état de l'art de ces méthodes et algorithmes de traitement est détaillé dans [Ben Jemaa 98].

C'est au niveau du système de traitement que l'utilisateur peut introduire certains paramètres traduisant ses exigences relatives au cahier des charges de numérisation. Il choisit le pas de la numérisation, la résolution minimale, l'étendue des numérisations, mais aussi le type de données qu'il souhaite obtenir. Il établit ainsi sa stratégie de numérisation.

Nous avons décrit la chaîne de numérisation (chaîne d'acquisition numérique) au travers des trois fonctions qui lui sont associées : la fonction Acquérir, la fonction Déplacer, la fonction Traiter. La suite de notre propos détaille les principales sources d'incertitudes liées à ces fonctions. Nous détaillons principalement l'utilisation d'une caméra CCD et d'une source laser qui sont couramment utilisées pour répondre à la fonction Acquérir. Puis nous abordons la fonction Traiter en donnant un aperçu sur les différentes méthodes de calibration. Nous considérons la fonction Déplacer comme étant largement traitée dans la littérature, nous la citons ici pour mémoire.

### **3 Imprécisions associées à la fonction Acquérir, point de vue matrice CCD et source laser**

Nous nous intéressons plus précisément dans cette partie à un type de capteur 3D par triangulation active qui consiste en l'association d'une caméra CCD avec une source laser. C'est un capteur de ce type qui sera utilisé lors de nos expérimentations : capteur à plan laser Kréon Technologie ([www.kreon3d.com](http://www.kreon3d.com)). Nous verrons dans la partie expérimentale, que notre étude peut cependant se généraliser à l'emploi de systèmes d'acquisitions sans contact à base de caméra, si le modèle de calibration est connu.

#### 3.1 Constitution d'une caméra CCD

La caméra CCD est le type de capteur le plus utilisé dans le domaine de la "vision artificielle". Nous allons décrire les principaux éléments la constituant, afin d'en extraire les principales caractéristiques et sources d'imprécisions. Deux parties composent la caméra CCD : l'objectif et la matrice CCD (Figure 16).

L'objectif contient un ensemble de lentilles d'axes de symétrie considérés comme confondus en un axe unique appelé axe optique. L'objectif permet la formation de l'image de la scène observée dans le plan image. Cette image représente les luminances des objets contenus dans le champ de vue de l'objectif. Il est source d'aberrations géométriques et chromatiques, phénomènes d'autant plus importants que l'on s'éloigne des zones centrales des lentilles de l'objectif.

Cette image, sous forme d'informations analogiques, est alors numérisée. C'est en partie le rôle de la matrice CCD, elle est constituée d'un assemblage de photodiodes, chacune d'elles délivrant une intensité proportionnelle à la luminance de chaque pixel. Les éléments photosensibles sont "impressionnés" par les photons de la lumière visible et du proche infrarouge, par un obturateur électronique le temps nécessaire.

La discrétisation spatiale de l'image ou résolution spatiale dépend du nombre de sites photosensibles. Nous trouvons aujourd'hui des caméras haute résolution à 6 000 000 pixels (caméra Inca, Leica). Un phénomène de déformation locale de l'image peut être provoqué par un suréclairement (ou blooming) dans les zones adjacentes.

Le signal provenant des sites photosensibles est traité par un convertisseur analogique/numérique. Cette conversion produit une erreur de quantification ou arrondi et peut aussi introduire un bruit de nature électronique.

On peut distinguer deux familles de caméras CCD :

*Les caméras matricielles* : le capteur est constitué d'une matrice de  $n$  lignes par  $p$  colonnes d'élément de base la photodiode, souvent de taille 256x256, 512x512. La charge analogique de chaque élément est convertie en valeur numérique dans la caméra.

*Les caméras linéaires* : le capteur est constitué d'une seule barrette de détecteurs, mais de meilleure résolution (souvent 2048 éléments). La deuxième dimension est recréée le plus souvent par l'acquisition de la position du porteur.

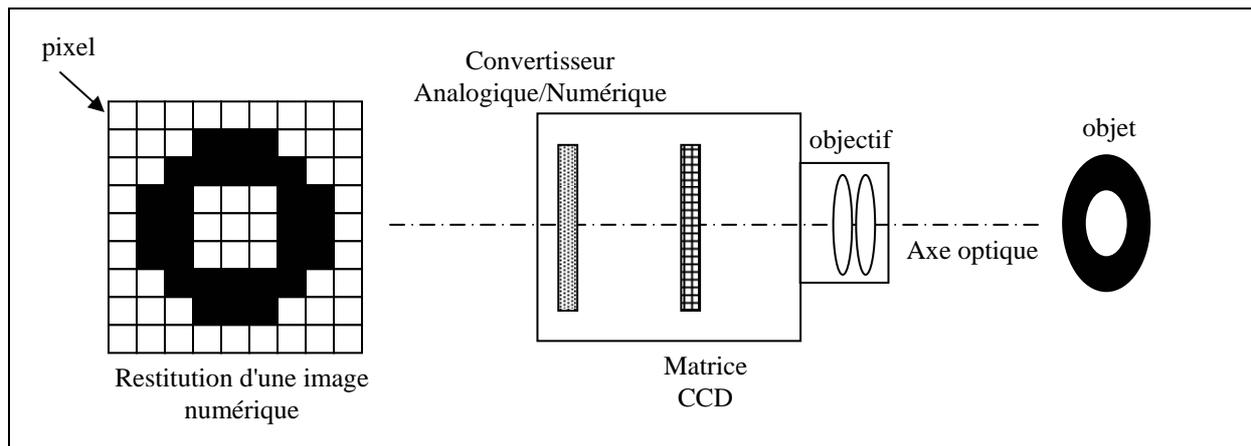


Figure 16 : Caméra CCD

Les caractéristiques géométriques et optoélectroniques d'une caméra CCD sont détaillées dans [Zhou 92], en voici quelques unes :

- sensibilité lumineuse (lumière blanche): elle se définit comme le quotient de la variation de la réponse par la variation de l'éclairement lumineux. Nous obtenons ainsi l'amplitude du signal vidéo correspondant à une scène observée de luminance uniforme donnée :

$$\text{Sensibilité lumineuse} = \text{Réponse (mV)} / \text{Eclairement (Lux)}$$

La réponse est la tension du signal vidéo. L'éclairement lumineux est le flux lumineux reçu par unité de surface et s'exprime en Lux.

- résolution : la résolution spatiale caractérise l'aptitude du capteur à distinguer les détails d'une scène.

Nous trouvons aussi les caractéristiques suivantes : non linéarité de la réponse à l'éclairement, non uniformité de réponse, sensibilité spectrale, rapport signal sur bruit, déformations géométriques, résistance à l'éblouissement, bruit d'échantillonnage, bruit de quantification. Autant de source d'imprécisions ou de bruit.

Concernant le bruit dans les mesures optiques, rappelons les différentes sources possibles d'après [TI Goure] (Figure 17).

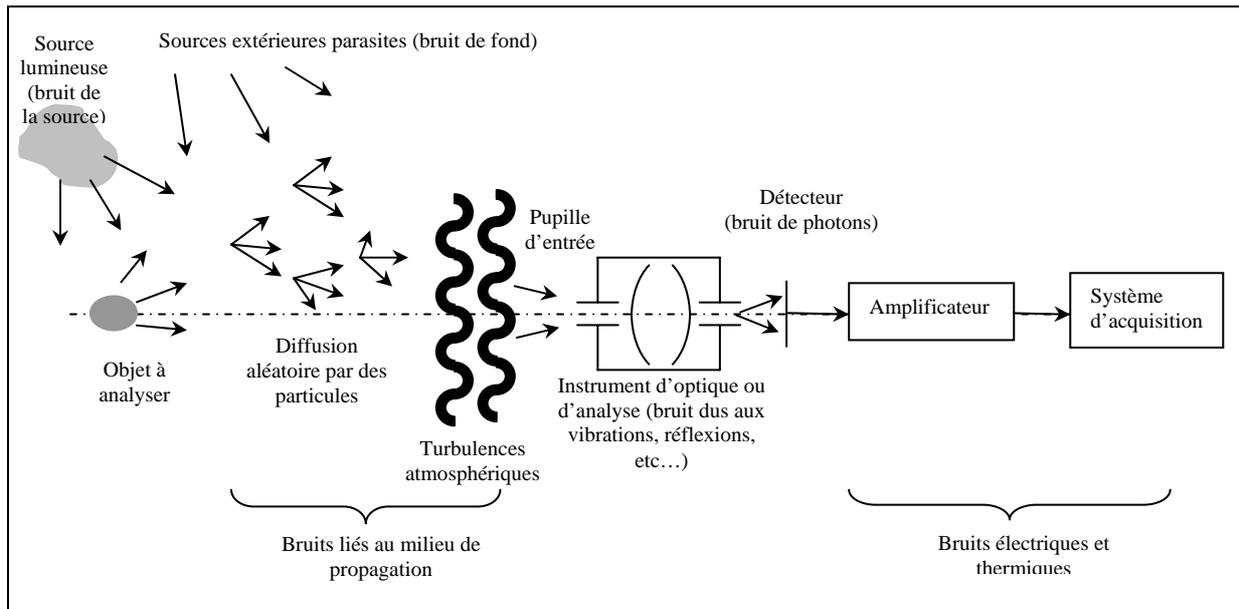


Figure 17 : Principales sources de bruit en mesures optiques [TI Goure]

### 3.2 Problèmes liés à l'emploi d'un laser

Le cas particulier des capteurs utilisant une source laser mérite d'être évoqué ici. C'est une méthode de type active largement employée. De plus l'emploi d'une source laser permet d'obtenir une source lumineuse cohérente collimatée qui présente moins de contrainte en terme de conditions de contraste par rapport à une lumière blanche.

#### 3.2.1 Définition, principe [Dico web2] [Cohen 99]

LASER signifie Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, soit une amplification de la lumière par une émission stimulée de radiation (Figure 18). Ceci permet d'obtenir un appareil fournissant un rayonnement lumineux directif et quasiment monochromatique. Un laser émet une source lumineuse qui est cohérente spatialement et temporellement, en maintenant la phase entre les ondes sur une grande distance, et qui a de la directivité par concentration de la puissance sur un espace réduit.

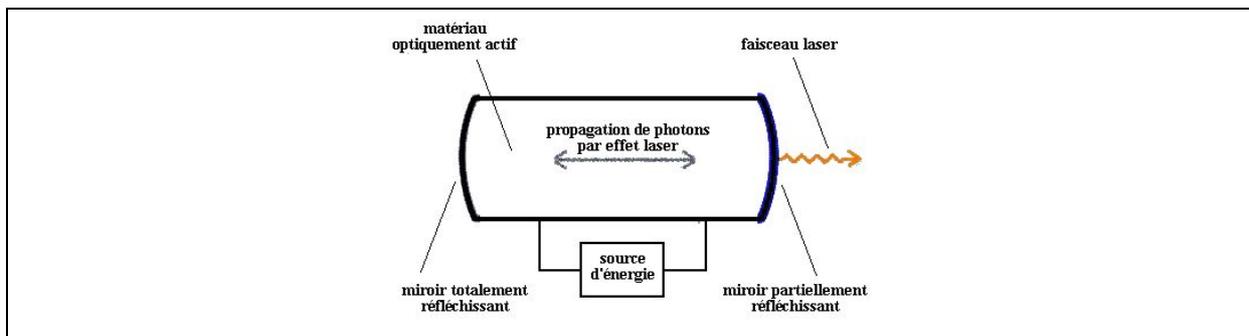


Figure 18 : Schéma de principe d'un laser [Cohen 99]

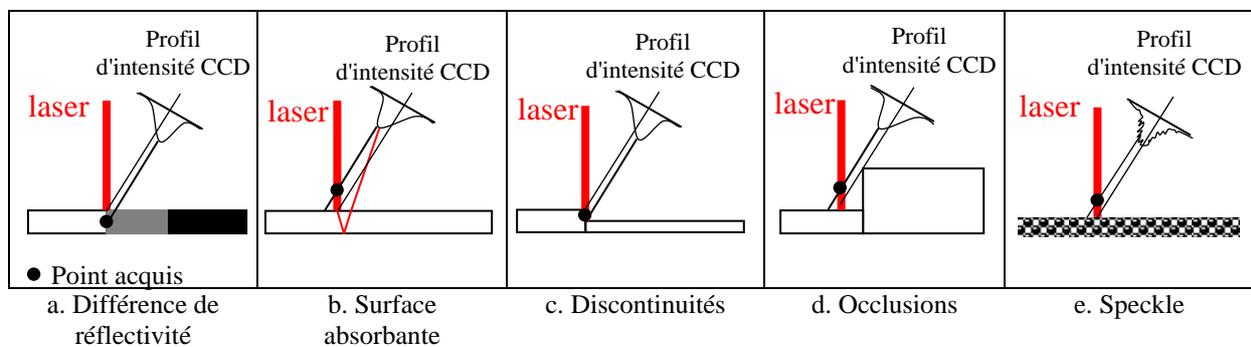
### 3.2.2 Problèmes liés à la géométrie et à la nature de l'objet numérisé

Différents problèmes peuvent être rencontrés lors de l'utilisation d'une source laser pour effectuer une numérisation 3D. Un capteur CCD observe la trace laissée sur l'objet à numériser par la ligne ou le plan laser. La numérisation de cette trace par le capteur se fait par l'identification du pic d'intensité laser.

Les lasers émettent la lumière avec un faisceau d'intensité de profil gaussien [Prieto 99]. Si l'énergie du faisceau n'est pas perturbée, une source de lumière gaussienne produit une image gaussienne sur le capteur CCD. Ainsi si le profil d'intensité est modifié, ceci aura pour conséquence une interprétation erronée par l'identification du pic d'intensité (par la moyenne ou la médiane de la répartition) dans le capteur CCD.

Les différentes causes sont les suivantes :

- ❑ la surface présente des différences de réflectivité, Figure 19a
- ❑ la surface est réfléchissante ou absorbante, Figure 19b
- ❑ la surface présente des discontinuités, Figure 19c
- ❑ le faisceau laser est partiellement occlus, Figure 19d
- ❑ il se produit le phénomène de speckle, Figure 19e



Le phénomène de speckle intervient lorsque l'état de surface micro géométrique est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du laser employé, il se produit alors un phénomène d'interférence lumineuse entre la lumière cohérente émise par le laser et celle réfléchie par la surface de la pièce. Ceci a pour effet une perturbation du profil d'intensité lumineuse observé par la caméra CCD, et restitue ainsi une acquisition erronée.

En conclusion, les différentes technologies employées, matrice CCD et source laser sont potentiellement des sources d'incertitudes sur la mesure. Les conditions géométriques de la matrice CCD sont source d'aberrations et doivent parfois être prises en compte dans le processus de reconstruction du 3D (§4.2). L'influence du laser sur la surface numérisée prend en compte à la fois l'angle d'incidence et la nature de la surface.

Abordons à présent la seconde fonction concernant l'aspect logiciel de la chaîne de numérisation, plus particulièrement au niveau de la calibration : la fonction Traiter.

### **4 Problématique liée à la fonction Traiter, point de vue de la calibration**

Outre les problèmes liés à la nature de l'objet à numériser que nous avons évoqué précédemment, l'aspect traitement logiciel notamment au travers du processus de reconstruction du 3D n'est pas sans sources d'imprécisions. En effet, des modèles et algorithmes parfois très différents sont employés pour répondre à la fonction Traiter.

#### 4.1 Définition de la calibration

Nous employons la définition suivante :

"La calibration d'une caméra dans le contexte de la vision 3D par ordinateur est le processus de détermination de la géométrie interne à la caméra et les caractéristiques optiques (paramètres intrinsèques) et/ou la position 3D et l'orientation du plan de la caméra dans un référentiel absolu (paramètres extrinsèques)" d'après [Tsai 87].

Ainsi, la calibration d'un système optique est l'identification des paramètres constitutifs de son modèle. Nous distinguons ici d'une part le choix d'un modèle représentant le système d'acquisition, par exemple un modèle de sténopé, et d'autre part une méthode d'identification des paramètres. C'est à dire l'emploi de procédure et la résolution numérique permettant de déduire les coefficients du modèle choisi.

En résumé, la procédure de calibration met en jeu différentes activités représentées sur la Figure 20 :

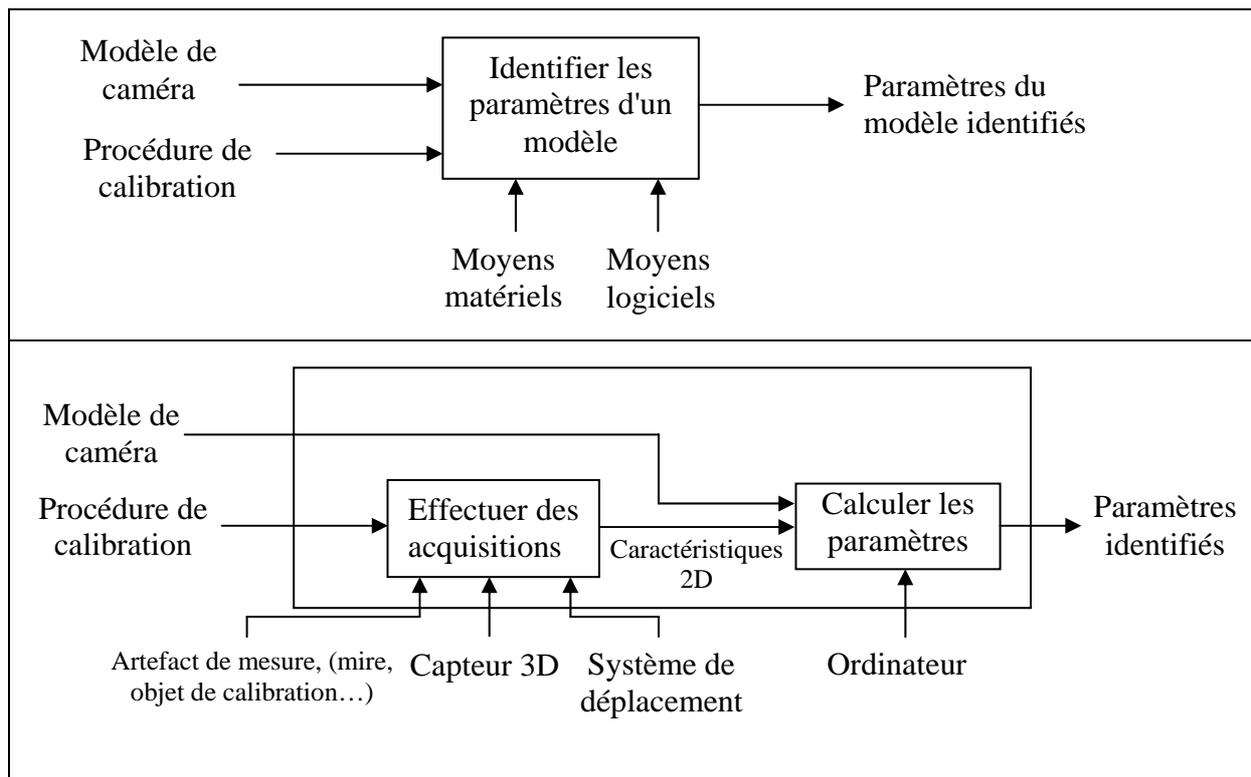


Figure 20 : Calibration

#### 4.2 Modèles de calibration

La modélisation pour des systèmes à base de caméra, consiste à exprimer sous la forme d'un certain nombre de paramètres son comportement géométrique dans le processus de formation d'image. Nous distinguons principalement dans la littérature deux types de modèle de caméra : le modèle de projection perspectif ou modèle du sténopé qui est le plus répandu et le modèle des deux plans, par extension des  $n$  plans.

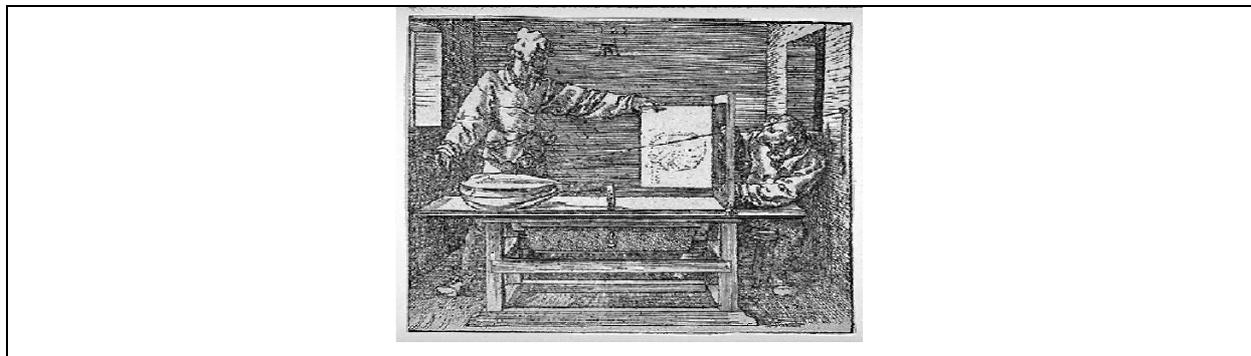


Figure 21 : Illustration de la formation de l'image pour un modèle de sténopé [Dürer 1525]

4.2.1 Modèle physique du sténopé

Ce modèle repose sur les propriétés géométriques des lentilles minces. La Figure 22 montre les différents modèles de lentilles [Cahn 97]. L'objectif de la caméra est considéré comme une lentille idéale et l'objet, supposé suffisamment éloigné, est considéré comme un objet plan.

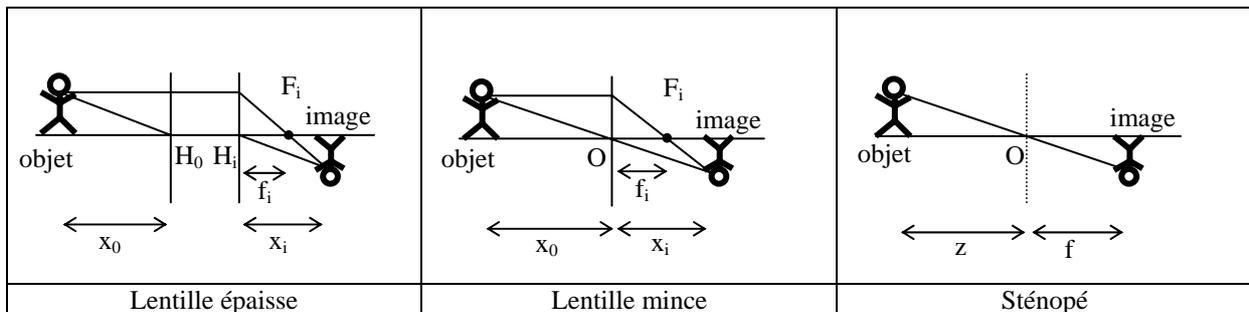


Figure 22 : Modèles de lentille [Cahn 97]

La transformation d'une scène bidimensionnelle en une scène tridimensionnelle est réalisée par le modèle de projection perspectif ou modèle du sténopé. Les hypothèses de ce modèle sont : orthogonalité des axes du plan de projection (O, u, v) et planéité de la surface.

Ici, un point B(X,Y,Z) est projeté en un point b(u,v) sur le plan de la caméra (ou plan rétinien), par l'intermédiaire du point F (Figure 23). Ce point F, appelé point focal ou centre optique ici, définit le centre de projection. La distance entre le centre optique et le plan rétinien est la distance focale f.

Une évolution du modèle sténopé est la prise en compte des distorsions optiques imputées aux optiques des caméras [Weng 92]. Ces distorsions peuvent être de différentes nature (Figure 24).

L'introduction des distorsions dans le modèle sténopé permet de prendre en compte les défauts suivants : montage décentré des lentilles, qualité géométrique des lentilles, orthogonalité de la grille de capteurs CCD, orthogonalité du plan image avec l'axe optique.

Les coordonnées du point b(u, v) dans la matrice CCD deviennent alors :

$$\begin{cases} u_d = u + \Delta u & \text{avec } \Delta u = \Delta u_r + \Delta u_d \\ v_d = v + \Delta v & \text{avec } \Delta v = \Delta v_r + \Delta v_d \end{cases}$$

La distorsion radiale  $\Delta_r$  est due à la courbure des lentilles et la distorsion de décentrement  $\Delta_d$  à la non colinéarité de l'axe des différentes lentilles du système optique.

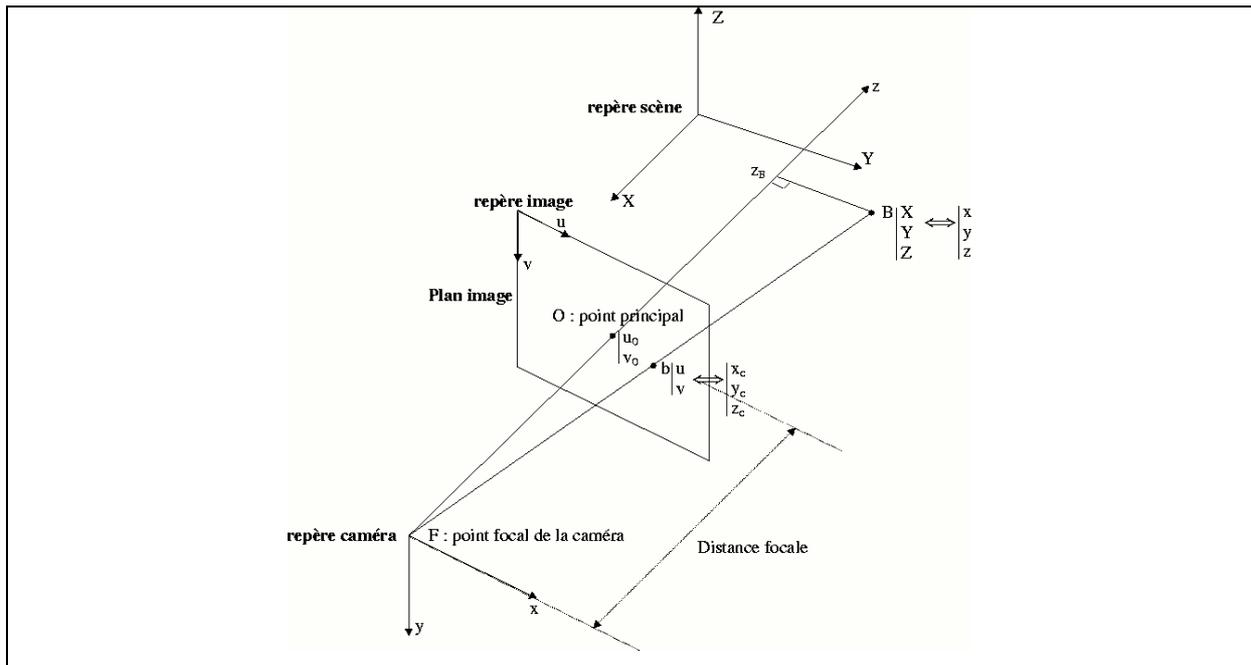


Figure 23 : Modèle du sténopé

En coordonnées cartésiennes, la distorsion radiale peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\begin{cases} \Delta u_r = k_d \cdot u \cdot (u^2 + v^2) + o(u, v)^5 \\ \Delta v_r = k_d \cdot v \cdot (u^2 + v^2) + o(u, v)^5 \end{cases}$$

où  $k_d$  réel, paramètre de distorsion radiale.

De la même façon, nous pouvons exprimer la distorsion de décentrement par :

$$\begin{cases} \Delta u_d = p_1 \cdot (3u^2 + v^2) + 2p_2 uv + o(u, v)^4 \\ \Delta v_d = 2p_1 uv + p_2 \cdot (u^2 + 3v^2) + o(u, v)^4 \end{cases}$$

où  $p_1$  et  $p_2$ , paramètres réels associés à la distorsion de décentrement.

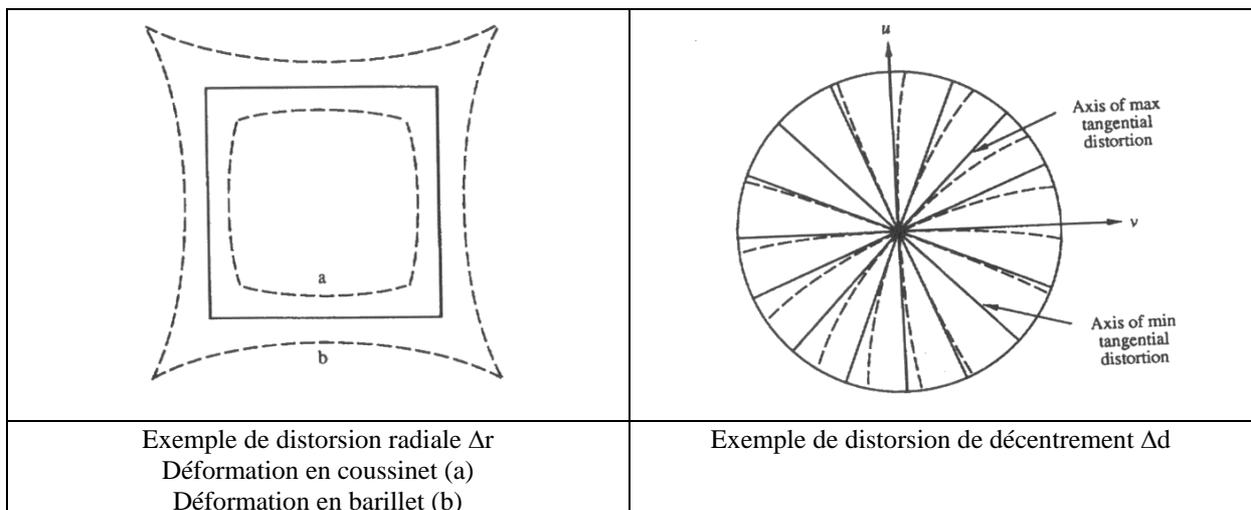


Figure 24 : Phénomène de distorsion [Weng 92]

#### 4.2.2 Modèle mathématique des n plans

Le modèle mathématique ne prend pas en compte explicitement la constitution de la caméra. Il s'agit en fait de la modélisation d'un volume de travail qui contient les points projetés dans l'image discrétisée.

On associe à chaque point image 2D, n points 3D situés dans n plans connus de l'espace. Ces points représentent l'intersection du rayon, associé au point 2D, avec ces n plans 3D de l'espace. Pour la méthode des 2 plans, la calibration consiste à estimer la transformation entre les coordonnées (u,v) du plan image et les coordonnées des points  $P_1 = (x_1, y_1, 0)$  dans  $R_1$ ,  $P_2 = (x_2, y_2, 0)$  dans  $R_2$  (Figure 25).

Trois solutions sont proposées pour effectuer cette transformation :

- une transformation linéaire :

par la définition d'une matrice  $2 \times 3$  ( $A_i$ ) :  $\{i = 1..2\} : (x_i \ y_i)^t = (A_i) \cdot (u \ v \ 1)^t$

- une transformation quadratique :

par la définition d'une matrice  $2 \times 6$  ( $A_i$ ) :  $\{i = 1..2\} : (x_i \ y_i)^t = (A_i) \cdot (u \ v \ u^2 \ v^2 \ uv \ 1)^t$

- une transformation par l'emploi de spline cubique

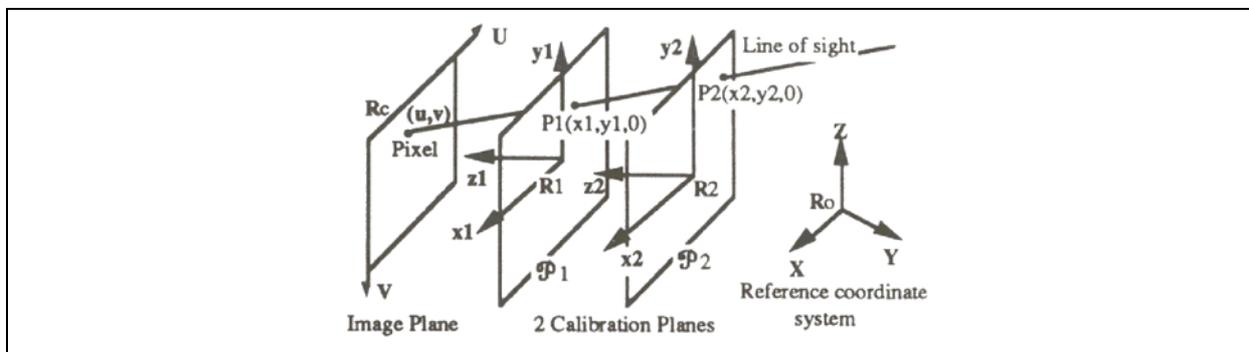


Figure 25 : Modèle des 2 plans [Champleboux 92]

Contrairement au modèle physique, les lignes de projection ne passent pas obligatoirement par le centre optique. La calibration consiste à identifier les paramètres des formules d'interpolation. On calibre un volume de travail délimité par les plans. Cette méthode présente l'intérêt d'être indépendante de la nature du système d'acquisition et d'être plus « précise ». Cependant, le coût de calcul reste élevé et la mise en œuvre plus délicate.

Notons ici que notre application s'appuie sur un modèle physique de type sténopé ne prenant pas en compte la distorsion.

### 4.3 Influence des méthodes d'identification pour la calibration des caméras CCD

Nous trouvons ici un grand nombre de méthodes de calibration en fonction des différentes technologies employées. Nous n'en donnerons pas une description exhaustive, nous ferons référence à Zhou pour une description plus approfondie des méthodes de calibration [Zhou 92]. Il est important cependant de noter que l'étape de calibration nécessite deux phases bien distinctes : le choix d'un modèle de caméra (voir §4.2), puis la procédure d'identification proprement dite des paramètres du modèle. C'est lors de cette dernière étape que de nombreuses méthodes et algorithmes sont employés dans la littérature. Une étude comparative des méthodes de calibration menée par Salvi montre les performances des différents algorithmes les plus couramment utilisés [Salvi 02] (voir chapitre 4).

De plus, les méthodes de calibration employées par les systèmes à base de caméras associent des primitives géométriques extraites de l'espace objet et image. Ces méthodes sont basées sur l'appariement de ces primitives afin d'en déduire les paramètres du modèle choisi. Nous trouvons par exemple les appariement suivants : points image 2D / points objet 3D, segments image 2D / segment objet 3D. Ces techniques mettent en œuvre des modèles spécifiques à la procédure employée. Garric étudie l'influence de ces différentes techniques pour des problèmes liés au positionnement de manipulateur dans l'espace 3D [Garric 96]. Il propose l'utilisation de l'algorithme de Bard Deming, qui est une alternative au filtre de Kalman, pour minimiser le bruit sur les primitives utilisées. Nous ne détaillerons pas ici ces algorithmes qui dépassent le cadre de notre étude.

En conclusion, la phase de calibration est une phase essentielle dans le processus de numérisation 3D et fait intervenir un grand nombre d'hypothèses et de modèles. Il faut alors être vigilant sur les répercussions dans l'espace des points 3D obtenu en terme de qualité dimensionnelle.

Le LURPA a développé une méthode de calibration permettant l'adaptation d'un capteur à plan laser sur une MMT équipée d'une tête orientable [Dantan 96]. C'est cette méthode de calibration que nous emploierons dans notre étude. L'objectif poursuivi n'est pas ici de comparer différentes méthodes pour en dégager la plus performante, mais l'évaluation de la qualité du nuage de points obtenu. Ainsi, nous ne remettons pas en cause la méthode de calibration qui nous sert de support pour illustrer le processus de qualification d'un nuage de points issu de la numérisation 3D.

## 5 Problématique liée à la fonction Déplacer, point de vue du porteur

Pour réaliser la numérisation la plus complète possible, le capteur 3D doit être positionné et orienté par rapport à l'objet. De plus l'ajout de degrés de liberté (§2.2), est presque toujours nécessaire pour effectuer un balayage correct de l'objet. C'est le rôle du porteur qui réalise la fonction Déplacer. Nous abordons ici, les porteurs qui comportent une commande numérique gérant les déplacements : Machines Outil à Commande Numérique MOCN, ou plus généralement des porteurs à base d'axes numérisés, Machines à Mesurer Tridimensionnelles (MMT). Ces porteurs introduisent un certain nombre de perturbations au niveau de la mesure (Figure 26).

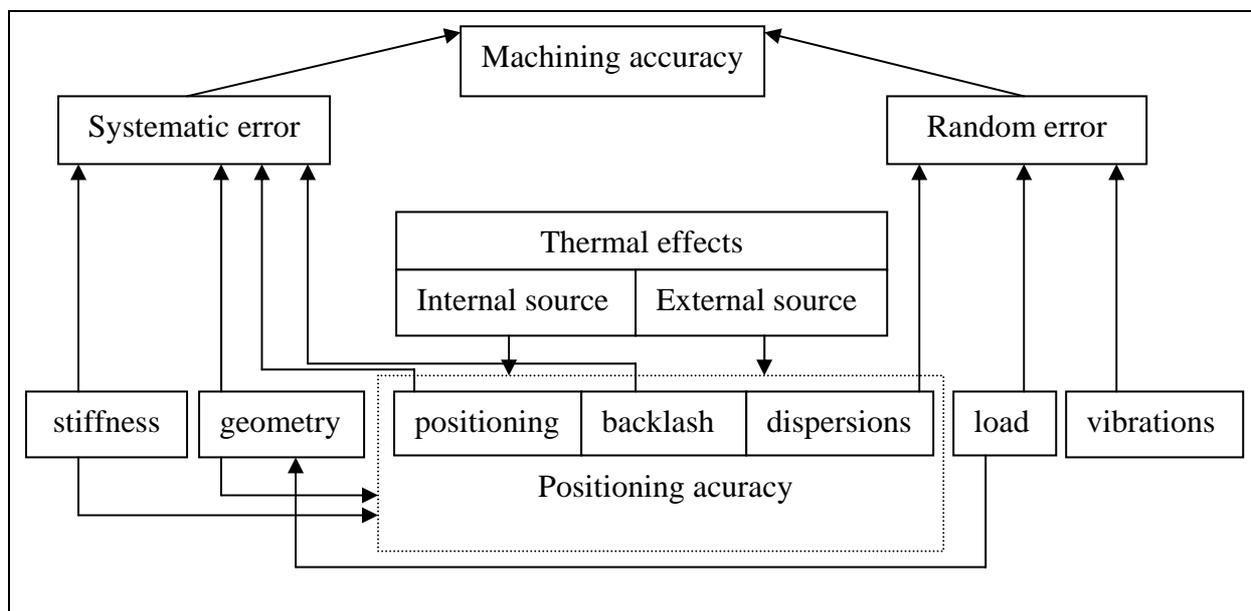


Figure 26 : Diagramme des sources d'erreurs affectant la précision de la machine [Rahman 00]

A titre d'exemple, la mise en géométrie d'une MMT permet l'identification, la modélisation et la correction de défauts associés aux mouvements des mobiles. Sous l'hypothèse de solides indéformables, nous pouvons décrire les erreurs de chaque axe par un champ de déplacement de corps solide. L'utilisation du Torseur des Petits Déplacements [Bourdet 87] pour décrire ces erreurs de position permet, par sa linéarité de rendre les déplacements indépendants. Ainsi, l'erreur de position pour chaque pas de mesure s'écrit en fonction de 6 paramètres : 3 translations (une justesse et deux rectitudes) et 3 rotations (roulis, tangage et lacet). A ces 6 paramètres par axe, on ajoute 3 paramètres de position relative des axes (perpendicularités). Le modèle des 21 défauts constitue le modèle analytique de correction d'une machine 3 axes. Pour ce qui est des machines outils, des approches récentes

de correction volumique à l'aide de tracker (laser interférométrique suiveur) voient le jour [Leleu 02].

La Figure 27 présente des mesures de justesses réalisées par un laser interférométrique lors de la mise en géométrie de la MMT du LURPA. Ces défauts géométriques, qui peuvent atteindre une vingtaine de microns (axe Y), sont compensés au niveau du logiciel de mesure par une matrice de correction.

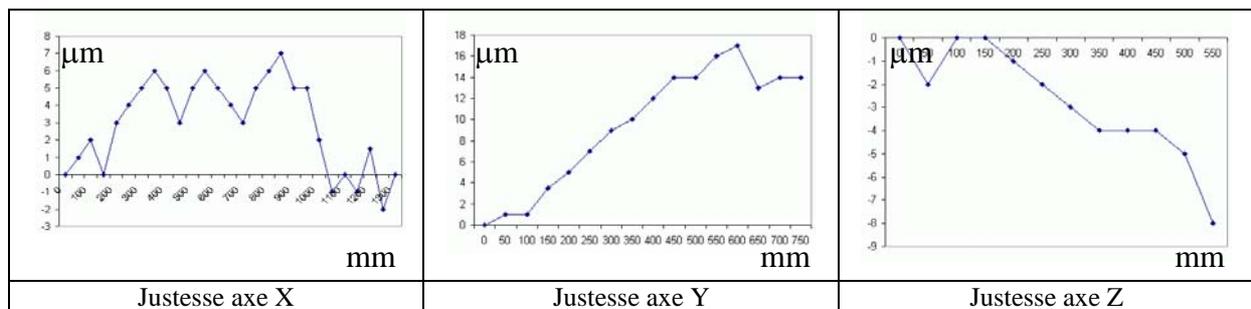


Figure 27 : Relevés de justesse avant correction

L'identification et la correction des porteurs de type MMT étant largement abordés dans la littérature, nous n'y reviendrons pas spécifiquement.

En plus d'effets statiques, la Figure 28 présente l'effets thermiques des éléments d'entraînement des mobiles. Nous constatons une dérive sur l'axe X sur l'acquisition d'un point en répétabilité sur une durée d'une heure, correspondant à 230 acquisitions environ. La cause de la dérive observée est l'influence thermique du moteur d'entraînement de l'axe X à la mise sous tension de la machine.

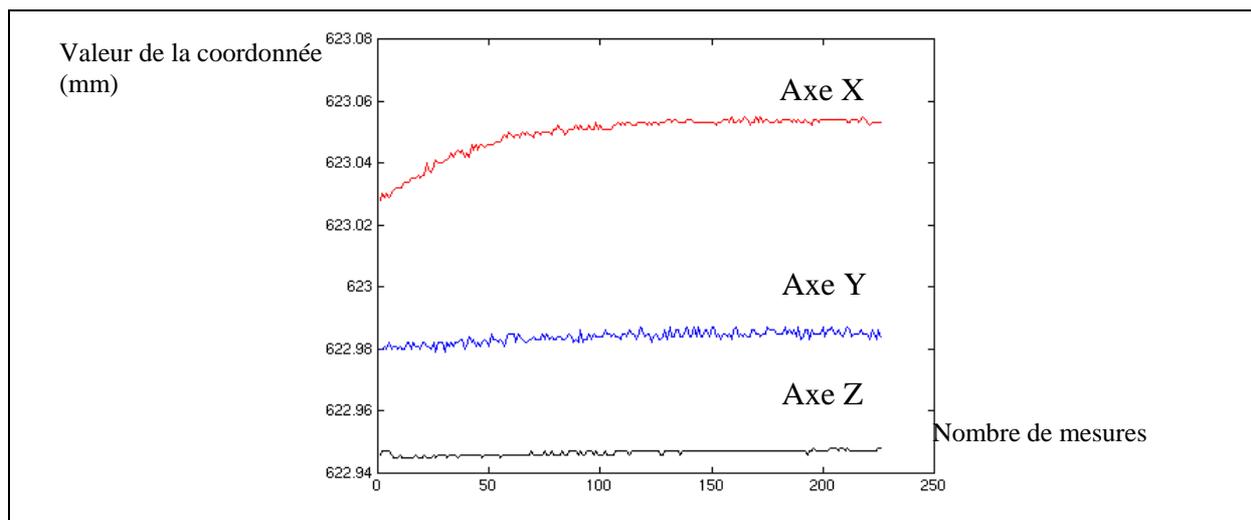


Figure 28 Dérive thermique

Différentes actions correctives peuvent alors être menées : attente d'un régime permanent, modélisation du comportement, remplacement ou modification des organes en

cause. Dans notre cas, l'atteinte du régime permanent après une période de mise en chauffe de la machine permet de négliger les effets thermiques.

