

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Mohamed BOUDIAF

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

FACULTE DE GENIE MECANIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE MARITIME

THESE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT

Spécialité : Génie maritime

Option : Construction

Présentée par : ZEROUAL Ibrahim

Titre

***Etude De Modèles Photogrammétriques En Métrologie Industrielle : Apport
Dans Le Génie Maritime***

Soutenue en.....avril.....2015 Devant le jury composé de :

Professeur Adjout Houari	USTO-MB	Président
Professeur Liazid Abdelkrim	ENP-Oran	Directeur de thèse
Professeur Belkadi Mustapha	USTO-MB	Examineur
Professeur Aoun Allah Moham	USTO-MB	Examineur
Professeur Idriss Amara	U. Constantine	Examineur
Docteur Elosmani Mohamed	ENP-Oran	Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier le Professeur **Liazid Abdelkrim**, Directeur du Laboratoire de recherche en Technologies de l'Environnement (LTE) pour avoir accepté de diriger cette thèse. Son soutien et ses conseils étaient très bénéfiques pour le bon déroulement des travaux.

Je tiens également, à remercier la professeur **Pierre Grussenmeyer** pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire afin de compléter mes recherches en documentation et en logiciels. La discussion et les conseils retenus m'ont permis de voir clairement la finalité des travaux.

J'exprime ma reconnaissance et mes remerciements à Monsieur **Adjlout Houari**, Professeur au département de génie maritime (USTO), pour avoir accepté de présider mon jury.

Que soient remerciées, Messieurs **Belkadi Mustapha**, **Aoun Allah Mohamed**, Professeurs au département de génie maritime (USTO) et messieurs **Elosmani Mohamed** et **Idriss Amara**, respectivement maitre de conférence à l'EMP d'Oran et professeur à l'université de Constantine pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

J'exprime ma reconnaissance à mon ami **Abderezak Brahmi** pour ces conseils et sa contribution en informatique, ainsi qu'à l'équipe de photogrammétrie du CNTS d'Arzew pour sa collaboration et son dévouement à la spécialité.

Je tiens aussi à remercier ma famille d'avoir supporté mon humeur pendant toute la période des travaux et de recherche.

Dédicaces

A mon défunt père

A ma défunte mère

A toute ma famille

A la mémoire de Chalabi Lahouari : photogrammètre hors pair,

A tous mes amis,

A tous les photogrammètres

Je dédie ce travail

Ibrahim Zeroual

Résumé

La mesure dimensionnelle sur les pièces industrielles présente des aspects aussi diversifiés que complexes. L'analyse des sujets en métrologie doit satisfaire des règles de dimensionnement et de tolérancement. Il est utile quelquefois de recourir à l'inter comparaison pour valider des résultats. L'étude de modèles photogrammetriques pour la métrologie industrielle est le sujet de cette thèse. En effet, on s'intéresse aux méthodes photogrammetriques permettant de satisfaire des besoins de mesure pour le génie industriel. Dans plusieurs travaux de mesure, la photogrammétrie a apporté sa contribution en métrologie tridimensionnelle (3D); néanmoins le doute sur l'exactitude persiste et rend cette méthode méconnue par la communauté des industriels.

Dans le cadre de cette étude, la précision, le temps et le coût des différentes opérations ont été considérés. Sachant que les paramètres techniques de mesure sont liés à l'acquisition et aux différents traitements, on utilise une conception basée sur les niveaux de densification et de classification (ZOD-TOD). Les quatre niveaux qui représentent cette conception s'étalent depuis l'ordre zéro (0) jusqu'au troisième ordre (3) permettant un traitement dense et complet de l'objet. Dans ce contexte, il est nécessaire d'adopter une démarche rigoureuse permettant d'atteindre les objectifs escomptés. Dans ce travail, le modèle d'ordre zéro (ZOD) est représenté par la méthode DLT et montre la possibilité du processus photogrammetrique à réaliser une reconstruction 3D d'un objet.

D'un autre coté, le problème de densification est abordé en entamant une intercomparaison avec la lasergrammetrie. Les modèles utilisés permettent de définir une configuration de réseaux photogrammétriques denses et donnent une représentation fiable du sujet à analyser. Les principes de la méthode SIFT et Ransac sont appliqués et montrent leur utilité particulièrement pour la phase de densification. Plusieurs outils permettent de créer des modèles 3D précis et de qualité sur différents types d'objets. La modélisation dense de surface rapprochée d'objets limités à quelques mètres seulement et des séquences d'appareils photographiques calibrés de haute résolution sont employées pour traiter des projets photogrammétriques basés sur l'extraction automatique de point de jonctions permettant l'automatisme et l'exactitude du rendu 3D. Les petits formats stéréoscopiques de cameras, après étalonnage, offrent des solutions très intéressantes pour la modélisation de surface dense par l'utilisation de la corrélation épipolaire.

La visualisation des modèles est nécessaire pour faire apparaître les caractéristiques de l'objet, nous proposons donc l'utilisation de solutions disponibles dans le logiciel Cloud-Compare (EDF, Opensource). Enfin, nous avons établi une étude de faisabilité de la photogrammétrie en métrologie industrielle et avons analysé ses possibilités pour la restitution des objets (primitif) plans, surfaciques et de volumes 3D. La précision relative atteinte est variable entre 10^{-3} et 10^{-6} de la taille de l'objet mesuré. La complexité des objets en industrie nécessite des stratégies de prises de vues et la mise en place de systèmes de contrôle. L'étalonnage et l'exploitation complète des systèmes de mesure photogrammétrique dans un environnement industriel permettent d'améliorer la qualité totale, prenant en compte l'exhaustivité et la précision géométrique.

MOTS CLES : PHOTOGRAMMETRIE, LASERGRAMMETRIE, METROLOGIE, DLT, DENSIFICATION.

Abstract

The dimensional measurement on industrial parts presents as complex as diverse aspects. The analysis of the topics in metrology must satisfy dimensioning and Tolerancing rules. It is useful sometimes to use inter comparison to validate results. The study of models photogrammetric for industrial metrology is the subject of this thesis. Indeed, there is interest in methods photogrammetric to satisfy the needs of measurement for industrial engineering. In several work measurement, photogrammetry has made its contribution in metrology three-dimensional (3D); Nevertheless doubt on the accuracy persists and makes this method goes unrecognised by the industrial community.

In this study, the accuracy, the time and cost of various operations have been considered. Knowing that technical measurement parameters are related to the acquisition and the different treatments, using a design based on the densification and classification (ZOD - TOD) levels. The four levels that represent this concept spread since the order zero (0) until the third order (3) allowing a dense and complete treatment of the subject. In this context, it is necessary to adopt a rigorous approach to achieve the expected objectives. In this work, the model of order zero (ZOD) is represented by the DLT method and indicates the possibility of the photogrammetric process to achieve a 3D reconstruction of an object.

On the other hand, the problem of densification is addressed by initiating an intercomparison with the example. The models used to define configuration of dense photogrammetric networks and give a reliable representation of the subject to analyze. SIFT and Ransac method principles are applied and show their usefulness particularly in the phase of intensification. Several tools to create 3D models accurate and quality on different types of objects. Dense surface modeling closer objects limited to a few meters only and calibrated cameras of high-resolution sequences are used to treat photogrammetric projects based on automatic extraction of point of junctions allowing the automatism and the accuracy of the 3D rendering. Stereoscopic formats of cameras, after calibration, offer very interesting solutions for dense surface modeling by used it...

Visualization of models is necessary to make appear the characteristics of the object, we therefore propose the use of solutions available in the Cloud-Compare (EDF, Opensource) software. Finally, we have established a feasibility study of Photogrammetry in industrial metrology and analyzed its possibilities for the (primitive) objects, surface and volume 3D restitution. The affected relative accuracy is variable between 10^{-3} and 10^{-6} the size of the object being measured. The complexity of the objects in the industry requires shooting strategies and the implementation of control systems. Calibration and full operation of the photogrammetric measurement in industrial environment systems allow improved total quality, taking into account the completeness and geometric precision

Key words: PHOTOGRAMMÉTRIE, LASERGRAMMETRY, METROLOGY, DLT, DENSIFICATION.

ملخص

يعرض قياس الأبعاد على أجزاء صناعية معقدة كالجوانب المتنوعة. يجب أن تستوفي تحليل المواضيع في علم القياس قياس الأبعاد والتفاوتات القواعد. أنه من المفيد في بعض الأحيان إلى استخدام جملة المقارنة للتحقق من صحة النتائج. دراسة نماذج الطبغرافية للمقاييس الصناعية هو موضوع هذه الأطروحة. وفي الواقع، هناك اهتمام بأساليب الطبغرافية تلبية احتياجات القياس للهندسة الصناعية. في عدة أعمال القياس والمسح التصويري قدمت إسهامها في القياس ثلاثية الأبعاد D3؛ ومع ذلك استمرت الشكوك حول الدقة ويجعل هذا الأسلوب يذهب غير المعترف بها من قبل المجتمع الصناعي.

في هذه الدراسة، تم النظر الدقة، والوقت والتكلفة لمختلف عمليات. مع العلم أن المعلمات قياس التقنية المرتبطة باقتناء وعلاجات مختلفة، باستخدام تصميم استناداً إلى التكتيف والتصنيف (ZOD-الطود) مستويات انتشار المستويات الأربعة التي تمثل هذا المفهوم منذ الأمر صفر (0) حتى بالترتيب الثالث (3) السماح بمعاملة كثيفة وكاملة لهذا الموضوع. وفي هذا السياق، من الضروري اعتماد نهج صارم تحقيق الأهداف المرجوة. في هذا العمل، نموذج لترتيب الصفر (ZOD) يتم تمثيله بواسطة الأسلوب DLT ويشير إلى إمكانية عملية الطبغرافية تحقيق إعمار بشكل ثلاثي الأبعاد من كائن.

من ناحية أخرى، هو معالجة مشكلة التكتيف قبل الشروع ببنية مع المثال. النماذج المستخدمة لتحديد تكوين شبكات الطبغرافية كثيفة وإعطاء تمثيل موثوقة لهذا الموضوع تحليل. التدقيق ومبادئ أسلوب رانسك يتم تطبيقها وإظهار فائدتها لا سيما في المرحلة لتكتيف. عدة أدوات إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد عالية الجودة ودقة على أنواع مختلفة من الكائنات. كثافة السطح النمذجة تقتصر على بضعة أمتار فقط توثيق الكائنات ومعايرة الكاميرات عالية الدقة متواليات تستخدم لعلاج الطبغرافية المشاريع استناداً إلى استخراج التلقائي من نقطة من تقاطعات السماح نا ودقة عرض ثلاثي الأبعاد. أشكال مجسمة للكاميرات، وبعد معايرة، تقدم حلولاً مثيرة جداً للاهتمام لكثافة السطح النمذجة باستخدام فإنه...

لتصور للنماذج اللازمة لجعل تظهر خصائص الكائن، ولذلك فإننا نقترح استخدام الحلول المتاحة في البرنامج مقارنة سحابة (شركة كهرباء فرنسا، مفتوحة المصدر). وأخيراً، وقد أنشأنا دراسة جدوى للمسح التصويري في المقاييس الصناعية وتحليل إمكانياتها للكائنات (البدائية)، رد 3D سطح وحجم. دقة نسبية المتضررة متغير بين 3-10 و 6-10 حجم الكائن الذي يتم قياسه. الطابع المعقد للكائنات في هذه الصناعة يتطلب استراتيجيات وتنفيذ نظم مراقبة إطلاق النار. والمعايرة والتشغيل الكامل لقياس الطبغرافية في نظم بيئة صناعية السماح بتحسين الجودة الشاملة، مع مراعاة مدى اكتمال ودقة هندسية.

الكلمات الرئيسية: المسح التصويري، والمثال، والمقاييس الأوزان، DLT، التكتيف.

Abréviations

Abréviations	Signification
DLT	Direct Linéaire Transformation
SMP	Système de Mesure Photogrammétrique
ZOD-TOD	Zero Order Data – Third Order Data
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
SIG	Système d'Information Géographique
FTP	Fichier Topométrique Portuaire
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
JCGM	Comité commun pour les guides en métrologie
BIPM	Bureau international des poids et mesures
ISO	Organisation internationale de normalisation
OIML	Organisation internationale de métrologie légale
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
PA	Points d'appuis
PC	Points de contrôles
PMS	PhotoModeller Scanner

Nomenclature

Variable	Signification
x,y	Coordonnées images
XYZ	Coordonnées objet
X0Y0Z0	Coordonnées du centre perspectif
R, k, λ	Rotation, facteurs d'échelle
bx by bz	Composants de la base
x',y'	Coordonnées clichés corrigés de la rotation
P _{l0}	Parallaxe linéaire longitudinale de la référence
H ₀	Eloignement de référence
P _{li} , Δ P _{li}	Parallaxe linéaire longitudinale de i et différence de parallaxe / référence
H _i , Δ H _i	Eloignement et différence d'éloignement de i / référence
B	Base terrain
c, r	Distance focale-principale ; distance radiale
L _i	Paramètres de la transformation DLT
k ₁ , p ₁ ,p ₂	Coefficients de distorsion
dk ₁ , dp ₁ ,dp ₂	Valeur de l'interpolation linéaire sur les paramètres
A,B,C,D	Matrices du traitement numérique
T _x ,T _y ,T _z	Translations dans le repère navire
V	Vecteur des résidus des traitements par moindre carrées

Liste des figures

Figure 1a : formation de l'image.....	p18
Figure 1b : les distorsions radiales	p18
Figure 1c : les distorsions tangentielles.....	p18
.....	
Figure 1.1 : système analogique Wild B9 et stéréocomparateur	p23
Figure 1.2: système analytique planicomp P33.....	p24
Figure 1.3 : système digital KLT	p25
Figure 1.4 : photogrammétrie industrielle	p26
Figure 1.5 : couple stéréoscopique à l'échelle de maquette de brise lame.....	p27
Figure 1.6 : couple stéréoscopique à l'échelle de maquette de mole.....	p27
Figure 1.7 : aménagement hydroélectrique.....	p28
Figure 1.8 : bases géométriques de la photogrammétrie.....	p29
Figure 1.9 : bases de la géométrie stéréoscopique	p30
Figure 1.10 : organigramme kasser	p34
Figure 1.11 : organigramme Frédérique	p35
Figure 1.12 : condition de coplanarité.....	p39
Figure 1.13 : parcours laser	p42
Figure 1.14: mesure des différentes phases	p42
Figure 1.15 : mesure par triangulation	p43
Figure 1.16 : mesure des deformations	p45
Figure 1.17 : description des objets	p50
Figure 1.18 : digitalisation d'un presseur	p52
Figure 1.19 : processus en métrologie	p53
Figure 1.20 : orientation externe	p54
Figure 1.21 : contrôle 3D d'une pièce	p56
Figure 1.23 : trace de courbe	p57
Figure 1.24 : courbe spline et catmut	p58
Figure 1.25 : organigramme d'une démarche CAO.....	p59
.....	
Figure 2.1 : étapes de modélisations.....	p69
Figure 2.2 : projet avec un appareil digital.....	p69
Figure 2.3 : étapes de projections.....	p69
Figure 2.4 : vue d'ensemble des différentes projections.....	p70
Figure 2.5 : géométrie avec projection optique.....	p72
Figure 2.6: entités géométriques des images simples doubles et triples.....	p76
Figure 2.7 : éléments caractéristiques d'une photographie.....	p78
Figure 2.8: image d'une photographie inclinée : éléments de base.....	p79
Figure 2.9 : vue horizontale et verticale.....	p79
Figure 2.10 : notation des différents repères.....	p81
Figure 2.11: système de coordonnées sur la matrice CCD.....	p83
Figure 2.12: camera projective et modèle sténopé.....	p83

Figure 2.13: camera orthographique.....	p83
Figure 2.14: camera orthographique à l'échelle.....	p83
Figure 2.15: modèle sténopé et système de coordonnées.....	p84
Figure 2.16: cas d'un couple stéréoscopique normal.....	p89
Figure 2.17: perspective d'un point 3D.....	p90
Figure 2.18: exemple d'échantillonnage avec des primitives simples.....	p91
Figure 2.19: erreur de déviation a partir d'un maillage.....	p91
Figure 2.21 : image des crêtes et des blobs.....	p94
Figure 2.20 : mode maillé d'une image.....	p91
Figure 2.22 : paramétrisation d'un plan en coordonnées cylindriques.....	p95
Figure 2.23 : descripteurs des points d'intérêt.....	p96
Figure 2.24 : phases de traitement global.....	p98
Figure 2.25 : reconstruction des points de la scène 3D et phase qualité.....	p101
.....
Figure 3.1 : organigramme de traitement.....	p109
Figure 3.2 : processus de traitement.....	p111
Figure 3.3 : appareil de prise de vues Kodak easyshare CX7300.....	p112
Figure 3.4 : schéma de prise de vues.....	p112
Figure 3.5 : écarts en précision relative.....	p116
Figure 3.6 : contrainte géométriques en stéréoscopie.....	p118
Figure 3.7 : schéma de principe.....	p120
Figure 3.8 : cibles, camera canon, mire A0.....	p124
Figure 3.9 : acquisition de la scene du labotopo.....	p124
Figure 3.10 : configuration des stations et des cibles.....	p125
Figure 3.11: courbe de distorsion focale 20mm.....	p125
Figure 3.12: courbe de distorsion focale 28mm.....	p125
Figure 3.13 : configuration spatiale camera/cibles.....	p126
Figure 3.14 : organigramme du processus de traitement.....	p128
Figure 3.15 : résultats du calcul 3D labo topo.....	p129
Figure 3.16 : résultats du calcul 3D wild B9.....	p130
Figure 3.17 : résultats du calcul 3D pièce mécanique.....	p130
Figure 3.18 : intersection des rayons homologues : écart.....	p130
Figure 3.19 : intersection des rayons homologues pour la pièce.....	p131
Figure 3.20 : precision d'intersection pour chaque projet.....	p132
Figure 3.21 (a,b,c) : distorsions des cameras.....	p134
Figure 3.22 (a,b,c) : blocs et restitution des trois tests.....	p137
Figure 3.23 : superposition lasergrammétrie/photogrammétrie.....	p138
Figure 3.24 : calculs 3D comparatifs sous cloudcompare.....	p138
Figure 3.25 : démarche globale PMS.....	p140
.....
Figure 4.1 : schéma conceptuel.....	p149
Figure 4.2 : processus de construction.....	p151
Figure 4.3 : construction par groupe.....	p151

Figure 4.4 : système de coordonnées Navire.....	p154
Figure 4.5 : influence de décalage.....	p156
Figure 4.6 : localisation des points durs sur une nappe.....	p157
Figure 4.7 (a, b) : vues sur le port d'Oran.....	p159
Figure 4.8 : plan du port.....	p160
Figure 4.9 : cliché aérien sur une partie du port.....	p160
Figure 4.10 : MNT et intégration CAO.....	p161
Figure 4.11 : fichier topométrique portuaire et intégration photogrammetrique.....	p161
Figure 4.12 : amplification des déformations.....	p162
Figure 4.13 : relevé des points durs.....	p165
Figure 4.14 : orientations préalables dans le système navire.....	p166
Figure 4.15 : répartition idéale de douze points de calage.....	p167
Figure 4.16 : systèmes de références (mesure et contrôle).....	p168
Figure 4.17 : différentes phases de traitements.....	p169
Figure 4.18 : application sur machine outil de Sift.....	p170
Figure 4.19 : maillage et restitution fraiseuse.....	p170
Figure 4.20 : zone tampon pour un objet plan.....	p172
Figure 4.21 (a, b, c) : histogrammes sur 3 tests	p172
Figure 4.22 : projection et triangulation du sujet plan.....	p174
Figure 4.23 : restitution et calcul du plan moyen.....	p174
Figure 4.24 : organigramme global de Ransac.....	p175
Figure 4.25 : restitution face avant et arrière du B9.....	p176
Figure 4.26 : disposition des centres perspectifs en bande.....	p176
Figure 4.27 : restitution laser de Wild B9.....	p176
Figure 4.28 : courbes comparatives photogrammetrie/lasergrammetrie.....	p177
Figure 4.29 : orientation externe à partir de plusieurs faisceaux.....	p178
Figure 4.30: définition du prototype.....	p179
Figure 4.31 : grille d'intervention.....	p180
Figure 4.32 : niveaux fonctionnels et intégration CAO.....	p181
Figure 4.33 : organigramme MCD « métadonnées ».....	p183
Figure 4.34 : système de contrôle photogrammetrique.....	p184
.....
Figure 5.1 : coque du « Janus ».....	p188
Figure 5.2 : préparation et marquage de la coque.....	p189

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : comparaison de scanner laser.....	p43
Tableau 2.1 : différents modèles d'appareils	p75
Tableau 2.2 : notation des entités homogènes et Euclidiennes.....	p76
Tableau 2.3 : Notation des entités géométriques de base en 2D et 3D.....	p76
.....	
Tableau 3.1 Résumé des résultats pour les quatre applications.....	p110
Tableau 3.2 : Comparaison 14/16 paramètres.....	p113
Tableau 3.3 : Resultats comparatifs sur le positionnement.....	p114
Tableau 3.4 : Paramètres d'analyse.....	p115
Tableau 3.5 : tableau comparatif des précisions relatives obtenues.....	p115
Tableau 3.6 : caractéristiques système de prises de vues.....	p123
Tableau 3.7 : caractéristiques des tests.....	p123
Tableau 3.8 : Résultats des éléments internes de l'étalonnage.....	p125
Tableau 3.9 : Ecart obtenus sur les points d'appuis.....	p126
Tableau 3.10 : écarts selon chaque composante pour chaque test.....	p126
Tableau 3.11 : différences distances entre mesurées et calculées.....	p127
Tableau 3.12 : Affinement du calcul 3D pour le deux tests.....	p127
Tableau 3.13 : Quantitatif des erreurs image pour test 1.....	p128
Tableau 3.14 : Quantitatif des erreurs image pour test 2.....	p129
Tableau 3.15: Quantitatif des erreurs image pour test 3.....	p129
Tableau 3.16 : Tableau résultat des traitements.....	p129
Tableau 3.17 : Résultats du calcul 3D.....	p138
Tableau 3.18 : Résultats comparatifs Lasergrammetrie et Photogrammétrie.....	p139
.....	
Tableau 4.1 : caractéristiques des spécialités.....	p150
Tableau 4.2 : Résultats de la 'DLT' pour le couple 118-119.....	p161
Tableau 4.3 : Notation des paramètres.....	p164
Tableau 4.4 Table de distribution χ^2_2 selon le degré de liberté et la valeur de la probabilité.....	p 174
Tableau (4.5) Tableau comparatif lasergrammetrie / photogrammétrie.....	p177
Tableau 4.6 : phases photogrammétrie.....	p179
Tableau 4.7: Tolérances photogrammétrie.....	p181
Tableau 4.8: Synthèse des deux expériences et tolérances.....	p182

Table des matières

<u>REMERCIEMENTS</u>	2
<u>DEDICACES</u>	3
<u>RESUME</u>	4
<u>ABSTRACT</u>	5
<u>ABREVIATIONS</u>	7
<u>NOMENCLATURE</u>	8
<u>LISTE DES FIGURES</u>	9
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	12
<u>TABLE DES MATIERES</u>	13

Introduction générale	16
------------------------------------	----

Chapitre I : outils et synthèse bibliographique	21
1.1 Introduction.....	22
1.2 Historique.....	23
1.3 Applications de la photogrammetrie numerique.....	36
1.4 Synthèse des applications en industrie.....	48
1.5 Conclusion du chapitre1	63

Chapitre 2 : la modélisation photogrammétrique	65
2.1 Introduction.....	66
2.2 Modélisation des cameras numériques.....	68
2.3 Géométrie de base de l'image	74
2.4 Approche non linéaire	82
2.5 Approche linéaire	86
2.6 Opérations de photogrammétrie numérique.....	87
2.7 Qualité des traitements photogrammetriques.....	97
2.8 conclusion chapitre 2.....	100

Chapitre 3 : mise en œuvre et application	103
3.1 Introduction	104
3.2 Processus de la méthode DLT : étape ZOD.....	107
3.3 Photogrammétrie multi image : étape TOD.....	118
3.4 Synthèse et traitements en photogrammétrie rapprochée.....	133
3.5 Conclusion du chapitre 3.....	142

Chapitre 4: étude de faisabilité dans le génie maritime	144
4.1 Contexte objectif	145
4.2 Métrologie dimensionnelle.....	146
4.3 Présentation du processus de construction des navires	150
4.4 Utilisation de la photogrammétrie et analyse.....	156
4.5 Photogrammétrie et procédés.....	159

4.6 Définition d'un système de mesure photogramétrique.....	164
4.7 Conclusion chapitre 4.....	187
Conclusion générale	188
Dossier Annexes	200-250

Introduction générale

Introduction générale

Depuis toujours, la recherche de méthodes de mesure fiables pose un problème de définition et d'utilisation de moyens appropriés pour une analyse et une connaissance meilleure de l'objet. Avec l'avènement des techniques nouvelles de mesures telles que les méthodes optiques, il est difficile d'opter pour telle ou telle approche. Il est nécessaire, alors de définir un environnement de travail propre aux spécificités des besoins. La mise en œuvre de mesures par procédés optique dans le domaine de la métrologie dimensionnelle en milieu industriel est de plus en plus fréquente. La préoccupation principale commune est l'assurance de la qualité de la mesure, du fait de son existence contractuelle et de sa nécessité technique.

L'utilisation de la photogrammétrie en industrie n'est pas un phénomène récent. En effet, depuis le début des années 1970 l'application de cette technique s'étend de plus en plus à la construction. Cette méthode a le mérite de pouvoir acquérir instantanément des informations et utilise des photographies différentes d'un même objet. La photogrammétrie permet d'atteindre des précisions de l'ordre du cent millième de la plus grande dimension de l'objet à mesurer [Gava, 1998].

La restitution photogrammétrique en cartographie topographique est considérable, ce qui a permis de nouvelles innovations technologiques grâce à la vision par ordinateur. Si le dialogue avec l'ordinateur se limite à quelques commandes lors de l'orientation des clichés, la restitution nécessite une analyse comparative poussée entre les photographies et l'espace objet [Kölbl, 1990]. Lors du congrès de photogrammétrie à Kyoto; les firmes Kern, Matra et Toko ont présenté des systèmes confortant l'observation stéréoscopique. Malheureusement, la qualité d'image et leurs performances n'atteignaient pas encore celle des reconstituteurs analytiques [Kölbl, 1990].

Par ailleurs, la photogrammétrie rapprochée s'est développée grâce à l'imagerie numérique et au processus de traitements d'images. Les nouvelles perspectives de la photogrammétrie reposent sur la recherche d'algorithmes et de leurs applications. Un grand nombre de cameras non métriques et métriques aux caractéristiques et aux coûts divers sont utilisables [Gruen, 1992]. Le niveau de précision est poussé au point d'atteindre $0.2 \cdot 10^{-6}$ à 10^{-6} grâce à l'utilisation de systèmes hybrides [Fraser, 1991]. Des stations photogrammétriques tel que la station DIPS permet un champ d'application très étendu. Basées sur une approche modulaire, ces systèmes sont extensibles aux nouvelles technologies [Gruen, 1992].

La mise en perspective exacte d'un faisceau ou d'un ensemble de faisceaux par rapport au sujet est fondamentale en photogrammétrie. Les éléments de cette étape sont la modélisation géométrique entre l'espace objet et l'espace image.

L'analyse d'image nécessite la compréhension du phénomène physique qui les interprète. L'extraction d'informations à partir d'images passe souvent par une modélisation mathématique la plus fidèle possible de ce phénomène physique. Le modèle de formation des images le plus souvent utilisé est le modèle sténopé, schématisé sur la figure (1). Ce modèle est constitué d'un point principal et d'un plan de projection appelé plan image.

La ligne perpendiculaire au plan image et passant par le point principal est appelée l'axe principal. Chaque point de la scène est projeté par rapport au point principal dans l'image sur le plan de projection. Ce modèle perspectif s'exprime algébriquement par une matrice (3×4) correspondant à une application de l'espace projectif P3 dans P2. Cette modélisation mathématique du processus *de*

formation d'images est linéaire lorsque les coordonnées homogènes sont utilisées. De cette propriété, dérive des conséquences géométriques telles que la géométrie épipolaire reliant deux images.

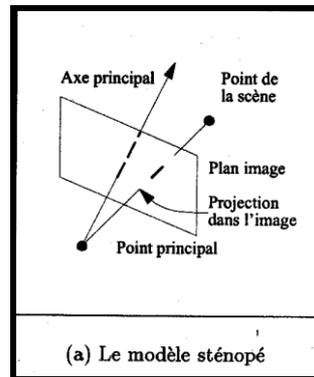


Figure 1a : Principe de la formation d'image

Un système d'acquisition d'images suit ce modèle lorsque les lentilles utilisées et leur montage sur l'objectif sont parfaits. Dans le cas contraire, des distorsions optiques peuvent apparaître. Il existe deux types principaux de distorsion. Les distorsions radiales dues au fait que les lentilles ne sont pas parfaitement mince, et qu'elles présentent des défauts de courbure. Leur effet est de déplacer les points images symétriquement au centre de l'image.

Les distorsions tangentielles apparaissent lorsque l'assemblage des lentilles sur l'objectif n'est pas parfait (lentilles non alignées, non positionnées perpendiculairement à l'axe principal). Elles sont souvent accompagnées par des distorsions radiales.

En plus de ces distorsions, des aberrations peuvent se glisser sur les bords des lentilles [Slama,1980]. Les figures (1b) et (1c) montrent les effets des distorsions radiales et tangentielles. Chaque segment montre la position initiale d'un point dans une image conforme au modèle sténopé (extrémité représentée par une croix) ainsi que sa position lorsque des distorsions optiques sont présentées.

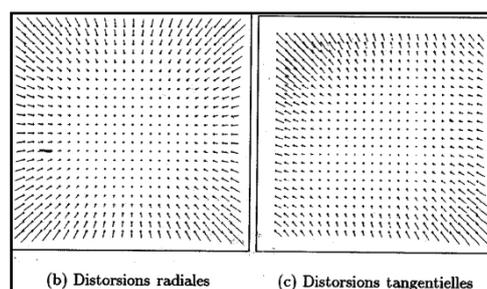


Figure (1b) et (1c) Les distorsions

Très vite, le modèle sténopé a été complété afin de mieux représenter le phénomène physique de la formation des images. Les photogrammètres se sont penchés sur ce problème en ajoutant aux paramètres internes de la camera des paramètres prenant en compte les distorsions radiales et tangentielles [Brown,1966][Faig,1975][Beyer,1992a]. L'étalonnage de caméra est alors une nécessité pour la définition des objets et leur géométrie.

D'un autre côté, la photogrammétrie multi-image décrite chez RolleiMetric permet un traitement simultané de données qualitatives et quantitatives [Daguillon,1996]. Plusieurs prises de

vues permettent une restitution exacte de l'objet. Sachant qu'il est possible de combiner plusieurs perspectives d'un objet, la recherche de modèles permettant une bonne exactitude et un bon rendement des opérations photogrammétriques s'imposent. Il est nécessaire alors, de dépasser le cadre de la photogrammétrie classique en définissant de nouveaux modèles d'acquisition et de reconstitution. Une configuration spatiale entre l'acquisition et le traitement des perspectives reste à définir.

Les applications visées par cette méthode relèvent aussi de l'aéronautique, de l'aérospatiale, de l'architecture et de la construction [Legac,1994]. Par exemple, caractériser une section d'une aile d'Airbus avec une précision de 0,15 mm sur un espace de 27m³, caractériser en géométrie et dimension un satellite avec une précision de 0,08 mm dans un volume de 25 m³ ou déterminer les positions et orientations d'une bride de tuyauterie avec une précision de 0,06 mm dans un espace de 0,25 m³. Dans le domaine du génie civil et de l'architecture certains travaux ont suscité l'intérêt, notamment les logiciels Typhon et Arpenteur développés au laboratoire de photogrammétrie à l'Insa Strasbourg [Grussenmeyer,1998].

Malgré l'arrivée des caméras de type couplage de charges (CCD) à haute résolution et des calculateurs portables puissants, cette technique ne fournit pas de résultat en temps quasi-réel. De plus, elle nécessite plusieurs angles de vue pour recouvrir l'information tridimensionnelle. Devant cet état de fait, quel système photogrammétrique est-il possible d'adopter pour satisfaire le compromis du coût à celui de la qualité des opérations. En fait, à travers cette question il se dégage une multitude de points à éclaircir et à développer pour pouvoir obtenir une réponse cohérente et fiable en perception tridimensionnelle par voie photogrammétrique.

Dans le domaine de la vision industrielle, la production avec une meilleure rentabilité et une réactivité d'un niveau de qualité constant, a amené les concepteurs à automatiser leurs chaînes de production et à standardiser leur processus de fabrication à l'échelle universelle. Le contrôle qualité et l'optimisation de production sont par conséquent devenus les priorités des décideurs industriels. L'application des techniques de vision artificielle à des problématiques de production présentent plusieurs avantages dont l'adaptation aux environnements difficiles.

Les questions relatives à un Système de Mesure Photogrammétrique peuvent se résumer de la façon suivante :

1. Quel est l'impact de la photogrammétrie d'aujourd'hui ?
2. Quelle est la limite entre la photogrammétrie et les processus de traitement d'image ?
3. Comment choisir les méthodes pour une telle ou telle configuration d'objets ?
4. Comment définir le système de mesure photogrammétrique ?

La mise en place d'un Système de Mesure Photogrammétrique (SMP) est actuellement une approche permettant de trouver un bon compromis entre coût et rendement des opérations. Ainsi, le redressement ou l'orthophotographie numérique sont des solutions très appréciables pour certains cas de la restitution. Une recherche algorithmique et mathématique au sens théorique doit être établie pour extraire les conditions géométriques satisfaisantes et dégager un prototype pour la configuration du SMP. Les transformations projectives et la théorie des invariants apportent des contraintes de qualité pour la photogrammétrie. La réponse aux questions précédentes passe par les étapes suivantes :

1. Recherche de solutions de type $[\sum \Delta x, \sum \Delta y] = 0$ ou $\min(V^t W V) = 0$
2. Définition d'un SMP : Ensembles d'exploitation photogrammétrique.
3. Correction des Points d'appuis et Points de contrôle : Analyse des distorsions.
4. Correction de l'image : Mise en perspective exacte.
5. Application au SMP : Restitution et reconstitution de l'objet.

Dans ce travail l'étude de la géométrie projective et la recherche d'un bon rapport base / éloignement est une étape principale permettant de préparer la plateforme du système.

La définition de critères d'optimisation pour l'élaboration d'un processus combinatoire est l'objet de l'étude aux étapes 3 et 4, cela permettra de rassembler toute l'information utile à la modélisation et à l'exploitation en photogrammétrie. Le Système de Mesure Photogrammétrique (SMP) est une plateforme qui prend comme modèles mathématiques les résultats de cette recherche. Nous rappelons que le (SMP) doit prendre en compte les objets éloignés (300m) ainsi que ceux rapprochés (quelques mètres).

Le plan de cette thèse est organisé de la façon suivante :

Un bref aperçu est établi sur l'historique de la photogrammétrie et de la photogrammétrie rapprochée dans son évolution sur ses aspects pratiques et théorique dans le chapitre 1. Au chapitre 2, nous traitons des problèmes de la modélisation en photogrammétrie ainsi que sur la théorie de la prise de vues et des aspects optiques. Ce chapitre aura pour objectifs le développement et les nouvelles approches théoriques de la photogrammétrie rapprochée. Les traitements photogrammétriques feront l'objet du chapitre 3 qui regroupera quelques formes d'applications pour l'étude des aspects pratiques objets rapprochés. Par rapport à un marché logistique en constante évolution, il est nécessaire de voir les adaptations possibles à courte distance. Ainsi la conception d'un SMP est proposée pour l'actualisation de l'approche photogrammétrique.

Une étude de faisabilité en vision industrielle et les perspectives d'une telle plate-forme dans le domaine de la métrologie industrielle feront l'objet du chapitre 4. Les études de retro conception et de restitution d'objets 3D à l'aide des outils de la CAO seront largement débattues dans cette partie. La conclusion générale couronne ce travail.

Chapitre 1
Outils et synthèse bibliographique

1.1-Introduction

La photographie est un processus qui convertit le monde réel tridimensionnel en des images à deux dimensions. L'appareil photo est un dispositif qui réalise cette transformation. La photogrammétrie permet de renverser le processus photographique décrit ci-dessus. Elle convertit les images planes d'un objet en coordonnées à trois dimensions par rapport à un système de référence.

Cependant, puisque l'information est perdue dans le processus photographique, on ne peut pas reconstruire l'objet à trois dimensions complètement avec juste une seule photographie. Comme minimum, il y'a besoin de deux différentes photographies pour reconstruire l'objet à trois dimensions. Si le processus était parfait, les deux photographies sont suffisantes pour reconstruire parfaitement l'objet à trois dimensions. Malheureusement, le processus photographique et la mesure ne sont pas parfaits et la reconstruction de l'objet réel en trois dimensions est donc imparfaite.

Cependant, plusieurs photographies peuvent être prises et il est possible d'employer des informations supplémentaires pour améliorer le processus. Les coordonnées à trois dimensions sont le produit de mesures de photographies multiples et le résultat du processus photogrammétrique.

Les méthodes d'acquisition photogrammétriques ont évoluées sur les plans de modèles de restitution, de matériels et de processus de traitement. Bien que le problème majeur reste la restitution des objets en trois dimensions, le processus photogrammétrique est une technique qui se développe de plus en plus grâce aux méthodes numériques liées à la vision par ordinateur et à la photographie numérique. Depuis toujours le produit final du photogrammètre est un document projeté orthogonalement pour représenter les trois dimensions X et Y pour le plan et Z pour l'altitude ou l'élévation. Si cette démarche est suffisante pour l'analyse géométrique des sujets (terrain topographique par exemple), elle ne peut être valable dans le cadre d'applications complexes telles que la trajectographie, le déplacement des objets et la simulation de phénomènes physiques.

Les photogrammètres ont de tout temps approché la problématique de la mesure en considérant la perspective centrale comme élément fondamental de la géométrie projective. Sachant que l'unité fondamentale est la perspective ou faisceaux, on doit rechercher des modèles photogrammétriques ayant des solutions proches de la réalité. Les étapes d'un tel processus de modélisation orientent la réflexion vers l'étude des phases de l'évolution de cette technologie qui s'apparente trop souvent aux méthodes de traitement de l'image.

L'objectif principal de cette synthèse est d'établir un inventaire des méthodes photogrammétriques utilisées aussi bien dans l'aérien que dans le terrestre. Ce travail fera l'objet d'une étude pour extraire une modélisation paramétrable dans des situations difficiles.

Il faut reconnaître que la photogrammétrie développe une industrie lourde pour une organisation productive dans le domaine de la construction. Le processus de la photogrammétrie analogique intègre toutes les opérations effectuées entre le moment de la prise de vues et celui de la restitution sur des appareils optico-mécaniques. On parle de photogrammétrie analytique lorsque le processus de restitution est assisté par ordinateur. Une troisième possibilité consiste à utiliser la photogrammétrie numérique où l'intensité lumineuse est enregistrée par des moyens informatiques [Krauss,1998]. A cet effet, les trois phases importantes du processus photogrammétrique se résument comme suit :

- Le processus analogique.
- Le processus analytique.
- Le processus numérique.

L'analyse des différents facteurs pour l'utilisation des méthodes photogrammétriques permettra l'édification d'un tableau comparatif illustrant des modèles de systèmes performants qui touchent essentiellement la métrologie 3D dans un contexte général.

1.2 Historique

1.2.1 Photogrammétrie analogique

Les premières applications de la photogrammétrie furent réalisées en France par l'officier Aimé Laussedat (1819-1904) qui l'utilisa pour ses levés topographiques à partir de 1849. A partir de 1858 l'architecte allemand A.Meydenbauer utilisa la photographie comme moyen de levé de plans de monuments. De 1870 à 1900 des levés par exploitation graphique de photographies terrestres furent exécutés en Italie, en Autriche, en Allemagne en France et au Canada. En 1936, il a été attribué un brevet à Robert Ferber aux Etats Unies, pour le Gallus-Ferber Photorestituteur qui était le premier instrument de production d'orthophoto. Bien qu'il n'ait pas été beaucoup employé parce qu'il n'était pas économique [Laurent, 1968], la table traçante est composée d'une projection anaglyphique qui a été employée pour soulever ou abaisser un des deux projecteurs. Le projecteur mobile n'a pas eu de filtre comme composant. Aux Etats-Unis, la fente de Russel Kerr a apporté des contributions significatives dans l'instrumentation photogrammétrique.

En 1956 il a été attribué un brevet pour la réalisation d'un projecteur ellipsoïde de réflecteur dédié au traçage stéréo-photogrammétrique des cartes" connue sous le nom de l'Er-55. Ces cartes étaient employées par le département géologique américain (US Geological Survey) durant les années 1950 et les années 1960 [Radlinski1985]. Cette table traçante a accepté le langage figuré stéréoscopique non seulement de la photographie verticale mais aussi de la photographie oblique et transversale convergente. En 1959 il a été attribué un brevet pour un orthoscope. Cet instrument a produit la photographie avec le même niveau d'exactitude que celui de la carte pour un coût moindre. Les fabricants d'instrument ont eu des influences significatives sur des développements photogrammétriques. La société Kern d'Aarau, en Suisse, a été fondée en 1819 et a commencé la fabrication des instruments photogrammétriques pour présenter le très populaire stéréorestituteur analogique PG2. Plus de 700 de ces instruments ont été vendus dans le monde entier.

En 1980, Kern a présenté le stéréorestituteur analytique DSR1. La société Heerbrugg Wild a été fondée en 1921 et est devenue la plus importante entreprise de fabrication des instruments précis en optique et en stéréorestitution. Leurs stéréorestituteurs A8 et B8 Aviograph étaient des instruments analogiques très réussis avec plus de 2.000 unités vendus dans le monde. En 1988, Kern et Wild ont fusionné pour former par la suite la société Leica en 1990. En utilisant l'expertise des deux compagnies, le système analytique SD 2000, a été lancé en 1991. En 2001, Leica a acquis la société d'azimut, les systèmes d'ERDAS, et LH systèmes donnant à Leica les possibilités d'offrir des progiciels de systèmes LIDAR, de télédétection, de traitement d'image, et des possibilités numériques des stéréorestituteurs.

Les développements historiques discutés précédemment étaient orientés vers des techniques photogrammétriques terrestres et aériennes essentiellement. Un des défis uniques faisant face à la communauté scientifique était une compréhension de la vie et des dispositifs sous l'eau. Dimitri Rebikoff né en 1921 à Paris, est crédité d'un certain nombre de travaux pilotes en photographie sous-marine comprenant le flash électronique, les appareils-photo de film et la photogrammétrie sous-marine. En collaboration avec le Professeur Ivanoff, M. Le Grad et M. Cuvier, il développe des objectifs photogrammétriques très précis de correction dans des applications sous-marines.



Figure 1.1 Système analogique B9 et stéréocomparateur du laboratoire MAPE

1-2-2. Photogrammétrie Analytique

Au début des années 50, Everett Merritt a édité des travaux sur la photogrammétrie analytique [?]. Il a travaillé pour le centre photographique naval d'interprétation à Washington, C.C et a développé une série de solutions analytiques pour le calibrage d'appareil photo, le relèvement dans l'espace, l'orientation interne, relative et absolue d'un couple stéréoscopique. La prolongation finale pour la commande analytique [Doyle,1964]. Tout en partageant des similitudes au travail de Church, l'approche de Merritt était plus complète, manipulant un certain nombre de problèmes différents. L'invention de l'ordinateur par Zure en Allemagne en 1941 et indépendamment par Aitken aux USA en 1943 a permis une avancée significative aux développements photogrammétriques après 1950 [Konecny,1985]. Elle est responsable du troisième cycle de développement de la photogrammétrie analytique.



Figure I.2 Système analytique – Planicom P33 au laboratoire MAPE

En 1953, le Dr. Helmut Schmid, au laboratoire balistique de recherches, Aberdeen, le Maryland, a développé les principes de la notation de matrice employée en multiposte pour la photogrammétrie analytique. Les dispositifs importants mis en œuvre ont concerné, la correction rigoureuse par la solution des moindres carrés, la solution simultanée pour plusieurs clichés, et une étude complète sur la propagation des erreurs [Doyle,1964].

Du Conseil "Recherche" national Canadien, G. H. Schut a employé le concept de coplanéité pour la triangulation analytique [Schut,1955]. Etant un fervent défenseur de l'ajustement simultané du bloc, Schut identifiait les limitations informatiques de ce processus et a donc développé un ajustement par bandes. Ceci a été réalisé par le calcul pour l'orientation relative de chaque photographie une première fois. Après, chaque photographie a été orientée le long de la bande et les coordonnées dans le système bande ont été ajustées par rapport au terrain. Brown Duane est également responsable de travaux en photogrammétrie analytique tout en collaborant avec Schmid et plus tard dans l'industrie privée [Doyle,1964].

En 1961, Brown Duane rejoint Instrument Corporation de la Floride et deux ans après a formé le Duane Brown Analytical System, DBAS Inc. [Doyle,1964] ; [Brown,1971]. Il s'est établi en tant que pionnier en photogrammétrie à courte distance et en photogrammétrie analytique. Brown a continué à raffiner l'ajustement en bloc pour les grands projets photogrammétriques en incluant l'autocalibration. Il a également travaillé sur les satellites Doppler de positionnement et les satellites pour la photogrammétrie. Le DBA a développé un appareil photographique plan de grand format. En 1977, Brown fonda les services géodésiques GSI (Geodetic Survey Incorporation) par son achat de la division photogrammétrique et géodésique des services de la DBA. En 1979, il lui a été délivré un brevet pour la plateforme du réseau qu'il a développé. GSI a continué des développements en photogrammétrie industrielle avec le système STARS qui a incorporé l'appareil photo CRC-1 commandé par microprocesseur, le monocomparateur et un logiciel pour le verrouillage du système.

L'aerotriangulation conventionnelle exige une chambre métrique avec les paramètres d'étalonnage d'appareil photographique. Ceci exclut l'utilisation des appareils-photo non-métriques et disponibles immédiatement pour le travail précis. Houssam Mahmoud Karara avec Y.I. Abdelaziz, ont développé la Transformation Linéaire Directe (DLT) en 1971. Identifiant qu'il y a un certain nombre d'applications potentielles avec les appareils photographiques non-métriques. Il a été prouvé une manière d'exécuter une transformation directe entre des coordonnées de l'objet et celles faites au comparateur. Les données d'étalonnage de l'appareil photographique ne sont pas exigées, la transformation du système comparateur aux coordonnées des photographies et des approximations initiales des inconnues permettent une configuration globale du système de calcul. La méthode basée sur la DLT a employé deux polynômes comme principe de cette transformation. Ces polynômes ont été dérivés de l'équation de colinéarité et de la transformation affine des coordonnées comparateurs [Wolf, 2001].

1.2.3 Photogrammétrie digitale

Un des pionniers de la photogrammétrie numérique était Gilbert Louis Hobrough. Sa carrière photogramétrique a commencé par son emploi au Photographic Survey Corporation Ltd. En 1951, ses contributions initiales à la science ont comporté le développement d'un imprimeur électronique [Anone, 2003]. Il a également construit un enregistreur aéroporté de profil. Cet instrument a exigé un système de radar pour mesurer l'onde de l'avion à la terre avec une exactitude d'environ 0.40m et un baromètre de référence avec une exactitude comparable.

En 1957, Hobrough a démontré son concept de corrélation d'image sur une table traçante de Kelsh. En raison de la technologie, le processus de corrélation était analogue où le matériel a été utilisé pour comparer les niveaux gris du figuré. Ce développement a mené à la création du B8 Raytheon Wild Stéréomat. Par la suite Hobrough a travaillé sur le stéréoscope électronique d'enregistrement automatique (ARES). Le but de cet instrument était de corréler la photographie à haute résolution pour la reconnaissance à haute précision et permettre une mesure plus précise des états au sol [Anone,2003].

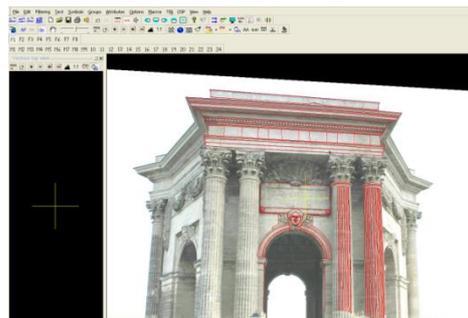


Figure I.3 : Le système digital en photogrammétrie rapprochée (KLT)

1.2.4 Premières applications en photogrammétrie rapprochée

La photogrammétrie terrestre peut être considérée comme le précurseur de la photogrammétrie aérienne moderne. En effet, les principes de la mesure stéréoscopique [Pulfrich, 1900] et de la restitution analogique [Ghosh, 1989] ont été développés pour les besoins de la photogrammétrie terrestre. A l'époque, la principale application de ces méthodes était le lever topographique; de nos jours, la restitution topographique s'effectue presque exclusivement à l'aide de photographies

aériennes, tandis que la photogrammétrie « terrestre » est utilisée pour des tâches diverses dans l'industrie et la technique, par exemple la mesure de précision des engins spatiaux, détermination des déformations d'un objet (surtout si un contact direct est exclu), analyse des courants marins ou des vagues, relevés architecturaux pour la conservation des monuments, etc.

A titre d'exemple, en 1973, Carl Zeiss JENA [Wahl, 1983] proposa aux constructeurs automobiles français un ensemble complet photogramétrique afin de procéder à des essais et travaux en vue d'utiliser le procédé existant (type cartographique) pour des besoins industriels. La Régie RENAULT très sensibilisée et intéressée par cette méthode, détacha du personnel pour s'occuper de travaux comme :

- Des essais de précision,
- Des essais de faisabilité,
- Des essais comparatifs de précision avec différentes machines de mesure tridimensionnelle de grande capacité.

La nécessité de relever des points particuliers sur une pièce en imposant certaines contraintes dues au procédé UNISURF qui permet de définir mathématiquement des surfaces, imposa des modifications du système au point de vue mécanique, électronique et informatique. Ces modifications permirent d'aboutir à un système industriel réel [Wahl1983]. La version industrielle du STECOMETRE (figure I.3) est à commande par manivelles électriques. Tous les déplacements des plateaux de la machine sont mus par des moteurs pas à pas, aussi bien en fonction manuelle qu'automatique commandée par ordinateur. Les commandes par manivelles électriques ont permis de supprimer les liaisons mécaniques entre les manivelles et le système d'entraînement des plateaux. L'ensemble du système photogramétrique RENAULT, comprend trois parties A, B, C, figure (1.4) :

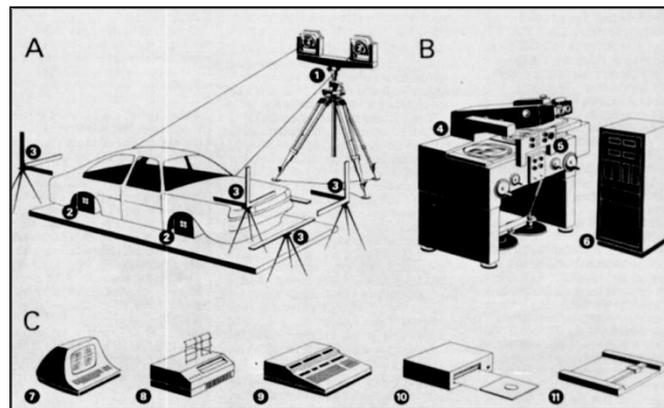
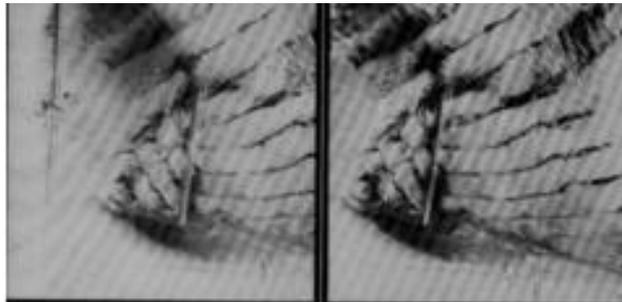


Figure I.4 : Présentation globale d'un système de photogrammétrie industrielle

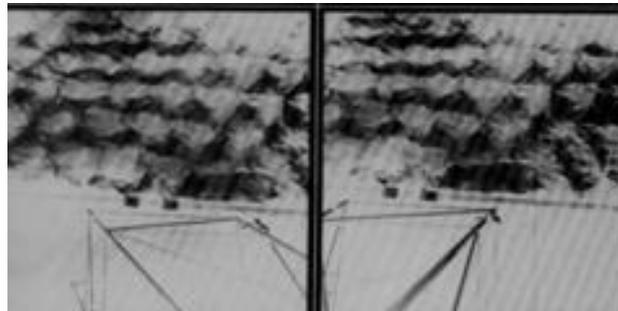
Les entités A, B et C représentent :

- A : La « prise de vues » pour laquelle nous utilisons les chambres photogramétrique UMK 10/1318.
- B : La-partie « restitution » : Cette opération s'effectue avec le STECOMETRE C à commande par manivelles électriques. Sur sa façade un pupitre de commande permet de piloter en mode automatique par l'intermédiaire de joysticks. Un microprocesseur est incorporé au système de manière à rendre celui-ci plus performant.
- C : La partie « traitement » : C'est le traitement des coordonnées machines pour leur transformation en coordonnées 3D pour les fonctions manuelles, ou le traitement inverse pour les fonctions automatiques.

D'autres applications industrielles ont eu des effets positifs en métrologie et en construction afin d'élargir le spectre de la photogrammétrie. L'une de ces applications concerne les études des maquettes de constructions hydrotechniques à l'aide de la photogrammétrie. Une partie importante de ces études est consacrée à la détermination de la caractéristique géométrique de la surface de l'eau qui entoure la maquette de l'ouvrage hydrotechnique. Pour une houle variable excitée artificiellement, des sondes spéciales étaient réparties uniformément sur les modèles étudiés figures (1.5 et 1.6). Toutefois, ces sondes ne permettaient qu'une détection ponctuelle des propriétés de la houle de telle façon qu'une interprétation exempte d'erreurs des résultats d'essai n'était pas assurée. L'intérêt de la photogrammétrie dans ce travail réside dans l'interprétation des données créées et l'incertitude obtenue par ce nouveau principe de mesure [Mucha, 1983].



Figures 1.5a et 1.5b : Partie du couple stéréoscopique à l'échelle d'une maquette de brise-lames.



Figures 1.6a et 1.6b : Couple stéréoscopique à l'échelle d'une maquette de môle (section).

En industrie, la détermination de la capacité d'une retenue hydroélectrique par photogrammétrie permet la mesure de grandeurs dans un projet d'aménagement hydroélectrique. Parmi ces grandeurs, le volume d'eau accumulable dans le réservoir créé par le barrage ou plus précisément l'expression de la surface du plan d'eau en fonction de la cote du niveau est une donnée essentielle. Cette relation est souvent mal connue à la fois pour des raisons techniques et naturelles; D'une part, les levés existants sont parfois de qualité médiocre et la précision planimétrique des courbes de niveau n'est pas toujours suffisante; d'autre part figure (I.7). L'érosion et l'alluvionnement sont susceptibles de faire varier de façon sensible la capacité d'une retenue dans le temps.

Dans ce contexte, il a été envisagé la recherche d'une méthode précise d'évaluation de la surface d'un plan d'eau par exploitation d'une couverture aérienne stéréoscopique. Plus précisément, le problème posé était de déterminer, sur la hauteur de tranche utile d'une retenue, les diverses surfaces délimitées

par des courbes de niveau équidistantes avec une précision relative si possible meilleure que 1/500 pour chacune des surfaces [Nevière, 1966].



Figure I.7 : Aménagement hydroélectrique par voie photogrammétrique

Dans ce même contexte pour des aménagements hydroélectriques concernant la surélévation du niveau formant une intumescence ou bombement, la technique photogrammétrique a été utilisée. En effet, pour assurer la sécurité des ouvrages il est important de connaître les surélévations résultantes maximales correspondant aux crêtes des ondulations qui constituent la tête des intumescences. La restitution de ces courbes a donné des résultats appréciables. La production des plans métrologiques est réalisée par procédés classiques analogiques.

1.2.5-Méthodes, Outils et Matériel

Principes géométriques

Connaître la position spatiale du lieu ou d'un objet où se trouve l'activité industrielle est une préoccupation majeure pour l'homme. La photogrammétrie est un outil spécialement adapté pour lui fournir une réponse à cette problématique. La technique fait appel à l'exploitation de photographies en géométrie descriptive et projective. Si l'exploitation d'une photographie isolée est limitée, on constate que la mise en œuvre de couples stéréo photographiques permet un positionnement précis et rapide de tous les objets qui peuplent un espace déterminé. La stéréophotogrammétrie permet donc l'exploitation d'un modèle réel tridimensionnel d'un objet dont on est chargé d'établir la description métrique avec une certaine précision. Après avoir passé très rapidement en revue la formation d'un modèle au départ de deux photographies (ou gerbes perspectives), on abordera dans ce paragraphe, d'une part les possibilités que devraient offrir les nouvelles caméras numériques et d'autre part l'intérêt que représente l'utilisation de documents épipolaires, notamment dans la recherche de processus de reconnaissance semi-automatique d'objets.

Au moment des prises de vues, les centres optiques occupent une position spatiale bien déterminée et les axes optiques jouissent d'une orientation particulière propre à chaque cliché. Pour reconstruire, au départ des photographies, un modèle spatial tridimensionnel, il est nécessaire de connaître les paramètres de la position spatiale de la caméra lors de chaque prise de vue. Il faut donc déterminer les

coordonnées cartésiennes X, Y et Z du point de vue ainsi que l'orientation de l'axe optique de la photo correspondante. D'un point de vue classique, les étapes sont comme suit :

Orientation interne

Chaque gerbe perspective doit être reconstruite pour qu'elle soit identique à celle qui existait lors des prises de vues. Mais les clichés ont subi des altérations. Pour obtenir le résultat, on applique les paramètres, qui ont été déterminés lors de la calibration de la caméra et consignés dans un certificat de calibration. Les données les plus importantes concernent la valeur de la focale (f), les coordonnées calibrées des marques de fond de chambre (4 ou 8) et les corrections de distorsions des systèmes optiques. La reconstruction fidèle de chacune des gerbes constitue l'orientation interne.

Orientation relative

On ne connaît à priori que des coordonnées x et y mesurées de manière indépendante dans chacun des clichés pour quelques points homologues. La théorie de l'orientation nous a appris que ce nombre de points communs doit être supérieur ou égal à 5. Disposant des 2 gerbes indépendantes, il faut les positionner de telle sorte que les rayons homologues, c'est-à-dire les paires des rayons optiques provenant des mêmes points de l'objet, se coupent deux à deux dans l'espace. Cette opération qui reconstruit un modèle spatial de l'objet en 3D est l'orientation relative.

Orientation absolue

Il faut pouvoir manipuler le modèle Figure (1.8), qui jouit d'une orientation spatiale quelconque pour l'exprimer dans un système de coordonnées général afin qu'il restitue fidèlement les coordonnées terrain de l'objet. A cette fin, l'origine O_1 va subir une translation spatiale puis le modèle sera mis à échelle et il subira des rotations autour des axes x , y et z jusqu'à ce que la similitude entre le modèle et l'objet original soit bien établie Figure (1.8). Les basculements, la mise à échelle et les translations spatiales constituent l'orientation absolue.