Nous notons ici que l'emploi d'une MMT comme porteur permet de nous affranchir ou de considérer comme négligeables les sources d'incertitudes liées au système de déplacement par rapport à celles du capteur optique.

Enfin, remarquons que la fonction déplacer peut être réalisée par l'utilisateur en déplaçant manuellement le système de numérisation 3D. Le problème est alors transféré dans le système logiciel de traitement qui aura la charge du recalage des différentes vues de numérisation, ce qui peut causer des problèmes d'identification [Brand 94].

## 6 Conclusion

La structure des systèmes de numérisation 3D d'une façon générique s'appuie sur des ressources matérielles et logicielles qui sont des sources potentielles d'erreurs sur les acquisitions délivrées. Nous avons isolé trois fonctions principales que sont les fonctions Acquérir, Traiter et Déplacer. Nous nous intéresserons aux deux premières fonctions, considérant la fonction Déplacer comme une fonction relativement bien maîtrisée dans le cas des MMT en tant que source d'imprécisions.

Bien qu'il existe une grande diversité de composants technologiques pour répondre à la fonction souhaitée de numérisation 3D, nous nous sommes concentrés plus particulièrement sur les systèmes de triangulation active à base de caméras et de source laser. Ces systèmes sont employés par de nombreuses applications aussi diverses que variées. Comme nous venons de le voir, les sources d'imprécisions sont nombreuses, ce qui implique que les données restituées sont entachées d'erreurs. Dans une optique de qualification des données, ces erreurs doivent être prises en compte. Le chapitre suivant présente différentes approches proposées dans la littérature concernant la qualification. Les approches classiques de qualification des nuages de points sont pour la plupart globales et n'apportent souvent qu'une réponse incomplète, ne prenant pas en compte la spécificité d'un moyen de mesure sans contact.

## **CHAPITRE 3**

**QUALIFICATION DES MOYENS DE MESURE OPTIQUE :  
APPROCHES ASSOCIEES A LA LITTERATURE**

Le problème de la qualification d'un nuage de points est un problème complexe car il peut être abordé à différents niveaux. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la structure même de la chaîne de numérisation fait apparaître de nombreux composants, autant de sources potentielles d'incertitude sur le nuage de points restitué.

De nombreuses approches de qualification sont détaillées dans la littérature. Certaines concernent la qualification globale de la mesure par l'identification d'artefact<sup>1</sup> et sont similaires à des approches de qualification sur des moyens conventionnels de type MMT par exemple. D'autres s'intéressent plus précisément à certains maillons de la chaîne de numérisation. On peut trouver par exemple des approches associées plus particulièrement aux caractéristiques physiques des capteurs pour en apporter des améliorations. D'autres travaux se concentrent sur les algorithmiques de calibration pour de nouvelles méthodes d'identifications plus performantes.

Ce chapitre traite de "l'état de l'art" disponible, non exhaustif mais représentatif des différentes approches liées à la qualification d'un nuage de points, et concernant plus particulièrement les systèmes à base de caméras. Ce chapitre s'articule autour de deux grandes approches, celles qui relèvent de la qualification du moyen de mesure de manière globale par la mesure d'artefact, et les approches spécifiques liées aux différents maillons de la chaîne de numérisation (associées aux fonctions traiter et acquérir) : calibration, emploi de source laser, choix d'une stratégie de planification de trajectoire de numérisation.

## **1 Évaluation globale du moyen de mesure optique par l'emploi d'artefact**

Les systèmes de numérisation 3D sans contact se distinguent des systèmes de palpement mécanique par le type de capteur employé, le plus souvent une caméra CCD observant la scène et restituant une image en deux dimensions. Ces capteurs ne restituent généralement pas un unique point 3D mais un ensemble de points 3D image d'une ligne ou d'une surface [Besl 88]. De nombreux paramètres peuvent influencer sur la qualité des points obtenus [Prieto 99] : profondeur de champ, angle de vue, type de surface ...

Cependant, nous trouvons dans la littérature des approches permettant de mettre en évidence et de qualifier ces systèmes par la mesure d'objets géométriquement connus : les artefacts. L'approche par la mesure d'artefact est une méthode comparative entre la mesure d'une grandeur de référence et la mesure délivrée par le système.

□ Feng et Liu réalisent la numérisation d'une sphère de référence par un système à plan laser [Feng 01]. Cette sphère est placée à une distance  $D_0$  fixe d'un plan rectifié, qui peut être incliné à l'aide d'une barre sinus (Figure 1). Les essais mettent en évidence les influences liées à la distance de numérisation, et à l'angle d'incidence sur l'erreur de mesure, et donnent une évaluation de l'incertitude de mesure sur une distance.

Les auteurs proposent un modèle empirique bilinéaire représentant l'erreur systématique en fonction de l'angle d'incidence et de la profondeur de champ pour une correction des mesures effectuées.

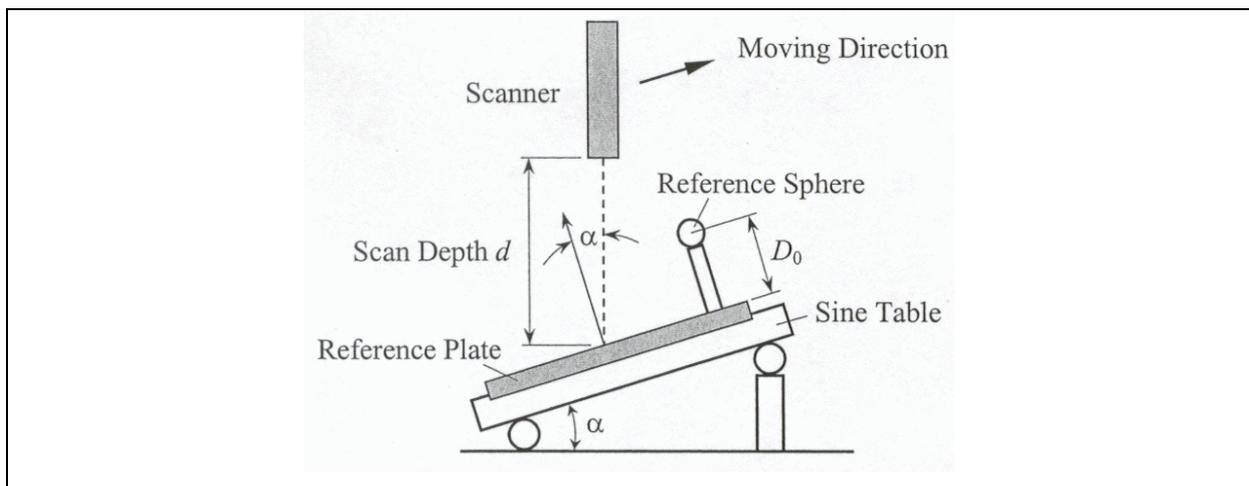


Figure 1 : Mesure d'une sphère de référence [Feng 01]

Les résultats montrent qu'ils obtiennent pour ce système une erreur aléatoire de 18 à 36  $\mu\text{m}$  et une erreur systématique allant jusqu'à 160  $\mu\text{m}$ . L'écart entre le modèle de correction de l'erreur systématique et les données expérimentales correspond à l'erreur aléatoire soit 25  $\mu\text{m}$ . Cependant, la méthode d'évaluation reste dépendante de la numérisation d'une calotte sphérique, selon différentes orientations de capteur. Nous analysons dans le chapitre 5 les conséquences que la mesure partielle d'un élément induit sur le résultat de mesure.

□ Luhmann et Wendt (PTB Allemagne) [Luhmann 00] dressent un panel de procédures d'acceptation (norme VDI 2634) pour les systèmes photogrammétriques ou de mesure 3D optique. Les conclusions sont les suivantes : le guide d'acceptation et de vérification des systèmes de mesure optique 3D préconise l'erreur sur la mesure de longueur comme paramètre de qualité pour décrire les performances géométriques. Des artefacts spécifiques à

<sup>1</sup> Artefact : objet géométriquement défini et connu servant d'étalon de mesure

la mesure optique sont employés. En ce qui concerne la mesure de la longueur étalon, elle est réalisée à l'aide d'une barre à boules constituée de deux sphères blanches (Figure 2c).

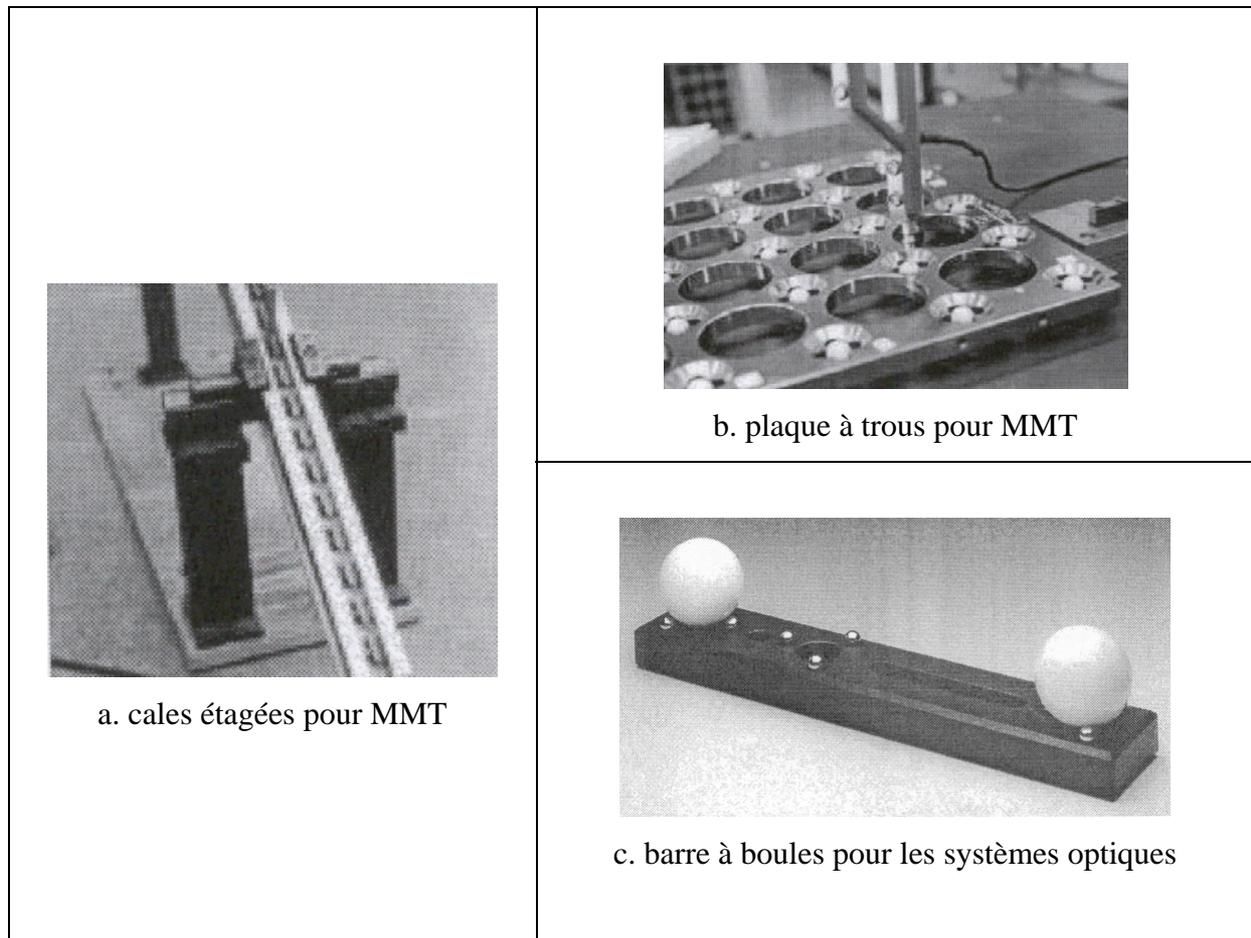


Figure 2 : Artefacts de mesure [Luhmann 00]

Bien qu'aucun résultat de mesure ne soit mentionné, nous citons toutefois cette référence car c'est la seule approche orientée vers un projet de norme qui préconise un certain type d'artefact de mesure pour l'évaluation des systèmes optiques.

□ El-Hakim et Beraldin [El-Hakim 95] proposent eux aussi une démarche basée sur la mesure d'artefacts : une plaque composée de trous de différents diamètres, des cylindres, des plans, des sphères (Figure 3). Des résultats sont présentés sur la mesure de sphères, en fixant ou non les paramètres intrinsèques du capteur, les meilleurs résultats étant obtenus dans le premier cas. Ces différents objets sont préalablement palpés mécaniquement à l'aide d'une MMT dont l'incertitude de mesure dans le volume est inférieure à  $5 \mu\text{m}$ . Les objets présentés Figure 3 permettent des évaluations sur différentes surfaces géométriques : sphères (A),

cylindres (B-C), plans (D), ainsi que l'évaluation de caractéristiques géométriques sur des pièces présentant des arêtes vives (E). Les essais permettent la comparaison de deux systèmes d'acquisition, l'un actif par triangulation laser, l'autre passif par photogrammétrie. Les résultats montrent que les performances des systèmes passifs en terme d'exactitude de mesure sont globalement meilleurs : 1:3000-1:7500 du champ de mesure pour la triangulation laser, 1:20000 pour le système photogrammétrique.

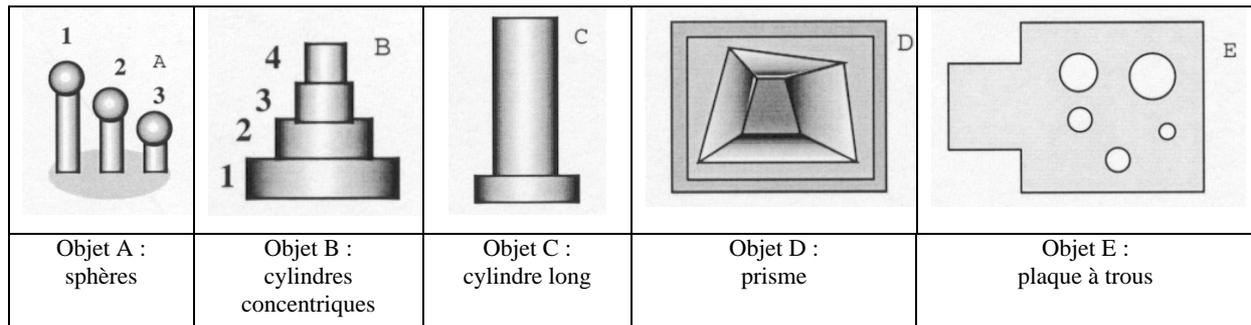


Figure 3 : Objets tests pour évaluation de systèmes d'acquisition [El-Hakim 95]

□ Enfin une intercomparaison dans le domaine de la métrologie 3D par procédés optiques a été menée [Martin Rabaud 98]. Cette intercomparaison consiste en la mesure de caractéristiques géométriques matérialisées sur une structure étalon (Figure 4a), par différents moyens optiques et différents utilisateurs. Les résultats permettent de dégager les poids relatifs des différentes sources d'incertitude par ordre d'influence : la stratégie de mesure, le type d'exploitation, la main d'œuvre, l'environnement, le type de cible, le type d'initialisation, l'éclairage, le produit, la mesure du point, l'instrument utilisé, l'étalon, le calculateur (Figure 4b).

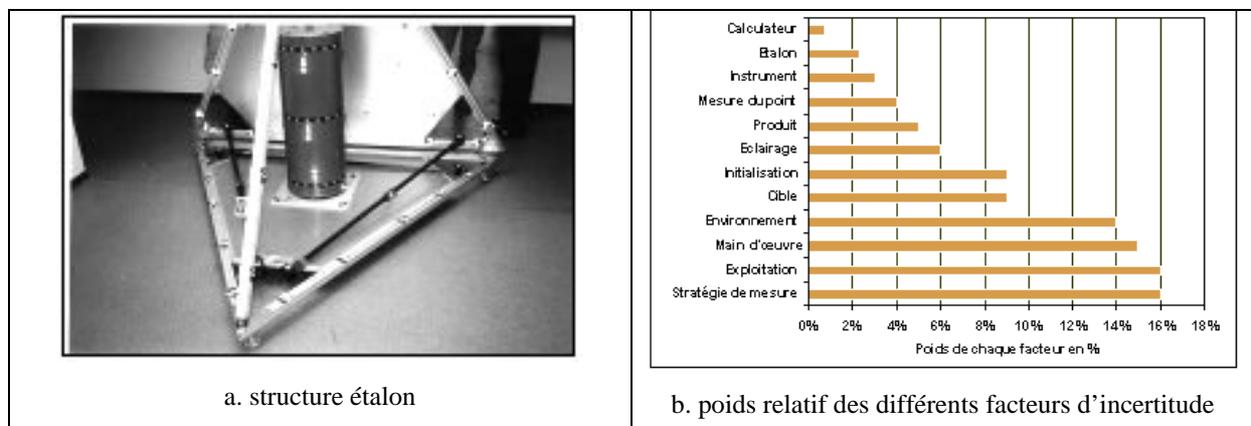


Figure 4 : Artefact de mesure et résultats de l'intercomparaison [Martin Rabaud 98]

Parmi les nombreux paramètres évalués, nous pouvons noter l'incertitude moyenne qu'il est possible d'atteindre pour la mesure d'un objet de 2 m : 0.1 à 0.2 mm pour les théodolites en intersection, 0.1 à 0.15 mm pour les systèmes photogrammétriques, 0.1 à 0.4 mm pour de la vidéogrammétrie et 0.3 à 0.7 mm pour des tachéomètres. L'absence de normes et de procédures dans le domaine de la mesure sans contact est révélée par la prépondérance des facteurs main d'œuvre, exploitation et stratégie de mesure où l'utilisateur est libre sur l'interprétation d'un protocole.

En conclusion, l'évaluation d'un système de mesure passe le plus souvent par la mesure d'une longueur ou d'une grandeur de référence. Cette grandeur de référence est matérialisée au moyen d'un artefact de mesure dont la géométrie varie selon les différentes applications et approches : distance sphère/plan [Feng 01], distance sphère/sphère [Luhmann 00], ou distance entre cibles localisées sur une structure étalon [Martin Rabaud 98].

Ces procédures d'évaluation permettent de qualifier en partie le moyen de mesure par l'évaluation d'un indicateur global : une longueur caractéristique. Cette seule évaluation n'est pas suffisante en ce qui concerne la qualification des systèmes de mesure sans contact. Dans une seconde partie nous présentons des approches plus spécifiques aux différents problèmes associés aux éléments de la chaîne de numérisation.

## **2 Approches liées aux différents constituants de la chaîne de numérisation**

Plutôt que de définir des procédures d'évaluation globale du moyen de mesure comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, certains auteurs ont une approche locale au niveau des constituants de la chaîne de numérisation. Nous évoquons les approches liées à la calibration, à la prise en compte de la nature et de la géométrie de la surface numérisée dans le cas d'une source laser, et au choix de stratégies de numérisation.

### **2.1 Approches associées à la calibration**

Les problèmes liés à la calibration sont largement traités dans la littérature, notamment dans le domaine de la vision artificielle. Cette étape de calibration est le passage de l'espace mono ou bidimensionnel du capteur vers l'espace 3D d'expression du résultat de la numérisation (chapitre 3, §4). Comme nous l'avons évoqué, cette étape est essentielle et tient une part non négligeable sur la qualité des données restituées. Les choix d'un modèle et d'un algorithme d'identification peuvent entraîner des erreurs sur l'évaluation de la position d'un

point dans l'espace 3D. Nous y reviendrons au chapitre 5 où nous évaluerons par une procédure expérimentale spécifique, la calibration retenue.

□ Brand et Mohr ont une approche liée aux techniques de traitement d'image. La procédure de calibration s'appuie sur une mire de calibration composée d'éléments géométriques connus, ici un réseau. Les auteurs proposent un modèle permettant d'identifier des coins dans une image digitale avec une exactitude sub-pixel évaluée à 1/10 du pixel annoncé (Figure 5) [Brand 94]. Notons que la méthode de calibration utilisant un traitement d'images à l'aide de vues restituées par des caméras CCD est largement employée, notamment pour les systèmes à base de lumière structurée ou par stéréovision. La méthode proposée minimise les erreurs dues à la procédure de calibration.

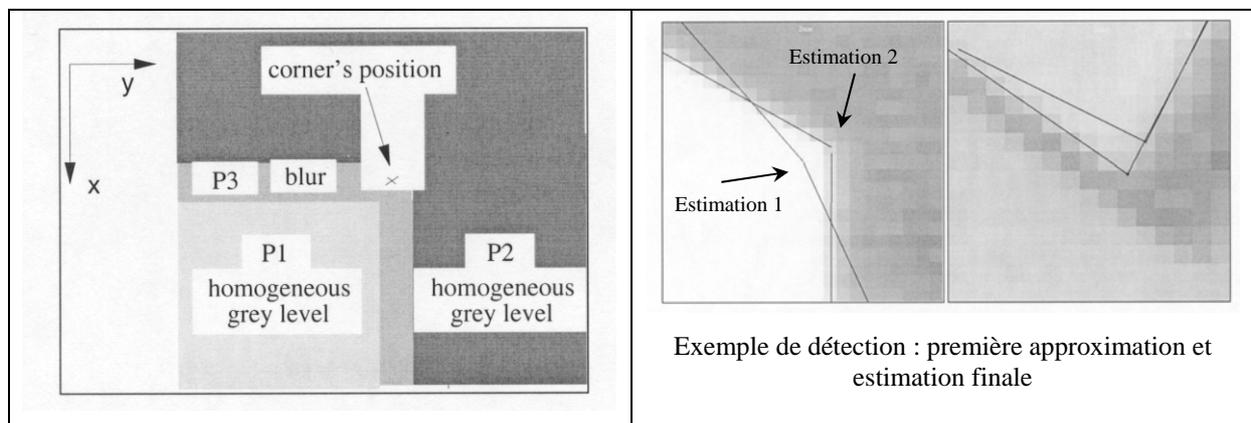


Figure 5 : Modèle pour la détection de coins dans une image [Brand 94]

□ Aguilar, Torres et Lope présentent leurs travaux pour un système de stéréovision par caméras CCD en vue d'une application automobile [Aguilar 96]. Des résultats d'erreurs de calibration sont donnés pour des modèles de caméra tenant compte ou non des phénomènes de distorsion.

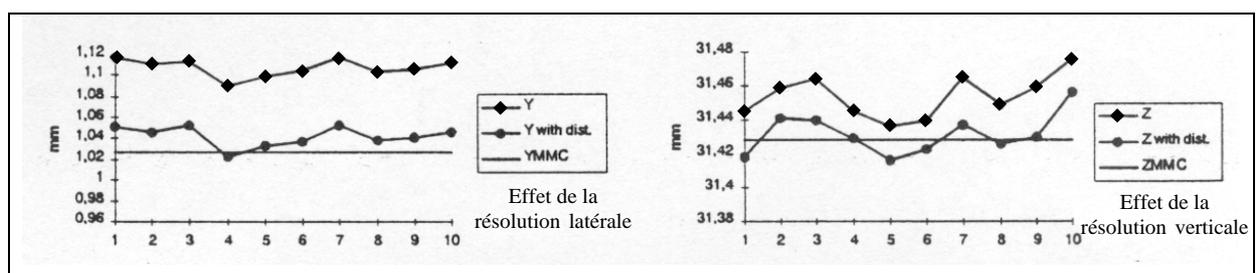


Figure 6 : Erreur de mesure avec et sans modèle de distorsion [Aguilar 96]

Une erreur de 0.07 mm sur la coordonnée Y (ou X) pour l'effet latéral, et 0.02 mm sur Z, dans l'axe du capteur optique peuvent être corrigées par la prise en compte d'un modèle de distorsion (Figure 6).

□ Garric propose une démarche qui s'inscrit dans le domaine de la robotique de manipulation [Garric 96]. Il évalue les algorithmes de résolution et d'évaluation des méthodes de calibration les plus répandues. Il compare certaines techniques d'appariement lors de la procédure de calibration sur des jeux de points 2D-3D. Une méthode d'identification globale prenant en compte la distorsion radiale dérivée des algorithmes de Levenberg-Marquardt, Kalman et Bard-Deming a été développée par Garric. Il obtient une incertitude de positionnement de  $0.3 \text{ mm} \pm 0.15 \text{ mm}$ , ce qui est suffisant pour une application de robotique de manipulation.

□ Enfin, Salvi effectue une étude comparative des différents algorithmes de calibration et de leurs performances [Salvi 02] (Tableau 1). Il emploie un indicateur défini dans [Weng 92] qui permet d'évaluer la méthode de calibration employée : le critère NSCE (Normalized Stereo Calibration Error). Une calibration basée sur l'analyse d'images numériques est directement influencée par la résolution de ces images. Ainsi en considérant une projection inverse de l'ensemble des pixels constituant l'image dans l'espace objet, la zone couverte par cette projection sur la surface de l'objet donne une indication sur l'incertitude, due à la résolution de la caméra, à cette distance de projection (Figure 7). Le critère NSCE représente le taux d'erreur latérale due à la triangulation et la déviation due au bruit de mesure sur un pixel. Ce critère prend en compte une erreur latérale et non 3D, mais est indépendant de la résolution de l'image, de la profondeur de champ et de la distance à l'objet numérisé.

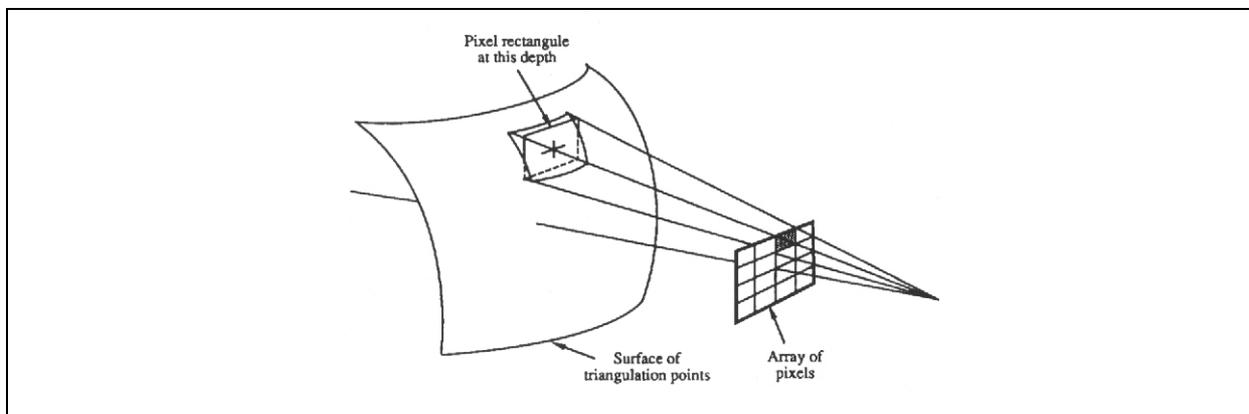


Figure 7 : Projection inverse, critère NSCE [Weng 92]

Si  $NSCE < 1$  l'erreur due à la triangulation est en moyenne moins importante que celle provoquée par le bruit de mesure au niveau des pixels de la caméra. Si  $NSCE \approx 1$ , cela est significatif d'une bonne calibration, alors que la calibration est incorrecte pour  $NSCE \gg 1$ .

Ce critère est employé pour des systèmes à bases de stéréovision, non traités dans ce mémoire. Notons que les méthodes d'identification Hall, Faugeras sans distorsion et Tsai sont plus sensibles au bruit de mesure que les méthodes optimisées et prenant en compte la distorsion, ce qui est vérifié par le critère NSCE.

	3D position (mm)			NSCE <sup>2</sup>
	Mean	$\sigma$	Max	
Hall	0.1615	0.1028	0.5634	N/A
Faugeras	0.1811	0.1357	0.8707	0.6555
Faugeras NR <sup>3</sup> without distorsion	0.1404	0.9412	0.0116	0.6784
Faugeras NR with distorsion	0.0566	0.0307	0.1694	0.2042
Tsai	0.1236	0.0684	0.4029	0.4468
Tsai optimized	0.0565	0.0306	0.1578	0.2037
Tsai with principal point of Tsai optimized	0.0593	0.0313	0.1545	0.2137
Tsai optimized with principal point of Tsai optimized	0.0564	0.0305	0.1626	0.2033
Weng	0.0570	0.0305	0.1696	0.2064

Tableau 1 : Accuracy of 3D coordinate measurement [Salvi 02]

En conclusion, les modèles de calibration et les méthodes d'identification employées jouent un rôle important dans la validité des données restituées. Nous retiendrons principalement l'étude comparative de Salvi qui montre bien que pour un modèle de calibration donné, comportant déjà un certain niveau d'hypothèses, les méthodes d'identification du modèle choisi ne sont pas sans influence.

## 2.2 Approches associées à l'influence du type de surface numérisée

La nature de la surface numérisée et sa géométrie sont de même influentes sur la mesure par moyens optiques, notamment pour les systèmes à base de laser. Nous trouvons dans la littérature un certain nombre d'auteurs qui proposent des solutions afin de remédier en partie à ces problèmes.

<sup>2</sup> Normalized Stereo Calibration Error [Weng 92]

<sup>3</sup> Newton-Raphson

□ Curless et Levoy présentent une approche originale basée sur l'analyse de l'évolution temporelle des réflexions de la lumière structurée sur la surface de l'objet [Curless 95]. La lumière est supposée respecter un profil gaussien d'intensité. Ainsi cette analyse reste applicable à des systèmes à base de laser afin de réduire le phénomène de speckle. Grâce à cette méthode, la numérisation de géométrie est possible dans les zones où les procédés conventionnels donnent des erreurs (coins, variation de réflectance ...).

La géométrie de la pièce numérisée joue un grand rôle pour la qualité des acquisitions. Pour des systèmes de numérisation à base de laser, Zhou propose une méthode permettant de corriger l'erreur de forme obtenue par mesure d'une surface complexe à l'aide d'une nappe lumineuse [Zhou 98] (Figure 8a). Une étude théorique de l'effet de la forme sur l'exactitude de mesure est décrite à partir de la loi de la réflexion d'un modèle de Lambert. Zhou étudie la variation de hauteur  $\Delta X$  de la surface numérisée en fonction de  $\alpha$ , angle d'incidence laser. La modélisation de l'erreur en fonction de paramètre de distance et d'angle d'incidence est comparée au résultats expérimentaux (Figure 8b et c). Notons que la différence d'échelle est due à un domaine de validité des paramètres du modèle expérimental réduit. L'auteur mentionne cependant que la tendance de l'évolution du modèle correspond aux mesures expérimentales. Dans ce cas, c'est un choix technologique sur la constitution du système qui permet d'apporter une solution. Un système composé de deux caméras CCD permet de réduire l'erreur due aux variations de forme de la pièce par la pondération des acquisitions.

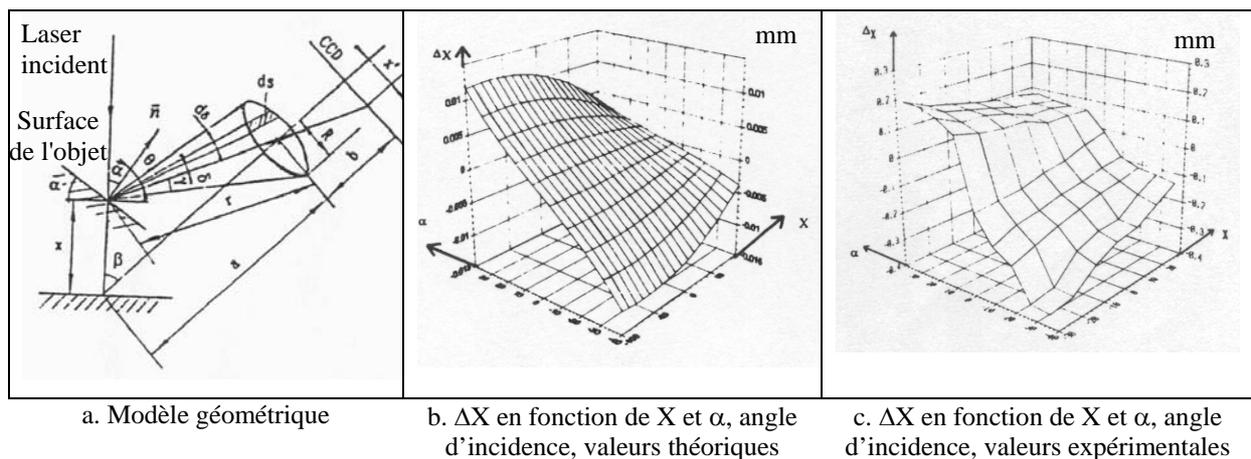


Figure 8 : Modèle géométrique et erreur de forme théorique et expérimentale [Zhou 98]

□ Enfin, la nature de la surface numérisée est un facteur influant sur la qualité de la numérisation. Godin traite le cas de la numérisation d'une surface en marbre à l'aide d'un

capteur à ligne laser (Figure 9) [Godin 01]. Il met en évidence le phénomène physique d'absorption de la lumière en évaluant le bruit de mesure en fonction, d'une part de la distance à la surface et d'autre part du diamètre du spot laser (Figure 10).

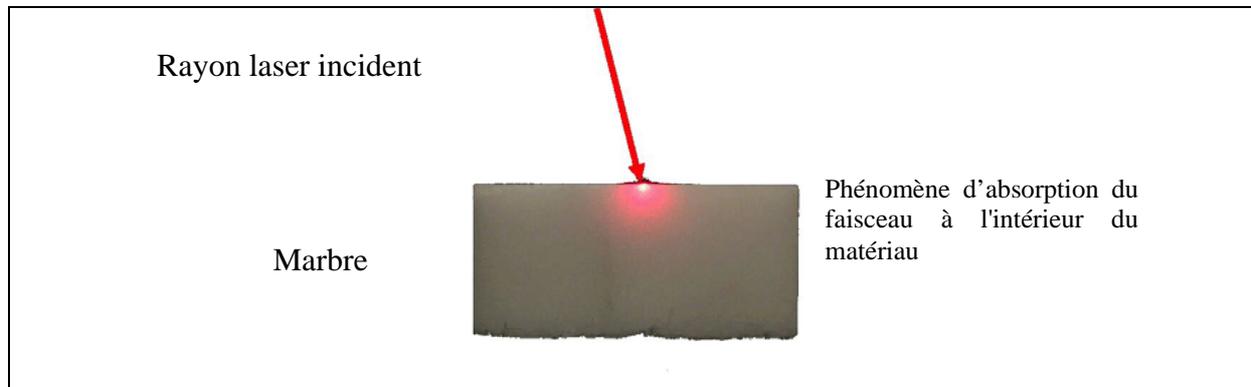


Figure 9 : Spot laser à la surface d'un bloc de marbre<sup>4</sup>

L'auteur précise qu'un modèle de prédiction de surface translucide décrit dans [Jensen 01] peut être pris en compte pour une correction éventuelle. Il mentionne un bruit de mesure de 23 à 45  $\mu\text{m}$  à comparer au 14  $\mu\text{m}$  de bruit sur une surface de référence opaque. De plus Godin constate une erreur systématique due à l'aspect translucide du marbre, un décalage de 40  $\mu\text{m}$  est constaté et se réduit à 5  $\mu\text{m}$  si la surface est recouverte d'un mattifiant.

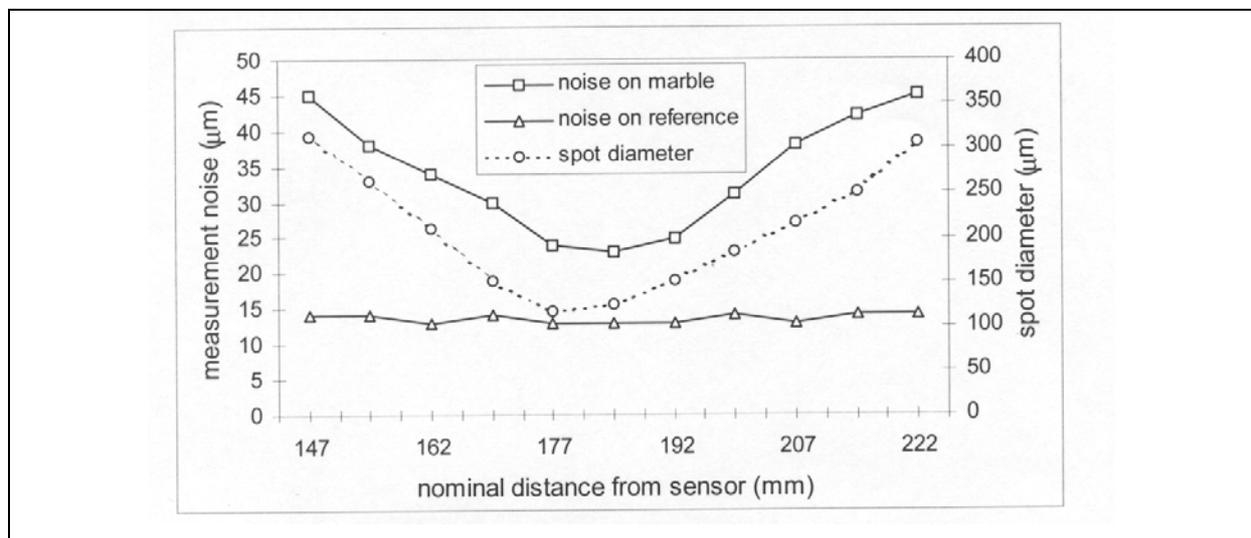


Figure 10 : Effet du diamètre du spot incident sur le bruit de mesure [Godin 01]

En conclusion, ces approches sont directement en relation avec la technologie employée pour la numérisation ainsi que la nature de l'objet. Le type de matériau de l'objet numérisé et

la technologie employée sont généralement des données d'entrée du processus de numérisation et sont difficilement modifiables. Les méthodes proposées donnent des pistes pour la correction éventuelle des acquisitions. Nous ne traiterons dans nos travaux que les aspects qualitatif concernant la nature des surfaces. Le système de numérisation sera considéré comme choisi en fonction de l'objet et de l'application visée. L'emploi de mattifiant est quelque fois indispensable pour s'affranchir de la nature de la surface de l'objet à numériser, mais a des répercussions sur le dimensionnel obtenu. Cet aspect sera traité au chapitre 5.

### 2.3 Approches associées à la planification de trajectoires et aux stratégies de numérisation

Le problème de la qualité d'une numérisation est souvent abordé en relation avec la planification de trajectoires de numérisation.

Tarabanis définit la planification de trajectoires de la façon suivante : "*étant donné un ensemble de tâches (reconnaissance d'objet, reconstruction de scène, détection d'entités), un modèle de caméra et un modèle d'objet, le système doit permettre de déterminer l'ensemble des paramètres nécessaires (paramètres de pose de la caméra, paramètres d'éclairage ...) satisfaisant cette tâche avec un certain degré de satisfaction*" d'après [Tarabanis 95]. Un état de l'art représentatif des différents systèmes de planification de trajectoire pour les capteurs 3D est présenté.

□ Lee et Park proposent une méthode d'inspection de formes complexes par un système laser 3D divisée en trois étapes [Lee 00]. Pour chaque point discrétisé sur la surface, toutes les directions d'accessibilité sont générées en fonction des contraintes du capteur (profondeur de champs, angle de vue, calcul d'interférence pièce/capteur), ce sont les directions locales d'accessibilité (LAD: locally accessible directions) (Figure 11). Puis, le nombre d'acquisitions et les orientations les plus appropriées sont calculées.

---

<sup>4</sup> <http://graphics.stanford.edu/papers/marble-assessment/laser-striking-marble.jpg> [Godin 01]

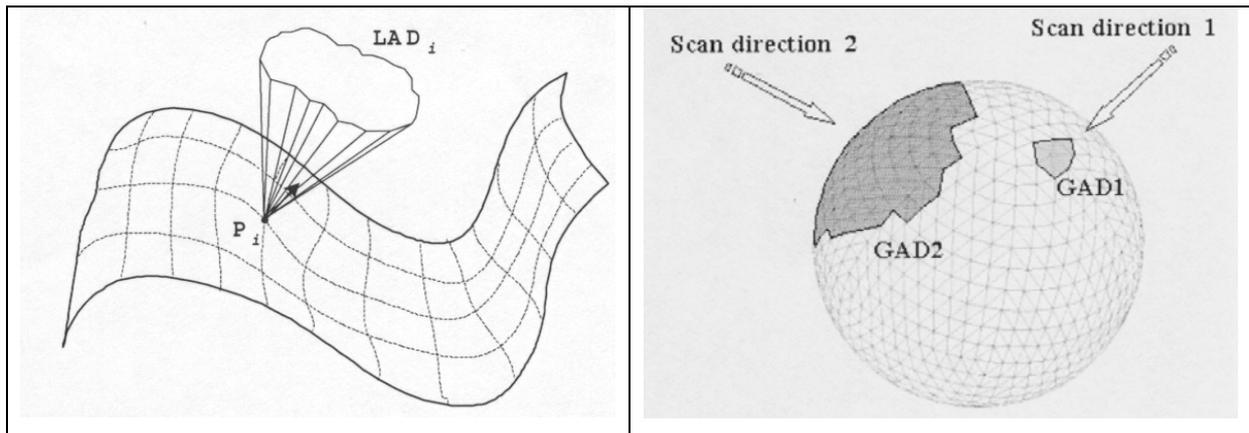


Figure 11 : Directions d'accessibilité locales (LAD) et globales (GAD) [Lee 00]

Finally, the trajectory of digitization presenting the minimal time is generated from the global accessibility directions determined from the LAD (GAD : globally accessible directions) (Figure 11). Here the criterion retained is a criterion "of exhaustiveness" for a minimal time of digitization.

This approach is completed by that of Papadopoulos who treats the automatic digitization by a laser plane sensor of an object without having in advance knowledge of its nominal geometry. The generation is done iteratively by the update of the volume of the digitized space with the help of a representation by voxels. This update allows the determination of the orientations necessary for the 3D sensor to continue the digitization in an automatic way (Figure 12) [Papadopoulos 97].