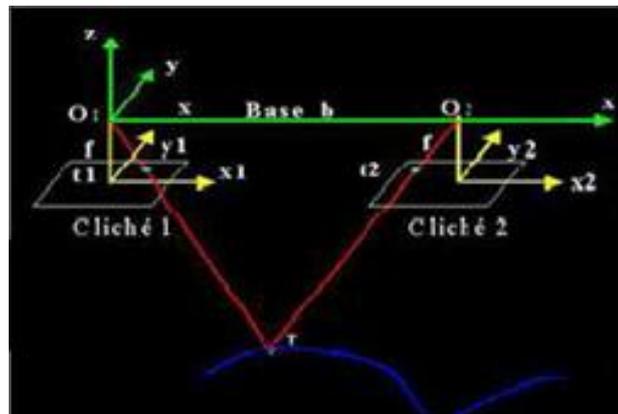


Figure 1.8 : Les Bases géométriques de la photogrammétrie : mesures (x_1, y_1) ; (x_2, y_2)

En métrologie, cette façon de traiter un couple permet de garantir une bonne restitution de la surface objet (terrain). Les opérations menées pour mettre en place un couple se basent sur la géométrie stéréoscopique et aussi sur des traitements numériques mono image permettant d'extraire l'information 3D [Lafarge,2007], (figure I.9).

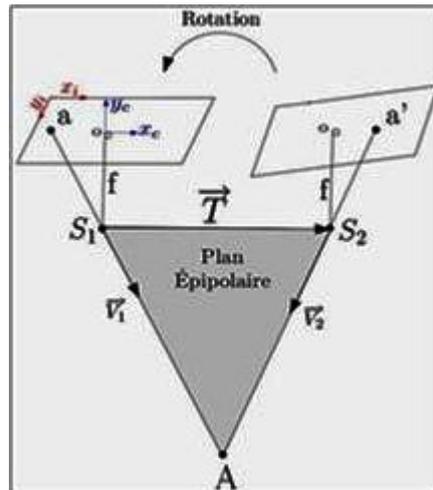


Figure I.9 : Base de la géométrie stéréoscopique.

La formalisation géométrique de la stéréoscopie repose sur deux types d'équations, toutes deux largement utilisés en photogrammétrie et en vision par ordinateur, le but étant de déterminer l'orientation relative ou absolue des images à partir des points identifiés comme homologues dans deux images ou faisceaux :

- L'équation de colinéarité. a et a' figure (1.9) étant les images du point A de l'espace réel dans deux plans images (correspondant à deux positions successives du plan focal d'une caméra donnée), on écrit simplement le fait que a , S_1 et A sont alignés, ainsi que a' , S_2 et A . Ces expressions ne sont rigoureusement exactes que si les optiques employées sont dépourvues de [distorsion](#) (ou corrigées de celle-ci). Cette approche est historiquement celle qui a été utilisée en photogrammétrie, son principal inconvénient résulte du fait que le problème de l'orientation relative de deux images est ici non linéaire, et exige donc une solution approchée pour démarrer les calculs. Cette solution approchée est simple en photogrammétrie aérienne, car les axes de prises de vues sont quasiment verticaux, les images étant sensiblement orientées de façon similaire. La démarche consiste donc à calculer l'orientation relative des images, puis à mettre l'objet 3D ainsi obtenu à sa place dans l'espace (orientation absolue), et enfin le mettre à l'échelle.
- L'équation de coplanarité. L'approche est un peu différente, même si elle est géométriquement équivalente, on écrit que les vecteurs \overrightarrow{Aa} , $\overrightarrow{Aa'}$ et \vec{T} sont coplanaires. Cette méthode est la base de la résolution de l'orientation relative au sein de la communauté de la vision par ordinateur. Les trois vecteurs étant coplanaires, on exprime que leur produit mixte est nul, ce qui peut s'écrire comme une forme quadratique basée sur une matrice, appelée "matrice essentielle" (terme consacré). Cette matrice résulte du produit de l'axiateur formé à partir de la translation \vec{T} avec la matrice de rotation permettant de passer du référentiel de l'image 2 à celui de l'image 1. Cette approche suppose la connaissance préalable des paramètres géométriques de l'acquisition d'images (position de l'axe optique par rapport à l'image, valeur de la distance focale, distorsion, etc.). Pour les cas où ces paramètres sont inconnus, la modélisation doit se passer de certains éléments indispensables à la reconstruction géométrique complète. Néanmoins, si l'on admet de travailler en [géométrie projective](#), qui est parfaitement adaptée à cette situation, on peut quand même obtenir des éléments

très utiles, et cette situation est fréquemment rencontrée en vision par ordinateur. On utilise alors encore une forme quadratique, mais cette fois basée sur la "matrice fondamentale", autre terme consacré à la relation sur deux images.

1.2.6. Les systèmes d'acquisitions

Caméras Argentiques

Une caméra argentique est une caméra avec laquelle l'enregistrement de l'information radiométrique se fait par le biais d'une réaction chimique sur un support appelé film.

- Caméras métriques

Une caméra métrique est une caméra argentique étalonnée (focale, point principal d'autocollimation, distorsion, coordonnées des marques de fond de chambre) et comportant des marques de fond de chambre destinées à la correction des déformations dues au développement du film. Il s'agit de caméras destinées à des applications photogrammétriques.

- Caméras non métriques

Il s'agit de caméras argentiques ne comportant pas de repères de fond de chambre; l'appareil photographique de commerce est une caméra non métrique. Elles peuvent être utilisées pour des applications photogrammétriques après l'étalonnage.

Caméras Numériques

Avec des caractéristiques de caméras numériques la question du choix entre CCD matriciel et CCD à barrette s'est très vite posée. On voit d'ailleurs que cette question continue de faire cas des concepteurs puisque deux grands fabricants de caméras aériennes que sont ZI Imaging (Zeiss) et LHSystems (Leica) ont choisi pour le premier la solution matricielle et pour le second la solution linéaire. Dans le domaine de la production photographique des études de rapport qualité/prix ou de cout/délais apportent des solutions au problème du choix.

- Caméras matricielles (Géométrie conique)

Elles fonctionnent de la même manière que des caméras argentiques si ce n'est que le film sensible est remplacé par une matrice de capteurs photo-électriques. Très vite, ce type de caméras numériques est apparu sur le marché. On en distingue deux types: les caméras matricielles et les caméras à barrettes ou linéaires. La géométrie est à notre avis le point fort de la matrice par rapport à la barrette. En effet, pour ceux qui veulent appliquer la photogrammétrie avec une bonne précision géométrique, la camera matricielle est très sollicitée. Il y'a d'autre part un intérêt de passer de l'image à la réalité terrain une fois la caméra étalonnée géométriquement. En effet les CCD matricielles jouissent d'une très bonne stabilité géométrique.

- Caméras à barrettes (Géométrie cylindro-conique)

Le capteur est composé d'une ou plusieurs barrettes CCD (Coupled Charged Devices) qui enregistrent les informations perpendiculaires à l'axe optique. L'autre dimension, celle de l'axe de vol ou de prises de vues est obtenue par des enregistrements successifs au fur et à mesure que le vecteur avance. Ce type de capteur largement utilisé pour des applications satellitaires est aussi appelé "PUSH BROOM". Un des avantages de la camera linéaire est que pour chaque point de l'axe de prise de vue, on a une visée au nadir ou au centre normal du cliché. Ce n'est pas le cas

avec une caméra matricielle en raison des nombreuses parties cachées dues à la projection conique.

- Avantage des caméras numériques

L'intérêt de l'utilisation des caméras numériques est évident lorsqu'on s'intéresse aux différents postes d'une chaîne de production photogrammétrique. En effet, les étapes de développements et d'orientations internes sont supprimées, ce qui présente un gain de temps mais aussi un gain financier. De plus, les capteurs CCD permettent d'enregistrer des images avec une dynamique bien plus importante que celle que l'on obtient à partir de films argentiques. L'importance de cette richesse de l'information radiométrique prend toute sa dimension dans des processus de traitements d'image et d'automatisation : suppression du voile atmosphérique, corrélation automatique, prise en compte des différences d'éclairement du soleil. Malheureusement, la taille des fauchées des caméras numériques matricielles est nettement inférieure à celle des caméras argentiques. En photogrammétrie aérienne, ceci implique un surcoût important durant la campagne de prises de vues puisqu'il faut augmenter le nombre de bandes. Le prix d'acquisition et le format réduit sont les raisons principales du faible essor des caméras numériques jusqu'à présent. En revanche, les travaux de recherche de l'Institut Géographique National (IGN) et de certaines sociétés laissent entrevoir des progrès importants sur la taille de ces capteurs. En métrologie industrielle, il existe des caméras étudiées spécifiquement pour des applications isolées où le contrôle dimensionnel et la reconstitution 3D sont opérés simultanément. Ainsi, dans plusieurs expériences telle l'expérience Alice au CERN où il s'agit de définir un Système électro-optique de mesures métrologiques des grandes structures, la caméra digitale BCAM a été utilisée. En effet le système BCAMs est utilisé pour des problèmes de métrologie, de surveillance et de reconstruction tridimensionnelle [Maurriset,2007].

1.2.7 Méthodes de restitution

La restitution photogrammétrique combine systématiquement deux images qui ont été photographiées depuis différents points. Chaque œil observe une autre image et, si les images sont bien orientées dans l'appareil, on obtient une vue en trois dimensions. Cela facilite l'identification et l'interprétation de certains objets. Pour le levé proprement dit, on utilise une marque flottante qu'on met en contact avec le point à mesurer. L'appareil transforme les coordonnées (x,y) du point apparaissant sur la photographie de gauche et sur celle de droite en coordonnées (XYZ) du point qui serait mesuré en trois dimensions sur le terrain. Finalement, les coordonnées (XYZ) sont enregistrées et traitées à l'aide de logiciels graphiques tels que le logiciel MicroStation. Des appareils très modernes intègrent les éléments mesurés en trois dimensions dans l'image stéréoscopique, avec les deux photographies recouvertes. L'avantage des levés photogrammétriques est leur rapidité à fournir des plans cotés. On se déplace très vite d'un point à un autre et l'enregistrement se fait directement. Il est possible d'effectuer les mesures sans rencontrer des problèmes d'accessibilité sur le terrain. Ces levés dépendent cependant de la possibilité de prendre des photographies (conditions de prises de vues) et ont aussi des contraintes dues au fait que tout n'est pas visible sur une photographie de l'objet.

Pour les caméras numériques et la définition des paramètres internes connus ou inconnus, la solution est d'utiliser la méthode des faisceaux lors d'un ajustement global ou de réaliser un étalonnage. Tous les paramètres d'orientation des images sont déterminés en une seule étape. Cette méthode nécessite la connaissance d'au moins 6 points de calage correctement répartis dans l'espace tridimensionnel et elle

permet entre autre, de passer directement d'un point terrain M à un point image m . Elle se base sur l'utilisation des coordonnées images comme observation et sur l'emploi d'une projection centrale comme défini précédemment, [Jung, 2007].

Les traitements se basent sur des systèmes logiciels permettant de reconstruire les surfaces des objets. A titre d'exemple le logiciel de calcul AICON 3D Studio transforme les photographies couleur en noir et blanc afin qu'elles soient exploitables, puis recherche tous les points intéressants l'objet. L'opérateur signale la présence de points connus dans les clichés. Le logiciel reconnaît ces points et calcule le projet dans leur système de coordonnées local. A partir du recouvrement réalisé grâce aux cibles codées et des points connus, les orientations et les coordonnées locales des points rétro réfléchissants peuvent être déterminées. Le logiciel permet de mettre le projet à l'échelle, mais aussi de changer de système de coordonnées. A l'issue du calcul sont obtenues les coordonnées de tous les points rétro réfléchissants dans un même système, dont les cibles placées dans les trous des plaques BCAMs, avec une précision X, Y, Z de 0.05mm [Maurisset, 2007].

Dans le domaine de la reconstitution 3D en industrie de nombreuses techniques se sont développées, principalement ces dix dernières années, afin de répondre à la diversité des applications. Les techniques des plus courantes sont : le palpage mécanique, le balayage laser (point ou plan), la projection de lumière structurée ou Moiré et la photogrammétrie. La démarche la plus courante permet la création de nuages de points sur des objets à analyser puis d'en appliquer une segmentation.

L'exploitation de ces nuages de points peut s'envisager de deux manières selon les applications. Les logiciels de reconstruction de surfaces peuvent traiter certains types de nuages de points directement. Sinon, un maillage des points permet de produire une surface de polygones triangulaires en éliminant le bruit de mesure (segmentation). Le maillage de points est une problématique complexe car il existe une multitude de nuages, plus ou moins structurés, comprenant du bruit de mesure et des aberrations, selon plusieurs angles. Pour répondre à cette problématique, plusieurs algorithmes de maillage sont nécessaires alternativement ou conjointement. En tant que concepteur, les prestataires sont amenés à traiter des nuages de toute provenance dont la méthode de numérisation n'est pas toujours connue.

Avec le développement d'outils tel 3DReshaper, un logiciel de maillage de points qui réunit des algorithmes spécifiques, il est possible de lire des nuages de points quelle que soit leur provenance. La philosophie du maillage s'opère sur les points pertinents et sans charger l'ensemble des points en mémoire. Ceci nous permet d'exploiter des nuages très denses (plusieurs dizaines de millions de points), la seule limite étant la capacité du poste informatique. Afin de répondre à la demande pressante des industriels pour produire des fichiers d'usinage de moules sans passer par une reconstruction de surfaces CAO, des processus de maillage de points sous contrainte sont disponibles. Cette technologie ouvre des horizons nouveaux grâce aux capacités des équipements d'Usinage Grande Vitesse (UGV), appliquées à l'usinage de moules ou de prototypes. En effet, dans certaines applications, la reconstruction de surfaces n'est pas forcément nécessaire si l'on peut s'appuyer sur un maillage de qualité. En effet, pour accélérer le processus de développement de nouveaux produits, certaines demandes exigent des plans de joint sur un maillage pour usiner un moule en UGV, produire un moule en résine selon un procédé de prototypage rapide ou encore réaliser un prototype directement. Ainsi, la mise au point d'un procédé capable de mailler finement des nuages de points de formes non géométriques sous la contrainte de plans de joint précisément positionnés est un sujet de recherche.

La ligne de plan de joint est garantie mathématiquement identique sur les différentes parties du moule et le résultat produit est un moule légèrement facettées (micro facette) dont il convient de polir la surface pour obtenir un rendu parfait. Le processus de restitution peut se définir selon les organigrammes 1.10 et 1.11 suivants [Kasser, 2001], [Frédérique, 2002] :

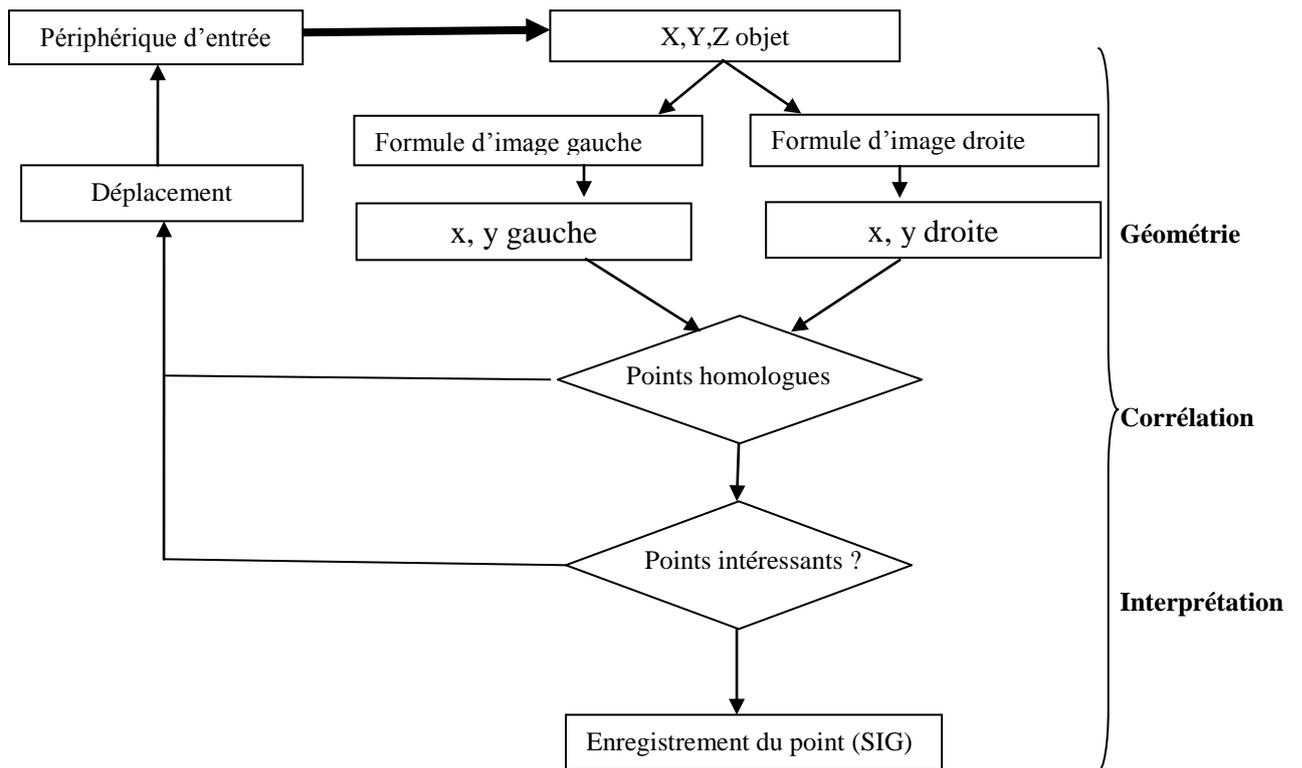


Figure 1.10 : Organigramme [Kasser2001]

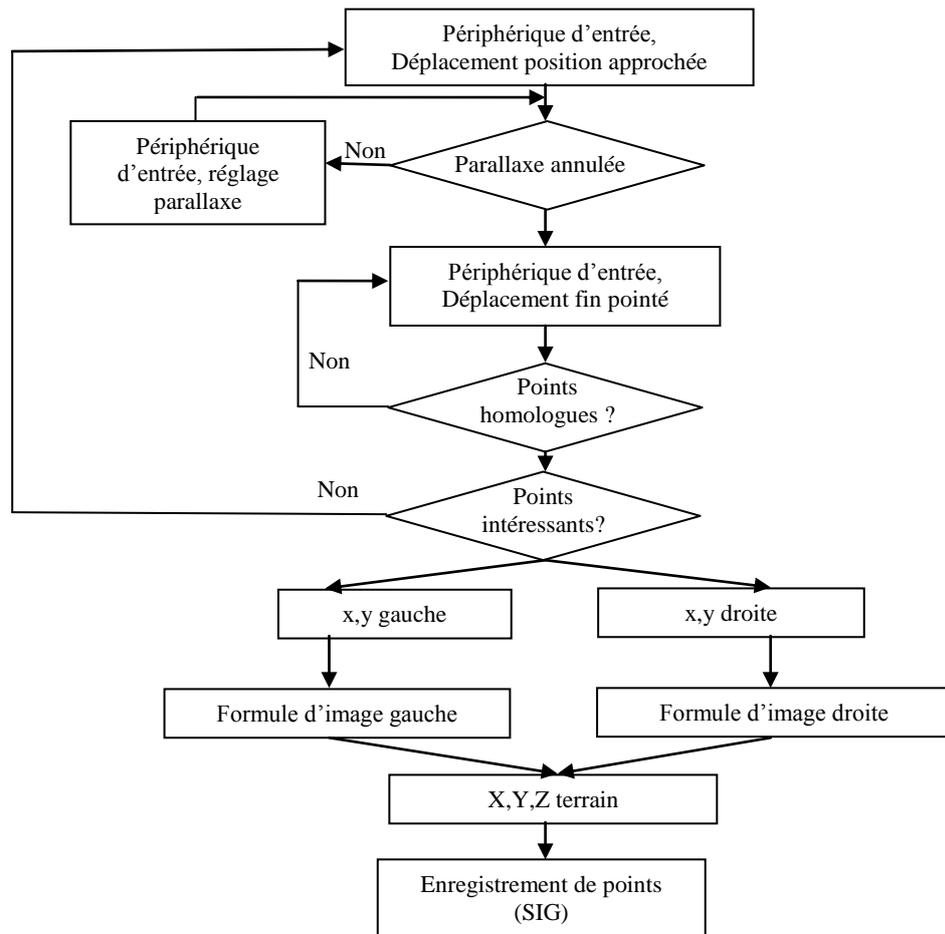


Figure 1.11 : Organigramme [Frédérique2002]

La restitution calcule un fichier en coordonnées 3D prêt pour un maillage de surface et une reconstruction de l'objet. La qualité du produit et son exactitude sont souvent rattachés à un cahier de charge définissant des spécifications. Concrètement, ces besoins se traduisent par des extractions d'informations dimensionnelles sous forme de coordonnées à partir desquelles il est possible de faire des mesures de distance. Il est aussi possible de faire des représentations bidimensionnelles (plans, élévations, coupes, etc.). Les commanditaires ont aussi besoin de reconstructions géométriques tridimensionnelles. Un autre besoin concerne la restitution de l'apparence visuelle des surfaces.

Enfin, plusieurs besoins peuvent être exprimés en même temps. Dans ce cas, il s'agit de faire une restitution de plusieurs aspects à la fois [De Luca, 2009]. Ces besoins se traduisent par l'obtention d'un certain nombre de produits issus du relevé par photogrammétrie et lasergrammétrie. Les produits tel l'orthoimage ou images panoramiques peuvent être suggérés pour des situations simples (objets plans) ou complexes (multi facette et multi plans).

L'ortho-image est une image redressée qui utilise des points de recalages lorsque les paramètres de prise de vue sont inconnus ou un MNT lorsque ces paramètres sont connus. En photogrammétrie terrestre, l'ortho-image permet de créer des ortho photo-plans pour produire des plans de façade et des représentations graphiques des éléments architecturaux.

D'un autre côté les images panoramiques permettent un assemblage de plusieurs photographies prises depuis un même point de vue. En effet, les photographies sont prises avec des angles verticaux différents et un angle horizontal de 360°, de manière à obtenir des bandes qui couvrent tout l'objet à représenter. Ensuite, ces photographies sont assemblées et projetées sur une surface ou sur un nuage de points. Par exemple, une image panoramique permet de visualiser un espace intérieur de manière intégrale sur un même document.

Plus récemment, un autre produit peut faire l'objet d'application en métrologie 3D appelé la carte de profondeur. Celle-ci permet de donner les écarts d'une surface par rapport à un plan ou à une surface de référence (cylindre, sphère, surface paramétrée...). Les écarts sont représentés par un dégradé de couleurs en fonction de l'importance de l'écart. Un avantage de ce produit est de pouvoir mettre en évidence les déformations de la surface d'un objet.

1.3. Applications en photogrammétrie numérique

1.3.1-Calibration des capteurs

La calibration est un processus indispensable en photogrammétrie. L'opération permet d'extraire les éléments internes de la camera ou de l'appareil photographique. Il existe une gamme de modèles permettant d'assurer cette phase, ceux-ci sont traduits du modèle fonctionnel défini par l'équation de colinéarité. Les transformations entre des espaces 2D et 3D permettra d'extraire les différents coefficients de l'orientation interne (focale, point principal et distorsions). L'opération présente les mêmes objectifs quelque soit le mode de traitement analytique ou numérique. Le formalisme d'étalonnage se base sur le modèle mathématique permettant de définir :

- La position du point principal d'auto collimation sur l'image,
- Les distorsions de l'image pour corriger les coordonnées images,
- De définir la distance principale ou focale de la caméra.

La calibration à deux dimensions (2D) est basée sur un objet plan (mire) permet de définir les paramètres internes d'un camera selon des modèle prédéfinis. Il est possible d'intégrer la méthode DLT 2D basée sur un algorithme défini par Hartley et Zisserman [Hartley, 2000].

Par ailleurs, la calibration 3D est opérée par rapport à un objet tridimensionnel dont les cibles sont définies dans un référentiel connu. L'étalonnage permettra de calculer les seize (16) paramètres d'un faisceau dont neuf externes et sept internes facteur d'échelle. Il existe plusieurs techniques décrites dans la **littérature**. La reconstruction 3D avec plusieurs images, en utilisant des techniques telles la reconstruction multi stéréoscopique passe par un étalonnage des faisceaux. Deux étapes sont alors nécessaires pour réaliser la reconstruction : le calibrage et la rectification [Guerchouche, 2008].

Faugeras et Toscani [Faugeras, 1986, Faugeras, 1987] ont proposé une méthode de calibrage basée sur une évaluation de la Projection Perspective d'une Matrice (PPM) employant une image d'un modèle non-planaire. Il emploie des approches linéaires et non-linéaires. Sur l'image, au moins six points 3D non coplanaires sont nécessaires pour à l'étalonnage. Zhang [Zhang, 1999 ; Zhang, 2000] a décrit un algorithme qui exige au moins deux vues différentes d'un modèle planaire. Un étalonnage bien plus précis est obtenu en utilisant un grand nombre de vues (vingt ou plus). Les déplacements du modèle entre les vues ne sont pas nécessairement connus. L'algorithme détaillé dans [Gue, 06] pour le calibrage d'appareil photographique est basé sur une évaluation robuste de la PPM. La cible utilisée est un cube 3D avec différentes faces colorées. Un choix manuel de deux faces adjacentes sur l'image acquise permet au système de détecter automatiquement les six sommets associés à ces faces et

d'initialiser ainsi la page par minute en utilisant l'algorithme de Faugeras-Toscani. Une amélioration de l'évaluation de page par minute est alors réalisée en réduisant au minimum la distance entre les bords projetés du cube et les découpes d'image. L'évaluation des paramètres de l'appareil photographique peut être améliorée en saisissant des images additionnelles prises de différentes positions dans le champ visuel de l'appareil photographique, si les faces adjacentes sont vues. Cette évaluation implique une technique d'optimisation non-linéaire selon des algorithmes dont celui de Levenberg-Marquardt. L'évaluation objective des algorithmes d'étalonnage d'appareil photographiques est affectée par le manque de critères de comparaison des paramètres internes obtenus par les différentes méthodes. Peu d'auteurs comparent des méthodes existantes de calibrage d'appareil photographiques et examinent ce problème de façon spécifique. Zollner et Sablatnig [Zollner, 2004] étudient l'exécution des trois méthodes les plus couramment employées basées sur des étalonnages de plans. González et al. [Gonzales, 2005], présentent une analyse comparative de huit étalonnages d'appareil-photo dans lesquelles ils se concentrent spécifiquement sur la stabilité :

- la stabilité des paramètres internes quand l'installation d'appareil-photo est constante et du modèle de calibrage est déplacée.
- la stabilité des paramètres externes quand le modèle existe et la configuration de l'appareil-photo change.

La conclusion de leur étude est que le résultat de l'évaluation de paramètres dépend de l'endroit du modèle de calibrage dans les images acquises. Dans le cas d'une mise en place constante de cameras, les valeurs de paramètres internes ne devraient théoriquement pas changer. Cependant, dans la pratique, ces valeurs changent d'un procédé d'étalonnage à l'autre et ceci constitue un problème. Dans le cas d'un appareil photographique et d'un modèle fixes, avec la variation de la configuration d'appareil photographique (foyer et/ou mise au point) les valeurs de paramètres externes ne sont pas toutes constantes par rapport à ce qu'elles devraient être.

Par ailleurs, on trouve dans Salvi un examen détaillé de cinq des techniques d'étalonnage les plus connues [Salvi2002]. Les auteurs regroupent quelques critères pour évaluer et comparer les méthodes d'étalonnage. Ces critères sont essentiellement basés sur l'exactitude de mesure en 3D et la mesure 2D des points d'appuis. Un ensemble de points 3D est défini dans la scène de référence, avec des coordonnées connues, puis ils sont reconstruits en utilisant un système stéréoscopique. Les dispersions entre les positions 3D estimées (respectivement les positions 2D estimées sur un plan image) et les positions réelles connues de la scène de référence sont calculées. Les critères proposés constituent une bonne évaluation pour la comparaison des méthodes d'étalonnage parce que l'exactitude est directement liée à la reconstruction 3D des points image. Actuellement, Il existe plusieurs méthodes d'évaluation d'un étalonnage effectué donnant lieu à une traçabilité du processus de reconstitution.

1.3.2-Méthodes en photogrammétrie numérique

La photogrammétrie se base sur des modèles qui se résument sur trois niveaux définissant chacun une unité de traitement ; le faisceau, l'image stéréoscopique ou stéréo modèle et la bande. La triangulation sur la base de l'unité photogrammétrique définissant les primitives de calcul, le point et la ligne. La photogrammétrie numérique propose un certain nombre de modèles de traitements dans différents domaines selon des besoins exprimés. Très souvent, on observe une complémentarité pour une amélioration du rendu du processus de contrôle.

• **Unité faisceau**

La photogrammétrie analytique à courte distance a pris son essor depuis les années 1980 avec la mise en place de modèles numériques de déformation et des anomalies de distorsion [Faig1979], [Brown,1980] ; [Grüen,1978a]. La décomposition de la distorsion s’effectue en deux groupes définis de façon distincte [Fraser,1982]:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_c + \Delta x_p \\ \Delta y &= \Delta y_c + \Delta y_p \end{aligned} \tag{1.1}$$

Une partie concerne l’objectif de la camera et la seconde tient compte de la distorsion sur l’image. Une approche commune de représentation des corrections sous forme de polynômes est utilisée comme suit :

$$\begin{pmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \end{pmatrix} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i \begin{pmatrix} a_{ij} \\ b_{ij} \end{pmatrix} x^i - j y^j \tag{1.2}$$

Avec : a_{ij} et b_{ij} coefficients du polynôme de la transformation image.

L’utilisation des paramètres auxiliaires fournit des équations d’observation proche de la réalité des objets ou des terrains. Le travail de Fraser [Fraser,1980],[Fraser,1987] est reconnu comme l’un des plus importants dans le domaine de la photogrammétrie moderne. En effet, Fraser a développé des algorithmes pour la reconstruction d’objets a partir de plusieurs images en utilisant différentes méthodes numériques. Ses travaux ont démontré la capacité d’acquérir des mesures tridimensionnelles d’une grande précision [Fraser,1992]. L’utilisation de la méthode des faisceaux pour une seule ou plusieurs perspectives avec les différents paramètres permet d’offrir une combinaison appliquée en photogrammétrie rapprochée non-métrique. Plusieurs auteurs proposent le calcul à 11 paramètres, 12 paramètres ou 16 paramètres dans des projets de métrologie industrielle [Faig,1979].

Sous l’utilisation de la colinéarité, le relèvement ou l’intersection des faisceaux sont des applications de la condition de colinéarité. Des essais en soufflerie permettent de mesurer les efforts globaux de l’ensemble du plan de voilure de divers types de gréements, sans donner la moindre information sur le champ de pression exercé sur les voiles. Pour palier à ce défaut et réaliser une avancée significative dans la compréhension du fonctionnement des voiles de bateau, il faut concevoir :

- un système permettant de mesurer les efforts indépendamment sur chaque voile,
- un moyen de mesure des différences de pression sur la voile,
- un moyen de mesure de la géométrie de la voile en équilibre.

Une balance aérodynamique avec six composantes à jauges de contraintes sensibles placée sous le plancher de la veine d’essai pour la mesure des efforts. Les différences de pressions seront mesurées à l’aide des capteurs à fil chaud et la géométrie déterminée par photogrammétrie. Ces essais en soufflerie, où l’écoulement incident est complètement maîtrisé, permettront la mise en place des méthodes et matériels expérimentaux pour les essais en navigation réelle. Ils permettent de s’affranchir de l’influence des mouvements du bateau et des inhomogénéités du vent. La DLT mono faisceau a été utilisée à cet effet pour juger de la pertinence de la photogrammétrie dans ce domaine. En effet, Liu [Liu2000] utilisa le système d’équation (1.3) pour des applications photogrammétriques typiques montrant le principe de mesure de modèles sensibles à la pression, à la température dans des tunnels de vent.

$$\begin{aligned} x_n - x_p + dx &= -c \frac{m_{11}(X_n - X_c) + m_{12}(Y_n - Y_c) + m_{13}(Z_n - Z_c)}{m_{31}(X_n - X_c) + m_{32}(Y_n - Y_c) + m_{33}(Z_n - Z_c)} \\ y_n - y_p + dy &= -c \frac{m_{21}(X_n - X_c) + m_{22}(Y_n - Y_c) + m_{23}(Z_n - Z_c)}{m_{31}(X_n - X_c) + m_{32}(Y_n - Y_c) + m_{33}(Z_n - Z_c)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Avec :

$$\begin{aligned} dx &= \alpha(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + P_1(r^2 + 2\alpha^2) + P_2\beta \\ dy &= \beta(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + P_1\alpha + P_2(r^2 + 2\beta^2) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Et $\alpha = x - x_p$; $\beta = y - y_p$; $r^2 = \alpha^2 + \beta^2$

Les caractéristiques propres aux caméras (résolution, zone de mise au point, champ de vision) limitent la distance maximale et minimale de la caméra à l'objet. On est également limité pour le placement des caméras par l'espace de travail (plan de pont pour des mesures embarquées) et la visibilité. Toutes ces contraintes rendent complexe le développement d'un système capable de mesurer la géométrie d'un plan de voilure.

- **Unité de traitement : le stéréo modèle**

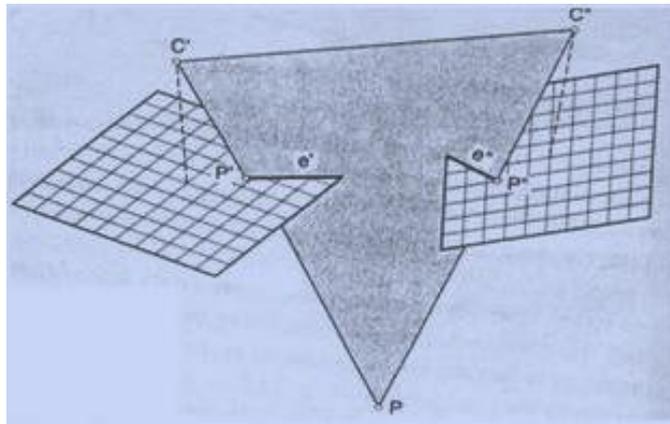


Figure 1.12: Condition de Coplanarité pour le traitement d'un modèle 3D

La formation de l'image plastique (modèle 3D) et la simulation ou la restitution de la surface de l'objet permet une reconstruction de l'objet selon l'échelle désirée. Certains auteurs traitent globalement toute une scène en utilisant le modèle 3D appelé couramment par la communauté des photogrammètres modèles indépendants [Ebaadi, 2006]. L'orientation relative est effectuée pour chaque modèle dans un repère lié au système d'observation, un ajustement global est alors calculé pour extraire les éléments externes de chaque modèle du bloc. Les observations réalisées sur le système modèle sont traitées par triangulation dans un système absolu lié à l'objet.

- **Unité de traitement : la bande**

Dans le domaine de la triangulation photogrammétrique, il existe deux méthodes d'ajustement se basant sur l'unité faisceau ou l'unité modèle. La triangulation est une extension des méthodes de stéréo restitution, qui permet de restituer de façon globale un bloc de clichés tout en minimisant le nombre de points d'appuis et de contrôle. Les résultats finaux peuvent alors provenir de deux méthodes de calcul différentes. On dispose tout d'abord d'une méthode de compensation en bloc par

modèles indépendants. Celle-ci se base sur une transformation de similitude spatiale appliquée à des coordonnées modèle.

Usuellement, cette méthode est employée avec des prises de vues réalisées avec des chambres métriques, et nécessite la détermination des stéréo modèles, afin d'en obtenir les coordonnées de points qui seront transformées dans le système de référence de l'objet. On doit donc effectuer l'orientation relative des clichés avant de s'intéresser à la transformation qui ramènera le bloc dans ce système général. Dans ce cas, la disposition des points de calage va avoir une importance considérable quant aux précisions tant planimétrique qu'altimétrique. La seconde méthode qui peut être employée est celle dite de compensation par les faisceaux. Celle-ci est utilisée très fréquemment par la communauté des photogrammètres et celle de la vision PC.

D'après les recommandations de la Société Américaine de Photogrammétrie, il faut veiller à répartir les points de calage de façon suffisamment homogène, en vue d'atteindre une bonne précision, sachant que la solution la plus satisfaisante sera de les disposer dans les coins et sur les bords des bandes constituant le modèle [Asprs, 2004]. Le but essentiel est finalement d'éviter toute extrapolation entre points d'appuis, de contrôle et de liaison. En se plaçant d'un point de vue théorique, on recherche quelles doivent être alors, s'il en est besoin, les caractéristiques d'un canevas d'appui et son impact dans les processus de traitement et d'ajustement.

Tandis que la communauté des photogrammètres s'est aisément adaptée afin d'utiliser pleinement la technologie numérique de la formation image, néanmoins elles sont fondées toujours sur les modèles mathématiques bien définis. Les dernières innovations significatives dans ce domaine étant l'ajustement par bandes dans les années 1950 et le concept d'auto étalonnage d'appareil photographique au début des années 1970. Les deux modèles fondamentaux pour l'orientation photogrammétrique demeurent les modèles bien connus de colinéarité et de coplanarité, qui forment la base de l'orientation relative, absolue et externe. La condition de déterminer les valeurs initiales a eu une influence considérable sur l'orientation de réseau en photogrammétrie rapprochée. Car la plupart des projets photogrammétriques de triangulation aboutissent à un ajustement par bande, on pourrait dire aussi bien que l'évolution dans l'orientation de réseau a principalement été une histoire d'évolution d'algorithmes et des procédures pour optimiser le rétablissement automatisé des valeurs initiales [Fraser, 2006].

Avec la photogrammétrie, les disciplines de la vision par ordinateur (CV) maintiennent un intérêt vif pour la reconstruction de la scène ou de l'objet 3D par imagerie numérique. Les modèles utilisés dans la vision par ordinateurs (CV) sont principalement basés sur la géométrie projective et ne soulignent pas une reconstruction euclidienne rigoureuse. Des modèles linéaires sont préférés, malgré la stabilité et la fiabilité informatique incertaine de leur application relativement à d'autre telle que la géométrie stéréoscopique idéale de la vision, (C.-à-d. faible ou aucune convergence et un petit rapport de base/profondeur). Une motivation pour les modèles directs et linéaires d'orientation est qu'ils évitent la nécessité de fournir des valeurs initiales pour les paramètres d'orientation.

Les matrices de projection sont effectuées dans un processus à deux étapes pour déterminer une solution linéaire homogène d'équations avec des coordonnées normalisées. Les huit (8) points ou plus permettent un traitement [Hartley, 1997] ou une décomposition singulière de valeur (SVD). Une approche de RANSAC [Fischler, 1981] peut également être utilisée dans les cas où il y a beaucoup de points homologues disponibles. La matrice et les traductions de rotation sont alors récupérées par

l'intermédiaire de la méthode (SVD) [Hartley, 2000], qui sera utilisée pour la matrice essentielle de degré deux.

Le point final commun relatif au processus d'orientation pour des applications métriques est - et devrait être- le modèle d'ajustement par bandes discuté dans le chapitre suivant. Critiqué dans son exécution, cependant, cet ajustement fait parti de la génération des valeurs initiales. Cet aspect a considérablement influencé le développement pratique des systèmes photogrammétriques rapprochés, particulièrement depuis l'apparition des appareils-photo numériques et de l'automatisation de processus.

Les recherches actuelles se basent sur la détection automatique des points cibles pour la création de nuages dense sur l'objet à analyser. Il y'a les techniques de lasergrammétrie qui répondent à cette problématique en créant des réseaux denses et fiables de la scène. Dans le domaine de la modélisation, des techniques algorithmiques sont opérées pour diverses approches à appliquer. La corrélation épipolaire dense (CED) est une de ces techniques et permet de générer des nuages de points pour la reconstruction des objets.

Le problème dans la reconnaissance d'objet est de faire face aux différentes transformations telles la rotation, la translation, le changement d'échelle et d'illumination, ou encore l'occlusion. A tout ceci s'ajoute le problème du temps de traitement des informations ; en effet, le temps de calcul augmente avec les exigences contenues dans un cahier des charges. Depuis les années 1980, plusieurs méthodes et algorithmes pour aborder le sujet furent proposés. L'étude a cependant été menée essentiellement autour d'une méthode proposée par David Lowe [David Lowe, 2004], et qui demeure la plus utilisée actuellement dans le domaine de la reconnaissance d'objet. Il s'agit du processus Scale Invariant Feature Transform ou méthode SIFT. Aussi, les descripteurs de Moravec et de Harris, nous orientent vers l'algorithme SIFT et aux tests sur différentes configurations d'images [Lyannick, 2008].

Les techniques lasers permettent de générer des nuages de points et d'en faire une représentation en trois dimensions. L'ensemble des coordonnées tridimensionnelles obtenues par des mesures d'angles et de distances fournit une redondance sur le sujet à analyser. Cette technique connue sous le nom de lasergrammétrie permet principalement d'acquérir les volumes des objets et des espaces bâtis. Enfin, le temps d'acquisition dépend de la résolution utilisée.

La station de numérisation mesure de manière rapide et directe, les coordonnées d'une multitude de points en trois dimensions dans un champ de vision étendu. Il est possible d'obtenir une information sur la réflectivité d'une surface dans la direction du faisceau laser puis sur la couleur lorsque la station de numérisation est équipée d'une caméra CCD ou d'un appareil photographique. Il existe trois fonctionnements différents pour une station de numérisation : l'acquisition par temps de vol, par différence de phase et par triangulation. Les trois types d'acquisitions peuvent être utilisés selon les besoins [Deveau, 2003]. Tout d'abord, la mesure de distance par temps de vol est obtenue en calculant le temps de trajet Dt que met le faisceau laser pour parcourir un aller-retour entre la station de numérisation et la surface visée, figure (1.13). La vitesse de la propagation de l'onde C_0 et l'indice de réfraction du milieu traversé étant connus, la distance D_0 parcourue par le faisceau laser peut être déduite par la formule (1.5):

$$Dt = v * t / 2 \tag{1.5}$$

Avec Dt : la distance parcourue

t : le temps de parcours

v : vitesse de la lumière

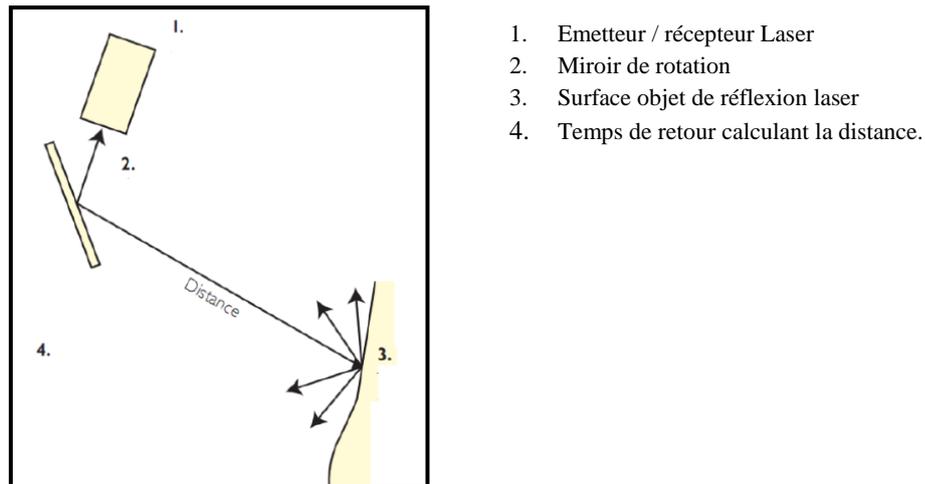


Figure 1.13 Parcours d'un faisceau laser lors d'une mesure par temps de vol (Barber, 2007)

Il faut tenir compte de la précision de la mesure du temps, par exemple, avoir une précision du millimètre, il faut disposer d'une horloge capable de mesurer une durée de 6.7 Ps (Picoseconde). Ensuite, il existe la mesure de distance par différence de phase, figure (1.14). Dans ce cas de figure, la différence de phase $\Delta\Phi$ entre le signal émis et le signal reçu permet de calculer la distance D_0 entre la station de numérisation et la surface visée, en fonction du nombre N de longueurs d'onde λ , tel que :

$$2D_0 = N\lambda + d \Rightarrow D_0 = c/f (N/2 + \Delta\phi/\pi) \quad (1.6)$$

Avec d comme facteur d'excédent.

f : fréquence de l'onde modulée

c : célérité de la lumière

N : nombre de longueurs d'onde le long du trajet du rayon laser.

$\Delta\phi$: Différence de phase mesurée par le phasemètre

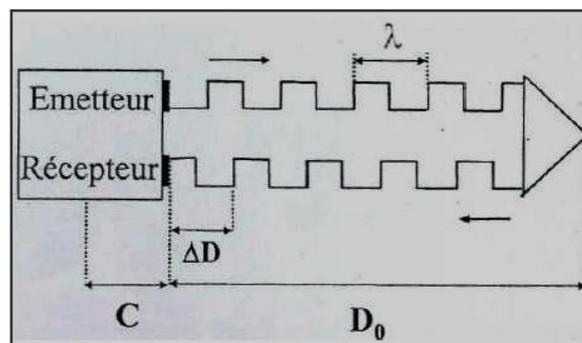


Figure 1.14 Mesure par différence de phase

Ce type de scanner est adapté aux mesures de courtes à moyenne distances (portées inférieures à 100m) et fournissent des distances plus précises pour les courtes portées que les scanners laser à temps de vol [Boulaassal, 2010].

Enfin, l'acquisition peut se faire par triangulation. Dans ce cas, la station de numérisation se compose d'un émetteur et d'une caméra CCD ou deux selon l'appareil. La caméra enregistre la position du point visé par le laser. Comme la distance entre l'émetteur et le récepteur est connue, de même que les

angles d'émission et de réception, la position du point visé peut être déterminée par un calcul de résolution de triangle. La figure (1.15) indique le parcours du faisceau laser dans le cas d'une mesure de distance par triangulation.

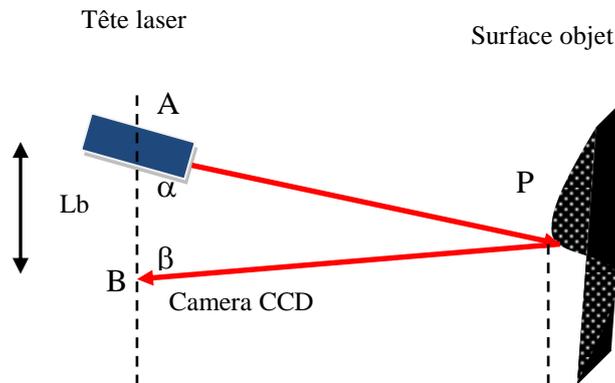


Figure 1.15 Parcours d'un faisceau laser lors d'une mesure par triangulation [Boulaassal,2009].

Les deux angles (α , β) calculent la distance AB par rapport au point P de l'objet en utilisant la relation trigonométrique :

$$AP = Lb * \sin\beta / (\sin(\alpha + \beta)) \quad (1.7)$$

Avec: AP : distance inclinée située la source laser et le point P situé à la surface de l'objet,

Lb : longueur de base entre rayon émis et rayon réfléchi.

(α , β) : angles définis par le triangle APB

Le tableau 1.1 permet une comparaison grossière du scanner laser :

Type de scanner laser	Applications	Précision / Portée
Temps de vol	Approprié pour l'acquisition des volumes intérieurs et extérieurs : architecture, travaux public et génie civil.	4 mm au delà de 50 m / 1 à 350 m Temps de vol (Valeurs de la station GX de TRIMBLE)
Différence de phase	Idem	3 mm à 25 m / 0,6 à 153 m (Valeurs de la station Photon 120 de FARO)
Triangulation	Approprié pour les petits Objets, métrologie, industrie, Etc...	50 μ m / 10 cm à 10 m

Tableau 1.1 : comparaison de scanner laser

Dans plusieurs travaux de lasergrammétrie, des auteurs se sont intéressés à la segmentation du nuage de points pour la reconstruction d'objets 3D. La modélisation des objets rapprochés tels les plans (façade de bâtiments par exemple) oriente les traitements vers des processus de consolidation

et de segmentation. Un ajustement des paramètres du plan par la méthode des moindres carrés permet de restituer concrètement l'objet dans sa forme [Boulassal,2010]. Une autre application dans le domaine de la cartographie mobile permet de faire la liaison entre laser terrestre et photogrammétrie. Dans ses travaux, Majd [Majd, 2010] a établi une conception permettant des traitements cinématiques de données laser appliqués à la cartographie. Une solution photogrammétrique est proposée par intégration de données dans le système de navigation GPS/INS. L'orientation externe pour chaque faisceau y est calculée pour extraire les paramètres cinématiques de déplacement à savoir le roulis, le tangage et le lacet.

1.3.3-Travaux numériques en photogrammétrie

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques applications permettant d'illustrer la variété des domaines d'applications en photogrammétrie. En effet, la photogrammétrie industrielle et la photogrammétrie rapprochée ont convenu une démarche très précise appliquée en vision par ordinateur. Il existe différentes formes sur la modélisation permettant d'adapter l'outil aux besoins. La performance des systèmes numériques a permis d'augmenter la production de données photogrammétriques. Les systèmes analytiques étant très onéreux, la photogrammétrie numérique apporta des solutions monoscopiques avec des logiciels tels PhotoModeler et des solutions stéréoscopiques avec les logiciels DVP, Typhon, etc. [Streilein1999]. Le système Digital Vidéo Plotter (DVP) était l'un des premiers systèmes proposés pour la cartographie à grande échelles en milieu urbain [Agnard, 1988]. Il existe d'autres systèmes développés par les universités utilisant le principe stéréoscopique et pour les objets rapprochés. Dans ce contexte, on cite TIPHON (Traitement d'Image et Photogrammétrie Numérique) sous Windows pour des restitutions basées sur deux images avec plusieurs types de chambres [Grussenmeyer, 1998]. Ce logiciel permet de travailler sur des images des chambres aériennes avec repères de fond de chambre, de chambre avec réseaux, de caméra d'amateur et de caméras numériques. Un stéréoscope est utilisé si des observations en trois dimensions sont nécessaires.

Plusieurs considérations sont nécessaires pour satisfaire un projet photogrammétrique. La limite maximale de temps d'acquisition d'image sur le site et la durée des traitements de données pour les levés sont des critères importants pour la réussite du projet. Le prix du système d'acquisition d'images numériques influe de manière concrète sur la manière de mener le projet. La photogrammétrie numérique est rentable dans toutes ses opérations et doit prendre en considération le rapport (Qualité / Prix) sur la base de critères qualitatifs et quantitatifs.

Depuis l'apparition du concept « photogrammétrie digitale », il existe une large gamme d'applications permettant de montrer les capacités de la photogrammétrie en industrie. Au travers de ces applications, des modèles mathématiques élaborés pour les thèmes métrologiques sont définis. Le processus de la modélisation est enclenché dès que les systèmes sont modifiés ou que les objets à analyser sont différents. En effet, dans le domaine de l'environnement des applications ont été faites pour la surveillance des avalanches par mesures en trois dimensions et le suivi de la couverture neigeuse [Vallet, 2000]. Pour bien encadrer notre approche de modélisation, il existe différents travaux réalisés au cours de ces dernières années mettant en applications des thèmes et des modèles très diversifiés.

En industrie, l'étude de déformation des pièces d'avion par photogrammétrie industrielle offline s'avère une alternative très intéressante et à des prix réduits. L'analyse d'un propulseur a nécessité la distribution de cents points cibles sur ses lames vues sous plusieurs stations. Pour des déformations de

2.5 mm, l'erreur estimée sur les traitements est de 50μ , figure (1.16). Ce type de projet permet de démontrer la flexibilité de la photogrammétrie et son exactitude raisonnable pour différentes campagne de mesure par rapport aux techniques courantes de l'aviation [Wongjun, 2008].

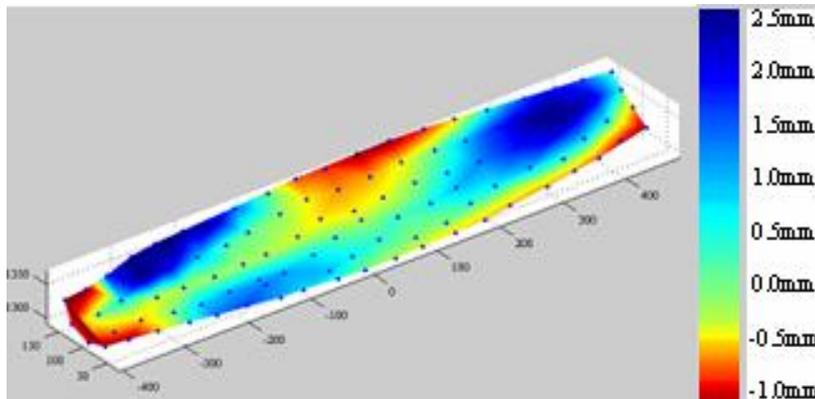


Figure 1.16 ; mesures de déformations

Le développement des technologies numériques des appareils photographiques et le développement de modèles à contribuer sur les possibilités de la photogrammétrie rapprochée. Avec des images de haute résolution et plusieurs images d'un objet nous pouvons obtenir une reconstitution 3D précise de l'objet. Cet avantage, a pu mettre en application, la photogrammétrie industrielle pour obtenir une qualité des produits avec des coûts et des équipements relativement peu onéreux. Sachant que les appareils photographiques numériques récents n'ont aucune information complète de déformation d'objectif et d'inaptitude des caméras CCD, l'obtention de quelques informations sur des paramètres numériques d'appareil photographiques est nécessaire. La présentation d'un modèle linéaire pour le calibrage de camera est plus facile et confortable pour la correction des observations. Par conséquent, nous pouvons étendre cette méthode pour l'auto calibration. Dans ce cas, sans connaître la valeur initiale, nous pouvons calculer des paramètres internes d'appareil photographiques et des paramètres externes des images [Haeri, 2008]. Le modèle mathématique de la DLT est augmenté de quelques paramètres pour réduire la distorsion radiale (1.8).

$$x = \frac{a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^3 + a_5Y^3 + a_6Z^3 + a_7}{c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4X^3 + c_5Y^3 + c_6Z^3 + 1} \quad (1.8)$$

$$y = \frac{b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4X^3 + b_5Y^3 + b_6Z^3 + b_7}{c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4X^3 + c_5Y^3 + c_6Z^3 + 1}$$

La comparaison de différents systèmes de mesure optiques pour la reconstitution de surface selon leur exactitude réalisée est un sujet permanent en photogrammétrie. Les principes de recherche incluent des tests et fonctions numériques impliquant des combinaisons d'images. L'exactitude est souvent évaluée par l'utilisation d'un objet extérieur à la référence 3D se composant d'une surface spécifique d'analyse. Un modèle basé sur les surfaces NURB est très utilisé pour le contrôle de l'exactitude [Luhman, 2008].

Les étapes de modélisation exprimées par des niveaux et des qualités de données permettent la reconstitution de la surface des objets et la réalisation d'une visualisation 3D. Dans ce type de recherche, l'algorithme développé par Akca [Akca, 2008] sur la corrélation d'images par moindres

carrés permet de reconstruire la surface de l'objet à partir de fonction (g, f, \dots). Le principe s'énonce comme suit $f(x,y,z) - e(x,y,z) = g(x,y,z)$, les fonctions f et g représentent les régions conjugués de l'objet et $e(x,y,z)$ l'erreur de mesure entre les deux fonctions du même objet. La méthode photogrammétrique intégrée à d'autres techniques permet d'approcher le balayage laser. L'analyse des profondeurs des pièces par rapport à un système de référence permet d'exprimer la distance euclidienne par rapport à des différences de niveaux (altitudes). Le rapport géométrique entre les pièces est défini selon sept (7) paramètres de transformations de similitude spatiale (3D). Les paramètres inconnus des transformations sont traités en tant que quantités stochastiques en utilisant des poids appropriés. Cette prolongation du modèle fonctionnel donne le contrôle des paramètres d'évaluation de qualité géométrique. Toutes ces nouvelles techniques offrent une flexibilité d'un niveau élevé pour n'importe quel genre de problème sur la correspondance en trois dimensions (3D) des images, aussi bien pour les outils statistiques que pour l'analyse de la qualité des résultats finaux [Akca,2008].

La complémentarité des méthodes de définition de surfaces et leurs capacités à générer des modèles est une démarche à ne pas négliger pour la qualité d'un produit. La chaîne du processus dans les méthodes optiques de mesure peut être subdivisée en quatre composants principaux : le système d'appareil-photo (la géométrie, éclairage et luminance de l'appareil-photographique), la gamme d'objet (configuration, complexité, et signalisation), la conception de réseau (configuration, balances, éléments de commande) et le système d'analyse (algorithmes pour la mesure d'image, le modèle fonctionnel pour la géométrie d'appareil-photo et l'ajustement par bandes). Les résultats photogrammétriques dans une chaîne de processus complexes incluent des déviations ou des anomalies dues aux effets insuffisamment connus par rapport aux composants principaux. Les appareils photographiques à haute résolution numériques utilisés ne restent pas stables au cours d'une période acceptable durant la phase de l'acquisition d'image. Par conséquent un nouveau modèle d'appareil-photo a été discuté et vérifié par Hastedt et al, [Hastedt, 2002]. Une orientation interne d'image variante est ajoutée au modèle fonctionnel, qui décrit la variation de la distance principale et le point principal. Afin de compenser ces influences, une grille de correction de sonde par éléments finis a été choisie. Le modèle mentionné d'appareil-photo permet l'utilisation des appareils-photo à haute résolution numériques instables pour des précisions élevées. Choissant la bonne gamme d'objet pour des buts d'étalonnage et de vérification, la directive allemande VDI/VDE 2634, recommandant une configuration spéciale, donne un appui particulier. Rautenberg et Wiggenhagen [Rautenberg, 2002] ont discuté la vérification de différents systèmes de mesure optiques basés sur cette directive. Hastedt, [Hastedt, 2002] a continué ce concept de vérification et a démontré des déviations dépendantes de la longueur restant dans les limites de l'erreur de la mesure.

Dans le cas des techniques industrielles de mesure, le matériel rétro réfléchissant est employé pour la signalisation combinée avec l'utilisation de mires codés et de méthodes d'appariement automatique. Dold [Dold, 1998] a démontré le problème et les limites de ce matériel en introduisant les caméras intelligentes qui constituent une étape technologique normale vers l'automatisation des déterminations photogrammétriques. Cette technologie permet non seulement de raccourcir les temps de traitement des images, mais aussi de mieux maîtriser les processus de mesures au moment même où l'on en a besoin, c'est-à-dire pendant l'acquisition de l'image. En particulier la réflexion marginale est affectée et ne rencontre pas la réflexion exacte exigée. Le choix d'un matériel est un composant important du processus photogrammétrique, particulièrement dans le domaine du contrôle qualité. L'optimisation et les spécifications de la conception de réseau ont été discutées dans plusieurs travaux, sur l'exemple ceux de [Fraser, 1984], et de [Zinndorf, 1986]. Fraser a expliqué la dépendance à l'égard du problème

de la donnée (Conception d'Ordre Zéro) et le problème de configuration (conception de premier ordre). Concernant celles l'optimisation des investigations précédentes et les approches appliquées dans la conception de réseau doivent être modifiées pour les méthodes utilisées actuellement en tenant compte de la particularité de nouveaux équipement digitaux et ses avantages de flexibilité dans le système. Une étape vers cette modification constitue un outil de simulation conçu pour des applications spéciales dans des études techniques d'accident, qui a été développé par Raguse et Wiggenhagen [Raguse, 2003].

Des techniques de simulation basée sur la Méthode de Monte Carlo ont été utilisées pour le contrôle de système photogrammétrique. La méthode de simulation permet un regard plus étroit aux composants simples du système, à leur incertitude et aléatoirement à la distribution simultanément sur le système photogrammétrique. L'analyse des résultats de simulation se concentrera sur l'influence des paramètres et de la géométrie de camera aussi bien que sur l'influence de l'espace objet [Akca,2008]. L'avantage des méthodes de simulation implique des possibilités pour modifier des paramètres spécifiques. Par exemple, des effets systématiques peuvent être appliqués et l'influence peut être modélisée pour analyser des objectifs métrologiques. La séparation des effets inclus dans la chaîne du processus des techniques optiques de mesure peut donc être commandée sous des investigations de laboratoire et être soutenue par des expériences pratiques. L'ajustement par bandes peut alors être bien appliqué par rapport au traitement global d'un bloc.