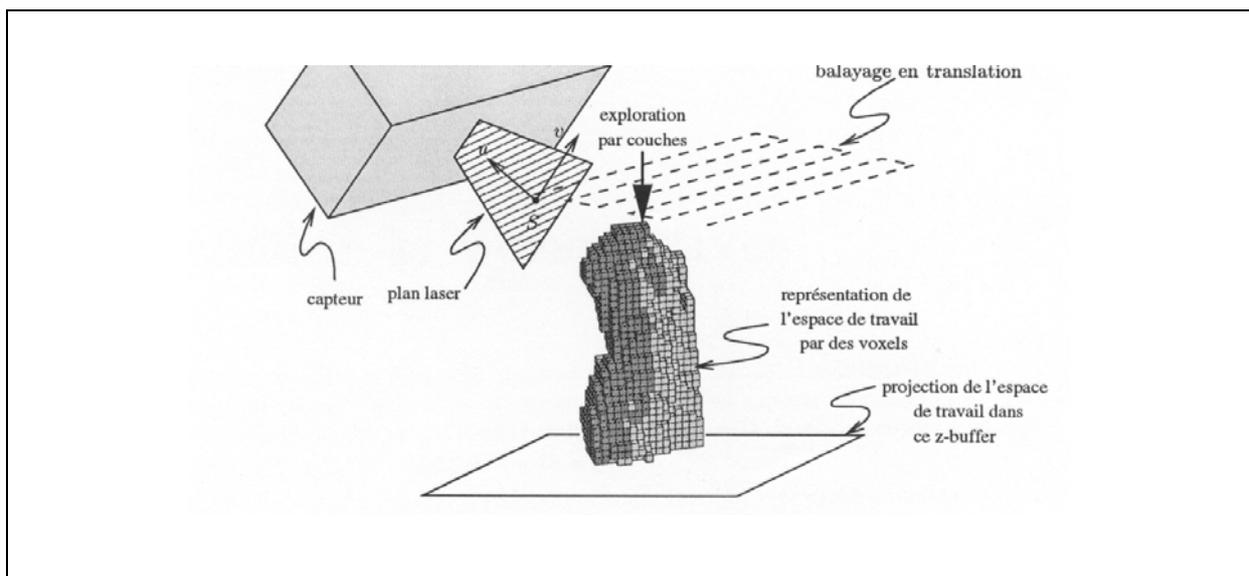


Figure 12 : Principe de l'actualisation du volume d'espace numérisé [Papadopoulos 97]

Citons dans le contexte de la génération automatique de trajectoires de numérisation les travaux menés au CRAN à Nancy [Remy 00]. Ils sont axés autour du développement d'une plate-forme de simulation logicielle pour la génération de trajets de numérisation à partir d'un modèle CAO en format STL.

Concernant les approches précédentes, le problème de la qualité de l'acquisition n'est pas abordé en terme dimensionnel, le cahier des charges est ici la numérisation automatique et la restitution d'un nuage de points le plus représentatif possible en terme de complétude.

Nous allons voir à présent des approches liées à la numérisation d'une pièce prenant en compte la notion de qualité des données restituées.

□ [Pito 96] évoque le problème du placement du capteur par rapport à l'objet (Next Best View problem) afin d'éviter un certain nombre de problèmes affectant la « précision » des acquisitions. Ces problèmes liés à des passages sur des arêtes vives doivent être pris en compte lors de la stratégie de placement du capteur par rapport à l'objet. Pito propose une approche basée sur l'élimination des données susceptibles d'introduire des erreurs de mesure par la suppression des données proches des arêtes de l'objet.

Dans ce contexte du choix de la « prochaine meilleure vue de numérisation », les travaux de Massios traitent de la détermination d'une stratégie de numérisation optimale en intégrant un facteur de visibilité et surtout en lui associant un facteur de qualité [Massios 98]. Les approches classiques utilisent un critère de visibilité pour générer la prochaine orientation de capteur dans un processus de numérisation qui nécessite plusieurs vues. Cependant, cette nouvelle orientation peut entraîner l'observation de la surface sous un angle d'incidence très important. Massios détermine un facteur de qualité qui permet de minimiser le nombre de plans d'occlusions, sources d'erreurs potentielles lors de la numérisation, à partir d'une représentation par voxels, en estimant l'angle entre la normale à la surface numérisée et la direction d'observation du capteur. Il établit une carte à partir d'une pondération des critères de visibilité et de qualité en fonction du nombre de vues de numérisation et de l'angle de vue (Figure 13).

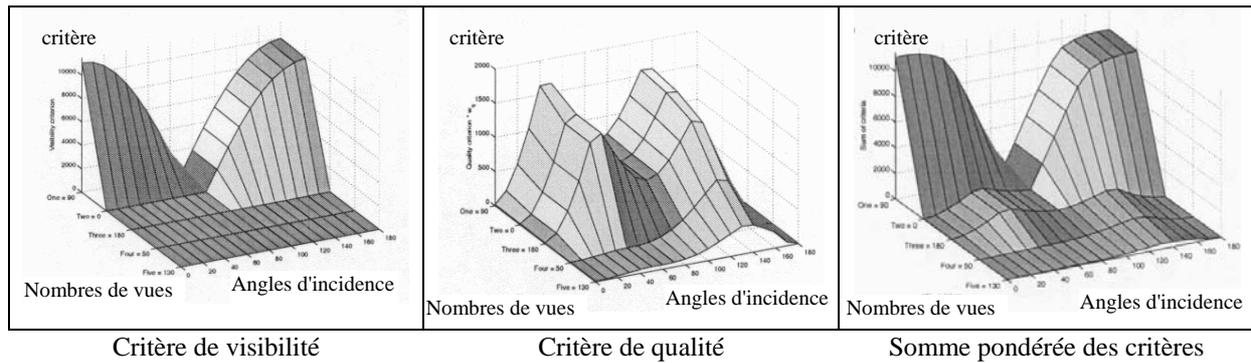


Figure 13 : Représentation des critères de visibilité et de qualité [Massios 98]

Pour une application de rétroconception, Banta et Al. définissent un taux de recouvrement pour atteindre une couverture optimale de la surface en fonction du nombre de vues utilisées et du modèle original (Figure 14) [Banta 93]. Pour cela, une grille d'occupation spatiale est actualisée à chaque vue.

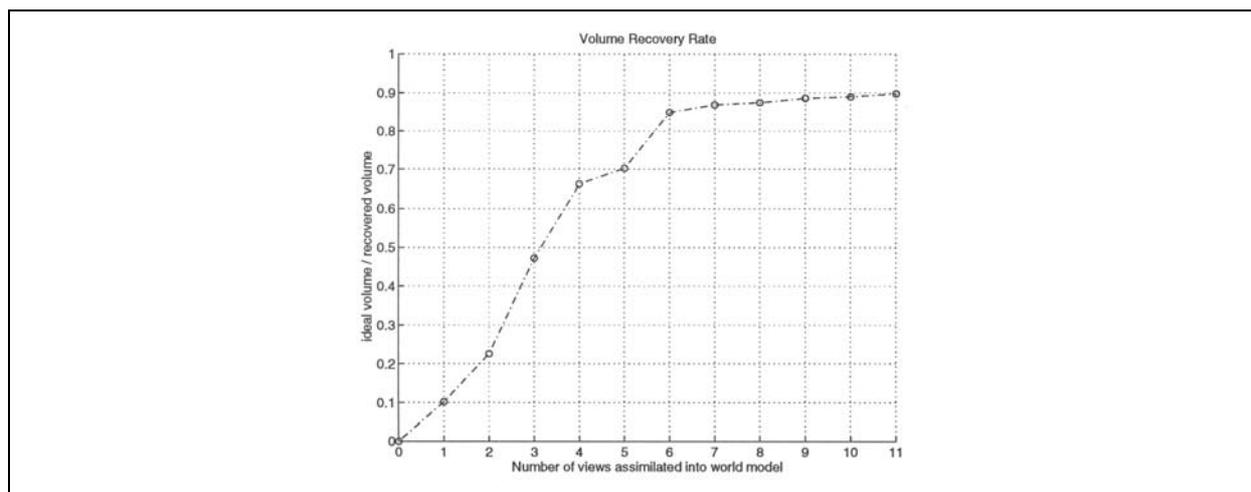


Figure 14 : Taux du volume du modèle initial par rapport au modèle reconstruit en fonction du nombre de vues de numérisation [Banta 93]

□ Smith et Zheng emploient un capteur à ligne laser monté sur une MMT pour une application de d'inspection de profils d'engrenages [Smith 01]. Le problème de l'inspection se pose en tant qu'orientation de la tête de mesure. Il est mentionné que l'orientation de la tête de mesure par rapport à la pièce est influente sur l'exactitude des données. Un modèle est développé et permet de simuler l'erreur commise sur la mesure d'un point en fonction de l'orientation du capteur [Smith 98]. Le modèle prend en compte une représentation du faisceau laser ainsi que le comportement réfléchissant de la surface par un modèle hybride de

réflexion de type diffuse et spéculaire. Une correction de l'erreur systématique permet de ramener l'erreur de déplacement linéaire normal au faisceau laser, de  $38 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$ .

□ Enfin, Prieto présente une approche de planification de trajectoires permettant de minimiser le bruit de mesure lors de la numérisation pour une application d'inspection dimensionnelle [Prieto 99]. Il propose un modèle de bruit tenant compte de l'angle d'incidence et de la profondeur de champ. Ce bruit est déterminé par l'évaluation de la répétabilité sur la mesure d'un point.

Les mesures sont données pour des angles d'incidence dans la direction du balayage laser de  $0$  à  $35^\circ$  (angle  $\alpha$ , Figure 15) et dans la direction perpendiculaire au balayage de  $-15$  à  $15^\circ$  (angle  $\beta$ , Figure 15), pour une profondeur de champ de  $170$  à  $240 \text{ mm}$ . Il obtient jusqu'à  $5.6 \mu\text{m}$  de répétabilité pour un capteur autosynchronisé, et jusqu'à  $0.5 \text{ mm}$  pour le capteur de type Biris.

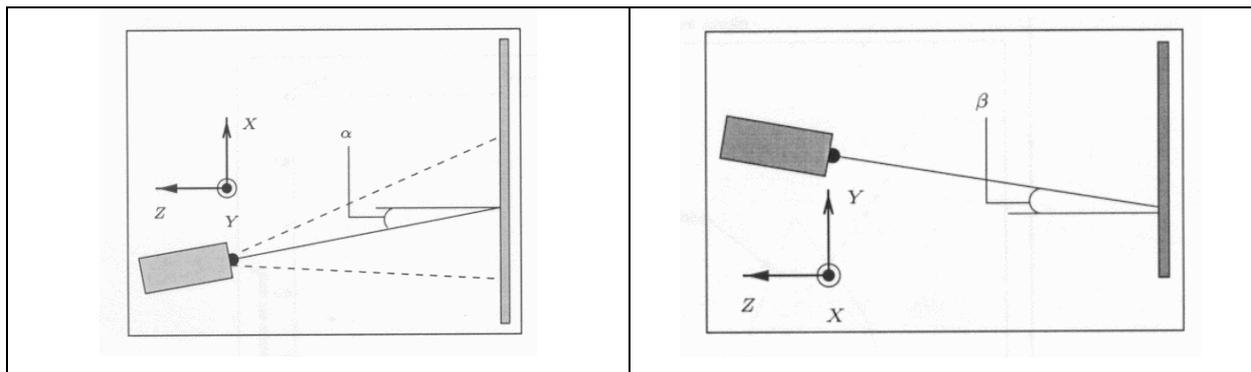


Figure 15 : Paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  de l'orientation de la caméra [Prieto 99]

Cette approche permet d'obtenir une évaluation globale de la répétabilité dans des conditions données : distance à l'objet numérisé et angle d'incidence. L'exploitation du modèle de bruit sur la répétabilité des mesures permet de générer un ensemble de positions de capteur optimal pour la planification de trajet de numérisation sur des pièces prismatiques ou de formes complexes (Figure 16).

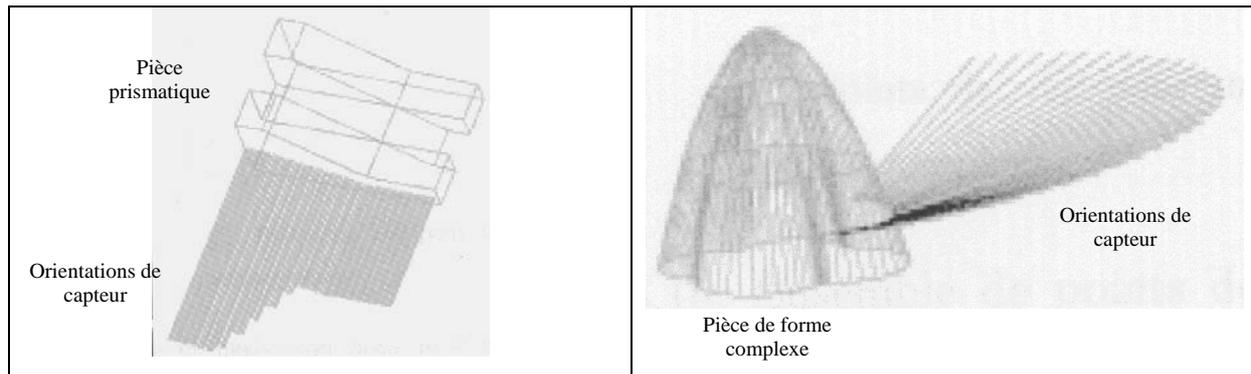


Figure 16 : Planification de trajectoires [Prieto 99]

Notons que cette approche de planification de trajectoire est la seule à notre connaissance qui attribue un bruit de mesure en fonction des conditions expérimentales pour l'application proprement dite. Cette démarche se situe entre une approche globale par identification d'artefact et une approche locale de caractérisation du nuage de points.

En conclusion, le problème de la planification de trajectoires de numérisation tient compte ou non de critères de qualité liés à l'orientation et à la position du capteur par rapport à la surface numérisée [Smith 01] [Banta 93] [Prieto 99] [Massios 98]. Ces critères permettent d'orienter la stratégie de numérisation en fonction d'une application, comme en inspection dimensionnelle [Prieto 99].

### 3 Conclusion

La qualité géométrique du résultat d'une numérisation 3D est abordée dans la littérature selon deux approches. D'une part, nous trouvons des approches nécessitant la mesure d'artefact qui permettent de donner une estimation globale de l'incertitude du moyen de mesure [El-Hakim 95] [Martin Rabaud 98] [Luhmann 00] [Feng 01]. Face à l'absence de normes dans ce domaine, le choix et la nature des artefacts sont très variés et ils sont adaptés par chaque auteur au type de technologie employé.

D'autre part, nous trouvons des approches locales basées sur l'estimation des incertitudes des composants de la chaîne de numérisation. De nombreux travaux, notamment dans le domaine de la vision par ordinateur, s'intéressent aux problèmes de calibration et aux algorithmes employés associés à la fonction « Traiter ». Ces approches permettent de bien mettre en évidence l'importance du choix du modèle de calibration et surtout du type de

méthode d'identification des paramètres [Aguilar 96] [Brand 94] [Salvi 02] [Garric 96] [Schmid 98].

Dans le domaine mécanique et génie mécanique, le problème de la qualité de la numérisation est abordé par le choix d'une stratégie de numérisation adaptée. Cette stratégie consiste à sélectionner un nombre d'orientations de capteur adéquat. Le critère retenu est essentiellement un critère d'accessibilité pour obtenir une image numérique de l'objet la plus complète possible [Lee 00] [Papadopoulos 97] [Remy 00]. La stratégie de numérisation peut aussi tenir compte de critère dimensionnel. Un modèle de comportement global du bruit de mesure en fonction de l'angle d'incidence du capteur par rapport à la surface est souvent mis en avant [Smith 01] [Prieto 99][Massios 98][Banta 93] [Pito 96].

Enfin, nous citons les approches traitant plus spécifiquement des problèmes liés à la technologie employée (ici une source laser) et à la nature de l'objet numérisé [Curless 95] [Zhou 98] [Godin 01].

Dans le cadre de notre étude, nous ne nous intéresserons pas aux incertitudes directement liées à la nature de la surface, (non prise en compte du phénomène de speckle, ni de l'influence quantitative du type de matériau). Des approches dans la littérature permettent d'apporter des pistes de réflexion et certaines solutions. De même, le choix d'un porteur de type MMT permet de nous affranchir de ses défauts géométriques, négligeables devant les incertitudes du capteur optique. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur les sources d'imprécision liées à la géométrie de la pièce par rapport à l'incidence laser, ainsi qu'à l'influence de la méthode de calibration que nous employons.

Pour compléter cette étude, notons l'approche proposée par Hoppe basée sur la définition d'indicateurs [Hoppe 92]. L'activité de reconstruction de surface en rétroconception utilise assez largement les données issues de systèmes de numérisation : c'est bien souvent la première étape d'un processus ou la première application. Dans ce contexte, Hoppe propose une méthode permettant la reconstruction de surface à partir d'un nuage de points inhomogène intégrant deux facteurs de qualité, l'un lié à la densité et l'autre au bruit [Hoppe 92]. Il propose une définition de ces indicateurs utilisés pour initialiser l'algorithme de triangulation des données en reconstruction de surface.

Cette approche originale permet, au travers de la définition d'indicateurs de qualité, d'effectuer un lien entre le nuage de points obtenu par numérisation 3D et l'application visée, ici une application de rétroconception. Ce qui nous paraît pertinent pour améliorer le traitement des données par l'intégration de la notion de qualité. Nous appuyant pour partie sur les travaux de Hoppe, nous avons repris la notion d'indicateurs de qualité en terme de bruit et

de densité. Cependant, considérant diverses applications, nous nous sommes attachés à étendre la notion d'indicateurs de qualité à d'autres caractéristiques associées au nuage de points.

Dans le chapitre suivant, nous proposons une expertise des grands nuages de points issus de numérisation amenant à la définition d'indicateurs de qualité.

## CHAPITRE 4

EXPERTISE DU NUAGE DE POINTS :  
DEFINITION D'INDICATEURS DE QUALITE

La qualification de données issues de systèmes de numérisation 3D permet de s'assurer de la conformité de l'ensemble discret de coordonnées 3D vis à vis de l'objet initial en relation avec l'application associée. Comme nous l'avons vu précédemment, chaque maillon composant la chaîne de numérisation est source potentielle d'imprécisions sur les données (chapitre 2). La littérature propose des approches de qualification globale qui permettent de vérifier l'aptitude à mesurer certaines géométries d'objets dans des conditions données. Nous proposons au chapitre 5 une méthode de qualification globale adaptée au moyens optiques de numérisation. De même des approches locales sont plus spécifiquement liées à certains maillons de la chaîne de numérisation (chapitre 3). Cependant, ces approches ne font pas directement le lien avec l'application visée, à l'exception des travaux de Prieto qui associe le bruit de mesure à l'application d'inspection dimensionnelle [Prieto 99] et ceux de Hoppe pour une application de rétroconception [Hoppe 92].

Dans ce chapitre, s'inspirant des travaux de Hoppe, nous appréhendons la notion de qualification au travers d'indicateurs de qualité. Ces indicateurs sont classés en deux catégories : les indicateurs intrinsèques qui peuvent être définis à partir de la seule connaissance d'un nuage de points, et les indicateurs spécifiques liés au moyen utilisé ou à toutes autres conditions expérimentales. Nous mettons en avant le lien entre indicateurs et application du nuage de points. À partir d'une expertise du nuage de points, des procédures d'évaluation sont définies dont certaines seront mis en œuvre au chapitre 5.

### **1 Définition des indicateurs de qualité**

L'information délivrée par un système de numérisation 3D est bien souvent insuffisante pour pouvoir apprécier la "qualité" de l'acquisition. Au regard de l'application visée, il est utile de disposer de caractéristiques supplémentaires pour enrichir l'ensemble de triplets de coordonnées restitué par un capteur 3D. La définition d'indicateurs de qualité permet d'enrichir le nuage de points par rapport à l'application recherchée.

Nous définissons un indicateur de qualité de la façon suivante : "un indicateur de qualité est une grandeur choisie, associée à une caractéristique définie dans le cahier des charges, destinée à en observer les évolutions par rapport à un seuil fixé par l'application visée" d'après la norme NF X 50-125.

Nous pouvons adopter la démarche suivante :

- évaluation suivant une procédure d'indicateurs de qualité liés ou non au système de mesure,
- détermination d'un seuil de conformité par rapport à l'application,

- prise de décision sur l'action à mener (Figure 1).

Cette prise de décision peut être une renumérisation, une correction des données, une remise en cause du moyen ...

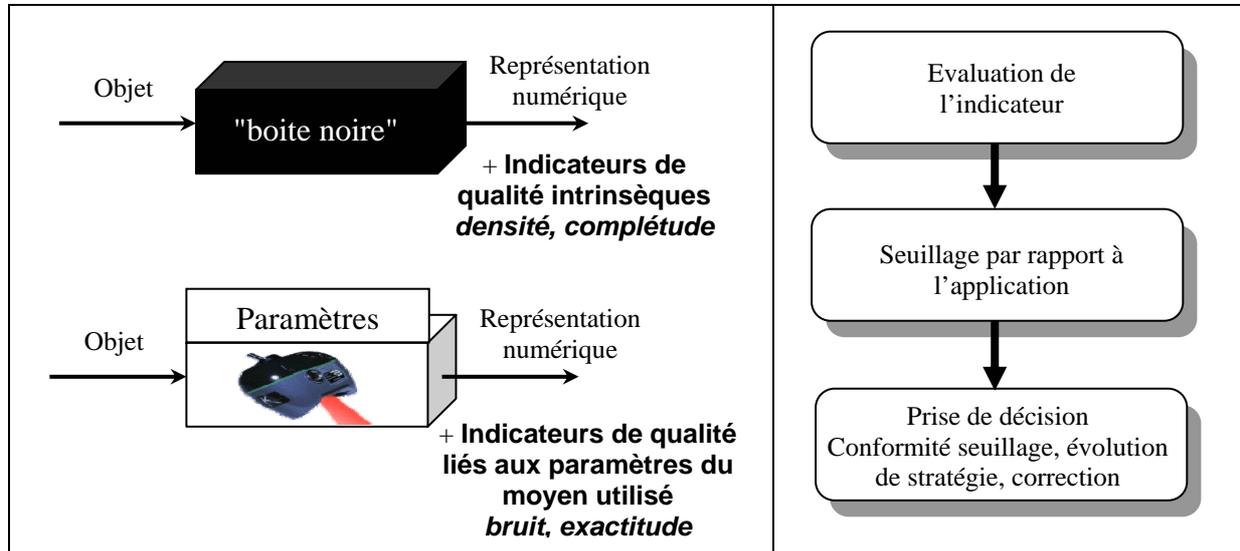


Figure 1 : Une démarche de qualification pour deux groupes d'indicateurs de qualité

Compte tenu de la spécificité des nuages de points et des applications retenues, les travaux que nous avons menés nous ont conduit à la définition de 4 indicateurs de qualité que nous classons en 2 types : les indicateurs intrinsèques et les indicateurs spécifiques.

Les indicateurs intrinsèques sont représentatifs de caractéristiques du nuage de points obtenus, et sont indépendants du moyen d'acquisition utilisé qui reste d'un point de vue utilisateur une "boite noire" (Figure 1). Les indicateurs intrinsèques définis sont la **densité** et la **complétude**. Ils peuvent être évalués sur le nuage de points sans connaissance du moyen de mesure. Ils rendent compte à la fois de l'inhomogénéité du nuage de points et de l'importance des zones non numérisées.

Les indicateurs spécifiques nécessitent une connaissance du moyen de numérisation, comme par exemple, le modèle de calibration employé (Figure 1). Nous définissons le **bruit** de numérisation comme proposé par Hoppe [Hoppe 92] et l'**exactitude** de positionnement. Ce dernier indicateur s'inspire d'approches classiques proposées pour qualifier les mesures. Ils rendent compte à la fois des perturbations dues à l'optique et aux composants employés ainsi que l'incertitude sur la position vraie d'un point 3D.

Les indicateurs précédents ont été choisis en fonction de leur nécessité dans des applications comme la rétroconception, le copiage de forme, l'inspection dimensionnelle ...

En effet, comme nous l'avons exposé au chapitre 1, une application de reconstruction de surface est perturbée par la présence de densités variables ou de bruit. De même, l'incomplétude du nuage peut le rendre impropre à une application de copiage de forme. Qu'ils soient quantifiés explicitement ou évalués grossièrement, les indicateurs interviennent à un niveau ou à un autre dans le processus. Nous avons représenté sur le Tableau 1, l'importance des indicateurs en fonction d'applications courantes du génie mécanique, selon notre expertise et la pratique de celles-ci. Notons que ces indicateurs sont pour nous les plus courants en fonction des applications que nous traitons. Ces indicateurs peuvent être complétés par d'autres en fonction du domaine d'application retenu.

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

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

Tableau 1 : Relation entre les indicateurs de qualité et l'application visée

Intéressons nous maintenant à la définition des différents indicateurs de qualité ainsi qu'aux procédures d'évaluation.

## 2 Indicateurs intrinsèques

Dans cette partie, nous définissons les indicateurs de densité et de complétude. Ainsi, nous qualifions le nuage de points de  $\rho$ -dense et  $\kappa$ -complet où  $\rho$  et  $\kappa$  sont deux grandeurs relatives à l'indicateur.

### 2.1 Indicateur $\rho$ -dense [Hoppe 92]

La densité d'un nuage de points est une caractéristique difficile à maîtriser la plupart du temps. En effet, afin de récupérer une image 3D satisfaisante de la pièce, il est souvent nécessaire de numériser la pièce selon plusieurs vues, le recalage des différentes vues provoque un recouvrement sur les nuages de points. Le nuage de points devient alors inhomogène avec des densités locales très variables, ce qui peut avoir une influence sur le traitement (Figure 2).

2.1.1 Définition de l'indicateur  $\rho$ -dense

Soit  $Y = \{y_1, \dots, y_n\} \subset X$  un ensemble d'acquisitions non bruitées de la surface  $S$ .  $Y$  est appelé  $\rho$ -dense si toute sphère de rayon  $\rho$ , centrée sur un point  $M$  ne contient qu'un seul point dans l'ensemble  $Y$  (Figure 3).

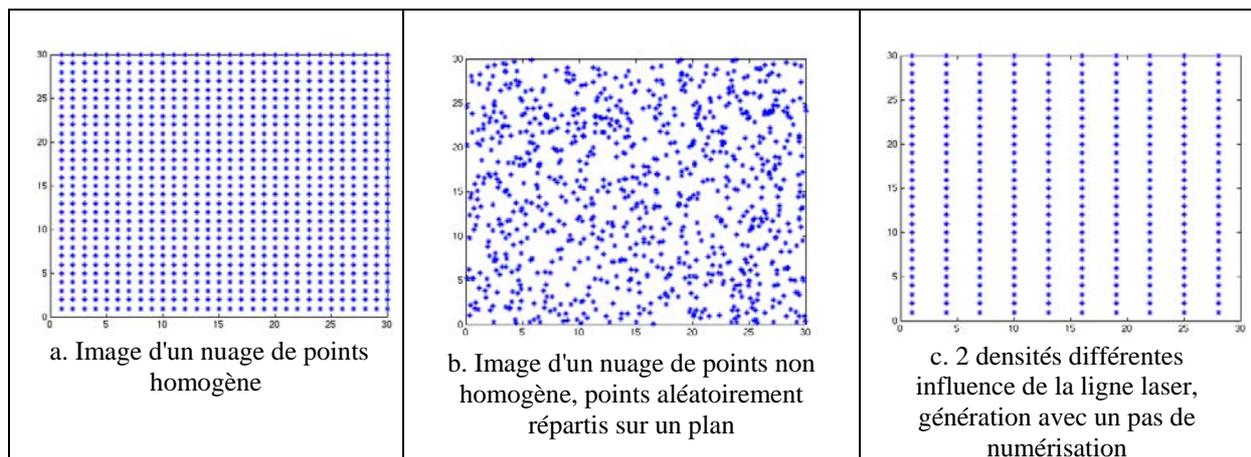


Figure 2 : Densité

2.1.2 Evaluation de l'indicateur  $\rho$ -dense

Soit  $E = \{e_1, \dots, e_n \mid e_k = (x_k, y_k, z_k)\}$  un ensemble de points numérisés sur une surface quelconque, nous souhaitons évaluer l'indicateur  $\rho_k$  relatif à la densité locale du nuage de points au point  $e_k$ . D'après la définition précédente, nous pouvons appliquer le calcul suivant :

$\forall i \in [1, n], \forall k \in [1, \dots, i-1, i+1, \dots, n], \rho_k = \min(\text{dist}_{ik})$  avec

$$\text{dist}_{ik} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}$$

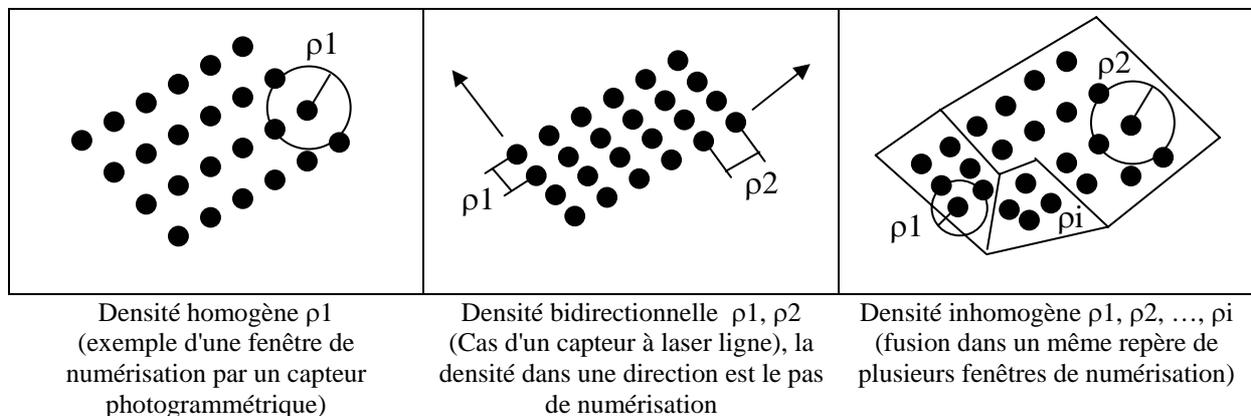


Figure 3 : Indicateur  $\rho$ -dense

L'indicateur  $\rho_k$  obtenu indique en chaque point numérisé  $e_k$   $k \in [1, n]$ , une densité locale qui tient compte de ses plus proches voisins. Soit  $\rho^*$  le critère de densité que l'on se fixe en fonction de l'application traitée. Nous pouvons définir une densité moyenne globale  $\rho_{\text{global}}$  telle que  $\rho_{\text{global}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_k \rho_k$ .

$$\rho_{\text{global}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_k \rho_k$$

La comparaison de  $\rho_{\text{global}}$  avec  $\rho^*$  peut orienter une prise de décision concernant l'ensemble des points numérisés, si  $\rho_{\text{global}} > \rho^*$  la densité peut ne pas être suffisante pour l'application, une numérisation supplémentaire peut être menée.

Cependant cette évaluation reste globale et ne prend pas en compte le caractère anisotrope de la densité au niveau local comme après fusion de différentes vues de numérisation (Figure 3 et Figure 4). En effet, la valeur de l'indicateur précédent peut être identique dans les deux situations représentés Figure 2a et Figure 2c alors que les nuages sont forcément différents en terme de répartition.

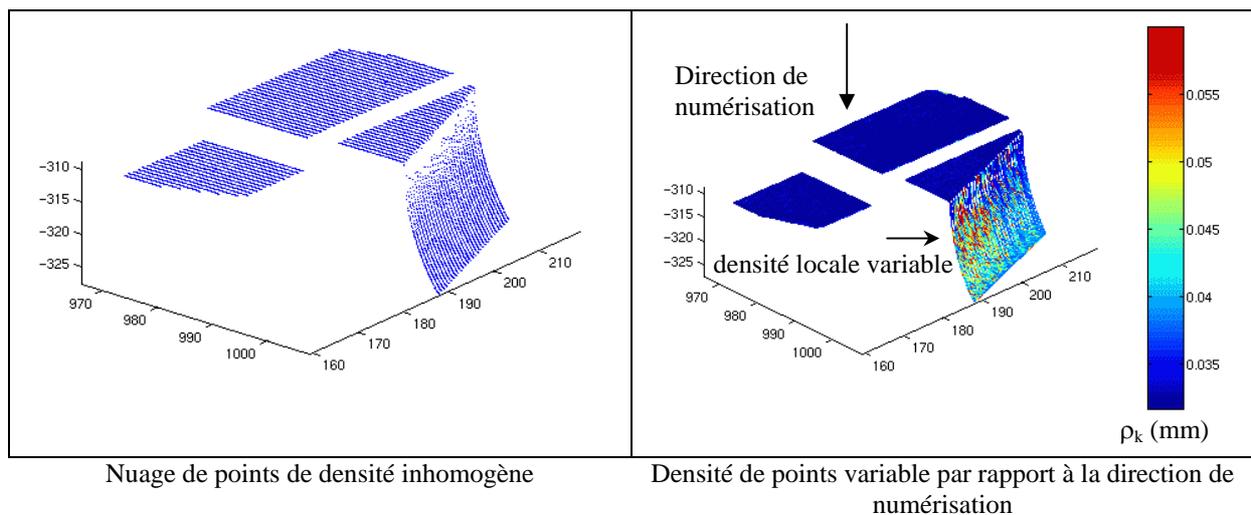


Figure 4 : Représentation de densité

Afin de tenir compte du caractère anisotrope de répartition des données, nous utilisons la représentation des données sous la forme d'espace-voxels. Le pavage de l'espace ainsi effectué permet l'évaluation locale de la densité.

La représentation par espace-voxels permet de donner un attribut de densité au modèle. Ainsi suivant l'échelle de description du modèle, ici des voxels d'arête 1mm, nous pouvons quantifier le nombre de points numérisés contenu dans l'espace-voxel (Figure 5c). Nous obtenons une densité locale de points où l'indicateur  $\rho_k$  correspond au nombre de points par  $\text{mm}^3$ .

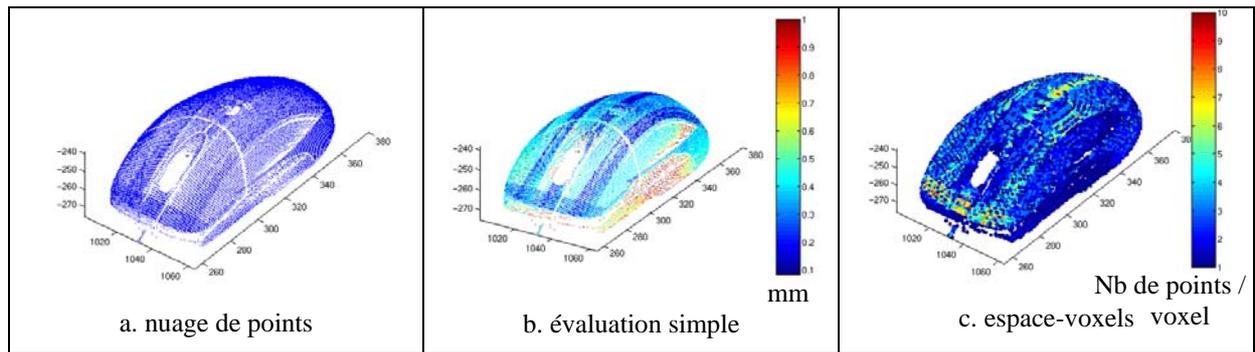


Figure 5 : Densité, évaluation simple et par espace-voxels

L'indicateur de densité peut être employé pour une application de filtrage des données. En effet, dans le cas d'un filtrage par sphère de proximité, la densité est modifiée localement afin d'homogénéiser les données. Le choix d'un rayon de filtrage peut se faire en accord avec le fichier initial en conservant comme paramètre la densité locale la plus représentative sur l'ensemble des données. L'indicateur  $\rho_{\text{global}}$  devient le paramètre de l'application de filtrage comme illustré Figure 6 où  $\rho_{\text{global}} = 1$  mm. Remarquons qu'un filtrage des données est souhaitable pour une application de copiage de forme. L'étape du calcul de la trajectoire de l'outil est sensible aux variations de densité pour une stratégie d'usinage donnée [Boyer 02].

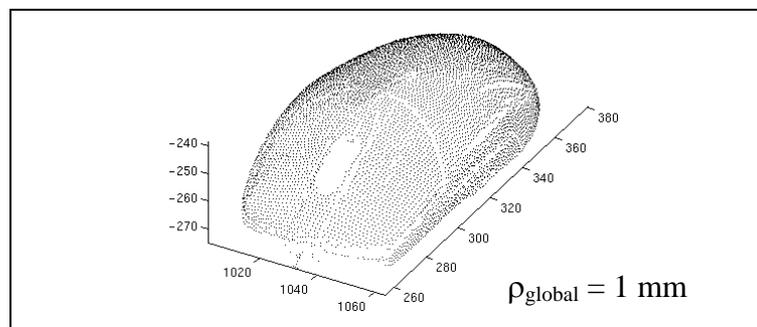


Figure 6 : Utilisation de l'indicateur  $\rho$  pour une application de filtrage de données

## 2.2 Indicateur $\kappa$ -complétude

La complétude permet de donner un critère d'arrêt à la numérisation de l'objet. C'est bien souvent ce critère qui est employé dans la littérature (voir chapitre 3) pour définir une stratégie de numérisation, l'approche de Papadopoulos en est un exemple [Papadopoulos 97] : il aborde la complétude par une actualisation du volume de l'espace numérisé à l'aide de voxels.

Notre approche se veut ici plus générique et doit permettre de définir la complétude d'un nuage de points de manière intrinsèque. L'application visée nous donne alors des indications sur les seuils à fixer à cet indicateur pour qu'il soit pertinent.

### 2.2.1 Définition de l'indicateur $\kappa$ -complétude

Une représentation discrète de la surface d'un objet peut laisser apparaître des lacunes de numérisation, c'est à dire des zones où il y a une absence d'information. Cette absence de numérisation peut être interprétée de deux manières différentes :

- il y a de la matière sur l'objet numérisé mais la numérisation est incomplète, (orientation inadéquate ou "oubli") une numérisation supplémentaire de cette zone permet de compléter l'information du nuage de points (Figure 7),
- il n'y a pas de matière sur l'objet numérisé; une numérisation supplémentaire n'apportera rien de plus au nuage de points.

Nous n'aborderons pas ici l'interprétation de la géométrie numérisée, mais la présence ou non d'une possible lacune de numérisation sur un fichier de points.

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 ici est à rapprocher de celle de la densité. En effet, nous définissons *une "incomplétude" par un changement local brusque de densité dont on aura fixé le seuil. La grandeur  $\kappa$  associée est un taux de couverture de la surface numérisée telle que :*

$$\kappa_{\%} = \left(1 - \frac{\sum \text{Aires}_{\text{zones seuillées}}}{\sum \text{Aires}_{\text{zones numérisées}}}\right) * 100$$

$\kappa = 80 \%$  représente une couverture de la surface de 80 %, soit 20 % de zones seuillées correspondant à une possible incomplétude. Les aires sont déterminées à partir d'une triangulation des données que nous définissons dans la suite.

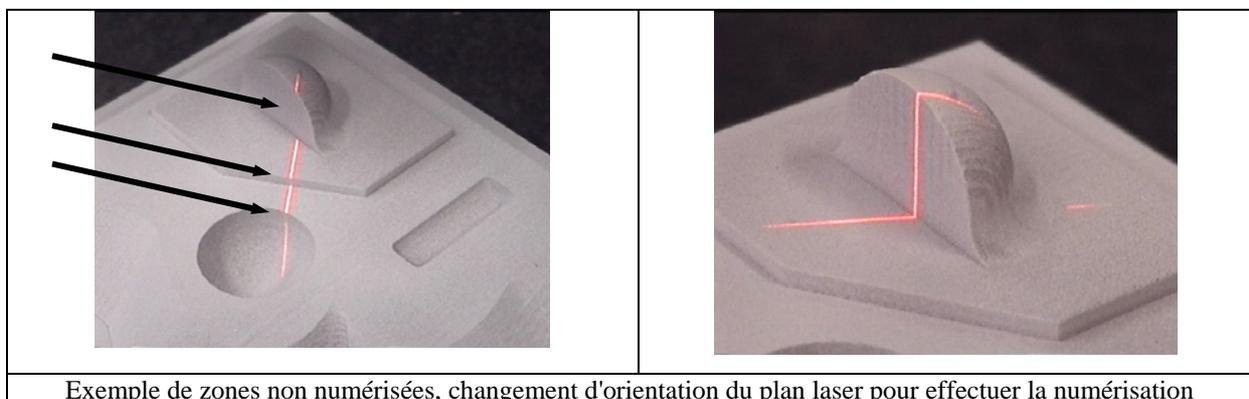


Figure 7 : Changement d'orientation de capteur sur une pièce de test [Larue 00]

### 2.2.2 Evaluation de l'indicateur $\kappa$ -complétude

L'évaluation au sens d'un seuillage de la densité dans une représentation des données par voxels ne donne pas de résultats satisfaisants. Cette démarche est fortement dépendante du choix de la taille de voxel.

Afin d'extraire les zones de l'espace susceptibles de révéler des lacunes de numérisation, nous appliquons une triangulation de Delaunay sur la fenêtre de numérisation à traiter, soit  $T = \{t_1, \dots, t_p\}$  tel que  $t_i, i \in [1, p]$  une facette du maillage. Un traitement morphologique sur  $T$  permet d'isoler les facettes  $t_i$  en cause (Figure 8).