En fonction des dimensions d'un objet, du niveau de détail requis et de la précision souhaitée, les méthodes de relevé et les instruments utilisés sont différents. Pour les objets de petite taille et les détails industriels, les scanners par triangulation garantissent une bonne précision. Ensuite, il faut choisir la résolution en considération du niveau de détail requis sur le modèle final. Ce choix dépend de la distance de prise de vue et de l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface. Il se fait aussi en fonction de la taille du plus petit objet à numériser. À ce sujet, il est possible de contrôler la qualité des données par une relation entre la résolution et la taille de la plus petite entité [Brian, 2003].

Lorsque la lasergrammétrie et la photogrammétrique sont utilisées sur le même site, le référencement des données issues des deux techniques peut se faire par la topométrie [Mauranges, 2009]. Cela passe par la mise en place de cibles relevées par les trois techniques (lasergrammétrie, photogrammétrique et topométrie). Par ailleurs, dans le cas du couplage entre un appareil photographique et une station de numérisation pour une configuration d'acquisition depuis le même point de vue, les centres perspectifs des instruments doivent être les plus proches possibles. Ce type d'acquisition permet notamment de créer des images panoramiques en projetant un ensemble d'images sur une surface 2D cylindrique, sphérique ou sur un modèle tridimensionnel comme le nuage de points (ensemble cohérent de coordonnées en trois dimensions relatif à une station de numérisation).

En ce qui concerne la photogrammétrique industrielle, différents types de configurations d'acquisition permettent de prendre en compte la morphologie d'un objet. Tout d'abord, l'acquisition d'une seule image est utile sur un objet plan simple. Deux types de restitutions sont utilisés en fonction de la connaissance ou non de la forme d'objet et des paramètres internes de l'appareil photographique. Ensuite, l'acquisition d'un couple stéréoscopique permet de restituer les zones importantes au détail. Dans ce cas, le recouvrement des deux images doit couvrir tout l'objet et les prises de vue doivent être parallèles. Enfin, l'acquisition d'un bloc d'images permet de produire des modèles texturés et dans ce cas, les prises de vues peuvent être convergentes, horizontales, verticales ou obliques.

1.4- Synthèse pour les applications en industrie

1.4.1- Le besoin industriel

La modélisation photogrammétrique apporte beaucoup de flexibilité en industrie. La retro-conception trouve sa voix naturelle en métrologie dès lors que la pièce est définie par des moules ou des graphiques. La taille et l'échelle dans le processus de traitement d'un objet industriel sont des facteurs importants pour le résultat métrique et le rendu des images. En effet, le tolérancement des pièces et des unités industrielles sont des limites physiques pour telle ou telle méthode. L'une des difficultés du tolérancement réside au fait que même avec les outils et méthodes les plus avancés de notre époque notamment la méthode CLIC [Anselmetti,2005] et le logiciel MECAMaster [Clozel,2004], la détermination quantitative des spécifications nécessaires au respect des conditions fonctionnelles se fait toujours à la main. C'est à l'issue de cette étape que les valeurs déterminées sont introduites dans les logiciels de CFAO pour une simulation.

Les acteurs industriels déclarent souvent une sous utilisation de modèles déjà existant à des fins d'optimisation des coûts. Par exemple, il faut aussi investir une partie de l'énergie consacrée au domaine du tolérancement à la mise en œuvre des modèles et outils déjà développés. Ceci par exemple en étudiant la complémentarité des différentes approches notamment en vision industrielle, pour enfin exploiter rapidement leurs points forts dans l'enrichissement des logiciels de CFAO.

Au niveau des normes, beaucoup d'opérations sont faites sur les pièces élémentaires mais pas assez sur leur assemblage. De même, rien n'est fait sur la gestion des interfaces : cette déclaration illustre les points déjà abordés pour l'étude de la qualité dont la traçabilité. Il faut prendre en considération la structure du tolérancement et son impact en assurance qualité. Ceci doit renforcer les liens entre la fabrication et les bureaux d'études.

Les opérateurs industriels s'entendent sur le fait que le tolérancement devient progressivement un sujet de spécialiste : les processus de contrôle diffèrent selon la taille des pièces. On peut alors noter que le maillage à l'aide des courbes de Bézier peut traiter des éléments complexes en un minimum de points de contrôle ce qui permettra de gagner de la place pour la mémorisation des formes. Une mémorisation des points de contrôle est beaucoup moins coûteuse qu'une mémorisation de tous les points d'un objet. Actuellement, l'industrie demande la représentation et la conception d'objets sur ordinateur avant de les transformer dans la réalité.

On rappelle que la rétro-conception géométrique est un processus permettant l'obtention d'un modèle numérique à partir d'un objet réel existant. Le processus de prise de mesures est l'étape initiale conditionnant cette démarche. Plusieurs solutions performantes existent, mais sont trop souvent des boîtes noires pour l'utilisateur. Les limites inhérentes aux principes physiques utilisés ne sont pas directement perceptibles. L'étape ultime est l'intégration des données numérisées dans une solution CAO où une comparaison avec un modèle numérique est possible. Dans ce contexte, il existe plusieurs types de cameras qui pourront satisfaire la CFAO : thermique, infrarouge, visible et laser.

A titre d'exemple, l'intégration d'un capteur à plan laser sur la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) de l'Atelier Inter établissement de Productique Lorrain, a permis de mettre en évidence différents problèmes qui ont été à l'origine de plusieurs travaux. Ces travaux font partie d'un projet qui a vu le jour au sein de l'équipe Ingénierie de Conception et de Fabrication du Centre de Recherche en Automatique de Nancy. Le mémoire propose également un état de l'art des différentes technologies

de numérisation disponibles sur le marché et axe ses recherches sur la détermination de la gamme de numérisation la plus adaptée aux besoins. Le but étant de définir les différentes positions de la pièce qui contribueront à une numérisation totale [Davillerd, 2005], [Benoit, 2005].

1.4.2- Processus d'adaptation

La photogrammétrie a été appliquée dans de nombreux domaines industriels et est potentiellement pour davantage d'expansion et de croissance apparemment sans limites. La photogrammétrie industrielle a été décrite en tant qu'application métrologique dans la construction de bâtiments, le génie civil, l'exploitation des carrières, la construction de véhicule et de machine, la métallurgie, les coques de bateau et le trafic, avec leurs principes fondamentaux et sujets aux limites, y compris les phases de la recherche, de la planification, de la productique, du suivi de la fabrication, de la surveillance, de la réparation et de la reconstruction. Les objets mesurés par les techniques photogrammétriques peuvent être solide, corps liquides, gazeux ou phénomènes physiques, si stationnaire ou mobile, qui permettent la prise de vues photographique. [Meyer,1973], [MP,Asprs].

Beaucoup d'entreprises industrielles utilisent aujourd'hui la vision pour automatiser des opérations fastidieuses de tri ou de contrôle à des cadences très rapides. Ainsi, pour tenter de se rapprocher des contraintes industrielles, nous nous basons sur la démarche suivie lors de l'installation d'un système de contrôle qualité par vision. Dans ce paragraphe nous abordons essentiellement les systèmes de contrôle utilisant les caméras linéaires. En parallèle avec cette progression nous donnons un exemple organique sur des études réalisées par des industriels. Généralement, le choix permettant de diviser cette progression se fait en cinq étapes [Laroche, 2007] :

1. Pertinence d'un contrôle par vision artificielle,
2. Sélection des moyens matériels,
3. Développement logiciel,
4. Installation du système et validation du contrôle,
5. Acceptation et pérennité du système.

Dans le premier point nous nous posons la question de la nécessité d'un système de contrôle qualité par vision artificielle, discuter le cas de la photogrammétrie en atelier. Pour répondre à cette question nous serons amenés à discuter sur les possibilités et les limites des systèmes de vision artificielle appliqués au contrôle qualité. Les seconds et troisièmes points représentent l'essentiel de cette adaptation. Il est nécessaire d'opérer sur des exemples concrets concernant le choix des éléments matériels qu'il est souhaitable d'utiliser. Les algorithmes permettant d'effectuer le contrôle des produits en temps réel seront définis selon le principe de fonctionnement du matériel. Bien que dans certains cas, des calculs élémentaires suffisent à résoudre les problèmes posés, tout l'arsenal des méthodes du traitement d'image vient bien à point pour parvenir à extraire l'information pertinente. Le quatrième point permet de s'apercevoir des problèmes et dans ce cas de modifier tout ou une partie du matériel ou encore un traitement logiciel d'étalonnage.

L'expérience montre que le dernier point (5) reste le plus délicat puisqu'il fait intervenir des facteurs humains. Le niveau du personnel de production chargé du fonctionnement au quotidien ainsi qu'au niveau du personnel du service "contrôle qualité" chargé du bon fonctionnement dans le temps du système. L'organigramme suivant est un exemple permettant de situer la métrologie dans un processus industriel et par la même occasion de localiser la photogrammétrie en productique. Le contexte

organisationnel étant associé au contexte technique à travers l'objet, l'atelier ou l'usine. L'adaptation s'exprime par le fait que l'interaction métrologique sera basée sur une géométrie, de forme, taille et de repérage. Il existe une bonne série d'opérations à satisfaire pour des problèmes d'adaptation : traitements online et suivi des éléments industriels.

La mise en place d'une démarche formalisée pour conserver le patrimoine en industrie grâce à un Système d'Information dédié orienté selon une vision Produit-Processus peut aussi être une alternative peu commune pour le génie industriel. Il est évident que l'archéologie industrielle se propose de mettre en corrélation les entités définies par des processus liés par des chaînes d'actions et des chaînes numériques. Des outils et des méthodes sont à définir pour décrire les entités mises en cause et analyser les liens les interconnectant. Le domaine d'étude étant celui des manufactures, des usines, des industries, il convient de s'interroger sur la possibilité d'une adaptation des outils et méthodes issus du monde industriel au champ disciplinaire de la conception et de la retro. Conception.

Notons cependant que cette hypothèse est bijective et que les résultats de cette démarche « Génie Industriel vers Patrimoine » pourront être réinjecté dans le monde industriel afin d'enrichir ses modèles et leurs sémantiques. Afin de résoudre le problème de la conservation de l'objet physique, les outils des sciences pour l'ingénieur et plus largement les outils du virtuel peuvent apporter une solution. De plus, comme Olivier Lavoisy le démontre dans sa thèse [Lavoisy,2005], le graphisme technique a évolué exponentiellement depuis quelques années. En effet, le graphisme technique est un moyen pour transmettre le savoir faire et les connaissances contenus dans les ateliers, les centres d'apprentissage, et les bureaux d'études. L'évolution du graphique technique détermine depuis les années 2000 des efforts dans l'intégration de filières numériques [Vandendriessche,2000]

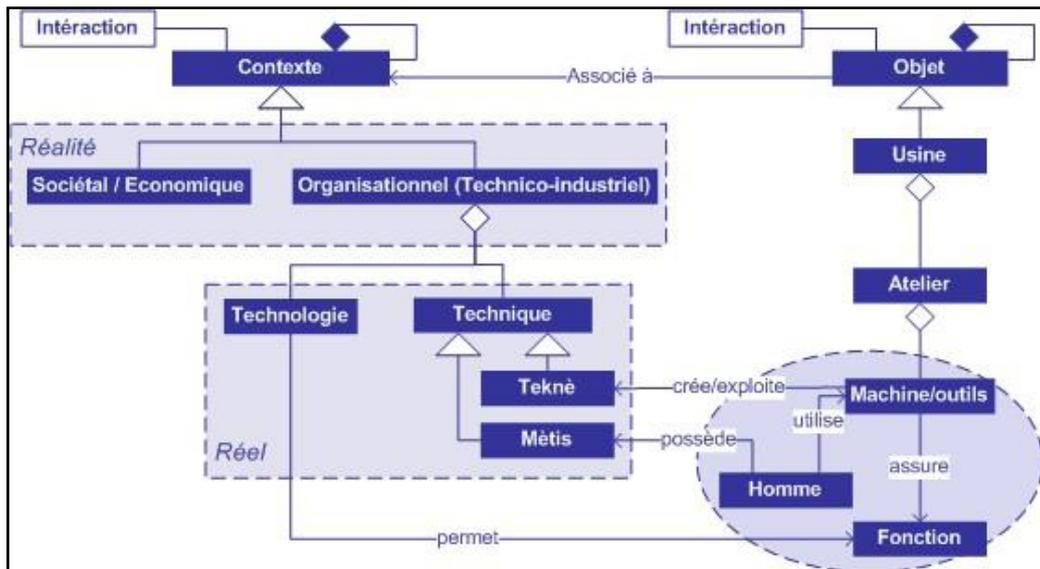


Figure 1.17: Description du domaine des objets proto-industriels complexes [Laroche,2005]

Les évolutions considérables d'analyse d'assemblage 3D sont une contribution à la résolution des lacunes de la norme ISO d'origine 2D. La figure 1.17 s'inscrit dans la logique que l'on s'est attribuée au début de cette étude, c'est-à-dire se fixer les objectifs de métrologie photogrammétriques. Par ailleurs, son principal défaut est sa nécessité à utiliser des calculateurs très puissants. Mais les industriels aimeraient aussi une sauvegarde du patrimoine industriel et technique pour des raisons de développement et d'optimisation.

Des sociétés se sont spécialisées dans la mesure 3D optique par couplage de la photogrammétrie et du traitement d'image. A titre d'exemple, le système AdventCR de mesure 3D sans contact à grande vitesse est destiné au contrôle en ligne ou bord de ligne. Il permet d'effectuer des mesures de géométrie et de points de surface avec une bonne rapidité et une précision allant jusqu'à 100 µm sans avoir besoin de mettre des cibles sur la pièce à mesurer. La gamme Advent permet d'embarquer un capteur incluant des caméras CCD sur des robots pour automatiser le contrôle si bien que ce système est utilisé pour le contrôle des caisses automobiles chez Renault (une heure de contrôle au lieu de neuf heures). D'autres systèmes basés sur le même principe atteignent des précisions entre 75 µm et 25 µm pour des objets de 3,5 m. De la même manière, la triangulation laser est une technique qui permet de calculer la distance entre un objet donné et une source laser, et une ou plusieurs caméras vidéo [Zani, 2004].

Lorsque les caméras CCD sont venues concurrencer l'appareil photo et les supports numériques, le traditionnel film argentique, plus personne n'a parlé le même langage: alors que certains utilisent le terme de "vidéogrammétrie" pour désigner une photogrammétrie dans laquelle l'appareil photo a été remplacé par une caméra numérique, d'autres préfèrent parler de "photogrammétrie numérique", tandis que d'autres encore réservent le terme de photogrammétrie aux mesures en temps différé et celui de vidéogrammétrie pour les mesures en temps réel [Zani,2004]. En réalité, il s'agit de distinguer les opérations on line des opérations off line en milieu de production.

1.4.3- Métrologie et vision industrielle

L'évolution du système métrologique, devenu SI (Système International), a été confiée aux bons soins des scientifiques. Les scientifiques l'ont fait évoluer selon leurs besoins, c'est-à-dire vers une précision de plus en plus grande, notamment en ce qui concerne le Temps, pour lequel ils approchent les 10^{-15} secondes (femto-seconde). C'est l'échelle de temps qui permet des changements de système de mesure et même de conception de la physique, puisque la vitesse de la lumière est fixée comme constante universelle, supposée par définition invariable dans le temps et l'espace. Pour la mesure des longueurs, ils ont adopté la vitesse de la lumière dans le vide, laquelle n'est pas d'un accès facile pour le commun des hommes.

La mesure informatique est à base 2 (et non en base 10), et ses multiples ont une progression exponentielle, non pas décimale, mais en base 210. Il est important de le souligner, car la confusion est souvent faite entre 10^3 (1000) et 2^{10} (1024). Cet exemple montre comment, de nos jours comme par le passé, à partir d'un besoin social, ici le développement de l'informatique et des télécommunications, une nouvelle mesure naît de la pratique (imposée par les entreprises dominantes) et devient ensuite une norme (et non le contraire). À travers le temps, en effet, la culture métrologique naît de la pratique. Le système métrique décimal semble être une exception à cela en ce sens qu'il est issu des pratiques des scientifiques et non des pratiques sociales (en majorité marchandes) de la mesure. Ce type d'évolution pourrait s'appliquer pour la photogrammétrie.

La méthodologie de la photogrammétrie terrestre montre des caractéristiques prometteuses pour l'acquisition de données géométriques 3D, elle rejoint de ce fait la communauté des métrologues. Plusieurs approches photogrammétriques ont déjà été utilisées pour des objets rapprochés, mais peu d'entre elles ont été consacrées au contrôle on line sur le terrain. En effet, la restitution 3D des unités de chantier montre la possibilité de la photogrammétrie en temps réel. Certaines expérimentations ont

d'abord eu lieu en laboratoire afin de valider l'exactitude et l'approche de la méthode. La recherche de modèles tridimensionnels d'objet permettant une visualisation exacte de l'objet est toujours d'actualité, le sens du rapport image/objet et virtuel/ rendu est en parfaite croissance dans le domaine de la conception. Différentes formes d'utilisation de la photogrammétrie (échelle, base/éloignement, résolution, cibles, précision) sont possibles, par sa flexibilité la technique s'adapte très bien mais il est nécessaire de trouver le bon prototype pour assurer une bonne métrologie. La conception s'occupera à définir les niveaux suivants :

- Un premier niveau d'acquisition,
- Un second niveau lié à l'étalonnage,
- Un troisième niveau lié aux traitements et à l'analyse des résultats.

Pour obtenir une bonne qualité de reconstruction tridimensionnelle 3D, la conception est une phase nécessaire à la mise en place du système de mesure. Le couple acquisition et traitement s'opère de façon multiple pour arriver à un résultat cohérent, figure (1.18). La densification et la composition texturale doivent améliorer la qualité du rendu, l'approche offline est souhaitée pour un étalonnage de la scène de l'objet.

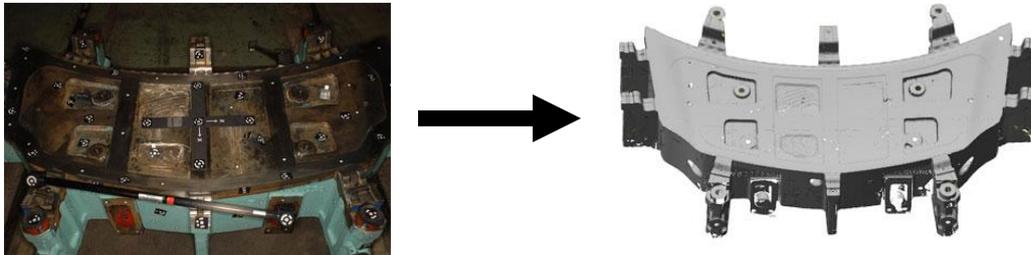


Figure 1.18: Digitalisation d'un presseur et Reconstruction de surfaces du presseur (RDS)

La recherche à long terme doit permettre de développer un système à base de connaissances capable de produire automatiquement des logiciels de traitement photographique et d'image à partir d'une spécification faite par un ou plusieurs utilisateurs. Cet objectif est très ambitieux et quelque fois le résultat est un échec. Néanmoins, adopter une approche constructive de la réalisation d'un système de mesure est plus judicieux. Pour cela, il nous est nécessaire de construire un atelier d'ingénierie des connaissances en traitement d'images qui se veut le lieu de l'étude et du développement de ces processus. L'atelier se présente comme un ensemble d'outils logiciels partageant une même ontologie destinés à faire collaborer l'expert du traitement d'images et l'ingénieur de la connaissance afin d'aboutir à une théorie du développement d'application intégrable dans un système. La vision industrielle en métrologie reflète une multitude de facette pour l'extraction d'une information géométrique tridimensionnelle. Les visions en coupe, en profil et en 2.5D ne sont plus suffisantes pour l'analyse de la conformité des pièces industrielles. Une photogrammétrie rapprochée sur plusieurs perspectives ou faisceaux d'un objet permettra un meilleur rendu du sujet, figure (1.19).

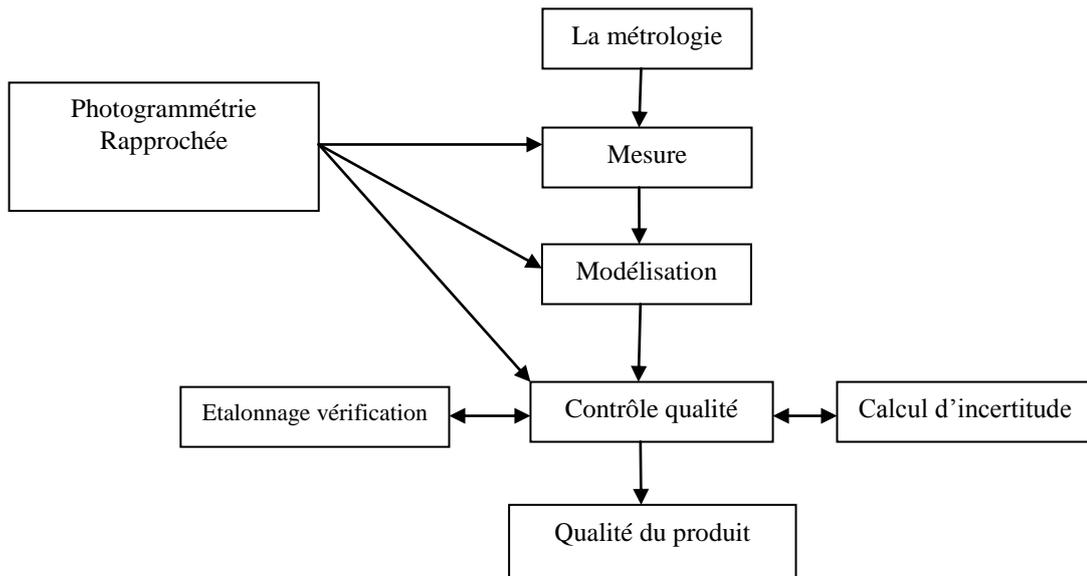


Figure 1.19 : Processus en métrologie

La récente montée en puissance des micro-ordinateurs a permis de reprendre l'idée sur la photogrammétrie digitale avec plus de chances de réussite. Le cahier des charges est simple; les fonctions seront celles d'un appareil de restitution analytique traditionnel avec orientations interne et externe de photographies aériennes ou terrestres, saisie et codification d'objets, saisie de mesures de triangulation ou de Modèle Numérique de Surface. Il y'a aussi les images spatiales en développement constant qui utilisent ce type de traitement [Egels, 2001].

Les caractéristiques d'un restituteur sur PC temps réel, vitesse d'affichage et de réaction, gros volume de données, commande interactive et réactive sont proches de celles que l'on demande à un jeu vidéo, et c'est du côté de ces techniques de programmation qu'il faut regarder, d'autant plus que l'on commence à trouver des jeux vidéo stéréoscopiques (même s'ils sont aujourd'hui encore très fatigants). Il existe plusieurs approches de modélisation permettant de donner une solution à moindre coût. On trouve dans le prototype proposé par Grussenmeyer et Elkhilil [Grussenmeyer,2002], un modèle d'orientation externe illustrant un processus photogrammétrique adapté aux besoins actuels de la mesure. Selon cette approche, il existe trois groupes permettant d'assurer cette opération, figure (1.20):

- traitements linéaires pour des problèmes non linéaires : solution approchée
- traitement non linéaires : solution rigoureuse,
- traitements en géométrie projective.

La relation entre ses différentes solutions pour l'orientation externe permet d'atteindre des résultats très précis. D'un autre côté, les problèmes de densification de réseaux et de restitution sont des problèmes d'actualité auxquels il faut adjoindre le graphisme 3D (rendu).

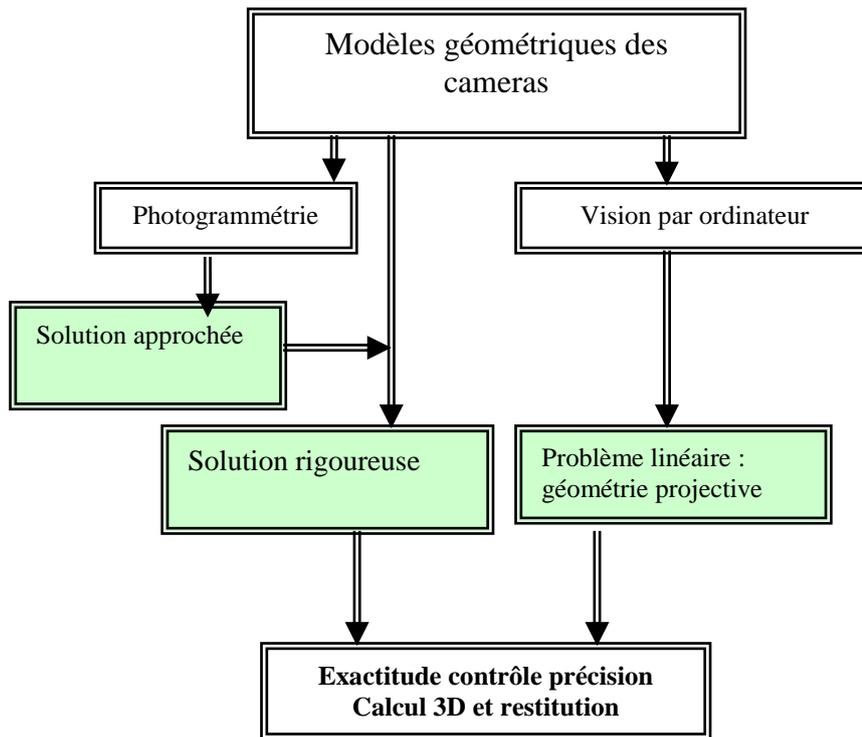


Figure 1.20 : Orientation Externe en Photogrammétrie

L'identification des points homologues a longtemps exigé une intervention humaine, et représentait alors une phase de travail assez coûteuse. Il est nécessaire de compléter l'orientation externe par une reconnaissance automatique des points images pour appréhender une restitution numérique, pour cela des algorithmes de filtres et de détecteurs sont présentés dans le second chapitre. Par ailleurs, il y'a des niveaux de conception à mettre en œuvre pour distinguer des niveaux de qualité.

En citant quelques travaux, la première étape pour établir un réseau photogrammétrique est la conception d'un réseau. Conceptuellement, le but est de définir une configuration de réseau optimale et un plan optimal d'observation qui satisferont la qualité requise avec un effort minimum. En d'autres termes, après que la définition des conditions de qualité de réseau (précision et fiabilité), la technique de l'optimisation de réseau tient compte d'une configuration réseau optimale et un ensemble d'observations qui répondent aux exigences [Grafarend, 1974] ; [Cross, 1985] ; [Schmitt, 1985] ; [Schaffrin, 1985], [Amiri2006]. Il n'est pas évident de résoudre tous les aspects de l'optimisation d'un réseau dans une étape mathématique simple. Au lieu de cela, le problème de la conception de réseau géodésique a été divisé en sous-problèmes dans lesquels du progrès pourrait être accompli. La classification admise proposée jadis par Grafarend, [Grafarend, 1974], [Gustavo, 95] est de la forme:

- Conception de Zéro-Ordre (ZOD) : le problème de la donnée (système du même rang de référence)
- Conception de premier ordre (FOD) : le problème de configuration
- Conception de second ordre (SOD) : le problème de poids
- Conception de troisième ordre (TOD) : le problème de densification

La recherche dans ce domaine en photogrammétrie rapprochée a été faite par Fraser [fraser, 1984, 1992, 1996] qui a discuté du problème de conception de réseau. Mason, [Mason, 1994] a employé les systèmes experts et Olague, [Olague, 2000] a employé un algorithme génétique pour le placement des appareils-photo matriciels en utilisant des simulations heuristiques sur ordinateur. L'analyse de visibilité par un système brouillé d'inférence pour le placement d'appareil-photo a été faite par Saadatseresht [Saadatseresht, 2004]. Des considérations de précision et de fiabilité dans la photogrammétrie rapprochée, introduites comme des conditions de qualité de réseau, ont été adressées par [Gruen, 1978, 1980] et [Torlegard, 1980]. Des considérations sur le placement d'appareil-photo pour la détermination des paramètres additionnels de l'appareil-photo en employant des points de commande ont été adressées par Gruen, [Gruen, 2001], [Amiri, 2005], à montré l'influence de différents réseaux d'appareil photographiques panoramiques sur la précision des coordonnées d'objet.

La conception de méthodes numériques peut être étalée sur quatre phases selon le besoin ou la configuration demandée. Dans sa démarche, Amiri [Amiri, 2006] a prévu trois étapes pour la conception de réseau de mesure : Le SOD, le FOD et le ZOD ont été exécutés pour appréhender le processus métrologique. Dans la phase SOD, la précision des coordonnées de point a été estimée à partir de la précision demandée des paramètres optiques du réflecteur primaire du télescope de Planck. Une surface des moindres carrés modélisant pour l'ajustement de précision d'ellipsoïde a été développée permettant de relier les coordonnées de point aux paramètres optiques. Le FOD a été exécuté par simulation heuristique pour trouver une configuration optimale des stations d'appareil-photo afin de réaliser la précision estimée des coordonnées de point dans l'étape précédente de conception (SOD). La phase ZOD a été exécutée afin de réaliser la meilleure précision des paramètres optiques. Un réseau photogrammétrique rapproché optimal a été conçu par simulation heuristique avec une précision relative meilleure que le 1:1,000,000. L'erreur RMS sur les résidus de point d'image était de 1/90 du pixel et la précision moyenne de point d'objet était de 1.8 et 2.1 microns pour les haches de partie latérale et de profondeur. Cette précision extrêmement élevée a pu être acquise par un réseau géométrique fort, basé sur le concept d'hyper redondance, une méthode de détection efficace et un auto étalonnage avancé.

1.4.4- Reconstitution des surfaces

Depuis les années 1950, la disponibilité de nouvelles machines outils permet l'usinage de formes 3D à partir de pièces de bois ou d'acier. Ces formes pouvaient être utilisées comme poinçons et matrices pour emboutir des produits comme la tôlerie de voitures. On constate donc le manque de logiciels adéquat pour ce type de production. Afin d'usiner une forme à l'aide d'un ordinateur, il devient nécessaire de produire une modélisation de celle-ci compréhensible par l'ordinateur. Par conséquent, le besoin de modèles mathématiques relativement aux surfaces gauches devient indispensable.

Dans les différents maillons de la chaîne de conception et de fabrication d'un produit, la reconstruction des objets est en évolution constante. La numérisation de formes complexes fait partie de ces évolutions et elle est devenue un instrument incontournable du processus de rétro-conception. Cependant, la mise en place d'une cellule de digitalisation dans un atelier de fabrication ou, plus généralement dans le milieu industriel, apporte son lot de questions et de problèmes. Comment définir le besoin métrologique, quelle est la forme et la taille des pièces à contrôler, comment définir les facettes unifiée sous forme 3D. Le tolérancement en dimensionnement permet d'établir une classification pour des programmes qualité et de définir une chaîne CFAO pour la production. En

effet, la conception assistée par ordinateur (C.A.O) tourne autour de deux grandes méthodes : le bitmap (image raster) et le vectoriel. Le bitmap est une technique dans laquelle une image est décomposée en des millions d'images (pixels). Parmi ses inconvénients, la capacité énorme qu'elle occupe sur le disque dur, et puis l'impossibilité de redimensionner l'objet puisqu'on aura des pixels. Le vectoriel, par contre, est une technique plus complexe qui se base sur l'élément point en tant qu'entité élémentaire, des courbes usuelles telles que le cercle ou l'ellipse, et des courbes plus évoluées sont utilisées dans la reconstruction.

La technique est très précise et les dessins supportent le redimensionnement ou le recadrage sans avoir aucun effet négatif sur la qualité de l'image. Ce procédé est aussi beaucoup plus facile à manipuler, on applique des transformations affines sur chaque objet, une translation d'une partie de dessin par exemple, ne demande qu'un seul vecteur, alors que l'on devrait traduire chaque pixel dans le bitmap. Ainsi, dans l'automobile ou l'aéronautique par exemple, les carrosseries sont représentées par des surfaces de Bézier puisqu'on doit pouvoir reconstituer à la fin des surfaces aérodynamiques c'est-à-dire sans « cassures ». Les courbes de Bézier sont utilisées aussi pour la conception des terrains, des moteurs, où des logiciels tels Autocad sont les plus connus et utilisés par la communauté des industriels, figure (1.21).

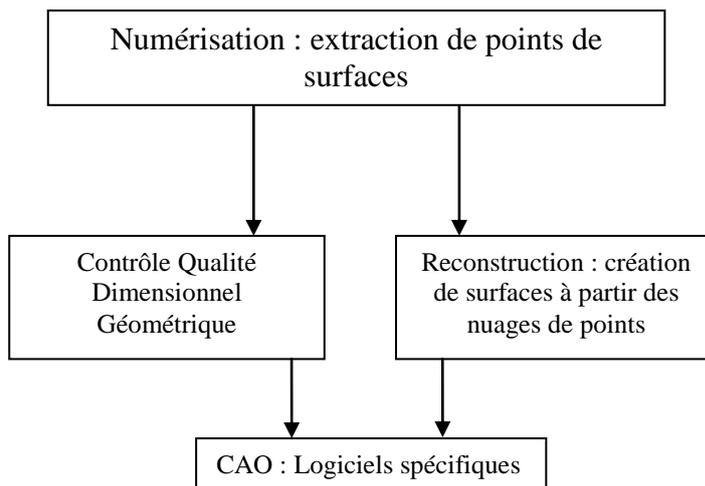


Figure 1.21 : Le contrôle 3D d'une pièce

La majorité des applications faisant intervenir des images. La plupart des scènes réelles ou virtuelles sont composées de courbes ou de surfaces. Pour les problèmes de synthèse d'images les courbes et les surfaces paramétrées sont utilisées pour le rendu 3D des objets reconstitués.

Afin de représenter les objets, les courbes et les surfaces peuvent être traités de deux façons :

- La modélisation à partir d'un modèleur et sur la base d'une description mathématique ou de manière interactive.
- La modélisation à partir de données issues de mesures, de capteurs ou d'images, en général des points de l'espace, L'objet est modélisé par approximations (modèles mathématiques simples), figure (1.22).

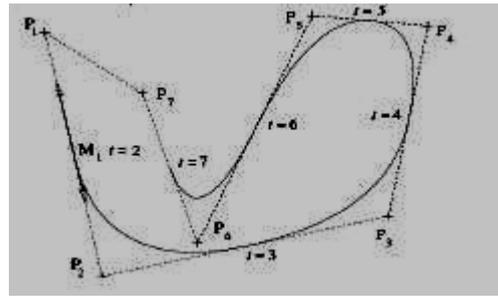


Figure 1.22 Tracé des courbes $k=3$

▪ **Courbes paramétrées**

Il existe un besoin industriel pour approximer et/ou interpoler des contours d'objets industriels (pièces, outils, maquettes, simulation). Les critères de continuité du premier ordre (tangentes), du 2^{ème} ordre (points d'inflexion) ne peuvent satisfaire une reconstitution 3D. Les courbes quadratiques d'ordre deux (2) présentent une flexibilité insuffisante.

Une solution permettant un maillage 3D en considérant les courbes 2D polynomiales d'ordre 3, généralisées ensuite aux surfaces 3D (*de Casteljau : Citroën 1959, Bézier : Renault 1962, Ferguson : Boeing 1964, Coons : MIT 1967 Catmull : Univ. Utah 1974*).

Les définitions suivantes permettent de situer le contexte géométrique et d'analyser des approches de la reconstruction 3D. La localisation d'un point P qui se "déplace" dans le plan avec un degré de liberté définie une courbe en 2D :

$$P \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x(u) \\ f_y(u) \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

De la même manière, la localisation d'un point P qui se "déplace" dans l'espace avec un degré de liberté définie une courbe 3D:

$$P \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x(u) \\ f_y(u) \\ f_z(u) \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Les courbes sont définies sur des intervalles bornés dont le paramètre 'u' est compris entre zéro (0) et un (1).

▪ **Les Courbes de Bézier**

Se sont des courbes lissées définie par N+1 points de contrôle P0, P1,...PN, contenant les extrémités P0 et PN et passant au voisinage des autres points. La formulation mathématique est comme suit :

$$P \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x(u) \\ f_y(u) \\ f_z(u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^N B_i(u)x_i \\ \sum_{i=0}^N B_i(u)y_i \\ \sum_{i=0}^N B_i(u)z_i \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

Si on prend N=3 et donc 4 points de contrôle pour définir la courbe. La fonction f devient alors :

$$f(u) = \sum_{i=0}^3 B_i(u)P_i \quad (1.12)$$

La notation matricielle donnera donc:

$$f(u) = (u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1) M_B \begin{pmatrix} \vec{P}_0 \\ \vec{P}_1 \\ \vec{P}_2 \\ \vec{P}_3 \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

Avec M_B , la matrice génératrice des courbes de Bézier.

Les courbes de Béziérs présentent des inconvénients, en effet, si on a plus de 4 points de contrôles, il faut générer 2 courbes (surfaces). Les tangentes sont définies aux extrémités de la courbe de Bézier, mais pas la dérivée d'ordre 2, donc une impossibilité pour détecter des points d'inflexions. Si un point de contrôle change légèrement de position, l'ensemble de la courbe (surface) est affectée.

▪ **Les Splines**

Pour corriger les limites des courbes de Béziérs à représenter correctement une surface, l'approche spline permet d'assurer la continuité d'ordre 2 aux points de jonction. Elles sont très utilisées pour le design des avions, des voitures et des coques de bateaux

Splines de Catmull-Rom

Disposant de $N+2$ points $P(0), P(N+1)$, on cherche une courbe passant par $P(1) \dots P(N)$ dont la tangente au point $P(i)$ est parallèle à la droite $P(i-1), P(i+1)$, chaque segment S_i est défini par :

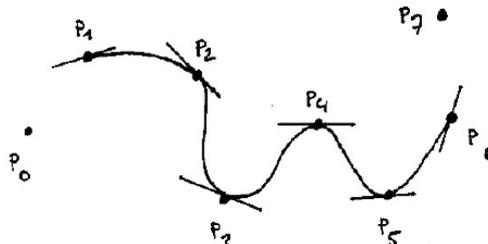


Figure 1.23 Splines de Catmull-Rom

$$f_i(u) = (u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1) \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{P}_{i-1} \\ \vec{P}_i \\ \vec{P}_{i+1} \\ \vec{P}_{i+2} \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

La méthode présente un inconvénient car elle nécessite la connaissance des points P_0 et P_7 .

- Toute courbe B-spline commence par un point sur la première arête du polygone de contrôle et est tangente à celui-ci (idem pour le dernier point).
- Les points intermédiaires sont des points de contrôle externes à la courbe.
- La transformée affine d'une courbe B-spline est la courbe passant par la transformée affine des points.
- Une courbe B-spline appartient à l'enveloppe convexe des points qui la contrôlent
- Si elle est d'ordre n , elle appartient à l'enveloppe convexe des $n - 1$ point consécutifs.

B-Splines uniformes

Dans ce cas, on connaît N points $P(1) \dots P(N)$ et chaque segment S_i est défini par la formule (1.15) et on cherche une courbe proche de $P(1) \dots P(N)$ tel que :

$$f_i(u) = (u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1) \frac{1}{6} \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{P}_{i-1} \\ \vec{P}_i \\ \vec{P}_{i+1} \\ \vec{P}_{i+2} \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

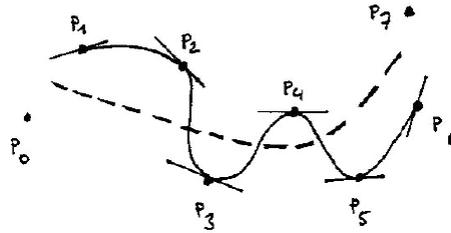


Figure 1.24 : Courbe intermédiaire dans un semi de points

La continuité est d'ordre 1 et 2 d'un segment à l'autre.

Il existe d'autres formes de la fonction Splines :

- B-Splines non uniformes avec une généralisation du principe des Splines et les nœuds ne sont pas forcément régulièrement repartis.

L'équation est de la forme :

$$P = f(u) = \sum_{i=0}^N \tilde{P}_i N_{K,i}(u) \tag{1.16}$$

$$N_{K,i}(u) = \frac{u - x_i}{x_{i+K} - x_i} N_{K-1,i}(u) + \frac{x_{i+K} - u}{x_{i+K} - x_{i+1}} N_{K-1,i+1}(u)$$

$$N_{1,i}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \leq u \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- B-Splines non uniformes rationnelles (NURBS)

Equation est récursive de la forme :

$$P \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x(u) \\ f_y(u) \\ f_z(u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{b_{x0} + b_{x1}u + b_{x2}u^2 + b_{x3}u^3}{c_0 + c_1u + c_2u^2 + c_3u^3} \\ \frac{b_{y0} + b_{y1}u + b_{y2}u^2 + b_{y3}u^3}{c_0 + c_1u + c_2u^2 + c_3u^3} \\ \frac{b_{z0} + b_{z1}u + b_{z2}u^2 + b_{z3}u^3}{c_0 + c_1u + c_2u^2 + c_3u^3} \end{pmatrix} \tag{1.17}$$

Cette forme englobe les coniques et les autres splines et permet un contrôle plus fin de la courbe.

L'étude des maillages utilisés dans la reconstitution est propre à chaque application et l'environnement dans lequel se trouve la pièce. Les courbes Nurbs (Non Uniform Rational B-Spline) de degré k est définie par :

- Un vecteur de nœuds $T = (t_0, t_1, \dots)$,
- $n + 1$ points de contrôle P_i ,
- $n + 1$ fonctions de pondération $R_{i,k}$ déduites des fonctions,
- De pondération des B-splines $N_{i,k}$ au moyen de $n + 1$ poids W_i (généralement choisis positifs stricts) :

$$\mathcal{R}_{jk} = \frac{\sum w P_i N_{i,k}(t)}{\sum w N_{i,k}(t)} \tag{1.18}$$

Quelques propriétés des Nurbs :

- En choisissant correctement les points de contrôle et les poids, toute conique peut être représentée exactement par une Nurbs.
- La transformée affine d'une courbe Nurbs est la courbe passant par la transformée des points.

- Contrairement aux courbes B-spline, l'image d'une courbe Nurbs par une projection est la courbe Nurbs passant par la projection des points ; les poids doivent être recalculés en fonction de la matrice de projection.
- En raison de ces propriétés, les Nurbs sont fournies dans de nombreux logiciels d'infographie

▪ **Les surfaces Nurbs**

- Les surfaces Nurbs s'obtiennent par extension de la définition des courbes Nurbs,
- Deux vecteurs de nœuds T et S, un pour chacune des variables t et s,
- $(m + 1) \times (n + 1)$ points de contrôle $P_{i,j}$,
- $(m + 1) \times (n + 1)$ fonctions de pondération $R_{i,j,k}$ déduites des fonctions de pondération des B-splines N au moyen de $(m + 1) \times (n + 1)$ poids $w_{i,j}$:

Actuellement, le designer est capable de concevoir théoriquement et de simuler un jeu de condition fonctionnel basé sur les cotes et les dimensions. Par rapport à cette démarche, les industriels partent de la pièce réelle pour générer par la suite des formes de Bézier (maillage) pour en faire un prototype.

La problématique du tolérancement et d'analyse d'assemblage actuelle peut se décliner de la manière suivante, figure (1.26) dans un environnement de pièces de grandes dimensions.

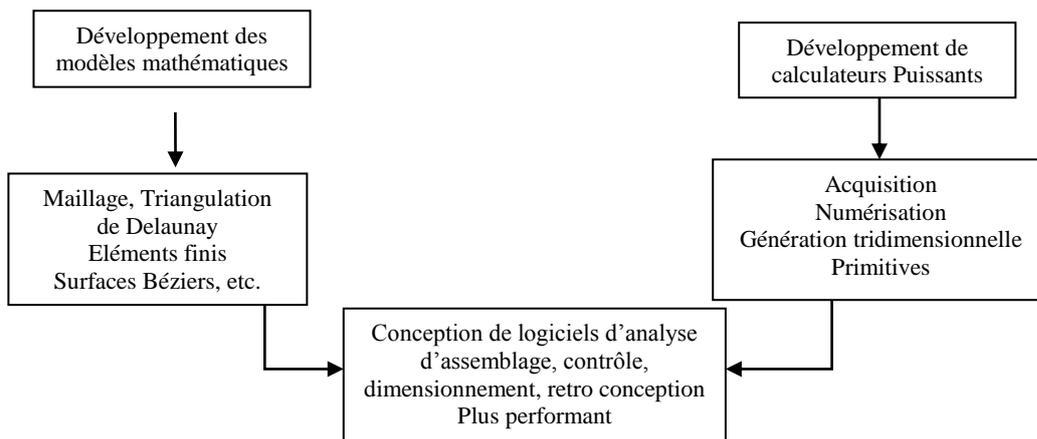


Figure 1.25 : Organigramme d'une démarche CAO

Le rôle des surfaces dans les technologies modernes justifie le nombre très important d'instruments nouveaux apparus pour les étudier. Caractériser les surfaces d'un point de vue purement géométrique est chose complexe. Les outils de traitement des signaux à une dimension (filtres, analyseurs de spectres) ont trouvé leurs équivalents pour les grandeurs bidimensionnelles, et pour les surfaces isotropes, l'analyse unidimensionnelle d'un profil est suffisante pour apporter une bonne connaissance de la surface. À l'étalonnage des sondes et des capteurs qui servent à dresser la carte d'une surface, il faut adjoindre la connaissance des bandes passantes des fonctions de transfert de l'instrumentation mise en œuvre. Cette dernière condition est souvent la plus difficile à remplir pour comparer des résultats obtenus par des voies différentes.

Nous avons vu des dispositifs très variés, dont certains mesurent une cote verticale, certains une différence de cotes entre points voisins ou éloignés, d'autres mesurent une pente locale, et d'autres enfin mesurent une variation de pente entre deux points voisins, c'est-à-dire une courbure locale. Ces différents procédés sont évidemment caractérisés par leur sensibilité, mais aussi et surtout par leur

fonction de transfert des fréquences spatiales qui traitent différemment écarts de forme, ondulation et rugosité.

C'est l'exploitation complète mais prudente de ces instruments qui conduira, dans chaque discipline, à établir les procédures pour atteindre tel ou tel paramètre caractéristique d'une surface. Les recoupements de résultats d'origines diverses sont souvent le meilleur moyen de se prémunir contre les artefacts insoupçonnables d'une technologie particulière. Les méthodes optiques et les palpeurs mécaniques, les microscopies à effet tunnel sont des techniques très différentes dont aucune n'est absolument meilleure que les autres. Elles sont toujours plus ou moins complémentaires.

La forme géométrique des pièces est déterminée par les surfaces géométriques qui les délimitent. Une surface géométrique est un élément de forme géométrique, par exemple une portion de plan, une portion de cylindre, une portion de cône, etc. La modélisation géométrique d'une pièce revêt deux aspects, une modélisation de la forme réelle créée par un procédé de fabrication et une modélisation de la forme idéale définie par un dessin ou tout autre moyen informatique.

Les éléments de forme géométrique constituant une pièce sont définis :

- de manière réaliste par des ensembles finis de points mesurés et par des éléments géométriques de substitution,
- de manière idéale par des éléments géométriques nominaux.

Le tolérancement permet de limiter les variations des éléments géométriques réels par rapport aux éléments géométriques nominaux. La modélisation des formes géométriques s'appuie sur les bases de la géométrie euclidienne, aussi nous conserverons le vocabulaire traditionnel ou les mots, droite, cercle, plan, sphère, cylindre, cône et tore désignent des surfaces et des lignes d'étendue infinie et de forme idéale.

Les surfaces géométriques réelles sont les interfaces matière-environnement qui délimitent la forme réelle d'une pièce. La géométrie de ces interfaces est fonction du mode d'obtention des surfaces, de la nature du matériau, de la température, du degré d'hygrométrie, de l'état de contraintes de la pièce etc..

Pour un état donné des paramètres, une surface géométrique réelle est définie par l'ensemble de tous les points appartenant à son interface matière - environnement. La désignation d'une surface géométrique réelle reprend en général le même nom que celui utilisé en géométrie des surfaces parfaites auquel on adjoint le qualificatif de réel ou le qualificatif de surface réputée. On parlera ainsi de plan réel ou de surface réputée plane, de cylindre réel ou de surface réputée cylindrique etc...

Les surfaces géométriques réelles qui désignent une interface matière-environnement sont les surfaces réputées plane, sphérique, cylindrique, conique et torique. Le mot surface réelle regroupe toutes les autres formes de surfaces (surface réglée, de raccordement, de Bézier, etc...). Une surface géométrique réelle particulière est le plan médian réel de deux surfaces réputées planes. Cette surface est constituée de l'ensemble des milieux de tous les bipoints qui peuvent être pris suivant "une direction", sur l'ensemble des deux surfaces réputées planes.

Le plan médian réel n'est donc pas directement un interface matière-environnement. Par extension on pourrait définir une surface géométrique réelle comme étant un ensemble de points reliés par une surface continue qui possède des écarts géométriques par rapport à une surface géométrique idéale. Une ligne géométrique réelle est un ensemble de points reliés par une ligne continue qui possède des écarts géométriques par rapport à une ligne géométrique parfaite (droite ou cercle). Dans la pratique une ligne géométrique réelle peut-être obtenue de deux façons :

- Soit par l'intersection d'une surface géométrique idéale et d'un interface matière environnement. On peut citer comme exemples une génératrice réelle appartenant à une surface réputée cylindrique (ou conique), un cercle réel appartenant à une surface réputée cylindrique, une droite réelle appartenant à une surface réputées plane. Ces

trois lignes réelles sont obtenues par intersection de la surface réelle et d'un plan judicieusement choisi.

- Soit par un ensemble de points construits à partir d'une surface réelle. Par exemple l'axe réel d'un cylindre (ou d'un cône) obtenu par l'ensemble de tous les centres des cercles construits à partir d'une surface réputée cylindrique (ou conique), ou le cercle réel obtenu par projection dans un plan de l'ensemble des points appartenant à une surface réputée cylindrique.

On remarque qu'une ligne géométrique réelle ne peut être déterminée que par une opération de construction géométrique. D'un autre côté, les points géométriques réels sont obtenus à partir de surfaces réelles. Par exemple intersection d'une droite et d'une surface géométrique réelle, milieux de deux points réels, intersection d'une ligne géométrique réelle et d'un élément géométrique idéal, centre d'un cercle réel etc.

Pour des raisons pratiques et économiques, la "mesure" d'un élément géométrique réel ne peut se faire que par un nombre limité de points. A l'aide d'un traitement photogrammétrique chaque élément géométrique réel est donc connu par un ensemble fini de N points saisis, duquel on déduit par compensation ou transformation N points mesurés. Par convention les ensembles de points saisis et points mesurés sont désignés par le nom de l'élément géométrique utilisé en géométrie des surfaces parfaites, auquel on adjoint le qualificatif de saisi ou de mesuré.

L'association d'un élément géométrique parfait à un ensemble de points est l'un des problèmes fondamentaux de la mesure tridimensionnelle. Cette association est nécessaire à chaque étape du processus d'interprétation des mesures. En effet elle permet tout d'abord, avec un critère d'association des moindres carrés, de définir les normales aux points de contact entre le palpeur et la surface et de calculer les ensembles de points mesurés, puis de donner suivant différents critères une représentation simplifiée de la géométrie réelle de la pièce, elle permet également d'effectuer des contrôles par calibre numérique, d'associer une référence ou un système de références à plusieurs éléments mesurés et de calculer un défaut de forme dans le cas où la machine à mesurer permet de mesurer une surface avec un très grand nombre de points. L'identification d'un élément géométrique parfait, représentatif d'un ensemble de points, doit permettre de définir la nature de l'élément géométrique, son orientation, sa position et ses dimensions intrinsèques.

1.5 - Conclusion

1.5.1 Aspects économiques

Nombreux sont les éditeurs de logiciel à s'être penchés sur cette question, que ce soit dans le domaine commercial, ou dans les organismes de formation. Mais aucune réalisation ne convenait réellement au but fixé. Les logiciels commerciaux nécessitent généralement des configurations informatiques bien définies (machines multiprocesseurs, cartes graphique et écrans spécifiques), ce qui exclut pratiquement la transportabilité du système. De plus, leur coût de licence est élevé, et le coût d'installation d'une salle de travaux pratiques de photogrammétrie devient prohibitif. Enfin, ces systèmes sont relativement fermés, et il est difficile d'y incorporer de nouveaux algorithmes en un temps compatible avec les impératifs d'une formation. Ils comportent des modules fonctionnant en « boîtes noires », assez incompatibles avec la pédagogie. Ainsi est née l'idée de rechercher des

modèles pour la formation et la petite industrie. Les outils étudiés précédemment, cherchent visiblement à répondre aux mêmes problématiques avec des canaux différents.

Des systèmes de CFAO permettent de lier la photogrammétrie à l'industrie sont disponibles et rendent l'accès à l'information 3D plus intéressante, notamment sur les points relatifs aux aspects économiques. Une étude a été réalisée par le CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale) pour tester et évaluer les performances des logiciels de photogrammétrie à courte distance [Streilein, 1999], L'objectif principal étant de regrouper des données faites avec des appareils photographiques numériques d'amateur est de réunir les avis des utilisateurs des différents logiciels commerciaux et universitaires. A titre illustratif, le logiciel Digital Vidéo Plotter « DVP » se veut beaucoup plus abordable financièrement, mais le manque d'automatisation dans les modules de triangulation et de génération de modèles numériques est probablement limitatif. Il faut encore tester dans un contexte de production le restituteur numérique DVP, ainsi que sa capacité à s'intégrer dans une gamme complète. Le rapport qualité/prix est tributaire des applications induites et de l'ergonomie des stations photogrammétriques dans le temps et dans l'espace. Les modules de restitution des logiciels KLT ATLAS, DATEM et DVP sont visiblement plus orientés vers la restitution manuelle, ne serait-ce que pour le pilotage depuis l'espace terrain.

Cependant KLT ATLAS et DATEM sont fortement dissociables de DVP. En effet, KLT ATLAS et DATEM sont des restituteurs numériques relativement chers (30.000 €) et qui requièrent une configuration matérielle élevée (carte mère biprocesseur, 1 Go de RAM). Ils présentent toutefois l'avantage de s'intégrer dans des gammes de produits complètes susceptibles de concurrencer des solutions LEICA ou INTERGRAPH. Ces outils présentent des fonctionnalités de dessin dont la qualité est indiscutable. Celles-ci se reposent sur un affichage de grande qualité et ce même pour des images relativement importantes. Le développement futur de fonctionnalités de dessin pour la restitution est un élément prépondérant dans l'évaluation des logiciels.

En effet, la photogrammétrie implique de gérer de nombreux et souvent volumineux fichiers. Un tel outil de gestion prend toute sa dimension lorsqu'on vise des applications importantes où une simple structuration des données métrologiques sur disque dur ou sur serveur peut s'avérer limitant. Les applications industrielles permettant d'effectuer de la mise à jour sont nécessaires pour une gestion métrique en production. L'exploitation des images numériques dont le faible coût d'acquisition, permet de concevoir une base de données industrielle exploitable dans la conception de fabrication. Ceci est d'autant plus vrai avec la progression des capteurs dont la résolution ne fait que s'améliorer [Frederique, 2002].

1.5.2-Nécessité d'une modélisation

En tant qu'outils de saisie pour des applications industrielle ou de type métrologie, les appareils de restitution numériques représentent une composante importante dans de nombreux projets du génie industriel. Afin de mieux connaître les solutions du marché, la modélisation permet de faire une étude marketing permettant de montrer l'impact économique et de discuter sur le rapport qualité /prix. La raison des différents ordres informatiques qui ont évolué au cours des années est étroitement liée aux différentes approches à la détermination de valeur initiale. C'est également pour cette raison qu'on entend la justification pour les développements des solutions alternatives et linéaires à l'orientation d'image. Les solutions en photogrammétrie rapprochée et des approches alternatives à résoudre les orientations (interne et externe) sont aisément réalisable.

Nous avons vu que la restitution nécessite de définir une fonction de passage de coordonnées images vers des coordonnées objet et inversement. Celle-ci dépend d'un certain nombre de choix quant aux modélisations et aux approximations :

- Distorsions intervenant parfois dans des calculs de triangulation mais rarement pour le calcul d'un couple isolé; elle est modélisée *a posteriori* c'est à dire que ses paramètres font partie des inconnues lors de la résolution du système : elle est comprise dans la boîte noire du système.
- Distorsion de la caméra comme donnée généalogique de la qualité.
- Prise en compte ou non de la rotation de fond de chambre dans l'affinité d'orientation interne.
- Etude de la convergence, du rapport base/éloignement et des inclinaisons de caméra.
- Tenir compte de la directive 2634 part1 dans les précisions d'acquisition.

L'analyse des applications de la photogrammétrie souligne une disparité importante dans la fonctionnalité des outils ainsi que dans leurs prix. Un appareil de restitution numérique s'intègre nécessairement dans une chaîne, or l'ergonomie et le niveau des fonctionnalités des différents logiciels testés sont souvent marqués par leurs origines. En effet, certains restituteurs numériques développés par des fabricants de logiciels de traitements d'image souffrent souvent d'une ergonomie peu adaptée à la restitution ou à la reconstitution d'objets. Ainsi, la définition d'un modèle se limite aux coordonnées et orientations des sommets de prises de vues si et seulement si le système destinataire utilise les mêmes modélisations et approximations que le système ayant calculé le modèle. Ce point est très important car la définition des formats d'échange varie d'un fabricant à l'autre, et ces aspects ne sont pas toujours définis explicitement. Un moyen de contourner cette définition laborieuse est de proposer au système d'arrivée et de recalculer les positions et orientations des sommets de prises de vue avec ses propres hypothèses. La recherche d'un modèle approprié pour des applications en métrologie doit faciliter l'utilisation de la photogrammétrie et rendre le facteur de rentabilité appréciable. Il s'agit alors de livrer un listing de points, connus en coordonnées images et en coordonnées objets, qui servira d'observations préalables au calcul. Dès lors, le système d'arrivée n'a plus qu'à effectuer le calcul. Les attentes d'utilisateurs actuels et potentiels de systèmes de reconstitution nous informent sur la variété des solutions actuelles et de la nécessité d'en suivre la constante évolution, des cas réels montrent la complexité d'un choix judicieux. L'utilisation de fichiers de type STL doit permettre une flexibilité et une souplesse d'emploi d'un point de vue ergonomique en photogrammétrie rapprochée.

Chapitre 2 : La modélisation photogrammétrique

2.1 - Introduction

2.1.1 Contexte général

L'objet de ce chapitre est de donner un aperçu des méthodes de modélisation et de traitement photogrammétriques. Que l'on désire organiser des ateliers, mesurer un objet, préparer une stratégie d'implantation industrielle ou concevoir un plan d'urbanisme, on a besoin d'organiser des informations descriptives de l'espace à deux (2) et à trois (3) dimensions. Il s'agit souvent de données et de connaissances de type géométrique et topologique, riches en sémantique que l'on manipule par des raisonnements appropriés. Comme pour toute information susceptible d'être utilisée par l'ordinateur, il serait possible de modéliser directement les données et les connaissances spatiales par des structures de données. Cependant, cette approche serait trop liée aux machines, c'est pourquoi des niveaux de modélisation plus proches des objets à manipuler sont préférables. Ceci implique de se doter de formalismes de représentation adaptés aux caractéristiques particulières des données et des connaissances spatiales.