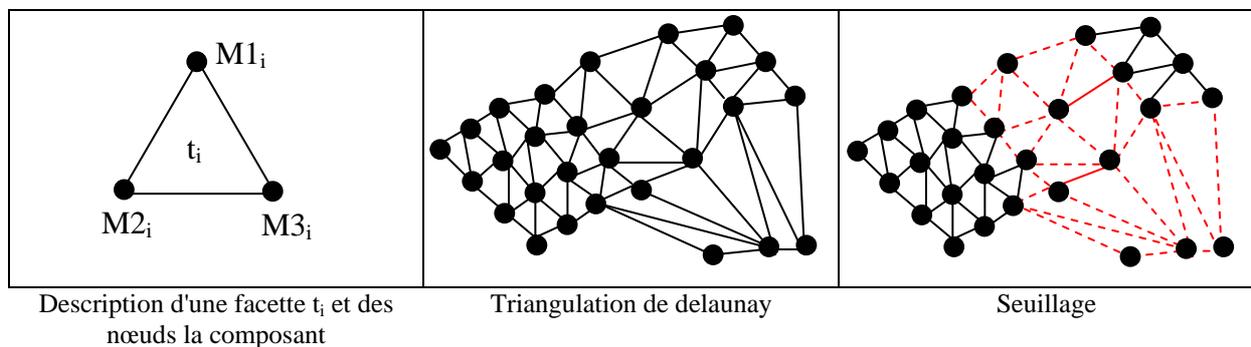


Figure 8 : Maillage

Les étapes de l'identification de l'indicateur de complétude sont :

- Evaluation de l'indicateur de densité global  $\rho_{\text{global}}$
- Triangulation des données numérisés, définition d'un ensemble de facettes  $T$
- Calcul des aires  $A_i$  des facettes  $t_i$  constituant l'ensemble  $T$ , (Figure 9a)
- Détermination de l'aire seuil  $A_s$  fonction de la densité du nuage de points telle que  $A_s = 2 \cdot \rho_{\text{global}}^2$ , (Figure 9b)
- Extraction des facettes telles que  $A_i > A_s$ , (Figure 9c)
- Evaluation de l'indicateur de complétude  $\kappa$ , (Figure 10)

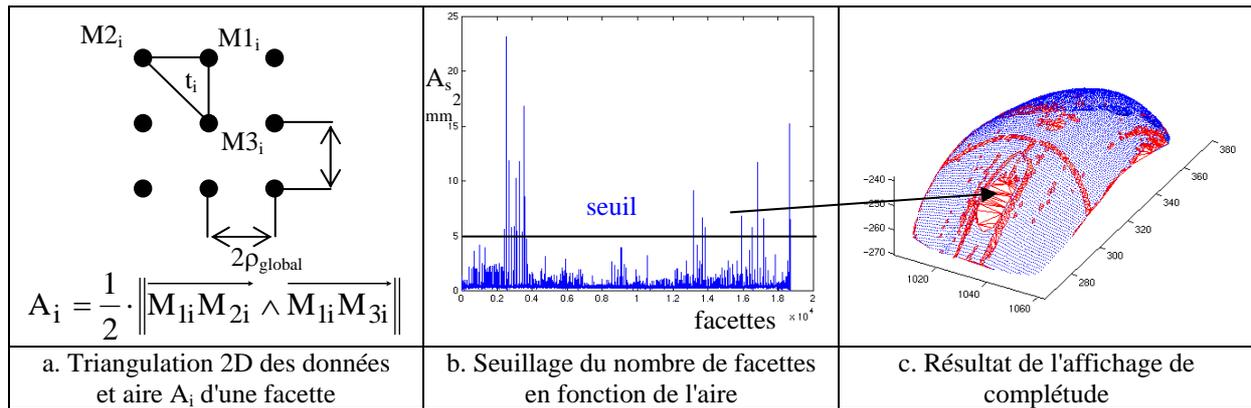


Figure 9 : Méthode d'évaluation de la complétude [Lartigue 02]

Nous illustrons notre démarche au travers de l'exemple suivant :

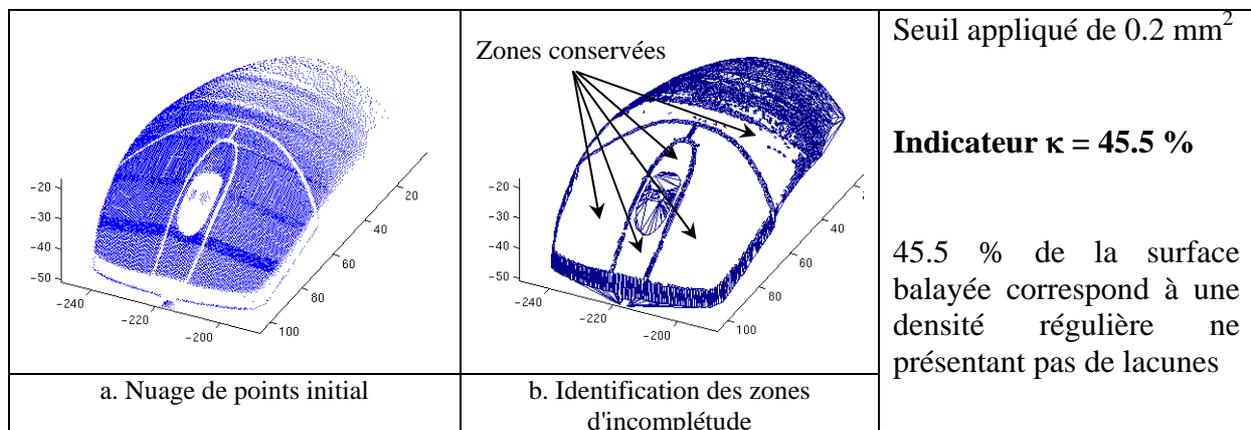


Figure 10 : Identification de  $\kappa$  sur un exemple de numérisation

En conclusion, cet indicateur peut être utile à deux niveaux. Le premier concerne la stratégie de numérisation où une incomplétude du nuage de points mise en évidence peut être levée par un changement d'orientation par exemple. Le deuxième niveau concerne l'application proprement dite où un algorithme de partitionnement est une bonne alternative pour isoler les zones présentant "une complétude suffisante", pour la définition de sous ensembles de points topologiquement cohérents. Cette dernière utilisation de l'indicateur de complétude est plus spécifique aux applications de rétroconception et de métrologie.

### 3 Indicateurs spécifiques

Nous décrivons ici les deux indicateurs spécifiques : le bruit de mesure  $\delta$ -bruit et l'exactitude de position  $\tau$ -exactitude. Ces indicateurs sont directement dépendants de la qualité dimensionnelle du nuage de points, et sont caractéristiques du moyen et des conditions

expérimentales de mesure. Ainsi, la seule connaissance du nuage de point n'est pas suffisante pour identifier  $\delta$  et  $\tau$ , grandeurs associées aux indicateurs. Ces grandeurs sont appréhendées au moyen de procédures expérimentales présentées ici et mise en œuvre au chapitre suivant.

### 3.1 Indicateur $\delta$ -bruit :

Le bruit de mesure est souvent la cause principale d'erreur sur les données restituées. Comme nous l'avons vu, ce type d'erreur aléatoire peut être provoqué par différentes sources aussi bien électronique (bruit de fond des composants), que mécanique (vibrations) et optique (comportement des lentilles ou autre systèmes optiques). Nous considérons dans notre étude une modélisation du bruit selon un modèle gaussien. Compte tenu d'une répartition d'intensité lumineuse de type gaussienne pour des systèmes à plan laser, il semble cohérent d'adopter une représentation gaussienne pour le bruit.

#### 3.1.1 Définition de l'indicateur $\delta$ -bruit [Hoppe 92]

*Soit  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  un ensemble de points numérisés sur ou proche de la surface inconnue  $S$ . Afin de quantifier le bruit d'acquisition, nous considérons chaque point  $x_i \in X$  pouvant s'écrire sous la forme  $x_i = a_i + e_i$ , où  $a_i \in S$  est un point de la surface inconnue et  $e_i \in \mathbb{R}^3$  est un vecteur d'erreur. Alors, une acquisition  $X$  est dite  $\delta$ -bruitée si  $\|e_i\| \leq \delta$  pour tout  $i$ ,  $\|x\|$  est ici la distance euclidienne.*

Cet indicateur permet d'évaluer dans le cas de notre capteur ou pour tout moyen de numérisation, le bruit intrinsèque à l'acquisition.

#### 3.1.2 Evaluation de l'indicateur $\delta$ -bruit

D'une façon générale, nous adoptons une procédure d'évaluation du bruit de la manière suivante.

Soit un ensemble  $M_i$  de points issus de la numérisation et  $E$  un élément géométrique idéal (un point, une droite, un plan ...) correspondant à la surface nominale attendue, nous notons  $\sigma$  l'écart type des écarts géométriques entre l'élément associé au sens des moindres carrés et l'ensemble des points  $M_i$ .

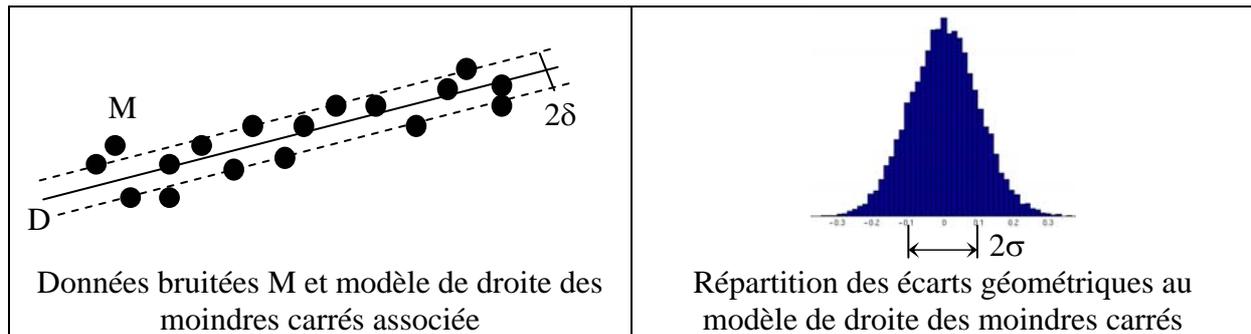


Figure 11 : Association d'un modèle des moindres carrés

Illustrons le propos précédent par l'exemple suivant qui concerne l'identification d'une ligne réputée rectiligne (Figure 11). Soit une ligne D réputée rectiligne, matérialisée par l'intersection de la surface d'une cale étalon et d'un plan laser, et un ensemble de points correspondant à cette acquisition  $M = \{(m_1, \dots, m_n) / m_k = (x_{1k}, x_{2k})\}$ . Nous notons  $\sigma$  l'écart type des écarts géométriques entre un modèle de droite des moindres carrés associé aux données numérisées et les données elles-mêmes, l'indicateur  $\delta$  s'écrit alors  $\delta = k \cdot \sigma$ , avec  $k$  facteur d'élargissement tel que  $k \in \{1, 2, 3\}$ . La répartition des écarts géométriques respecte une loi gaussienne, ce qui confirme le choix d'une modélisation du bruit de type gaussien.

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (\text{dist}_i - \overline{\text{dist}})^2} \text{ avec } \text{dist}_i = \frac{|ax_{1i} + bx_{2i} + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{ et } \overline{\text{dist}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \text{dist}_i$$

Cette évaluation reste valable pour l'association d'un plan des moindres carrés. Notons cependant que cette évaluation sur des formes canoniques, si leur position exacte est connue, permet d'évaluer une composante de bruit par l'écart type et un biais associé à l'exactitude de mesure qui peut être révélé par la médiane de la répartition. L'indicateur suivant, qui concerne l'exactitude de mesure, permet d'évaluer l'écart entre la mesure et la valeur vraie du mesurande, la surface physique numérisée.

### 3.2 Indicateur $\tau$ -exactitude

L'exactitude de position d'un point géométrique est une caractéristique métrologique importante dès lors que l'on attache de l'importance au dimensionnel de l'objet numérisé. Cette exactitude est bien souvent donnée de manière globale pour tout le volume de mesure (exemple de la qualification d'une MMT) [Chomo 94]. Nous proposons ici, d'évaluer l'indicateur  $\tau$  qui est une caractéristique locale associée en chacun des points numérisés.

### 3.2.1 Définition de l'indicateur $\tau$ -exactitude

L'exactitude de mesure peut être définie de manière multiple. Il n'existe pas aujourd'hui de norme précisant les différentes caractéristiques métrologiques appliquée aux moyens de mesure sans contact. Nous donnons ici une définition en relation avec notre application que nous développons au chapitre 5. Cette exactitude de mesure est liée à l'utilisation d'une matrice CCD qui est supposée « non isotrope ».

L'indicateur  $\tau$  est une grandeur associée localement à chacun des points issus de la numérisation, et spécifie que le point numérisé est entaché d'une incertitude de position de  $\tau$ .

**Soit  $M$  le point réel de la surface visé et  $M_i$  le point numérisé, alors :  $\|\overrightarrow{M_i M}\| \leq \tau$**

### 3.2.2 Evaluation de l'indicateur $\tau$ -exactitude

L'exactitude de mesure est définie comme l'écart entre le mesurage et la valeur vraie du mesurande [VIM 93, §(3.5)].

La particularité des systèmes de numérisation par moyens optiques (à base de caméras) est qu'un unique point 3D  $M(X, Y, Z)$  peut être observé par différents points de vue dont les images 2D correspondantes sont  $(L_1, C_1)$  et  $(L_2, C_2)$  (Figure 12). Dans le cas de notre capteur, cela se traduit par toute transformation géométrique laissant invariant le plan laser [Contri 02].

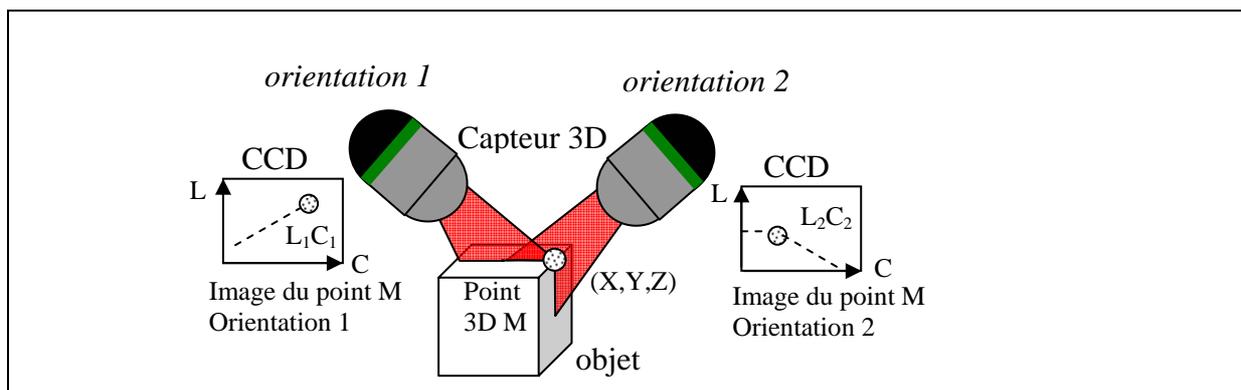


Figure 12 : Observation d'un unique point 3D M selon différentes orientations de capteur

C'est le cas notamment, lorsque différentes positions du capteur sont nécessaires pour la numérisation. De ce fait, cet unique point 3D peut être numérisé à partir de différentes positions dans la matrice CCD. Le comportement de la caméra n'étant pas exempt de défauts (chapitre 3), la restitution du point 3D dans ces différentes vues n'est pas unique.

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, la procédure de calibration permet d'établir une relation univoque entre l'espace des coordonnées 2D ( $L, C$ ), lignes et colonnes de la matrice CCD et l'espace des coordonnées 3D ( $X, Y, Z$ ) pour une position de capteur donnée ( $X_m, Y_m, Z_m$ ). La relation de passage du 2D au 3D est de la forme suivante :

$$\begin{aligned} X &= X_m + f_1(L, C) \\ Y &= Y_m + f_2(L, C) \\ Z &= Z_m + f_3(L, C) \end{aligned} \quad (1)$$

où  $f_1, f_2, f_3$  dépendent de paramètres identifiés lors de la calibration.

Ainsi, pour un unique point 3D ( $X, Y, Z$ ) visé, il est possible d'observer dans la matrice CCD autant d'images correspondantes au placement du capteur ( $X_m, Y_m, Z_m$ ). L'équation 1 devient alors une relation qui permet l'identification des positions du capteur observant un unique point 3D selon un mode de parcours de la caméra prédéfini.

Cette méthode permet d'évaluer la dispersion sur la position d'un point 3D en fonction de la localisation de son image dans la matrice CCD. Nous proposons de mettre en évidence le caractère non isotrope de la matrice CCD en quantifiant cette dispersion à l'aide de l'indicateur  $\tau$ . Les résultats de notre méthode d'identification sont présentés au chapitre 5. Cette méthode se généralise à tout système d'acquisition optique dont le modèle de calibration inverse est connu.

#### 4 Synthèse des indicateurs de qualité

Les indicateurs de qualité peuvent être considérés comme une aide à la qualification du nuage de points. Ces indicateurs de qualité sont à mettre en corrélation avec l'application visée afin d'adapter les seuils correspondants à la conformité des acquisitions.

Différentes utilisations sont possibles : un constat simple au regard des indicateurs, une renumérisation selon une stratégie différente, une correction des acquisitions, le changement du moyen de numérisation. Toutes ces prises de décisions se font en relation avec le cahier des charges fixé par l'utilisateur.

L'utilisation du modèle de représentation par espace-voxels permet cette synthèse. Cette représentation est structurée par deux classifications. La première, la classification primaire, concerne la nature des voxels. Ils sont soit vides, non vides ou inconnus. Dans ce dernier cas, le procédé ne permet pas à l'étape considérée de qualifier le voxel, cas d'une occlusion du capteur par exemple (Figure 13) [Contri 00]. La seconde classification, la classification

secondaire, prend en compte la spécificité de l'application par la définition d'attributs. Ces attributs, attachés aux voxels non vides (i.e. attachés à l'espace des points inclus dans les voxels non vides de la classification primaire), permettent une particularisation des espaces-voxels pour un traitement local spécifique (exemple : qualification des données, partitionnement...).

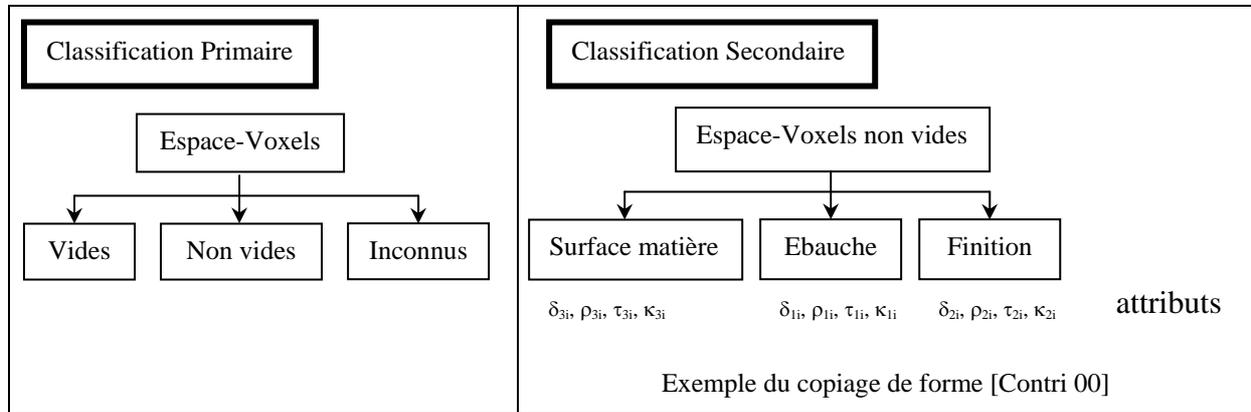


Figure 13 : Classifications et attributs des espace-voxels

L'utilisation de cette représentation permet dans le cadre de travaux une synthèse des indicateurs de qualité sur l'ensemble des données numérisées.

Notre démarche est illustrée, Figure 14, par l'identification des indicateurs de qualité ( $\delta, \rho, \tau, \kappa$ ) puis par la synthèse à l'aide d'une représentation par espace-voxels.

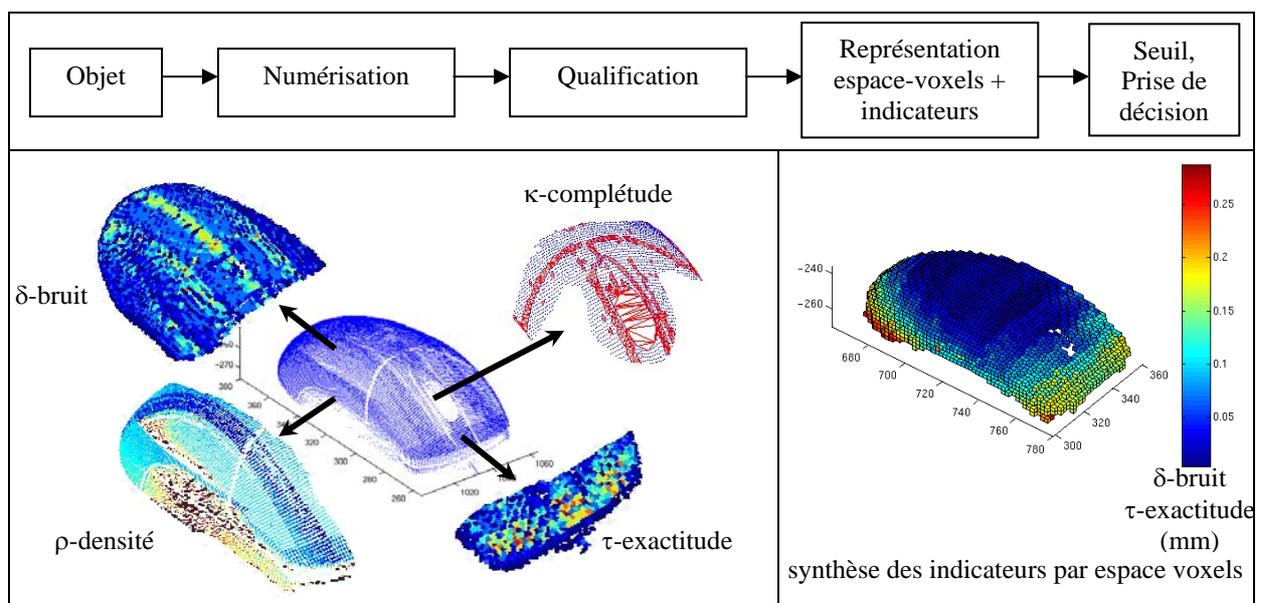


Figure 14 : Synthèse des indicateurs de qualité ( $\delta, \rho, \tau, \kappa$ )

## **5 Conclusion**

Afin de prendre en compte les spécificités des moyens de numérisation sans contact nous devons privilégier une approche locale de qualification. Or, les approches classiques concernent bien souvent des approches globales ou traitent seulement de certains phénomènes sans avoir un véritable lien avec l'exploitation des données.

Nous avons proposé des outils de qualification au travers d'indicateurs afin d'enrichir la représentation des données au regard de l'application visée. Les indicateurs intrinsèques de densité et de complétude sont évalués sur le nuage de points. L'évaluation du bruit et de l'exactitude de mesure est réalisée en relation avec le moyen de numérisation par des procédures expérimentales spécifiques. Nous abordons dans le chapitre suivant la mise en œuvre des procédures d'identification expérimentale des indicateurs de type exactitude de mesure et bruit.

## **CHAPITRE 5**

### **QUALIFICATION DU NUAGE DE POINTS : EXPERIMENTATIONS**

Ce chapitre décrit la mise en œuvre de la démarche de qualification d'un nuage de points obtenu par numérisation 3D à l'aide d'indicateurs :  $\delta$ -bruit,  $\rho$ -densité,  $\kappa$ -complétude,  $\tau$ -exactitude, définis au chapitre précédent.

Les expérimentations que nous avons menées se déroulent en deux temps. Tout d'abord, nous avons mené une vérification de la faisabilité d'une évaluation globale par la mesure d'artefact, telle qu'elle est souvent effectuée dans la littérature. Cette étude nous a conduit à la définition d'un artefact spécifique pour la mesure par moyen optique.

Cette évaluation globale n'étant pas suffisante pour la qualification nécessaire à une application, nous abordons dans un second temps l'évaluation des indicateurs de qualité définis au chapitre précédent et plus particulièrement  $\delta$ -bruit et  $\tau$ -exactitude. Nous montrons pour chacun de ces indicateurs un exemple d'application.

Enfin, nous terminons ce chapitre par une synthèse des indicateurs, synthèse s'appuyant sur une représentation des données par espace-voxels.

### 1 Préliminaires

Avant de présenter notre démarche expérimentale, nous détaillons les moyens expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que la procédure de calibration que nous avons utilisée et qui sera reprise dans l'évaluation d'indicateurs.

Nous donnons de plus des résultats préliminaires concernant la préparation des surfaces à numériser.

#### 1.1 Présentation du site expérimental

Le site expérimental de numérisation reprend la structure évoquée au chapitre 3. Il se compose d'un capteur 3D à plan laser qui assure la fonction Acquérir, une MMT qui assure la fonction Déplacer ainsi qu'une partie logicielle qui se charge de la fonction Traiter.

##### Capteur 3D :

Le capteur 3D est un capteur à plan laser KLS51 (Kréon Technologies) dont certaines caractéristiques sont données Figure 1 ([www.kreon3d.com](http://www.kreon3d.com)). Ce capteur est constitué de deux caméras CCD situées de part et d'autre d'un plan laser. Ces caméras permettent d'observer et de numériser la trace laissée par le plan laser sur la surface de l'objet numérisé (caractéristiques en annexe VI). Ce capteur a été spécialement modifié et allégé en collaboration avec la société Kréon Technologies afin de pouvoir l'adapter à un attachement motorisé.

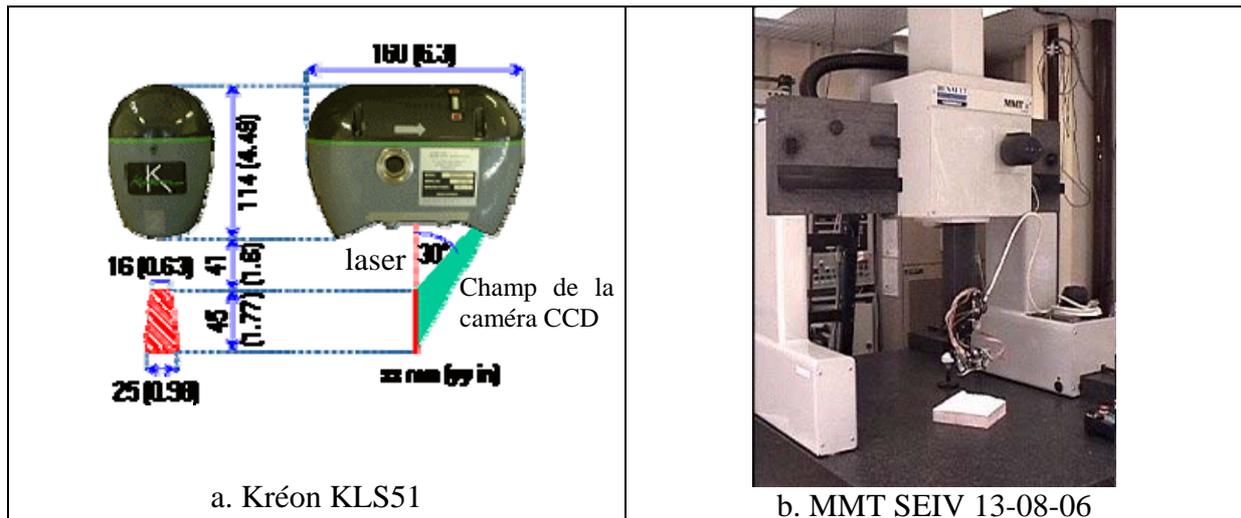


Figure 1 : Capteur 3D KLS51 et Machine à Mesurer Tridimensionnelle

#### Système de déplacement du capteur 3D :

C'est une machine à mesurer tridimensionnelle SEIV de type portique qui assure la fonction déplacer. Les courses sont les suivantes : X 1300 mm, Y 800 mm, Z 600 mm. La MMT est équipée d'une tête orientable motorisée Renishaw à positions discrètes PH10M, axe A 0-105° et axe B 0-360° par incrément de 7,5°, soit 720 positions possibles. L'incertitude de remise en position de la tête orientable est négligeable. Les incertitudes sur chaque axe de déplacement restent inférieures à 1  $\mu\text{m}$ . Mesurée sur la MMT équipée d'un palpeur mécanique, l'incertitude de mesure d'une cale étalon de longueur L est évaluée à  $4\mu\text{m} + L/200$  après correction géométrique par une société agréée.

#### Partie logicielle :

La partie logicielle est constituée du logiciel TUTOR (Brown & Sharpe) qui se charge du pilotage de la MMT, ainsi que de POLYGONIA (Kréon Technologies) pour l'acquisition et le traitement des données issues du capteur 3D.

#### 1.2 Identification des paramètres de la caméra : la procédure de calibration

La procédure de calibration qui réalise la transformation des données 2D de l'espace de la caméra en coordonnées 3D est une procédure spécifique, développée pour permettre l'utilisation du capteur à plan laser sur la MMT équipée d'une tête orientable PH10M [Dantan 96]. Le modèle de calibration retenu est le modèle de sténopé. La procédure d'identification des paramètres du modèle s'appuie sur la mesure d'un artefact, une sphère à facettes, dont les plans, supposés de faible défaut de forme ( $< 2\mu\text{m}$ ), ont des positions

relatives connues (Figure 2). L'extraction de points d'intérêts construits sur l'intersection de deux segments laser permet l'identification des paramètres du modèle.

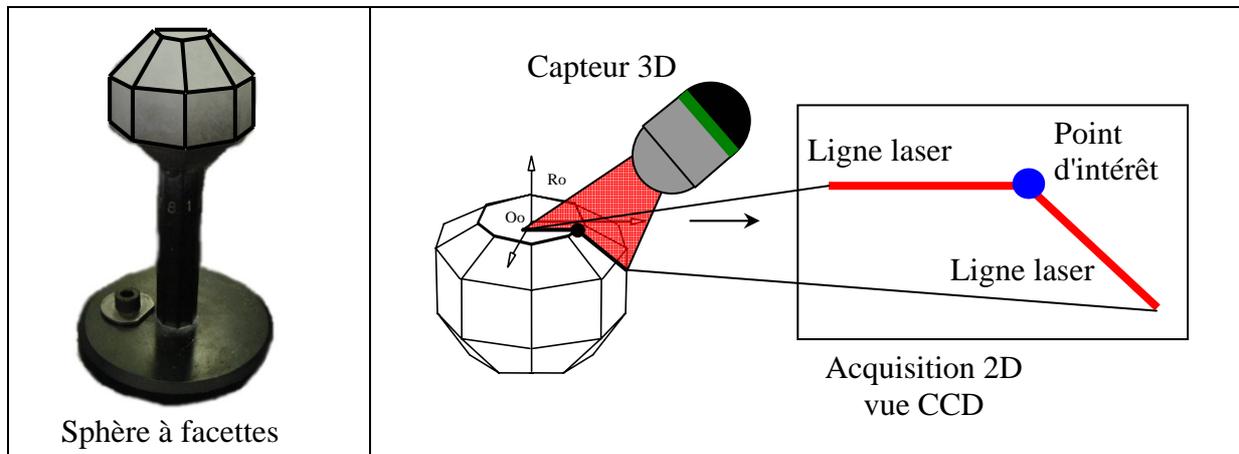


Figure 2 : Sphère à facettes, artefact de calibration

Comme nous l'avons exposé précédemment, la procédure de calibration joue un rôle important sur la qualité des points 3D restitués. Nous aborderons cet aspect au paragraphe 3.3 par une évaluation de la procédure de calibration en prenant en compte le bruit de numérisation.

### 1.3 Influence du mattifiant : évaluation expérimentale de son épaisseur

Selon la technologie employée, le système de numérisation est plus ou moins sensible aux conditions expérimentales et au type de matériau numérisé. Par exemple, les variations de luminosité ambiante et de contraste sont pénalisantes pour une mesure sans contact en lumière blanche par projection de lumière structurée. Dans le cas d'un capteur à plan laser, il est insensible à ce phénomène. Cependant des conditions de contraste avec le matériau à numériser sont à respecter afin d'éviter tout problème d'absorption ou de réflexions parasites. Afin de numériser un grand nombre d'objets de matériaux différents, les utilisateurs ont souvent recours à l'application d'un mattifiant. Ce mattifiant est généralement une poudre mate de couleur blanche appliquée en spray sur la surface de l'objet à numériser. A noter que ce mattifiant introduit une épaisseur supplémentaire, ce qui peut être pénalisant pour des applications d'inspection dimensionnelle.

Ce paragraphe présente une analyse d'un type de mattifiant couramment employé et son impact sur les variations dimensionnelles. Deux mesures ont été réalisées (voir annexe IV): l'une pour la détermination de la hauteur de marche entre une surface non recouverte et une surface avec mattifiant ; la seconde concerne une topographie de surface pour une répartition

non homogène du mattifiant correspondant à deux pulvérisations successives. La surface initiale est une surface réputée plane de défaut de forme inférieur à  $0.8 \mu\text{m}$ .

Les résultats montrent une hauteur de marche de l'ordre de  $11 \mu\text{m}$  (Figure 3) après une pulvérisation légère sur la surface. La hauteur de marche est déterminée par la distance entre 2 plans parallèles des moindres carrés associés au nuage de points. La topographie de surface (Figure 4) montre une répartition du mattifiant après deux pulvérisations consécutives, ce qui est souvent le cas pour recouvrir entièrement la surface de l'objet. Ceci est la cause d'un défaut de forme de l'ordre de  $45 \mu\text{m}$  dans le cas le plus défavorable.

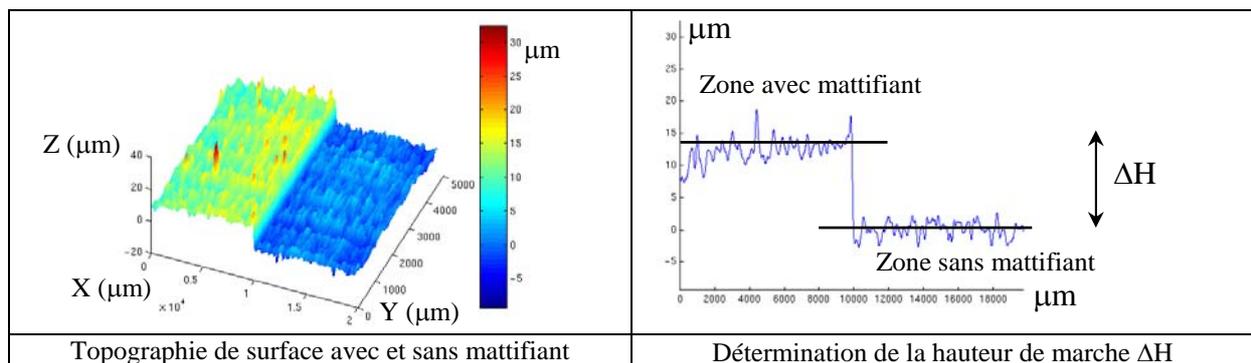


Figure 3 : Identification de hauteur de marche

Cette analyse de la répartition du mattifiant montre que son influence est non négligeable et qu'elle doit être prise en compte pour une mesure dimensionnelle. Le mattifiant peut toutefois être employé pour des applications demandant une exactitude de mesure sur la position 3D des points de l'ordre de  $0.4$  à  $0.5 \text{ mm}$ .

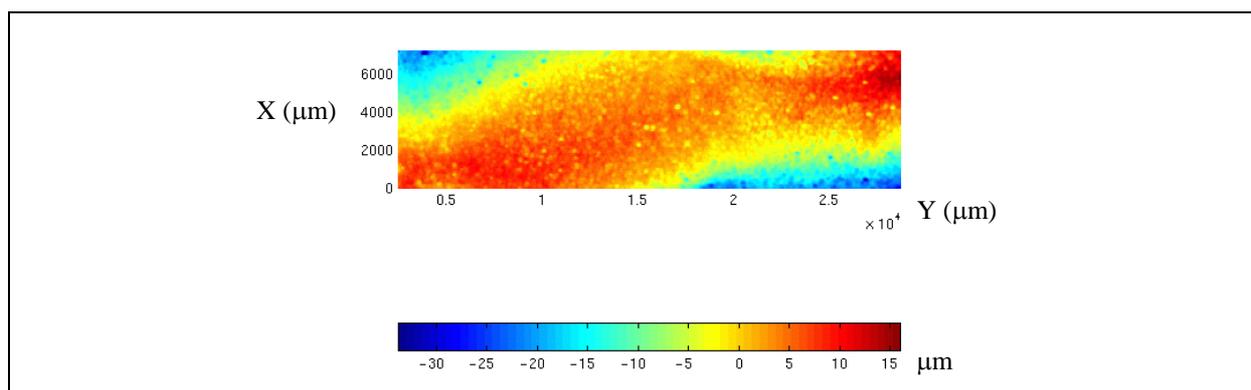


Figure 4 : Topographie de répartition du mattifiant sur une surface réputée plane

#### 1.4 Influence du type de matériau

Cette étude qualitative permet de compléter l'étude préliminaire de l'influence du mattifiant sur la mesure. En effet, afin de s'affranchir de l'emploi de mattifiant, il suffit de numériser un

matériau de couleur blanche et suffisamment mat. La Figure 5 montre la trace laissée par un capteur à plan laser sur quatre surfaces différentes, une recouverte de mattifiant, une résine type polyuréthane, un PA6.6 (Nylon) et du Téflon. Nous constatons pour les deux derniers des phénomènes d'absorption et de diffusion importants, compte tenu de leur nature translucide. Nous retiendrons donc pour nos expérimentations le choix d'un matériau à base de polyuréthane qui a un comportement comparable à celui d'une surface avec mattifiant.

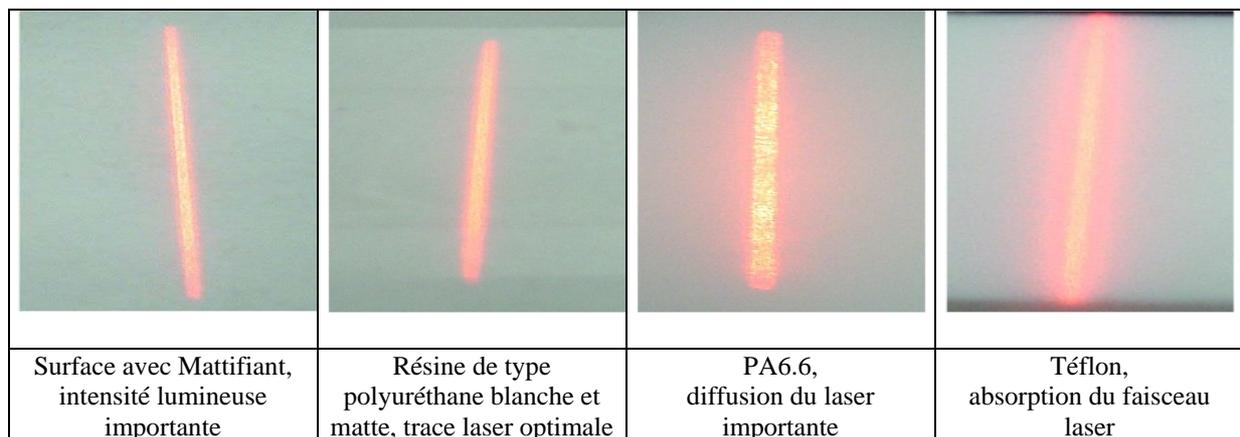


Figure 5 : Analyse qualitative de certains matériaux

## 2 Une première approche, évaluation globale par grandeurs caractéristiques d'un étalon

L'approche globale est celle qui est la plus couramment décrite dans la littérature (voir chapitre 4), en particulier pour la qualification des moyens de mesure mécanique par palpation. Elle consiste en l'identification d'une caractéristique géométrique à partir d'un objet réputé étalon. Nous analysons l'approche par l'identification du centre d'une sphère de référence pour en dégager les limites à l'emploi des systèmes de mesure sans contact. Nous proposons dans un second temps, un objet de référence plus adapté à la mesure sans contact.

### 2.1 Mesure d'une sphère

Une sphère de référence dont le défaut de forme est inférieur à  $0.5 \mu\text{m}$  est placée dans le volume de mesure. L'identification du centre de la sphère par palpation mécanique constitue la mesure de référence. Notons que le centre de la sphère est identifié par une méthode d'association suivant le critère des moindres carrés.

La procédure consiste à évaluer le centre de la sphère par numérisation 3D pour différentes orientations du capteur laser puis de le comparer à la mesure de référence. L'identification du centre de la sphère de référence est effectuée par 100 mesures par palpation

en 5 points à l'aide d'une MMT dont l'étendue de la dispersion sur la détermination du centre est inférieure à 4  $\mu\text{m}$ .

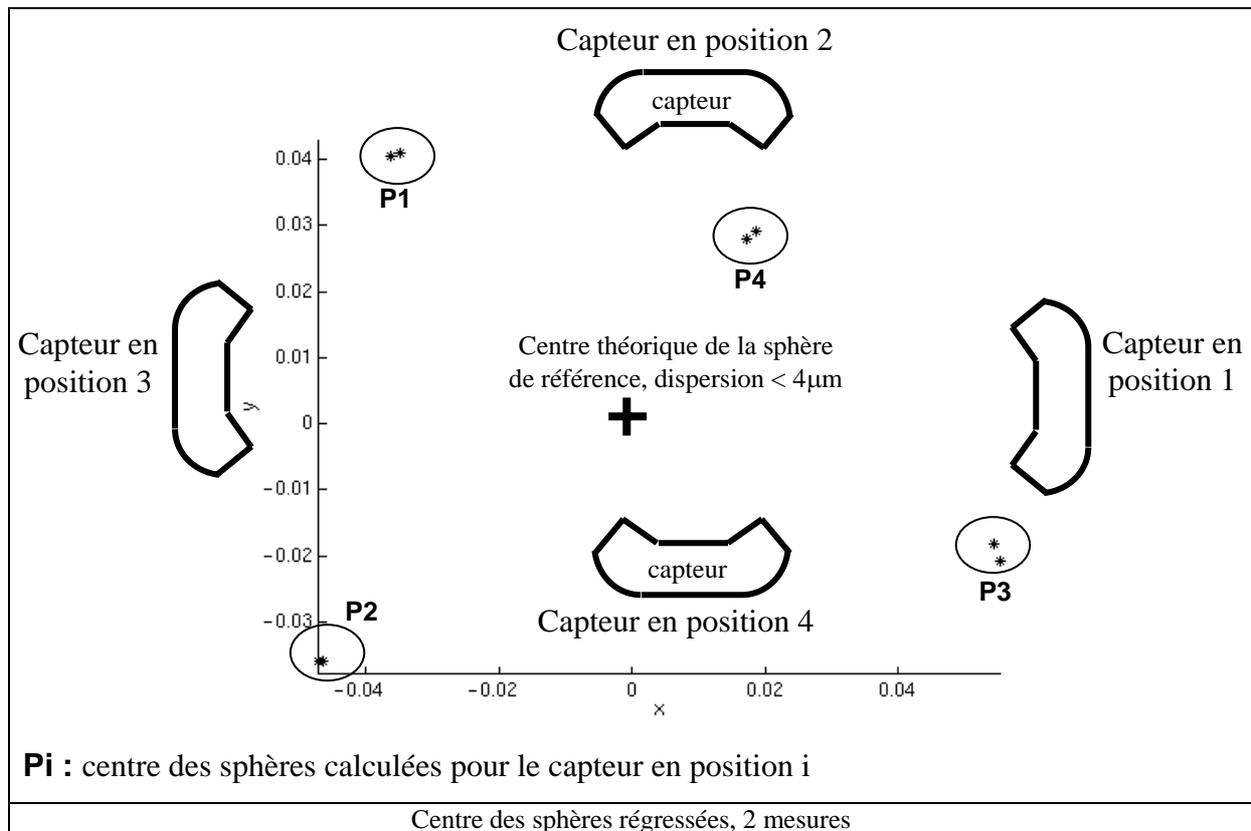


Figure 6 : Identification du centre d'une sphère de référence selon 4 orientations de capteur

La Figure 6 représente dans le plan XY, les centres des sphères régressées correspondant à la numérisation de la sphère de référence selon quatre orientations de capteur. Des variations sont obtenues sur les positions des centres,  $\Delta X = 0.08 \text{ mm}$ ,  $\Delta Y = 0.13 \text{ mm}$ ,  $\Delta Z = 0.05 \text{ mm}$  ( $\Delta d = 0.08 \text{ mm}$ , variation de distance par rapport au centre théorique). L'erreur maximale sur la position du centre de la sphère de référence peut être bornée par une sphère d'incertitude équivalente ou un ellipsoïde d'incertitude qui est plus représentatif de l'erreur commise par axes (Figure 7).