Sachant que les objets contiennent des détails importants et nombreux pour être considérés dans des études ultérieures, la restitution photogrammétrique est une solution très rentable pour résoudre ce problème. Partant d'un couple de cliché étalonné, on oriente celui-ci pour avoir une image en trois dimensions définie dans le système référence de l'objet. La projection de cette image donne un plan conforme de l'objet. Les étapes de cette transformation sont établies depuis l'acquisition des images. La recherche de modèles pour le traitement numérique des photographies éloignées ou rapprochées est en accroissement permanent et est fonction de la nature de l'objet à saisir. Dans beaucoup de problèmes de la photogrammétrie rapprochée on traite les déformations structurelles des objets de tailles réduites pour définir en trois dimensions la position des différents points qui constituent l'objet. Parmi les photogramètres, on peut citer le travail de Fraser [Fraser et al, 1980],[Fraser,1987] comme l'un des plus reconnus dans le domaine de la photogrammétrie moderne. Fraser a développé des algorithmes pour la reconstruction d'objets à partir de plusieurs images en utilisant la méthode des moindres carrés. Ses travaux ont démontré la capacité d'acquérir des mesures tridimensionnelles d'une grande précision [Fraser, 1992]. Cependant, tous ces aspects exposés auparavant et les différentes réflexions sur la complexité de la tâche, amènent le cognicien à se poser un ensemble de questions :

- ⇒ Quels sont les aspects qui s'impliquent dans le développement du système photogrammétrique ?
- ⇒ Comment pourrions-nous développer un bon critère pouvant juger notre configuration ?
- ⇒ Où doit on placer les cameras afin d'obtenir une erreur minimale dans les calculs tridimensionnelles ?
- ⇒ Quelle méthode d'optimisation pourrait-on utiliser pour avoir une bonne distribution des points d'appuis?

En effet, la modélisation en photogrammétrie prévue pour ce chapitre comprend les phases suivantes :

- Une phase analytique permettant de dégager un critère d'approximation. En effet, la photogrammétrie et la vision par ordinateur sont parfaitement en accord pour produire des solutions sur la restitution des objets. L'étude de la géométrie qui débuta avec Euclide et l'apport des géométries analytiques en imagerie sont nécessaires pour satisfaire des besoins exprimés en métrologie.

- Une seconde phase permettant d'élaborer un processus combinatoire capable de produire une solution. Comme, l'information visuelle d'un objet complexe demande l'utilisation de multiples stations de saisie. Tarbox et Gottschlich, [Tarbox et Gottschlich, 1993] ont reconnu le besoin d'une planification sur la position et l'orientation des cameras pour une inspection entière de l'objet. L'objectif initial est de restituer un objet 3D basé sur l'acquisition d'un modèle à partir d'images et de comparer le résultat par rapport à la réalité. Avant d'effectuer cette comparaison, une modélisation complète et suffisante du processus de traitement doit être générée à partir de l'information des capteurs.

2.1.2 Le formalisme de la modélisation

Dans beaucoup de problèmes de la photogrammétrie rapprochée on traite les déformations structurelles des objets de différentes tailles pour définir en trois dimensions la position des différents points qui le constituent. Il est évident que la recherche de méthodes fiables de mesure pose un problème de définition et d'utilisation de moyens appropriés pour une analyse et une connaissance meilleure de l'espace. Avec l'avènement des techniques nouvelles de mesures telles que les méthodes photogrammétriques, il est difficile d'opter pour telle ou telle approche. L'ingénierie des connaissances spatiales permet alors de définir un environnement de travail propre aux spécificités des besoins. Comme pour toute information susceptible d'être utilisée par l'ordinateur, il serait possible de modéliser directement les données et les connaissances spatiales par des structures de données. Cependant, cette approche serait trop liée aux machines, c'est pourquoi des niveaux de modélisation plus proches des objets à manipuler sont préférables. Ceci implique de se doter de formalismes de représentation adaptés aux caractéristiques particulières des données et des connaissances spatiales.

Plusieurs buts dans la conception d'un processus de mesure tridimensionnelle sont poursuivis : la précision de la mesure 3D, la fiabilité dans la mesure des objets, ainsi que l'économie du système. L'expertise est nécessaire pour développer un système multicapteur dans des travaux comme ceux de [El Hakim et al, 1993], dans lequel l'auteur montre les étapes nécessaires pour l'évaluation d'une configuration donnée. Cependant, des travaux en photogrammétrie visant à automatiser le processus ont été développés [Mason, 1997]. Le processus peut être divisé en quatre étapes selon la méthodologie développée dans le domaine géodésique, et seulement les trois premières sont à considérer en photogrammétrie rapprochée. La conception du réseau des cameras a été donc divisée en quatre étapes par la communauté des photogramètres [Grafarend, 1974]. En effet, avec le développement de la technologie, une nouvelle génération d'appareils photographiques panoramiques terrestres a hérité le marché. L'appareil photographique dont le principe se compose d'une rangée linéaire qui est montée sur un plateau tourne-disques de précision élevée et est parallèle à l'axe de rotation.

La première étape permettant d'établir un réseau photogrammétrique est la conception de station de prise de vues. Conceptuellement, le but de la conception de réseau est de concevoir une configuration de réseau optimale et un plan optimal d'observation qui satisferont la qualité exigée avec un effort minimum. En d'autres termes, après que la définition des conditions de qualité de réseau (précision et fiabilité) que la technique de l'optimisation de réseau tient compte d'une configuration de réseau et d'observation optimales qui répondront à des exigences [Grafarend, 1974] ; [Cross, 1985]; [Schmitt,

1985] ; [Schaffrin, 1985]. Dans le passé, il était très difficile, sinon impossible, de résoudre tous les aspects de l'optimisation de réseau par une démarche mathématique simple. Au lieu de cela, le problème de la conception de réseau géodésique au sens métrologique a été divisé en sous-problèmes dans lesquels du progrès pourrait être accompli (chapitre 1). Dans ce chapitre on rappelle la classification admise proposée par Grafarend, [Grafarend, 1974], et adoptée par Amiri Parian, [Amiri Parian et al2005] est :

- Conception de Zéro-Ordre (ZOD) : le problème de la donnée (système du même rang de référence),
- Conception de premier ordre (FOD) : le problème de configuration,
- Conception de second ordre (SOD) : le problème de poids,
- Conception de troisième ordre (TOD) : le problème de densification.

Notre approche de modélisation est basée sur cette classification car elle permet d'étudier la configuration interne et externe de notre système de mesure photogrammétrique. Il est vrai que l'on a besoin d'une seule phase de conception, mais cette dernière est un processus qui peut devenir très complexe à cause du nombre de contraintes et de facteurs interdépendants impliqués dans la conception [Mason, 1995b].

Toutes ces contraintes peuvent être résumées de la façon suivante:

- Contrainte d'échelle dans l'image,
- Contrainte de résolution,
- Contrainte dans l'espace de travail,
- Contrainte de mise au point,
- Contrainte de champ de vision,
- Contrainte d'angle d'incidence,
- Nombre et distribution des points dans les images,
- Contribution aux angles d'intersection ou la géométrie de l'image,
- La visibilité, cette dernière contrainte est reliée aux problèmes d'obstruction dans l'espace de travail.

Parmi celles-ci la contribution à des angles d'intersection dans la géométrie image et la contrainte de l'angle d'incidence s'avèrent être les points principaux pour la précision de la reconstruction.

Les outils de *modélisation conceptuelle* des objets à 2 et à 3 dimensions, prennent en compte à la fois leur forme géométrique et leur localisation dans l'espace selon les aspects mathématiques d'une modélisation géométrique. Parmi les objets à 2 dimensions, les images tiennent une place importante. Les objets spatiaux à 2 dimensions sont des surfaces ou des éléments de surface. Ici, nous traitons le cas particulier des surfaces pseudo plan, bien que ces développements puissent se généraliser à d'autres cas comme les carrosseries de voitures, les ailes d'avions, etc. Un élément de surface est un polygone, avec l'ensemble de ses points non nécessairement coplanaires. Un objet peut se définir comme une fonction en z des coordonnées x et y , $z = f(x,y)$. Cette fonction n'est jamais connue en tout point, seuls des échantillons de points sont disponibles, et des règles permettent de reconstituer l'ensemble par interpolation. On appelle *modèles numériques* de terrains, les procédures permettant d'estimer l'élévation z d'un point en fonction de celle de points voisins. La modélisation en photogrammétrie doit permettre le passage d'une étape grossière (approchée) vers une étape fine

(définitive) pour assurer une similitude exacte entre l'image et l'objet. Comme vu précédemment un tel processus peut commencer par l'étape ZOD pour finir à l'étape TOD, figure (2.1).

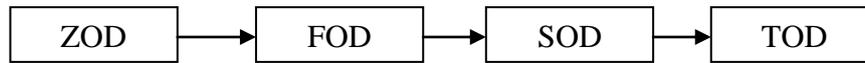


Figure 2-1. Étape de modélisation (conception).

2.2. Modélisation des Caméra Numériques

Les appareils numériques de modélisation nécessitent trois systèmes de coordonnées, figure 2.2).

1. Le système S_o de coordonnées de l'objet avec des coordonnées de l'objet $x = [X, Y, Z]^t = {}^o x$.
2. Le système S_c de coordonnées de l'appareil avec des coordonnées de l'appareil ${}^c x = [{}^c X, {}^c Y, {}^c Z]^t$, et,
3. le système de coordonnées du plan de l'image avec un appareil général digital que nous appellerons S_g et qui a les coordonnées d'images $g x' = [g x', g y']^t$. Le nom du système dépendra du modèle d'appareil utilisé.

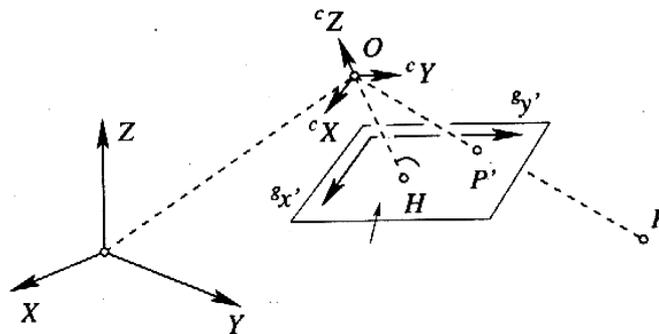


Figure 2.2 : Projection avec un appareil digital, système de coordonnées de l'objet $[X, Y, Z]$, centre de projection O , système de coordonnées de l'appareil $[{}^c X, {}^c Y, {}^c Z]$, système de coordonnées de l'image ou du capteur $[g x', g y']$, point principal H , point Objet P , Point Image P' .

La projection peut être divisée en quatre étapes. (Figure 2.3).

1. Transformation du point espace P de S_o à S_c .
2. Projection idéale du point espace P vers le plan de l'image conduisant au point d'image idéal P_i .

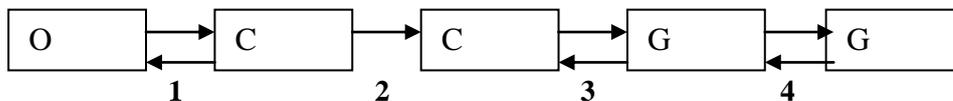


Figure 2.3 : Etapes de projection avec un appareil digital

3. Transformation du point d'image idéal P est représenté en système de coordonnées de l'appareil digital, en système de coordonnées du détecteur S_g ,
4. Modélisation des erreurs d'image afin d'obtenir le point d'image observable P^t .

La projection de l'espace vers l'image peut être modélisée de plusieurs façons. La projection n'est pas renversée parce qu'une dimension, l'information de profondeur, est complètement perdue. Les modèles d'appareils diffèrent dans le nombre et le type de paramètres internes. Les modèles d'appareils suivants sont de bonnes approximations d'un appareil réel figure (2.4).

- L'appareil idéal, figure (2.4) se caractérise par la distance principale c comme le seul paramètre de l'orientation interne, parce que l'origine du système de coordonnées de l'image est au point principal. Les coordonnées de l'image sur le modèle d'appareil idéal sont indiqués avec $^c x'$. L'appareil idéal est un bon modèle pour l'appareil à sténopé, si le point principal est l'origine du système de coordonnées

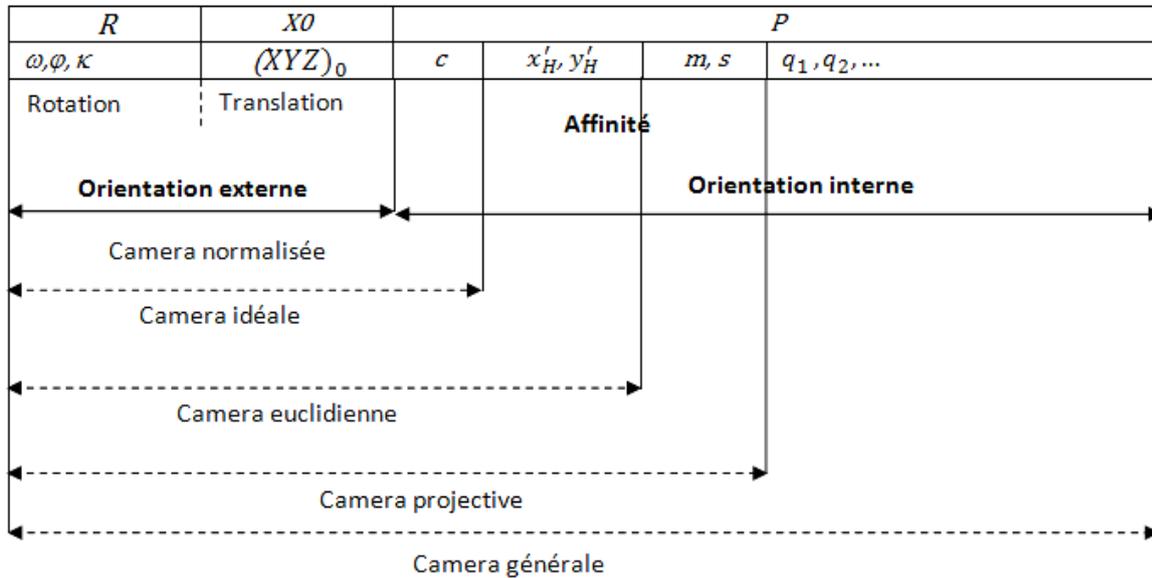


Figure 2.4 : Vue d'ensemble des étapes de projection pour les appareils à perspective, les paramètres concernés et l'appellation des modèles d'appareil : matrice de rotation R avec des angles de rotation, centre de projection x_0 , paramètres p pour l'orientation interne, divisés en 5 paramètres pour projection à lignes constantes et les paramètres q pour les parties qui perturbent les lignes droites.

- L'appareil normalisé possède une distance principale $c = 1$ et une matrice de rotation $R = 1$. Cet appareil peut être utilisé sur un ordinateur si l'orientation de l'appareil est connue. Cette définition est motivée par les cas normaux d'images simples et doubles telles que définies en photogrammétrie. Cette notion est différente de celle utilisée dans [Hartley, 2000], où un appareil idéal avec $c = 1$ est appelé appareil normal. Les coordonnées de l'image basées sur le modèle d'appareil normalisé sont indiquées par $^n x'$.
- L'appareil avec un système de coordonnées Euclidien est différent de l'appareil idéal en ce que l'origine du système de coordonnées de l'image n'est pas au point principal. Les seuls paramètres de l'orientation interne sont la distance principale c et les coordonnées $[x'_H, y'_H]$ du point principal H . Les coordonnées de l'image basées sur le modèle d'appareil normalisé sont indiquées par $^e x'$. C'est aussi un bon modèle pour l'appareil à sténopé si les coordonnées des points de l'image sont mesurées arbitrairement dans un système Euclidien. C'est également un bon modèle pour un appareil digital, si les distances pixel sont les mêmes pour les deux directions de coordonnées et si la lentille ne produit pas de distorsion. Cette notion de modèle d'appareil Euclidien ne doit pas être confondue avec celle introduite par [Hartley, 2000];[Faugeras, 2001], qui est une projection parallèle sur le plan de l'image avec un système de coordonnées Euclidien.
- L'appareil avec un système de coordonnées de détecteur apparenté ou appareil projectif se caractérise seulement par l'invariance des lignes droites. Ici, le système de coordonnées de

l'image – en plus d'un décentrage du point principal – peut avoir une fente ou une différence d'échelle m dans x^t et y^t en ce qui concerne la situation physique. Les coordonnées de l'image basées sur l'appareil à lignes droites constantes sont indiquées par x' .

- L'appareil général ne conserve pas les lignes droites. Ici des paramètres supplémentaires q_i sont nécessaires pour décrire les erreurs d'image qui perturbent les lignes droites, et particulièrement les distorsions de la lentille.

Tous les modèles d'appareils représentent une projection à partir de l'espace objet vers un espace image avec un centre de projection unique, puisque les rayons de projection passent à travers un point unique. Comme conséquence, on peut appliquer une transformation de l'image donnant une image perspective, aux images prises avec n'importe laquelle de ces appareils (y compris ceux ne conservant pas les lignes droites), permettant l'exploitation de géométrie projective. Dans ce qui suit, toutes les projections sont présentées dans des coordonnées homogènes et, pour comparer avec les ouvrages classiques, en coordonnées Euclidiennes.

2.2.1 Orientation Externe

L'orientation externe transforme les coordonnées x_p du système S_o de coordonnées de l'objet vers le système S_c de l'appareil. Ceci peut être atteint en deux étapes :

1. Translation du système S_o de coordonnées de l'objet vers le centre de projection O avec trois coordonnées $x_o = [X_o, Y_o ; Z_o]^t$ comme paramètres.
2. Rotation du système S_o vers le système S_c . La matrice de rotation $R = {}^cR$ peut être représentée par trois paramètres indépendants.

▪ Projection avec un Appareil Réel

La projection de l'objet vers l'espace image avec un degré qui soit suffisant pour la majorité des applications est décrite ici. La base est un modèle de lentille épaisse tirée d'optique géométrique, comme indiqué dans la figure (2.5).

Le point focal F de la figure (2.5) se trouve sur l'axe optique à la distance de la longueur focale f du plan principal π_2 . Le plan de l'image en général n'est pas perpendiculaire à l'axe optique, et il ne passe pas par le point focal F . A cause de la distorsion de la lentille, le rayon de projection n'a pas la même direction dans l'espace objet (à gauche) et l'espace image (à droite). Les parties essentielles du rayon de P à $K1$ et de $K2$ vers le point observable de l'image sont déplacés un peu, puisque les deux plans principaux de la lentille ne sont pas identiques et peuvent être distants de plusieurs centimètres.

Pour la reconstruction de la scène, on n'utilise que le bouquet de rayons dans l'espace objet qui passe par $K1$. Comme la relation géométrique entre le plan de l'image et l'espace objet n'est pas prise en considération, le plan principal à gauche avec la partie de la figure à sa droite peut être modifié jusqu'à ce que les deux plans principaux π_1 et π_2 coïncident avec $K1 = K2$. Ce point est alors utilisé comme centre du système S_o des coordonnées de l'appareil. Il sera appelé le centre de projection et sera indiqué par O .

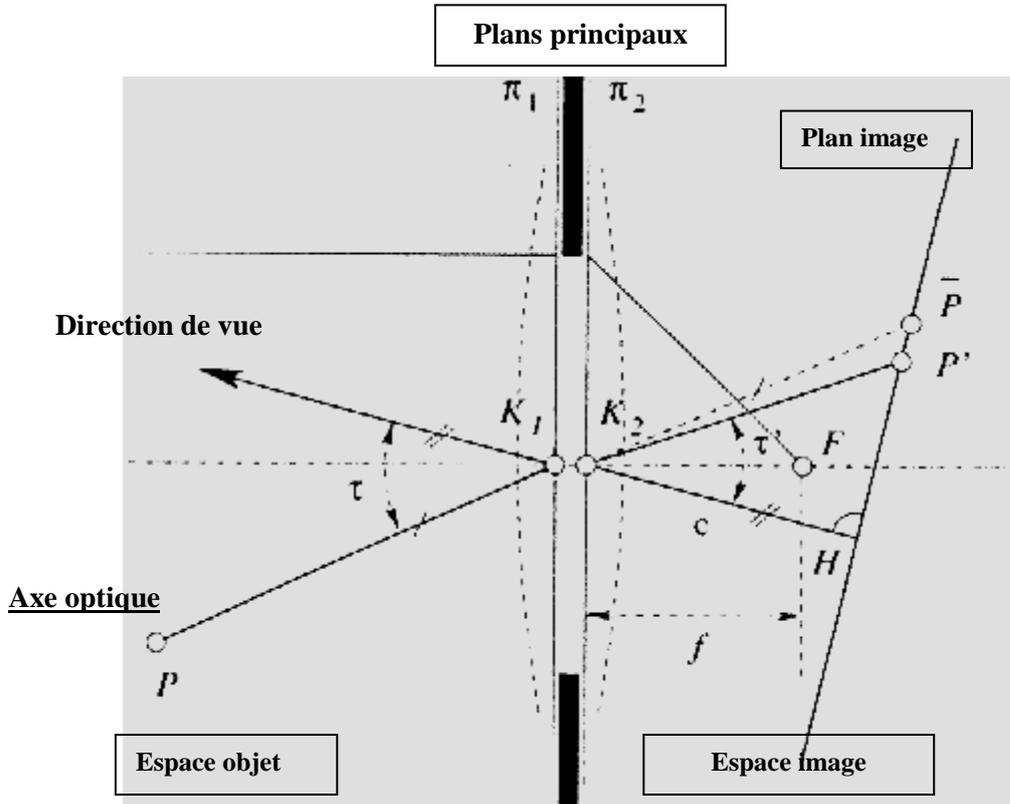


Figure 2.5 : Géométrie avec projection optique.

Pour simplifier les relations de projection, les axes cX et cY parallèles au plan de l'image sont choisis de telle sorte qu'ils forment un système de coordonnées Cartésien de droite avec l'axe cZ étant alors perpendiculaire au plan de l'image. La direction de l'axe optique n'a donc pas d'effet direct sur la modélisation. Cependant le point d'intersection A de l'axe optique peut être pris comme point de symétrie pendant la modélisation des distorsions de la lentille, étant donné qu'on peut supposer que cette distorsion dans une première approximation est invariable dans sa rotation.

Comme le plan de l'image en général ne passe pas par le point focal F , par exemple, quand on fait la mise au point à une distance limitée, la distance principale c est essentielle, étant en général différente de la longueur focale. La distance est déterminée par ordinateur et avoisine la distance du centre de projection $O = K_2$ du plan de l'image. Le point sur le plan de l'image le plus près du centre de projection est le point principal H . La direction HO est la direction de vue et coïncide avec l'axe optique seulement si le plan de l'image lui est perpendiculaire.

▪ Systèmes de coordonnées

Pour la modélisation de la projection, il est nécessaire de représenter les points dans différents systèmes de coordonnées figure, (2.2). On va supposer que tous les systèmes de coordonnées sont Euclidiens et à droite.

Les quatre systèmes suivants sont utilisés en vision par ordinateur et en photogrammétrie

1. Le système S_0 de coordonnées de l'objet
 Comme il va être question uniquement d'objets statiques dans un système fixe de coordonnées d'objets, l'exposant sera omis, ainsi donc $x = 0_x$.
 Le choix de du système de coordonnées de l'objet dépend de l'utilisateur. Pour des raisons d'ordre numérique, il est souvent utile de choisir un système de coordonnées d'objet dont l'origine est le centre de la surface considérée et avec un chiffre supérieur au diamètre de la surface considérée. Un tel traitement ne sera pas toujours explicité.
2. Le système de coordonnées de l'appareil photo S_c . Son origine sera à au centre de projection O , le centre de la lentille (Figure 2.12)
3. Le système de coordonnées du détecteur S_d d'un appareil photo général. Pour les images analogiques, son origine est au milieu de l'image ; pour les appareils numériques, son origine est à la position du pixel (0,0).
4. Pour les images analogiques, créées par exemple par des appareils photo à pellicule ou des images analogiques numérisées, on a également besoin du système de coordonnées du numériseur S_d de mesure de l'image ou du système de scanner. Il est défini par le fabricant. Comme la pellicule a besoin d'un système de coordonnées supplémentaire, la modélisation des deux types d'appareil sera discutée séparément.

▪ Orientations Internes et Externes

Comme la position de l'appareil photo dans l'espace varie généralement beaucoup plus rapidement que les aspects de géométrie et de physique de l'appareil lui-même, on doit généralement distinguer deux types de paramètres de modélisation.

1. Les paramètres internes sont les paramètres nécessaires pour modéliser la géométrie les aspects géométrique et physique de l'appareil afin de pouvoir déduire la direction du rayon de projection vers un point objet à partir d'un point image et de l'orientation externe.
 Les paramètres internes décrivent l'orientation interne (IO) de l'appareil. Dans le cas le plus simple d'un appareil idéal, ceci peut être seulement la distance entre l'appareil à sténopé et le plan de l'image; dans le cas des appareils sophistiqués, ceci peut être plusieurs dizaines de paramètres. L'orientation interne est calculée par calibration et est généralement gardée fixe dans les applications photogrammétriques. Un appareil avec une orientation interne fixe s'appelle un appareil métrique, et on peut supposer que le calibrage permet de rendre les paramètres internes valables pendant une certaine période. D'un autre côté, on ne peut considérer que les images prises avec un caméscope aient une orientation interne stable, à cause du zoom ou bien parce que la puce CCD n'est pas stable par rapport à la lentille de la caméra. Dans le cas d'un système de mesure consistant en au moins deux détecteurs, tels que les caméras stéréos, les positions relatives entre les détecteurs sont également des paramètres internes du système.
2. Les paramètres externes décrivent la position de l'appareil dans l'espace. Ils contiennent toujours les six paramètres de l'orientation externe (EO), à savoir les trois coordonnées du centre de projection, ou la translation de l'appareil depuis l'origine jusqu'à sa position durant l'exposition, et les trois paramètres décrivant la rotation, par exemple, comme les angles de rotation autour des trois axes de l'appareil.

Les paramètres d'orientation externes varient selon le mouvement de l'appareil dans l'espace ou peuvent être constants dans le temps si l'appareil est fixé, comme lorsqu'un trépied est utilisé.

Les paramètres d'orientation externes peuvent être mesurés directement, cependant, ils sont généralement déterminés par les procédures d'orientation comme indiqué dans le chapitre 1.

L'idée d'orientation externe peut être étendue à un système de mesures complet, telle qu'une série de plusieurs appareils. L'orientation externe fait référence alors à la position de ce système dans son ensemble dans l'espace, comme, par exemple, une tête stéréo consistant en deux appareils montés sur une fourgonnette ou un robot.

Le mot 'orientation' ici s'applique à l'état de l'appareil dans l'espace ; le mot 'orientation' peut cependant aussi être utilisé pour décrire le processus de calcul de cet état. La distinction sera claire à partir du contexte.

▪ **Appareils Généraux à Ligne Droite Constante**

Il sera utile de considérer l'orientation interne d'un appareil à partir de son état de calibrage. Trois différents états seront distingués, en fonction de trois modèles d'appareils :

1. Les paramètres internes de l'appareil sont totalement inconnus. Il s'agit là d'un appareil non calibré et l'on utilise alors le modèle pour un appareil général.
2. Certains des paramètres internes de l'appareil ont été déterminés par calibrage, ou bien on peut supposer qu'ils sont suffisamment petits, de sorte que la projection de l'espace objet vers l'espace image conserve les lignes droites. Il s'agit d'un appareil partiellement calibré ou appareil à ligne droite constante. Il est conceptuellement facile de parvenir à cet état particulier de calibrage [Brown, 1971] ; [Devernay et Faugeras, 1995]. Dans le champ de vision de l'ordinateur, ce type d'appareil est souvent considéré comme non calibré, en supposant implicitement qu'il ne possède pas de distorsions non linéaires.
3. Les paramètres internes de l'appareil sont entièrement connus et avec un degré avancé d'exactitude. Il s'agit là d'un appareil calibré. La plupart des appareils de photogrammétrie sont de ce type, car il est sous-entendu que le calibrage a été effectué et que l'appareil est stable dans le temps. Ainsi la relation entre les points d'image observables et les rayons de projection est disponible. Il faut noter que n'importe quel modèle mathématique aurait pu être utilisé pour l'étalonnage s'il est suffisamment précis pour l'application.

▪ **Détecteurs d'Image sans Centres de Projection Uniques**

A l'opposé des appareils de perspective où tous les rayons dans l'espace objet se recoupent en un point, le centre de projection, il est nécessaire de considérer les détecteurs d'image qui n'ont pas un centre de projection unique. Il s'agit par exemple d'appareil à balayage ou d'images prises d'objets dans un milieu physiquement différent [Wolf et Forstner, 2000]. Il n'existe pas de transformation pour convertir de telles images en des images de perspective, par contraste avec les images à perspective générale et des distorsions aléatoires. Une vue d'ensemble des différents modèles d'appareils est examinée dans [Swaminathan, et al. 2003] et présentée dans le tableau 2.1.

croquis	Modèle de l'image	Optique de l'Image	Type de Distorsion	Informations pour Corriger la distorsion
	Perspective	Appareil à sténopé et appareils basés sur des lentilles	Aucun	Non Applicable
	Point de Vue Unique	Appareils à grand angle, à très grand angle, appareils catadioptriques, et appareils rotatifs	Distorsions radiales et tangentielles, voiles de l'image	Modèle d'appareil
	Point de vue non unique	Appareils à grand angle, appareils catadioptriques, ensemble de plusieurs appareils et appareils mobiles (mosaïque)	Distorsions caustiques	Modèle d'appareil et structure de la scène.

Tableau 2.1: Différents modèles d'appareils, tirés de (Swaminathan et al, 2003)

2.3. Géométrie de Base de l'Image

La tâche classique de la photogrammétrie est la récupération d'informations à partir des images d'une scène. Cette section décrit sous forme mathématique la géométrie d'images à perspectives simples, de séries de deux et trois images. Deux tâches seront effectuées figure (2.6) :

- Des expressions explicites pour la prédiction de points, lignes et plans seront établies. Ces prédictions prendront en charge les mesures et les processus d'appariements automatique. Dans le cas d'une seule image, la prédiction est traitée par la projection de points et de lignes donnés de l'espace objet dans l'image, menant à des points et à des lignes d'images. Ceci servira également de base pour l'orientation d'images isolée ou multiples. La discussion sur la prédiction est nécessaire pour la qualité du produit restitué, c'est à dire le rétro-éclairage, de lignes et de plans en 3D de points et de lignes d'images vers l'espace objet, conduisant à des rayons de projection et à des plans de projection. Cette tâche inverse de la projection permettra plus tard la reconstruction d'entités 3D à partir des entités d'images observées. Dans le cas de paires ou de triplés d'images la détermination des points d'images et peut être des lignes sera faite si ceux ci celles-ci existent dans une ou deux autres images.

L'inclusion de lignes droites et des points tels qu'observés dans les entités est obligatoire dans les méthodes utilisées aujourd'hui en photogrammétrie, car les lignes peuvent être extraites automatiquement et de façon très fiable à partir d'images digitales.

- Il sera établi des expressions explicites pour les contraintes entre les traits géométriques correspondants, tels que les points ou lignes d'images uniques, de paires ou de triplés d'images. Ceci permettra la détermination de l'orientation mutuelle ou relative des images sans aucune information sur la scène observée. En cas de correspondances inconnues entre les images et la scène, l'orientation absolue des caméras au moment de la saisie de l'image pourra être déterminée.

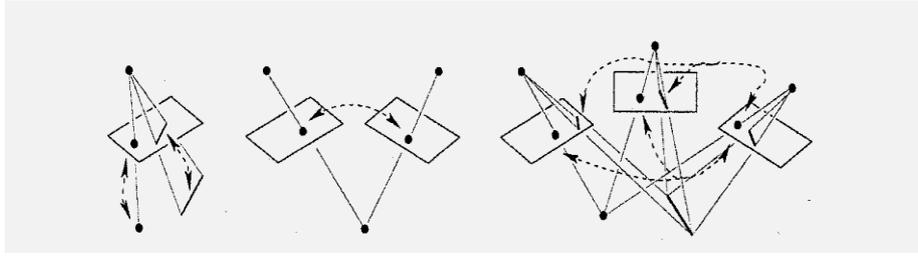


Fig.2.6 ; Prédiction d'entités géométriques et de contraintes entre entités géométriques correspondantes dans les images simples, doubles ou triples.

Remarque : La notion d'image [Castleman, 1996] est très large. En général, il s'agit d'images d'appareils photos à cadres, c'est à dire que l' image est une projection 2D d'un objet 3D vers un espace image 2D où le cadre entier ou le format est exposé simultanément à travers une lentille. Ici, on suppose qu'il existe un centre de projection unique, de sorte que les rayons de lumière entre l'objet et les points de l'image passent à travers un point unique. Quelques exemples sont également donnés d'appareils à lignes qui ont également un centre de projection unique. Dans quelques cas spéciaux, particulièrement lorsqu'on génère des images 2D avec une caméra à lignes à mouvement circulaire, il n'existe pas de centre de projection unique pour l'ensemble de l'image. Cependant, dans tous les cas, l'idée est de déterminer le rayon de projection, une ligne l_x 3D dans l'espace objet, à partir d'un point de l'image x' mesurable afin de pouvoir déduire l'information 3D à partir de mesures 2D.

Notation : En général, les entités géométriques sont nommées selon leurs représentations, vecteurs ou matrices. Ainsi donc, des lettres majuscules, telles que P ou O indiqueront les points ; des lettres minuscules, telles que l ou m indiqueront les lignes, et des lettres grecques, telles que α ou π_1 indiqueront les plans.

Espace	2D	3D	Transformations
Euclidiens	x'	x	R
Homogènes	l', x'	a, l, x	H

Tableau 2.2 : Notation des entités Euclidiennes et homogènes.

Élément	2D	3D
Plans		a, b, \dots
Lignes	l', m', \dots	l, m, \dots
Points	x', y', \dots	x, y, \dots

Tableau 2.3 : Notation des entités géométriques de base en 2D et 3D.

2.3.1 Géométrie de l'Image Simple

Afin de pouvoir exploiter le contenu de l'image pour reconstruire des objets en 3D avec un ordinateur, il faut un modèle mathématique qui puisse se rapprocher assez près de la réalité physique de la projection. Cette section va donc décrire le modèle géométrique de la projection des points et des lignes en 3D dans l'image créée par un vrai appareil photo. Ceci doit prendre en considération (i) la position spatiale et la position de l'appareil photo pendant l'exposition, (ii) la projection à travers l'optique, (iii) les effets de distorsion de la lentille, (iiii) les effets de distorsion du film dans les appareils à pellicule, et (iiiii) la géométrie du système de coordonnées dans lequel les points et les lignes sont mesurés.

Ce modèle géométrique permet d'inverser le processus de projection afin d'inférer la direction spatiale des points 3D et des lignes à partir des images observées, et d'utiliser cela pour calculer la position spatiale de l'appareil photographique et la position 3D des points et lignes observés. Tous les détails visibles de la scène, et particulièrement les plans et les autres surfaces, peuvent être reconstruites, tant qu'ils permettent l'identification des images ou des points de l'espace ou des lignes sur lesquels ils figurent.

2.3.2 Termes de Base Concernant les Images en Perspective

On distingue différents types d'images, en fonction de l'orientation de l'appareil photo dans l'espace.

- ♦ Vue nadir : Le plan de l'image est strictement horizontal et la direction de vue est la direction nadir. Une image prise dans la direction opposée donne une vue zénith.
- ♦ Vue verticale : Le plan de l'image est à peu près horizontal, typique des images aériennes.
- ♦ Vue oblique : le plan de l'image est incliné.
- ♦ Vue horizontale : Le plan de l'image est à peu près vertical, typique des images terrestres.

Le système de notation suivant est utilisé, il se réfère en grande partie aux images aériennes, figures (2.7) et (2.8)

- Tous les rayons de l'image se coupent en un point, le centre de projection O qui se trouve entre l'espace objet et le plan de l'image pendant l'exposition de l'image (prise de position). La scène est montrée à l'envers sens dessus dessous, avec l'image reflétée comme à partir d'un miroir. L'image est donc généralement tracée en position de vue, où la scène est montrée dans son orientation correcte.
- La notation O pour le centre de projection vient du Latin *oculus* (œil). Son emploi vient des systèmes de dessin de perspective des peintres de la Renaissance, tels que Léonard de Vinci (1452 – 1519) et Albrecht Durer (1471 – 1528) [Durer, 1525] qui sont considérés comme les précurseurs de la géométrie projective [Slama, 1980] ; [Faugeras, 2001].
- Dans le cas d'une image nadir d'un plan horizontal, l'image est similaire à l'objet. Les distances $d = PQ$ dans l'espace objet sont projetées aux distances $d' = P'Q'$, réduites à l'échelle $S = d/d' = Hg/c$ où Hg/c est la hauteur au dessus du sol et c est la distance principale, proche de la longueur focale. L'échelle de l'image, $s = 1/S$ est l'inverse de l'échelle. Dans ce cas, il est constant pendant toute l'image.
- Pour les images verticales de terrain plat et lisse, l'échelle de l'image varie légèrement d'un point à un autre. Ici, l'image de l'échelle s est la valeur moyenne des échelles d'images locales.

- Sur terrain rugueux ou vues obliques, l'échelle de l'image varie grandement d'un point à un autre, à cause du relief ou de l'inclinaison de l'image et aussi en fonction de la distance d .
- Le point principal H est dans le plan de l'image le point le plus près du centre de projection figure (2.4). La direction de vue est la direction de la ligne OH en direction de l'objet.
- Les point nadir N et N' sont les intersections de la ligne du fil à plomb à travers le centre de projection O dans le plan au sol et le plan de l'image respectivement.
- Le plan principal est défini par la ligne nadir NN' et la direction de vue OH . Ce plan tient verticalement sur le plan de sol horizontal et recoupe le plan de l'image dans la ligne principale.
- La ligne principale est la ligne ayant la pente maximale dans le plan de l'image et elle passe par le point principal et le point nadir.
- La ligne d'horizon est l'intersection du plan horizontal à travers le centre de projection O et le plan de l'image et elle est perpendiculaire à la ligne principale.
- L'angle d'inclinaison π est l'angle entre la direction de vue OH et la ligne du fil à plomb.
- L'angle de swing (*balancement* : non indiqué dans la Figure 2.4) est l'angle entre la ligne principale et l'axe de coordonnée y' du système de coordonnées de l'image.
- L'isocentre est l'intersection de la bissectrice de ON et OH avec le plan de l'image. En ce point, l'échelle de l'image locale pour des distances infinitésimales est indépendante de leurs directions et de l'angle d'inclinaison π . L'échelle de l'image pour un terrain horizontal à ce point est identique à c/Hg .
- La parallèle isométrique est une ligne horizontale à travers l'isocentre. Pour un terrain horizontal, l'échelle de l'image le long de cette ligne est constante et égale à c/Hg . L'échelle de l'image locale est plus grande que c/Hg au dessous de la parallèle isométrique et plus petite au dessus.

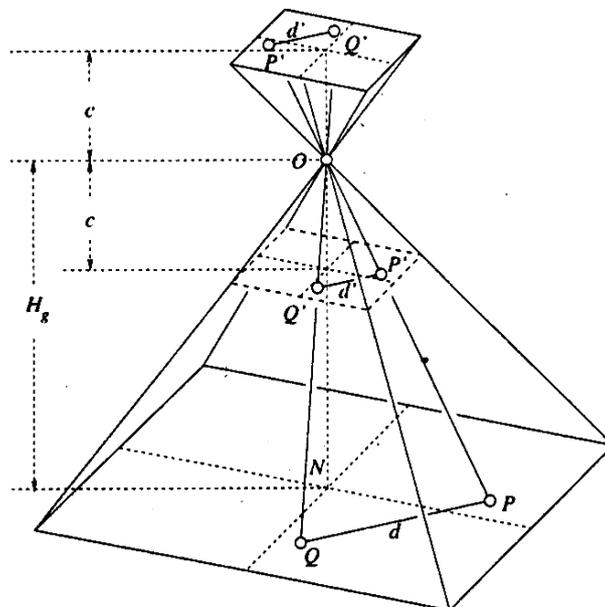


Figure 2.7 : Points et lignes de base dans une image nadir : centre de projection O , plan de l'image en prise de position, plan de l'image en position vue, plan au sol, point nadir N , distance principale c , hauteur au dessus du sol H_g , échelle de l'image c/H_g .

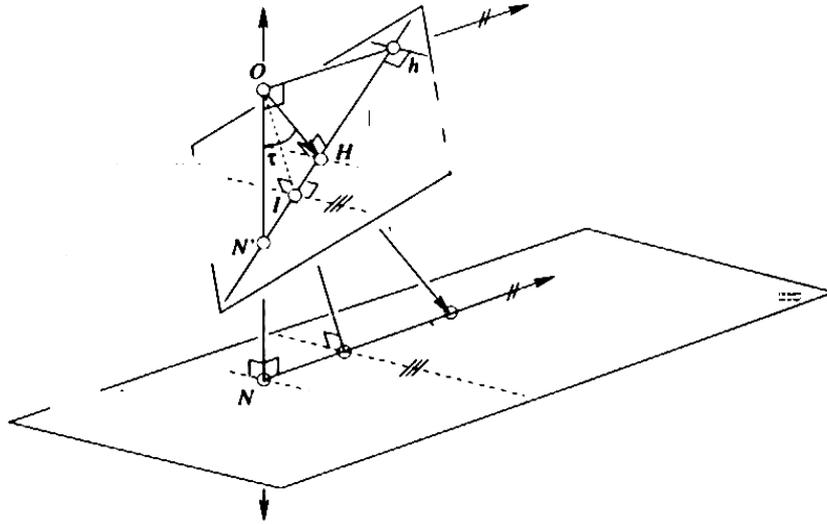


Figure 2.8: Points et lignes de base d'une image inclinée : centre de projection O , point principal H , direction vue OH , points nadir N et N' , angle d'inclinaison π , isocentre $I =$ bissectrice du nadir et de la direction de vue recoupant le plan de l'image. Parallèle isométrique = ligne horizontale de l'image à travers l'isocentre I , ligne d'horizon h , ligne principale ($N'H$).

Exemples : Des croquis de vue horizontale et verticale sont donnés à la figure (2.9). La vue horizontale (à gauche) montre la ligne horizontale h avec deux points qui disparaissent et qui sont l'intersection des groupes de lignes parallèles dans l'espace objet. Il est clair que la position de l'horizon permet de déduire les angles d'inclinaison et de swing (*balancement*). La vue verticale (à droite) montre l'image du point nadir N' , qui est le point de disparition des lignes du fil à plomb dans l'espace objet. Bien que ce soit une vue verticale, on peut voir que les murs verticaux des constructions et des points ont les mêmes coordonnées planimétriques mais que les hauteurs différentes ont des positions qui varient grandement dans l'image. Ce déplacement du relief, également présent mais pas visible dans les images sur terrain lisse, peut être utilisé pour déduire les hauteurs des constructions. L'échelle de l'image locale bien sûr est différente pour les points au niveau du sol et au sommet des constructions.

La géométrie de l'image doit par conséquent être modélée en détail pour prendre en charge tous ces effets et pour exploiter pleinement l'information géométrique de l'image en perspective.

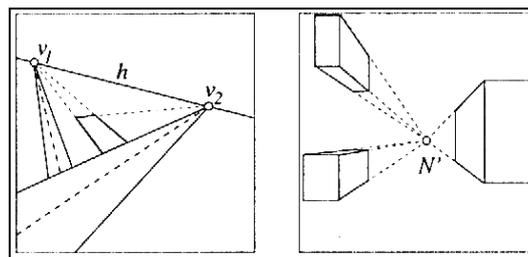


Figure 2.9. Vue horizontale (gauche) et verticale (droite) avec la ligne horizontale h , les points qui disparaissent v_1 et v_2 et le point nadir N' .

2.3.3 Principes de Modélisation

▪ Introduction

Le processus d'un traitement photogrammétrique consiste à déterminer une relation mathématique existant entre les coordonnées tridimensionnelles (3D) des points d'une scène et les coordonnées bidimensionnelles (2D) de ces mêmes points projetés, détectés dans une image. La détermination de cette relation est une étape incontournable en Vision, en particulier pour la restitution des objets, où il est donc nécessaire d'inférer une information tridimensionnelle à partir de données extraites de l'image (2D). En réalité le champ d'application est plus large et l'étalonnage s'avère nécessaire dès lors qu'il faut établir une relation entre l'image et le monde 3D : reconnaissance et localisation d'objets, contrôle dimensionnel de pièces, reconstruction de l'environnement pour la navigation d'un robot mobile. La calibration est une phase incontournable dans les problèmes de restitution.

En général, le problème du calibrage des caméras CCD se décompose généralement en une étude de calibrage *géométrique* (calcul de la matrice de projection) et un calibrage *radiométrique* (uniformité de la luminance dans l'image). Le premier problème a donné lieu à une littérature dense, le second est quant à lui moins étudié. A travers ce chapitre, nous nous attacherons à poser de manière didactique le problème du calibrage géométrique des capteurs et à le résoudre par des méthodes linéaires puis non linéaires. La littérature fait souvent état de calibrage *faible* ou *fort* ; la distinction se situe au niveau d'une estimation globale de la matrice de projection (cas faible) ou d'une estimation de chaque paramètre qui compose cette matrice (cas fort).

Le processus de calibration est un processus supervisé nécessitant souvent l'intervention de l'opérateur. C'est un processus statique qui s'effectue hors-ligne, avant l'utilisation de la caméra pour une tâche visuelle précise. Une fois la caméra calibrée, ses paramètres doivent rester fixes en cours d'utilisation. Chaque fois que l'on désire modifier la mise au point, la distance focale voire l'ouverture de l'objectif, la caméra devra être recalibrée. De très nombreux travaux, ces vingt dernières années, ont permis d'obtenir des méthodes plus ou moins complexes et donc plus ou moins précises permettant d'assimiler un système de vision à un ensemble métrologique.

▪ Formulation du problème

L'optique géométrique classique voudrait qu'on utilise des modèles à lentilles épaisses ou à lentilles minces. La difficulté d'exprimer de façon simple les contraintes de vergence, nous pousse à recourir au modèle sténopé (*pin-hole model*) où tous les rayons passent par un seul et même point (le centre optique). La cellule photosensible (plan image) se situe à une distance de ce centre et représente la distance focale ou tirage de l'objectif.

Notons que l'image obtenue est normalement inversée par rapport à la scène vue par l'œil. Pour pallier ce problème, on place artificiellement le plan image devant le centre optique (d'un point de vue physique, cet artifice est réalisé en lisant la matrice CCD de manière à obtenir l'inversion de l'image). Dans la littérature, nous trouvons plusieurs types de projection d'image ; orthographique, orthographique à l'échelle, para-perspective et perspective. C'est cette dernière famille de projection qui retiendra notre attention pour sa meilleure adéquation à la réalité physique des appareils photographiques et des capteurs de vision.

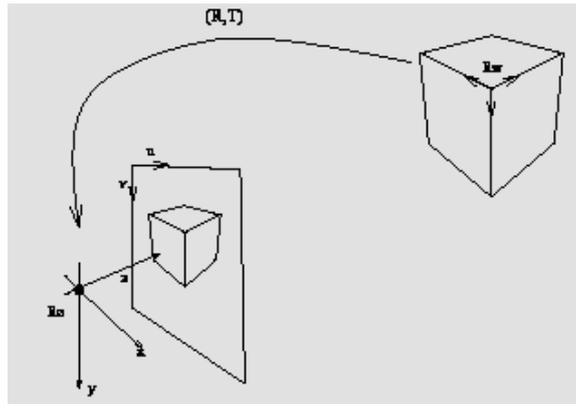


Figure 2.10 : Notation des différents repères

Dans ce paragraphe nous utiliserons les notations suivantes figure (2.10):

- R_c repère caméra (axe z confondu à l'axe optique) ;
- R_w repère lié à la modélisation de l'objet ;
- $(0,uv)$ repère Image (prenant en compte l'effet de digitalisation).

Les changements de repère (Objet/Caméra) et (Caméra/Image) passent par une transformation composée de rotations, translation et facteurs d'échelle. Le premier changement de repère permet d'exprimer les coordonnées de l'objet ou de l'étalon, (positionné dans l'espace) dans le référentiel lié à la caméra.

$$P_c = (M_1) \cdot P_w \quad (2.1)$$

$$P_c = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Avec :

- P_c les coordonnées 3D d'un point de la mire, exprimées dans le repère de modélisation,
- P_w les coordonnées du même point 3D exprimées dans le repère de la caméra.

Les matrices de rotation et de translation (R et T) sont définies dans le repère de la caméra. Dans une même notation matricielle il est nécessaire d'utiliser une notation en coordonnées homogènes.

Le second changement c'est à dire le passage du repère caméra au repère image est lié aux équations de projection perspective. De manière classique, ces équations sont de la forme :

$$\begin{aligned} x &= X_c f / Z_c \\ y &= Y_c f / Z_c \\ z &= f \end{aligned} \quad (2.3)$$

En coordonnées homogènes, le système s'écrit :

$$\begin{bmatrix} sx \\ sy \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} P_c \quad (2.4)$$

On remarque que les notations homogènes introduisent un facteur multiplicatif s , lors du passage ($\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$). Pour le changement de coordonnées dans le plan image il est nécessaire d'inclure la différence de pas, selon les coordonnées x et y , relatives d'une part à la forme du pixel élémentaire sur la matrice CCD figure, (2.11).

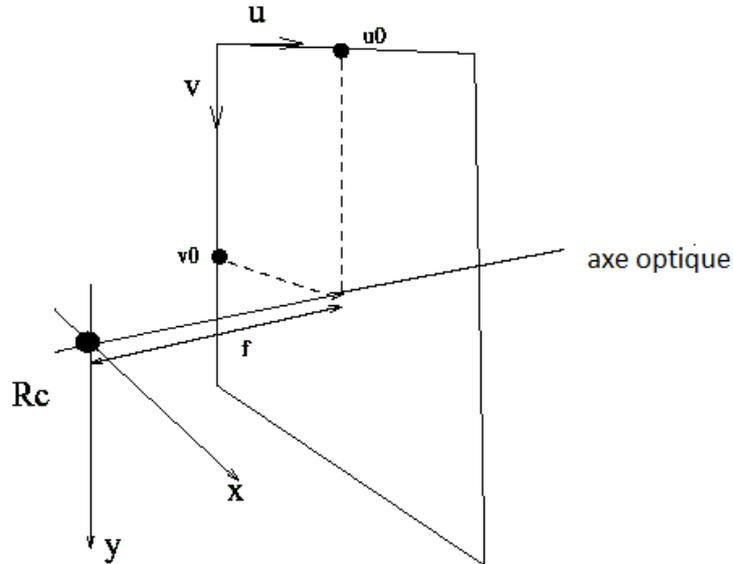


Figure 2.11. Système de coordonnées sur la matrice CCD

Donc :

$$\begin{bmatrix} s \\ u \\ v \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Soit encore, les équations classiques de changement de repère (Coordonnées Caméra / Pixel) :

$$\left. \begin{aligned} u &= x/d_x + u_0 \\ v &= y/d_y + v_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

- Dont (u_0, v_0) représentent les coordonnées (en pixel) dans l'image, de l'intersection de l'axe optique et du plan image (origine du changement de repère).
- Et (d_x, d_y) sont les dimensions respectivement selon x et y d'un pixel élémentaire de la matrice CCD. On l'appelle résolution la trace de l'image figure, (2.12).

Caméra projective

Ce paragraphe a pour but de représenter les différents modèles de projection que l'on retrouve dans la littérature. La stratification est sous-tendue à un certain nombre d'approximations et donc de simplifications du comportement réel inhérent aux rayons lumineux qui se propagent à travers les différentes lentilles des objectifs.

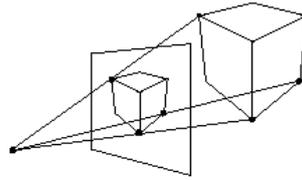


Figure 2.12. Camera projective - sténopé

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$P_{im} = M.P_{cam} \quad (2.8)$$

Tous les rayons lumineux se projettent dans l'image via un point unique, le centre optique. M représente la matrice de projection.

Cas particulier de camera

La Projection orthographique simple ou mise à l'échelle figure 2.13 et 2.14 sont des cas où tous les rayons lumineux se projettent dans l'image selon un faisceau de droites parallèles. Il n'existe plus de notion de focale, de point de fuite, et donc plus d'effet perspectif dans la figure. La mise à l'échelle peut être appliquée ou non selon l'objet.

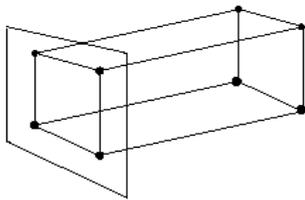


Figure 2.13 : camera orthographique

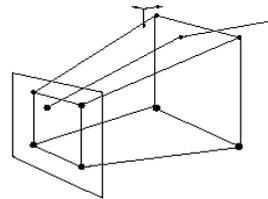


Figure 2.14 : caméra orthographique à l'échelle

La représentation précédente s'éloigne fortement en termes de réalisme des images capturées par une caméra. On peut cependant se rapprocher d'une image conforme en introduisant une mise à l'échelle donc une Projection orthographique à l'échelle.

Il faut prêter attention car dans cette représentation l'ensemble des points subit tout d'abord une projection orthographique, suivi d'une mise à l'échelle. Cela se voit notamment si on regarde la coordonnée des points. L'expression générale du système complet de formation d'images s'exprime alors par la relation [2.9].

$$\begin{bmatrix} s_u \\ s_v \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.4. Approche non linéaire

Selon le formalisme utilisé en photogrammétrie, le modèle de projection utilisé pour le processus de formation d'images se réfère au modèle optique sténopé, approximation du modèle optique de lentille mince. Cette approche représente d'une part la modélisation précise des phénomènes de distorsion optique provoqués à la surface des lentilles et d'autre part par la mise en œuvre d'un processus d'optimisation non linéaire minimisant un critère, exprimé en pixel, de reprojection des points dans les images.

Les conventions de notations en photogrammétrie sont légèrement différentes de celles utilisées en vision par ordinateur. Entre autre, classiquement les données ne sont plus exprimées dans le repère de la caméra mais dans le référentiel du monde réel qui reste fixe quelle que soit la position de la caméra.

Soient les notations suivantes :

- $R_w\text{-}XYZ$ est un repère 3D direct. C'est le référentiel objet qui servira entre autre de base de modélisation.
- $o\text{-}uv$ est le référentiel 2D image, dont l'origine est située au coin haut-gauche de l'image.
- $R_c\text{-}xyz$ est le référentiel 3D de la caméra dont l'origine est au centre optique et dont l'axe z est confondu avec l'axe optique. xy sont respectivement parallèles à $o\text{-}uv$.

Les paramètres internes du capteur que nous devons déterminer sont : le point principal (u_0v_0), la distance focale f et la taille des pixels de la matrice CCD (dx , dy) ou leur rapport, et enfin les paramètres de distorsion optique introduits par l'objectif de la caméra. Les paramètres externes sont la matrice de rotation R ainsi que le vecteur de translation T entre R_c et R_w .

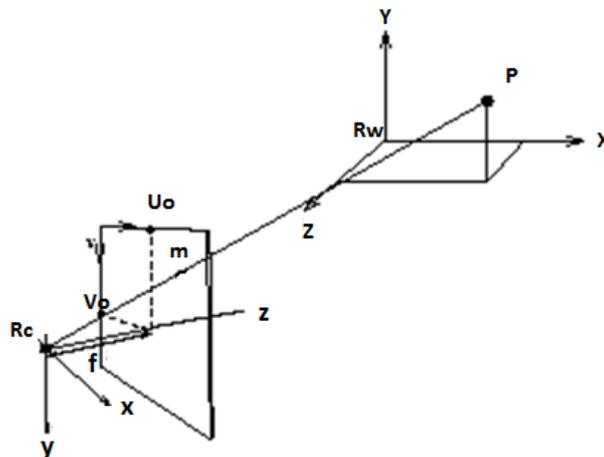


Figure 2.15 : Modèle sténopé, géométrie de l'image et systèmes de coordonnées.

La méthode décrite dans ce chapitre est strictement une approche au sens des moindres carrés ; nous allons essayer de minimiser des *erreurs de mesure* dans l'image, représentant la différence entre un point détecté sur l'image et son homologue 3D dans l'espace objet.

2.4.1 Formulation Mathématique

Soit une projection perspective entre une image 2D et un objet 3D (sous une hypothèse *sténopé*). La relation entre un point de l'étalon et sa projection dans l'image est décrite par l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \lambda_i \left[R \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + T \right] \quad (2.10)$$

Où :

- (x_i, y_i, z_i) est un point image défini dans le Référentiel Caméra, avec $z_i = f$, distance principale de la camera.
- λ_i est un facteur d'échelle introduit lors du passage $R \rightarrow R^2$
- (X_i, Y_i, Z_i) sont les coordonnées du point de l'objet définies dans le système objet XYZ
- (T_x, T_y, T_z) est le vecteur de translation,
- R est la matrice de rotation exprimée dans le repère de la camera et paramétrée selon les trois angles d'Euler α, β, γ
-
- $$R = \begin{pmatrix} \cos\gamma\cos\beta & \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha - \sin\gamma\cos\alpha & \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha + \sin\gamma\sin\alpha \\ \sin\gamma\cos\beta & \cos\gamma\cos\alpha + \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha & \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha - \cos\gamma\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

En éliminant λ_i dans (2.10) et en supprimant l'indice i , nous obtenons les expressions suivantes appelées *équations de colinéarité* en photogrammétrie :

$$\left. \begin{aligned} x &= f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Si nous exprimons (x, y) dans le système de coordonnées pixel de l'image nous obtenons:

$$\left. \begin{aligned} x &= (u + e_x - u_0)dx - d\sigma_x \\ y &= (v + e_y - v_0)dy - d\sigma_y \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Dans cette expression (e_x, e_y) sont les erreurs de mesure respectivement selon les coordonnées x et y , (c'est à dire, les corrections à apporter aux mesures pour qu'il existe une correspondance parfaite avec les données issues de la fonction de projection). *dox* et *doy* sont les composantes de distorsion optique qui se divisent en deux parties : distorsions *radiale* et *tangentielle*. Nous introduisons ici, les deux formes communément utilisées en photogrammétrie [Ame84] :

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_x &= (u-u_0).dx(a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6) \\ d\sigma_y &= (v-v_0).dy(a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6) \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_x &= P_1(r^2 + 2(u-u_0)^2.dx^2) + 2p_2.(u-u_0).dx(v-v_0)dy \\ d\sigma_y &= P_2(r^2 + 2(v-v_0)^2.dy^2) + 2p_1.(u-u_0).dx(v-v_0)dy \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Où dans les expressions (2.13), (2.14), et (2.15) :

- u,v - sont les coordonnées image dans le référentiel image,
- uo,vo - les coordonnées du point principal dans le référentiel image,
- a1,a2,a3 - les coefficients du polynôme qui modélise la distorsion radiale,
- p1,p2,p3 - les coefficients du polynôme qui modélise la distorsion tangentielle,
- dx,dy - représentent les facteurs d'échelle de la forme du pixel élémentaire,
- le paramètre r est la distance radiale depuis le point principal.

Étant donné que r peut prendre des valeurs importante (selon la taille de l'image), r4 et r6 deviennent parfois énormes; l'expression (2.12) peut alors conduire à une instabilité numérique lors de l'estimation des différents paramètres. Un moyen de contourner cette difficulté est de réécrire cette expression de la manière suivante :

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_{xr} &= (u-u_0)d_x(a_1(r^2 - r_0^2) + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6)) \\ d\sigma_{yr} &= (v-u_0)d_y(a_1(r^2 - r_0^2) + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6)) \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Le système (2.16) suppose que la distorsion est nulle pour une distance radiale de ro. En substituant (2.13), (2.14) et (2.15) dans (2.12), et en posant $\phi_x = f / dx$ et $\phi_y = f / dy$ nous obtenons le système suivant :

$$\left. \begin{aligned} P(\Phi) &= u_0 + d\sigma_{xr} + d\sigma_{xt} + F_x = u + e_x \\ Q(\Phi) &= v_0 + (d\sigma_{yr} + d\sigma_{yt}) \frac{f_x}{f_y} + F_y = v + e_y \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Où Φ est un vecteur de 15 paramètres et F_x et F_y sont les fonctions définies par la condition de colinéarité.

2.4.2 Résolution du problème

Reprenons les équations de colinéarités définies dans l'expression précédente (2.17) :

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(\Phi) - u \\ Q(\Phi) - v \end{pmatrix} = V(\Phi) \quad (2.18)$$

Le problème est à présent de déterminer la valeur de Φ qui minimise

$$S = \sum_{i=1}^n (e_{xi}^2 + e_{yi}^2) \quad (2.19)$$

Dans (2.18), $P(\Phi)$ et $Q(\Phi)$ sont des fonctions non linéaires de Φ , la minimisation est donc un problème d'optimisation non linéaire. Un moyen de résoudre ce problème est de faire une linéarisation

de (2.18) à partir d'une valeur initiale Φ_0 (généralement fournie par le résultat de la résolution linéaire) et de calculer une correction $\Delta\Phi$ qu'on ajoute alors à Φ_0 qui devient la nouvelle valeur initiale : le procédé doit être répété jusqu'à la convergence du système de résolution.

$$V(\Phi) = V(\Phi_0) - \sum_{i=1}^{15} \frac{\partial V}{\partial \Phi_i} \Delta\Phi_i \quad (2.20)$$

$$V = L - A\Delta\Phi \quad (2.21)$$

A Représente donc la valeur courante du critère et A la matrice jacobienne du système, autour du vecteur courant Φ_0 . La résolution au sens des moindres carrés de (2.21) revient à estimer l'équation d'observation :

$$\min_{\Delta\Phi \in R^{15}} (V^T W V) \quad (2.22)$$

La solution de (2.22) est donnée par :

$$\Delta\Phi = (A^T W A)^{-1} (A^T W L) \quad (2.23)$$

Si toutes les mesures sont faites avec la même précision et qu'il n'existe pas de corrélation entre les paramètres, la matrice poids est représentée par l'unité. Cette approche est définie comme étant rigoureuse pour la communauté des photogrammètres.

2.5 Approche Linéaire

2.5.1 Position du problème

Étant donné un nombre d'appariements 3D - 2D ($XYZ ; u v$), expression (2.24) entre un objet et son image, le problème donc est de déterminer les 16 paramètres de la formation d'images.

$$\begin{bmatrix} s_u \\ s_v \\ s \end{bmatrix} = M_{int} \cdot M_{ext} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix} = M_{3 \times 4} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

La résolution du problème de calibrage par une méthode linéaire présente l'avantage de ne pas demander de valeurs initiales des paramètres de calibrage pour trouver une solution. Nous verrons que ceci a un coût dans la pratique et que les performances d'une telle approche sont d'ordre zéro. Faugeras et Toscani [Faugeras et al, 1987] ont proposé cette méthode dans le début des années 1980 en vision par ordinateur. C'est une approche similaire à la méthode DLT (Direct Linear Transformation) qui avait été introduite en photogrammétrie dans les années 1970.

II.5.2 Principe

Soit la projection 3D-2D entre un point de l'étalon et son image :

$$\begin{bmatrix} s_u \\ s_v \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Par substitution de l'équation et combinaison des paramètres nous obtenons la forme linéaire suivante du système d'observation :

$$\begin{bmatrix} X_w^i & Y_w^i & Z_w^i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i X_w^i & -u_i Y_w^i & -u_i Z_w^i & -u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_w^i & Y_w^i & Z_w^i & 1 & -v_i X_w^i & -v_i Y_w^i & -v_i Z_w^i & -v_i \\ & & & 0 & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ m_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.26)$$

L'indice i représente l' i ème appariement entre point 3D de l'objet et le point 2D détectés dans l'image. Chaque appariement permettant d'écrire 2 équations, le nombre minimum d'appariement nécessaire à la résolution du problème est donc de 6 appariements. Résoudre un système surdéterminé ($A=0$), revient à chercher le vecteur propre associé à la plus petite valeur propre de A . On utilise en général l'algorithme SVD (Singular Value Décomposition) [Jung, 2007]. Les 16 paramètres de formation d'images sont ainsi entièrement déterminés par la résolution de l'équation (2.25).

2.5.3 Remarques et commentaires

Cette méthode est très facile à implémenter. La résolution d'un système linéaire est peu coûteuse en temps de calcul. Cependant les résultats auxquels nous arrivons ne sont pas très stables. Par stabilité de la méthode, on entend son aptitude à fournir des résultats (sur les paramètres intrinsèques) semblables pour différentes attitudes de la mire. Notons, que la décomposition précédente laisse entrevoir un problème au niveau de l'estimation de la rotation. En effet, nous ne sommes jamais certains que :

$$R_{1(123)} \wedge R_{2(123)} = R_{3(123)} \quad (2.27)$$

En d'autres termes que la matrice de rotation R soit réellement conditionnée comme une matrice de rotation. Une solution palliative consiste alors à modifier la matrice de projection perspective pour lui adjoindre un terme supplémentaire qui peut s'interpréter comme la non orthogonalité de l'axe optique par rapport au capteur CCD et ce qui permet d'assurer l'orthogonalité des trois vecteurs de rotation.

En fait, la matrice de rotation n'est pas paramétrée de façon satisfaisante dans l'approche linéaire. Il conviendrait d'utiliser sa décomposition selon les angles d'Euler (α, β, γ) respectivement autour des axes (x, y, z) du repère caméra. Il résulte, dans ces conditions, que le système à résoudre n'est plus *linéaire*. De plus, aucun phénomène de distorsion optique n'est pris en compte dans le processus de formation d'images. Néanmoins cette méthode procure une très bonne estimation initiale à un processus d'optimisation non-linéaire.

2.6. Opérations de Photogrammétrie Numérique

La modélisation de données photogrammétriques pour satisfaire des besoins métrologiques est une phase primordiale permettant de générer des surfaces tridimensionnelles. Le fonctionnement des processus opératoires est articulé sur des modèles fonctionnels ou déterministes dont le rendement est évalué sur la base de fonctions stochastiques. En général, dans le domaine de l'informatique, la modélisation est « la représentation au sein d'un ordinateur de modèles géométriques d'un objet solide » c'est-à-dire d'objets à trois dimensions.

Modéliser un objet revient à le représenter sous forme vectorielle et l'hypothèse de base utilisée pour cette modélisation consiste à résumer l'objet par un ensemble de formes géométriques simples qui le

composent. Les principales méthodes de modélisation rencontrées dans la littérature peuvent être rangées en deux catégories : les modélisations paramétriques et non paramétriques

2.6.1. Modèle fonctionnel

Dans de nombreux domaines de l'industrie, le recours à la simulation a longtemps pu passer pour une solution rapide permettant d'éviter tout travail préalable de conceptualisation. Lorsqu'un objet complexe ne se prête pas immédiatement à un modèle général, il peut encore prêter à des multi modèles sur ordinateur (pluri échelles, pluri perspectifs, etc..), notamment s'il existe différentes échelles de terrain stabilisées en des formalismes locaux, puis intégrables par ordinateur.

Il est nécessaire donc, pour assurer une bonne métrologie de « calibrer » l'espace ou l'environnement de mesure. Les fonctions et paramètres permettant de satisfaire cette requête sont nombreux et multiformes. Les objectifs assignés en métrologie doivent de toute évidence garantir les points suivants pour des objets 3D :

- Exactitude géométrique,
- Dimension précise des objets à restituer,
- Forme des objets selon une certaine limite : tolérance de déformation.

L'étude de la modélisation fonctionnelle et stochastique doit apporter des solutions en utilisant à chaque fois le cas normal photogrammétrique. Dans le cadre de cette thèse, on s'oriente d'une conception zéro (ZOD) vers une conception de troisième degré (TOD) pour résoudre les problèmes de densification qui se traduit en photogrammétrie par la génération d'un nuage de points [Amiri et Gruen, 2006]. Le traitement photogramétrique doit prendre en compte les éléments suivants :

- Modèle : cas du couple normal,
- Extension pour plusieurs images,
- Génération de points par rapport au référentiel objet,
- Surfaces 3D de l'objet,
- Erreurs de détermination 3D selon le processus.

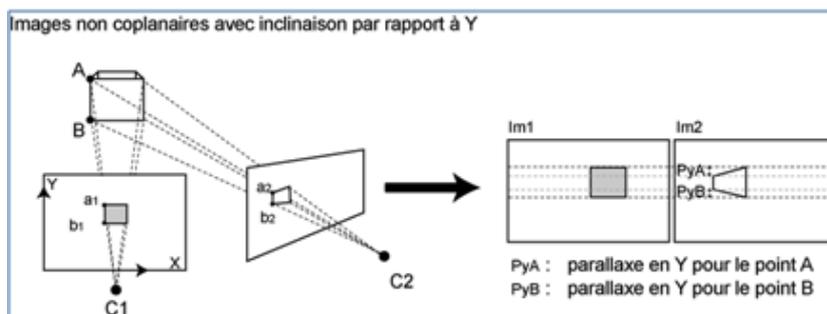
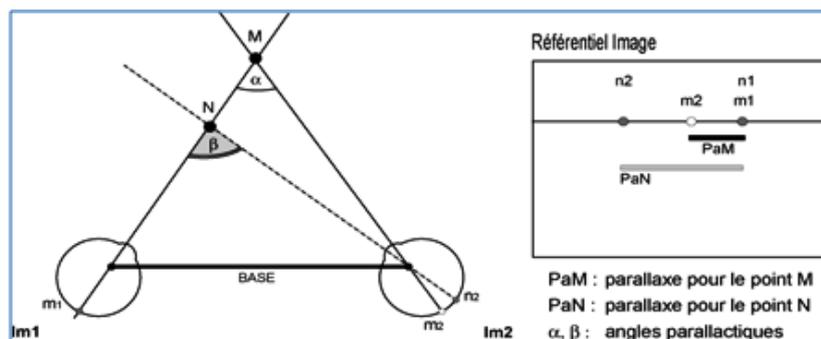


Figure 2.16 : cas d'un couple permettant de définir une étape d'acquisition d'ordre zéro (ZOD)

Le modèle fonctionnel peut se résumer par rapport à l'unité de traitement (faisceau) relatif au couple en paramétrant les facteurs de prise de vues et en procédant par rapport au cas normal. Il est difficile d'établir un cas de modèle complet pour toutes les situations (cas normal, incliné, convergente, panoramique). Très récemment, un modèle robuste d'orientation d'images par le processus direct de la condition de coplanarité est défini dans les travaux de thèse de Kalantari, (Kalantari, 2009). Le modèle fonctionnel s'articule sur une approche directe de l'estimation automatique de l'orientation 3D d'images pour des besoins de mosaïquage et de triangulation de bloc. En partant d'une hypothèse de traitement faisceau, il est toujours possible de combiner les fonctionnalités et atteindre un bon niveau de densification et d'estimation.

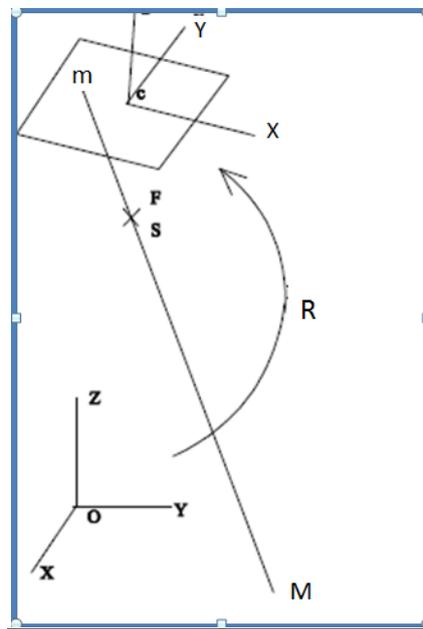


Figure 2.17 : perspective d'un point 3D (condition de colinéarité)

$$M = \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ p \end{pmatrix}; m = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

2.6.2 Modèle stochastique

Nombreux sont les domaines d'application - notamment la prédiction, la détection d'un signal en communication, la localisation - où il est important d'estimer l'intégrale d'un processus stochastique à partir d'observations en un nombre fini de points proprement choisis dans l'intervalle d'observation. Ainsi, des questions d'ordre techniques se posent:

- 1) Quel est le meilleur plan d'échantillonnage dans un processus photogrammétrique?
- 2) Comment utiliser les observations engendrées par cet échantillonnage pour construire des estimateurs efficaces?

- 3) Quelle est la performance de cet échantillonnage par rapport à d'autres plans d'échantillonnage, en particulier l'échantillonnage uniforme (périodique)?
- 4) Comment déterminer la taille de l'échantillon pour obtenir une certaine précision de l'erreur quadratique d'estimation?

Le contrôle des traitements et une vérification de la fiabilité des résultats sont assurés par les modèles stochastiques. En photogrammétrie, ils se basent en général sur l'évaluation de la précision géométrique du calcul sur des points connus. Des primitives de classes d'objet (point, ligne, surface) sont considérées, les résultats et leurs effets permettent de définir l'objet. De manière classique le résultat du modèle généré est représenté par la figure (2.18).

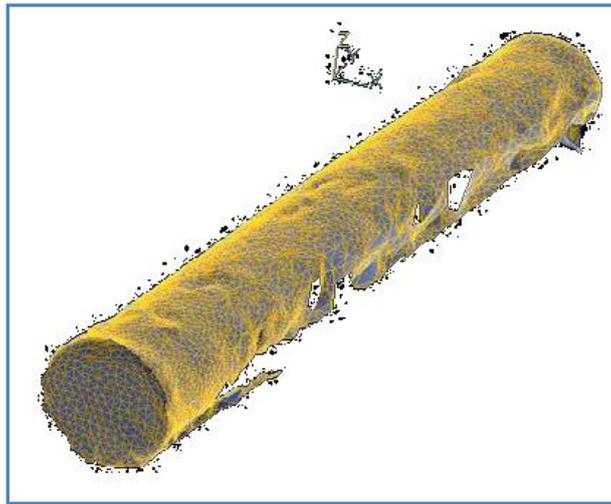


Figure 2.18 : Exemple d'échantillonnage à partir de primitives simples

L'échantillonnage de la fonction maillage permet d'approcher de manière exhaustive la forme de l'objet, néanmoins une déviation entre la forme réelle et la forme obtenue est observable. La figure (2.19) illustre cet aspect.

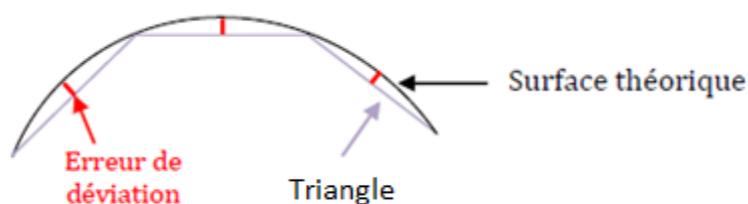


Figure 2.19 : Erreur de déviation après maillage

2.6.3 Traitement d'images par filtrage

Le filtrage d'image a pour but d'améliorer la qualité d'une image numérique. Le terme qualité peut prendre plusieurs sens suivant la raison qui nécessite d'effectuer cette amélioration. Par exemple, on parle de qualité visuelle lorsqu'on cherche à avoir un meilleur aspect de l'image ou de qualité du signal lorsqu'on cherche à atténuer les distorsions liées aux techniques de numérisation. Le filtrage manipule uniquement les données de l'image numérisée. On ne fait aucune supposition sur ce que représente

l'image. Le résultat obtenu suite à un filtrage dépend donc énormément de la qualité du signal de l'image d'origine. Si le signal est très détérioré, le filtrage seul sera très peu efficace. Dans ce genre de situation le filtrage est juste une première étape dans un traitement plus complexe qui fera intervenir des informations sémantiques sur l'image (modèle). Chaque filtre cherche à atténuer un type de défaut bien précis. Il n'y a pas de filtre universel capable de corriger tous les défauts. Il faut choisir les bons filtres selon les défauts à corriger. Cette partie a pour but de vous présenter les principaux filtres utilisés en traitement d'image.

Image[u][v] ; largeur (0,u); hauteur (0,v)

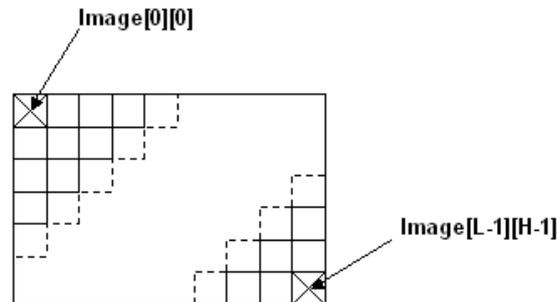


Figure 2.20 : Mode maillé d'une image

Chaque élément du tableau représente la valeur du pixel de l'image de coordonnées correspondantes. L'élément d'index (0,0) correspond au pixel en haut à gauche de l'image, et l'élément (largeur L-1, hauteur H-1) correspond au pixel en bas à droite de l'image. Le principe du filtrage est de modifier la valeur des pixels d'une image, généralement dans le but d'améliorer son aspect (contraste, clarté,...). En pratique, il s'agit de créer une nouvelle image en se servant des valeurs des pixels de l'image d'origine. Les transformations de l'image d'origine telle que les zooms, le découpage et les projections, n'entrent pas dans la catégorie du filtrage. Dans le filtrage global, chaque pixel de la nouvelle image est calculé en prenant en compte la totalité des pixels de l'image de départ. Dans cette catégorie on trouve, par exemple, les opérations sur les histogrammes ou les opérations qui nécessitent de passer dans l'espace de Fourier. En ce qui concerne le filtrage local, chaque pixel de la nouvelle image est calculé en prenant en compte seulement un voisinage du pixel correspondant dans l'image d'origine. Il est d'usage de choisir un voisinage carré et symétrique autour du pixel considéré. Ces voisinages sont donc assimilables à des tableaux à deux dimensions (matrices) de taille impaire.

La description des transformations entre les images d'une même scène vue par une ou plusieurs caméras est un problème connu en photogrammétrie. Le but étant de définir des applications de détection de points homologues permettant de déterminer les éléments constitutifs de l'objet au travers d'un nuage de point. Il existe différentes possibilités permettant d'opérer dans les zones d'intérêt dont chacune présente des aspects spécifiques pour des besoins exprimés. L'expression de la relation entre les images par la géométrie épipolaire ou en exploitant la matrice d'homographie est un processus opérationnel en photogrammétrie.

La géométrie épipolaire définit des transformations d'une image à l'autre, qu'on se trouve dans l'espace normalisé ou pixellique, respectivement par les matrices essentielle ou fondamentale. Cependant, il existe des cas où cette approche est dégénérée, notamment dans le cas d'une rotation pure entre les images où les épipôles ne sont pas définissables. Le cas dégénéré d'une homographie

apparaît lorsqu'on suit un plan qui dans une des images est visible et dans l'autre, la caméra a subi une rotation telle qu'il passe maintenant par le centre optique de la caméra et est donc invisible.

En photogrammétrie, l'identification des points homologues a longtemps exigé une intervention humaine, et représentait alors une phase de travail assez coûteuse. Le travail qui consiste à appairer tous les pixels de deux images peut ne pas être nécessaire si l'on veut simplement montrer que deux images se ressemblent si elles représentent le même objet. Parfois, il vaut mieux avoir moins de points (typiquement 3000) mais plus fiables. Cette fiabilité peut être assurée par l'utilisation de la méthode RANSAC.

▪ Les détecteurs

La détection de points d'intérêt trouve leur application dans bien des domaines de la vision par ordinateur. Pour les champs d'application, il est bon de préciser que ce soit en reconnaissance, en analyse des formes ou encore dans la reconstruction 3D d'une scène ou d'un objet. La métrologie étant l'objet de ce travail, la sélection des points d'intérêt est de détecter des coins dans l'image ou des cibles. Les coins peuvent être définis comme des extrémités ou des intersections de contours.

Parmi les détecteurs les plus populaires, on retrouve ceux qui utilisent une matrice de structure locale dont les coefficients sont obtenus en combinant les dérivées partielles de l'image ; on parle encore de matrice liée à la fonction d'autocorrélation de l'image. Cette matrice contient les dérivées partielles de la fonction d'intensité. L'un de ces détecteurs est le détecteur de Harris. Sa méthode est basée sur un seuillage : la mesure de la force du coin, définie à partir des valeurs propres de la matrice de structure, est comparée à un seuil soigneusement défini. Un autre détecteur apparaissant souvent dans la littérature est le détecteur SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) basé sur une comparaison de luminosité sans dépendre des dérivées de l'image. La fenêtre SUSAN est déplacée dans l'image et atteint un minimum quand elle repose sur un coin. Cette méthode est réputée pour être moins sensible au bruit mais utilise toujours un seuil. Ces méthodes sont néanmoins toutes deux efficaces et la méthode de Harris reste très utilisée car assez rapide en exécution.

Plus récemment, un détecteur de coins basé sur un raisonnement flou qui donne des degrés d'intérêt au coin en vue de l'appariement pour la détection des coins. Cette méthode est basée sur un autre algorithme de détection de coins utilisant la matrice de structure déjà mentionnée, l'algorithme de Förstner, [Förstner W. 1987] qui détecte les coins par un maximum local d'une fonction combinant les différents éléments de la matrice de structure. Le raisonnement flou utilise une fonction d'appartenance continue entre les points détectés comme étant des coins et ceux détectés comme n'en étant pas. Par cette méthode, des caractéristiques pour l'appariement de points entre deux images sont directement définies.

Enfin, il existe une autre approche assez reprise dans la littérature malgré sa jeunesse et c'est l'algorithme des SIFT (Scale-invariant feature transform) qui est un algorithme d'extraction de primitives discriminantes des images. Les primitives sont invariantes aux changements d'échelle et aux rotations et sont robustes (*i.e.* partiellement invariant) au changement de point de vue et d'illumination.

▪ Points de Harris

Comme souvent en vision par ordinateur, la première étape consiste à appliquer un filtre gaussien avant le traitement réel pour les applications.

L'extraction des points d'intérêt est la première étape du processus de mise en correspondance. Pour ce faire il existe de nombreux algorithmes dans la littérature. De tels algorithmes sont soit basés sur une extraction des contours au préalable, soit ils utilisent directement le signal de niveaux de gris. L'avantage principal des détecteurs basés sur le signal de niveaux de gris est que leur performance n'est pas dépendante de la réussite ou de l'échec de l'extraction des contours. Dans un contexte de mise en correspondance, il est important que le détecteur soit répétable, c'est-à-dire invariant aux transformations images. Une imprécision dans la localisation des points est donc remarquable. Ce détecteur considère un point d'intérêt comme un point sur lequel les courbures principales de la fonction d'autocorrélation est maximale, ce qui revient à considérer les valeurs propres de la matrice M . On pose :

$$A = (I_x)^2, B = (I_y)^2, C = I_x \cdot I_y \quad (2.29)$$

Où I désigne la fonction de luminance de l'image. Une implémentation stabilisée utilise des dérivées Gaussiennes et une implémentation récursive de ces filtres assure une détection rapide.

On floute (A, B, C) pour donner A', B' et C' .

$$M = \begin{bmatrix} A' & C' \\ C' & B' \end{bmatrix} \quad \text{et } H = \det(M) = 0; 04 - (\text{trace}(M))^2 \quad (2.30)$$

Intuitivement, on comprend que les maximaux de H sont les coins de l'image. Mais sur des exemples on peut montrer les limites de cette méthode pour des images faiblement contrastées.

L'extraction de caractéristiques est la première étape pour l'interprétation d'images, dont les plus utilisées: contour, région, ligne de droite, etc.

Les lignes de crêtes et les blobs sont introduits pour un meilleur affinement de l'image. TRAN Thi [Tran Thi, 2003] propose une détection des points par les blobs figure (2.21).

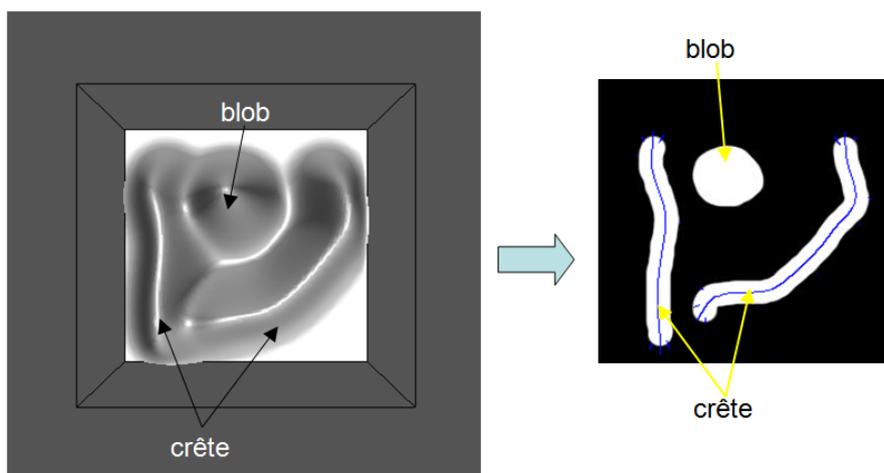


Figure 2.21 image des crêtes et blob de l'image

- **Transformée de Hough 3D**

L'approche par transformée de Hough, [Hough, 1962] est une exploration exhaustive de l'espace des paramètres du modèle recherché. Traditionnellement utilisée pour la détection de lignes droites dans une image, cette technique est rapidement étendue à l'estimation de modèles plus complexes (*e.g.* ellipses), dans des espaces de dimension quelconque. Il s'agit d'étudier l'espace d'accumulation des votes pour les paramètres testés. Les pics de l'accumulateur représentent les formes possibles du modèle. La détection de plans 3D s'effectue en exprimant l'équation d'un plan en coordonnées cylindriques par :

$$\rho = \cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \quad (2.31)$$

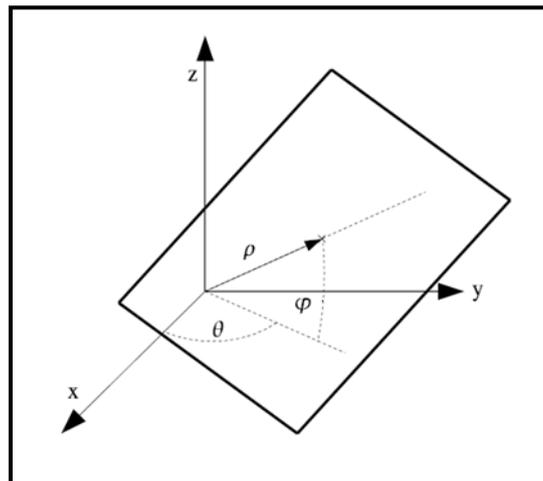


Figure 2.22: Paramétrisation d'un plan en coordonnées cylindriques

La limitation de l'envergure des angles θ et ϕ ainsi que la connaissance de l'emprise planimétrique des plans que l'on cherche à détecter sont deux facteurs courants de réduction de l'espace de recherche. Une telle réduction ne suffit malheureusement pas à assurer un ensemble de solutions (les maxima locaux de l'accumulateur) facilement exploitables pour un bâtiment de forme complexe. C'est d'autant plus vrai lorsque les données d'élévation utilisées sont bruitées ou lorsque les ruptures de pentes ne sont pas clairement définies [Jibrini, 2002].

- **SIFT :**

La vision par ordinateur utilise principalement, pour la détection automatique de points, La méthode SIFT invariante aux changements d'échelle, aux rotations, aux différences d'illumination pouvant exister entre images et aux variations de points de vue utilisés lors de l'acquisition des images.

L'avantage principal de cette méthode est qu'elle crée un grand nombre de points répartis sur toute l'image [Lowe, 2004]. Au lieu de détecter des coins, David G. Lowe choisit de regarder les blobs comme sur la figure (2.23):

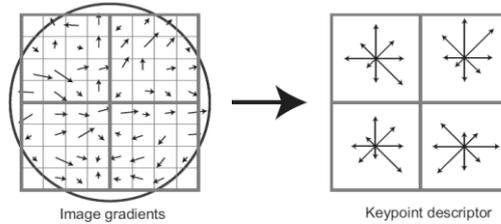


Figure 2.23 : Descripteurs des points d'intérêt (2*2) / (8*8)

On voit que les blobs correspondent aux extrema du Laplacien de l'image filtrée. Pour parcourir toutes les échelles, il est classique de convoluer l'image avec une gaussienne pour former une pyramide avec en haut la dernière convolution et en bas la première. La pyramide est nommée scale space (espace d'échelles). Il s'avère que prendre dans ces conditions les extrema locaux est très robuste. Il est à noter que grâce à la convolution, la dérivée seconde du Laplacien n'est à faire que sur la gaussienne. Cependant, pour gagner un temps de calcul, on utilise l'approximation de l'équation de la chaleur en considérant (que) le Laplacien est la dérivée selon l'axe des échelles.

▪ La Méthode RANSAC

L'algorithme RANSAC, introduit par Fisher et Bolles [Fisher et Bolles 1981], est une méthode "robuste" d'estimation de modèles. Pour un modèle à n paramètres, cette méthode consiste à effectuer N tirages aléatoires de n -uplets dans l'ensemble des mesures associées. Les points de mesures situés à une distance critique d_{cr} du modèle estimé à partir de chaque n -uplet de mesures sont les supports S du modèle. On considère qu'une estimation robuste du modèle est atteinte pour le modèle maximisant le nombre de supports. Sa formulation dans le cadre de l'estimation de plans est la suivante (algorithme 4) : À partir d'un ensemble N de points 3D, on sélectionne aléatoirement N plans (triplet $(\tau_1; \tau_2; \tau_3)$). Les points de N situés à une distance inférieure à la distance caractéristique d_{cr} constituent l'ensemble S des supports du plan. Le plan final P_{final} est le résultat de l'estimation par moindres carrés (ou autre) d'un plan sur l'ensemble S_{final} de cardinal maximum sur l'ensemble des supports S . L'ensemble de points S_{final} est ensuite extrait de l'ensemble initial N et l'algorithme est itéré jusqu'à l'épuisement de N .

L'algorithme RANSAC fournirait théoriquement un plan robuste optimal après l'extraction exhaustive de tous les triplets de points de l'ensemble N . Une telle définition du nombre de tirages est inenvisageable dans des conditions opérationnelles de calcul. Généralement, un nombre si élevé de tirages n'est pas nécessaire [Hartley et Zisserman, 2000].

En d'autres termes, pour une probabilité p de tirer un plan correct P , nous voudrions maximiser la probabilité w (w_3 pour 3 points) que tous les points sélectionnés appartiennent effectivement au plan final. On peut dès lors relier p , w et N par l'équation suivante :

$$(1-p) = (1-w)^3 \Rightarrow N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^3)} \quad (2.32)$$

Le nombre d'itérations N peut dès lors être calculé directement à partir de la connaissance de p et w . La probabilité p est généralement gardée constante à 0.99. La probabilité w doit être estimée en fonction des données. C'est un a priori difficile à paramétrer, mais dont dépend l'ensemble des points

sur lesquels sera estimé le modèle. Dans le cas d'images réelles dont la configuration est multiple et plus longue avec plus d'images et dans laquelle on constate des vibrations de la caméra, le traitement par bandes devient nécessaire. De plus, les orientations correspondent au positionnement des rayons optiques et définissent ainsi l'espace des intersections pour la restitution. La modélisation de ce processus permettra de définir le point d'intersection.

Actuellement, pour estimer l'homographie, les points sont filtrés par une homographie estimée itérativement en minimisant l'erreur de reprojection et en éliminant les outliers dans le but de ne garder qu'un ensemble de points coplanaires. Cependant, en utilisant la décomposition tridimensionnelle de l'homographie, et notamment en calculant la normale au plan observé, il serait intéressant, tout en minimisant l'erreur de reprojection pour éliminer les outliers, d'intégrer une contrainte selon laquelle les correspondances gardées (les inliers) permettent l'estimation d'une normale caractérisant un plan parallèle à la caméra. Mais il serait sans doute plus judicieux de développer cette idée selon une approche Ransac qui sélectionnerait aléatoirement des correspondances dont l'homographie estimée ne serait validée que si le plan (par sa normale) formé par les correspondances est proche d'être parallèle à celui de la caméra.

Ensuite seulement, la suite de Ransac serait appliquée à savoir le vote selon lequel l'homographie planaire choisie convient à un maximum de points. Si Ransac a un inconvénient, c'est justement que les points sont choisis aléatoirement, ce qui rend difficile l'évaluation du temps d'exécution. Aussi, et un peu à la manière d'une décomposition, où les images sont découpées en zones pour estimer une homographie par zone et ne rassembler deux zones que si leurs homographies sont proches dans le but de détecter les plans de l'image, on pourrait, une fois les points d'intérêt détectés, les regrouper selon leur proximité, pourquoi pas en effectuant une classification hiérarchique. Ensuite il faudrait calculer une homographie planaire pour chaque groupe et rassembler deux groupes si leurs homographies sont proches. Cette idée repose sur la constatation que les points détectés dans une image ont plus de chance d'être coplanaires s'ils sont proches, un objet planaire pouvant, par exemple, avoir une surface de 5000 pixels seulement. Un autre cas envisageable est qu'on ait une structure plane dans l'image dont une partie est masquée de telle sorte qu'il n'y ait aucun lien visuel entre deux parties de cette structure plane. Cette approche permettrait de lier deux groupes de points aux antipodes d'une image tout en éliminant les outliers (externes).

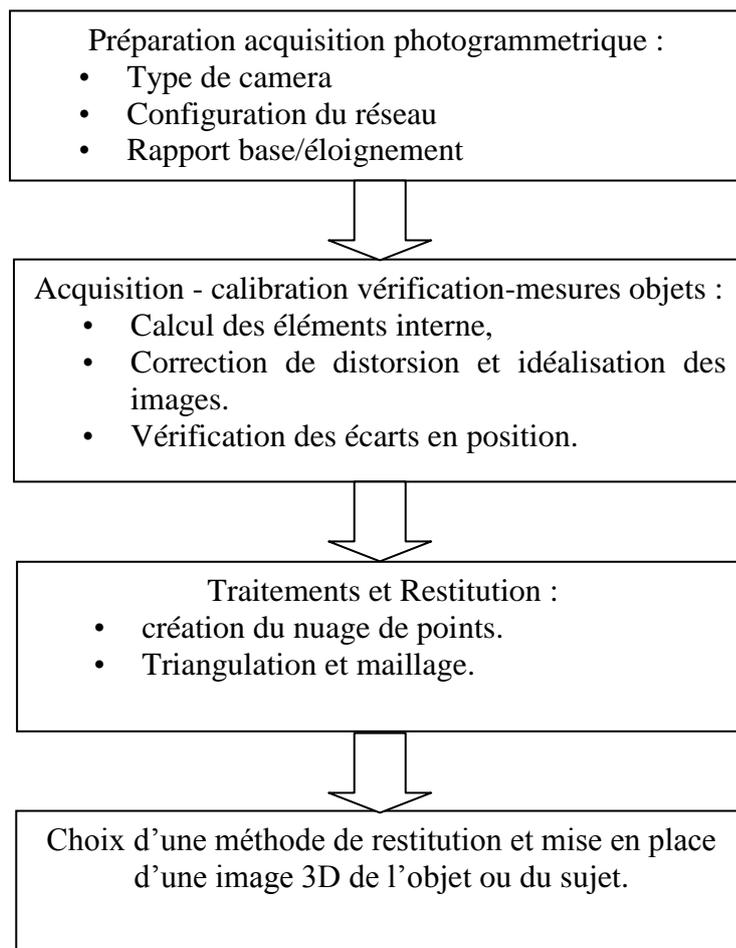


Figure 2.24: Phases du traitement global

2.7 Qualité des traitements photogrammétriques

Il est nécessaire de garantir la qualité des techniques photogrammétrique mises en œuvre en métrologie ainsi que des données et des produits qui en découlent. Le programme qualité doit également permettre d'en déduire des exigences à satisfaire par des projets de tous types, ceux de la mensuration officielle en particulier. Dans ce dernier cadre, la saisie des données et leurs traitements permettant de définir une métrologie des objets semblent particulièrement concernées. Les normes adéquates sont utilisées à cet effet. Afin de contrôler efficacement son propre travail la possibilité d'élaborer une liste de vérification contenant les mesures de la qualité les plus actuelles.

Le contrôle qualité peut se formaliser de manière adéquate par rapport à l'objectif poursuivi dans un projet. Si le produit est défini avec la plus grande exactitude possible et que les exigences sont définies clairement en matière de précision et de fiabilité, il sera plus facile pour le contrôleur de respecter ces exigences. Par conséquent, la structure d'un guide qualité reflète la succession des opérations du processus photogrammétrique dont :

- la définition des exigences du projet,
- le balisage des points remarquables,
- la digitalisation et la pixellisation,
- la méthode de triangulation ou de maillage,
- la génération de surface et MNS (Modèle Numérique de Surface),

- la génération d'images redressées et ortho image pour l'objet plan.
- les restitutions et reconstitution de l'objet dans l'espace 3D de référence.

2.7.1 Contexte objectif

Les principes directeurs sont guidés par des choix de méthodes et de données dont la traçabilité est certifiée. Un libre choix de méthodes concernera les restrictions devant se limiter à décrire les données et les produits concernés par le projet. Les principes de gestion de la qualité imposent que l'accent soit clairement mis sur les contrôles effectués par les soins de l'adjudicataire ainsi que sur les preuves qu'il doit apporter du respect effectif de la précision et de la fiabilité requise. Une conception modulaire doit s'effectuer au fil de l'avancement des travaux, de façon que les parties concernées puissent être jointes à des dossiers d'approbation ou à des vérifications intermédiaires.

Ces dix dernières années quelques directives sur la métrologie optiques sans contact ont été élaborée afin d'assurer un maximum de précision. Une de ces directives connues sous l'appellation VDI/VDE suivie d'un code démontre la fiabilité de la technique optique à assurer une certaine qualité. En effet, les appareils photographiques sont soumis à des efforts tout en fonctionnant dans les environnements à température variable et sous d'autres contraintes qu'on ne peut pas connaître (éclairage, netteté, mouvement de camera,...). Concrètement, on ne peut assumer que les orientations intérieures demeurent stables pour l'ensemble de l'opération de saisie. L'analyse du volume restitué permet de connaître la qualité du processus utilisé.

En industrie, le système photogrammétrique est également de plus en plus employé comme référence pour d'autres outils de mesure comme par exemple la projection de frange. Cependant, ces outils ont amélioré le temps d'exploration, les résultats de la photogrammétrie avec l'ajustement de bloc et le contrôle des différentes orientations des appareils photographiques. Ces derniers ne peuvent être prévus pour être le plus longtemps suffisamment précis. Il devient nécessaire d'utiliser des appareils photographiques stable avec des données métriques suffisamment précises.

La norme VDI/VDE 2634 [site] relative à l'exactitude des systèmes 3D de mesure optiques basés sur le balayage de l'espace objet permet d'évaluer l'exactitude du système de mesure. A titre d'exemple, la précision des systèmes du balayage à laser 3D se compose de combinaison des erreurs dans des mesures de distance et d'angle, et dans l'algorithme pour adapter les sphères/cibles dans le nuage de point. L'influence de ces erreurs ne peut pas être déterminée séparément. On rappelle que dans cette recherche, il s'agit de montrer l'impact des modèles photogrammétriques en métrologie industrielle (2D-3D). On insistera donc principalement sur :

- Les problèmes d'acquisition
- Les différentes orientations
- La restitution des objets

La traçabilité des différentes étapes de traitements seront discutées dans le troisième et le quatrième chapitre. Les configurations critiques sont analysées pour la mise en place d'un système de mesure photogramétrique (SMP) dédié à l'industrie.

2.7.2 Qualité des nouveaux points 3D

Les nouveaux points 3D sont matérialisés par un nuage de points. Ces points sont distribués de manière plus ou moins régulière sur la zone d'intérêt. Ce nuage contient plus d'informations qu'un modèle numérique de surface 2,5D tel que le procurerait par exemple un traitement photogrammétrique à partir d'images éloignées. En effet, dans un modèle numérique de surface, on associe une altitude (élévation) à un point ou à un pixel.

Concernant la précision du nuage de points, il faut distinguer la précision planimétrique qui concerne les coordonnées horizontales des points (X et Y), et la précision altimétrique qui concerne la coordonnée Z. Selon (Reshetyuk, 2006] ; [Alshawa *et al.* 2007) il y a trois sources d'erreurs dans le Calcul des coordonnées :

1- Les erreurs systématiques instrumentales : ces erreurs sont différentes d'un système de balayage à l'autre, selon la conception du dispositif et d'éventuelles imperfections de fabrication.

2- Les erreurs liées à l'objet étudié : ces erreurs sont liées aux caractéristiques de la surface Balayée optiquement. Plusieurs facteurs peuvent être cités ici comme les caractéristiques physiques (rugosité, couleur, température, pente) et les caractéristiques chimiques (par exemple l'humidité).

3- Les erreurs environnementales : elles affectent la propagation du rayon lumineux dans le milieu considéré. On cite, par exemple la température, la pression, les particules microscopiques, l'eau. D'un autre côté les erreurs de localisation des différents thèmes et phases sont à considérer dans le processus qualité.

Dans ce travail on utilise la démarche analytique suivante pour étudier la qualité de la restitution. L'organigramme de la figure (2.25) présente cette démarche.

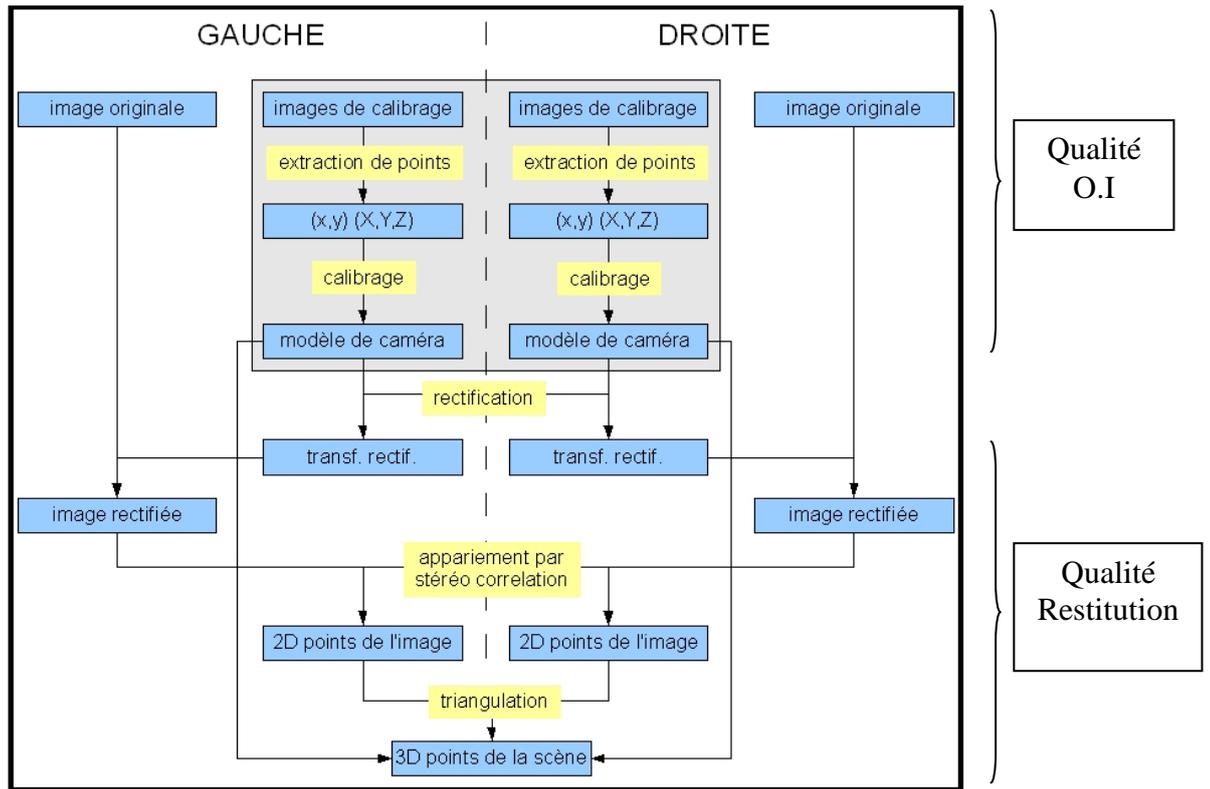


Figure 2.25– Reconstruction des points de la scène 3D et phases qualités

L'utilisation d'une approche stéréoscopique permet la mise en place de la géométrie épipolaire pour limiter la zone de recherche lors de l'analyse des correspondances. Cette approche est utilisée lors de la phase TOD défini précédemment. le contrôle qualité est élaboré selon le principe de restitution de la figure (2.25).

2.8 Conclusion

Dans cette étude, la modélisation photogrammétrique est un formalisme à plusieurs fonctions dont l'acquisition des données géométriques et celles concernant les traitements.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les aspects géométriques et analytiques utiles dans la conception d'un système de mesure photogrammétrique. Nous avons insisté sur l'orientation et la restitution des objets selon le processus photogrammétrique. Les modèles géométriques de représentation sont très diversifiés et sont définis sur la base de l'unité fondamentale (faisceau, modèle ou bande). Sachant qu'on se place au niveau de l'étape ZOD (Zéro Order Design), notre choix a porté sur l'unité faisceau (cliché). Un tel choix se justifie par le fait qu'on recherche une modélisation multifaisceaux et qu'on ne recherche pas de conditions de placement au préalable.

L'analyse photogrammétrique en métrologie est souvent caractérisée par un fichier d'information relatif à l'image et à l'objet. L'expert analyste peut employer la photogrammétrie pour faire des enquêtes d'emplacement ou des mesures d'objet avec un appareil photo connu et étalonné. Il existe un certain nombre de techniques mathématiques utilisées en analyse photogrammétrique pour l'industrie. Quelques méthodes utilisées généralement sont la transformation linéaire directe (DLT), la transformation à 8 paramètres, l'ajustement par bandes, et d'autres méthodes basées sur la condition de coplanarité. Les systèmes photogrammétriques modernes permettent d'accéder à plusieurs de ces techniques dans un environnement flexible et facile à utiliser. Les interfaces utilisateur graphiques modernes et les réalisations flexibles d'algorithmes permettent l'application des techniques photogrammétriques par des utilisateurs qui ne maîtrisent pas la photogrammétrie.

Il y a un certain nombre de systèmes éducatifs et commerciaux qui ont été employés pour l'analyse photogrammétrique. Des dispositions spécifiques adaptées à l'expertise sont mise en application pour produire des données en trois dimensions. Chaque thématique est alors analysée selon ses propres besoins. Les méthodes actuelles se basent sur les techniques de densification permettant de générer un nuage de points représentant l'objet pour être reconstruit ou reproduit de façon inverse. Dans un environnement industriel, les facteurs impliquant un processus de modélisation sont nombreux. L'appariement des images, l'estimation de la transformation et l'extraction des paramètres de la caméra sont autant de paramètres à prendre en compte pour la métrologie. Le chapitre présent a aussi eu la tâche de rassembler les bases théoriques nécessaires à la compréhension du problème ainsi que les travaux récents les plus proches du cas d'étude présent.

La section suivante discute de la formulation mathématique et la pratique de quelques méthodes (dont la méthode DLT) pour les besoins d'un système de mesure photogrammétrique SMP. Le traitement photogrammétrique est détaillé sur différentes caméras pour mettre en évidence sa flexibilité et sa maniabilité. En se basant sur l'unité faisceau, nous détaillons chaque étape (ZOD vers TOD) pour aboutir à un système de mesure actualisé prenant à la fois les modèles mathématiques et la technologie associée. La robustesse d'un système photogrammétrique repose sur sa capacité de produire des données 3D fiables par rapport à la référence. Les problèmes d'acquisition, de calibration et de traitements pour la reconstitution seront abordés dans les chapitres suivants.

Chapitre 3 : Traitements Photogrammétriques

3.1. Introduction

L'espace se caractérise en premier lieu par le fait qu'il incorpore une infinité de points. Bien évidemment, toute description pratique se limite à une représentation plus succincte, soit avec un nombre limité de points et de paramètres ponctuels, soit par des zones et des paramètres distribués. Dans le domaine de la photogrammétrie par exemple, il est courant d'utiliser des lieux privilégiés qui servent de référence pour le reste de l'espace. D'un autre côté, certains objets peuvent être modélisés par des paramètres simples (sphere). Ceci n'est pas toujours possible lorsqu'on a affaire à des objets géométriques solides de formes variées (ex : pièce mécanique).

En ce qui concerne les connaissances, rappelons qu'elles s'expriment généralement sous forme littérale qui donne généralement naissance à des règles et faits manipulées par des systèmes experts. Cependant, pour les connaissances spatiales, on dispose souvent d'éléments numériques en grand nombre, qui sont généralement difficile à synthétiser sous forme littérale. Par exemple, pour expertiser un objet encombrant, on possède sa description, sa géométrie globale et les points caractéristiques; il est difficile d'intégrer toutes les données afin d'aboutir à une description littérale des différents éléments à reconstruire. Ainsi pour modéliser les connaissances spatiales, il est nécessaire de répertorier leurs caractéristiques importantes, c'est-à-dire d'en extraire la sémantique.

L'évolution actuelle des moyens de calcul informatique est telle que l'emploi de la photogrammétrie numérique est devenue très abordable, par le biais de nombreux logiciels de traitement fonctionnant sur PC et plateformes classiques. Dans ce chapitre nous abordons une approche basée sur le modèle des faisceaux à 14 paramètres et à 16 paramètres pour établir une modélisation et extraire les caractéristiques des espaces et des objets en 2D et 3D. D'un autre côté on généralise le traitement sur des objets de tailles différentes pour observer l'impact de la modélisation photogrammetrique et son exactitude en métrologie industrielle.

Sachant que les objets contiennent des détails importants et nombreux pour être considérer dans des études ultérieures, la restitution photogrammétrique est une solution très rentable pour résoudre ce problème. Partant d'un couple de clichés non étalonnés, on oriente celui-ci afin d'avoir une restitution en trois dimensions, défini dans le système référence de l'objet. Les étapes de cette transformation sont :

- Acquisition des données images.
- Calcul des paramètres de passage entre l'image et l'objet.
- Contrôle et calcul 3D.

L'extraction et la manipulation de l'information 3D est un sujet d'actualité permettant de renforcer les méthodes de mesure en métrologie. Passer en revue un thème aussi largement traité dans la vision par ordinateur ou en photogrammétrie est pratiquement impossible. Aussi, nous allons ici simplement rappeler, et discuter, les principales façons d'opérer en métrologie dimensionnelle par photogrammétrie pour mieux situer notre contribution. Il existe plusieurs travaux permettant de montrer l'impact photogrammétrique en industrie. Au tout début du 20ème siècle, les usines d'automobile ont mis en place des systèmes de mesure en photogrammétrie rapprochée pour le contrôle dimensionnel et adapter l'unité photographique aux besoins métrologiques. Actuellement, il est courant de trouver dans le commerce des supports de systèmes photogrammétriques dédiés à l'industrie. Cependant, on peut remarquer que tous ces systèmes sont des boîtes noires reliant l'espace image à l'objet sans aucune information sur le concept métrologique [Kasser Kalantari, 2008]. Dans la vision d'ordinateur, l'étalonnage d'appareil-photo basé sur des méthodes de géométrie projective est employé couramment. La projection de matrice des inconnus contient généralement 6 paramètres à déterminer pour les modèles d'appareil photographique [Mugnier, 2004]. Une solution linéaire qui existe de façon identique au principe de la condition de colinéarité. Des travaux

récents démontrent l'impact de la photogrammétrie en métrologie, les objets statiques ou dynamiques sont analysés avec une bonne précision [Goktepe, 2010], [Baysal, 2010].

L'analyse des situations où l'objet est rapproché par rapport à la camera en considérant des positions normales pseudo horizontale est considéré dans cette étude. La modélisation d'un processus de traitement en géométrie projective telle la méthode DLT permet d'appréhender l'espace et de suivre les étapes d'un calcul 3D en identifiant les paramètres de la transformation notamment les distorsions. Deux types de camera sont utilisés l'une argentique et l'autre numérique, permettant de juger l'opportunité du processus pour des situations de matériel bas de gamme. Afin d'éviter les erreurs introduites dans les mesures d'une mire d'étalonnage, on intègre selon un formalisme photogrammétrique une métrologie des objets 3D tenant compte implicitement des aberrations géométriques des objectifs [Haeri, 2008]. Le positionnement des photographies respecte les conditions normales de prise de vues pour assurer des clichés stéréoscopiques.

En premier lieu, des questions reviennent à chaque fois qu'on utilise l'image numérique, le procédé photogrammétrique donne-t-il une bonne exactitude, le processus de traitement est-il simple d'implantation. En effet, il existe plusieurs approches permettant de restituer des objets 3D mais très peu permettent une détermination métrologique précise, d'autres part le problème du rendu est toujours étudié [kalantari, 2008]. L'approche proposée s'appuie sur la construction progressive d'une description structurelle globale d'un processus de calcul. Ceci implique une analyse locale de la profondeur de champ estimée, dont la valeur est dépendante des paramètres de la caméra. Pour définir les paramètres, le traitement utilise pour cette étude un minimum de huit points.

Les résultats photogrammétriques sur la chaîne d'un processus complexe incluent des déviations restantes dues aux effets insuffisamment connus. Les appareils photographiques à haute résolution numériques de nos jours utilisés par des opérateurs ne restent pas stables au cours d'une période acceptable relative à l'acquisition d'image. Par conséquent, la mise en place d'un contrôle avant toute opération métrologique est nécessaire pour obtenir une orientation interne d'image qu'on ajoute au modèle fonctionnel pour correction. Afin de compenser des influences à base de détecteur et des effets optiques résiduels non considérés dans la déformation radiale symétrique d'objectif, des grilles de correction par éléments finis peuvent être choisis. Ceci permettra de définir des modèles de correction pour des chambres photographiques instables. Si des objectifs d'étalonnage et de vérification sont assignés, la directive allemande VDI/VDE 2634 part1, recommande une configuration spéciale et donne un appui particulier à cette étape [Hastedt, 2006]. Rautenberg et Wiggenhagen [Rautenberg, 2002] ont discuté la vérification de différents systèmes de mesure optiques basés sur cette directive. L'analyse faite par DH Rick-Zapp, W Tecklenburg, J Peipe, H Hastedt, T Luhman [RiekkZapp, 2008] pour le contrôle et la vérification de système photogrammétriques a démontré des déviations dépendantes de distances en deçà des limites de l'erreur de mesure en longueur. Dans le cas des techniques industrielles de mesure, le matériel rétro réfléchissant est employé pour la signalisation combinée avec l'utilisation du flash.

L'utilisation de caméras métriques (dont les paramètres optiques sont connus avec précision) très chères, étaient alors indispensables mais peu adaptées aux expérimentations en milieu industriel. Dans cet article est développée une étude de la précision des déterminations par rapport à un référentiel donné de l'espace objet basée sur la maîtrise des paramètres de distorsion. En métrologie, le système d'acquisition, l'objet à analyser et le processus de traitement sont très corrélés. En effet, une recherche d'indicateurs relatifs au processus sont analysés et mis en évidence pour une meilleure planification de l'acquisition. Les résultats de cette modélisation permettent de contrôler les paramètres en fonction de la distribution des points cibles et de définir la meilleure position de la chambre photographique par rapport à la scène et à l'objet. Dans cette

optique, le calcul des paramètres internes et externes pour chaque faisceau et l'interpolation des paramètres de distorsion permet de connaître les points objets.

Dans ce chapitre, nous insistons sur le principe de la méthode DLT pour son intérêt de passer du système image vers le système objet. L'objectif de cette démarche étant la recherche d'un modèle rentable pour des besoins réguliers de mesure. Nous présentons la méthode DLT dans sa globalité afin d'établir une restitution en mode monoscopique. Le programme présenté permet le traitement par couple de faisceau et une restitution des objets basée sur le point. Quelques résultats sont exposés pour montrer l'intérêt et les limites d'une telle approche.

3.2- Le Processus de la Méthode DLT : Etape ZOD

Dans le chapitre 2 il est montré que l'étape ZOD est liée au choix dans le nombre de points objets qui constituent les données d'entrée. Ceci sera utile dans la détermination des paramètres du système de cameras lors du processus d'optimisation. Dans ce travail, l'étape ZOD est représentée par la méthode DLT pour sa capacité à relier espace-objet et espace-image en tenant compte des facteurs de distorsions.

Dans ce chapitre, nous traitons le cas particulier des surfaces pseudo planes, bien que ces développements puissent se généraliser à d'autres cas comme les carrosseries de voitures, les ailes d'avions, etc. Un élément de surface est un polygone, avec l'ensemble de ses points non nécessairement coplanaires. Un objet peut se définir comme une fonction en z des coordonnées x et y , $z = f(x, y)$. Cette fonction n'est jamais connue en tout point seuls des échantillons de points sont disponibles et des règles permettent de reconstituer l'ensemble par interpolation.

3.2.1 Méthodes et algorithmes

Il est proposé d'étudier quatre applications très différentes avec un traitement identique à l'aide de la méthode DLT [Abdelaziz et Karara, 1980]. Le modèle utilisé est celui à quatorze paramètres ce qui permettra de se prononcer sur sa qualité dans la restitution des coordonnées objet. Dans ce processus, les résultats obtenus renseignent sur la pertinence de ce modèle DLT.