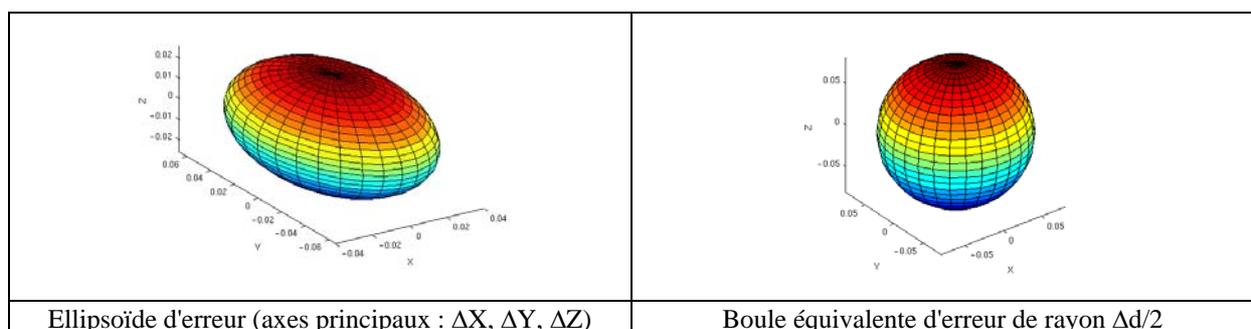


Figure 7 : Représentation de l'erreur sur la détermination du centre de la sphère de référence

En conclusion, l'évaluation globale par une mesure de sphère est une méthode rapide mais qui nécessite le pré positionnement de la sphère de référence. Une alternative consiste en une mesure relative pour exprimer les écarts sur la position des centres selon différentes vues. Cependant, la méthode est encore plus dépendante du modèle d'association (méthode des moindres carrés), de la densité de points ainsi que de sa répartition. Le problème de la numérisation d'une calotte sphérique par palpage est traité dans [Bourdet 93]. L'algorithme est peu sensible au nombre de points mais la procédure doit respecter un angle au sommet de la calotte sphérique d'au moins 50°. Pour les raisons évoquées précédemment, nous avons défini un artefact qui nous semble plus adapté à la mesure sans contact, l'artefact de mesure triplan.

## 2.2 Une approche de mesure de distance, artefact de mesure triplan

L'artefact de mesure triplan est un élément géométrique permettant la mesure d'une grandeur étalon par moyens optiques. Les procédés de mesure "conventionnels" de type mécanique nécessitent la mesure de cales étalons pour la qualification du volume de mesure [Cnomo 94]. La mesure de cales pose des problèmes d'accessibilité pour les moyens de mesure optique, ombres ou occlusions par exemple (Figure 8): la numérisation complète d'une cale, implique un changement d'orientation de la tête de mesure. Cette nouvelle orientation fait alors intervenir des paramètres de positionnement supplémentaires liés à la calibration, ce qui entraîne une incertitude supplémentaire.

L'artefact de mesure triplan permet l'identification de deux points d'intérêt en conservant une même orientation de capteur. Cet artefact aide ainsi à qualifier le volume de mesure balayé par le capteur 3D afin d'effectuer une qualification similaire à la procédure par cales étalons, comme le préconise la norme CNOMO dans le cas des MMT [Cnomo 94].

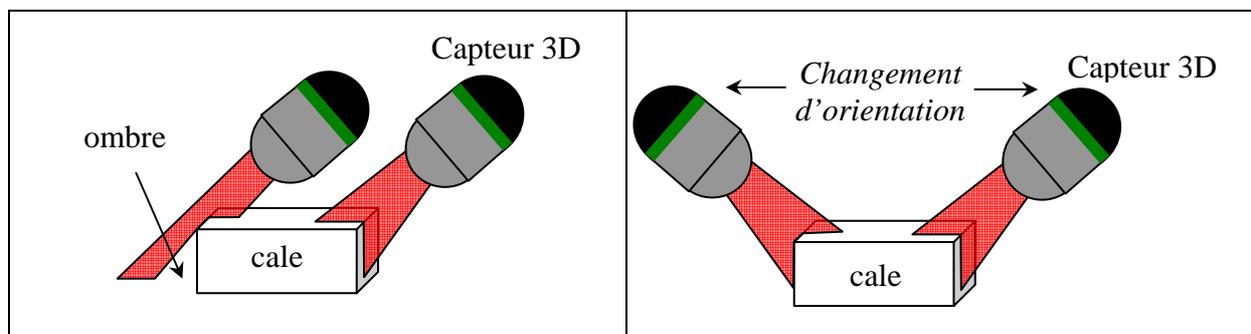


Figure 8 : Problèmes d'accessibilité

### 2.2.1 Description de l'artefact Triplan

L'artefact de mesure triplan est un objet de géométrie composée de plans sécants réalisé dans un matériau à base de polyuréthane (§1.4). Les trois plans sécants permettent de définir 1 point d'intérêt, identifié par intersection de ces trois plans. Dans le cadre de notre étude, deux points d'intérêt PT1 et PT2 matérialisent une distance D connue. La Figure 9 montre la description géométrique de l'artefact de mesure. Nous retenons les plans numérotés de 1 à 4 pour nos expérimentations.

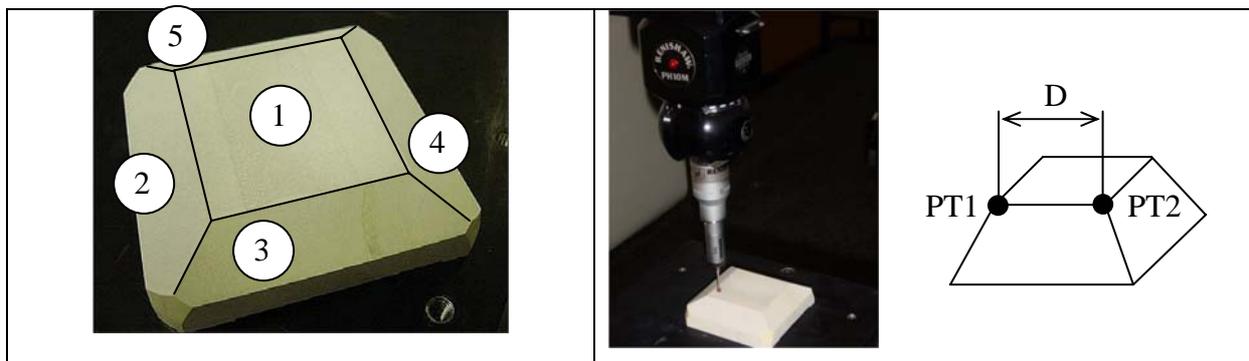


Figure 9 : Artefact de mesure Triplan, distance étalon D

### 2.2.2 Résultats

L'artefact de mesure triplan permet de garantir l'accessibilité des deux points d'intérêt ainsi définis par une unique orientation de capteur. La numérisation de l'artefact permet d'identifier complètement la distance étalon D, distance évaluée par l'extraction des deux points PT1 et PT2. Chaque point est construit comme l'intersection de trois plans.

Cette distance étalon est évaluée au préalable par palpage ce qui limite l'incertitude de mesure à une valeur inférieure à 8µm. La mesure de l'artefact effectuée 50 fois donne (tableau 1) :

45.529	45.531	45.526	45.532	45.534	45.525	45.534	45.526	45.530	45.534
45.529	45.531	45.525	45.537	45.532	45.530	45.529	45.524	45.540	45.532
45.537	45.538	45.530	45.529	45.533	45.536	45.537	45.541	45.536	45.541
45.531	45.530	45.530	45.535	45.538	45.527	45.534	45.541	45.538	45.531
45.528	45.538	45.538	45.533	45.531	45.529	45.536	45.532	45.528	45.540

Tableau 1 : Mesures D en mm, par palpage mécanique

**une distance D de moyenne 45.532 mm.**

En ce qui concerne la mesure par numérisation, une méthode d'extraction des points caractéristiques doit être mise en place afin d'évaluer  $D$ . La méthode consiste à isoler les trois plans dans le nuage de points numérisés et d'en calculer l'intersection pour déterminer le point  $PT_i$  (Figure 10). Cette méthode d'extraction est validée sur un nuage de points simulant la numérisation de l'artefact afin d'éprouver la robustesse de l'algorithme détaillé dans l'annexe II.

La moyenne sur 5 mesures de l'artefact donne  $D_{\text{moyen}} = 45.576$  mm soit un écart à la valeur tenue pour vraie de  $44 \mu\text{m}$ .

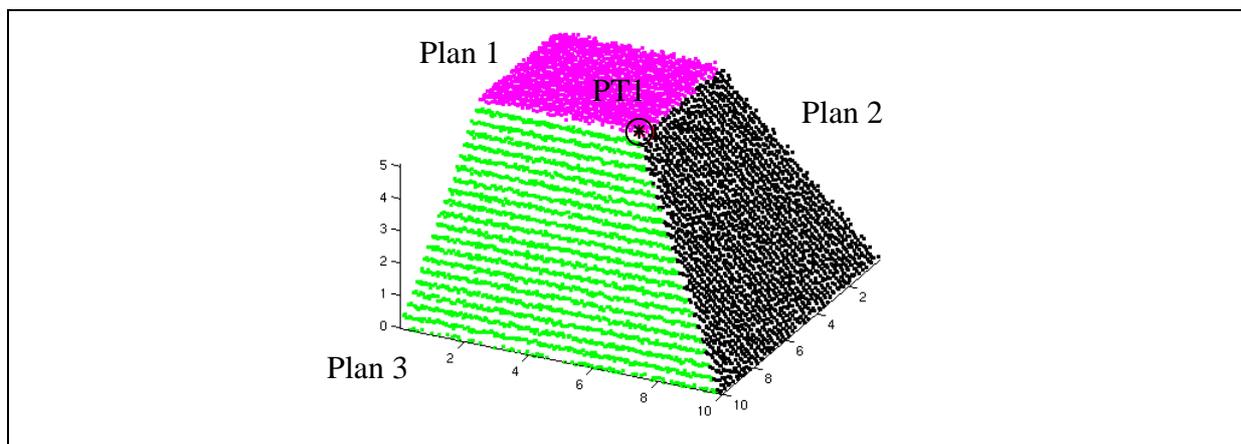


Figure 10 : Extraction du point  $PT_1$  sur l'artefact triplan

De la même façon que la procédure de qualification globale par mesure de cales étalons pour une MMT [Cnomo 94], nous pouvons conclure sur l'utilisation de l'artefact triplan. Nous soulignons la faisabilité de l'emploi de l'artefact triplan pour les moyens de mesure sans contact. Cependant, l'objectif n'étant pas ici de qualifier le moyen de mesure de façon globale, nous n'avons pas poussé cette expérimentation plus avant qui reste néanmoins réalisable.

La mesure par moyens optiques emploie des systèmes d'acquisition à base de caméras et d'algorithmes spécifiques. La mesure effectuée par l'artefact triplan est une mesure globale ne prenant pas en compte notamment la position de chaque acquisition dans la caméra CCD (§3.4). Il faut donc compléter cette approche en s'orientant vers des méthodes qui permettent d'évaluer l'exactitude de mesure au niveau de la matrice CCD ainsi que l'impact du bruit de numérisation.

### 2.2.3 Influence du bruit sur la mesure absolue

Nous avons mis au point des mesures de cales étalons pour déterminer la limite de résolution spatiale lors d'une identification de distance. Ainsi, l'effet du bruit de mesure sur l'identification de grandeurs géométriques impose des limites. La Figure 11 montre cet effet sur des mesures de distances entre deux plans distants d'une valeur conventionnellement vraie.

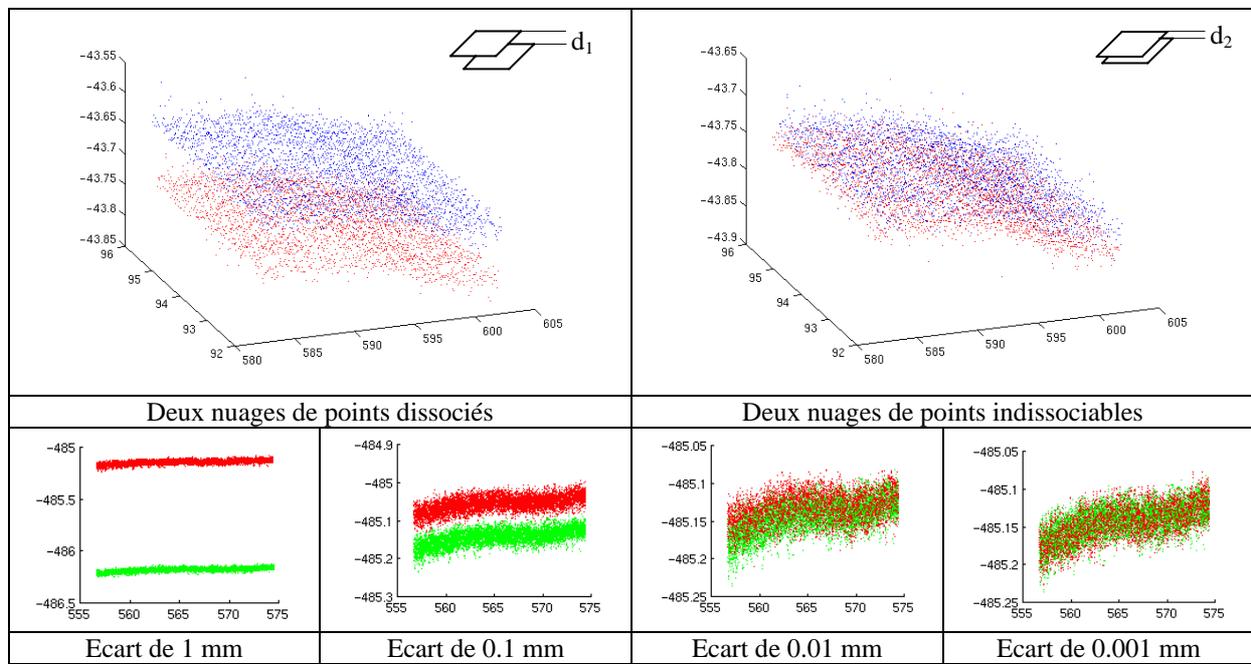


Figure 11 : Effet du bruit de mesure sur l'évaluation de grandeurs géométriques

L'évaluation sur cales étalon est une procédure mettant en avant l'influence du bruit de numérisation sur la mesure absolue de distance. Cette procédure consiste en la mesure de plans matérialisés par des cales étalons. L'empilage de cales définit la distance étalon que l'on cherche à évaluer. Cette procédure est détaillée dans l'annexe III. Nous obtenons Figure 12 la courbe représentant le taux d'erreur relatif entre la valeur conventionnellement vraie et la valeur mesurée :

$$\text{taux d'erreur relatif} = \frac{\text{grandeur mesurée} - \text{grandeur conventionnellement vraie}}{\text{grandeur conventionnellement vraie}} * 100. \quad \text{Nous}$$

obtenons un taux d'erreur relatif variant de 0.4 à 130 %, pour les 4 mesures effectuées correspondant aux grandeurs conventionnellement vraies suivantes : 1 mm, 0.1 mm, 0.01 mm, 0.001 mm.

Ce taux d'erreur relatif rend compte de l'influence du bruit de numérisation par rapport à la valeur absolue de la distance évaluée.

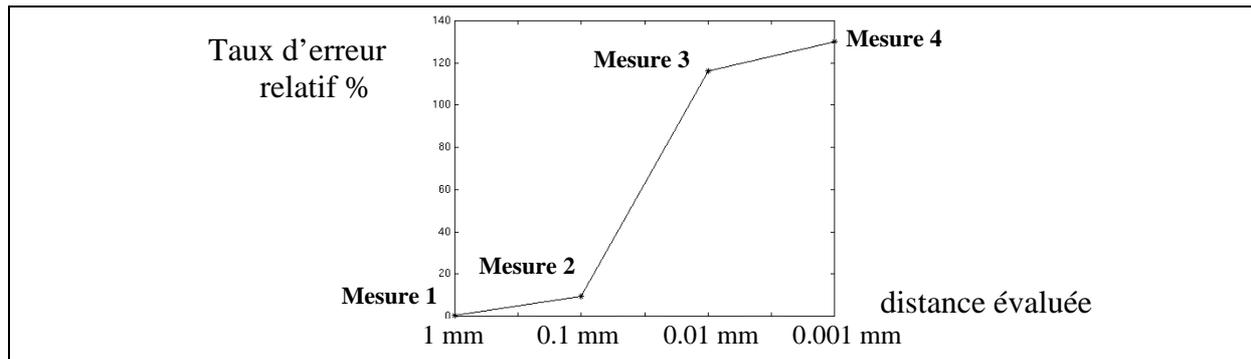


Figure 12 : Taux d'erreur relatif sur la mesure de cales étalons

En conclusion, nous pouvons identifier un seuil entre la mesure 2 et la mesure 3, ce qui revient à fixer un seuil d'identification compris entre 0.01 et 0.1 mm en dessous duquel l'erreur relative sur la mesure absolue est trop importante pour être significative.

### 2.3 Conclusion sur l'évaluation globale

La mesure par palpation mécanique utilise largement l'approche globale de qualification qui est bien maîtrisée et performante. Ce paragraphe a permis de faire le point sur cette approche et d'examiner si elle est suffisante dans le cadre de la mesure sans contact. Des éléments de réponse peuvent être apportés si l'on désire mener une qualification globale au sens de la norme par mesure d'une distance étalonnée, en utilisant l'artefact triplan. Ajoutons que l'influence du bruit de mesure est non négligeable sur la mesure globale. Une méthode a été développée permettant d'évaluer le taux d'erreur sur la mesure considérée.

Toutefois, l'approche globale est une approche qui maximise les erreurs de mesure en lui attribuant un majorant. La mesure est de ce fait pénalisée. Dans le cas du palpation mécanique, cette majoration peut atteindre le double d'une erreur locale par rapport à une erreur calculée dans le volume. A contrario, les moyens de mesure optique peuvent subir des variations sur les erreurs commises notamment en fonction du comportement de la caméra, l'écart peut alors atteindre un facteur 10.

Comme nous l'avons vu, les systèmes de numérisation à base de caméra ne peuvent pas se contenter d'une seule qualification globale. Il faut faire intervenir une approche locale plus significative du comportement de la matrice CCD et du laser. Nous traitons dans la suite de notre propos, l'approche de qualification locale des données restituées.

### 3 Deuxième approche, une évaluation locale au niveau du nuage de points

Cette deuxième approche concerne une évaluation locale du nuage de points prenant en compte les spécificités d'une chaîne de numérisation optique. Nous abordons trois types d'évaluations locales de qualification. La première traite de l'influence du bruit causé par l'incidence laser au niveau de la numérisation de la pièce, par l'évaluation de l'indicateur  $\delta$ -bruit. La seconde permet d'évaluer les répercussions du bruit de numérisation sur la procédure de calibration employée. Enfin, la troisième est une procédure d'évaluation de l'exactitude de mesure en fonction de la position de l'acquisition dans la matrice CCD, en relation avec l'indicateur  $\tau$ -incertitude.

#### 3.1 Etude de l'incidence laser

L'orientation  $\alpha$  du plan laser du capteur 3D par rapport à la surface de la pièce numérisée est un paramètre influant. Une modélisation du bruit associée à ce paramètre a été réalisée par Prieto pour une application d'inspection dimensionnelle [Prieto 99]. Cependant l'approche proposée permet la modélisation du bruit sur un domaine de validité assez restreint de 0 à 45°.

Nous proposons ici une étude systématique permettant la modélisation du bruit lié à l'orientation du capteur par rapport à la surface de l'objet, pour des orientations de 0 à 90°. Une mise en évidence du phénomène est menée par la numérisation d'une pièce de test comportant des plans inclinés.

##### 3.1.1 Pièce test "plans inclinés"

Cette pièce est constituée de 7 plans angulairement positionnés les uns par rapport aux autres à 15° (à  $\pm 0.1^\circ$ ) (Figure 13).

La procédure de numérisation consiste à acquérir chacun des plans tout en conservant une distance du capteur aux plans numérisés constante, de façon à ce que chacune des acquisitions se fasse dans une même zone de la matrice CCD de la caméra.

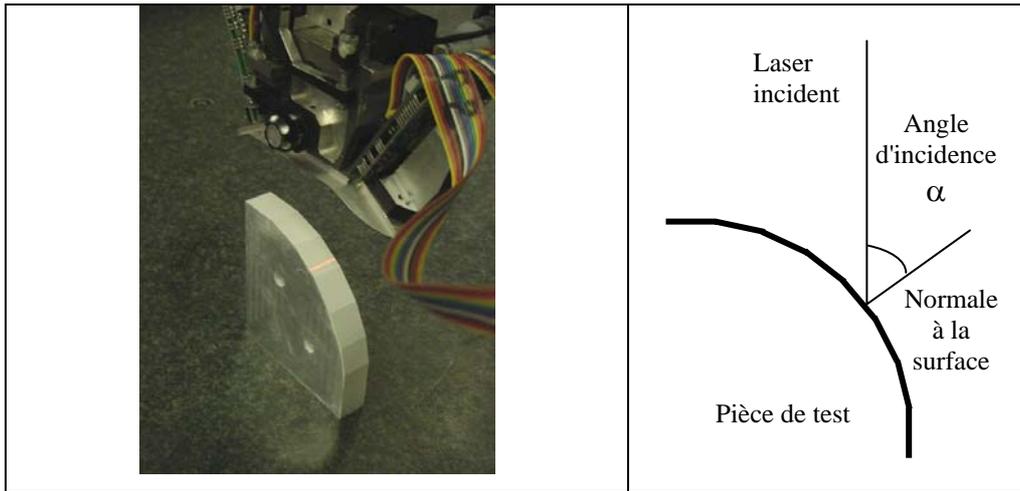


Figure 13 : Pièce de test plans inclinés

### 3.1.2 Analyse des résultats

Pour chacun des plans numérisés nous analysons deux indicateurs liés au bruit, l'un concernant un défaut de planéité et l'autre un défaut de rectitude au sens du critère des moindres carrés. Nous suivons la démarche décrite au chapitre 4 concernant l'identification de l'indicateur de bruit  $\delta$ , avec un facteur d'élargissement  $k = 1$ .

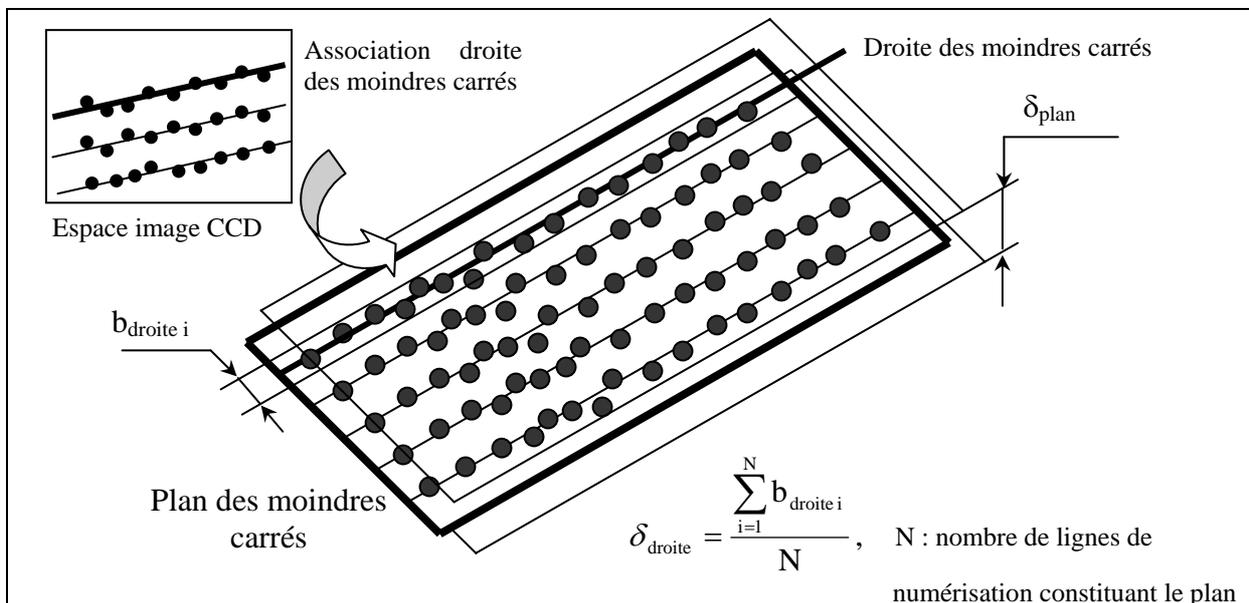


Figure 14 : Définition des indicateurs  $\delta_{plan}$  et  $\delta_{droite}$  caractérisant le bruit

Le premier indicateur  $\delta_{plan}$  rend compte de l'évolution du bruit de numérisation sur l'ensemble du plan ; le second  $\delta_{droite}$  permet un point de vue plus local en analysant chacune des acquisitions constituant le plan numérisé. Nous faisons l'hypothèse suivante : la

numérisation s'effectue à l'aide d'un plan laser supposé idéal qui intersecte une autre surface réputée plane de la pièce de test ; le résultat est en théorie une droite d'intersection où se trouvent les points d'acquisition.

Les plans [0° 15° 30° 45° 60° 75°] ont été numérisés avec un pas de 0.25 mm soit environ 20 acquisitions par plan. Le bruit est identifié par l'intermédiaire des indicateurs  $\delta_{\text{plan}}$  et  $\delta_{\text{droite}}$  qui ont été calculés de la façon suivante (Figure 14). L'indicateur  $\delta_{\text{plan}}$  représente l'écart type de la répartition des écarts géométriques des acquisitions au plan des moindres carrés correspondant. L'indicateur  $b_{\text{droite}_i}$  est l'écart type de la répartition des écarts géométriques des points numérisés par rapport à une droite des moindres carrés associée à chaque ligne de numérisation. Cette association se fait dans le plan image 2D de la caméra (L,C). La droite ainsi calculée est ensuite transposée dans l'espace 3D par le modèle de calibration. L'indicateur  $\delta_{\text{droite}}$  est alors le résultat de la moyenne des  $b_{\text{droite}_i}$  sur les N "lignes" de numérisation constituant un plan donné. Nous obtenons les résultats suivants (Figure 15):

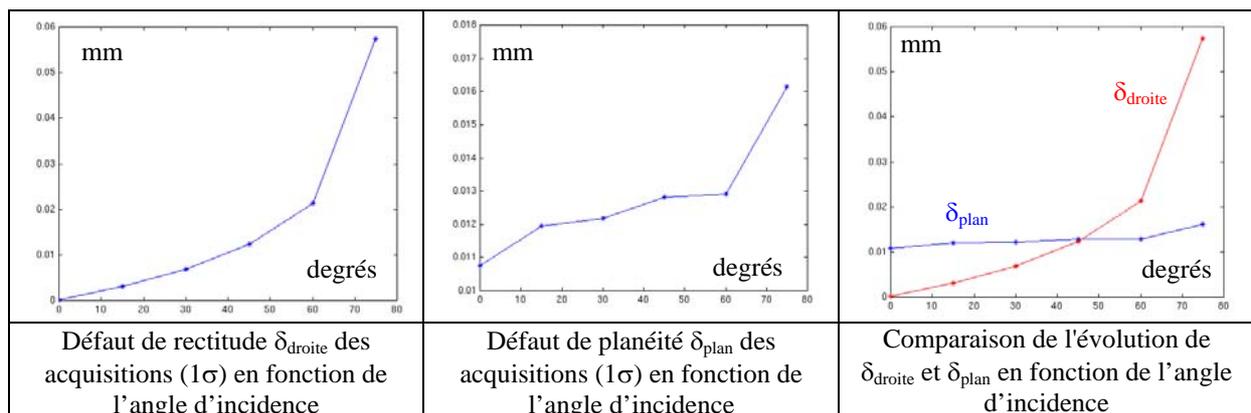


Figure 15 : Evolution des indicateurs  $\delta_{\text{droite}}$  et  $\delta_{\text{plan}}$

Nous constatons une forte corrélation entre  $\delta_{\text{droite}}$  et l'angle d'incidence. Nous développons dans le paragraphe suivant l'analyse systématique de l'orientation du plan laser par rapport à la surface numérisée afin d'en dégager un modèle exploitable lors de la numérisation d'une pièce. Concernant  $\delta_{\text{plan}}$ , l'influence de l'incidence du plan laser est négligeable vis à vis du paramètre  $\delta_{\text{droite}}$ . En d'autre terme, l'effet du bruit latéral est prépondérant par rapport à celui dans la direction normale au plan mesuré. Nous nous intéresserons principalement à la caractérisation de  $\delta_{\text{droite}}$  pour un point de vue local.

### 3.1.3 Analyse systématique, barre sinus

Cette analyse utilise une barre sinus et une cale étalon permettant d'une part de matérialiser une surface réputée plane et d'autre part de l'orienter suivant un incrément donné, ici de 5° (Figure 16).

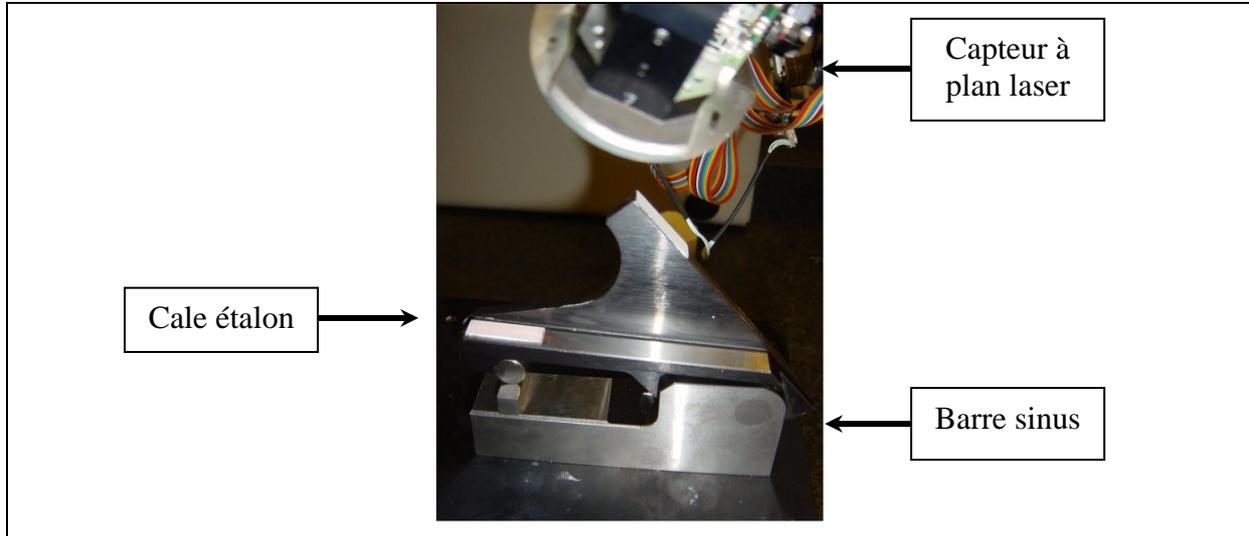


Figure 16 : Dispositif expérimental

Les résultats de l'étude sont présentés Figure 17 et montrent une bonne adéquation avec les tests précédents (Figure 17a). La Figure 17b montre les résultats obtenus pour les indicateurs  $\delta_{\text{droite}}$  et  $\delta_{\text{plan}}$  dans le cas de la barre sinus. Sur la Figure 17c, nous avons modélisé  $\delta_{\text{plan}}$  par une constante de valeur 0.017<sub>6</sub> mm. Ceci est significatif d'un bruit de numérisation normal à la surface quasi indépendant de l'incidence laser. Quant à l'indicateur  $\delta_{\text{droite}}$ , il fait l'objet d'une modélisation par un polynôme de degré 5. Nous pouvons distinguer deux zones, la zone 1 ( $\alpha < 60^\circ$ ) correspond à une évolution quasi linéaire du paramètre en fonction de l'angle d'incidence, la zone 2 ( $\alpha \geq 60^\circ$ ) est modélisable par une loi quasi exponentielle et peut être considérée comme une zone critique à éviter si possible.

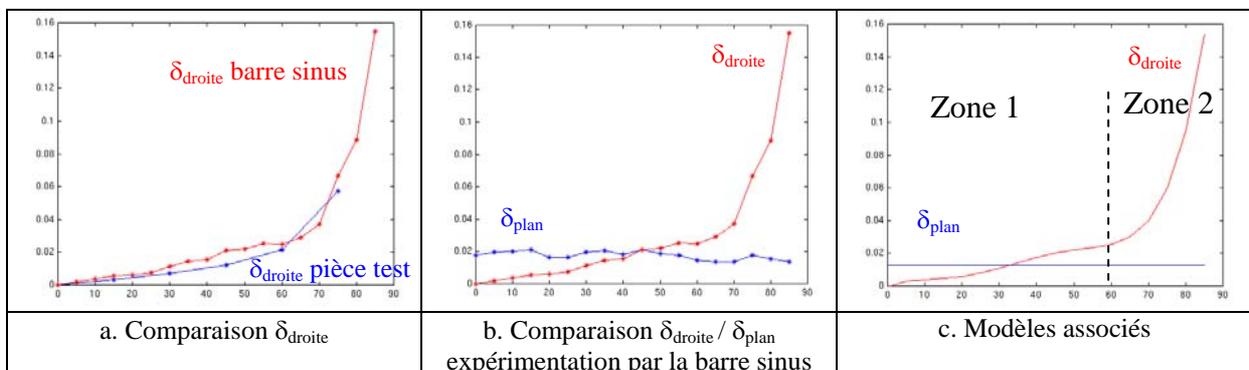


Figure 17 : Indicateurs  $\delta_{\text{droite}}$  et  $\delta_{\text{plan}}$  (barre sinus) et modèle

Les modèles associés sont les suivants :

- modèle  $\delta_{\text{plan}}$  constante : 0.018 mm

- modèle  $\delta_{\text{droite}}$  : polynôme d'ordre 5 (écart maximal par rapport aux mesures expérimentales 4.2  $\mu\text{m}$ )

$$\delta_{\text{droite}}(X) = (5,41\text{e} - 10) \cdot X^5 + (-8,9\text{e} - 08) \cdot X^4 + (5,05\text{e} - 06) \cdot X^3 + (-1,12\text{e} - 04) \cdot X^2 + (1,2\text{e} - 03) \cdot X + (-6,66\text{e} - 04)$$

avec X en degrés.

Remarquons que cette analyse systématique sur barre sinus valide les résultats de mesure effectuée sur la pièce de test.

### 3.2 Application de l'étude de l'incidence laser sur des formes tests

Cette application permet d'établir une cartographie représentant l'influence de l'incidence laser sur la surface numérisée en chacune des acquisitions. L'approche de Prieto qui consiste à positionner le capteur dans un domaine angulaire limité par des seuils de bruit admissibles s'appuie sur une représentation CAO initiale de la pièce. Dans notre cas, le modèle de la pièce est a priori inconnu et nous proposons une qualification complète des points numérisés vis à vis de l'incidence laser.

Nous appliquons ici le modèle  $\delta_{\text{droite}}$  sur la numérisation d'une surface non plane afin de qualifier le nuage de points en terme de bruit de numérisation lié à l'incidence laser. Deux pièces tests sont utilisées afin de représenter des géométries de surfaces complexes de type concave et convexe (Figure 18).

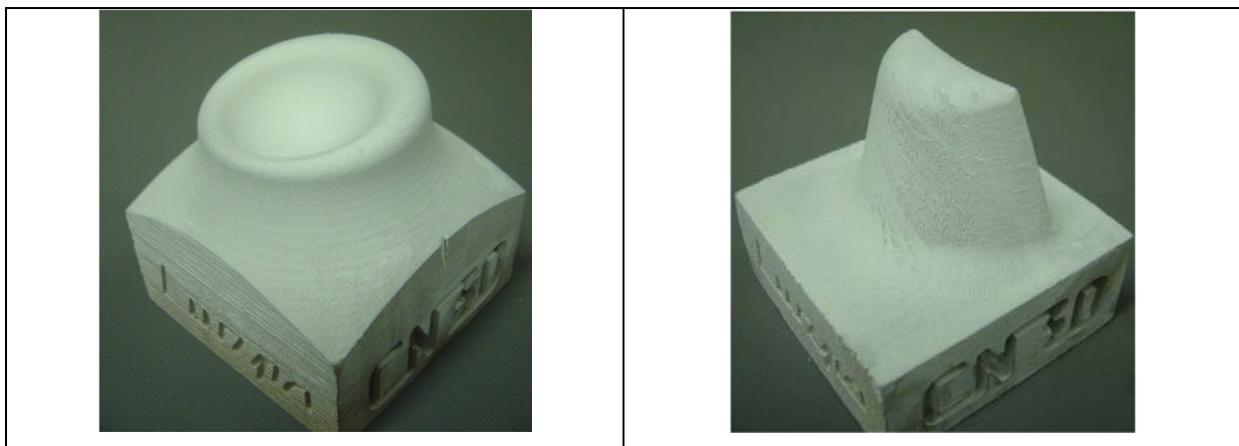


Figure 18 : Formes test concave et convexe

La détermination de l'angle d'incidence du plan laser par rapport à la surface implique la connaissance de la normale à la surface numérisée. Ne connaissant pas a priori la forme numérisée, nous employons une triangulation de Delaunay afin de définir en chacun des points de numérisation un voisinage local. Il est défini par une surface polygonale constituée des facettes de la triangulation (Figure 19a).

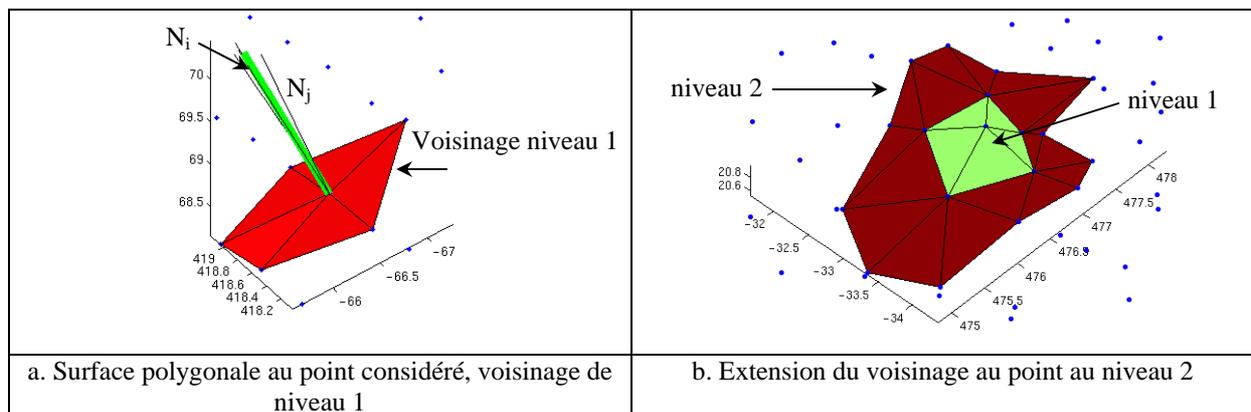


Figure 19 : Evaluation locale de la normale

Le calcul effectif de la normale en un point est déterminé à partir des normales  $N_j$  aux facettes de la triangulation constituant son voisinage. Selon le voisinage considéré (niveau 1 ou 2), un nombre différents de facettes sera pris en compte (Figure 19b). Pour le niveau 1, le nombre de facettes correspond à toutes celles contenant le point considéré. Pour le niveau 2, ce nombre est étendu à toutes les facettes contenant les points du maillage retenus au niveau 1.

La normale  $N_i$  au point  $M_i$  est donnée par :

$$\vec{N}_i = \frac{\sum_j \vec{N}_j}{\left\| \sum_j \vec{N}_j \right\|}$$

L'intérêt de la définition d'un voisinage étendu permet d'effectuer un lissage des données plus important dans le cas du niveau 2. Dans certains cas, le bruit de numérisation donne une interprétation locale erronée de la géométrie. Cet effet est atténué en étendant ce voisinage, nous le visualisons Figure 20.

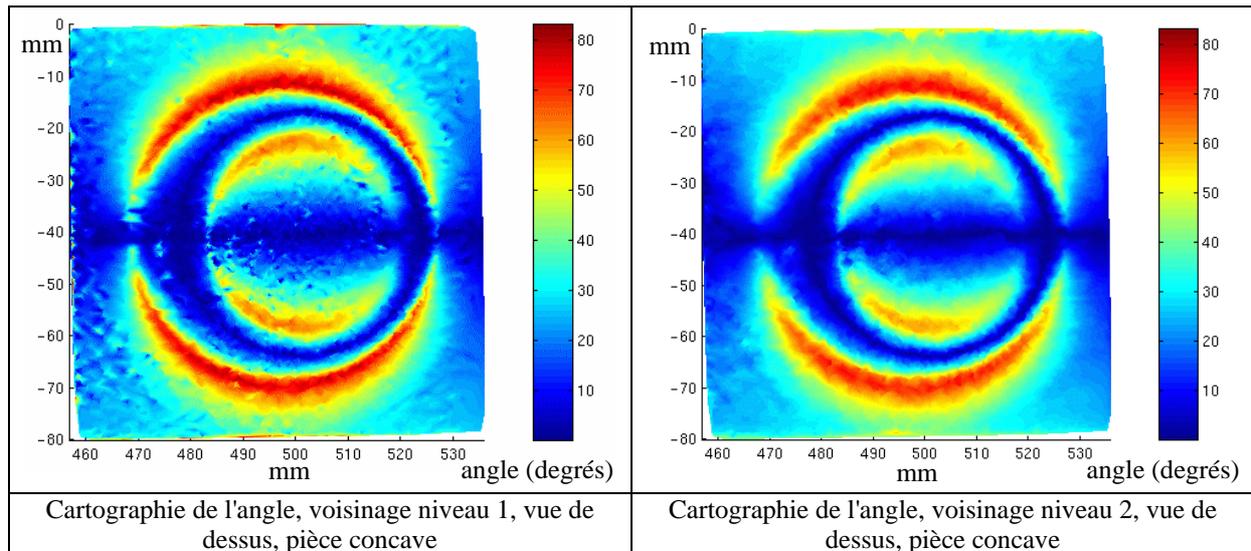


Figure 20 : Effet de lissage

En appliquant, le modèle de bruit préalablement établi au §3.1.3, nous pouvons définir une cartographie de l'influence de l'angle d'incidence sur la numérisation. D'après le modèle employé nous distinguons deux zones, l'une correspondant à un angle d'incidence de 0 à 60° et l'autre de 60 à 90°. Le premier intervalle sera considéré comme un intervalle d'utilisation et le second comme un intervalle critique. La Figure 21 montrent la représentation du modèle de bruit sous la forme de l'indicateur  $\delta$  pour les formes test concave et convexe. Par exemple, si  $\delta = 0.05$  mm, il faut interpréter cet indicateur comme une variation de la localisation du point 3D de  $\pm 0.025$  mm. C'est une première étape dans la qualification des données en fonction d'une stratégie de numérisation fixée. L'utilisateur a le choix dans sa prise de décision : conserver les données, extraire les données sous un seuil de bruit, régénérer une numérisation avec une stratégie différente pour diminuer l'effet du bruit...