▪ Principe de la DLT

Les coordonnées image et objet des cibles sont reliées par la condition de colinéarité où le vecteur image est aligné au point objet à l'aide d'un vecteur issu du centre perspectif:

$$\begin{pmatrix} x_n - x_p + dx \\ y_n - y_p + dy \\ -c \end{pmatrix} = \lambda M \begin{pmatrix} X_n - X_c \\ Y_n - Y_c \\ Z_n - Z_c \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

où M est la matrice de rotation, λ est un facteur d'échelle, $p_n = (x_n, y_n)^T$ et $P_n = (X_n, Y_n, Z_n)^T$ sont respectivement les coordonnées image et objet de la $n^{\text{ième}}$ cible. Une manipulation algébrique du système d'équations (3.1) conduit aux bien connues équations de colinéarité (3.2), reliant la position de la $n^{\text{ième}}$ cible dans l'espace objet au point correspondant dans le plan image. Les termes dx et dy représentent les distorsions de lentille et les déformations du cliché.

$$\left. \begin{aligned} x_n - x_p + dx &= -c \frac{m_{11}(X_n - X_c) + m_{12}(Y_n - Y_c) + m_{13}(Z_n - Z_c)}{m_{31}(X_n - X_c) + m_{32}(Y_n - Y_c) + m_{33}(Z_n - Z_c)} \\ y_n - y_p + dy &= -c \frac{m_{21}(X_n - X_c) + m_{22}(Y_n - Y_c) + m_{23}(Z_n - Z_c)}{m_{31}(X_n - X_c) + m_{32}(Y_n - Y_c) + m_{33}(Z_n - Z_c)} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

où m_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) sont les éléments de la matrice de rotation M et sont fonction des angles d'orientation d'Euler (ω, ϕ, κ). L'ensemble des paramètres ($\omega, \phi, \kappa, X_c, Y_c, Z_c$) et (c, x_p, y_p) sont respectivement les paramètres d'orientation externes et internes de la caméra. Ces paramètres sont à déterminer par étalonnage. Les termes de distorsions peuvent être modélisés par la somme des distorsions radiales et tangentielles [Faig, 1976], [Hottier, 1976].

$$d_x = d_{xr} + d_{xt} \quad \text{et} \quad d_y = d_{yr} + d_{yt} \quad (3.3)$$

En supposant que l'axe optique des lentilles est perpendiculaire au plan de l'image, les distorsions dx et dy s'expriment par [Hottier, 1976], [Faig, 1974] :

$$\begin{aligned} dx &= \alpha(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + P_1(r^2 + 2\alpha^2) + P_2\beta \\ dy &= \beta(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + P_1\alpha + P_2(r^2 + 2\beta^2) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Avec: $\alpha = x - x_p$

$$\beta = y - y_p$$

$$r^2 = \alpha^2 + \beta^2$$

Les techniques analytiques d'étalonnage de la caméra utilisent les équations de colinéarité (3.2) et les termes de distorsion, équations (3.4), pour déterminer les paramètres internes et externes de la caméra [Hottier, 1976]. Le nombre de paramètres K_i pris en considération dans les équations (3.4) dépend du degré de sophistication désiré de la solution. En général les paramètres K_1, K_2 suffisent selon la référence [Faig, 1974]. Cependant, seul des tests permettent de se prononcer sur le nombre des paramètres à adopter. Les équations de la DLT, équations (3.5), peuvent être obtenues par simple réarrangement et combinaison des termes des équations de colinéarité (3.2) :

$$\left. \begin{aligned} L_1 X_n + L_2 Y_n + L_3 Z_n + L_4 - (x_n + dx)(L_9 X_n + L_{10} Y_n + L_{11} Z_n + 1) &= 0 \\ L_5 X_n + L_6 Y_n + L_7 Z_n + L_8 - (y_n + dy)(L_9 X_n + L_{10} Y_n + L_{11} Z_n + 1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Les paramètres L_i à L_{11} sont relatifs aux paramètres d'orientation internes et externes de la caméra [K. Kraus, P. Waldhausl 1998]. Contrairement aux équations standard de colinéarité, équations (3.2), les équations de la DLT, équations (3.5), sont linéaires par rapport aux paramètres L_i ($i=1, 11$) quand les termes des distorsions dx et dy sont négligés. Ainsi, la forme matricielle des équations de la DLT pour N points cibles est $BxL=C$; où $L = (L_1, \dots, L_{11})^T$; $C = (x_1, y_1, \dots, x_N, y_N)^T$ et B est une matrice $(2N \times 11)$ qui peut être directement obtenue à partir des équations (3.5). Une solution au sens des moindres carrés pour obtenir L sans exigence d'une estimation initiale, est donnée par $L = (B^T B)^{-1} B^T C$. Lorsque dx et dy ne peuvent plus être négligées (tenir compte des équations (3.4) dans le système (3.5), alors les méthodes itératives sont exigées et la méthode DLT perd quelque peu de sa simplicité. En général la méthode DLT

peut être utilisée pour obtenir de bons résultats concernant les paramètres d'orientation externes ($\omega, \phi, \kappa, X_c, Y_c, Z_c$) et la distance principale (c) bien qu'elle fournit des résultats souvent insuffisants sur les coordonnées du point principal (x_p, y_p). Cependant, la méthode DLT est très utile puisque les approximations initiales peuvent être assez facilement trouvées.

Dans ce travail, quatre applications sont envisagées dont deux en photogrammétrie aérienne et les deux autres en photogrammétrie rapprochée terrestre. Le traitement par la méthode DLT s'effectue dans les quatre cas. Afin de tester la pertinence du modèle DLT à quatorze paramètres, seul le paramètre K_1 est sélectionné a priori dans les équations (3.4). Si on suppose que les paramètres qui représentent la distorsion de l'objectif varient linéairement, on pourra procéder à une interpolation linéaire pour estimer les facteurs de distorsion relatifs aux cibles et aux points inconnus.

▪ **Modélisation et résolution du système DLT**

Les observations dans l'espace image des coordonnées clichés sont entachées d'erreurs de pointé puisque les mesures sont faites séparément (pointé non stéréoscopique). Devant cet état de fait, il est nécessaire de vérifier les observations en tenant compte des équations aux parallaxes (3.6).

$$PL_i = x_i' - x_i'' \tag{3.6}$$

où x_i', x_i'' ; $i = (1 \div n)$ représentent les coordonnées de la parallaxe longitudinale du point (i). La différence de parallaxe ΔPL_i entre la référence (0) et le point (i) est exprimée par l'équation (3.7).

$$\Delta PL_i = PL_i - PL_0 = B.c. \left(\frac{1}{H_i} - \frac{1}{H_0} \right) = \frac{B.c.\Delta H_i}{H_i.H_0} \tag{3.7}$$

Où :

- H_i, H_0 : Eloignement du point (i) et de la référence (0).
- PL_0 : Parallaxe linéaire longitudinale du point de référence (0).
- $\Delta H_i = H_i - H_0$: Différence d'éloignement entre le point (i) et le point de référence (0)

Un développement mathématique permet d'aboutir à : $\Delta H_i(B.c + H_0 \Delta PL_i) - H_0^2 \Delta PL_i = 0$, donc une fonction implicite du type $F(\Delta H_i, \Delta PL_i) = 0$. Sa dérivée première par rapport à ΔH_i et ΔPL_i permet d'écrire :

$$\begin{aligned} A_i &= (B.c + H_0 \Delta PL_i) ; \varepsilon_z = d(\Delta H_i) \\ B_i &= (H_0 \Delta H_i - H_0^2) ; \varepsilon_p = d(\Delta PL_i) \end{aligned}$$

Ainsi, la relation d'observation (3.7) peut alors s'écrire sous la forme matricielle $C.X=0$, avec $C = \{A_i, B_i, i = 1 \div n\}$ et $X = \{\varepsilon_z, \varepsilon_p\}$.

Donc $X = (C^T C)^{-1}$ représente le biais des mesures en éloignement et en parallaxes. Si on suppose que les paramètres qui représentent la distorsion de l'objectif varient linéairement, on pourra procéder à une interpolation linéaire pour estimer les paramètres de distorsion relatifs aux points de contrôle et aux points nouveaux. Ainsi, par rapport au centre du cliché, pour chaque accroissement de rayon $\Delta r_i = (r_{i+1} - r_i)$ correspond un accroissement $\Delta k_1(i) = k_1(i+1) - k_1(i)$; ceci entraîne :

$$\Delta k_1 = \frac{(r_{i+1} - r_i)(k_{1(i+1)} - k_{1(i)})}{(r_{i+1} - r_i)}$$

Il en est de même pour ΔP_1 et ΔP_2 d'où les expressions des paramètres k_1 , P_1 et P_2 , définis dans l'équation (3.4) :

$$k_1 = k_1(i) + \Delta k_1 ; p_1 = p_1(j) + \Delta p_1 ; p_2 = p_2(j) + \Delta p_2 \quad (3.8)$$

▪ **Organigramme**

La figure 3.1 présente un algorithme de traitement basé sur les étapes suivantes :

- ⇒ Acquérir la perspective i et i+1
- ⇒ Traitements préliminaires (x,y), (x',y'), biais.
- ⇒ Traitement DLT - calcul de distorsion - interpolation
- ⇒ Stockage des paramètres (14 ou 16),
- ⇒ Refaire les étapes précédentes,
- ⇒ Intégration d'autres mesures (distances, coordonnées, etc..),
- ⇒ Ajustement des paramètres (faisceaux),
- ⇒ contrôle dimensionnel.

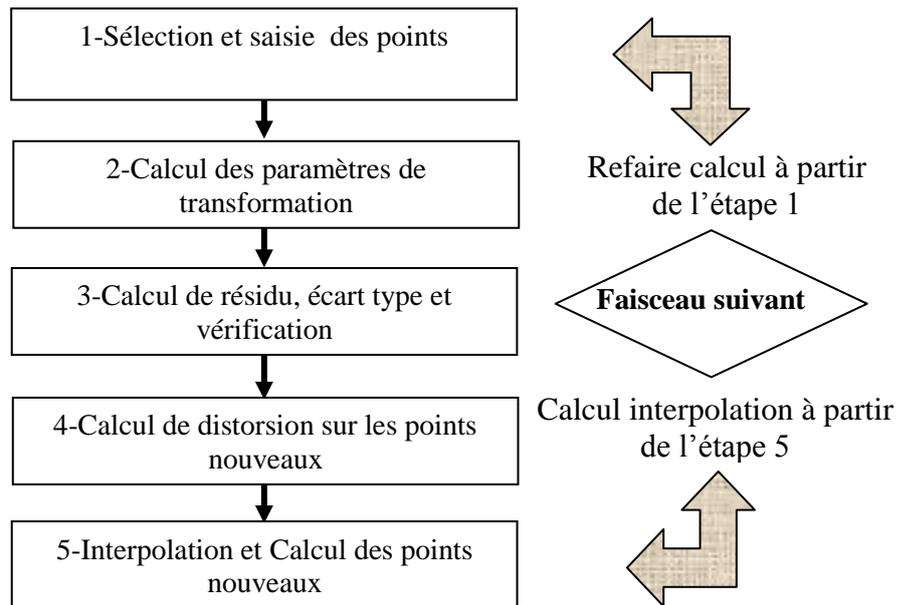


Figure 3.1 : Organigramme de traitement

3.2.3 Applications et résultats

Le choix du matériel est un composant important du processus photogrammétrique, en particulier concernant les algorithmes de mesure et de calcul. L'optimisation et les spécifications de la conception de réseau ont été discutées dans plusieurs travaux dont ceux par exemple de Fraser [fraser, 1984] et de Mason [Mason, 1995] qui décrivent l'impact d'un système expert en photogrammétrie rapprochée. Fraser a expliqué la dépendance à l'égard du problème de la donnée (conception d'Ordre Zéro) et la configuration comme problème de conception de premier ordre [Fraser, 2006]. Concernant l'optimisation des investigations précédentes et les approches appliquées dans la conception du réseau doivent être modifiées pour des méthodes utilisées récemment. Le nouveau équipement digital et ses avantages de flexibilité d'un système est souvent négligé en étalonnage. La traçabilité des données intermédiaires est dans la plus part

des cas négligée. La prise de décision pour des systèmes automatiques doit passer par des étapes de sélection et de filtrage [Reiterer, 2006]. Dans cette partie on expose les résultats d'une phase 'zéro' impliquant les paramètres de transformation et la localisation objet. Pour cela on définit les quatre applications avec différents éloignements.

La première application consiste à exploiter des clichés aériens obtenus à l'aide d'une caméra embarquée de marque Wild avec une distance principale de 88,67 mm [Wild, 1973]. La hauteur de prise de vue est de 1152 m avec un rapport base/éloignement 'B/H' de 1,04. Une vingtaine de points-cibles sont presignalisées. Les couples de clichés utilisés (n°2829 et n°2830) sont à axes de prise de vue normaux.

La seconde application consiste à établir les relevés géométriques de la carrosserie d'un véhicule accidenté en vue de son expertise. La description détaillée de cette expérience et des résultats obtenus est présentée dans la référence [Zeroual et al, 2002]. Le rapport base-éloignement dans cette application vaut 0,16. La troisième application a pour objectif la détermination de la surface frontale d'une fraiseuse et a permis de quantifier des déplacements selon les trois axes de la machine. Le relevé des cibles est élaboré par topométrie locale.

Dans la dernière application des cibles presignalisées de forme carré sont utilisées à une échelle de prise de vues au 1/5500 avec une camera grande angulaire (150 mm et 88 degrés). Ce cas permettra de confirmer la phase ZOD en utilisant l'approche DLT.

3.2.4 Résultats du traitement ZOD

Dans cette phase, il s'agit de déterminer le plus précisément possible les valeurs d'orientation de chaque cliché (les 14 paramètres du faisceau). Après positionnement des clichés sur l'écran, un certain nombre de points sont relevés dans chaque photographie qui représente les points d'appuis, de contrôle et les points nouveaux. Les déformations du cliché par rapport au cas théorique sont représentées par les paramètres de distorsions, et donc les corrections à appliquer aux mesures effectuées sur ce cliché. Les points homologues sont relevés sur chaque cliché et calculés par intersection spatiale. Les résultats du test de contrôle des applications sont illustrés sur l'annexe A1, A2 et A3. Les tableaux de l'annexe A1 représentent les observations des quatre applications. L'annexe A2 montre les résultats des traitements DLT selon l'étape ZOD, la validation est faite sur des points de contrôles. On constate alors la faisabilité du processus DLT pour construire une configuration initiale du réseau de camera. Dans l'annexe A3, un ensemble de résultat sont exprimés sur la fonction écart par rapport aux données réelles des points de contrôle. On constate principalement que les distorsions ne sont pas symétriques et de révolution au sens théorique du terme. La bonne distribution des points implique un calcul de la fonction écart plus exacte. Ces données nous indiquent une meilleure qualité sur le type de caméra utilisée. La vérification des critères établis dans la référence [Bopp et Kraus, 1980] concernant les combinaisons relatives aux paramètres d'orientation, permet d'illustrer la position de la solution finale relative à la restitution. Le tableau (3.1) regroupe les principaux résultats pour les quatre types de caméra.

Test	Chambre Wild	Minolta	Toshiba	Minervo
Points d'appuis	32cm	18.91 mm	20 mm	50cm
Points de contrôle	32 cm	26 mm	28mm	50cm

Tableau 3.1 Résumé des résultats pour les quatre applications

3.2.5 Traitements 14-16 paramètres

Le paragraphe précédent (3.2.4) sont basés sur un traitement global qui utilise la transformation à 14 paramètres pour établir une restitution ou un calcul à trois dimensions. Dans cette partie nous envisageons de tester le cas du plan rapproché avec des transformations à 16 paramètres et on utilise pour cela le logiciel Matlab. Cependant, pour obtenir un contrôle correct des intersections, on s'attachera à relever les points sur trois clichés au moins. L'algorithme du calcul multifaisceaux est indispensable pour des configurations complexes d'objets.

Sachant que tous les objets en jeu sont des matrices, y compris les scalaires (matrices 1×1) ainsi les opérations arithmétiques sont les mêmes pour les scalaires que pour les tableaux et les matrices (on additionner deux matrices par une seule instruction par exemple). La richesse de la bibliothèque des fonctions mathématiques décharge le programmeur de réécrire des codes pour implémenter les méthodes numériques de résolution (par exemple, les méthodes de factorisation de Cholevsky, de résolution par moindre carrées ou par gradients conjuguées sont disponibles). Cette partie propose un traitement DLT à 16 paramètres et ses conséquences pour le calcul multifaisceaux. En effet, en espérant un gain de précision nous montrons qu'un tel algorithme n'est pas vain. On trouvera en annexe A3 le jeu complet de données et les résultats des différents traitements. Les résultats sont regroupés par application et le traitement 14 et 16 paramètres sous forme de tableaux et graphique mettant en évidence les différences sur le calcul final

▪ La Méthode

La formulation mathématique à 16 paramètres s'écrit comme suit :

$$\frac{1}{R} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -xX & -xY & -xZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -yX & -yY & -yZ \\ \xi r_2 R & \xi r_4 R & \xi r_6 R & (r_2 + 2\xi_2)R & \xi \eta R \\ \eta r_2 R & \eta r_4 R & \eta r_6 R & \xi \eta R & (r_2 + 2\eta_2)R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{15} \\ L_{16} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Comme pour 14 paramètres, la configuration à 16 paramètres des points (X, Y ou Z = constante) reste indéterminée et le système ne trouve pas de solution. L'organigramme de la figure (3.2) tient compte de la configuration des points sur l'espace objet et leurs localisations sur l'image.

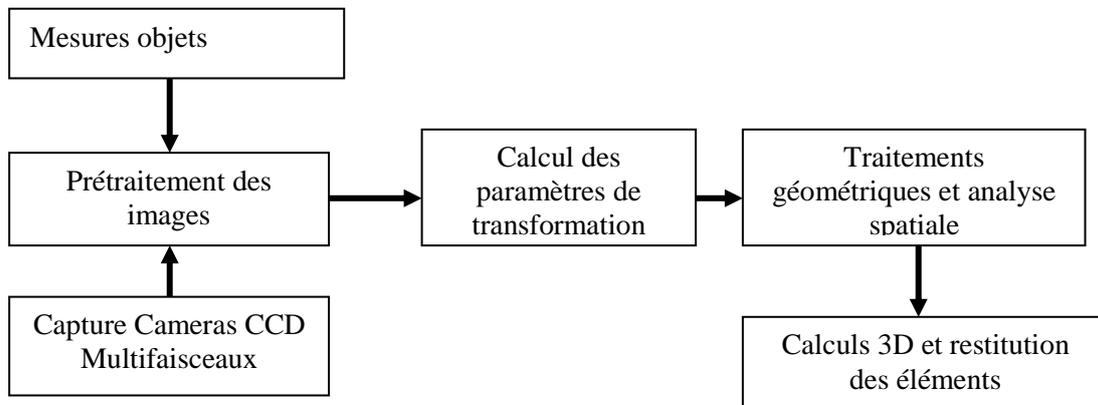


Figure 3.2 : Processus de traitement

▪ **Expérience**

Les travaux entamés sont de deux sortes, une étape pour la validation et une autre étape permettant de tester le processus sur des cameras quelconques. La validation utilise les données Wild correspondant à l'aérien et le fichier Mazda correspondant au rapproché pour comparaison et certification. La camera kodak EasyShare 7300 est testée dans un cas rapproché pour confirmer l'intérêt du processus photogrammétrique en général et celui de la méthode DLT en particulier. Les mesures clichés sont faites à l'aide de l'outil « Microsoft Photo Editor ».

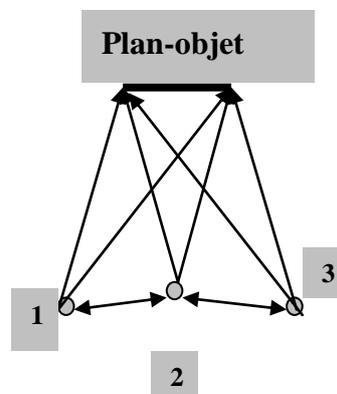
L'instrument d'acquisition_Kodak EasyShare CX7300 avec une résolution de 3,3 MégaPixels et une distance focale de 37 mm (équivalent à 35 mm) permet d'opérer librement la prise de vue par rapport à l'objet. La distance de mise au point varie de 0,8 m à l'infini (∞). La champ est composé par la camera à grand angle standard.



Figure 3.3: Appareil photo numérique ; Kodak EasyShare CX7300

Acquisition

La position latérale gauche 1-2 et la position convergente 1-3 sont considérées pour des calculs comparatifs. Le traitement global à trois faisceaux (1,2,3) est réalisé pour montrer son impact sur la qualité des mesures.



3.4: Schéma de prise de vues



Figure 3.4-1 Gauche (n°1)

Figure 3.4-2 Axe (n°2)

Figure 3.4-3 Droite (n°3)

▪ Traitements et résultats

Le processus de calcul à 16 paramètres est appliqué sur une surface plane. La configuration de ce calcul est basée sur la position de la camera photographique. En effet, il existe plusieurs types de position permettant la constitution du couple. Sur la surface plane de l'objet, il existe 27 cibles connues permettant le traitement par rapport aux points d'appuis et aux points de contrôle. Sur une configuration moyenne de neuf (9) points, on teste le processus pour avoir la meilleure précision possible.

Cette expérience a pour but de tester des objets plans rapprochés d'une part et d'extraire des informations pertinentes sur le positionnement de la caméra d'autre part. Ainsi, la prise de vues latérales, la convergence et l'analyse multifaisceaux sont des réponses à cette problématique.

Ce travail sous Matlab nous a permis de voir la simplicité avec laquelle il est possible de combiner un processus de traitement photogrammétrique. Dans certaines situations, les objets présentent une complexité pour des analyses spatiales et géométriques; cependant une restitution multifacettes reste tributaire du positionnement des prises de vues. Dans le chapitre suivant nous présentons un système photogrammétrique simplifié permettant des restitutions précises par calibration de caméras. Le premier résultat de cette démarche est orienté vers une comparaison entre les résultats 14 paramètres et 16 paramètres, tableau (3.2).

N° du point	14Paramètres / mm	16Paramètres / mm
PA(1)	2.68	2.68
PA(2)	3.06	3.06
PA(3)	1.87	1.79
PA(4)	2.15	2.14
PA(5)	3.83	3.83
PA(6)	6.0	6.00
PA(7)	3.81	3.82
PA(8)	3.97	3.95
PA(9)	1.68	1.60
Ecart spatial	3.23 mm	3.20 mm

Tableau 3.2 : Comparaison 14/16 paramètres

Notre objet étant un essai d'adaptation de la méthode numérique au problème posé, il convient d'abord de comparer les méthodes « normales » et spécifiques. La comparaison portera successivement sur la nature de la prise de vue et sur la précision obtenue pour chaque position. Le tableau (3.3) illustre cette comparaison et affiche l'écart spatial obtenu. On note que le positionnement affecte fortement l'exactitude de la mesure. Un nombre de points important et bien reparté ne peut corriger la perte de précision liée au positionnement { voir position (1) par rapport à (2) et (3) } de la figure (3.4).

Position	Nombre de points	Ecart spatial
(1) Latérale gauche	11	32.42 mm
(2) Convergentes	09	3.36 mm
(3) Trois faisceaux	09	2.86 mm

Tableau 3.3 : Resultats comparatifs sur le positionnement

Pour chaque cliché nous pouvons montrer la courbe des paramètres de distortion relatif à 16 paramètres. On observe une allure similaire pour le cliché (1) et (3) du fait de la symétrie par rapport à la normale. Des anomalies apparaissent sur le cliché (2) notamment pour les paramètres {L13 – L16 }.

Les annexes A2 et A3, expriment les écarts des différents traitements établis par la DLT. Si la différence obtenue n'a pas d'influence sur les résultats de la restitution, le contrôle métrologique est affecté d'un biais lié à l'orientation externe.

Dans le cas des images numériques aucune distinction n'est faite entre le point P de l'image idéale et le point mesurable P' . Le point idéal est supposé être identique au point mesurable mais observé dans un système de coordonnées oblique. On rappelle que la matrice de projection homogène contient 11 paramètres, à savoir les 5 paramètres de l'orientation interne et les 6 paramètres de l'orientation externe. La matrice de projection est homogène puisque son échelle peut être choisie arbitrairement. Sachant que la transformation linéaire directe (DLT) se rapporte directement aux coordonnées Euclidiennes des coordonnées de l'objet et des coordonnées mesurables du capteur des points image d'un instrument qui conserve les lignes droites ; on peut la généraliser dans les domaines d'application multi camera et multifaisceaux. La matrice de projection peut exclusivement être dérivée (à l'échelle) si l'orientation externe et les 5 paramètres de l'orientation interne sont donnés. La tâche inverse, dérivant les paramètres de l'orientation externe et interne à partir d'une matrice de projection donnée conduit à un résultat unique.

3.2.6. Analyse des résultats

L'analyse du modèle photogrammétrique est faite à la base de considérations économiques en se plaçant dans des conditions défavorables de mesures. Sachant que la photogrammétrie est actuellement utilisée dans plusieurs disciplines, il devient nécessaire de connaître les paramètres ayant déterminé la mesure et donc de connaître la traçabilité du processus. [Goktepe, 2010],[Ubaysal, 2010],[Zaharescu, 2010]. Le principe de compensation en métrologie et l'interpolation des valeurs de distorsion permet de gérer la qualité métrologique des processus. Dans la chaîne d'un processus métrologique optique, le développement d'un système qualité est une obligation pour assoir une meilleure adaptabilité. Le document établit est une restitution de tous les détails du sujet dont l'échelle est constante. La mise en place d'une librairie de calculs photogrammétriques basée sur des fonctions d'intersection spatiale prenant comme unité fondamentale le faisceau. Nous rappelons que l'objectif de ce travail n'est pas de produire un logiciel de photogrammétrie, mais de voir la possibilité pour la mise en place d'un système photogrammétrique peu onéreux dans le domaine de la métrologie. Les facteurs qui influencent la qualité des traitements effectués par la méthode DLT sont liés à plusieurs paramètres dont la résolution de l'image et le rapport base-éloignement. La référence [Kraus et Waldhausl, 1998] précise l'exactitude en photogrammétrie en fonction de l'échelle du cliché et du rapport base-éloignement. La qualité de la génération d'un modèle numérique de terrain dans la restitution d'un couple de clichés reste tributaire des observations clichés et du résultat des paramètres de distorsions [Henry JB et al, 2001]. La relation (3.9)

permet d'établir le lien entre le rapport base-éloignement (B/H), l'échelle (c/H) et l'acuité visuelle stéréoscopique. En effet, à partir de l'équation de la parallaxe (3.7) on obtient :

$$\Delta H = \frac{H}{B} \times \frac{H}{c} \times D \cdot \varepsilon \quad (3.10)$$

Où :

- ΔH : représente le plus petit relief perceptible.
- D : représente la distance d'observation ou d'examen stéréoscopique.
- ε : représente l'acuité visuelle de l'opérateur.
- εD : représente l'erreur des mesures image.
- (B/H) et (c/H) sont les paramètres de la prise de vues.

Le tableau (3.4) présente les résultats suivants :

- La tolérance ΔH obtenue comme étant le produit de l'équation [3.9] par un coefficient $k=2.57$ [Grussenmeyer P. et al, 1994].
- L'erreur altimétrique ΔH_t obtenue après le traitement DLT.
- L'écart spatial obtenu sur la base des écarts sur chaque point de contrôle.
- La précision relative obtenue comme étant le rapport de l'écart spatial par l'éloignement.

Sachant qu'un traitement mathématique identique a été effectué sur les quatre couples, il ressort en vertu du tableau (3.4) et compte tenu des tolérances calculées que le traitement par le modèle DLT à 14 paramètres a été suffisant pour les applications 1 et 2. Cependant, dans le cas de l'application 3, l'erreur induite ΔH_t dépasse la tolérance ΔH . Ceci parce que la caméra utilisée et les conditions d'acquisition n'étaient pas appropriées pour atteindre de bons résultats. En effet, une simple caméra de marque Toshiba avec une résolution 1,5 Megapixels était utilisée et la définition du système de référence n'était pas rigoureuse, c'est-à-dire que la mesure des distances dans l'espace objet n'était pas très précise (utilisation d'un décimètre).

	B/H	c/H	Tolérance ΔH	ΔH_t	Nbre de Pts de contrôle	Ecart spatial	Précision relative
Wild	1.04	1/13000	162 mm	52 mm	09	32 cm	$3 \cdot 10^{-4}$
Minolta	0.16	1/50	4 mm	1.9 mm	07	26 mm	$52 \cdot 10^{-4}$
Toshiba	1/3	1/21	8.50 mm	15 mm	09	28 mm	10^{-3}
Minervo	1/3	1/5500	100mm	30 mm	09	50 cm	$6 \cdot 10^{-4}$

Tableau 3.4 : Paramètres d'analyse

La précision relative obtenue en fonction de l'échelle et du rapport base / éloignement indique un taux de réponse assez bon pour les cas éloignés et un mauvais résultat pour les cas rapprochés. L'erreur relative de référence calculée sur la base du tableau nominal donné par [Waldhausl et al, 1998] permet de tracer une courbe figure (3.6) qui exprime l'écart des quatre applications (1 à 4) entre cette référence et le traitement obtenu. Le tableau (3.5) résume la comparaison sur les différentes caméras.

Applications	Wild (I)	Minolta (II)	Toshiba (III)	Minervo (IV)
Erreur relative référence	$0.8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$(1.6) \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
Erreur relative obtenue	$3 \cdot 10^{-4}$	$52 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-4}$

Tableau 3.5 : tableau comparatif des précisions relatives obtenues

Le graphe associé à ce tableau fait ressortir qu'en photogrammétrie rapprochée il est souhaitable d'avoir une bonne configuration de points. Appliquée à la mesure de la coque métallique en construction navale, la photogrammétrie fournit ainsi des résultats conformes aux exigences, en deçà de la précision à laquelle pourrait prétendre la restitution graphique. Peut-être est-ce l'intérêt des applications spéciales d'élargir ainsi le domaine d'intervention de la photogrammétrie, en favorisant le recours à des appareils ou à des procédés dont la restitution conventionnelle n'a pas un besoin urgent ou constant [Armand D., 2000]. Pour répondre à cette question une application pilote est faite sur le couple d'images 118-119 d'Oran (annexe A1) dans le paragraphe suivant.

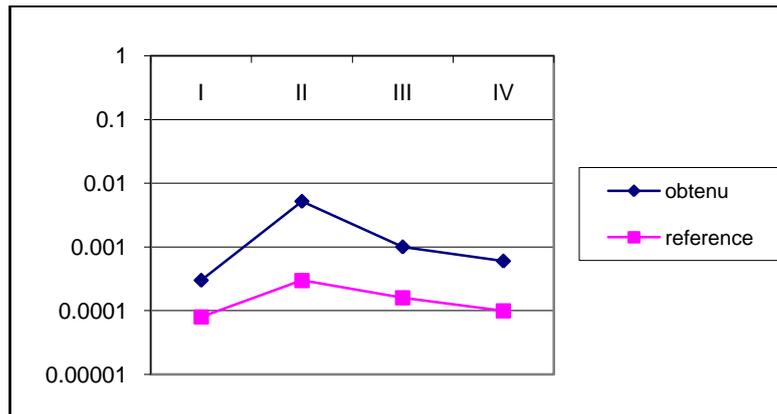


Figure 3.5: Ecart précision relative (jeu de données - référence)

Une étude critique de ce calcul permet de conclure :

- Que l'élément déterminant sur la précision planimétrique est l'identification photographique des détails rattachés; la difficulté à trouver, sur les abords de l'objet un élément naturel dont la définition géométrique soit précise. Ceci milite en faveur d'une présignalisation ou de cibles codées.
- Qu'au contraire la précision altimétrique est acceptable et difficile à améliorer;
- Que la précision globale obtenue est de l'ordre de 1 à 2/1.000, ce qui est discutable selon les besoins de métrologie par rapport à l'application.

3.2.7 Discussion et Commentaires

Le processus de restitution pour une configuration ZOD présente quelques anomalies de reconstruction 3D. En effet, à travers ces applications, nous pouvons constater une homogénéité du processus DLT dans le calcul des paramètres. Cependant, la qualité atteinte n'est pas très bonne vu l'influence des paramètres de la transformation au regard des observations objets et images [Faser, 1982]. On peut considérer un tel processus comme étant une étape ZOD (faible densité) pour être affinée par la suite en TOD (forte densité). Le programme établi permet un traitement par couple isolé et un traitement par couple selon la bande pour de grandes surfaces planes. En photogrammétrie, ce type de surface requiert certaines méthodes de traitement et de calcul 3D. Signalons enfin pour mémoire que la méthode numérique fournit un moyen de conservation des données sous forme d'éléments enregistrés et les procédés de reproduction introduisant des déformations d'autant plus sensibles que l'on cherche simultanément une

réduction sensible du document original. Certes, la méthode numérique précise exige des instruments onéreux (logiciels CAO-CFAO-SIG, ordinateur, table traçante) et ces investissements ne se justifient que par un emploi continu des appareils.

3-3 Photogrammetrie Multi-Images : étape TOD

3-3.1. Photogrammétrie rapprochée et système TOD

On rappelle que l'étape FOD (First Order Data) est en relation avec la position et l'orientation des cameras, Ceci détermine la précision du système. L'étape SOD (Second Order Data) consiste à réaliser des multiples prises de vue avec chaque caméra conformant le réseau; ceci est appliqué après avoir déterminé une configuration de base pour laquelle la géométrie d'image est optimale. On montre dans ce paragraphe la possibilité d'appliquer la dernière étape TOD (Third Order Data) en photogrammétrie à courte distance

La recherche sur ce thème en photogrammétrie rapprochée a été faite par Fraser, [Fraser, 1984, 1992, 1996] qui a discuté du problème de conception de réseau en photogrammétrie. Fritsch, [Fritsch et al, 1990], a exécutée une première conception d'ordre zero avec une méthode analytique. Mason, [Mason, 1994] a employé les systèmes experts et Olague, [Olague, 2002] a employé un algorithme génétique pour le placement des appareils photographiques matriciels en utilisant des simulations heuristiques sur ordinateur. Des considérations de précision et de fiabilité en photogrammétrie rapprochée, comme contraintes de qualité du réseau, ont été adressées par [Gruen, 1978, 1980] et [Torlegard, 1980]. Des conditions sur le placement d'appareil photographiques pour la détermination des paramètres additionnels de l'appareil en employant des points de contrôles ou de liaison ont été dressées par [Gruen et Beyer, 2001]. Amiri, [Amiri P. et Al, 2005], a montré l'influence de différents réseaux d'appareil photographique panoramique et les supports des camera CCD sur la précision des coordonnées d'objet.

La conception de réseau dans notre étude est fondée sur l'hypothèse que l'appareil photographique a été calibré à l'avance, avec des données auxiliaires (Paramètres Auxiliaires PAs) connus. Cette condition est acceptée pour les appareils photo métriques qui maintiennent des paramètres intérieurs constants. Dans le cas où les paramètres d'auto-calibration sont présents, le réseau devrait être conçu afin de réduire l'influence de l'PAs sur les conditions de qualité de réseau, qui sont habituellement la précision et des valeurs de coordonnées fiables du point d'objet. L'influence des données des PAs a été étudiée de deux manières :

- L'effet des PAs individuel sur le point d'objet coordonne la précision.
- L'effet de la présence d'un AP sur d'autres paramètres dans le vecteur de solution qui peut être montré par analyse de corrélation.

En règle générale pour récupérer l'orientation intérieure PAs dans l'auto-calibration, une rotation orthogonale de kappa entre chaque station d'appareil-photo a été suggérée par Fraser, 1984. En raison de différentes caractéristiques des appareils photographiques et quelques restrictions dans la conception, les règles précédentes pour des appareils-photo CCD matricielles ne peuvent pas être appliquées ici. Sachant que différents réseaux pour l'auto-calibration ont été produits par la simulation heuristique, on prévoit d'utiliser une démarche permettant un recouvrement supérieur à 10 % par rapport à la taille de l'image. Les résultats de l'analyse de corrélation des inconnus et d'un test de précision sont rapportés dans cette partie.

Les objectifs de cette étude sont multiples, la métrologie en photogrammétrie couplée avec des méthodes algébriques et numériques récentes, ont permis d'améliorer le traitement des vues multiples par caméra photographique. À partir de celles-ci, un ordinateur permet de percevoir en trois dimensions la scène observée et y établir des mesures figure (3.7). L'illustration d'une démarche induite: modélisation à travers une méthode mathématique, puis résolution effective en tenant compte des erreurs de mesure relatives au monde réel feront l'objet d'analyse et de discussion. L'utilisation de l'unité faisceau comme approche de traitement permet d'aborder la géométrie épipolaire pour rattacher un ou plusieurs couples de photographies et de résoudre le problème de la correspondance des points images.

Dans un couple stéréoscopique, la géométrie épipolaire nous informe que pour chaque point observé dans une image, ce même point ne peut être observé dans l'autre image que le long d'une droite, dite «épipolaire», et connue figure (3.7). De plus, la définition d'un intervalle d'éloignement de l'objet par rapport aux prises de vues correspond à un intervalle le long de cette droite. L'intervalle de recherche pour l'appariement n'est donc plus toute l'image, mais il est situé le long d'un segment. Les caractéristiques de prise de vue généralement inconnues (réglage du zoom ou de la mise au point, position des points de vue, orientation de l'appareil photo lors de la prise de vue) sont des critères pouvant mener à bien l'opération de mesure. Dans cette optique plusieurs auteurs se sont intéressés aux normes de qualité et à l'étude de l'exactitude de la mesure en photogrammétrie rapprochée [Fryer, J. and al, 2007]. Celle-ci, aura pour conséquence la définition d'un modèle CAO par rapport à des projets d'études et de conception. Le modèle est une surface valide et une description de l'objet qui contient la géométrie et la topologie s'avère nécessaire.

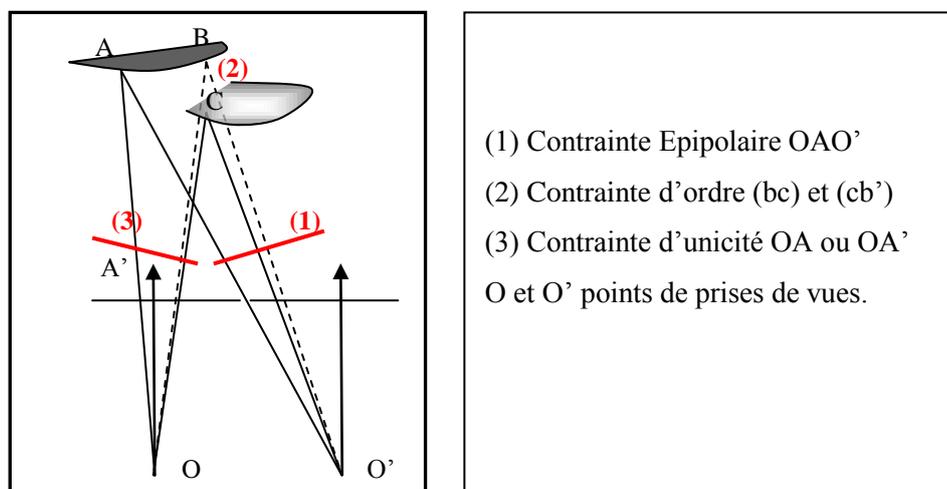


Figure 3.6 : Contraintes géométriques en stéréoscopie

En effet, il existe différentes applications où l'efficacité des méthodes photogrammétriques reste à démontrer. Dans ce contexte on cite la recherche photogrammétrique dans les mesures métrologiques et le calcul de modèles en trois dimensions qui sont d'actualité. Le potentiel métrique des systèmes de mesure 3D tel Photomodeler basé sur des appareils photographiques numérique est très fiable [Forstner W., 2004], [Enoc S. and al, 2009], [Eos Systems, Inc. 2010], néanmoins il faut s'imprégner de la démarche algorithmique pour des calculs 3D précis. Nous souhaitons utiliser un outil de mise en correspondance

suffisamment général pour pouvoir considérer des images prises dans des conditions très peu différentes (position et orientation). L'étalonnage implique la considération des différentes rotations avec des axes non parallèles conduisant à des images très différentes d'une même scène [Luhman, T. et al. 2006].

Par rapport à la nature géométrique des contraintes, il est illusoire d'espérer un processus de mise en correspondance parfait. Au voisinage de points particuliers et des points d'intérêts il est important d'avoir un signal suffisamment riche pour permettre une bonne identification. Les cibles codées permettent de satisfaire cette situation, mais de façon générale cette approche est non exhaustive. D'un autre côté, les grandes variétés de déformation excluent l'usage de la corrélation, cela implique certaines conditions de prises de vues. La parallaxe stéréoscopique d'un couple est un bon indicateur de configuration géométrique et permet d'améliorer le traitement global dans le calcul du modèle 3D. Résoudre le problème de la métrologie revient donc à mettre en place des paramètres auxiliaires, d'un autre côté l'utilisation d'une approche multi-échelle peut apporter des améliorations positives pour la mesure [Forstner W. 1986], [Kalantari M. et Jung, F., 2009]. La méthode de corrélation SIFT (Scale Invariant Feature Transform) développée par Lowe [David L, 2004] est très utilisée pour la mise en correspondance entre images et des points d'intérêts en photogrammétrie.

Les développements récents et les applications en photogrammétrie numérique dans la mesure industrielle couvrent un champ large des différents défis pratiques en termes d'exactitude indiquée, vitesse de mesure, automation, intégration de processus et rapport coût-délai. La vérification de l'exactitude et de traçabilité relative à l'unité standard en ce qui concerne des normes internationales est inévitable dans la pratique industrielle. Des solutions de système peuvent être divisées en mesure des points, les déformations et les mouvements, les découpes 3D et les surfaces 3D discrètes. Les développements récents et futurs se concentrent sur des applications dynamiques plus robustes, l'intégration des systèmes dans des chaînes de production, des solutions d'intégration où l'exactitude est plus élevée pour de faibles coûts [Luhman, T. 2010].

3-3.2. Principe et méthodes

La généralisation des concepts de la géométrie épipolaire et l'application de la théorie des invariants apporta plusieurs solutions relatives aux applications de la photogrammétrie rapprochée (orthophotographies, birapport et redressement, restitution mono image, etc.), [Grussenmeyer P. et Elkhilil O, 2002].

▪ Étalonnage

Si la problématique que nous soulevons dans cet article est axée sur l'influence des erreurs de métrologie d'une mire codée (format A0) représentant les points d'appuis, la formulation du problème de prise en compte de ces erreurs côtoie des domaines de recherche largement investis. [Hartley et Zisserman A., 2000]. En effet, la formulation qui suppose pouvoir estimer conjointement la position de la caméra pour chaque vue, la structure du modèle et les paramètres de la caméra est largement utilisée en photogrammétrie. L'approche, du fait qu'elle requiert un modèle approximatif de la mire, est en retrait par rapport aux travaux d'étalonnage 3D mais garde l'avantage important d'intégrer un vecteur de paramètres internes de caméra complexe apte à prendre en compte des déformations d'image importantes figure, (3.9). Des techniques d'étalonnage incluant la prise en compte des déformations d'images ont été introduites par les photogramètres utilisant des cameras non étalonnée [Lhumann et al, 2006].

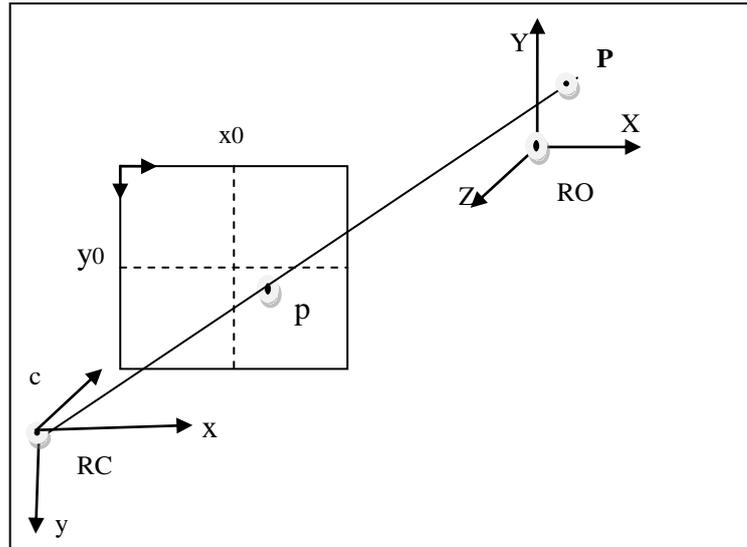


Figure 3.7 : Schéma de Principe

Il est utile de rappeler la nécessité de définir les éléments internes de la camera. La distance focale, le format de l'image et les distorsions sont autant de facteurs à calculer pour le projet. En métrologie, l'étalonnage est basé sur des observations en coordonnées images sur des cibles codées. L'appareillage se compose d'une camera photographique et d'une mire 2D contenant cents points cibles permettant un calcul des éléments internes à partir de plusieurs images figure, (3.9). L'optimisation d'un processus d'étalonnage se base sur la méthode des faisceaux. L'expression de l'équation de colinéarité est donc de la forme :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} = k.R. \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

En exprimant (x', y') dans le système image on obtient la relation des coordonnées corrigées:

$$\begin{aligned} x &= x' - x_0 - \Delta x \\ y &= y' - y_0 - \Delta y \end{aligned} \quad (3.12)$$

Dans cette équation les termes x_0 et y_0 représentent les coordonnées du point principal, x' et y' sont les coordonnées images et Δx , Δy représentent la distorsion totale regroupant celle radiale Δx_r , tangentielle Δx_t , et affine Δx_a .

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_r + \Delta x_t + \Delta x_a \\ \Delta y &= \Delta y_r + \Delta y_t + \Delta y_a \end{aligned} \quad (3.13)$$

A partir de l'équation (3.13) nous introduisons la formulation de la fonction de distorsion impliquant des coefficients comme paramètres inconnus. La formulation de la distorsion est celle définie par [Brown, 1971] et on rappelle que dans ce travail on tient compte uniquement des distorsions radiales et tangentielles :

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= x'(K_0 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7) \\ \Delta y_r &= y'(K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7) \\ \Delta x_t &= P_1 [r^2 + 2x'^2] + 2P_2 x' y' \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned}\Delta y_t &= P_2[r^2 + 2y'^2] + 2P_1x'y' \\ \Delta x_a &= C_1x' + C_2y' \\ \Delta y_a &= 0\end{aligned}$$

Les paramètres de ces expressions sont définis dans le paragraphe (3.2).

Par substitution dans (3.11) et (3.12) le système s'écrira donc :

$$\begin{aligned}x' &= x_0 + \Delta x + c \left(\frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \right) = x_0 + \Delta x + f(P) \\ y' &= y_0 + \Delta y + c \left(\frac{r_{12}(Y - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \right) = y_0 + \Delta y + g(P)\end{aligned}\tag{3.15}$$

La relation d'observation sera de la forme :

$$\left. \begin{aligned}\Delta x &= x' - x_0 - f(P) \\ \Delta y &= y' - y_0 - g(P)\end{aligned} \right\} E(P)\tag{3.16}$$

Le traitement de la projection perspective étant toujours définie entre le système objet (RO : repère objet) et le système image (RCxy : repère camera). L'optimisation de E dans l'équation (3.16) permet de déterminer le vecteur des paramètres inconnus P qui a la forme :

$$P = [x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, c_x, c_y, X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta, \gamma]^T$$

Les données de départ objet (X,Y,Z) et (x',y',-c) pour chaque point i permettent, pour chaque faisceau un calcul pour obtenir quinze (15) paramètres inconnus dont neuf (9) paramètres inconnus pour les éléments internes et six (6) paramètres externes de rotation et de translation. Pour un ensemble de faisceau on aura : (9 + 6×m) paramètres à définir pour la caméra. L'utilisation de systèmes d'observations redondants est nécessaire pour obtenir des résultats cohérents.

La déformation de l'objectif cause un décalage sur l'image (film ou CCD) d'un point du plan de la formation de l'image. La compensation pour tout point m (x, y) sur la surface d'image (coordonnée du point principal est (0.0)) est donné par :

$$\begin{aligned}x &= x' + (\Delta_{xr} + \Delta_{xt}) \\ y &= y' + (\Delta_{yr} + \Delta_{yt})\end{aligned}\tag{3.17}$$

Où: x, y sont les coordonnées corrigées du point image,

Δ_{xr} et Δ_{yr} : composantes x et y de la distorsion radiale,

Δ_{xt} et Δ_{yt} : composantes x et y de la distorsion tangentielle,

Les paramètres de la calibration sont donc calculés et se résument sur les éléments $K1, K2, K3, P1$ et $P2$, la valeur de la distance principale et les coordonnées du point principal. L'intérêt étant d'obtenir une image corrigée des différentes distorsions.

▪ Méthode de restitution

En photogrammétrie numérique, la restitution ou reconstruction en trois dimensions (3D) est basée sur la génération de nuages de points. Les méthodes denses en stéréoscopie sont limitées à des caméras étalonnées et des points de vues très proches les uns des autres [Luhman, T. 2010], [Rieke-Zapp, D.H.; Peipe, J., 2006]. La plupart des applications de modélisation et de visualisation nécessitent des

reconstructions denses ou quasi dense au lieu d'un nuage de points épars et utilisent des caméras qui nécessitant un étalonnage. Le calcul de la mise en correspondance dense débute par l'appariement de quelques points d'intérêts dont les cibles pour affiner l'orientation en détectant et en éliminant des pixels aberrants.

La précision sur le maillage est liée ou corrélée à celle définie par la mise en correspondance (appariement) entre différents points d'intérêt, on revient donc sur la qualité des coordonnées images observées. La difficulté principale de cette reconstruction consiste à savoir quel élément de l'image référence correspond au point de la seconde image ou des images corrélées. Les méthodes de corrélation sont basées sur des modèles de densification recherchant des points homologues sur un couple de photographie ou plusieurs photographies

Les relations de stéréoscopie en photogrammétrie nous permettent de calculer la position tridimensionnelle (3D) d'un point correspondant aux points homologues. Par rapport aux contraintes, les solutions de l'appariement peuvent être multiples ou inexistantes (taux de bruit). Il devient donc nécessaire d'appliquer des contraintes au problème de la corrélation pour converger vers une solution existante, unique et stable par rapport à l'objet. L'acquisition à la génération du modèle 3D est sujette à un ensemble de sources d'erreurs qui dépendent principalement :

- Des paramètres intrinsèques de la caméra, et en particulier les distorsions optiques qui transforment les droites (dont les épipolaires) en courbes. figure (3.7)
- De la position et l'orientation des caméras, qui diffèrent du cas normal.
- Du rapport R (Base/Eloignement), le recouvrement des images, et l'existence des objets sur les images.

Le rapport R doit être optimisé lors de l'acquisition des photographies, les paramètres intrinsèques sont déterminés pendant la calibration de l'appareil. Les distorsions et les écarts par rapport au cas normal sont corrigés par rectification épipolaires (création de deux caméras idéales virtuelles, dans le cas normal). La ressemblance entre les intensités dans les images pour les points homologues m et m' permet de calculer la corrélation entre images. La formulation suivante permet d'exprimer cette fonction [Kasser, M. et Egels Y. 2000], [Hullo JF. 2010] :

$$m[x, y, I(x, y)] \Leftrightarrow m'[x', y', I'(x', y')] \quad (3.18)$$

$$\text{La corrélation } C(m, m') = \sum_{-i}^{+i} \sum_{-j}^{+j} [I(x - u, y - v) - I'(x' - u', y' - v')]^2 \quad (3.19)$$

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la réponse de cette technique aux besoins de la reconstruction 3D. Les critères élaborés sont basés sur :

- La géométrie : niveau de détail et exactitude du modèle orienté.
- Les taux qualitatifs et quantitatifs permettant l'analyse de la reconstruction.

En second lieu, la technique utilisée actuellement pour des relevés et mesures métrologiques peut faire l'objet de comparaison par rapport aux données objets. Les éléments externes des faisceaux sont donc calculés et analysé par rapport à la situation réelle de prise de vues.

3-3.3- Le Système de mesure

Le choix du dispositif approprié de caméras est basé sur les conditions dont l'exactitude, la résolution, la vitesse d'acquisition, la synchronisation, la quantité de données, l'information spectrale, le champ visuel, l'échelle d'image, les interfaces numériques et le coût. De nos jours la variété des appareils photographiques et de camera disponibles pour l'acquisition d'image est énorme. Basé sur la technologie de CCD et de CMOS, les caméras sont disponibles avec de très hautes résolutions (>60 Mpixel), des taux très élevés, des tailles de pixel variant entre 1.4 μm et 15 μm , avec des formats différents [Lhumann et al,

2006]. Pour des raisons liées au coût des opérations on utilise un système photogrammétrique EOS 5D, afin d'en analyser les possibilités métrologiques en photogrammétrie industrielle.

Le système de mesure PhotoModeler d'Eos 5D est utilisé pour les mesures et les traitements photogrammétriques. Le processus de calcul se répartit entre orientation, détermination des paramètres externes et mise en place d'un processus additionnel (contraintes) permettant d'améliorer l'exactitude de la restitution ou du modèle 3D. La génération d'un modèle 3D se fait sur la base d'un couple ou d'un ensemble de vues réparties de façon homogène par rapport à l'objet. Une base des formes géométriques élémentaires (cylindre, cône,...) permet de reconstruire les parties simples de l'objet. D'un autre côté, la création du nuage de points permet une densification et un choix sur la méthode de modélisation 3D de l'objet. Par rapport aux principes théoriques, la démarche des professionnels reste sujette à des erreurs dans les opérations pratiques de mesures. Le temps de prise de vue ainsi que le milieu environnant, la résolution et la position géométrique des caméras sont un ensemble connexe non négligeable pour l'analyse de la qualité d'un traitement photogrammétrique. L'étalonnage reste donc une étape nécessaire pour la démarche de la qualité. Le laboratoire de topographie et de topométrie de l'INSA/Strasbourg nous a permis de réaliser cette expérience et le matériel utilisé pour ses opérations se résume à :

- PhotoModeler version 5.2 et PhotoModeler Scanner version 7.
- Camera canon 20, 28 mm,
- Mire de calibration 2D (100 points de contrôles),
- Cibles circulaires PhotoModeler 12 bits distribués sur des objets du chantier test.
- Scanner 3D trimble GX.

Le tableau (3.6) fournit les caractéristiques techniques des caméras :

Désignation	Canon ED50
Taille en mm	35.8 × 23.9
Taille en pixels	4368 × 2918
Rapport image	3/2
Sensibilité	ISO 100-1600
Type capteur	CMOS
Objectifs	20 - 28 mm
Vitesse obturation	1"/8000 - 30"

Tableau 3.6 : caractéristiques système de prises de vues

L'expérience utilise trois tests définis en fonction de la taille, l'éloignement et la complexité du sujet. Ceux-ci sont caractérisés par les paramètres du tableau (3.7) :

chantier	Volume	éloignement	Recouvrement
Test 1 (labo-topo)	3*3*3 m ³	5 m	60-80 %
Test 2 (Wild B9)	1.5 m ³	1 m	>70%
Test 3 (pièce)	64 dm ³	0.5 m	>70%

Tableau 3.7 : caractéristiques des tests

Les opérations de détermination sur l'objet sont appliquées au premier test du labo-topo : l'acquisition au Scanner Laser 3D(GX100) et mesures de coordonnées avec RealWorks V6.5 ont permis de calculer les coordonnées des 102 points cibles (17×6). L'exactitude des mesures atteintes est limitée par 5 mm sur l'objet (réf-trimble GX) et reste suffisante pour valider notre expérience car la quantification des données

et leurs cohérences vis-à-vis du rendu du traitement sont les points essentiels de notre étude. La distance station/cible est de l'ordre de 5m. En ce qui concerne les deux autres tests, les distances sur les cibles suffisent à orienter le modèle.

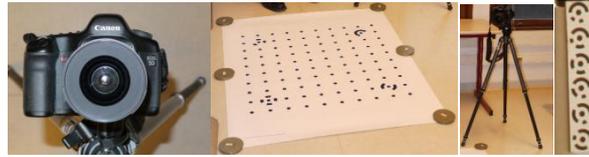


Figure 3.8 : Cibles, camera Canon, trépied et mire A0 d'étalonnage



Figure 3.9 : Acquisition de la scène au trimble GX

L'utilisation d'un algorithme de détection des intensités sur les cibles a permis d'extraire les coordonnées du système de référence à partir de la scène du test 1 acquise avec le système trimble GX. La précision de cette opération de référencement est de l'ordre de 0.5 mm.

3.3.4 Résultats et discussion

Les traitements photogrammétriques sont diversifiés et s'enchaînent pour assurer le résultat préconisé. La fiabilité du processus et son impact pour satisfaire une bonne reconstruction implique la considération de plusieurs paramètres. Dans ce paragraphe des résultats sont rassemblés et présentés pour l'analyse des différentes phases du processus. La vérification de l'exactitude et de la traçabilité à l'unité standard en ce qui concerne des normes internationales est inévitable dans la pratique industrielle. Les aspects d'étalonnage et de restitution sont discutés dans les paragraphes suivants, et sachant que des développements récents et futurs se concentrent sur des applications dynamiques plus élevées, il convient d'analyser les paramètres utilisés dans le calcul du modèle 3D.

▪ Etalonnage et orientation

La mire de format A0, comprenant 100 points a permis d'étalonner les caméras canon. La figure (3.10) illustre le résultat de la calibration sur les points cible dont l'écart résiduel vaut 0.5 pixel.

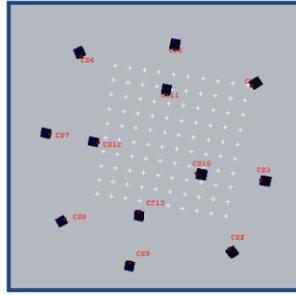


Figure 3.10 : Configuration des stations et des cibles codées

Les paramètres des cameras sont résumés dans le tableau suivant, des variations sont constatées par rapport aux configurations des images utilisées :

Paramètre interne	Camera 20mm		Camera 28mm	
	Focale-mm	20.591	20.749	28.583
Format-mm	35.792×23.927	35.808×23.927	35.891×23.927	35.851×23.927
Point principal mm	17.951-11.963	17.995-11.963	17.857-12.107	17.916-11.963
K1	2.1×10^{-4}	2.21×10^{-4}	1.31×10^{-4}	1.30×10^{-4}
K2	-3.57×10^{-7}	-3.27×10^{-7}	-1.659×10^{-7}	-1.62×10^{-7}
K3	0	0	0	0
P1-P2	0	0	1.07×10^{-5} ; 0	1.071×10^{-5} ; 0

Tableau 3.8 : Résultats des éléments internes de l'étalonnage

Les courbes de distorsions pour les deux caméras sont représentées sur les figures (3.11et 3.12). Elles expriment la distorsion radiale en fonction de la distance et on considère que les autres distorsions sont négligeables. Les paramètres P1 et P2 de l'équation (3.14) fournissent une correction maximale de 0.3μ . Les caméras les plus précises sont utilisées donc dans le traitement photogrammétrique.

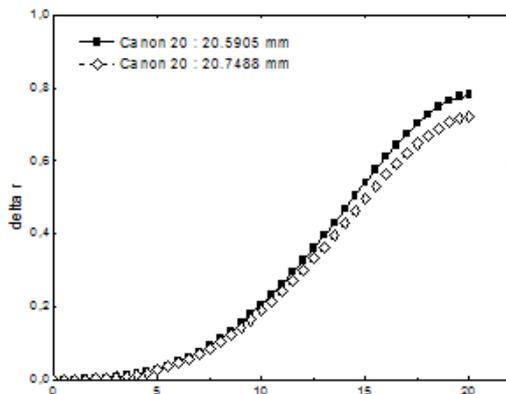


figure 3.11 : Courbes de distorsion focale 20mm

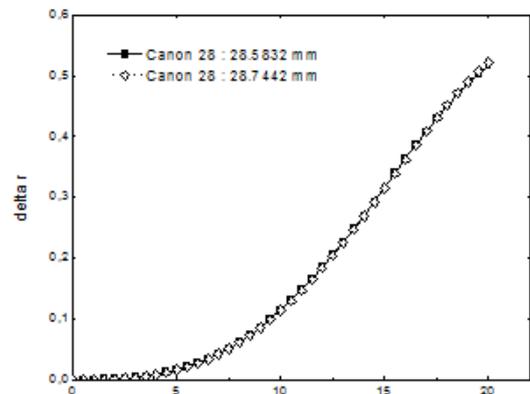


figure 3.12 : Courbes de distorsion focale 28mm

Dans le calcul du modèle 3D, les erreurs du calcul sur les points cibles dans le système objet ainsi que l'erreur sur les résidus obtenus sont représentées dans le tableau (3.9) :

Test étalonnage	Ecart x (mm)	Ecart y (mm)	Ecart z (mm)	Ecart type résidu (pixels)
Canon 20 mm	0.3 E-03	1,2 E-03	0.9 E-03	0,025 pixels
Canon 28 mm	1,2E-06	0.7 E-03	1,1 E-03	0.047 pixels

Tableau 3.9 : Ecarts obtenus sur les points d'appuis

L'étalonnage est une opération délicate dans le sens où plusieurs facteurs influents dans la phase d'acquisition. Globalement, le processus d'acquisition comprend les prises de vues pour l'étalonnage et les prises de vues pour la restitution. La mire de format A0 contenant quatre points de contrôles et 100 cibles détectables par le système d'étalonnage. Dans le premier test, l'expérience menée au laboratoire de topographie et de photogrammétrie utilise 17 mires représentant 6 cibles chacune codées à 12 bits. L'espace, objet de l'expérience est défini dans un volume de $10 \times 10 \times 3.5$ m³ avec grossièrement trois plans contenant les cibles, figure (3.13). Les stations d'observations sont placées sur des points très proches, la détection des plans est constatée avec des décalages de ± 5 mm. La figure 3.13 montre cet aspect par rapport à l'objet réel (position, dimension, forme). On constate donc que la configuration globale est bien conservée.