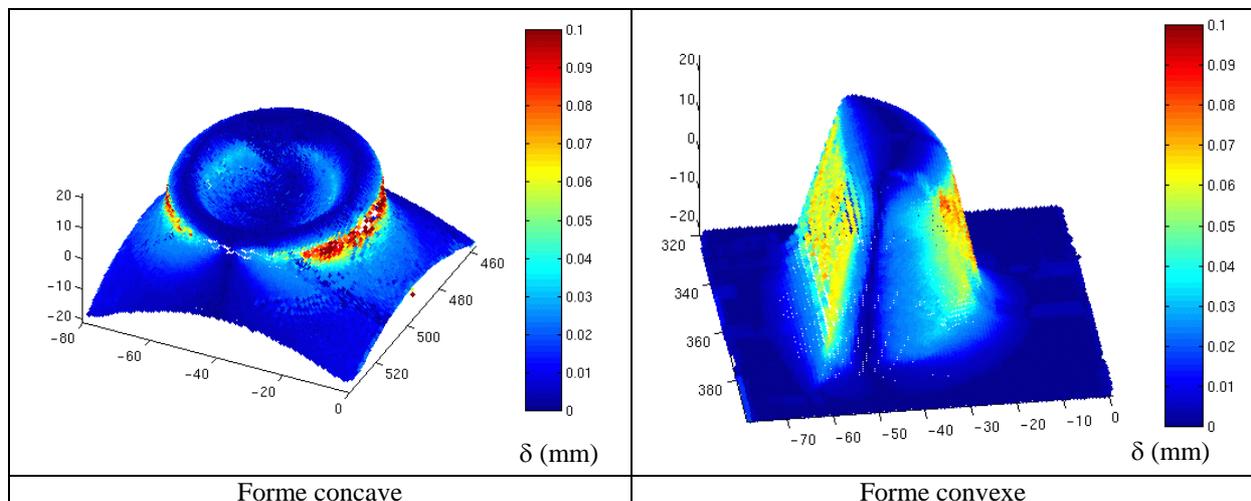


Figure 21 : Application de l'évaluation locale du bruit sur formes complexes

Le bruit de numérisation n'a pas seulement un effet direct comme nous venons de le voir sur l'exemple précédent. La calibration est aussi influencée par le bruit de numérisation, puisque par principe elle consiste en la numérisation d'un artefact constitué de plans. Nous analysons et évaluons l'impact du bruit de numérisation sur la procédure de calibration ainsi que ses répercussions sur le nuage de points final.

### 3.3 Evaluation de l'impact du bruit de numérisation sur la procédure de calibration

La procédure de calibration permet d'établir la relation de passage entre les données obtenues dans l'espace 2D de la caméra CCD  $N(L,C)$  et les coordonnées du point 3D correspondant, exprimé dans le repère de mesure  $M(X,Y,Z)$ . Elle repose sur le choix d'un modèle de calibration et sur la définition d'une méthode d'identification des paramètres du modèle. La procédure que nous utilisons est basée sur le modèle de sténopé, et permet d'identifier de manière globale les paramètres intrinsèques ( focale, centre optique) et extrinsèques (positionnement et orientation de la caméra dans le repère de mesure). En effet, Dantan et al. ont montré que la transformation des coordonnées issues du repère caméra en coordonnées 3D dans le repère de mesure peut se mettre sous la forme [Dantan 96]:

$$\begin{aligned} X &= X_m + f_1(L,C) = X_m + \frac{a_1 \cdot L + a_2 \cdot C + a_3}{a_{10} \cdot L + a_{11} \cdot C + 1} \\ Y &= Y_m + f_2(L,C) = Y_m + \frac{a_4 \cdot L + a_5 \cdot C + a_6}{a_{10} \cdot L + a_{11} \cdot C + 1} \\ Z &= Z_m + f_3(L,C) = Z_m + \frac{a_7 \cdot L + a_8 \cdot C + a_9}{a_{10} \cdot L + a_{11} \cdot C + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

Ainsi, on peut calculer à l'aide de l'équation (1) toute position 3D  $(X, Y, Z)$  en fonction de la position du capteur  $(X_m, Y_m, Z_m)$  et de l'acquisition 2D de la caméra CCD  $(L,C)$ . L'équation (1) fait apparaître 11 paramètres inconnus  $a_p$ , paramètres qui sont identifiés par la mesure de points d'intérêt sur un artefact spécifique : la sphère à facettes. La procédure d'identification des paramètres nécessite l'acquisition de 18 points d'intérêt sur l'artefact. Les différentes étapes relatives à la procédure de calibration sont présentées dans l'annexe VII.

Un point d'intérêt est calculé dans l'espace de la matrice CCD comme l'intersection de deux droites des moindres carrés associées à deux lignes numérisées. Ces lignes numérisées sont constituées d'un ensemble de points et sont l'image de l'intersection du plan laser avec deux faces planes sécantes de l'artefact. Pour chaque ligne numérisée, la zone d'association est limitée afin d'éviter les problèmes de bord dus aux extrémités de la trace laser et aux arêtes vives numérisées sur la pièce. La zone d'identification est définie selon un critère de distance

minimale aux extrémités, ce qui définit alors le sous-ensemble de points numérisés retenu pour l'association du modèle de droite.

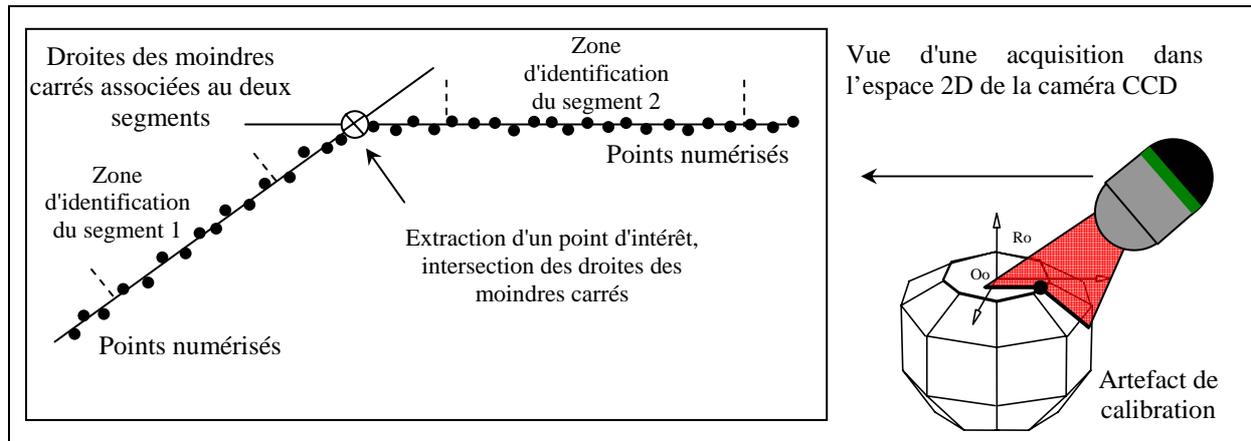


Figure 22 : Extraction d'un point d'intérêt dans l'espace 2D de la caméra CCD

L'extraction des points d'intérêts est fortement dépendante des éléments géométriques associés aux données bruitées. Ainsi les variations de position relative de ces éléments en fonction du bruit de numérisation entraînent une dispersion sur la localisation des points d'intérêts. Cette dispersion génère alors une incertitude sur la détermination des paramètres de l'équation de calibration, soit une incertitude sur la localisation d'un point 3D.

La méthode que nous avons développée permet d'évaluer par simulation numérique, la dispersion, liée au bruit de numérisation, sur la position des points d'intérêt, et d'évaluer l'impact de cette dispersion sur le nuage de points 3D restitué. Cette méthode donne une première approche de l'évaluation de l'indicateur  $\tau$ -exactitude par une composante liée à la procédure de calibration.

### 3.3.1 Procédure de simulation

La méthode d'évaluation est basée sur une simulation de l'impact du bruit de numérisation observé dans l'espace 2D sur la position des points d'intérêts. Elle comprend 5 phases :

#### - Phase d'Initialisation

Une calibration expérimentale est nécessaire, définissant un ensemble initial de 18 acquisitions, et un ensemble primaire de paramètres  $a_p$ . Les acquisitions, sous forme de segments de droite sont notées  $L_{i,j}$   $i \in [1,2]$ ,  $j \in [1,18]$ . L'indice  $i$  correspond à chacun des deux segments par acquisition, l'indice  $j$  correspond au nombre d'acquisitions nécessaires sur

l'artefact de calibration, ici 18 acquisitions, soit un total de 36 segments définis dans [Dantan 96](Figure 23).

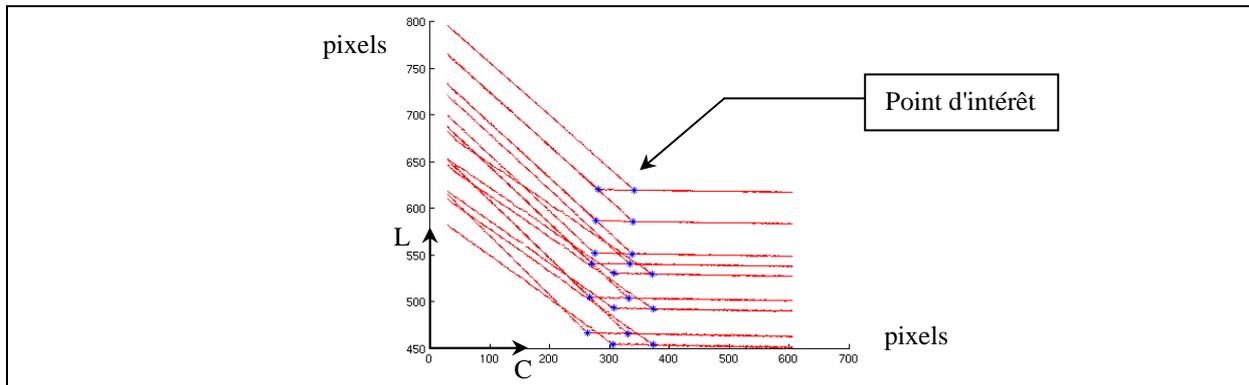


Figure 23 : Image caméra CCD de la calibration, superposition des 18 acquisitions

### - Phase d'Evaluation

La phase d'évaluation permet d'extraire l'indicateur  $\delta$ -bruit pour chacun des segments, ainsi que le nombre de points pris en compte pour l'association du modèle de droite. Nous les notons respectivement  $\delta_{i,j}$  et  $n_{i,j}$ .

La détermination de l'indicateur  $\delta_{i,j}$  s'effectue en suivant la procédure décrite au chapitre 5 §3.2. Nous obtenons ainsi l'ensemble des acquisitions  $L_{i,j}$ , le bruit  $\delta_{i,j}$  associé et le nombre de points  $n_{i,j}$  pris en compte lors du calcul (Figure 24).

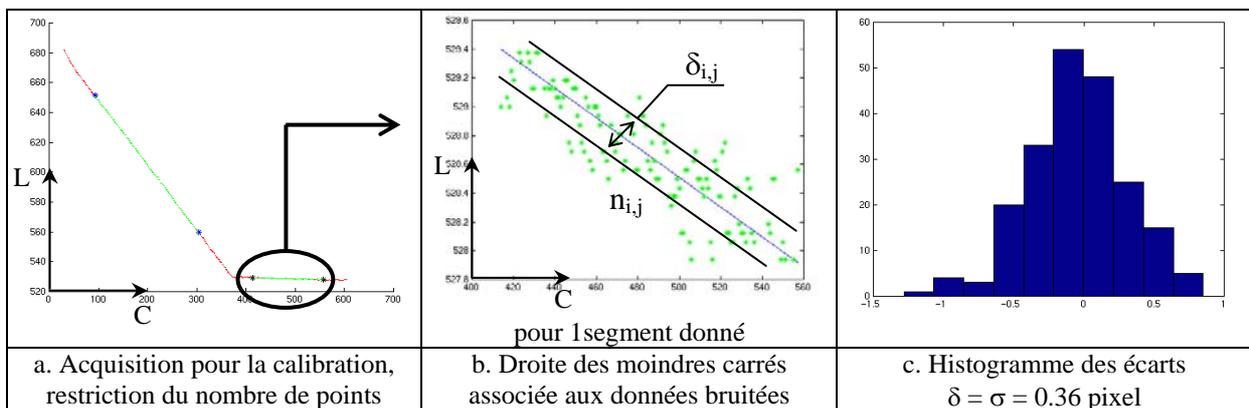


Figure 24 : Evaluation de l'indicateur  $\delta$ -bruit

Cette phase permet d'identifier les caractéristiques nominales de la calibration. La phase de simulation génère à partir de cette position nominale un nombre d'acquisitions, en utilisant les paramètres  $\delta_{i,j}$  et  $n_{i,j}$ .

**- Phase de Simulation**

Cette phase aborde la simulation proprement dite de la procédure de calibration (Figure 25). Pour un segment  $L_{ij}$ ,  $n_{ij}$  points sont répartis aléatoirement le long de la ligne nominale (Figure 25a). Les points sont ensuite distribués, selon une répartition gaussienne, autour de la ligne nominale en fonction du bruit de numérisation,  $\delta_{ij}$  (figure 25b). A cet ensemble de points, simulant une nouvelle acquisition, on associe un modèle de droite des moindres carrés (Figure 25c). Pour la simulation  $k$ ,  $k \in [1, n_{btest}]$ , il est alors possible d'extraire le point d'intérêt  $M_{j,k}$ , pour  $j=1, \dots, 18$ . L'indice  $k$  représente l'expérience de simulation en cours qui peut être répétée plusieurs fois de 1 à  $n_{btest}$  pour obtenir de manière significative l'impact du bruit sur la calibration. Le choix d'un nombre de simulation  $n_{btest}$  fait l'objet de l'annexe V.

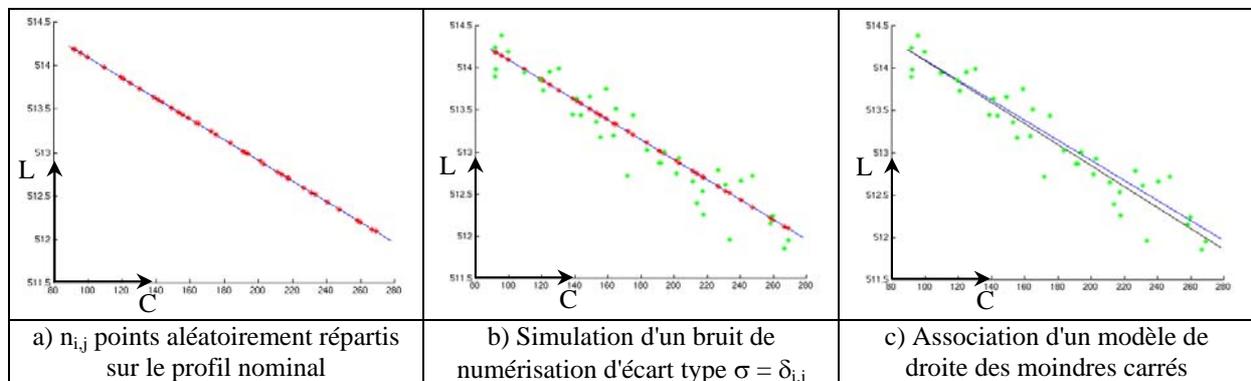


Figure 25 : Simulation

**- Phase d'Identification**

Une fois les points d'intérêts identifiés, les paramètres du modèle de calibration sont calculés par inversion matricielle (voir annexe VII). Nous les notons  $a_{p, n_{btest}}$   $p \in [1, 11]$ .

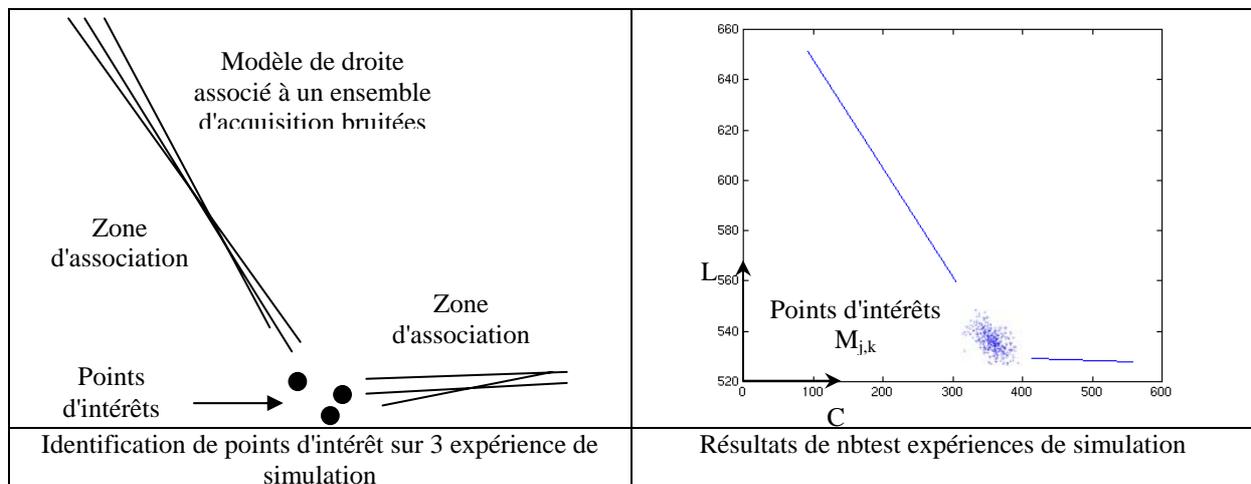


Figure 26 : Identification

**- Phase de Visualisation**

La construction de la carte de dispersion 3D dans le plan laser permet de visualiser l'impact du bruit de numérisation sur l'identification des paramètres du modèle de calibration choisi. La phase de visualisation permet la représentation qualitative et quantitative de l'impact du bruit de numérisation sur la localisation des points 3D numérisés. L'équation (1) liant les paramètres de calibration devient l'équation (2), où  $\Delta f_i$  sont les contributions dues au bruit de numérisation sur l'extraction des points d'intérêts.

Nous générons une grille de points balayant l'espace image dans l'espace 2D de la caméra CCD. A partir de la calibration primaire, nous obtenons les transformés dans l'espace 3D de l'ensemble des données 2D de la caméra CCD. Nous répétons l'opération sur l'ensemble de jeux de paramètres  $a_{p,nbtest}$ , et nous obtenons ainsi pour chacun des points générés dans l'espace 2D, une zone de dispersion 3D correspondant aux  $nbtest$  calibrations simulées (Figure 27).

$$\begin{aligned} X + \Delta X &= X_m + f_1(L, C) + \Delta f_1 \\ Y + \Delta Y &= Y_m + f_2(L, C) + \Delta f_2 \\ Z + \Delta Z &= Z_m + f_3(L, C) + \Delta f_3 \end{aligned} \quad (2)$$

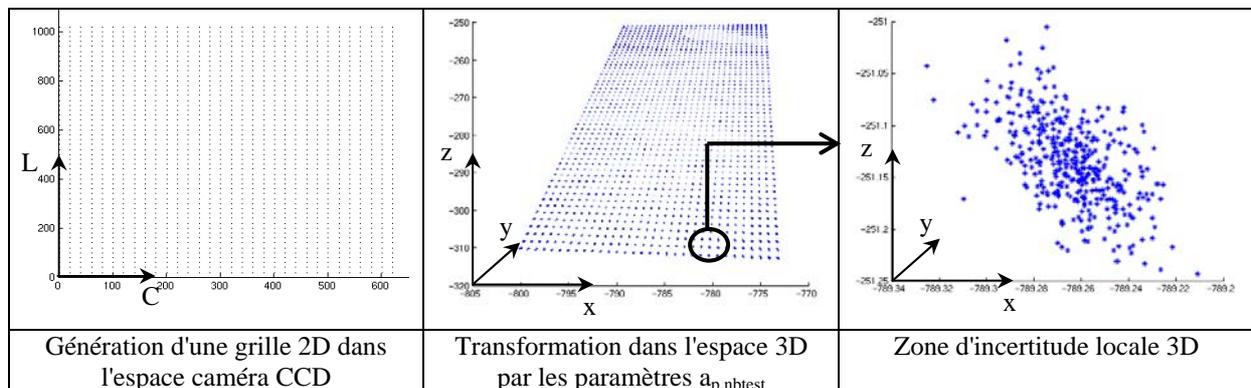


Figure 27 : Visualisation

L'évaluation de l'étendue de cette zone 3D peut se faire de deux façons différentes : calcul du diamètre du disque d'aire équivalente à l'ellipse associée au nuage de points, ou d'aire équivalente au polygone convexe associé au nuage de points (Figure 28a.). Nous choisissons ici, l'aire du polygone convexe pour des raisons de stabilité de l'algorithme.

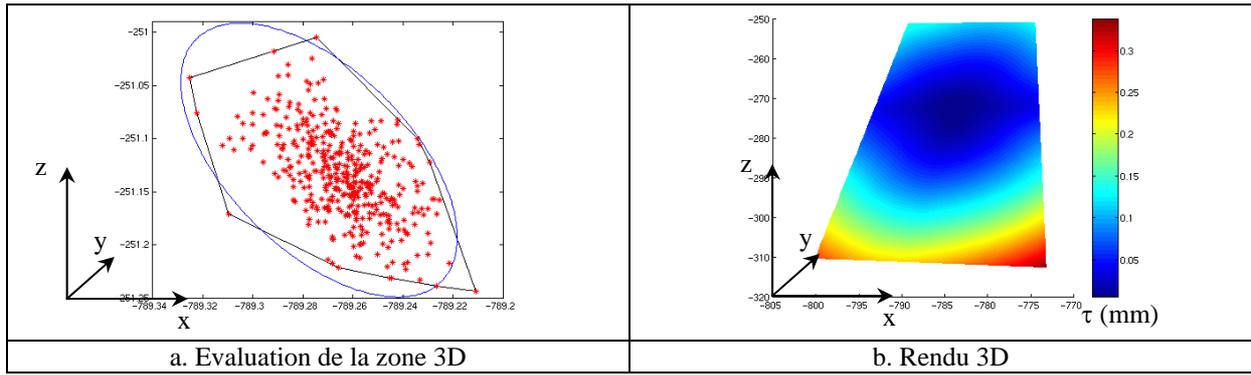


Figure 28 : Evaluation de l'impact 3D

Les résultats 3D montrent ici une incertitude de position en zone centrale au plan laser inférieure à 0.05 mm. Cette incertitude de position peut atteindre 0.3 mm dans les zones inférieures (Figure 28b).

L'incertitude sur la position du point restitué est prépondérante dans le plan laser, ici le plan XZ, d'après l'hypothèse du modèle de calibration (surface laser idéalement plane). Cette hypothèse est vérifiée pour les résultats que nous obtenons. La dispersion obtenue sur la position des points dans la direction Y est du second ordre par rapport aux direction X et Z, de l'ordre de 20 fois inférieure. La méthode d'évaluation de la dispersion sur la localisation d'un point 3D que nous proposons est synthétisée sur l'organigramme suivant :

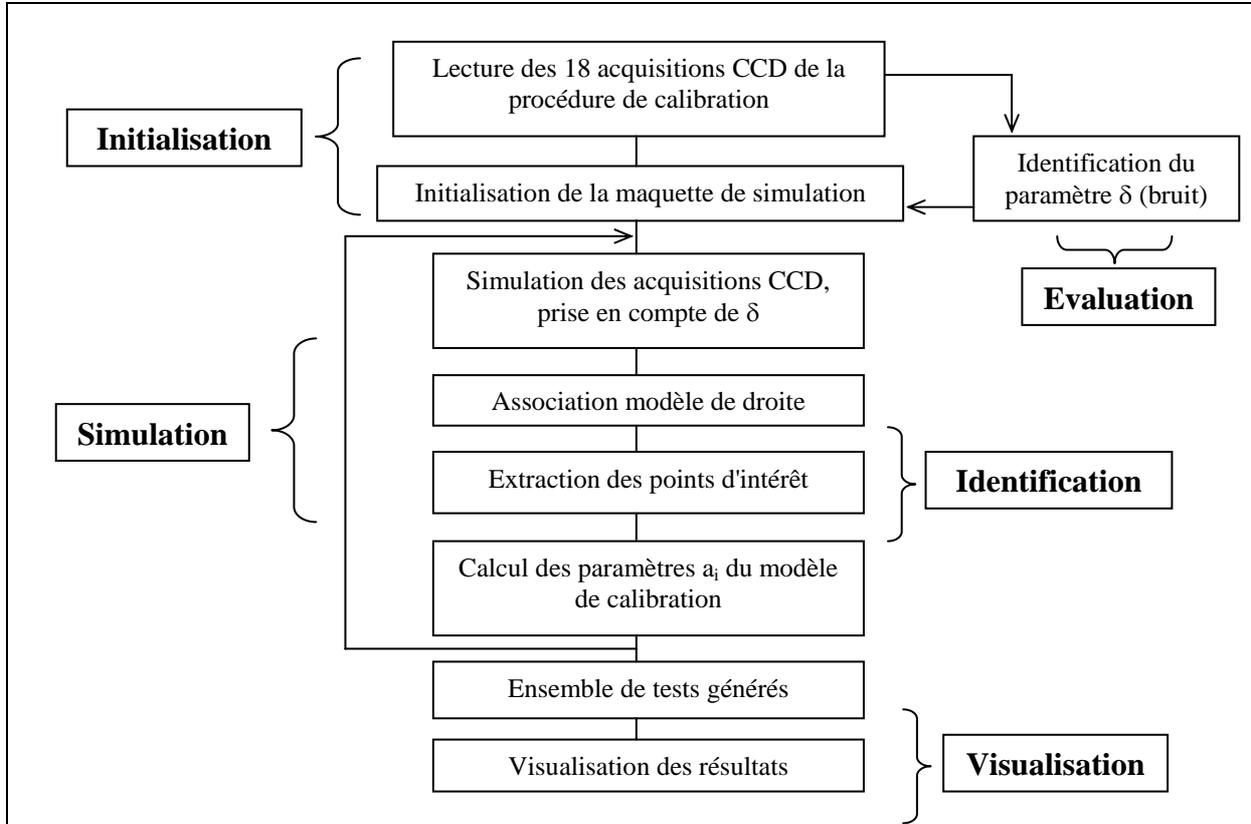


Figure 29 : Organigramme de la méthode d'évaluation de la calibration

### 3.3.2 Validation expérimentale du modèle

La validation expérimentale de la procédure exposée précédemment consiste en la répétition de la méthode de calibration. Vingt numérisations de l'artefact de calibration qui s'apparentent à nbtest ont été réalisées, soit un total de 20 jeux de paramètres de calibration. Les résultats montrent une bonne corrélation entre le modèle de simulation et les mesures expérimentales. Les Figure 30a et Figure 30b représentent respectivement les cartographies de l'indicateur  $\tau$ -exactitude pour les mesures expérimentales et pour la simulation. La Figure 30c montre une représentation de l'erreur absolue qui n'excède pas 30  $\mu\text{m}$ . Soit une erreur globale de moins de 10% qui nous semble raisonnable compte tenu de l'ensemble des paramètres influant lors de la mesure.

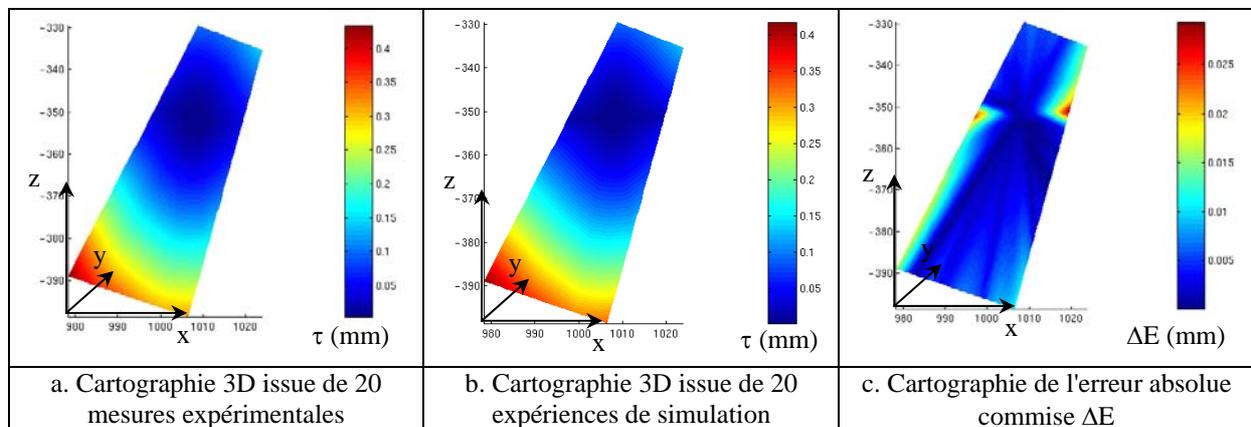


Figure 30 : Validation expérimentale

L'indicateur  $\tau$ -exactitude est ainsi évalué au sens de la méthode de calibration que nous employons. Cette procédure peut cependant être extrapolée pour toute méthode de calibration basée sur l'association d'entités géométriques à des données bruitées.

Voyons à présent une méthode d'évaluation complémentaire de l'indicateur  $\tau$  qui ne prend pas seulement en compte la méthode de calibration mais qui permet d'évaluer l'ensemble de l'espace image de la matrice CCD. Cette méthode n'est pas dépendante du modèle de calibration utilisé et peut être mise en place pour d'autres systèmes de numérisation.

### 3.4 Evaluation de l'incertitude de mesure au niveau de la matrice CCD

La mise en œuvre expérimentale de la procédure d'évaluation de l'exactitude de mesure au niveau de la matrice CCD permet d'évaluer la grandeur  $\tau$  qui caractérise l'indicateur  $\tau$ -exactitude.

L'utilisation du modèle inverse de calibration permet de générer un ensemble de positions du capteur compatible avec l'observation d'un unique point 3D, dont l'image 2D est maîtrisée dans la matrice CCD. Cette image 2D du point 3D est ici encore définie par l'intersection de deux segments de droite, eux mêmes intersections du plan laser avec deux plans sécants. Pour observer un unique point 3D selon différents points de vue dans la CCD, nous avons choisi un mode de parcours circulaire dont le centre est situé au milieu de la matrice. Les cercles parcourus ont des rayons allant de 20 à 140 pixels par incréments de 10 et sont décrits par 180 positions angulairement répartis (Figure 31).

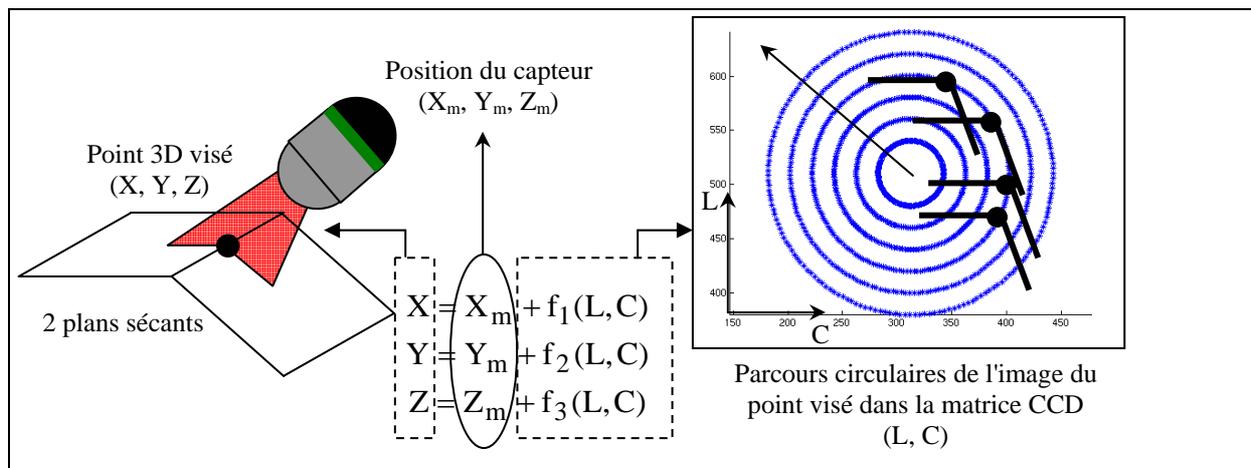


Figure 31 : Méthode d'évaluation par parcours de la matrice CCD

La procédure consiste alors à réaliser l'ensemble des acquisitions visant théoriquement le point unique M par l'équation de calibration. La relation (1) permet ainsi de définir, pour M donné et (L,C) prédéfinis sur un parcours circulaire, la position  $(X_m, Y_m, Z_m)$  du capteur correspondant à l'acquisition.

Les résultats sont reportés sur la figure 32 et montrent une répartition des points numérisés autour de la position visée : il existe une dispersion sur la localisation attendue du point 3D. Afin de quantifier l'étendue de la zone de dispersion, la grandeur  $\tau$  est calculée comme le rayon du disque d'aire équivalente à l'aire du polygone convexe associé à chaque nuage de points considéré (Figure 32). L'étendue de la zone de dispersion est une fonction croissante du rayon associé au parcours circulaire : plus on s'éloigne du centre de la matrice CCD plus la dispersion est importante. Ce qui confirme le caractère anisotrope de la matrice CCD.

Remarquons que cette évaluation s'effectue dans un système de coordonnées lié au plan laser. En effet, l'incertitude de position dans la direction perpendiculaire au plan laser est

environ 100 fois plus petite par rapport aux deux autres directions, ce qui nous amène à la négliger devant les autres dimensions.

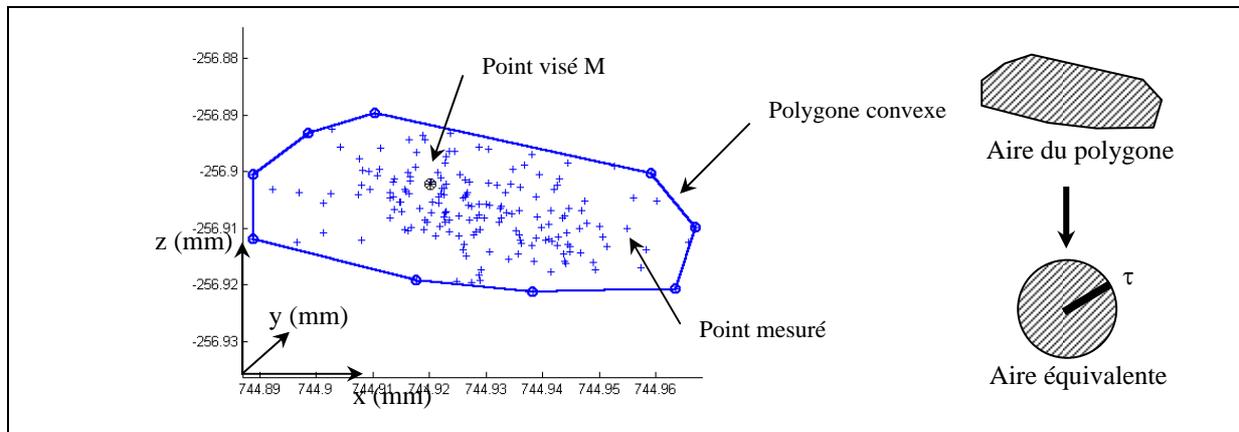


Figure 32 : Evaluation de la zone d'incertitude

La corrélation entre l'évolution de l'indicateur  $\tau$  et la position dans la matrice CCD est représentée Figure 33. Un modèle linéaire est associé à cette évolution en prenant comme hypothèse une évolution de l'erreur dans la matrice CCD purement radiale [Lartigue 02]. Cela correspond à la prise en compte d'une distorsion radiale prépondérante par rapport aux autres phénomènes.

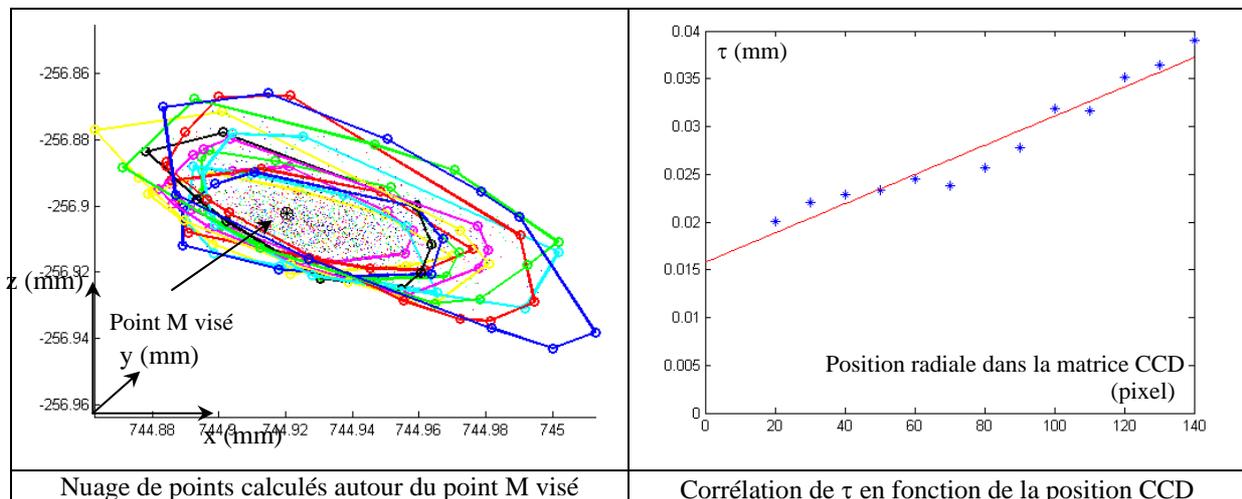


Figure 33 : Mise en œuvre expérimentale

$$\text{Modèle d'évolution : } \tau = 2.10^{-4} \cdot M_{\text{pixel}} + 0.0158 \quad (3)$$

avec  $\tau$  rayon du disque d'incertitude équivalent et  $M_{\text{pixel}}$  la position radiale de l'acquisition dans la matrice CCD. Nous constatons une incertitude de position plus petite dans la zone centrale de la matrice CCD par rapport à des zones qui en sont plus éloignées. Le modèle

d'évolution permet de quantifier le comportement spatial de la matrice CCD. Conformément à la démarche de qualification que nous avons définie (cf chapitre 4, figure1), trois utilisations peuvent se présenter comme la vérification de la conformité des données à un seuil, la correction des données en fonction de leur position d'observation ou le changement de stratégie. A partir d'une évaluation de l'indicateur  $\tau$ -exactitude puis d'un seuillage spécifique à l'application, nous nous intéressons à maximiser les zones à faible  $\tau$ . Dans l'optique de la modification de la stratégie de numérisation, l'utilisation du modèle d'évolution est présentée dans le paragraphe suivant pour une application liée à une numérisation de forme en vue de sa rétroconception.

#### 4 Application, Synthèse

Nous illustrons ici l'emploi des indicateurs de qualité au travers de deux exemples. Le premier exemple traite de l'adaptation de la stratégie de numérisation afin de maximiser le nombre de points admissibles pour l'application, au sens de l'indicateur  $\tau$ -exactitude. Le deuxième exemple traite de la synthèse des indicateurs de qualité à l'aide du modèle d'espace-voxels : c'est la qualification proprement dite des données issues d'un système de numérisation.

##### 4.1 Application : en vue de la rétroconception de forme

Nous présentons une application s'appuyant sur l'optimisation de trajets de numérisation au travers de la mesure d'une forme complexe en vue d'une application de rétroconception [Contri 01]. Compte tenu des modèles et approximations effectuées lors de cette opération, nous pouvons considérer par exemple qu'une incertitude de 50  $\mu\text{m}$  sur les données numérisées est admissible.

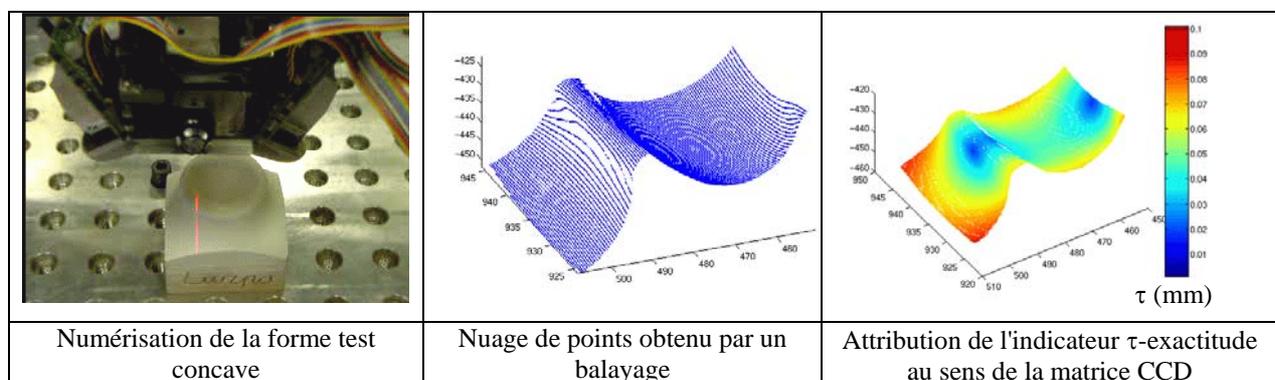


Figure 34 : Application à la numérisation d'une forme complexe

Le modèle CAO de la pièce étant à l'origine inconnu, un premier balayage de la surface permet d'attribuer l'indicateur  $\tau$  à chacun des points numérisés en fonction de leur position dans la matrice CCD (Figure 34) . Pour ce faire, on utilise le modèle donné par l'équation (3), établi précédemment. Compte tenu de la forme numérisée certaines zones présentent une incertitude  $\tau > \tau_{\text{admissible}}$ . L'évaluation de l'indicateur  $\tau$  peut alors être employé à l'optimisation de trajet par optimisation du nombre d'acquisitions en zone centrale de la matrice CCD (zones pour lesquelles  $\tau$  est minimum). Ceci est réalisé en déplaçant chacun des barycentres des lignes de numérisation en zone centrale de la matrice (Figure 35). Les trajets de numérisation sont alors déterminés par de nouvelles positions de capteur, identifiées par le modèle inverse de calibration, d'après équation (1).

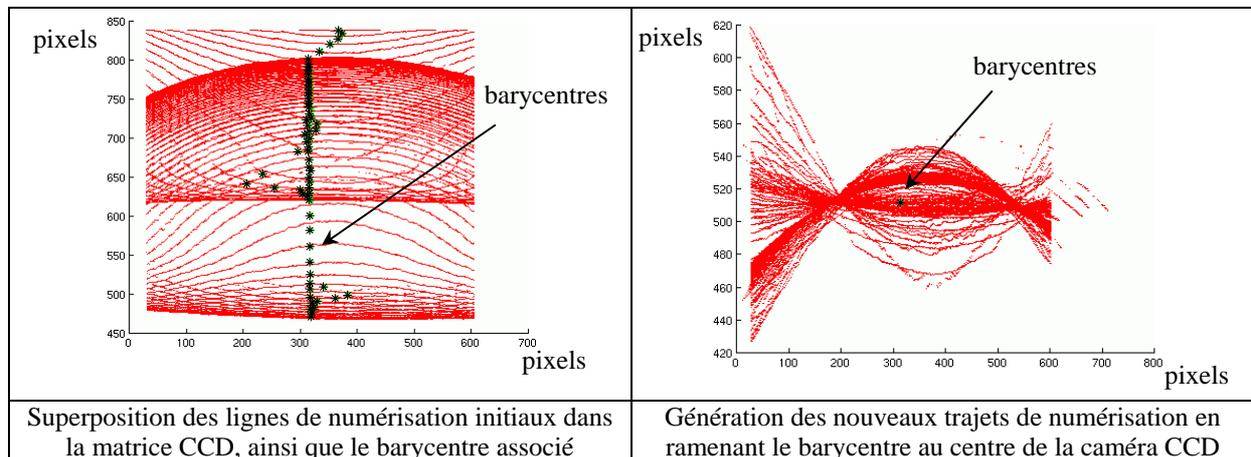


Figure 35 : Génération des trajets

Les nouveaux trajets de numérisation permettent ainsi d'optimiser les données au sens de l'indicateur  $\tau$ -exactitude dans la matrice CCD. La Figure 36a montre, pour un seuil de 50  $\mu\text{m}$ , deux zones permettant d'isoler les points admissibles des points qui ne le sont pas. Après renumérisation, la zone correspondante aux points admissibles est maximisée (Figure 36c) : les points admissibles représentent 43% des points lors de la première numérisation, pour 72% des points après renumérisation.