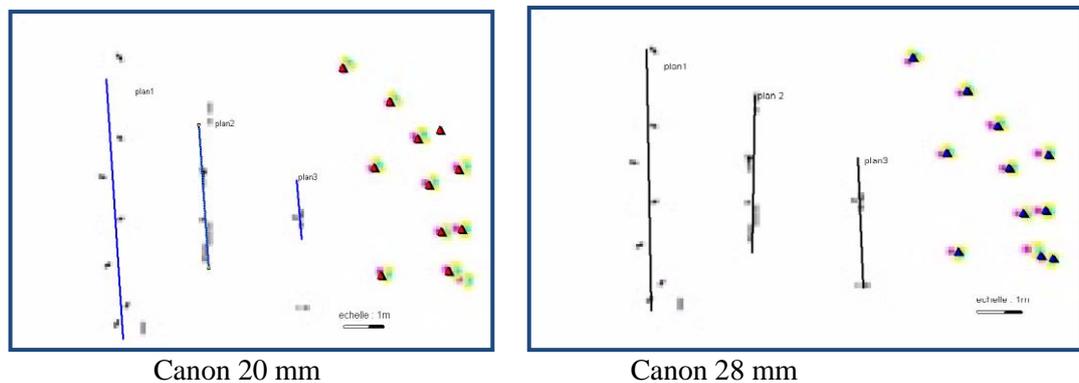


figure 3.13 : Configuration globale camera /cibles

La restitution est entamée après avoir défini les orientations sur des images corrigées nommée communément « image idéalisée ». On peut observer la différence concernant la déformation se trouvant aux abords de l'image corrigée dont la valeur maximale est 0.35 mm. La déformation est en forme de coussinet définie par une bande noire aux limites de l'image pour le cas de nos caméras canon.

Les aspects métriques concernant les écarts sur des points d'appuis nous donnent pour une première étape de calcul les valeurs selon le tableau (3.10). On note la valeur de la composante de l'écart spatial résiduel en accord avec la précision globale du système de mesure ($\cong 5$ mm) calculée sur la base de 103 points.

Chantiers test	Ecart x (mm)	Ecart y (mm)	Ecart z (mm)	Ecart type résidu
Canon 20 mm	3,1	3,2	3,2	0,100 pixels
Canon 28 mm	1,8	2,1	5,6	0,090 pixels

Tableau 3.10 : écarts selon chaque composante pour chaque test

D'un autre coté le tableau (3.11) résume la différence entre les distances calculées par le système photogrammétrique et les mesures de distances entre stations de prises de vues objets (tableau 6). Ce contrôle permettra de valider l'orientation externe, notamment la position des stations.

Numéro de station	St2-St3	St3-St4	St4-St5	St5-St6
Distance mesurée (mm)	1450	1180	1230	1175
Distance calculée (mm)	1437	1195	1243	1190
Ecart en mm	+13	-15	-13	-15
Ecart type mm	±1	-	-	-

Tableau 3.11 : différences distances entre mesurées et calculées

Les écarts observés sont dus aux mesures approchées et à l'incertitude du système de référence établi lors de l'opération de référencement. Le choix des points de références par rapport aux images et la mise en place de contraintes géométriques permet d'améliorer l'exactitude et le calcul du modèle 3D. Le tableau (3.12) agrégé des écarts montre une précision de l'ordre de 2.10^{-4} m sur le positionnement des points.

Chantiers test	Ecart x (mm)	Ecart y (mm)	Ecart z (mm)
Canon 20 mm	0,3	0,3	1
Canon 28 mm	0,2	0,2	0.3

Tableau 3.12 : Affinement du calcul 3D pour le deux tests

La configuration globale de l'ensemble des entités d'une scène permet de répondre efficacement sur la qualité des nouveaux points 3D. L'analyse des paramètres du traitement global (étalonnage, orientation et restitution) fournit une précision relative moyenne de 10^{-4} par rapport à la taille de l'objet. Un travail de haute précision ($>10^{-5}$) nécessite plus d'itérations et la prise en compte de données externes. La corrélation spatiale entre l'image, l'objet et sa reconstruction 3D peut-être estimée en utilisant la matrice jacobéenne dans le processus du calcul de modèles en trois dimensions [Forster W., 2004].

▪ La restitution et densification des points

Il est évident que pour les prises de vues avec une focale de 20mm, l'objet est dans une situation plus rapprochée par rapport aux autres focales 28 et 50 mm. Ceci rappelle l'utilisation des chambres normales et de grand angulaire en photogrammétrie aérienne. Dans les procédés optiques, la mesure se trouve altérée quelque soit le système utilisé ; en effet, les conditions d'éclairément, la position des éléments du sujet et des caméras, la prise de vue avec le réglage des différents temps permettent d'obtenir une bonne qualité d'images pour les traitements. En photogrammétrie digitale la reconstruction est basée sur la correspondance d'images et l'intersection des rayons homologues. Par rapport à la démarche classique, il est judicieux d'analyser le rapport Base/Eloignement pour extraire une position idéale des caméras lors des

prises de vues. L'organigramme général pour le traitement photogrammétrique est représenté par la figure (3.14).

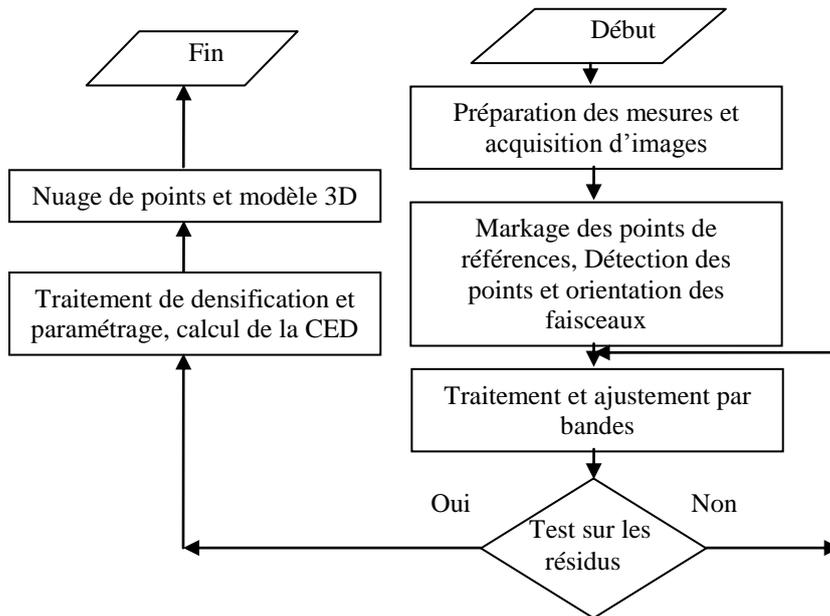


Figure 3.14 : Organigramme du processus de traitement

▪ **La corrélation pour l'orientation relative**

La corrélation multi vues est réalisée automatiquement en utilisant le module d'orientation sans tenir compte des coordonnées objets. Après nettoyage du fichier généré, les classes d'erreurs en pixels définies pour les trois tests permettent d'encourager cette démarche pour aborder la restitution. Globalement l'erreur de correspondance est inférieure à 1 pixel. Les tableaux (3.13), (3.14) et (3.15) illustrent les résultats de ce calcul pour les trois tests. Le nombre de points appariés exprimant une bonne corrélation pour l'orientation relative selon les classes d'erreurs entre 0 et 3 pixels ainsi que le taux sont mentionnés dans ces tableaux. Les valeurs aberrantes ou fausses sont rejetées.

Test 1(Wild-B9)	Nombre de points	Taux de présence
Classe [0-1pixel]	379	0.592
Classe [1-2pixels]	202	0.316
Classe [2-3pixels]	59	0.092

Tableau 3.13 : Quantitatif des erreurs image pour test 1

Test 2(labo-topo)	Nombre de points	Taux de présence
Classe [0,1pixel]	174	0.500
Classe [1,2pixels]	133	0.382
Classe [2,3pixels]	41	0.118

Tableau 3.14 : Quantitatif des erreurs image pour test 2

Test 3(pièce)	Nombre de points	Taux de présence
Classe [0,1pixel]	248	0.500
Classe [1,2pixels]	170	0.342
Classe [2,3pixels]	78	0.158

Tableau 3.15: Quantitatif des erreurs image pour test 3

■ **Densification et restitution**

Les objets observés avec la disposition des cibles sont représentées sur les figures. (3.15),(3.16) et (3.17). Le problème de la densification à été largement abordé par les photogrammètres et la question permettant de réaliser un maillage reste l'objectif de toute reconstruction. Néanmoins, pour le photogrammètre la génération du nuage de points reste primordiale car elle permet de fixer des conditions optimales pour les prises de vues dont le rapport Base / éloignement. Sachant que la méthode CED se base sur un calcul par couple de faisceaux, l'algorithme dispose de $(n^2-n)/2$ possibilités permettant la densification. Le traitement correct considère un rapport compris entre 0.1 et 0.3 pour le calcul des intersections entre points appariés par la CED, figures (3.1) et (3.4). Néanmoins, il faut noter la présence de valeurs aberrantes de ce rapport considérées comme indicateurs négatifs de prise de vues. Le tableau (3.16) résume le traitement de densification pour des valeurs du rapport B/H comprises entre 0.1 et 0.3. Le résultat de la CED est représenté en figure (3.15),(3.16) et (3.17) pour chaque test exprimant le calcul 3D.

Projet	Nombre de couples	Nombre de points	Précision relative à l'intersection des rayons homologues	Angle des points Intersectés En degrés
labo topographie	26	8009	0.00051- 0.000005	1.866°-81.540°
Wild B9	47	17851	0.005-0.00001	4.476°-89.300°
Pièce mécanique	21	19884	0.0085-0.000019	7.070°-89.960°

Tableau 3.16 : Tableau résultat des traitements

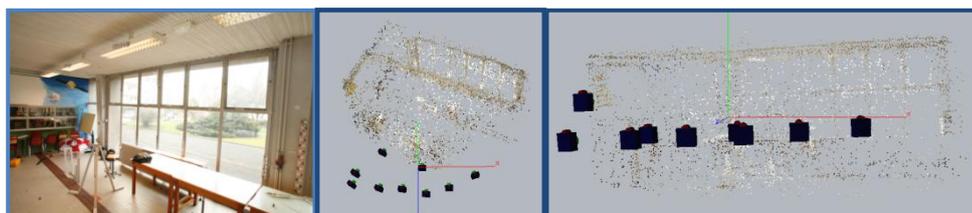


Figure 3.15: Résultat du calcul 3D labo-topographie (test1)

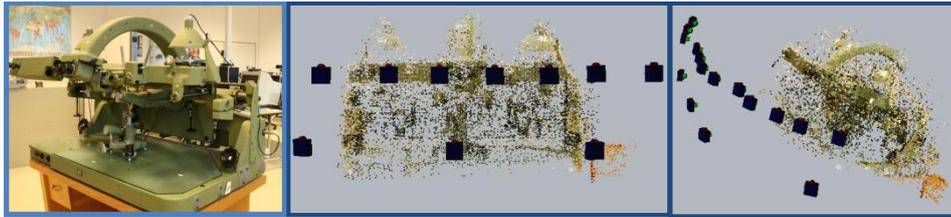


Figure 3.16: Résultat du calcul 3D Wild B9 (test2)

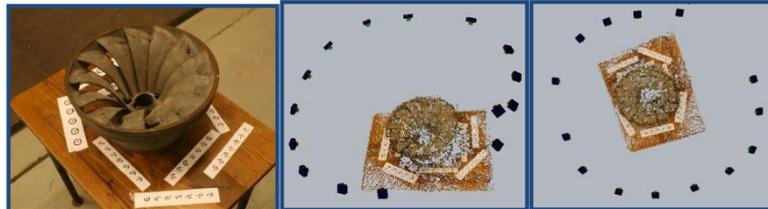


Figure 3.17 : Résultat du test pièce mécanique (test3)

Les nuages de points ainsi générés sont tributaires de l'ensemble des traitements appliqués à savoir l'orientation interne et l'orientation externe (relative et absolue) dépendant des paramètres de prise de vues. Dans beaucoup d'applications photogrammétriques la précision interne de mesure à partir de l'ajustement résultant sont présentés en tant que valeurs finales d'exactitude. Dans ces cas l'exécution d'un système peut facilement être manœuvrée simplement en augmentant le nombre d'observations. En réalité, les mesures d'exactitudes sont produites si des données indépendantes de points d'appuis / points de contrôles sont disponibles dans l'espace d'objet. Ces données de vérification peuvent être constituées par les points de contrôle 3D, qui, cependant, n'est souvent pas disponibles dans la pratique avec une exactitude (plus élevée) suffisante. Généralement ces corps de référence sont relativement petits, chers, lourds et non adaptés aux mesures optiques.

Un modèle complet permettant de corriger ces déformations et d'assurer la qualité des traitements en photogrammétrie ne peut être présentée que si l'agrégation des paramètres est modélisables [Rieke-Zapp D.H., Peipe, J, 2006]. Il existe plusieurs indicateurs permettant de juger de la qualité d'une bonne restitution. La valeur de l'intersection spatiale (indice Tightness) est une réponse à cette problématique en appliquant un calcul topologique détectant le rayon homologue, figure (3.18) et (3.19).

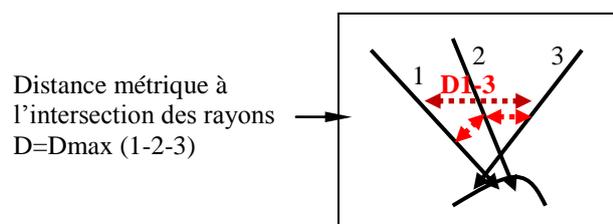


Figure 3.18: Intersection de rayons homologues à partir de plusieurs photographies



Figure 3.19 : Intersections de rayons homologues pour la pièce

Dans la réalité, ni le markage, ni le calibrage et l'orientation ne sont parfaites. Ceci implique que les rayons homologues ne s'intersectent pas et définissent au voisinage du point considéré un espace métrique permettant de choisir le point le plus probable calculé sur la base d'une distance maximale entre rayons. En raison de l'erreur de mesure, ces rayons ne s'intersectent jamais à un point parfait dans l'espace 3D, la figure (3.20) montre la précision relative de l'intersection des rayons homologues pour les trois tests, elle s'exprime en fonction de la taille de l'objet (d : dimension). Selon les travaux courants de photogrammètres, un rapport d'intersection de $0.1\% \times d$ donne comme résultat une bonne restitution et pour les travaux de grande précision il doit être inférieur à 0.01% [Luhman, T, 2010], [Fraser C. and Cronk S., 2010]. Les résultats obtenus dans les travaux de mesures photogrammétriques sur des objets volumineux ($\cong 100 \text{ m}^3$) permettent de certifier les développements récents de la méthode en métrologie industrielle [Ozbek M. and al, 2010], [Arias P. and al, 2010]. L'apport des données auxiliaires et l'indexation dans les traitements de primitives telles les courbes est une alternative certaine pour la reconstruction 3D et permet d'obtenir une bonne exactitude [Zheng J.D and al, 2009].

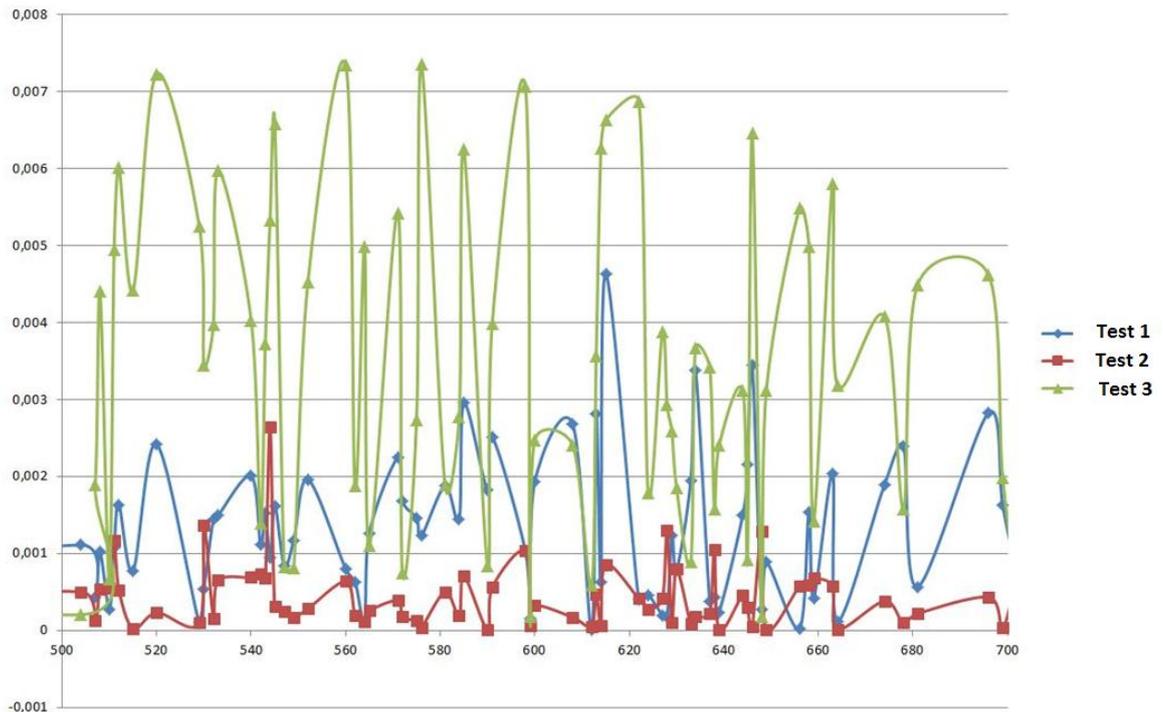


Figure 3.20 : Intersection des rayons homologues pour chaque projet

3.4 Synthèse et traitements en photogrammétrie rapprochée

Les travaux entamés dans ces différentes études et applications permettent d'aborder des thèmes pluridisciplinaires en métrologie industrielle. On constate d'abord une qualité hétérogène sur l'exactitude du modèle 3D restitué, on rattache cela aux différentes phases du processus et au principe même de la projection projective opérés en photogrammétrie. Il est plus que certain que la combinaison des différentes approches notamment en auto calibration améliore la précision des applications métrologiques [fraser, 1995]. Les différentes phases sont analysées indépendamment.

3.4.1 Etude de calibration

L'utilisation de plusieurs cameras pour l'analyse d'un objet est négociable selon des critères liés à l'exactitude à atteindre. Une calibration globale du système de mesure s'avère nécessaire et ceci induit donc une configuration de réseau de camera à analyser et à traiter en fonction de la distribution des cibles sur le sujet. Les systèmes utilisant plusieurs types de cameras sont donc conseillés pour un calcul 3D plus précis. Les travaux réalisés avec les deux focales (20-28 mm) montrent une amélioration dans le processus de la restitution. La mesure photogrammétrique sur l'objet génère des fichiers aptes à être exploités et corrigés. Les paramètres de la calibration sont recalculés pour la triangulation si nécessaire.

En optique élémentaire (conditions de Gauss : lentilles minces, rayons peu inclinés sur l'axe, optique peu ouverte), tout rayon passant par le centre de l'objectif n'est pas dévié. C'est ce que reproduit la perspective

mathématique. Malheureusement, les optiques réelles utilisées en prise de vues photogrammétriques ne remplissent aucune de ces conditions.

Dans le cas des optiques parfaites (dioptries sphériques centrés) le rayon d'entrée, le rayon de sortie, et l'axe de l'optique sont coplanaires. Mais les rayons incident et émergent ne sont pas parallèles. Cet écart de parallélisme constitue la distorsion de l'objectif. C'est une caractéristique permanente et stable de l'optique, qui peut être mesurée préalablement à la prise de vues, et corrigée lors des calculs de photogrammétrie.

Il est également possible de déterminer la distorsion (ainsi que le centrage et la distance principale) par photographie d'un polygone tridimensionnel de points très bien connus en coordonnées, et par calcul des équations de colinéarité, auxquelles on ajoute des inconnues de distorsion suivant le modèle choisi. Dans le cas d'un objectif parfait, la distorsion se modélise très bien par une correction symétrique polynomiale radiale autour du point principal de symétrie (intersection de l'axe optique avec le plan du capteur). Cette approche est utilisée dans ce travail pour obtenir des images idéales.

La correction à apporter est du type :

$$\Delta r = ar^3 + br^5 + cr^7 \quad (3.20)$$

Donc

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x/r \\ y/r \end{pmatrix} \Delta r = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} (ar^3 + br^5 + cr^7) \quad (3.21)$$

Si l'optique ne peut pas être considérée comme parfaite (c'est parfois le cas si l'on tente d'employer des appareils photographiques grand public pour des opérations photogrammétriques), la distorsion peut perdre son caractère radial et symétrique, et nécessite des moyens d'étalonnage et de modélisation beaucoup plus complexes. Les variations de centrage apportées par le déplacement du centre perspectif impliquent une modélisation très aléatoire de la distorsion.

▪ Déformations du capteur

L'équation de la perspective suppose que le capteur est un plan, et que l'on peut y définir un référentiel de mesure permanent. A ce point de vue, il faudra opposer les capteurs photochimiques (émulsion photographique) et les capteurs électroniques (matrices DTC). Ces derniers sont pratiquement indéformables, et l'image qu'ils acquièrent est définitivement stable (en tout cas sur le plan géométrique). Les remarques suivantes s'appliqueront donc uniquement aux capteurs photochimiques. L'indéformabilité de l'image au cours du temps, si elle s'est améliorée avec l'usage de supports dits "stables", est tout à fait insuffisante pour l'usage des photogramètres. Des déformations 10 fois supérieures à la précision des mesures nécessaires sont fréquentes. La seule parade efficace est la mesure des coordonnées images de points connus (les repères de fond de chambre) et la modélisation de la déformation par une transformation bidimensionnelle. Cette opération est connue sous le nom d'orientation interne. On choisit habituellement déformation. Mais cette déformation n'est ainsi mesurée que sur le bord de l'image, en un petit nombre de points (8 en général). La prolongation à l'intérieur de l'image est donc d'une assez faible fiabilité.

▪ **Modélisation des défauts non quantifiables**

Les principales corrections à apporter au modèle simpliste de la perspective centrale ont été passées en revue dans le chapitre 2. Lorsque la reconstitution géométrique précise est indispensable -c'est notamment le cas en triangulation, où le cumul d'erreurs systématiques peut engendrer des imprécisions intolérables ; une étape consiste à ajouter à l'équation de colinéarité et à ses termes correctifs, un modèle paramétrique de déformation (polynomial), contenant un petit nombre de paramètres, choisis de façon à représenter au mieux l'influence des défauts non directement modélisables (cas de la DLT). Cette technique permet habituellement un gain de 30 à 40% sur la précision de la troisième dimension de la triangulation. Dans ce travail, la procédure d'étalonnage utilisant les caméras 20,28 et 50mm nous a permis de constater des écarts non négligeables notamment pour la focale 50 mm, (voir figure 3.21c). Les 100 points d'appuis pour l'orientation interne ont mis en évidence des écarts très aléatoires.

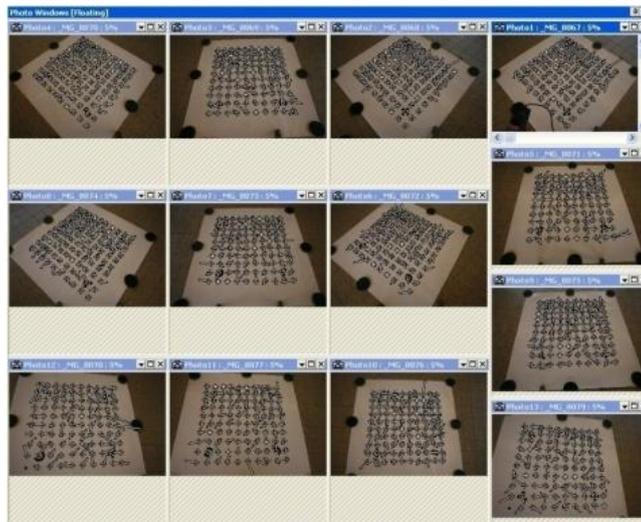


Figure 3.21a Chambre canon 20 mm : distorsion acceptable ;

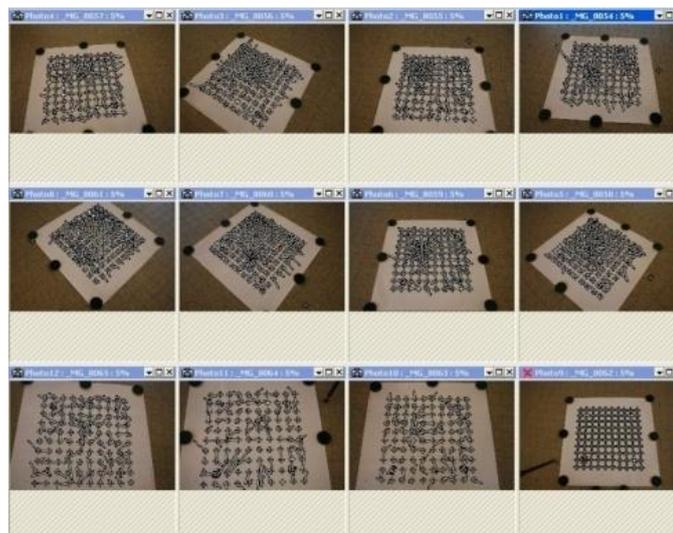


figure 3.21b Chambre canon 28mm : distorsion aléatoire



figure 3.21c Chambre canon 50 mm : distorsion importante

L'intérêt d'étudier l'étalonnage des caméras réside dans le fait d'estimer les erreurs probables en métrologie. Une approche de corrélation nécessite la recherche de la loi de composition des erreurs pour déterminer l'exactitude des traitements photogrammétriques.

3.4.2 Etude de l'orientation

La procédure pour l'extraction automatique des points de liaison fonctionne avec les couples d'images. Pour chaque paire, les points homologues sont recherchés à l'aide de la méthode SIFT [Lowe, 2004] disposent d'opérateurs utilisant une fonction quadratique ou une recherche par kd-tree pour la comparaison des descripteurs. Les valeurs aberrantes sont ensuite rejetées avec une estimation robuste de l'orientation relative selon la matrice fondamentale [Hartley et Zissermann, 2004] en utilisant 7 correspondances.

Si les paramètres de calibration sont connus, la matrice essentielle [Longuet-Higgins, 1981] est utilisée.

Ces opérations sont répétées pour toutes les combinaisons de paire d'image afin de compléter la phase correspondante sage de paire. Si les images forment une séquence ordonnée figures ?et ?), le nombre de combinaisons d'image à traiter est réduit à $n-2$, avec une amélioration des temps de calcul.

Les coordonnées en pixels extraites automatiquement des points homologues image peuvent être importées dans la plupart des utilitaires photogrammétriques pour l'orientation de l'image et la reconstruction de la géométrie recherchée.

Le modèle mathématique utilisé pour l'orientation du réseau est l'ajustement photogrammétriques par bandes basé sur les équations non linéaires de colinéarité et la méthode des moindres carrés (Gauss-Markov). Les valeurs initiales approchées sont nécessaires pour la linéarisation en utilisant le développement en série de Taylor. Cette procédure est utilisée dans le processus de l'orientation relative et permet une stabilisation progressive du bloc image puisque le nombre de rayons 3D par point augmente.

A partir de l'opérateur de détection SIFT on fourni un grand nombre de points sur l'image même en cas de mauvaise formation telle la variation d'échelle, la modification radiométrique, les vues convergentes et des lignes de base larges. C'est également souligné dans le cas de scènes bien texturées ou des images à très haute résolution. Mais trop de points de liaison (observations) pour l'ajustement en bloc peuvent engendrer de graves problèmes informatiques. Donc, après la mise en correspondance de toutes les combinaisons de paire d'image, le nombre de points de liaison extrait peut être réduit selon leur multiplicité (c.-à-d. le nombre d'images pour lequel le même point est visible). La taille de la cellule dépend de la résolution géométrique des images (pour une image 12Mpx, un bon choix est 200×150 px). C'est pourquoi l'utilisateur doit définir manuellement la taille de chaque cellule, conformément à la résolution géométrique des images originales.

D'un autre cote il existe des solutions logicielles de type « SFM » « Structure for Motion » permettant un traitement convivial des blocs. En effet, SFM a pour objectifs la détermination des positions et orientations des caméras à partir de points de liaison, et la reconstruction de la géométrie en 3D d'une scène. Plusieurs études ont cherché à répondre à ces problématiques de façon automatique. Ainsi [Snavely et al., 2008] ont proposé une application efficace nommée Bundler, aujourd'hui utilisée comme référence dans des solutions telles que SFM Toolkit et Visual SFM par exemple. Plus récemment, Pierrot-Deseilligny, [Pierrot-Deseilligny et Cléry 2011] proposaient un nouvel outil, Apero pour «Aérotriangulation Photogrammétrique Expérimentale Relativement Opérationnelle », destiné à sa chaîne de traitement Photocloud.

Les résultats de ces approches offre un traitement global tridimensionnel du sujet en apportant une reconstitution de surface par rapport à un repère absolu du référentiel objet. Les figures (3.22a,b,c) montrent cette étape de la restitution pour les trois tests cités précédemment. Le type de résultats est différent selon les paramètres de l'orientation utilisés et ceux liés à l'environnement du sujet. La figure 22 montre un aspect de l'influence de l'orientation relative sur la densification et la génération du nuage de points.

Les essais établis sur les trois tests montrent cette influence.



a)



b)

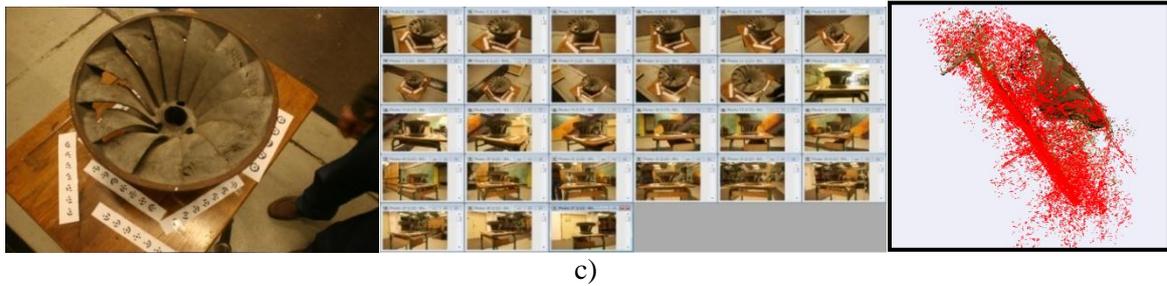


Figure 3.22

- a) Bloc labotopographie
- b) Bloc Wild B9
- c) Bloc pièce mécanique

3.4.3 Etude densification

La vision par ordinateur s'appuie sur les propriétés des images numériques pour faire sa mise en correspondance entre points homologues. Ainsi elle utilisera les lignes épipolaires lors de la recherche des points homologues, et la matrice fondamentale déduite des étapes de calcul précédentes (OI-OA), qui regroupe les positions et orientations des caméras.

Comme vu précédemment, la corrélation automatique d'images a pour objectif la génération de nuages de points 3D à partir de collections de photographies dont on connaît les positions et les orientations des caméras. Ces nuages de points seront la base du travail de modélisation 3D qui intéressent les domaines de la robotique, l'archéologie, la métrologie ou encore les jeux vidéo par exemple. Les techniques de Multi-View Stéréo se basent sur le principe de la corrélation épipolaire dense ou CED. Ce procédé repose sur la stéréoscopie, qui vise à reconstituer un objet en trois dimensions à partir de la mesure des parallaxes entre points homologues. C'est donc la mise en correspondance des points homologues qui permettra l'appariement des images.

Les techniques de MVS ont fait l'objet d'une classification par [Seitz et al., 2006], qui fait état des quatre approches utilisées pour la reconstruction de nuages de points 3D. Ainsi, il distingue la reconstruction à partir de la texture, de la silhouette, de cartes de profondeur et les méthodes basées sur des zones sites «patch-based».

Lors de cette étude on s'est appliqué à produire un nuage de points à partir des méthodes de correspondance. Les opérations (orientation et restitution) sont très corrélées pour parfaire le calcul d'un modèle 3D. L'information sur la qualité et l'indication de précision présentent l'exactitude produite. Dans le tableau (3.17) on résume les éléments ayant permis la construction du modèle 3D généré par la méthode photogrammétrique. La convergence vers une solution de qualité homogène est obtenue en réitérant le traitement du calcul 3D en utilisant des corrections sur les points d'orientation (relative et absolue).

Modèle 3D	Nbre de photographies	Précision image (pixels)		Précision métrique (mm)		Intersection des rayons (micron)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
Initial	6	1.520	0.003	0.275	4.29	2.5	1000
Intermédiaire 1	5	1.510	0.004	0.268	4.13	2.8	1100
Intermédiaire 2	5	1.480	0.004	0.263	4.04	3.7	1100
Intermédiaire 3	5	1.378	0.011	0.257	3.79	7.7	990
Final	5	1.378	0.011	0.257	3.79	7.7	990

Tableau 3.17 : Résultats du calcul 3D

Les résultats obtenus seront donc comparés aux données laser pour l'analyse de l'exactitude et le rendement de la photogrammétrie des objets rapprochés. Les critères d'analyses s'établissent autour des paramètres de prise de vues, l'étalonnage, l'orientation et les facteurs de corrélation dense.

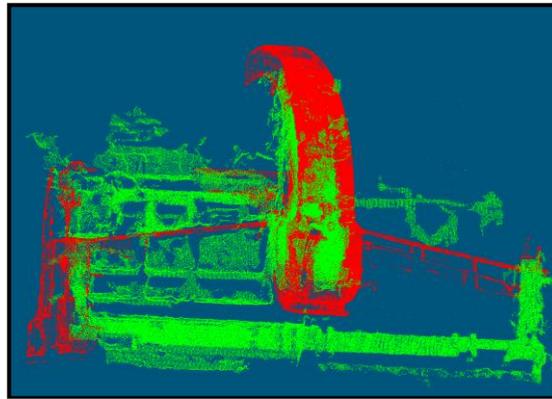


Figure 3.23 : Superposition Lasergrammetrie (rouge) et restitution Photogrammetrique (vert)

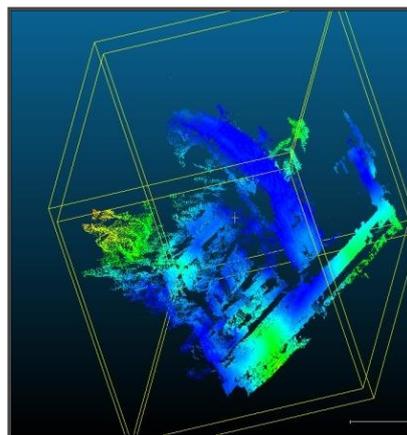


Figure 3.24 : Calcul comparatif des deux processus et superposition du résultat des deux méthodes (Cloud Compare)

Pour l'exploitation de la documentation 3D dans le domaine du patrimoine, la densification de surface réalisée prend en compte différentes couches (layer). La consolidation de ces couches sur la base de points communs et la reconstruction du modèle global 3D a fourni un bon résultat. Le couplage entre données laser scanner et photogrammétrie a permis de définir au mieux l'image virtuelle tridimensionnelle de l'objet. Néanmoins, la cotation des différentes pièces se fait par rapport à chaque face ou partie. Cela permettra d'utiliser des fichiers moyens en place mémoire. En effet, traiter en une seule fois un fichier de plus de 7 millions de points n'est pas une opération très judicieuse pour l'analyse des différents paramètres nécessaires à la documentation (profils, coupes,...).

Dans le tableau (3.18) suivant, on montre une comparaison très succincte permettant de placer un système de référence lié à une partie de l'objet (face arrière).

Méthode	Nuage Points	Triangles	Maillage	Précision	Coût
Photogrammétrie	850000	273055	Qualité moyenne	0.200 mm	faible
Lasergrammetrie	900000	Très dense	Bonne qualité	0.05 mm	fort

Tableau 3.18 : Résultats comparatifs Lasergrammetrie et Photogrammétrie

Les méthodes de densification de surfaces par voie photogrammétrique ont ouvert une nouvelle voie de mise en place de la documentation 3D relative au patrimoine de mesures industrielles. Les projets peuvent être menés à faible cout et dans des délais satisfaisants. Le calcul d'un modèle 3D du sujet peut subir plusieurs itérations afin d'atteindre une bonne exactitude. Les essais ont montré que trois itérations sont suffisantes pour l'obtention de la solution optimale.

3.4.4 Reconstruction des objets rapprochés

L'agrégation et la généralisation de l'information 3D sur l'objet nécessite une chaîne de traitement adéquate pour la mise en œuvre de la production de nuages de points denses.

Dans cette optique, l'outil *PhotoModeler Scanner* (PMS) est utilisé pour l'illustration d'un prototype de Système de Mesure Photogrammetrique (SMP).

La solution PMS présente de nombreux avantages :

- la chaîne de traitement est complète ;
- le géoréférencement des données est possible ;
- pérennité de la solution dans le temps ;
- une solution qui a fait ses preuves et qui a été utilisée pour la réalisation de nombreux projets ;
- interface de qualité ;
- interface conviviale ;
- réglages des paramètres avancés ;
- paramétrage des données relativement simple. En cas de doute sur la signification d'un paramètre, l'aide du logiciel apporte des réponses pertinentes.
- reconnaissance automatique de cibles codées, dont la taille est fonction de la taille du pixel projeté sur l'objet. Suite aux tests réalisés, nous avons noté certaines limites :

- le référencement des données reste problématique lorsque les projets sont volumineux (une centaine de photographies).

- la solution est payante : donc une licence est nécessaire.

L'étape du référencement des données a posé de nombreux problèmes lors des traitements. Le logiciel *Photo Modeler* gère mal cette étape lorsque les projets atteignent une centaine de photographies. Il est alors possible de travailler en sous-projets mais cela implique de lever sur le terrain plus de points d'appui, ce qui est contraignant. Pour pallier à ce problème, nous avons décidé de réaliser une simple mise à l'échelle du nuage de points et de l'exporter dans un logiciel tiers de CAO : système MapInfo. Le référencement des données peut alors être réalisé en externe, en utilisant la fonctionnalité *projection locale*. La méthode photogrammétrique est conseillée pour des sujets complexes et nombreux pour la restitution 3D, néanmoins la maîtrise des données qualitatives pour la métrologie industrielle reste un problème majeur. Le maillage donne une représentation très intéressante de l'objet 3D ; cependant il est nécessaire de passer par un traitement d'image pour une meilleure fiabilité métrologique. La démarche suivie pour la densification est représentée par la figure (3.25) :

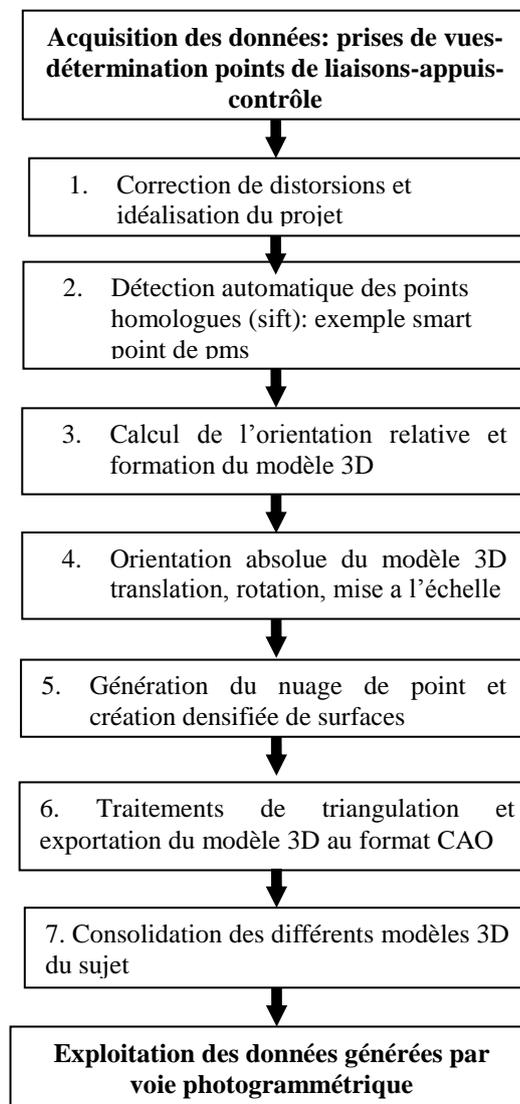


figure 3.25: Démarche globale PMS

3.5 Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre avait pour but d'appliquer les traitements photogrammétriques dans le domaine rapproché et d'en montrer les possibilités en métrologie. Fondamentalement les différents algorithmes d'étalonnage, d'orientation et les procédures informatiques en photogrammétrie rapprochée sont basés sur deux modèles fonctionnels : le modèle de colinéarité et le modèle de coplanarité. Bien que non linéaires, tous les deux sont résolus par l'intermédiaire de la méthode des moindres carrés, de ce fait exigeant la détermination des valeurs initiales pour les paramètres. Les différents ordres informatiques qui ont évolué au cours des années sont étroitement liés aux différentes approches pour la détermination de valeur initiale, ceci permet de maîtriser le calcul et l'incertitude pour garantir une traçabilité en métrologie. Une modélisation selon l'ordre de conception bien établi est souhaitable pour l'obtention d'une bonne qualité de rendu. Le niveau de modélisation sera étalé donc entre des traitements automatiques et des traitements semi automatiques.

Dans ce travail on a montré la flexibilité qu'a la photogrammétrie à mesurer des objets rapprochés avec une bonne rentabilité économique. Le gain sur la précision est basé sur une détection précise des cibles et de l'objet, des travaux ont permis de trouver des solutions très acceptables, cependant l'automatisation totale n'est pas souhaitable en industrie au regard de la complexité des objets. La gestion de la qualité en photogrammétrie permet une cohérence logique de la mesure et une qualité géométrique en ce qui concerne le sujet à définir. C'est également pour cette raison qu'on entend la justification pour les développements des solutions alternatives et intermédiaire de mesure. Finalement, la génération des valeurs initiales est un ennui nécessaire permettant de contrôler le saut technologique en améliorant le résultat final. Le traitement DLT à l'aide d'un modèle à 16 paramètres est un processus de contrôle sur des systèmes à très forte densité de points (nuages de points) permettant donc de définir des objets 3D avec une bonne exactitude. Les méthodes photogrammétriques apportent une dimension considérable en métrologie industrielle. L'utilisation des divers types de processus, et en particulier les aspects de l'intégration pour une meilleure définition des ajustements, est le plus utile pour plusieurs raisons en mécanique, en particulier dans la CFAO (Conception de Fabrication Assistée par Ordinateur). La complémentarité avec d'autres méthodes de mesures telles que la MMT est souhaitable pour enrichir les processus. Ceci complète les études dans l'intercomparaison et dans la technologie inverse pour atteindre des coûts moins onéreux.

Tester les performances du traitement DLT à l'aide d'un modèle à 14 et à 16 paramètres pour entamer la discussion autour du niveau du système d'acquisition et de traitement était pour ce travail une étape nécessaire. Les différentes applications ont été traitées et les résultats atteints confirment la capacité du modèle photogrammetrique dans la reconstruction 3D. La méthode DLT dans le traitement aussi bien en photogrammétrie éloignée que rapprochée est un processus pouvant agir dans l'acquisition, le contrôle et la calibration. D'un autre côté, la corrélation d'images et son approche pour appliquer des détecteurs est une méthode de traitement relative au niveau TOD (4^{ème} niveau) où il est question de densifier les primitives et de créer un nuage de points de l'objet à analyser. La rentabilité des systèmes photogrammétriques et la maîtrise du rapport qualité/prix ne sont plus mis en doute, on rappelle seulement que des études de faisabilité sont toujours nécessaires. Les résultats obtenus restent inférieur à 10^{-4} de la taille de l'objet et doivent respecter un nombre d'opérations itératives pour atteindre la précision escomptée.

Ces résultats restent tributaires du choix matériel et des conditions d'acquisition photographique c'est-à-dire d'une expérience avérée de l'exploitant. En effet, la variation des éléments de prise de vues (échelle, distance principale et base) s'avère déterminante pour le succès du traitement mathématique à l'aide du modèle DLT. La restitution de la géométrie d'un objet 3D avec la méthode DLT n'est pas un travail aisé. Cependant, on trouve des applications qui utilisent des surfaces locales dans des projets spéciaux. Les conditions pour appliquer une telle approche doivent regrouper :

- l'élimination des erreurs d'observation en résolvant des systèmes redondants.
- le traitement des paramètres de distorsion par la méthode rigoureuse [Hottier P., 1972].
- le calcul des coordonnées objets et l'estimation des écarts par des méthodes non linéaires.
- l'ajustement des traitements sur les points restitués et mise en place d'une adaptation numérique.

Dans le domaine de la photogrammétrie rapprochée, par exemple, il pourrait être précieux d'intégrer des blocs ajustés existants de la DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) dans un environnement d'évaluation et de contrôle. Ceci est d'autant plus vrai avec des systèmes de mesure microscopiques. Des systèmes métrologiques sont utilisés pour améliorer l'exactitude du positionnement de machines outils. Moylan et al [Moylan, 2009], définissent avec un rapport entre les mesures d'armature de métrologie et les coordonnées de la machine-outil l'exactitude du positionnement La planification dans un système de production est une nécessité permettant à chaque fois des innovations. On peut citer dans ce contexte, le système de production de Toyota (TPS), également nommé fabrication maigre, célèbre pour sa capacité à améliorer la productivité, la qualité, l'utilisation de l'espace, la concentration sur le consommateur, les suggestions et les résultats positifs des employés. Le contrôle en ligne est constitué d'abord par un étalonnage gestionnaire des différentes opérations du TPS [Mothersell, 2008]. Dans le modèle ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Inférence System) la comparaison du rendement du modèle 3D numérique reconstruit avec les différentes sections des données mesurées valide l'espérance que le modèle d'ANFIS permet la reconstruction de la surface réelle d'une manière satisfaisante [ZiMa, 2008].

La métrologie photogramétrique intègre les données de l'espace objet et celles liées à l'image. La recherche d'une solution unique et fiable n'est pas chose aisée, le choix de caméra, de station et de cibles bien configurées pour atteindre cette solution s'avère nécessaire. L'apport de la CED (corrélation épipolaire dense) est certainement d'une grande importance pour la restitution de modèles 3D. Cette technique largement utilisée dans le domaine rapproché de la photogrammétrie peut être très appréciable en métrologie industrielle. En effet pour des besoins de retro conception, le modèle 3D reconstruit est utilisé dans les études industrielles de construction et de productique. La corrélation s'avère géométriquement très performante car indépendante de la taille de l'objet et elle permet d'offrir des modèles issus d'ajustement par bande ou par faisceaux donnant lieu à une configuration globale fiable de l'objet. Le traitement pour la métrologie est validé pour chaque phase dont l'étalonnage, l'orientation externe et la restitution. On a vu que les erreurs se composent de façon très aléatoire et que le modèle final peut être très différent selon le choix des paramètres ; de ce fait une « calibration » globale s'avère nécessaire entre la scène et le système d'acquisition. Une bonne exactitude qualitative et quantitative est atteinte dans le processus global avec un facteur économique moindre.

En définitive, il semble que les procédés et le matériel utilisés dans ce travail soient bien adaptés aux relevés photogrammétriques des installations industrielles. La méthode semble prometteuse, cependant il faut faire une exception pour les pointés automatiques au sub-pixel. L'appareil digital Kodak Easyshare 7300 s'est également montré à la hauteur de la tâche puisque avec une résolution de 3.2 MP l'écart spatial est de 3mm. La précision obtenue, environ 1:2000° de la taille de l'objet est certainement inférieure à ce dont est capable une chambre métrique, mais la facilité d'utilisation de cet appareil et la rapidité d'obtention des données compense à notre avis ce désavantage. Une bonne planification du projet de mesure photogrammétrique donnera certainement de meilleures solutions. Il reste malgré tout de nombreux aspects à approfondir dans ce travail dont l'observation stéréoscopique pour des surfaces complexes. Cependant on peut dire qu'une bonne partie de la conception a été dégrossie pour des applications du type SMP-ZOD

Chapitre 4 : étude de faisabilité dans le génie maritime

4.1 Contexte-objectif

Comme processus, l'utilisation de la photogrammétrie en construction navale n'est pas un phénomène récent, en effet depuis le début des années 1980 on a vu les applications de cette technique s'étendre de plus en plus en industrie. Dans le contexte du génie maritime, les professionnels et industriels ont ressenti le besoin de s'équiper d'outils performants de relevé en engineering navale. L'objectif de cette étude étant de montrer l'intérêt des méthodes photogrammétriques de lever, de construction et de suivi dans le génie maritime. Lorsque les opérations métrologiques sont délicates ou impossibles à réaliser, la méthode photogrammétrique est souvent utilisée en tant que moyen indirect de mesure. Dans ce contexte, ostbye, [Ostbye et al, 1984] a présenté un projet photogrammétrique pour le contrôle en construction navale au congrès international de Rio de Janeiro en juin 1984; l'objectif étant de montrer l'adaptation de l'instrumentation et programmes (logiciels) aux requêtes des chantiers navals. La mise en œuvre du procédé de mesure et du traitement des données relatives au génie maritime sont subordonnés à la validation de critères de faisabilité. Dans cette quatrième partie on traite de l'ensemble de ces critères pour une utilisation rationnelle de la photogrammétrie dans les chantiers navals. Nous présentons le contexte général de la construction des navires dans les chantiers navals pour la compréhension et faciliter l'application de nouvelles techniques en Algérie.

En effet, une réorganisation des ports à la dimension des attentes des professionnels et industriels du domaine s'avère incontournable. En Algérie, un nouveau schéma organisationnel, une restructuration en adéquation avec les objectifs et un cadre juridique qui privilégie le principe de professionnalisation des activités des ports et de leur mise à niveau. La nouvelle organisation du G.I.C (Groupement d'Intérêt Commun des Entreprises de Gestion des Ports) s'inscrit dans le cadre d'une restructuration en profondeur en tant que service de mission publique de gestion du domaine public portuaire. Cette restructuration est étroitement liée aux multiples opportunités créées par l'ouverture du marché à l'économie mondiale. Elle nécessite la mise en place d'outils favorisant les activités liées à la pêche et la dotation des ports en installations et équipements afin d'assurer le développement de l'industrie portuaire. Elle requiert une logistique complexe de transport, d'acheminement, de conservation, de conditionnement en froid des produits de pêche, des ateliers et équipements de maintenance, de construction et de réparation des unités. Elle implique un recentrage des activités, orienté vers une meilleure satisfaction des professionnels de la pêche, qui vise l'amélioration de la rentabilité de l'outil de production, sa préservation et sa modernisation. Une description des chantiers du génie maritime et la présentation du processus de construction des navires sont nécessaires pour adapter la photogrammétrie aux besoins de la construction. La mesure aux chantiers nous renseigne sur les types de configuration afin de réaliser chaque niveau de modélisation.

L'imagerie numérique et les méthodes topométriques de relevé devant être intégrées à l'outil défini dans ce contexte. Les contraintes opérationnelles sont nombreuses mais trouvent des solutions par l'emploi de méthodes de mesure et de calcul exposés au fil du texte. La démarche est une proposition qui utilise le principe des faisceaux pour la définition d'un système de mesure photogrammétrique. Par ailleurs, la solution adoptée n'est qu'une ébauche permettant d'introduire le concept photogrammetrique dans le domaine du génie maritime.

4.2 Métrologie dimensionnelle

En métrologie, la nature de la pièce à mesurer et l'état de sa surface entrent en ligne de compte dans le choix de la méthode de mesure utilisable. Un capteur optique détectera plus facilement une pièce opaque, mais des méthodes sont disponibles pour mesurer des pièces transparentes. C'est principalement l'état de surface qui déterminera le choix de la méthode la plus appropriée. Avec une pièce rugueuse on utilisera plutôt la lumière diffuse, avec une pièce réfléchissante on utilisera la lumière réfléchie. La photogrammétrie industrielle intègre les données images et les données objet pour produire des documents métriques sur la pièce ou l'objet. Les conditions d'acquisition doivent être les plus favorables possibles (éclairage et contraste sur l'image).

On rappelle que dans tout projet d'ingénierie, le choix des spécifications de tolérance adéquates, est une opération d'une grande importance, lors des étapes de conception, fabrication ou contrôle.

L'analyse et la synthèse sont les deux problèmes les plus traités. Dès lors certains auteurs pensent qu'il faut encore élargir ce champ d'étude et ajouter les problèmes de mesure. De ce fait, on peut donner les définitions suivantes :

- L'analyse des tolérances représente l'opération de vérification des conditions fonctionnelles liées à la variation individuelle des pièces d'un mécanisme, et ce après avoir défini les tolérances, ainsi que la nature des spécifications (type).
- Par contre la synthèse peut prendre deux aspects. Le premier est la répartition et l'allocation des tolérances tout en respectant la fonctionnalité des mécanismes (conditions fonctionnelles à respecter). Le second est l'optimisation d'allocation des tolérances.

Un phénomène d'une grande importance que le concepteur ou le fabricant doit en tenir compte est celui de transfert. De ce fait, le transfert consiste à affecter les tolérances de la pièce en cours de fabrication en fonction des aptitudes de production, alors que l'évaluation des tolérances dépend des méthodes de mesure et d'interprétation par l'agent de contrôle. On peut supposer que le tolérancement est un élément directeur du cycle de vie d'un produit.

Dans ce qui suit, on va tenter d'établir les liens qui peuvent exister entre la « Conception » et la « Fabrication ». Le tolérancement des pièces en vue de leur assemblage est aujourd'hui un facteur majeur d'optimisation de la qualité, des coûts et du délai de conception et réalisation pour l'industrie de la mécanique. Cependant, les industriels et chercheurs spécialisés dans ce domaine s'accordent sur les lacunes et insuffisances des méthodes et outils que connaissent le processus de tolérancement et l'analyse des assemblages. A ce titre, des travaux souvent très "pointus" sont régulièrement réalisés pour certaines problématiques identifiées afin de faire face à ces lacunes et insuffisances. Ainsi donc, l'objectif de ce chapitre est non pas de proposer des solutions à une problématique particulière, mais d'abord de mettre en lumière le paysage global des difficultés et problèmes rencontrés en milieu industriel, ensuite de formaliser explicitement les besoins et attentes des industriels en thème d'amélioration des méthodes et outils du tolérancement et d'assemblage des pièces, ceci dans un environnement de pièces de grandes dimensions. L'exposé est illustré notamment par le décalage entre la modélisation 3D maintenant généralisée et les spécifications ISO d'origine 2D. En effet, les spécifications ISO sont aujourd'hui très insuffisantes pour garantir l'optimisation des assemblages, car une grande partie de sa réflexion porte sur l'analyse d'architectures des pièces élémentaires à assembler et non sur leur assemblage. L'analyse de processus de numérisation de pièces tridimensionnelles complexes n'est à ce jour pas totalement résolue notamment

d'un point de vue métrologique. Les développements présentés en photogrammétrie visent à déterminer les meilleures orientations et meilleurs positionnements possibles du capteur vis à vis de la pièce à mesurer en regard de ses spécifications. Pour cela, nous nous appuyons sur le concept de la visibilité et de travaux menés sur les incertitudes de mesure et du processus utilisé. Ils nous conduiront à déterminer les meilleurs points de vue possibles qui satisfassent la numérisation d'une pièce mécanique dans des conditions métrologiques optimales. Un exemple illustrera l'approche développée.

En outre, dans le but de fournir un outil d'aide à la planification d'un réseau de caméras pour la photogrammétrie, il est possible de déterminer en ensemble de configurations spatiales, orientations et positionnement, du capteur par rapport à la pièce à numériser. Le calcul de ces configurations se fait, bien évidemment, sous des considérations géométriques mais aussi métrologiques. En effet, à différentes étapes de la démarche, nous prenons en compte la qualité des nuages de points mesurés à travers des paramètres de densité et d'incertitudes de mesure.

Les exemples présentés dans le chapitre III montrent de fait la relation spatiale existante entre géométrie de la pièce et la métrologie. Des calculs ont été réalisés avec des discrétisations de la pièce et de la sphère unitaire plus fines. Si aujourd'hui nous sommes capables de déterminer positionnements et orientations du capteur, un certain nombre de manques existent. En particulier, nous pouvons citer :

- les dimensions de la pièce pour garantir une numérisation complète ;
- les dimensions du capteur pour les problèmes d'accessibilité ;
- les dimensions du champ de vue du capteur pour optimiser la prise de vues.

La nécessité de mettre en place un vocabulaire pour les besoins de la métrologie est incontournable. Il s'agit de donner un ensemble de définitions et de termes associés, en anglais et en français, pour un système de concepts fondamentaux et généraux utilisés en métrologie, ainsi que des schémas conceptuels illustrant leurs relations. Pour un grand nombre de définitions, des informations complémentaires sont données sous forme d'exemples et de notes (annexe A5).

Ce vocabulaire se propose d'être une référence commune pour les scientifiques et les ingénieurs -y compris les physiciens, chimistes et biologistes médicaux — ainsi que pour les enseignants et praticiens, impliqués dans la planification ou la réalisation de mesures, quels que soient le domaine d'application et le niveau d'incertitude de mesure. Il se propose aussi d'être une référence pour les organismes gouvernementaux et intergouvernementaux, les associations commerciales, les comités d'accréditation, les régulateurs et les associations professionnelles.

Les concepts utilisés dans les différentes approches de la description des tests sont présentés ensemble. Les organisations membres du JCGM peuvent sélectionner les concepts et définitions en accord avec leurs terminologies respectives.

Néanmoins, ce vocabulaire vise à la promotion d'une harmonisation globale de la terminologie utilisée en métrologie. La recommandation INC-1 (1980) du CIPM sur l'expression des incertitudes suggère que les composantes de l'incertitude de mesure soient groupées en deux catégories, type A et type B, selon qu'elles sont évaluées par des méthodes statistiques ou par d'autres méthodes, et qu'elles soient combinées pour obtenir une variance conformément aux règles de la théorie mathématique des probabilités, en traitant aussi les composantes de Type B en termes de variances. L'écart-type qui en résulte est une expression de l'incertitude de mesure. Une description de l'approche « incertitude » a été détaillée dans le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)* (1993, corrigé en 1995), qui met l'accent sur le traitement mathématique de l'incertitude à l'aide d'un modèle de mesure explicite supposant que le mesurande puisse être caractérisé par une valeur par essence unique. De plus, dans le *GUM* aussi bien que dans les

documents de la *CEI*, des indications sont données sur l'approche « incertitude » dans le cas d'une lecture unique d'un instrument étalonné, une situation qui se rencontre couramment en métrologie industrielle.

La valeur fournie par un instrument de mesure ou un système de mesure présente une indication qui peut être présentée sous forme visuelle et numérique. Elle est souvent donnée par la position d'un pointeur sur un afficheur pour les sorties analogiques, par un nombre affiché ou imprimé pour les sorties numériques, par une configuration codée pour les sorties codées, ou par la valeur assignée pour les mesures matérialisées. Une indication et la valeur de la grandeur mesurée correspondante ne sont pas nécessairement des valeurs de grandeurs de même nature. Pour l'imagerie on peut distinguer les pixels des grandeurs métriques.

Les schémas conceptuels de l'annexe A5 sont destinés à fournir :

- une représentation visuelle des relations entre les concepts définis et ceux désignés par le cahier de charge;
- une possibilité de vérifier si les définitions présentent des relations adéquates ;
- un cadre pour identifier d'autres concepts nécessaires ;
- une vérification du caractère suffisamment systématique des termes.

Il convient toutefois de rappeler qu'un concept donné peut être décrit par de nombreux caractères et que seuls les caractères essentiels distinctifs sont inclus dans la définition. La surface disponible sur une page limite le nombre de concepts qu'il est possible de présenter d'une manière lisible, mais tous les schémas sont interconnectés en principe comme indiqué dans chaque schéma par des références entre parenthèses à d'autres schémas. Les relations utilisées sont de trois types conformément à l'ISO 704 et à l'ISO 1087-1. Pour deux de ces types, les relations sont hiérarchiques et associent des concepts super ordonnés et subordonnés. Les relations du troisième type sont non-hiérarchiques. L'annexe A5 est un exemple de conception.