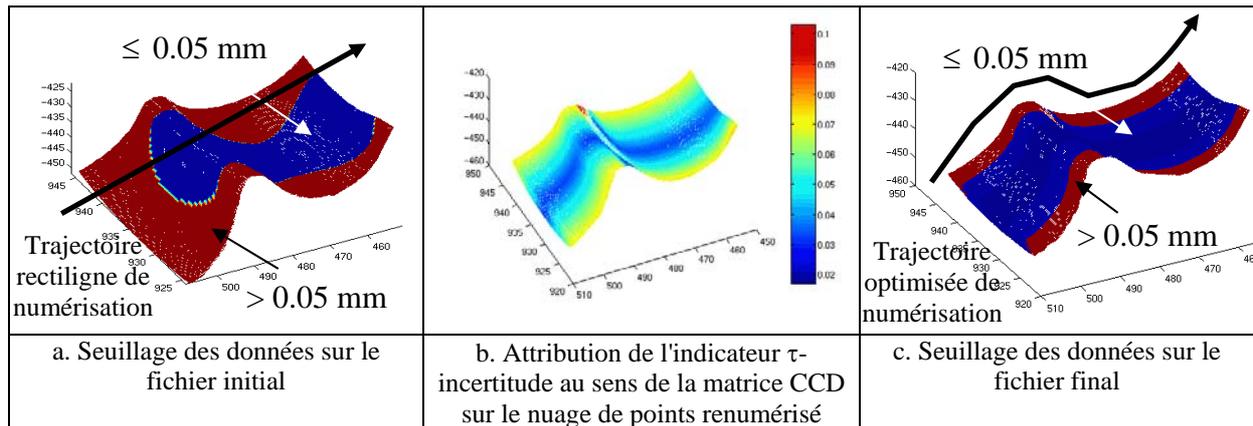


Figure 36 : Seuillage des données et résultat obtenu après renumérisation

#### 4.2 Synthèse des indicateurs de qualité par une représentation espace-voxels

Comme nous l'avons largement exposé, les indicateurs de qualité ont été définis pour la qualification des données numérisées en vue d'une application. Selon le type d'application, un ou plusieurs indicateurs sont utilisables et ont un impact différent. Afin, d'avoir un modèle de représentation unique, nous avons choisi d'utiliser le modèle d'espace-voxels dont les attributs sont les indicateurs de qualité. Ainsi, suivant l'application, il suffit de pondérer chacun des attributs pour qualifier localement l'espace du voxel considéré (chapitre 4, tableau 1).

Sur un exemple de la numérisation d'une forme complexe, ici une souris d'ordinateur, nous mettons en place les quatre indicateurs relatifs à la densité, à la complétude, au bruit, et à l'exactitude de mesure, sur un nuage de points défini par une vue de numérisation (Figure 37 et Figure 38).

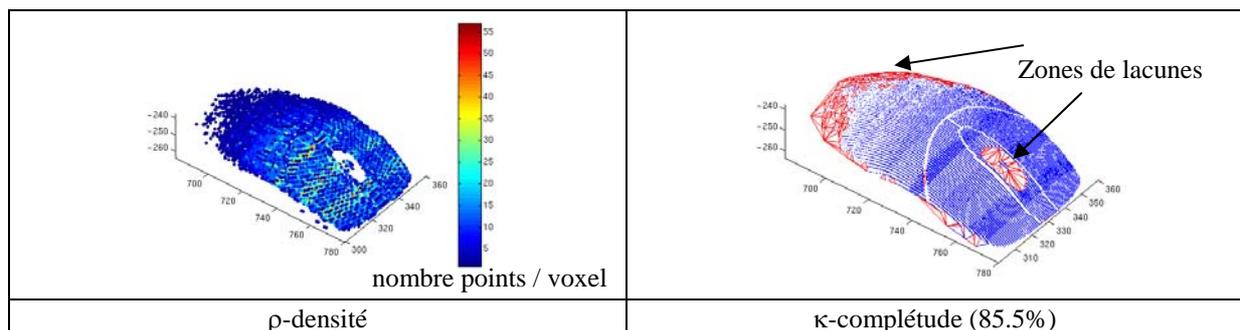


Figure 37 : Evaluation des indicateurs de qualité densité et complétude

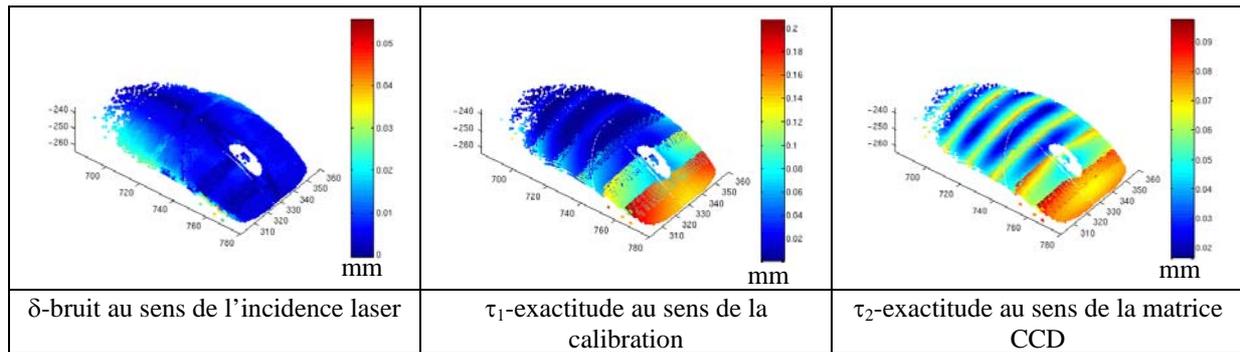


Figure 38 : Evaluation des indicateurs de qualité bruit et exactitude de mesure

La représentation par espace-voxels permet la synthèse des indicateurs après la numérisation de plusieurs vues, en structurant le nuage de points inhomogène résultant.

L'information portant sur la géométrie de la forme numérisée est contenue dans l'espace-voxel, c'est à dire l'information associée à l'ensemble des points numérisés contenus dans le voxel considéré. Les attributs de qualité définis par les indicateurs sont attachés à chacun des voxels en attribuant la valeur moyenne de l'espace-voxel. Une cartographie des erreurs peut être générée et exploitée à tout moment par le choix des attributs prépondérants en fonction de l'application.

Nous présentons les 4 vues nécessaires à la numérisation de la souris ainsi que sa représentation par espace-voxels (Figure 39). Nous avons choisi ici une taille de voxel d'arête 2 mm pour la visualisation de l'exemple.

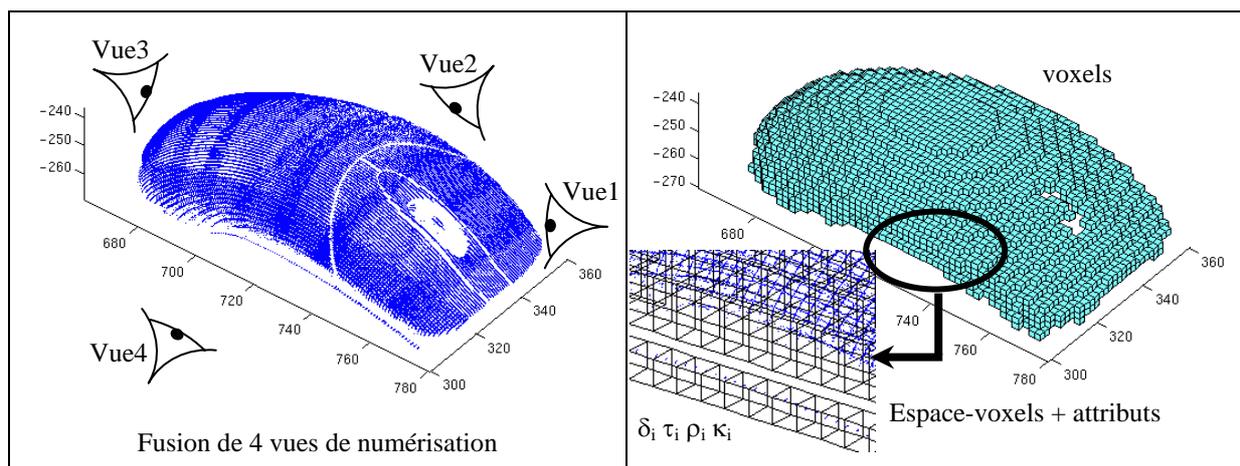


Figure 39 : Exemple de fusion de 4 vues de numérisation

En faisant l'hypothèse la plus défavorable où les effets sont cumulés, nous pouvons représenter la synthèse des indicateurs de bruit et d'exactitude de mesure sous forme d'espace-

voxels. Les indicateurs  $\delta$  et  $\tau$  tiennent compte à la fois de l'aspect stratégique de numérisation en fonction de l'incidence laser (Figure 40a), l'aspect logiciel par l'influence de la calibration (Figure 40b), et l'aspect matériel par l'influence de la matrice CCD (Figure 40c).

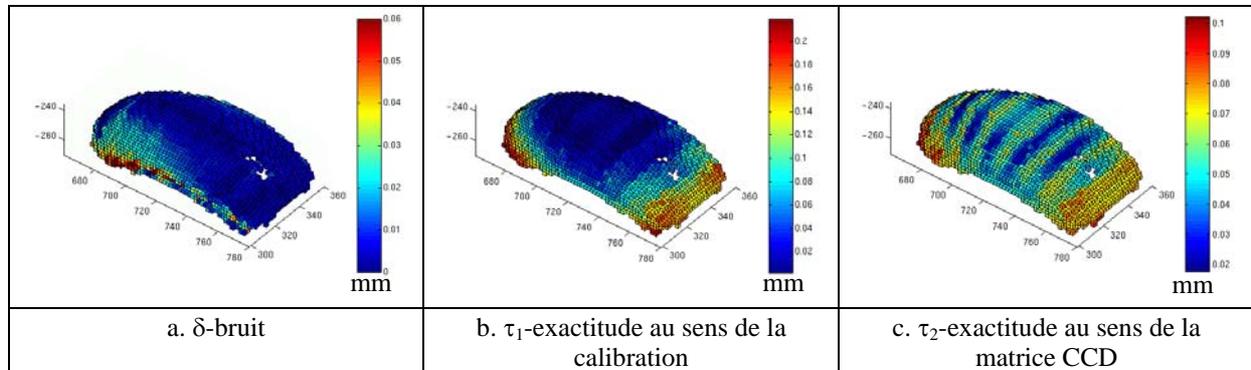


Figure 40 : Synthèse des indicateurs  $\delta$ -bruit et  $\tau$ -exactitude

La Figure 41 présente les indicateurs  $\delta$  et  $\tau$  cumulés sur l'ensemble du nuage de points,  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ ,  $\tau_1$  et  $\tau_2$  étant définis précédemment. Nous avons choisi ici une pondération de 1 pour les indicateurs en considérant une influence équivalente de chacun des indicateurs de qualité.

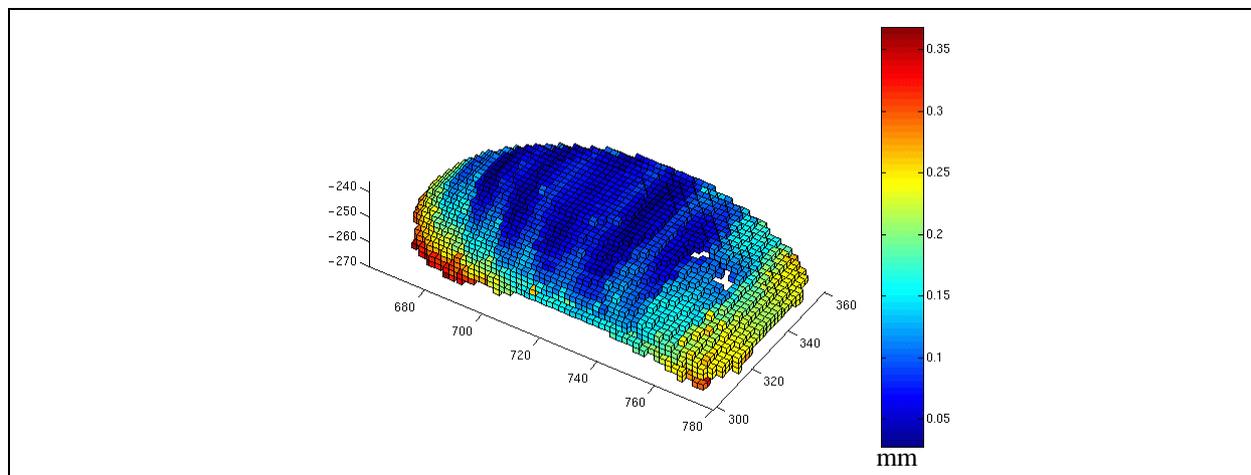


Figure 41 : Synthèse globale, représentation  $\delta + \tau_1 + \tau_2$

La synthèse des indicateurs sur l'ensemble des vues nécessaires à la numérisation de la souris permet d'établir une cartographie sur l'exactitude de position des points acquis. Nous notons que cette cartographie est présentée dans le cas le plus défavorable, ainsi l'exactitude sur la position d'un point numérisé ne dépassera pas 0.35 mm. Nous remarquons aussi que la grande majorité des points numérisés ont une exactitude comprise entre 0.05 et 0.15 mm. La démarche de qualification peut alors se poursuivre par une prise de décision de l'utilisateur :

une renumérisation après seuillage comme dans l'exemple précédent, une correction des données ou une simple validation avant l'application.

La méthode de synthèse peut avoir une limite dans le choix de la taille d'un voxel. En effet, ce modèle de représentation est un pavage de l'espace en cube de taille fixe. Aussi, le choix d'une taille de voxel a priori peut influencer le traitement d'un nuage de points inhomogène, ce qui est notre cas. Afin d'affiner la représentation des données, une structure de voxels de taille adaptative de type octree peut être mise en place à partir de l'évaluation de l'indicateur  $\rho$ -dense. Ainsi, un raffinement de la taille des voxels sera pris en compte dans les zones de forte densité alors que les zones de faible densité seront représentées par des voxels de taille plus importante. De même, le choix de la pondération des différents indicateurs pour l'application proprement dite reste à définir par l'utilisateur en fonction de son expertise métier.

L'évaluation d'indicateurs de qualité donnent des possibilités de qualification locale du nuage de points. Nous pouvons envisager des traitements locaux particuliers en fonction des différents seuils d'indicateurs imposés par l'application. Une application de copiage de forme peut sélectionner ou filtrer les points numérisés à l'aide de l'indicateur  $\tau$ -exactitude lors de l'activité de calcul de la position outil pour la génération de trajectoire. Ces points dont l'exactitude de mesure est la plus petite possible sont identifiés afin de générer une trajectoire d'usinage la plus conforme à l'objet initial en s'appuyant sur ces derniers. Des choix de paramètres d'usinage tels que les pas longitudinal et transversal peuvent être liés à l'indicateur  $\rho$  densité. Enfin des zones de reprises liées au paramètre de complétude  $\kappa$  peuvent être définies par partitionnement du nuage de points.

### **5 Conclusion**

Nous avons proposé dans ce chapitre des méthodes d'évaluation des indicateurs de qualité en relation avec nos moyens expérimentaux. Nos travaux se sont principalement orientés vers l'utilisation d'une technologie de capteur à plan laser. Cependant, notre démarche s'applique à tout autre moyen de numérisation sans contact à base de caméra CCD. Les indicateurs intrinsèques peuvent être évalués indépendamment du moyen de mesure, par contre les indicateurs spécifiques de bruit et d'exactitude de mesure nécessitent une connaissance du modèle de calibration et notamment du modèle inverse.

Les indicateurs locaux sont complémentaires d'une approche globale de qualification, utilisée largement de façon classique. En effet, comme nous l'avons vu, l'approche globale ne

prend pas suffisamment en compte les spécificités des moyens de mesure sans contact. Cependant, nous avons montré ici l'utilisation possible d'un artefact pour de la mesure optique, ainsi que les limites algorithmiques d'une qualification globale.

La qualification des données numérisées est une première étape dans le processus. L'utilisateur doit prendre une décision quant à la stratégie à adopter. Les indicateurs de qualité permettent d'orienter son choix dans une démarche plus proche de son application. Il peut ainsi décider d'une renumérisation partielle ou totale de la forme, un filtrage des données sous un seuil, du choix d'un autre moyen de numérisation correspondant mieux à ses besoins ...

Le modèle de représentation par espace-voxels qui permet la synthèse des indicateurs, nous paraît le plus adapté au traitement de grands nuages de points et plus particulièrement à sa qualification. C'est un modèle ouvert par sa capacité de représentation des données de natures différentes et évolutif par sa capacité à prendre en compte différentes caractéristiques par l'ajout d'attributs. Ce modèle peut être intégré à différentes applications, comme le partitionnement de grands nuages de points par exemple [Osty 02].

## Conclusion

Les systèmes de numérisation 3D sont largement employés aujourd'hui et occupent une place non négligeable dans l'industrie. Les progrès des algorithmes de traitement nécessaires à la reconstruction de formes 3D sont performants au regard des puissances de calcul disponibles. L'intégration des différents composants d'une chaîne de numérisation permet d'obtenir des solutions de numérisation ergonomiques et faciles d'utilisation.

La rapidité et la densité importante des données restituées font de ces systèmes de numérisation 3D des outils compétitifs pour la capture de la géométrie des formes complexes. Les applications sont nombreuses : visualisation, rétroconception, copiage de forme, inspection dimensionnelle, archivage des données ... Par sa densité d'information, le nuage de points restitué par les moyens de numérisation devient le modèle de représentation de plus bas niveau de référence sur lequel toute application peut s'appuyer directement. Cette représentation se substitue à l'objet physique initial pour l'application. Il se pose alors le problème de la conformité du nuage de points à l'objet. En d'autre terme, il est nécessaire d'évaluer la qualité géométrique de cette représentation pour son exploitation.

La qualification des données discrètes obtenue par moyen de palpation mécanique comme les MMT par exemple, est un problème assez largement traité et normalisé. L'absence de normes et de protocoles expérimentaux dans le domaine de la mesure 3D sans contact pose des difficultés de compréhension et d'interprétation des mesures.

Nos travaux de recherche permettent de mettre en évidence les particularités et les spécificités de la mesure sans contact. Nous apportons une alternative à une qualification globale classique par l'emploi d'un artefact spécifique pour les moyens de numérisation à base de caméras. Cette qualification globale n'étant pas toutefois suffisante nous la complétons par l'approche locale de qualification à l'aide des indicateurs de qualité.

Nous soulignons l'importance de l'application par rapport au nuage de points : il est nécessaire de replacer le nuage dans son contexte. Dans cette optique, les indicateurs de qualité sont des outils de qualification qu'il convient de développer. Nous avons traité ici quatre indicateurs représentatifs d'un grand nombre d'applications. D'autres types d'indicateurs plus spécifiques peuvent être définis comme ceux relatif à la visibilité, à la capacité à éviter l'interférence outil matière (une extension de la densité).

L'intérêt principal de la définition d'indicateurs est de prendre en compte les particularités locales du nuage de points ainsi que la spécificité du moyen de mesure employé pour l'intégrer dans l'application.

Nous avons mis en évidence ici la première étape concernant la qualification des données en prenant en compte la spécificité du moyen de mesure et du nuage de points. En perspective de ces travaux, nous envisageons la mise en œuvre et la validation expérimentale de son impact sur l'application, en d'autre terme une évaluation de l'approche de l'intégration de la qualification des données au sein de l'application vis à vis des approches classiques. Cette approche d'intégration de critères de qualité au niveau de la mesure est absente aujourd'hui des logiciels d'acquisition, qui se contentent actuellement de la restitution d'un nuage de points consolidé, c'est à dire exprimé dans un unique repère. L'évolution vers de nouvelles normes intégrant de nouveaux moyens de mesure peut contribuer au développement de logiciels d'acquisition orienté vers la qualité des données. L'intégration de critères de qualité peut aussi être abordée d'un point de vue utilisateur, comme nous l'avons fait, par l'emploi de procédures d'évaluation spécifiques.

Certains points de notre approche restent en perspective de travaux futurs. Les indicateurs de bruit et d'exactitude de mesure sont fortement liés et dépendent essentiellement de la qualité de l'optique de la caméra employée. Une étude complémentaire de type radiométrique, c'est à dire concernant les caractéristiques physiques des constituants de la caméra, peut permettre d'isoler les critères. Une cartographie des erreurs spécifique à chaque indicateurs est envisageable de manière indépendante.

Enfin nos travaux mettent en perspective l'approche de la correction du volume de mesure de façon analogue aux MMT. Ce ne sont plus les données qui sont qualifiées directement mais l'instrument de mesure. Cette démarche donnerait aux systèmes de mesure sans contact des niveaux de précision comparables aux moyens conventionnels de mesure, en y associant une ergonomie, une définition plus dense de la géométrie de l'objet réel et une rapidité d'acquisition inégalable.

## Références

- [Aguilar 96] J.J. Aguilar, F. Torres, M.A. Lope, Stereo vision for 3D measurement : accuracy analysis, calibration and industrial applications, *Measurement* 18(4), pp 193-200,1996.
- [Bahi 97] A. Bahi, Segmentation de surfaces représentées par des nuages de points non organisés. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 16 Juillet 1997.
- [Banta 93] J. E. Banta, Y. Zhien, X. Z. Wang, G. Zhang, M. T. Smith, M. A. Abidi, A "best-next-view" algorithm for three-dimensional scene reconstruction using range cameras, in *Geometric Methods in Computer Vision II*, Proc. SPIE 2031, pages 392-403, 1993.
- [Baribeau 91] R. Baribeau, M. Rioux, Influence of speckle on laser range finders, *Applied Optics*, Vol. 30, N°20, july 1991.
- [Ben Jemaa 98] R. Ben Jemaa, Traitement de données 3D acquises par des capteurs actifs sur des objets réels complexes, Thèse de doctorat, ENST / TSI, 13 octobre 1998.
- [Besl 88] P. J. Besl, Active Optical Range Imaging Sensors, *Machine Vision and Applications*, Vol. 1, pp 127-152, 1988.
- [Besl 92] P. Besl, N. McKay, A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 14, N°2, pp 239-256, 1992.
- [Bézier 77] P. Bézier, Essai de définition numérique de courbes et des surfaces expérimentales, Thèse d'état, Université Paris VI, 1977.
- [Bluteau 99] H. Bluteau, Contribution à l'amélioration de la qualité des mesures sur machines à mesurer tridimensionnelles, surveillance, diagnostic et correction des défaillances, Thèse de doctorat, LURPA / ENS - Cachan, 14 janvier 1999.
- [Boissonnat 95] J-D. Boissonnat, M. Yvinec, *Géométrie Algorithmique*, édition Ediscience International, collection Informatique, 1995.
- [Bourdet 87] P. Bourdet, Contribution à la mesure tridimensionnelle, modèle d'identification des surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, correction géométrique, Thèse de doctorat, 1987.

- [Bourdet 93] P. Bourdet, C. Lartigue, F. Leveaux, Effects of data point distribution and mathematical model on finding the best-fit sphere to data, Precision Engineering, Vol. 15 n° 3, july 1993.
- [Bourdet 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, Paris, 27-28 mai 1998.
- [Boyer 02] V. Boyer, Evaluation de trajets outils sous forme polynomiale, calculés à partir de données discrètes, mémoire de DEA de Production Automatisée, LURPA, 27 pages, 28 juin 2002.
- [Brand 94] P. Brand, R. Mohr, Accuracy in Image Measure, Spie Videometrics III, Boston, U.S.A., pp 218-228, 31 october - 4 november 1994.
- [Brown 81] C.M. Brown, Some mathematical and representational aspects of solid modeling, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 3, n° 4, pp 444-453, july 1981.
- [Cahn 97] U. M. Cahn von Seelen, Performance evaluation of an active vision system, dissertation in Computer and Information Science, University of Pennsylvania, 1997.
- [Champleboux 92] G. Champleboux, S. Lavallée, P. Sautot, P. Cinquin, Accurate Calibration of Cameras and Range Imaging Sensors: The NPBS Method, Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 1992.
- [Chollet 91] P. Chollet, Contribution à la modélisation de la précision géométrique des machines à coordonnées, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 23 septembre 1991.
- [Cnomo 94] Norme CNOMO, Machines à Mesurer Tridimensionnelles type à bras horizontal, col de cygne, pont ou portique, réception et vérification périodiques, E40.69.130.N, 16 pages, juin 1994.
- [Cohen 99] C. Cohen-Tannoudji, La physique des atomes froids présentée en termes simples par l'équipe "atomes ultrafroids" du Laboratoire Kastler Brossel, [http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/tutorial/pages/5\\_le\\_laser.htm](http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/tutorial/pages/5_le_laser.htm), 1999.

- [Contri 00] A. Contri, C. Lartigue, G. Osty, Copying of free-forms from digitized data : the voxel-space representation, Conférence IDMME'2000, Montréal, Canada, 2000.
- [Contri 01] A. Contri, C. Lartigue, Une méthode d'évaluation des incertitudes de mesure des surfaces complexes par moyens optiques, 7ème Colloque PRIMECA'01, La Plagne, 9 pages, 2-4 avril 2001.
- [Contri 02] A. Contri, P. Bourdet, C. Lartigue, Quality of 3D Digitised Points Obtained with Non-Contact Optical Sensor, Annals of the CIRP, Vol. 51, N°1, 2002.
- [Curless 95] B. Curless, M. Levoy, Better optical triangulation through spacetime analysis, Proc. Int. Conf. Computer Vision, pp 987-994, 1995.
- [Dantan 96] J.Y. Dantan, R. Rey, P. Bourdet, D. Feautrier, Calibrating the geometric position of a plane laser-beam vision sensor in a measuring system for tridimensional shapes, Proc. of "International Mecatronics Congress", Besançon, France, 1-3 Octobre 1996.
- [Dico web1] Dictionnaire en ligne, Albédo, disponible sur : <http://www.sciences-en-ligne.com/Dictionnaire/DictionnaireDIST/a/albe01.htm>, novembre, 2001.
- [Dico web2] Dictionnaire en ligne, Laser, disponible sur : <http://www.sciences-en-ligne.com/Dictionnaire/DictionnaireDIST/l/lase01.htm>, novembre, 2001.
- [Dürer 1525] A. Dürer, Man Drawing a Lute, gravure en bois, 1525, disponible sur : <http://www.esat.kuleuven.ac.be/~pollefey/tutorial/node37.html>.
- [Ebenstein 96] S. E. Ebenstein, V. S. Kiridena, G. H. Smith, Inspection of functional free form geometry, journal of materials processing technology, 58, pp 396-400, 1996.
- [El-Hakim 95] S.F. El-Hakim, J.-A. Beraldin. Configuration Design for Sensor Integration. SPIE Proceedings Volume 2598, Videometrics IV. Philidelphia, pp 274-285, October 22-26, 1995.
- [Feng 01] H.-Y. Feng, Y. Liu, F. Xi, Analysis of digitizing errors of a laser scanning system, Precision Engineering, 25, 185-191, 2001.
- [Garric 96] V. Garric, Vision pour la robotique de manipulation : calibration, localisation et saisie d'objets, Thèse de doctorat, LAAS-CNRS, INSA de Toulouse, 7 mai 1996.

- [Godin 01] G. Godin, J.-A. Beraldin, M. Rioux, M. Levoy, L. Cournoyer, F. Blais, Proc. Fifth Conference on optical 3-D measurement techniques, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 2001.
- [Goulette 97] F. Goulette, Quelques outils de géométrie différentielle pour la construction automatique de modèles CAO à partir d'images télémétriques, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 14 mars 1997.
- [Hoppe 92] Hoppe, H. De Rose, T. Duchamp, T. Mc Donald, W. Stuetzle, Surface reconstruction from unorganized points, Computer Graphics, Vol. 26, n° 2, pp 71-78, July 1992.
- [ISO-8402 94] International Organization for standardization, Management de la qualité et assurance de la qualité, Vocabulaire, norme ISO 8402, 50p., 1994.
- [Jensen 01] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, P. Hanrahan, A practical model for subsurface light transport, Proceedings of SIGGRAPH'2001, 8 pages, 2001.
- [Kosmopoulos 01] D. Kosmopoulos, T. Varvarigou, Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular reflection, Computers in Industry, 46: 49-63, 2001.
- [Lartigue 02] C. Lartigue, A. Contri, P. Bourdet, Digitised point quality in relation with point exploitation, Measurement, In Press, Uncorrected Proof, Available online 3 June 2002.
- [Larue 00] A. Larue, Validation d'une méthode de partitionnement de nuages de points denses, mémoire de DEA de Production Automatisée, LURPA, 54 pages, 29 juin 2000.
- [Lee 00] K. H. Lee, H-P. Park, Automated inspection planning of free-form shape parts by laser scanning, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 16, pp 201-210, 2000.
- [Leuleu 02] S. Leuleu, J-M David, G. Diolez, P. Martin, Evaluation de la géométrie des machines : présentation d'une méthode innovante, Actes de conférences, IDMME 2002, Clermont-Ferrand, France, 14-16 mai 2002.
- [Luhmann 00] T. Luhmann, K. Wendt, Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-d measurement systems, IAPRS, Vol. 33, Amsterdam, 2000.

- [Martin Rabaud 98] A. Martin Rabaud, Résultats de l'intercomparaison dans le domaine de la métrologie 3D par procédés optiques, Métride, Numérisation 3D Actes de conférences, 1998.
- [Massios 98] N. A. Massios, R. B. Fisher, A Best Next View Selection Algorithm Incorporating a Quality Criterion, Proc. British Machine Vision Conference BMVC97, Southampton, pp 780-789, september 1998.
- [Meagher 82] D. Meagher, Geometric modeling using octree encoding, Computer Graphics and Image Processing, 19(2), 1982.
- [Moron 96] V. Moron, Mise en correspondance de données 3D avec un modèle CAO, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 9 décembre 1996.
- [NF X07-020 96] NF X 07-020, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, AFNOR, juin 1996.
- [Osty 02] G. Osty, Extraction de particularités géométriques sur données discrètes issues de numérisation : partitionnement de grands nuages de points, Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 10 janvier 2002.
- [Osty 99] G. Osty, A. Contri, C. Lartigue, Traitements numériques et partitionnement de grands nuages de points: Préparation de la reconstruction de surface et de l'usinage, Actes de conférence Numérisation 3D, Paris 19-20 mai 1999.
- [Papadopoulos 97] D. Papadopoulos-Orfanos, Numérisation géométrique automatique à l'aide d'un capteur 3D de précision à profondeur de champ réduite, Thèse de doctorat, ENST, 14 février 1997.
- [Papier 98] L. Papier, J. Francon, Evaluation de la normale au bord d'un objet discret 3D, Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique, Vol.13 n°2 juin 1998.
- [Pito 96] R. Pito, Automated Surface Acquisitions using Range Cameras, a dissertation in Computer and Information Science, University of Pennsylvania, may 1996.
- [Prieto 00] F. Prieto, H. T. Redarce, P. Boulanger, R. Lepage, Accuracy improvement of contactless 3D sensor for dimensional inspection, 8<sup>th</sup> European Conference on Rapid Prototyping, CNIT Paris La Défense, 15 pages, 3-4 may 2000.

- [Prieto 00] F. Prieto, H. T. Redarce, P. Boulanger, R. Lepage, Accuracy improvement of contactless 3D sensor for dimensional inspection, Rapid production development, International journal of CAD/CAM and Computer Graphics, Vol. 15, N°2-3-4, pp 345-366, december 2000.
- [Prieto 99] F. Prieto, Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, thèse de doctorat, LAI INSA Lyon, LIVIA ETS Québec, ITI Conseil National de Recherches du Canada, décembre 1999.
- [Rahman 00] M. Rahman, J. Heikkala, K. Lappalainen, Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools, part I : theory, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, pp 1535-1546, 2000.
- [Rahman 00] M. Rahman, J. Heikkala, K. Lappalainen, Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools, part I : theory, Int. Journ. Of Mach. Tools and Manufacture, Vol. 40, pp 1535-1546, 2000.
- [Remy 00] S. Remy, A. Bernard, G. Ris, Integrated environment for 3D automatic inspection of complex parts, Rapid production development, International journal of CAD/CAM and Computer Graphics, Vol. 15, N°2-3-4, pp 383-391, december 2000.
- [Salvi 02] J. Salvi, X. Armangué, J. Batlle, A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation, Pattern Recognition, N°35, pp 1617-1635, 2002.
- [Sartori 95] S. Sartori, G. X. Zhang, Geometric Error Measurement and Compensation of Machines, Annals of the CIRP, Vol. 44, N°2, 1995.
- [Smith 01] K. B. Smith, Y. F. Zheng, Optimal path planning for helical gear profile inspection with point laser triangulation probes, Transactions of the ASME, Vol. 123, february 2001.
- [Smith 98] K. B. Smith, Y. F. Zheng, Accuracy analysis of point laser triangulation probes using simulation, Transactions of the ASME, Vol. 120, N.4, pp 736-745, novembre 1998.
- [Tarabanis 95] K. A. Tarabanis, P. K. Allen, R. Y. Tsai, A survey of sensor planning in computer vision, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, n°1, february 1995.

- [Teeuwsen 89] J. W. M. C. Teeuwsen, J. A. Soons, P. H. J. Schellekens, A General Method for Error Description of CMMs Using Polynomial Fitting Procedures, Annals of the CIRP, Vol. 38, N°1, 1989.
- [TI Goure] Techniques de l'ingénieur, J-P Goure, G. Brun, Bruit dans les mesures optiques, Traité Mesure et Contrôle, R358, 23 pages.
- [Tollenaere 98] Ouvrage collectif sous la direction de M. Tollenaere, Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, édition Hermès, 1998.
- [Tomox 00] Armspach, Introduction aux techniques d'imagerie Systèmes d'analyse d'images, tomographie rayons X, disponible sur : <http://picabia.u-strasbg.fr/MSBM>, 27 janvier 2000.
- [Topologie 02] S. Mehl, Notion de Topologie : Espaces topologiques, espaces métriques, disponible sur : <http://chronomath.irem.univ-mrs.fr/chronomath/TopoMetrique.html>, 2002.
- [Tsai 87] R. Y. Tsai, A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, IEEE Journal of robotics and automation, Vol. RA-3, N°4, august 1987.
- [VIM 93] Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, deuxième édition, Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 1993.
- [Weng 92] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, Camera Calibration with distortion models and accuracy evaluation, IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, Vol. 14, N°10, october 1992.
- [Zhou 92] J. Zhou, Contribution aux méthodes d'étalonnage des capteurs d'images, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris / ISMCM, 7 octobre 1992.
- [Zhou 98] L. Zhou, A. Waheed, J. Cai, Correction technique to compensate the form error in 3D profilometry, Measurement, N°23, pp 117-123, 1998.

## Annexe I

### Glossaire des termes et abréviations employés

**Calibration** : « La calibration d'une caméra dans le contexte de la vision 3D par ordinateur est le processus de détermination de la géométrie interne à la caméra et les caractéristiques optiques (paramètres intrinsèques) et/ou la position 3D et l'orientation (du plan) de la caméra dans un référentiel absolu (paramètres extrinsèques) » d'après [Tsai 87].

**CCD** : Charged Couple Device, ou DTC, Dispositif à Transfert de Charge

**Conformité** : satisfaction d'exigences ISO9000/2000

**Défaut** : non satisfaction d'une exigence relative à une utilisation prévue ISO9000/2000

**Exactitude de mesure** : étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur la valeur vraie du mesurande [VIM 93, (§3.5)].

**Incertitude** : Paramètre associé au résultat d'un mesurage qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

**Indicateur** : information choisie, associée à un phénomène, destinée à en observer périodiquement les évolutions par rapport à des objectifs NF X 50-125

**Luminance** : « Quotient de l'intensité lumineuse par l'aire apparente de la surface émissive. La luminance s'exprime en candela par mètre carré, ou par une valeur comprise entre 1 et 100, relative à un blanc de référence. Pour le blanc d'un moniteur couleur possédant une luminance proche de 80 candelas par mètre carré, la valeur de luminance  $Y = 1$  s'y rapporte ». ([http://discipline.free.fr/termes\\_tech.htm](http://discipline.free.fr/termes_tech.htm))

**Grandeur** : attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement [VIM 93, (§1.1)].

**Mesurage** : ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur [VIM 93, (§2.1)].

**Mesurande** : grandeur particulière soumise à mesurage [VIM 93, §(2.6)].

**MMT** : Machine à Mesurer Tridimensionnelle

**Précision** : le terme précision n'existe pas dans la norme et est remplacé par l'exactitude de mesure

**Répétabilité** : la répétabilité correspond à l'application de la même méthode de mesure par le même observateur, avec le même instrument de mesure, au même lieu, dans les mêmes conditions d'emploi et en répétant le mesurage sur une courte période de temps. Elle se caractérise par l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure. Elle peut s'exprimer, par exemple, par un écart type de répétabilité ou par un paramètre statistique caractéristique de la dispersion des résultats [VIM 93, (§3.6)].

**Reproductibilité** : Etroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure [VIM 93, (§3.7)].

**Voxel** : volume element

## Annexe II

### Artefact de mesure Triplan

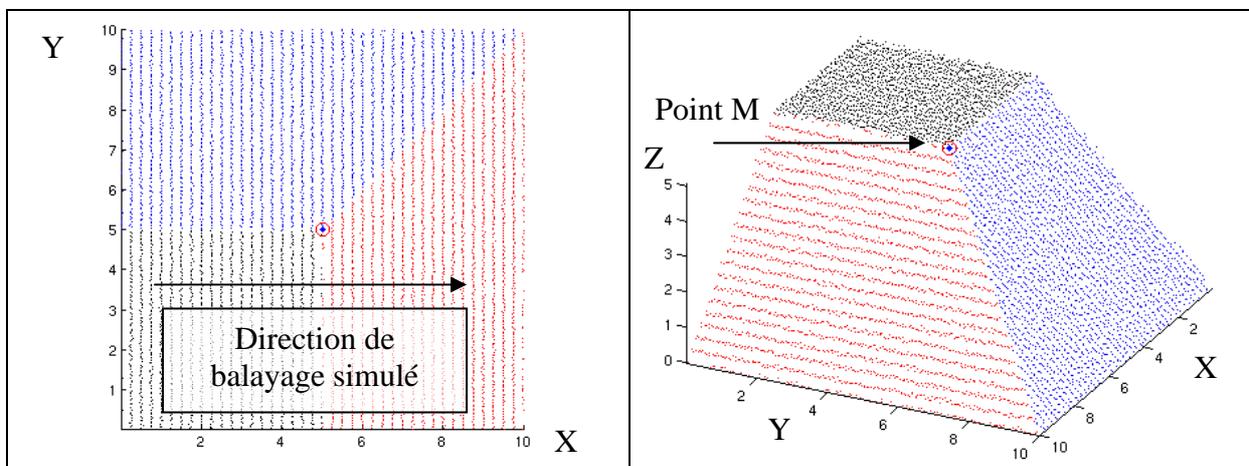
#### Etape 1 : Réalisation d'une maquette de simulation

La maquette de simulation permet de générer un nuage de points représentant la numérisation de 3 plans adjacents. Cette génération est construite par élévation sur Z d'une grille 2D. Les paramètres d'entrée correspondent à des données expérimentales.

Paramètres d'entrée :	densité selon X	$d_X = 0.25$ mm
	densité selon Y	$d_Y = 0.05$ mm
	bruit selon X	$b_X = 0.03$ mm
	bruit selon Y	$b_Y = 0.03$ mm
	bruit selon Z	$b_Z = 0.1$ mm

Paramètres de sortie : Position ( $X_{\text{calc}}$ ,  $Y_{\text{calc}}$ ,  $Z_{\text{calc}}$ ) du point M intersection des 3 plans

Ici les tests sont réalisés pour un point théorique  $M_{\text{théorique}} (5, 5, 5)$



Vues du fichier de simulation

Le point M est déterminé par l'intersection des trois plans des moindres carrés associés aux données générées. Soit P1, P2 et P3 ces trois plans de paramètre  $[a_i \ b_i \ -1 \ d_i]$

$$P1 : [a_1 \ b_1 \ -1 \ d_1] \rightarrow z = a_1x + b_1y + d_1$$

$$P2 : [a_2 \ b_2 \ -1 \ d_2] \rightarrow z = a_2x + b_2y + d_2$$

$$P3 : [a_3 \ b_3 \ -1 \ d_3] \rightarrow z = a_3x + b_3y + d_3$$

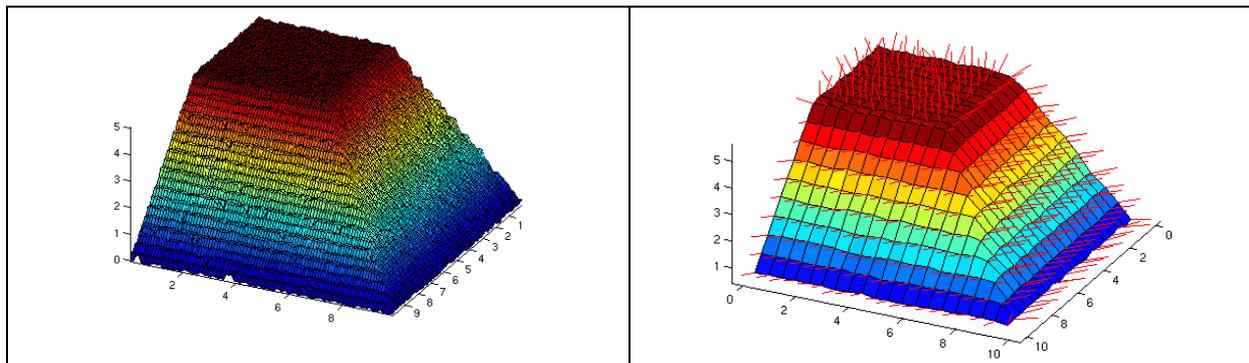
$$\begin{pmatrix} X_{\text{calc}} \\ Y_{\text{calc}} \\ Z_{\text{calc}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & -1 \\ a_2 & b_2 & -1 \\ a_3 & b_3 & -1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \end{pmatrix}$$

## Etape 2 : Détermination du partitionnement sur un fichier généré

Les 3 fichiers correspondants aux plans générés à l'étape précédente sont fusionnés afin de constituer un fichier test de numérisation. L'étape 2 consiste à déterminer le point M (X, Y, Z) par partitionnement du fichier test.

### *Description de l'algorithme :*

Nous associons un modèle surfacique par une fonction intégrée au solveur numérique Matlab (griddata) qui utilise une triangulation de Delaunay et d'après la méthode<sup>1</sup>. Ce modèle d'approximation polygonale consiste en l'association au nuage de points d'un ensemble de facettes planes selon une grille de pas spécifié par l'utilisateur.

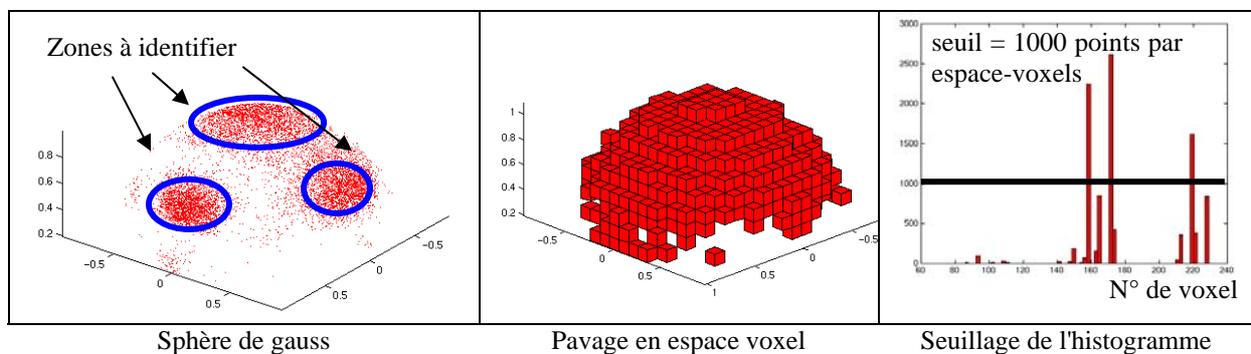


Modèle d'association polygonal

Détermination des normales

Le modèle associé permet de définir en chaque nœud une normale à la surface.

La représentation de l'ensemble des normales par une sphère de gauss permet l'identification des 3 zones correspondantes aux 3 normales principales aux plans.



Sphère de gauss

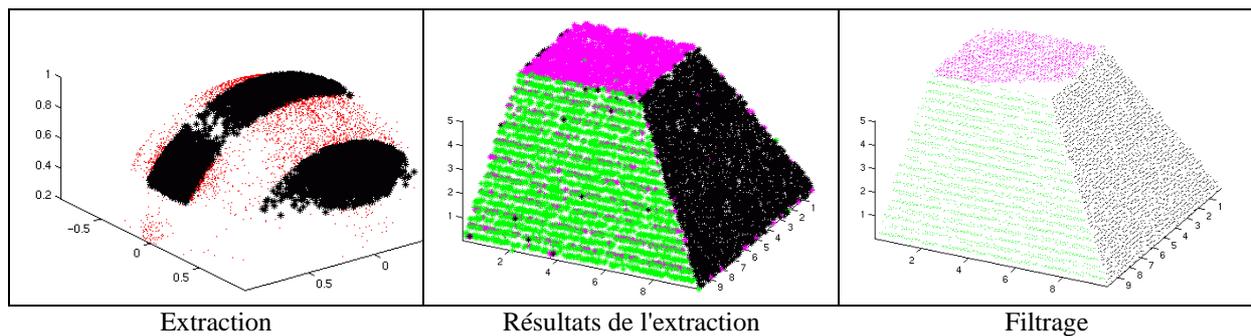
Pavage en espace voxel

Seuillage de l'histogramme

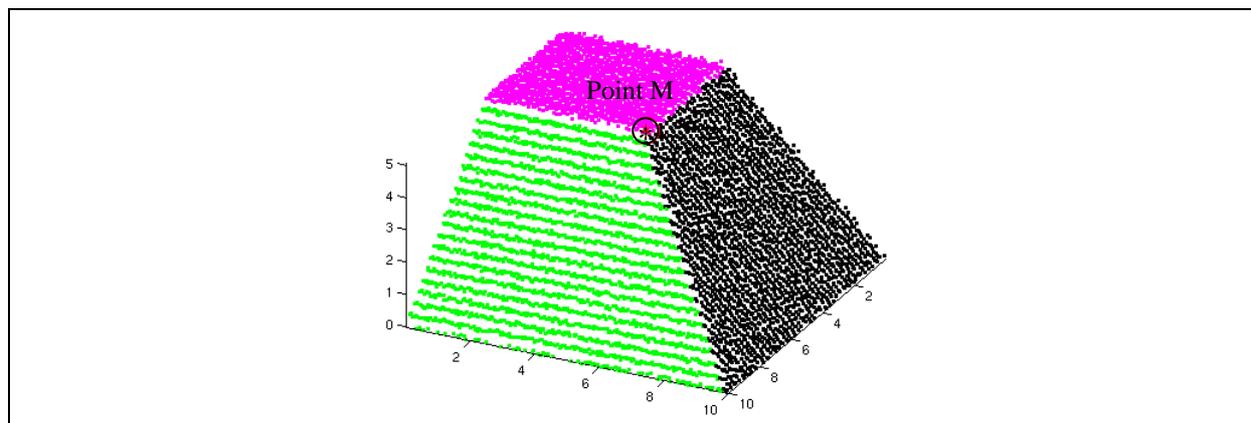
<sup>1</sup> Sandwell, David T., "Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data", Geophysical Research Letters, 2, 139-142,1987.

Le pavage de l'espace des normales sur la sphère de gauss en espace-voxels permet d'extraire les 3 zones mentionnées ci-dessus. Pour cela, nous appliquons un seuil sur la représentation de l'histogramme des voxels occupés en fonction de leur densité, (nombre de points par voxel). Le seuillage permet l'extraction des nœuds du modèle associé correspondant aux trois plans.

Un filtrage des points en spécifiant un défaut de forme mini (par exemple 0.1 mm), élimine d'éventuels points aberrants de façon itérative.



Enfin, le partitionnement des points réels est effectué par écart de proximité.

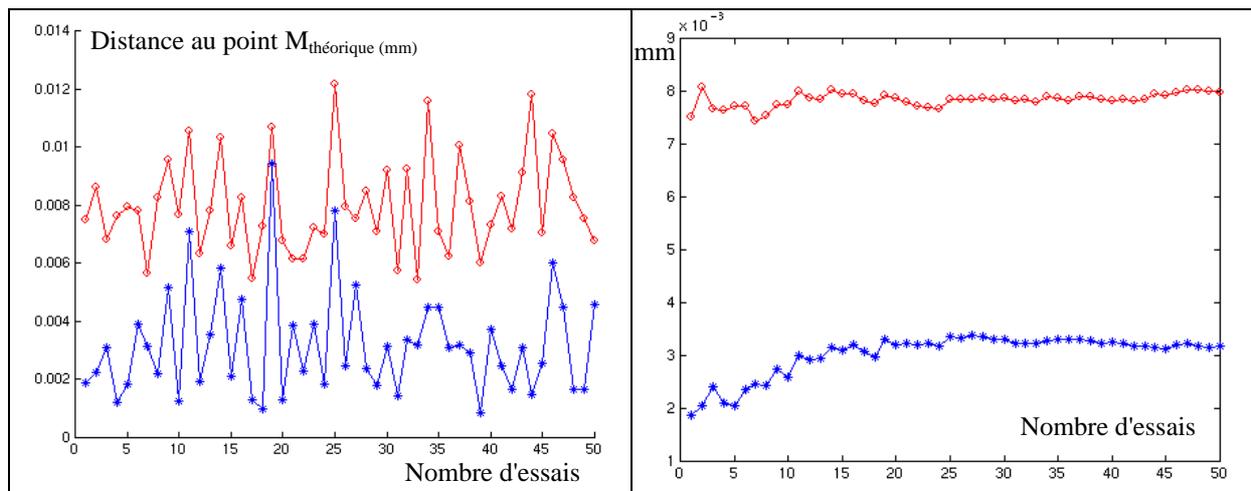


Partitionnement et calcul des coordonnées du point M

Les trois zones étant identifiées, le calcul de la position du point M peut être mené.

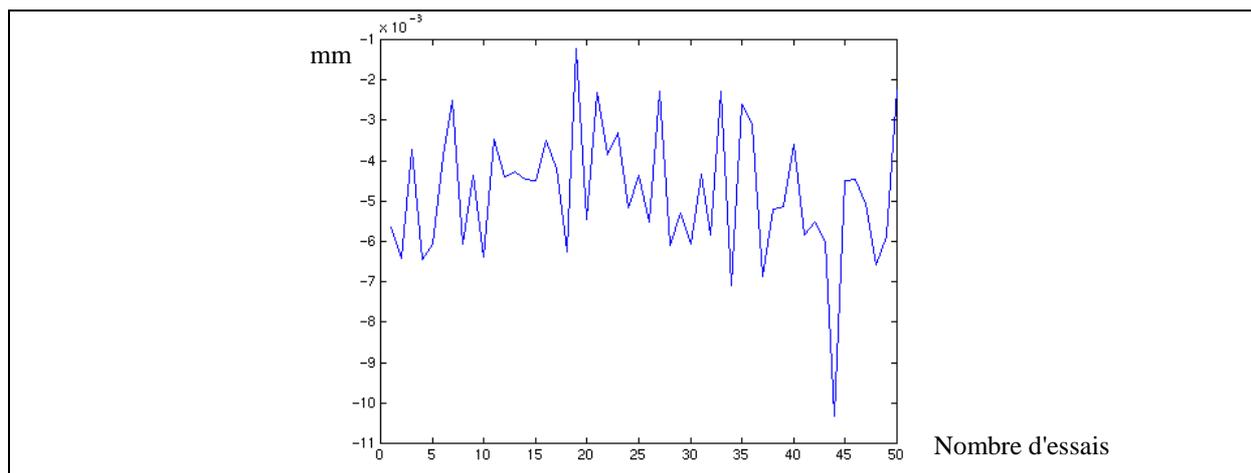
### Etape 3 : Estimation de la "précision de la méthode"

L'estimation de la méthode est effectuée par la génération de 50 fichiers simulés. La comparaison du calcul des coordonnées des points M issus de la maquette de simulation et ceux identifiés à partir de cette méthode de partitionnement constitue un indicateur de performance de l'algorithme. L'erreur numérique commise est de l'ordre de  $5 \mu\text{m}$ , ce qui est acceptable compte tenu de la grandeur à évaluer dans notre application : l'écart évalué a pour ordre de grandeur 10 fois l'erreur numérique.



Courbe du bas : simulation  
Courbe du haut : résultats du partitionnement

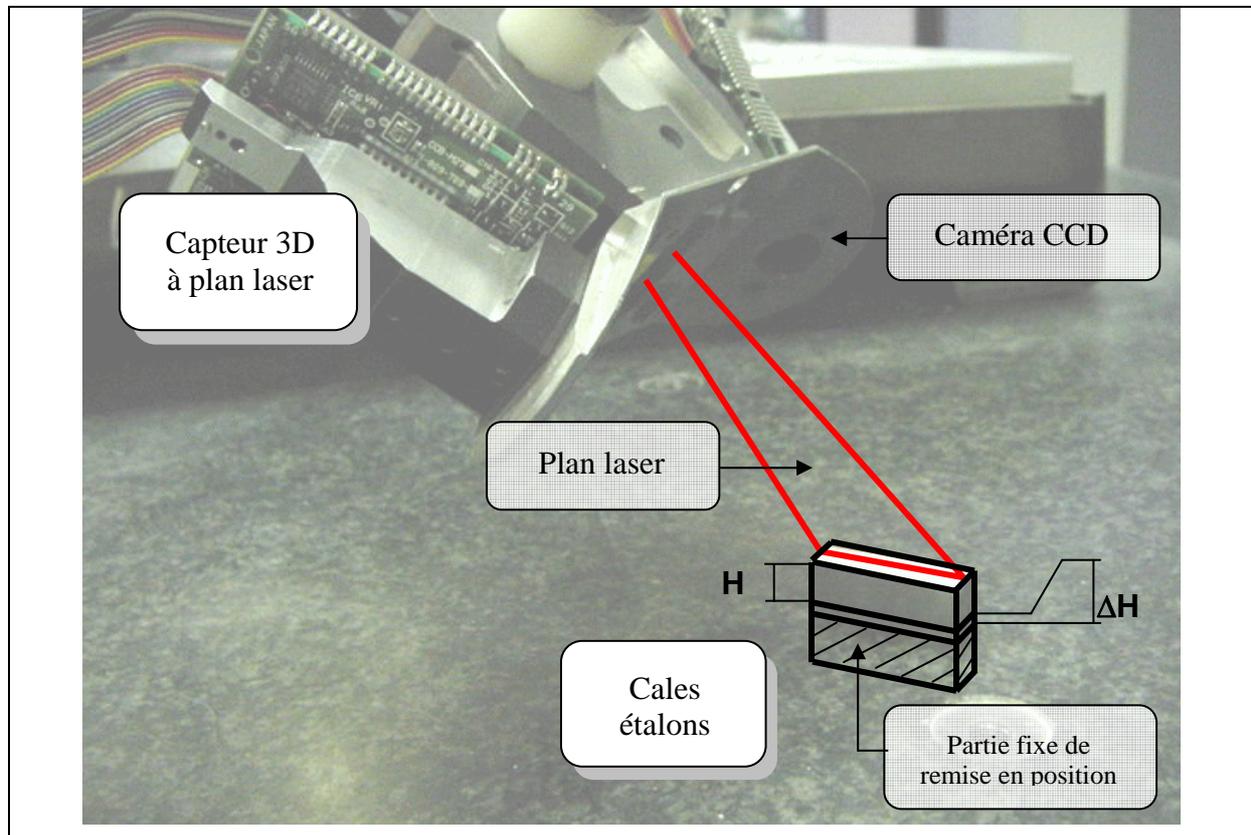
Représentation des moyennes des distances cumulées  
(convergence de la mesure à partir de 20 essais environ)



Estimation de la méthode de partitionnement employée (ici environ  $5 \mu\text{m}$ )

## Annexe III

### Evaluation de distance par mesure de cales étalons



Numérisation d'une surface réputée plane

L'évaluation de distance par mesure de cales étalon permet la définition d'un taux d'erreur relatif. Pour cela nous effectuons la numérisation d'une surface réputée plane constituée par la surface d'une cale étalon. Une surface de référence est numérisée plusieurs fois à différentes altitudes. Ces différentes altitudes sont réalisées par empilement de cales étalons dont l'épaisseur est connue. La remise en position se fait sur une troisième cale étalon solidaire du bâti.

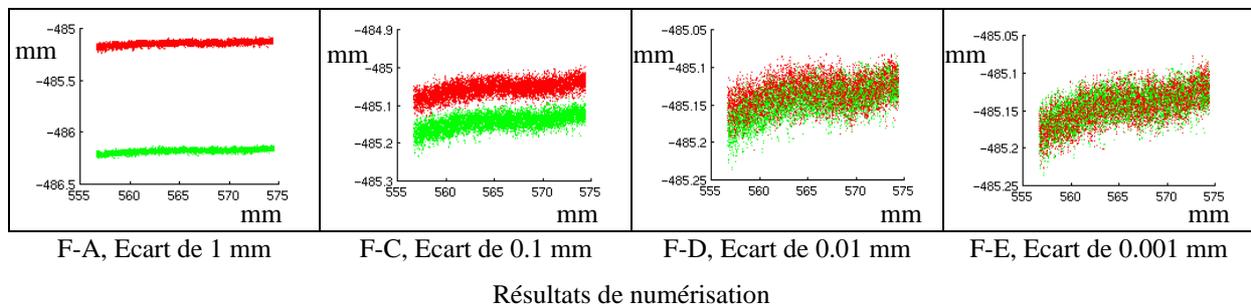
L'évaluation se déroule de la façon suivante : une première numérisation de la surface de référence puis superposition de la cale de référence sur une cale d'épaisseur connue (successivement 2 mm, 1.1 mm, 1.01 mm, 1.001 mm, 1 mm) elle-même sur une cale fixe liée au bâti.

La numérisation de la même surface de référence permet de s'affranchir d'un défaut de forme éventuel, aussi faible puisse-t-il être.

Les résultats de mesure sont décrits dans le tableau ci après. Les lettres A à F décrivent le type de numérisation, exemple : C = surface de référence superposé sur une cale de 1.1 mm. Les couples de lettre désignent une évaluation d'ensemble de distances points/plan.

Par exemple, A-B : association d'un plan des moindres carrés à la surface correspondant à la numérisation du plan de référence en position A, puis évaluation de l'ensemble des distances des points numérisés du plan de référence en position B au plan précédemment construit. Pour cette évaluation nous donnons la médiane de la répartition des écarts, la médiane donne la valeur centrée de la loi gaussienne associée à la répartition.

L'écart type de la répartition des points permet de valider la reproductibilité de la numérisation de la surface de référence, en terme de bruit (Valeur de référence : 0.0143 mm)



Numérisation de la cale étalon en 16 acquisitions, pas 0.25 mm

Nous réalisons 6 mesures

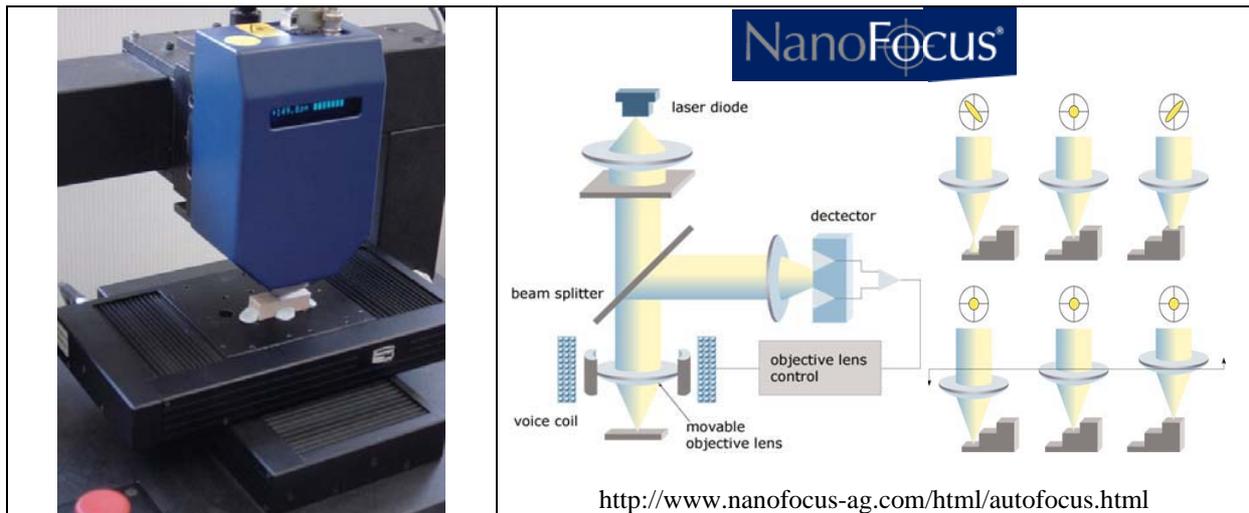
- A) Cale de référence 10 mm
- B) Cale de référence 10 mm + cale 2 mm
- C) Cale de référence 10 mm + cale 1.1 mm
- D) Cale de référence 10 mm + cale 1.01 mm
- E) Cale de référence 10 mm + cale 1.001 mm
- F) Cale de référence 10 mm + cale 1 mm

Type de mesure et distance théorique évaluée	Médiane ( mm )	Ecart type ( mm )
A-B (2)	2.0121	0.0155
A-C (1.1)	1.1135	0.0147
A-D (1.01)	1.0261	0.0152
A-E (1.001)	1.0063	0.0142
F-A (1)	1.0038	0.0146
F-C (0.1)	0.1096	0.0145
F-D (0.01)	0.0216	0.0148
F-E (0.001)	0.0023	0.0140

## Annexe IV

### Mesure de l'épaisseur de mattifiant

Les mesures sont effectuées à l'aide d'une station de mesure 3D  $\mu$ scan AF2000 de NANOFOCUS®.



Station de mesure 3D  $\mu$ scan AF2000 et principe de fonctionnement

*Extrait du rapport de mesure*

#### **I. MATERIEL UTILISE - CONFIGURATION**

Station de mesure 2D/3D par balayage laser  $\mu$ Scan AF2000 équipée :

- Du capteur Autofocus AF2000, gamme de mesure 1mm, résolution verticale 25 nm, distance de travail 2 mm, résolution latérale 1  $\mu$ m environ, fréquence de mesure 10 kHz. Caméra CMOS intégrée, champ de visualisation 0.6x0.8 mm<sup>2</sup>.
- Des tables de déplacement XY 100x100mm. Le défaut de planéité des tables sur 50mm est inférieur à  $\pm 0.5\mu$ m.

#### **II. ECHANTILLONS MESURES**

*Les échantillons suivants ont été mesurés :*

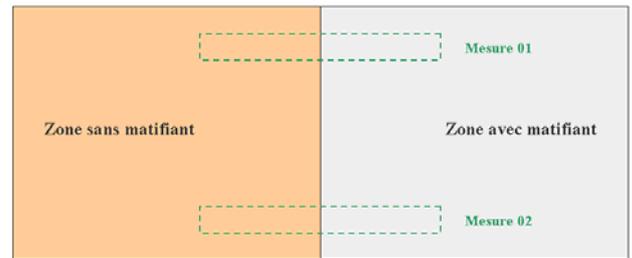
- LAB (résine)
- Cale étalon.

### III. PROTOCOLE DE MESURE

#### 1) Mesure d'épaisseur sur échantillon LAB :

Une marche a été générée par dépôt de matifiant sur la surface de l'échantillon LAB en partie masquée par du scotch.

Deux mesures topographiques ont été effectuées perpendiculairement à l'arête de marche.



#### Paramètres de balayage :

Type	= Plan
Orientation	= X-Direction
Vitesse	= 10.0 mm/s
Gamme X	= 20 mm
Gamme Y	= 5 mm
Résolution X	= 0.005 mm
Résolution Y	= 0.050 mm

#### 2) Evaluation de l'homogénéité du dépôt sur cale étalon :

La surface de la cale étalon a été mesurée avant et après dépôt du matifiant.

#### Paramètres de balayage :

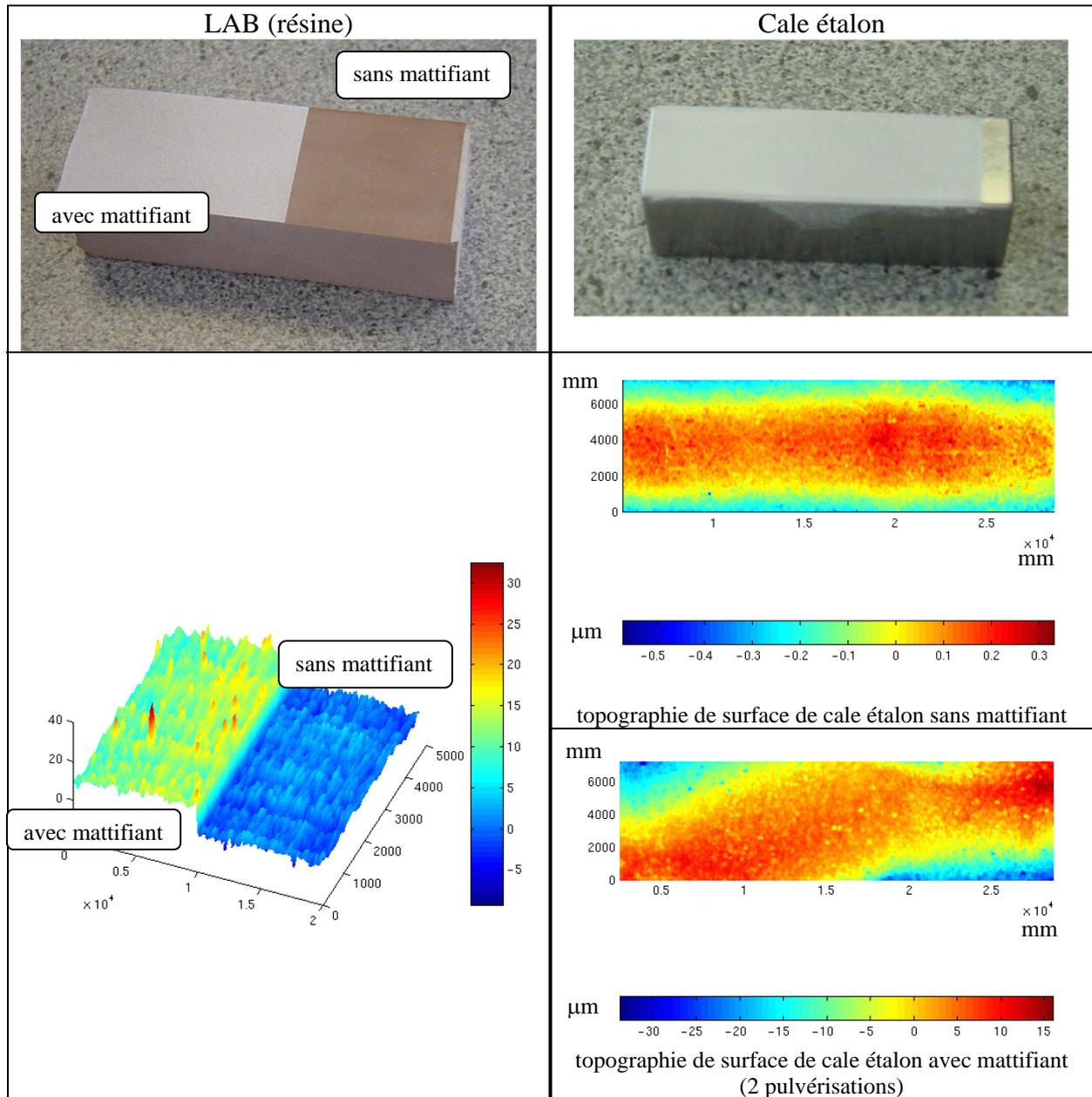
Type	= Plan
Orientation	= X-Direction
Vitesse	= 10.0 mm/s
Gamme X	= 29 mm
Gamme Y	= 7.5 mm
Résolution X	= 0.005 mm
Résolution Y	= 0.050 mm

#### Résultats obtenus :

Hauteur de marche : 11  $\mu\text{m}$

Défaut de forme maxi cale étalon < 1  $\mu\text{m}$

Défaut de forme maxi cale étalon avec matifiant 45  $\mu\text{m}$  (2 pulvérisations successives)



Hauteur de marche

Topographie de surface

## Annexe V

### Choix du paramètre nbtest

Le choix du paramètre nbtest permet la détermination d'un nombre d'expériences de simulation pour l'évaluation de l'impact du bruit de numérisation au niveau de la calibration.

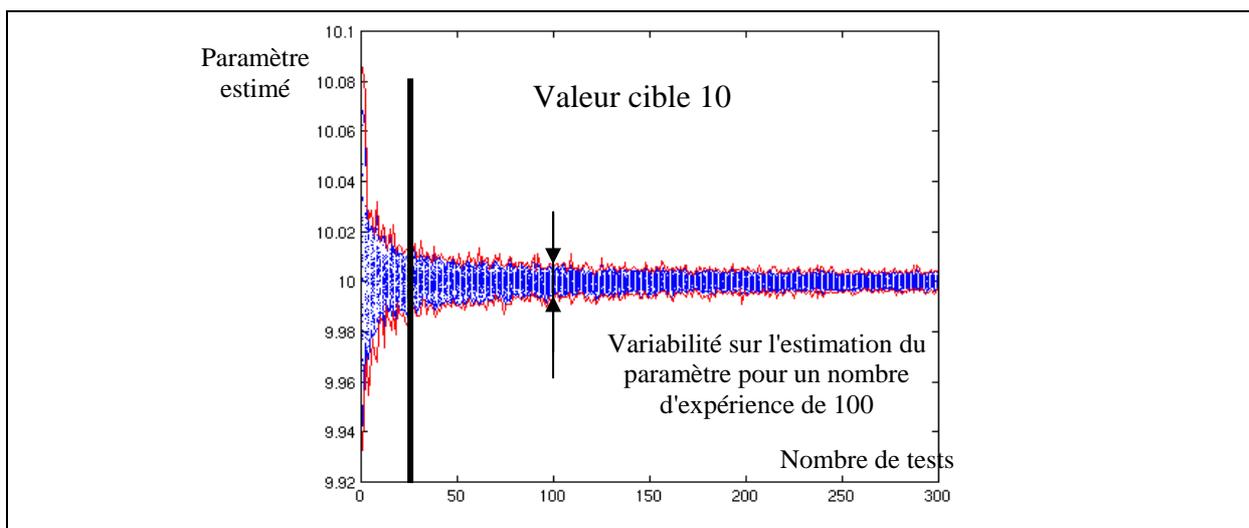
La méthode consiste en l'association d'un modèle de droite des moindres carrés sur un nuage de points simulé. Le nombre de points et le bruit associé aux acquisitions correspond aux caractéristiques moyennes d'une acquisition réelle dans la matrice CCD lors de la calibration. L'objectif de cette procédure est de donner le nombre de tests de simulation nécessaires pour obtenir une variabilité donnée sur les paramètres identifiés.

Les caractéristiques associées à la simulation sont :

droite d'équation nominale  $y = 10$ ; bruit simulé 0.4 pixel; longueur prise en compte 220 pixels; nombre de points 170.

Le nombre de tests pris en compte varie de 1 à 300. Pour chacun d'eux, 40 répétitions sont effectuées pour définir la variabilité du paramètre en fonction du nombre de tests. Le paramètre estimé est  $b$  lié à l'équation de droite  $y = ax + b$ . Pour un nombre de tests de simulations donné, le paramètre est évalué par sa moyenne.

Avec un seuil de  $\pm 0.5\%$  de la valeur cible, nous pouvons déterminer un nombre d'expériences tests minimal de l'ordre de 20.



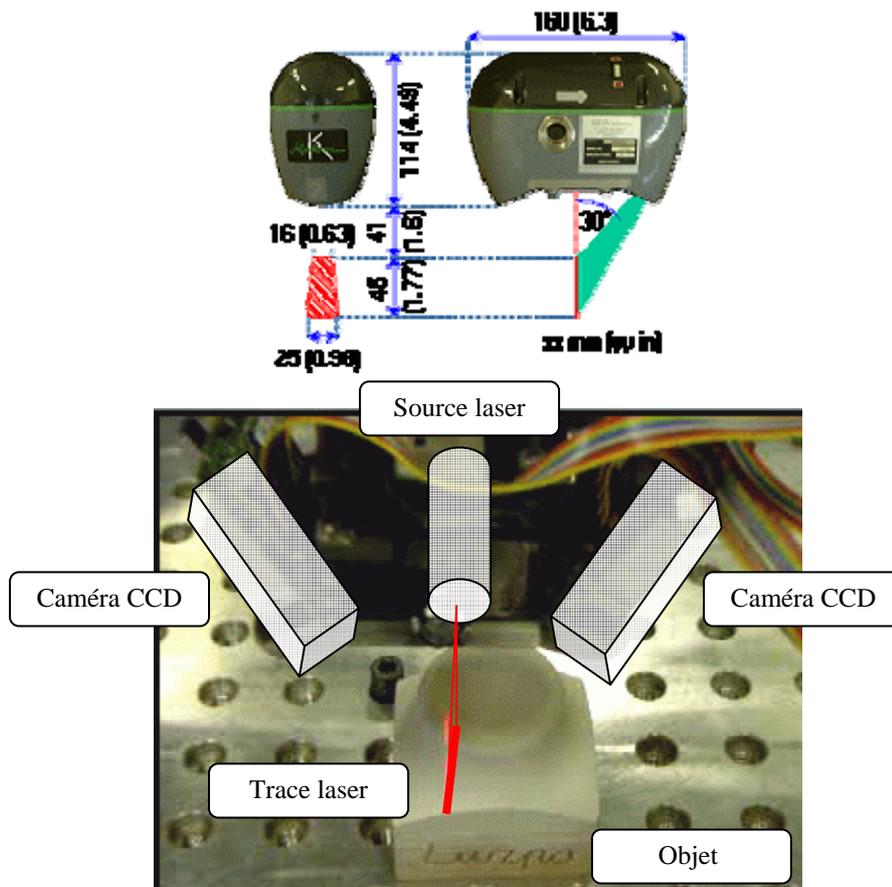
Détermination du nombre de tests de simulation

## Annexe VI

## Caractéristiques du capteur à plan laser Kréon KLS 51

D'après les données constructeur :

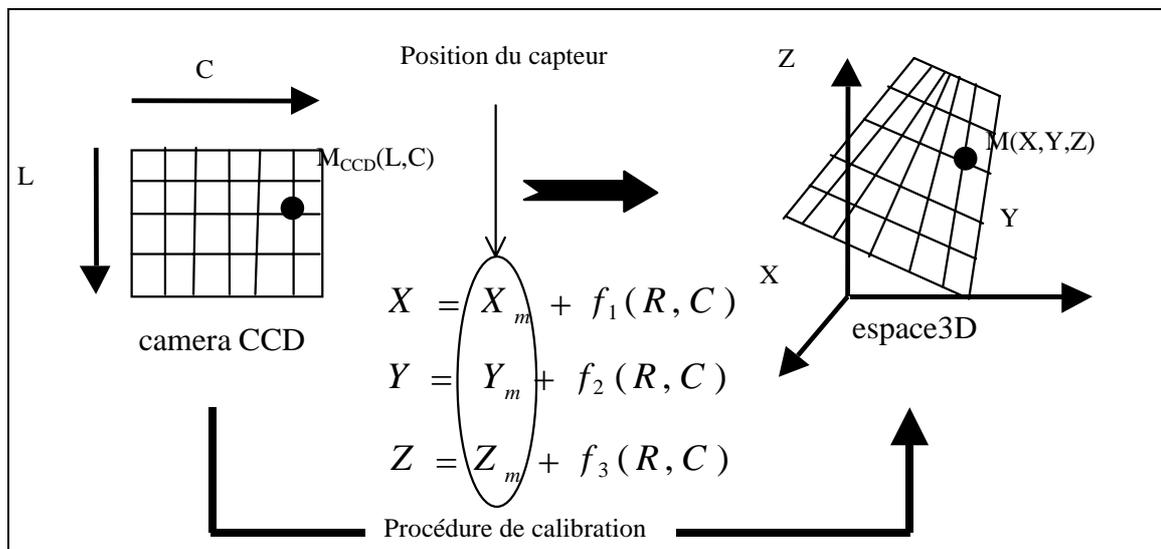
Diode laser	Catégorie IIIA
Longueur d'onde	670 nm
Puissance (ajustable)	1 à 4 mw
Nombre de niveaux de gris	256
CCD (nb de pixels)	752 x 580
Sensibilité	0,5 lux
Nombre de points / acquisition	600
Profondeur de champ	50 mm
Largeur de champ	25 mm
Poids	1 kg
Température d'utilisation	$0^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$



## Annexe VII

## Calibration sur sphère à facettes

Le modèle de calibration permet la transformation des coordonnées de 2D d'un point observé dans l'espace de la matrice CCD du capteur  $M_{\text{CCD}}(L, C)$  en coordonnées 3D dans le repère de l'espace 3D  $M(X, Y, Z)$ .



L'équation établie par Dantan et al. montre que le modèle associé au capteur utilisé permet d'exprimer les coordonnées  $M(X, Y, Z)$  en fonction de  $M_{\text{CCD}}(L, C)$  et de la position du capteur  $(X_m, Y_m, Z_m)$  dans le repère lié à la MMT [Dantan 96] :

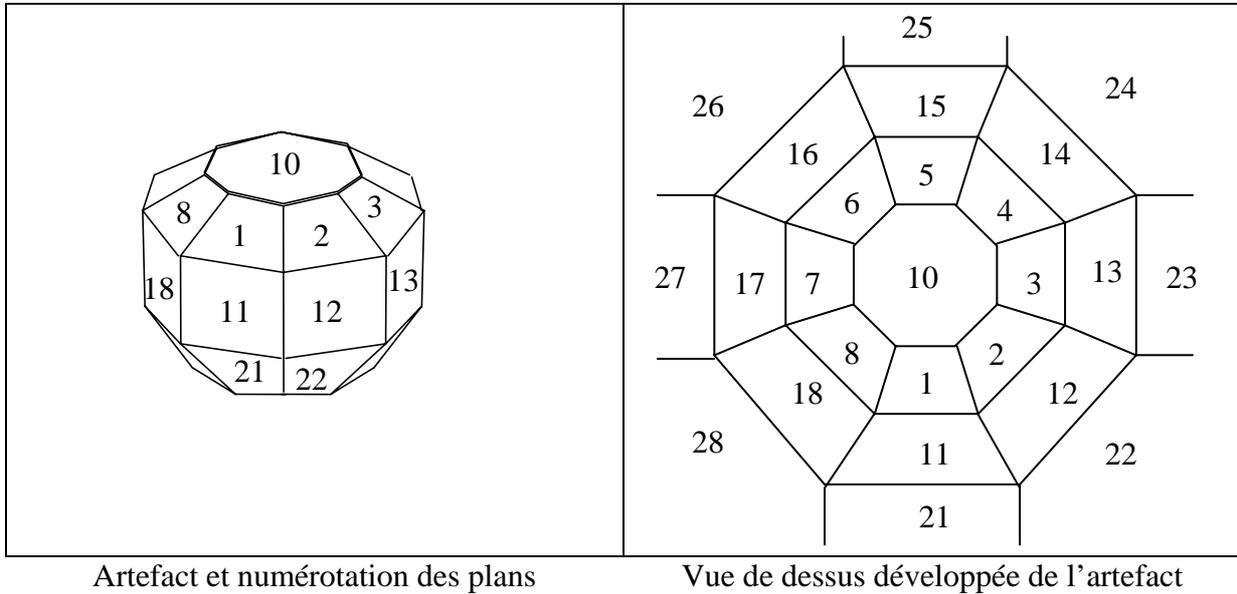
$$\begin{aligned}
 X &= X_m + \frac{a_1 \cdot L + a_2 \cdot C + a_3}{a_{10} \cdot L + a_{11} \cdot C + 1} \\
 Y &= Y_m + \frac{a_4 \cdot L + a_5 \cdot C + a_6}{a_{10} \cdot L + a_{11} \cdot C + 1} \\
 Z &= Z_m + \frac{a_7 \cdot L + a_8 \cdot C + a_9}{a_{10} \cdot L + a_{11} \cdot C + 1}
 \end{aligned} \tag{a}$$

L'équation de calibration précédente fait apparaître 11 paramètres ( $a_i, i \in [1, 11]$ ) inconnus qui sont identifiés par extraction de points d'intérêt sur un artefact de mesure conçu spécifiquement : la sphère à facettes. La sphère à facettes est géométriquement connue et positionnée dans le volume de mesure de la MMT par palpation mécanique. Les faces planes

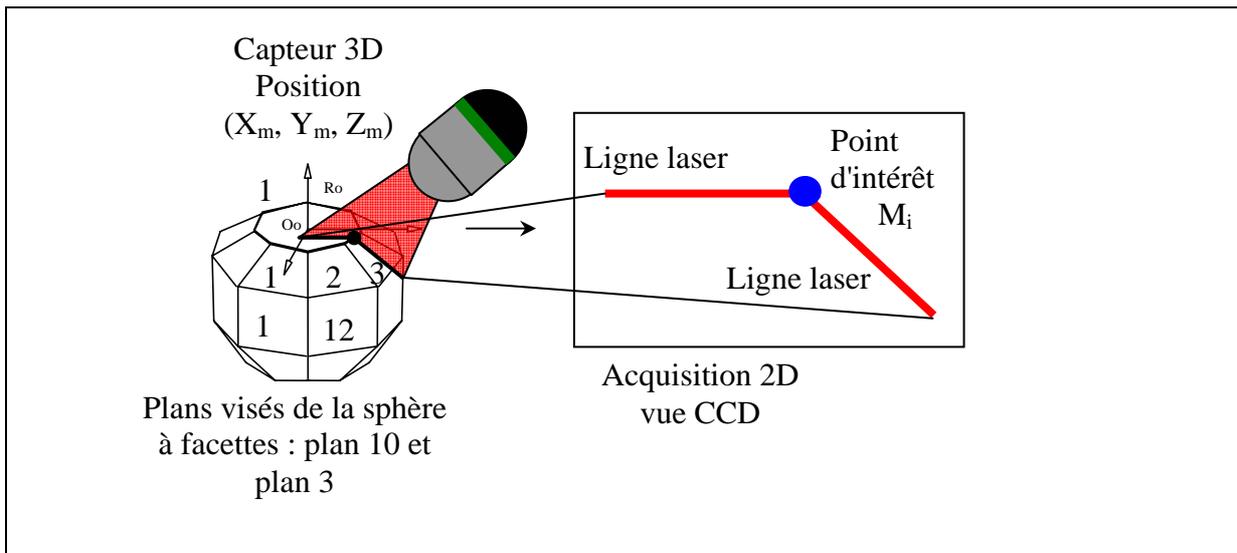
présentent un défaut de forme inférieur à  $1\mu\text{m}$ . Ainsi, chacun des plans de la sphère à facettes a pour équation dans le repère de la MMT :

$$\alpha_k \cdot X + \beta_k \cdot Y + \chi_k \cdot Z + \delta_k = 0 \quad (\text{b})$$

où  $k \in [1,25]$  est l'indice d'un des 25 plans de la sphère à facettes



La procédure de calibration consiste en l'observation d'un nombre fini de points d'intérêts  $M_i$  dans l'espace des coordonnées 2D de la matrice CCD relativement à un balayage de l'artefact de calibration. Un point d'intérêt est construit comme l'intersection du plan laser avec deux plans sécants de la sphère à facettes.



Ainsi, pour un point d'intérêt  $M_i$  dont l'image 2D est  $(L_i, C_i)$ , et dont les coordonnées 3D  $(X_i, Y_i, Z_i)$ , a priori inconnues vérifient l'équation de chacun des deux plans d'indices  $k$  et  $p$ , nous pouvons écrire :

$$\alpha_k \cdot X_i + \beta_k \cdot Y_i + \chi_k \cdot Z_i + \delta_k = 0 \quad (c_1)$$

$$\alpha_p \cdot X_i + \beta_p \cdot Y_i + \chi_p \cdot Z_i + \delta_p = 0 \quad (c_2)$$

Par substitution dans chacune des équations de  $(X_i, Y_i, Z_i)$  donnés par l'équation de calibration (a), on obtient pour chaque couple d'équations le couple d'équations linéaires en  $(L_i, C_i)$  suivantes :

$$-K_k =$$

$$a_{10}K_kL_i + a_{11}K_kC_i + a_1\alpha_kL_i + a_2\alpha_kC_i + a_3\alpha_k + a_4\beta_kL_i + a_5\beta_kC_i + a_6\beta_k + a_7\chi_kL_i + a_8\chi_kC_i + a_9\chi_k$$

$$-K_p =$$

$$a_{10}K_pL_i + a_{11}K_pC_i + a_1\alpha_pL_i + a_2\alpha_pC_i + a_3\alpha_p + a_4\beta_pL_i + a_5\beta_pC_i + a_6\beta_p + a_7\chi_pL_i + a_8\chi_pC_i + a_9\chi_p$$

avec pour chaque constante  $K_r$ ,  $K_r = \alpha_r X_m + \beta_r Y_m + \chi_r Z_m + \delta_r$

Ainsi, chaque acquisition donne lieu à 2 équations linéaires dont les inconnues sont les paramètres  $a_i$  ( $i=1, \dots, 11$ ).

Les paramètres du modèle de calibration sont alors solution du système linéaire suivant :

$$\begin{pmatrix} \alpha_k L_i & \alpha_k C_i & \alpha_k & \beta_k L_i & \beta_k C_i & \beta_k & \chi_k L_i & \chi_k C_i & \chi_k & K_k L_i & K_k C_i \\ \alpha_p L_i & \alpha_p C_i & \alpha_p & \beta_p L_i & \beta_p C_i & \beta_p & \chi_p L_i & \chi_p C_i & \chi_p & K_p L_i & K_p C_i \\ & & & & & & & & & & \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ a_{10} \\ a_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -K_k \\ -K_p \\ \cdot \end{pmatrix}$$

11x2xN 2xN

Pour des raisons de robustesse, la résolution est menée à l'aide d'un système linéaire surabondant de 11 inconnues et de 36 équations, correspondant à 18 acquisitions. Les paramètres  $a_i$  sont déterminés par une méthode des moindres carrés, et sont reportés dans l'équation (a) qui permet la restitution des coordonnées 3D correspondantes à toutes observations 2D de la matrice CCD.