La relation hiérarchique désignée comme *relation générique* (ou relation genre-espèce) associe un concept générique et un concept spécifique ; ce dernier hérite de tous les caractères du concept générique. Les schémas représentent ces relations sous la forme d'une arborescence où une branche courte terminée par trois points indique qu'il existe un ou plusieurs autres concepts spécifiques qui ne sont pas représentés et où une branche en gras indique une dimension terminologique séparée.

Un terme entre parenthèses désigne un concept qui n'est pas défini dans le vocabulaire, mais qui est considéré comme un concept premier généralement compréhensible. La *relation associative* (ou relation pragmatique) est une relation non hiérarchique qui associe deux concepts ayant des liens thématiques d'une certaine sorte. Il y a de nombreux sous-types de relations associatives, mais tous sont indiqués par une double flèche. Par exemple, la figure (4.1) illustre ce type de schéma de conception.

Pour éviter des schémas trop compliqués, toutes les relations associatives ne sont pas représentées. Les schémas mettent en évidence que les termes dérivés qui n'ont pas toujours une structure systématique, le plus souvent parce que la métrologie est une discipline ancienne, dont le vocabulaire a évolué par accréation plutôt que d'avoir été créé *ex nihilo* sous la forme d'un ensemble complet et cohérent.

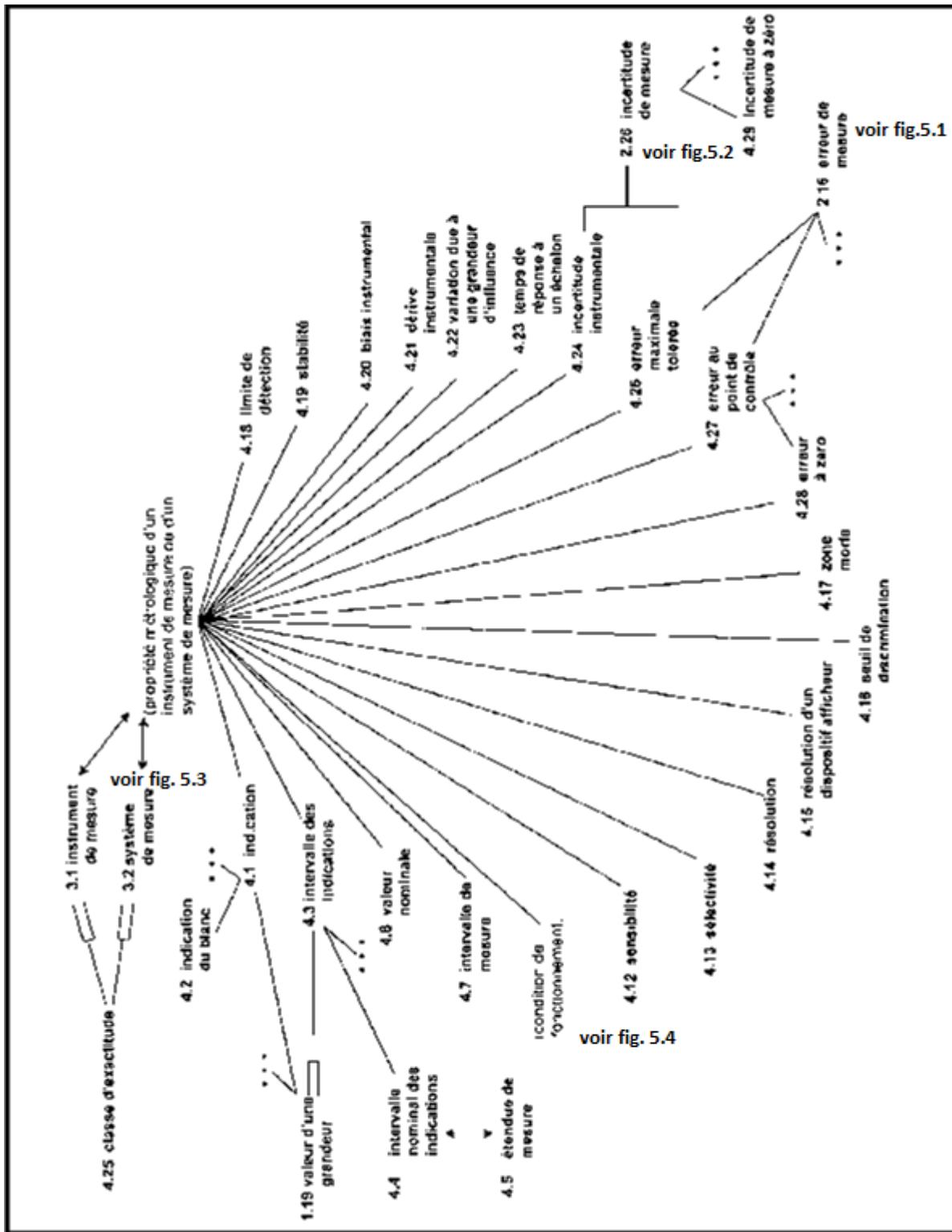


figure 4.1 : Schéma conceptuel pour la partie « propriétés métrologiques d'un instrument de mesure ou d'un système de mesure »

4.3 Présentation du processus de construction des navires

Aujourd'hui, la compétition internationale, dans un marché où la capacité est excédentaire, fait que l'entreprise portuaire est engagée dans une lutte pour devenir un chantier naval performant. En production, la validation de ces objectifs se traduit par l'application de solutions innovantes et passe par une étude méthodique des points faibles du processus de fabrication afin de les améliorer dans les meilleurs délais.

Aussi, dans le domaine de la mesure, le besoin d'analyse s'est rapidement fait sentir et le service Qualité et Précision exprime le besoin de se doter d'un logiciel d'expertise dimensionnelle adapté à la construction navale. Cette partie décrit le contexte industriel du milieu de la construction navale. La première thèse fait état de l'organisation de l'entreprise, la seconde expose les techniques actuelles de construction des navires et émet un diagnostic concernant les dysfonctionnements de montage. De plus, l'accent est mis sur le contexte industriel dans lequel sont menées les opérations de mesure à tous les stades de production et décrit les moyens opérationnels mis en œuvre pour assurer la construction de la coque métallique des navires. Pour avoir une idée sur la capacité d'un chantier et afin de mener à bien les différentes phases de construction d'un navire, cinq spécialités sont regroupées selon des compétences spécifiques et interviennent dans le cadre des activités les concernant. Le tableau (4.1) résume les informations clés permettant de caractériser l'ensemble des spécialités.

Type de spécialité	Rôle
Coque Métallique	Assurer la conception, la fabrication et le montage de l'ensemble des pièces qui constituent la structure et l'enveloppe métallique du navire
Energie et Fluides	Assurer le montage et le bon fonctionnement des installations énergétiques.
Electricité	Assurer le montage des installations électriques à bord et au prémontage en partenariat avec les autres spécialités
Peinture et Anticorrosion	Assurer la protection du navire contre les agressions du milieu environnant et intervenir sur les problèmes d'étanchéité
Emménagement	Assurer la décoration intérieure du navire en fonction des impératifs de style et de coût donnés par l'armateur

Tableau 4.1 : Caractéristiques des spécialités

4.3.1 Processus de construction

La construction de la coque métallique des navires à passagers consiste à usiner, à former et à assembler des pièces qui vont de quelques kilogrammes à plusieurs tonnes. Cette construction s'inscrit dans un processus industriel où tous les moyens des spécialités sont mis en œuvre afin de livrer les navires dans les délais contractuels. Pour avoir un ordre d'idée, le paquebot R31 de type *Millenium*, avec 13 ponts et 1000 cabines a été construit en environ 24 mois. La coque métallique a demandé à elle seule 10 mois de réalisation. Le diagramme de la figure (4.2) résume les étapes du processus de construction.

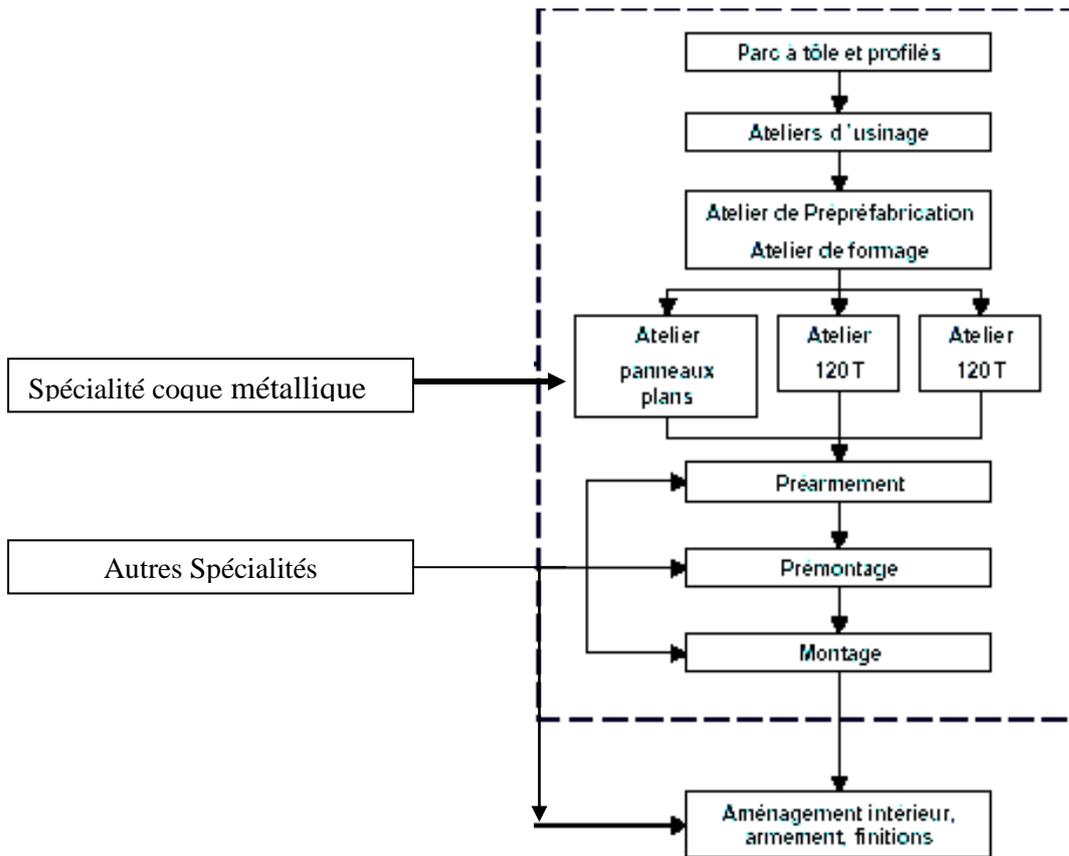


figure. 4.2 : Processus de construction [Manuel P., 2000]

4.3.2 Conception en blocs

La spécialité Coque Métallique a l'entière responsabilité de la partie étude des structures constituant les navires. Pour des raisons de productivité, l'exemple des chantiers de l'Atlantique (France) utilise depuis 1997 le principe de la construction modulaire en blocs. Cette technique consiste à diviser le navire en blocs, eux mêmes résultant de l'assemblage de panneaux. Selon sa taille, un navire se compose d'environ 30 à 60 blocs représentant 150 à 400 panneaux.

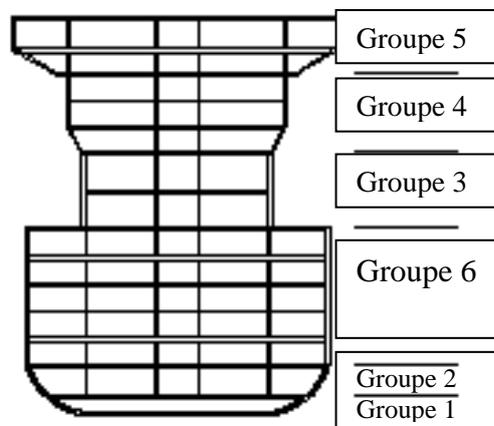


figure 4.3 : Construction par groupe de famille [Manuel P., 2000]

Le groupe 1 correspond aux panneaux de fond ou ballast. L'assemblage des groupes 1 et 2 forme les blocs de fond. Les groupes 2, 3, 4, 5, 6 constituent les blocs de pont. Les groupes 7, 8 et 9 (non représentées sur la coupe) correspondent respectivement aux blocs d'extrême avant et arrière.

Cette méthode de conception permet une gestion continue de l'outil de production et de la charge de travail. En effet, elle offre la possibilité de commencer la construction d'un navire dès la fabrication des premiers panneaux. Dès lors, l'ordonnancement, la coordination et la logistique jouent un rôle primordial pour le bon déroulement du montage. La construction modulaire impose la présence de surlongueurs verticales et longitudinales pour permettre l'ajustement des blocs. La faisabilité et l'homogénéité du montage sont subordonnées à l'existence de ces excès de matière qu'il faut découper sur mesure. La tendance actuelle va en faveur de la suppression des surlongueurs. Le découpage de celles-ci au montage est en effet long et onéreux. Des progrès significatifs ont été réalisés dans ce sens.

Cependant, la construction des blocs à la coupe juste, c'est à dire en respectant exactement leurs cotes théoriques, exige la maîtrise du dimensionnel de leurs éléments constitutifs tout au long du cycle de production.

4.3.3 Prémontage et montage

▪ Généralités

Le prémontage est l'opération qui consiste à assembler par soudage un ensemble de panneaux afin de former un bloc à plusieurs niveaux. Les blocs ainsi obtenus sont à leur tour assemblés dans la forme de construction, ils constituent le navire. Cette ultime étape de la construction de la coque métallique s'appelle le montage à bord.

On distingue plusieurs types de blocs :

- **les blocs standard** de 3 ou 4 niveaux constitués de 6 à 8 panneaux plans (famille 3,4,5,6 et 7). Ils pèsent en moyenne entre 120 et 400 tonnes et représentent 52% du total des blocs du navire,

- **les blocs de fond** constitués par assemblage de deux panneaux de fond (ou ballast) et de deux panneaux de premier entrepont en forme. Ils représentent 40% du navire et pèsent jusqu'à 450 tonnes,

- **les blocs complexes** qui sont composés des panneaux de charpente avant et arrière (bulbe - propulseurs d'étrave et panneaux de fond machine - ligne d'arbre). Ils sont fortement charpentés avec des formes arrondies et peuvent atteindre des tonnages allant jusqu'à 500 tonnes. Ils représentent 8% du navire. Malgré les disparités de forme, de volume et de poids, l'assemblage d'un bloc au prémontage et son montage à bord répond aux mêmes impératifs quelque soit son type.

▪ Impératifs de montage

L'assemblage des éléments de structure doit répondre à deux impératifs. Le premier impératif est lié à la stabilité statique et dynamique du navire. Cette stabilité est assurée par les correspondances des éléments de renforts longitudinaux (lisses, hiloires, carlingues, etc.), transversaux (barreaux, varangues, etc.) et verticaux (épointilles, pied de portique, etc.) qui assurent le transfert des efforts dans la structure. La règle régissant le positionnement des éléments impose que la structure qui reçoit supporte au minimum la demi-épaisseur de la structure ajustée. Le deuxième impératif est dicté par le procédé d'assemblage des éléments par soudage. En effet, cette technique impose de ménager des jeux de soudures de 5 à 9 mm entre les éléments à assembler. Les deux règles énoncées ci-dessus sont valables aussi bien dans le cadre

de l'assemblage des panneaux que pour le montage des blocs à bord. D'une manière générale, la construction métallique doit répondre aux normes définies dans les standards de qualité de la coque en acier pour les navires de la marine marchande.

▪ **Méthodologie**

Le mode opératoire relatif au réglage des panneaux constituant un bloc et son assemblage peut se faire de la manière suivante:

Phase 1 : Assemblage du niveau 1

La première opération consiste à implanter le chantier destiné à soutenir le futur bloc (plots et fers U, équerres, tins, etc.) conformément au plan établi par le service des Méthodes Logistiques Montage. Les panneaux constituant le niveau 1 peuvent alors être mis en place. Sur chacun d'eux sont tracées les lignes de références (axe du bloc ou parallèles et couple de référence ou parallèles). Le réglage longitudinal et transversal est effectué en imposant respectivement la cote entre les parallèles aux couples de référence et l'alignement axial des panneaux. La distance totale séparant les deux abouts est mesurée puis comparée à sa valeur théorique. En fonction de l'écart obtenu et de l'analyse du joint de soudure, il est procédé à un ajustement ou à une réparation.

Phase 2 : Assemblage du niveau 2

La mise en place du niveau 2 commence par le traçage des lignes de références sur les nappes des panneaux. Le réglage transversal est assuré par la mise en concordance axiale des panneaux. Le réglage longitudinal consiste ici à imposer aux abouts extrêmes du niveau 1 et du niveau 2 d'appartenir à un même plan vertical. Suivant la faisabilité de l'assemblage, il est procédé à un ajustement ou une réparation. Le joint de soudure et la longueur hors tout du bloc sont contrôlés.

Phase 3 et 4 : Assemblage des niveaux 3 et 4

L'assemblage des niveaux 3 et 4 est réalisé en suivant les mêmes principes que ceux mis en œuvre lors de l'assemblage du niveau 2 :

- réglage transversal à l'axe,
- *réglage longitudinal en fonction de la verticalité des abouts extrêmes.*

Phase 5 : Contrôle dimensionnel du bloc

Il a pour but de contrôler la conformité dimensionnelle du bloc et détecter les défauts susceptibles de pénaliser le montage du bloc à bord. Plusieurs mesures sont alors exécutées :

- géométrie complète du niveau supérieur,
- géométrie complète de l'about,
- hauteurs d'entreponts ou hauteurs par rapport à l'origine,
- cotes entre parallèles de réglage.

▪ **Montage à bord**

Le montage à bord des blocs issus du prémontage est réalisé en utilisant des principes de construction identiques à ceux mis en œuvre lors de l'assemblage. Les blocs sont réglés à bord en tenant compte de deux paramètres :

- alignement des axes,
- conformité de la longueur entre abouts.

Eu égard aux masses et aux efforts mis en jeu, le respect des correspondances de structures prend ici une importance capitale.

4.3.4 Les techniques topométriques

▪ Le Référentiel objet

Toutes les corporations travaillant depuis la conception jusqu'à la réalisation et l'achèvement du navire expriment les informations concernant le dimensionnel des éléments dans un système unique lié à l'objet navire. Ce référentiel orthonormé direct est défini comme suit :

- axe X : suivant l'axe longitudinal du navire, orienté de l'arrière vers l'avant,1
 - axe Y : suivant l'axe transversal du navire, orienté de tribord vers bâbord,2
 - axe Z : suivant le sens des élévations, orienté du bas vers le haut,3
- origine : fixée dans le plan de la quille du navire (origine OH) à l'intersection de l'axe longitudinal et de l'axe vertical du gouvernail.

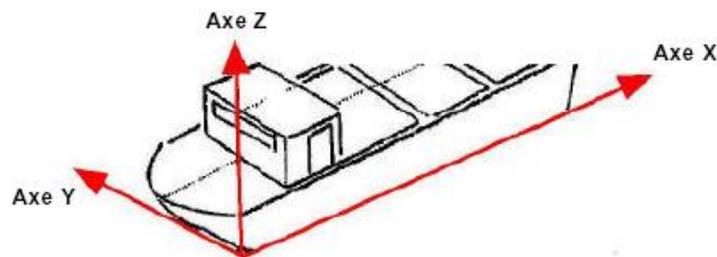


figure 4.4 : Système de coordonnées navire

Les mesures réalisées au tachéomètre s'appuient sur l'acquisition d'angles horizontaux et verticaux et de distances. Ces informations sont transformées en coordonnées cartésiennes et exprimées dans le repère navire tel que présenté précédemment.

Des logiciels d'acquisition retiennent la solution typique d'orientation 3 points,2 points et 1 point (3-2-1) pour fixer les sept paramètres de la transformation permettant d'exprimer les mesures dans le référentiel objet. La méthode d'orientation est basée sur les points suivants :

- trois (3) points minimums définissent un plan (XY, YZ ou XZ),
- deux (2) points minimums définissent une direction (X, Y ou Z),
- un point (1) définit l'origine du référentiel.

Ainsi, sous réserve d'une orientation correcte dans le repère navire, les coordonnées mesurées peuvent directement être comparées aux cotes théoriques disponibles sur les plans de réalisation.

▪ La Géométrie hors tout

La géométrie hors tout désigne :

- les longueurs entre abouts à bâbord et à tribord,
- les cotes entre couples de références,
- les cotes entre les parallèles et les abouts à l'avant et à l'arrière,
- les cotes entre parallèles à la jonction des panneaux,
- les demi-ouvertures à bâbord et à tribord pour chaque about.

La majeure partie de ces informations sont mesurées à l'aide d'un tachéomètre. L'orientation est alors basée sur les lignes de références tracées sur la nappe de pont (axe et couple de référence).

- **Géométrie des abouts**

La géométrie des abouts est obtenue par la méthode des plans parallèles. Elle constitue l'opération de mesure préalable au calcul de la découpe des surlongueurs et au montage des blocs à bord. La mesure a pour but de déterminer les cotes réelles entre le couple de référence et les abouts en des lieux caractéristiques du bloc (joint de nappe, cloisons verticales, raidisseurs, etc.). Ces cotes sont exprimées depuis un plan vertical parallèle à l'about du bloc défini par une lunette de théodolite. Les valeurs sont lues sur un réglelet maintenu horizontalement et disposé aux points clés.

- **Erreurs de montage**

Afin de respecter les impératifs de construction, les différentes corporations procèdent à des adaptations lors du montage à bord qui génèrent des surcoûts représentant en moyenne 10% du coût total. Une bonne gestion de l'espace industriel permet de minimiser ce surcoût [Combe J., 1990].

- **Décalages de bordés**

Les bordés, jouant le rôle d'enveloppe extérieure du navire, sont lorsqu'ils ne sont pas encore soudés sujet à déformations. La correspondance entre bordés n'est pas directement prise en compte lors du montage. Des décalages peuvent apparaître et rendre impossible le soudage des bordés entre eux. Ces décalages font l'objet d'une procédure de redressement à bord. En effet, les bordés de muraille et de fond sont systématiquement équipés de goujons soudés à environ 15 cm de l'about. Les goujons sont répartis tous les 40 cm sur la longueur du bordé. Ainsi, les goujons créent des points d'ancrages sur lesquels les charpentiers peuvent agir pour redresser à chaud et mettre en correspondance les tôles de bordés.

- **Décalages des habillages**

Les habillages primaires et secondaires assurent la transmission des efforts à l'intérieur de la structure métallique du navire. Les correspondances entre habillages doivent impérativement être respectées lors du montage (règle de la demi épaisseur). Le mode opératoire basé sur un réglage transversal qui tient compte uniquement de l'axe ne prend pas en considération les positions relatives des habillages. Ainsi, les carlingues axiales se font toujours face alors que des décalages peuvent exister à bâbord et à tribord. La réparation associée à ce type de désordre géométrique est relativement lourde à mettre en œuvre. Elle consiste à désolidariser partiellement les éléments présentant un défaut d'alignement de leur plan d'attache pour permettre de les réaligner avec leurs vis à vis. Plus le décalage transversal est important plus longue est la distance à dessouder le long de l'élément. Le rapport entre les deux grandeurs est de 100 (ex : 10 mm de décalage entraîne une réparation de 1 m).

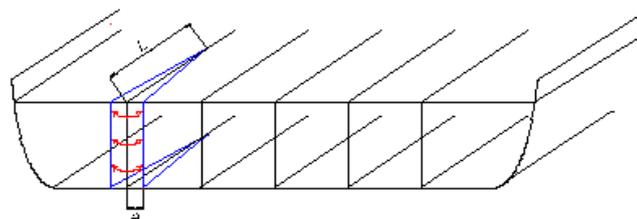


figure 4.5 : Influence d'un décalage transversal de carlingue sur la longueur à réparer.

4.4 Utilisation de la photogrammétrie et analyse des résultats

4.4.1 Problématique

Les panneaux et blocs produits par les ateliers de préfabrication peuvent présenter des déformations au niveau du bordé qui entraînent des difficultés d'assemblage. Aucune méthode de mesure et de représentation de ces déformations n'a été mise en place aux chantiers de construction navale malgré les enjeux qui en découlent pour améliorer la qualité des modules des navires. Le développement d'outil d'analyse graphique des déformations est un souci majeur pour les services de la qualité. La visualisation des déformations de bordé constitue un premier pas dans les applications photogrammétriques.

▪ Enjeux de la méthode

La démarche consiste dans un premier temps à adapter les résultats de la photogrammétrie aux besoins de la métrologie navale. La mise en place d'un référentiel unique n'est pas toujours évidente pour une analyse détaillée et précise. Les écarts observés et amplifiés dans un second temps représentent les déformations de l'objet (coque métallique) tel qu'il est construit par rapport à la forme théorique initialement prévue. Ne disposant pas de projet réel de construction de navire nous essayons de montrer en fonction de ce qui a été dit auparavant comment intégrer le processus photogrammetrique dans ce type de construction. En effet il s'agit :

- D'analyser la faisabilité technique de la méthode,
- D'étudier la référence et le gabarit du contexte de production,
- D'associer le processus de mesure aux autres méthodes.

4.4.2 Sensibilisation à l'analyse photogrammétrique

Les mesures réalisées par les différents services compétents sont avant tout orientées vers la production. Les relevés sont utilisés lors de la construction des panneaux et des blocs et servent dans certains cas de base aux indicateurs de suivi de qualité. Les outils d'analyse disponibles ne sont quasiment pas utilisés par les protagonistes de la mesure. En effet, les impératifs de production, le manque de formation et la complexité des outils sont autant de freins à l'étude critique des relevés. D'une manière générale, la spécialité Coque Métallique manque cruellement d'outils d'analyse adaptés susceptibles de fournir des solutions aux dysfonctionnements rencontrés. Ce travail permet d'apporter une première réflexion dans la mise en place du processus d'analyse photogrammétrique. La restitution des modèles en planimétrie selon le plan choisi (X,Y), (X,Z) ou (Y,Z) donne une estimation sur la qualité des montages. La déformation est une fonction déduite de l'écart spatial $E(X,Y, Z)$ entre le projet et sa réalisation. Il existe par ailleurs un autre type d'application dont la tendance à résoudre quelques problèmes du génie maritime n'est pas moindre. En effet, on cite l'aménagement portuaire, la cartographie du littoral et le suivi des chantiers [Cherifi et al, 2005].

4.4.3 Principes généraux

▪ Acquisition des données

Le seul procédé d'acquisition de coordonnées disponibles, maîtrisé et adapté aux chantiers navals est la tachéométrie. Ce procédé optique de mesure sans contact permet de calculer les coordonnées de chaque point caractéristique définissant l'objet à partir de mesures d'angles

(horizontaux et verticaux) et de distances. La méthode photogrammétrique complète ce procédé pour l'analyse des surfaces élémentaires ou globales.

Sur chaque point est positionnée une cible qui matérialise les points servant le traitement photogrammétrique. Les cibles seront collées sur les objets en utilisant l'aimant afin de conserver la surface de l'objet intacte. La précision attendue d'un tel procédé de mesure est de l'ordre de 1.5 à 2 mm dans des conditions optimales d'utilisation (visée unique sur chaque point, mesures réalisées à l'extérieur, distance mètres à ondes porteuses infrarouges).

- **Adaptation**

- **Points durs et Point d'appuis**

Les Point d'Appuis déterminent la capacité réelle de la précision des traitements, un choix judicieux de la configuration et la nature des points influencera le résultat final. Pour la coque métallique, les points durs sont des points remarquables de la structure du bloc situés à l'intersection des tôles. Ils sont de ce fait peu sujets aux déformations et reflètent au mieux la géométrie des renforts constituant le bloc. Par conséquent, ils désigneront le canevas des points d'appuis pour le levé photogrammétrique. Les plans de réalisation sont renseignés des cotes positionnant les renforts de structure à l'intérieur du bloc. Ainsi, on dispose des coordonnées de chaque point dur dans le repère navire.

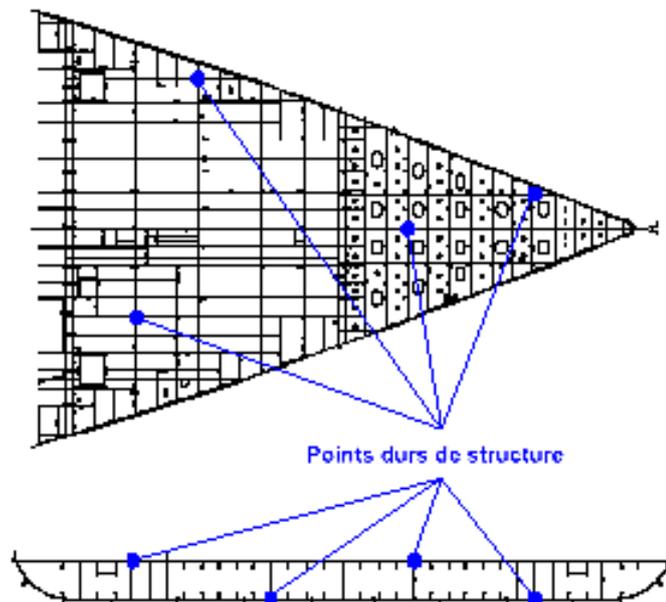


figure 4.6 : localisation des points durs sur une nappe de pont et sur un about

- **Points de détail**

Les points de contrôle et les points à lever sont des indicateurs de la bonne marche de la procédure et de la conformité de l'objet par rapport au modèle théorique. La modélisation d'un about ou d'une section de bloc impose de relever un certain nombre de points répartis sur l'objet définissant au mieux sa forme réelle. Étant donné les dimensions importantes des objets à modéliser et des ordres de grandeurs des déformations (quelques dizaines de millimètres au plus), le nombre de points à mesurer est relativement important.

En mesurant en moyenne un point tous les 50 cm le long du bordé, la forme de l'objet est correctement modélisée et le nombre de points reste raisonnable (environ 100 pour un about et 60 pour une section). Le pas d'échantillonnage doit être diminué dans les zones où l'objet présente beaucoup de forme (étrave du bulbe, ronds de ballast, etc.).

▪ **Changement de repère**

Les coordonnées des points durs sont déterminées dans le repère de levé et connues dans le repère navire. Le changement de repère en trois dimensions exige la détermination de sept (7) paramètres :

- trois translations,
- trois rotations,
- un facteur d'échelle.

Les points durs étant matériellement reliés entre eux par des tôles, ils forment un réseau de points figés et indéformables. Le nombre minimal de données nécessaires à la détermination des paramètres de changement de repère sont au nombre de trois points connus dans les deux systèmes. Le traitement de la surface globale de la coque métallique par voie photogrammétrique est souhaitable pour ce type de contrôle. La triangulation par faisceau, le traitement par modèles indépendants sont des processus largement utilisés en industrie.

▪ **Ajustement**

La méthodologie retenue impose une surabondance de données dans les calculs. Un nombre de données supérieur au minimum d'informations doit être introduit pour permettre une compensation globale relative aux paramètres de changement de repère. Ainsi, la réalité physique de l'objet est mieux reflétée et les éventuelles erreurs peuvent être détectées. En effet, un simple calage sur deux points pourrait être faussé si l'un des points est mesuré sur une déformation locale par exemple. Cette méthode permet de calculer des résidus pour chacun des points relevés qui donnent une indication sur la qualité du calage. Celle-ci est caractérisée par la valeur de l'EMQ (Ecart Moyen Quadratique). L'EMQ englobe et traduit deux notions différentes, à savoir la qualité des mesures d'une part et la conformité géométrique de la structure d'autre part.

4.5 Photogrammétrie et procédés

Dans ce travail, on s'intéresse à l'intégration de la photogrammétrie en génie maritime. En effet, il existe plusieurs applications relatives à l'aménagement portuaire, l'aménagement littoral et la construction des navires. Chacun selon le besoin et l'échelle d'abstraction. Pour illustrer l'approche photogrammetrique nous définissons deux grands ensembles de domaines à savoir l'aménagement des ports et la construction navale. La photogrammétrie en zone littorale développée par les services du SHOM pour des besoins cartographiques et photo bathymétriques a atteint des précisions altimétriques variant entre 0.5 et 2 mètres [AF 1989]. D'un autre côté l'intégration des résultats dans un SIG (système d'information géographique) permet d'établir une plate-forme d'analyse et de gestion spatiale. La gestion portuaire de Mostaganem est un exemple concret sur l'apport des outils spatiaux dans le génie maritime [Cherifi et al, 2005]

A partir des problèmes exposés ci-dessus et des différentes réflexions sur la complexité de la tâche, plusieurs questions sont posées à la mise en place dans le domaine du génie maritime :

- Quels sont les aspects qui s'impliquent dans le développement du système photogrammétrique ?
- Comment pourrions-nous développer un bon critère pouvant juger notre configuration ?

- Où doit on placer les cameras afin d'obtenir une erreur minimale dans les mesures tridimensionnelles ?
- Quelle méthode d'optimisation pourrait-on utiliser pour le placement des cameras ?

Un déplacement au port d'Oran s'est avéré nécessaire pour répondre en partie à ces questions. Des mesures faites à ce sujet permettent de placer la photogrammétrie comme technique d'acquisition très efficace, notamment en matière de coût et délais. En première approximation, la photogrammétrie complète les techniques classiques de mesure en construction. Il est possible de classer cet apport en deux types définis par les principes de mesures photogrammétriques : éloigné et rapproché.

4.5.1 Photogrammétrie éloignée : le Port d'Oran

Le premier résultat est celui des traitements photogrammetriques sur un couple d'Oran par la méthode DLT. On distingue deux grands ensembles de calculs: Les calculs approchés et les calculs précis. Le couple de photographies utilisées sont à l'échelle 1/10.000^e avec une distance principale 153,81 mm. (Source: INC-1981). Lorsqu'on observe le volume des données à gérer au niveau d'un port et son voisinage on constate qu'il y a beaucoup d'aspect liés à la localisation des entités spatiales et ceux relatifs à la construction navale. Dans ce contexte la photogrammétrie éloigné s'avère une bonne alternative pour la gestion, le suivi et la prise de décision. Entre les vues terrestres figure (4.6a et 4.6b) et la projection cartographique de la figure (4.7) il existe une bonne série de modèles à mettre en place pour la gestion de l'espace portuaire. Qu'il s'agisse d'aménagement portuaire, de protection de l'environnement ou de contrôle métrologique en construction navale, la photogrammétrie apporte des solutions très acceptables.



a)



b)

figure 4.7 : Vue générale du port d'Oran et quai Est

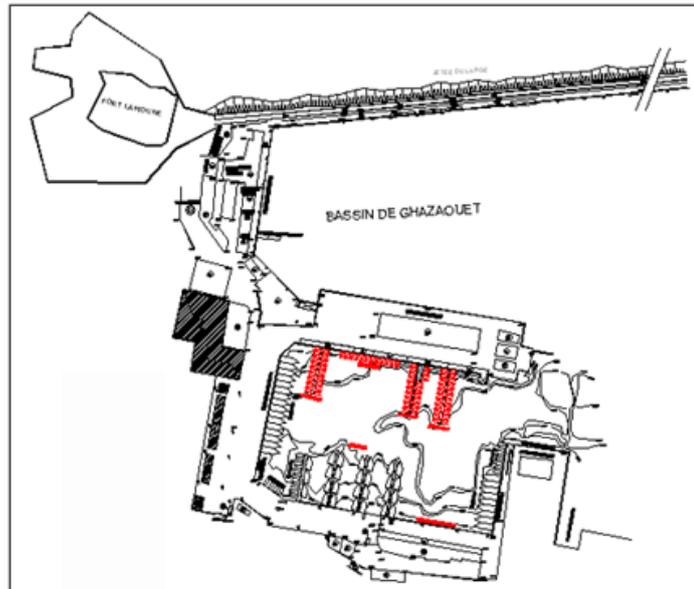


Figure 4.8 : Plan d'aménagement du port d'Oran

Résultats de la démarche

La photo aérienne de la figure 4.9 représente une partie du port d'Oran sur le cliché 118. Un fichier de données traitées FTP (Fichier Topométrique Portuaire) en trois dimensions est extrait pour des essais de visualisation et de contrôle. Une image aérienne permet de mieux suivre les activités industrielles du port en intégrant différents types de données. Les écarts obtenus dans le tableau (4.2) montrent que la méthode est très fragile pour assurer l'auscultation sur les ouvrages, par contre elle permet de donner une bonne approche pour le suivi et l'aménagement des ports ; notamment le positionnement des caméras.



figure 4.9 : Photographie aérienne sur le port d'Oran (cliché 118)

N° Point	X (m)	Y(m)	Z(m)
2033	-2.216	1.883	1.051
2018	0.557	0.704	-1.978
2019	1.804	-1.188	-1.631
2519	0.043	1.291	-0.015
2518	-0.281	-0.314	-0.017
3562	0.018	-0.737	-0.261
6022	0.303	-0.835	2.589
6032	-0.295	-2.393	0.596
6045	0.427	1.304	-0.19

Tableau 4.2 : Résultats de la 'DLT' pour le couple 118-119.

La rédaction d'un tableau d'assemblage des photographies aériennes donne une première approche pour la cartographie des zones portuaires. La reprise du Modèle Numérique de Terrain dans le contexte spatio-temporel est une condition nécessaire pour la gestion du niveau portuaire, figures (4.10) et (4.11). La réalisation du plan utilise à chaque fois l'information topométrique du terrain pour mettre en place des réseaux de surveillance ou des programmes d'auscultation sur des zones sensibles.

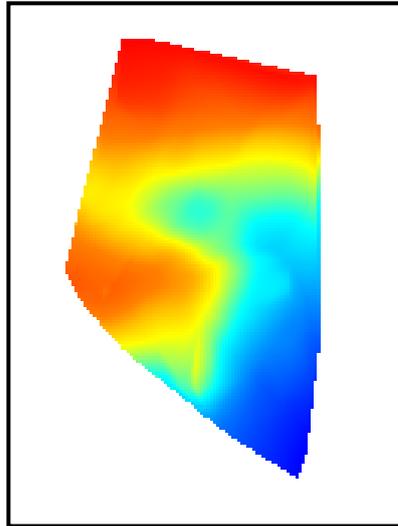


figure 4.10: MNT réalisé par un système CAO

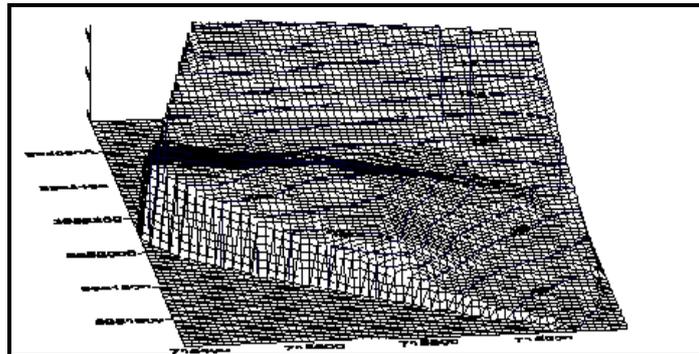


figure 4.11 : Intégration des mesures photogrammétriques (microstructures) et création d'un Fichier Topométrique Portuaire (FTP)

Une approche intégrée pour la création de photomodèles adaptés à quelques problèmes de reconstitution de surfaces 3D a permis d'utiliser le principe de la DLT comme démarche d'orientation et de calage [Lucas P., 2006]. Le Fichier Topométrique Portuaire (FTP) et l'organisation de photomodèles donnera quelques résultats sur la gestion spatiale du port.

4.5.2 Photogrammétrie rapprochés

Les résultats obtenus dans le chapitre trois (3) illustrent la faisabilité de la photogrammétrie rapprochée dans le génie maritime. Le mode de reconstitution (restitution 3D) adopté est défini en offline pour les besoins de cette thèse. En construction navale, il est impératif d'avoir un système de reconstitution au mode on-line. Les choix du système, son étalonnage et sa mise en service font partie d'un projet de planification et de mesure.

▪ **Transformation et importation des points de détails**

Jusqu'à présent, les coordonnées sont mesurées et exprimées dans le repère de levé. Afin de pouvoir comparer ces coordonnées aux valeurs théoriques, elles doivent être transformées et exprimées dans le repère navire. Les paramètres de transformation calculés au préalable à partir des points durs permettent d'effectuer le changement de repère. Ainsi, l'ensemble des points de détails subissent la transformation. Les points de détails peuvent alors être importés au sein du graphique contenant le plan théorique de l'objet à étudier (chapitre 3).

▪ **Visualisation et amplification des déformations**

Les écarts entre les points de détails transformés et leurs homologues sur l'objet sont déterminés au moyen d'une méthode graphique. Pour chaque point, la valeur de l'écart est mesurée sur la perpendiculaire à l'objet passant par le point considéré. Pour permettre une interprétation aisée du graphique final, les écarts sont amplifiés de telle sorte qu'ils apparaissent en taille réelle quelque soit l'échelle du tracé. Le principe d'amplification des déformations est basé sur le tracé d'une surface interpolée à partir de points photogrammétriques. La figure (4.12) exprime cette démarche. C'est un traitement entre les points d'appuis, les points de contrôles d'une part, les points de contrôles et les points de détail d'autre part. Un modèle filaire et une modélisation MNS représentent le résultat final du traitement. La conformité étant assurée par le concepteur de l'étude et l'expression de la déformation ΔE sera de la forme :

$$\Delta E = E - \delta E \text{ avec ; } E, \text{ Ecart spatial constaté; } \delta E, \text{ biais global sur le traitement.}$$

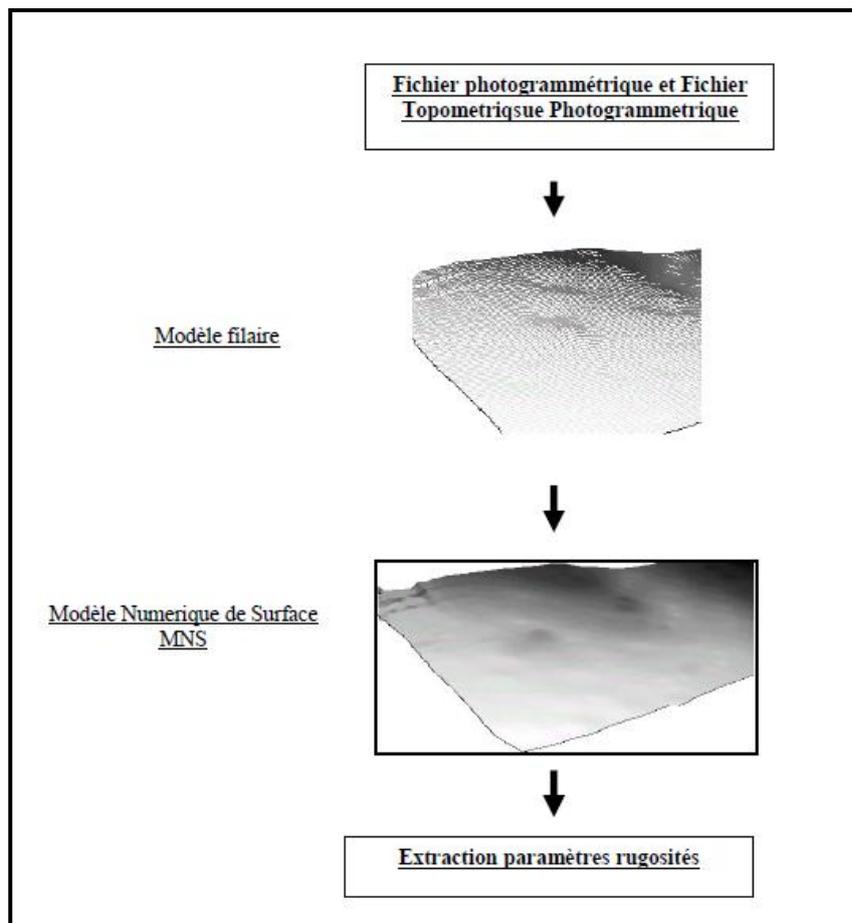


figure 4.12 : Amplification des déformations

4.6 Définition d'un système de mesure photogrammétrique

4.6.1 Aspect théorique

▪ Projection

Tel qu'il est présenté au chapitre 3, le module de traitement photogrammétrique nécessite un calcul de changement de repère selon le système navire ajusté par la méthode des moindres carrés. Pour faire face à cette particularité et anticiper les évolutions futures du programme, le module doit satisfaire ce changement et son ajustement associé selon les 3 dimensions. Les paramètres qui interviennent sont liés aux données du chantier naval, dont :

- L'organisation des ateliers,
- La nature des pièces à contrôler,
- Le système de référence navire, système objet, et le système image.

Préalablement à l'exécution des calculs, les coordonnées théoriques et les coordonnées relevées doivent faire l'objet d'une projection dans le but d'annuler les paramètres de transformation indésirables. La configuration des prises de vues face aux objets utilise un éloignement rapproché et un éloignement important selon le cas et la situation. La convergence et la position latérale des axes de prises de vues sont d'un apport certain dans la définition du prototype. Le tableau récapitulatif permet d'illustrer les résultats obtenus (voir tableau 3.5, chapitre 3).

▪ Changement de repère

La finalité du changement de repère envisagé est d'obtenir les paramètres de transformation qui permettent d'exprimer les coordonnées d'un pont connu dans le repère de mesure (repère généré par l'orientation préalable) au sein du repère navire (repère théorique). On cherche à passer du repère de mesure vers le repère navire.

En notant (x_i, y_i, z_i) les coordonnées d'un point (i) dans le repère de mesure et (X_i, Y_i, Z_i) les coordonnées de ce même point dans le repère navire, le changement de repère s'écrit ainsi sous forme matricielle :

$$\left. \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = T + R \cdot \lambda \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \right\} \quad (4.1)$$

Avec, T le vecteur de translation des origines, R la matrice de rotation des axes et λ un facteur d'échelle entre les deux systèmes ($\lambda=1$ en général pour une similitude spatiale correcte).

$$\left. \begin{aligned} X_i &= T_x + (\cos \beta \cos \gamma)x_i + (\cos \beta \sin \gamma)y_i - (\sin \beta)z_i \\ Y_i &= T_y + (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \gamma \cos \alpha)x_i + (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma)y_i + (\sin \alpha \cos \beta)z_i \\ Z_i &= T_z + (\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma)x_i + (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma)y_i + (\cos \beta \cos \alpha)z_i \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$\left. \begin{aligned} X_i &= T_x + \Delta M \\ Y_i &= T_y + \Delta N \\ Z_i &= T_z + \Delta P \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Avec :

- T_x, T_y et T_z , les paramètres de translation amenant l'origine du repère de mesure sur l'origine du repère navire,
- α, β, γ les paramètres de rotation amenant respectivement les axes x, y et z du repère de mesure sur le repère navire,
- $\Delta M, \Delta N, \Delta P$ les corrections de repère fonctions de α, β et γ .

La triangulation par faisceaux permet de raccorder les points de détail au système navire en passant par un ajustement global des observations. Une telle approche permet de contrôler par exemple la coque métallique du navire.

▪ **Ajustement par la méthode des moindres carrés**

Les relations d'observations sont directement déduites des formules de changement de repère énoncées précédemment. Les notations suivantes sont retenues, tableau (4.3) :

Observations	Paramètres	Résidus
n: nombre d'observations	ü: valeur approchée du paramètre u	\Leftrightarrow : \hat{V}_i valeur ajustée du résidu
i: indice des observations		
f _i ; g _i ; h _i	û valeur ajustée du paramètre u	

Tableau 4.3 : Notation des paramètres

Le système des relations d'observations s'écrit alors comme suit :

$$\left. \begin{aligned} \hat{f}_i &= \hat{T}_x + (\cos\hat{\beta} \cdot \cos\hat{\gamma})x_i + (\cos\hat{\beta} \cdot \sin\hat{\gamma})y_i - (\sin\hat{\beta})z_i - X_i = \\ \hat{g}_i &= \hat{T}_y + (\sin\hat{\alpha} \sin\hat{\beta} \cdot \cos\hat{\gamma} - \sin\hat{\gamma} \cos\hat{\alpha})x_i + (\sin\hat{\alpha} \sin\hat{\beta} \cdot \sin\hat{\gamma} + \cos\hat{\alpha} \cos\hat{\gamma})y_i + (\sin\hat{\alpha} \cos\hat{\beta})z_i - Y_i = \\ \hat{h}_i &= \hat{T}_z + (\cos\hat{\alpha} \sin\hat{\beta} \cdot \cos\hat{\gamma} + \sin\hat{\gamma} \sin\hat{\alpha})x_i + (\cos\hat{\alpha} \sin\hat{\beta} \cdot \sin\hat{\gamma} - \sin\hat{\alpha} \cos\hat{\gamma})y_i + (\cos\hat{\alpha} \cos\hat{\beta})z_i - Z_i = \\ &= \hat{V}_{x_i} \\ &= \hat{V}_{y_i} \\ &= \hat{V}_{z_i} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Les paramètres sont : $\hat{T}_x, \hat{T}_y, \hat{T}_z, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$,

Le dimensionnement et la linéarisation du processus sont nécessaires pour afficher le résultat recherché. Comme dans le chapitre 3, il s'agit de résoudre l'équation :

$$AX = B + V \quad (4.5)$$

Avec, **A** la matrice (n,7) des dérivées partielles, **X** la matrice (7,1) des corrections d'ajustement aux paramètres, **B** la matrice (n,1) des termes constants et **V** la matrice (n,1) des résidus. Par hypothèse, la valeur des poids est fixée à 1 et la condition des moindres carrés permet d'optimiser les paramètres de la transformation pour obtenir une visualisation des images compatibles avec la réalité.

4.6.2 Aspect technique

Il existe plusieurs facteurs contraignants pour appliquer la photogrammétrie. Les aspects liés à l'objet, au milieu et aux moyens sont aussi importants que la mise en place du processus de mesure. En effet, pour la construction navale, l'exploitation depuis la conception des navires jusqu'à l'approvisionnement des matières et l'ordonnancement des tâches nécessite une démarche permettant de mettre en place un parallélisme entre les données études et le réel. Une transformation des données théoriques issues de la CFAO et la CAO dans un référentiel unique permettra une simplification des lectures et des résultats du processus photogrammétrique.

A titre d'exemple, les conventions concernant la définition exacte des objets décrits dans les fichiers de dessin sont les suivantes :

- en transversal, les lignes représentent toujours les arêtes de tôle situées les plus près de l'axe,
- en élévation, les lignes représentent toujours les arêtes de tôle situées en dessous de la nappe de pont,
- pour les bordés, les lignes ou courbes représentent toujours les arêtes intérieures des tôles (celles tournées vers l'intérieur du navire).

Ces conventions (ou gabariages) sont à prendre en compte lors du choix de l'emplacement des points à relever afin qu'une comparaison avec le théorique soit possible. Toujours dans le domaine de la coque métallique les contraintes liées à l'objet apparaissent lors du montage et des relevés. Pour cela, les bouts relevés sont des objets de dimensions relativement importantes qui, dans le cas des paquebots, mesurent environ 26 m de large sur des hauteurs variant de 1.60 à 10 m. De plus, le procédé d'assemblage des éléments de structure implique la réalisation d'un joint de soudure à l'intersection des tôles. Ce cordon de matière recouvre le lieu géométrique remarquable et interdit le positionnement correct des cibles. En pratique, il apparaît que l'acquisition simultanée des deux coordonnées d'un même point dur de structure est impossible à mettre en œuvre. La solution retenue consiste à mesurer deux points situés proches du point dur et de fixer dans les calculs la coordonnée que l'on cherche à mesurer pour chacun d'eux.

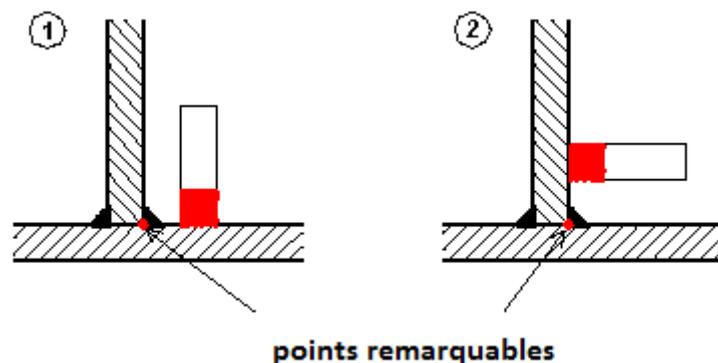


figure 4.13. Relevé de point dur en deux temps

Chaque point mesuré autorise alors l'écriture d'une équation dans le système des relations d'observations à résoudre en utilisant la méthode d'ajustement des moindres carrés. Une étude de faisabilité des méthodes photogrammétrique s'avère intéressante pour élucider quelques cas particuliers.

D'un autre côté, les contraintes liées au milieu sont relatif à la gestion de l'espace industriel, la visibilité des scènes des objets et l'analyse en temps réel. En effet, les sites de mesure depuis lesquels il est possible de mesurer les panneaux de fonds sont avant tout dédiés à la production. Les opérations y sont réalisées en temps masqué (pendant le travail d'autres corporations) ce qui peut nuire à leur qualité et dans certains cas rendre impossible leur exécution. Ainsi, le recul existant face à un about varie entre 2 et 15 m dans certaines unités de production. Ces contraintes doivent être prises en compte pour définir une méthode de relevé applicable dans le plus grand nombre de cas.

▪ Approche Méthodologique

- Orientation préalable

L'utilisation des tachéomètres offrent la possibilité de créer un repère de mesure orthonormé direct à partir de la définition d'un plan, d'une ligne et d'un point. Cette procédure est communément appelée orientation. La méthode explicitée ici commence par une orientation préalable dans le repère de mesure standard en construction navale : le repère navire.

Depuis une station située au sol, le repère navire peut être défini sommairement de la façon suivante :

- **plan** : un plan (YZ) passant par 4 à 6 points situés aux extrémités des renforts longitudinaux,
- **ligne** : une ligne Y positif passant par 2 points situés sur la rive de la nappe de pont, dirigée de tribord vers bâbord,
- **point** : un point situé à l'intersection du renfort axial et de la nappe de pont.

Une attention particulière doit être portée à la définition du plan. En effet, le changement de repère 3D prévisible lors des traitements ne corrigera d'aucune manière les erreurs de projections dues à une mauvaise inclinaison du plan. De ce fait le système d'équation utilise en abondance les points d'appuis (points durs) pour assurer une solution définitive donnant une vision réaliste de la configuration objet.

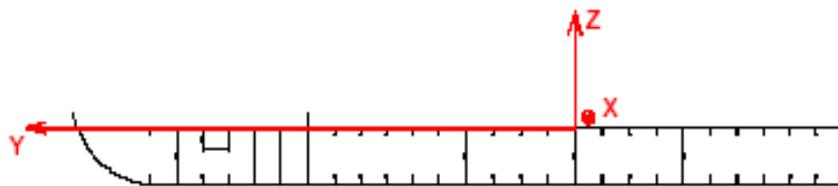


figure 4.14 : Orientation préalable dans le repère navire

L'orientation préalable dans le repère navire offre principalement deux avantages :

- Elle permet d'effectuer un contrôle direct lors du levé sur les valeurs des coordonnées mesurées en les comparant aux cotes disponibles sur les plans,
- Elle permet d'introduire des valeurs approchées nulles dans le calcul d'ajustement par moindres carrés (les paramètres subissant alors de petites variations).

- **Relevé des points durs**

Ce relevé s'effectue en disposant des cibles sur les éléments de structure à proximité des points remarquables connus dans le repère théorique. Ces points durs servent de points d'appui pour le changement de repère. Un minimum de 10 points connus selon trois dimensions et répartis idéalement sur l'objet est conseillé pour obtenir un calage correct. En effet, le temps d'acquisition reste alors raisonnable et la redondance des observations autorise un calcul d'ajustement significatif. Cependant, il faut veiller à conserver un équilibre dans la répartition des coordonnées figées. L'idéal est de relever les points par paire de sorte à imposer autant de valeurs selon l'axe Y que selon l'axe Z.

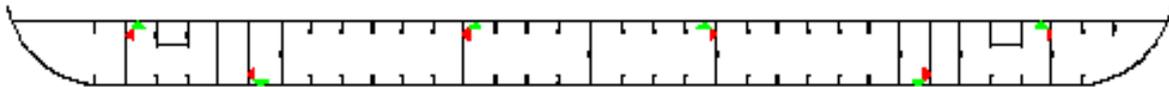


figure 4.15. Répartition idéale du relevé de 12 points de calage

- **Relevé des points de détail**

Le relevé des points de détail a pour but de déterminer la forme réelle de l'objet afin de la comparer à sa forme théorique. Dans cet objectif, il convient de relever pour un panneau de pont:

- environ 50 points sous la nappe de pont,
- environ 60 points à l'intérieur du bordé.

Les points sont répartis tous les 50 cm et peuvent faire l'objet d'un pointage dans la tôle pour permettre de les localiser ultérieurement : c'est l'opération de présignalisation.

- **Configurations de levé**

La méthode et les contraintes liées au milieu permettent d'envisager deux configurations de levé selon le recul disponible face aux abouts. La station en batterie utilisée lorsque la station ne peut pas être positionnée face à l'about car les angles d'incidences sur les cibles sont trop importants et sortent de la plage d'utilisation préconisée par le constructeur (incidence maximale : 45°). Elle s'applique lorsque la distance de recul disponible est inférieure à 10 m. Il faut envisager une position latérale qui permet de viser les cibles sous des angles moindres. La station peut alors être déportée sur le côté du panneau et être placée à environ 2m de l'about. La seconde configuration est utilisée dans les cas où le recul est supérieur à 10 m, la station peut être placée face à l'about. L'opérateur dispose ainsi d'une vision globale de la zone à relever.

4.6.3 Définition du système

▪ **Approche Méthodologique**

Les solutions sont nombreuses mais pas toujours satisfaisantes, par conséquent notre approche repose sur la dernière catégorie : modélisation à partir de données 2D réelles (image-photographie). Dans cette approche on dégage trois niveaux de modélisation :

- Un premier niveau concerne l'acquisition de données réelles 2D : dans cette partie il y'a la relation (sujet / camera) qui doit être modélisée.
- Un second niveau concerne les traitements qui sont de différents types : toutes les transformations entre l'image et la scène de l'objet doivent être modélisées avec prise en compte de l'aspect visuel.

- Un troisième niveau concernant la reconstitution (restitution 3D) : enfin il y'a l'aspect de la forme des résultats et de son impact pour la mesure qui doit être analysé. Le schéma suivant exprime ces différents niveaux.

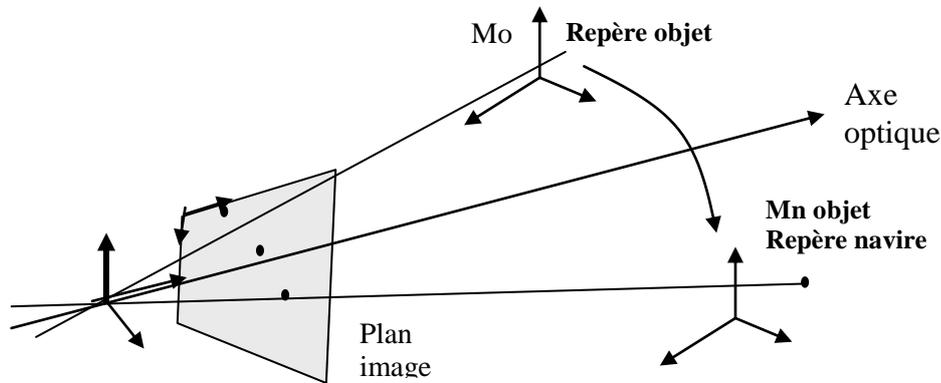


figure 4.16 : Systèmes de Références (mesure et contrôle)

La méthode D.L.T présente l'avantage d'utiliser un matériel de prises de vues peu onéreux. Le type de caméra est disponible sur le marché et l'utilisation peut-être rapide si on définit correctement le système de l'espace objet. A titre d'exemple cette méthode a été utilisée dans le contrôle des tunnels à vent [Liu, 2000].

Un premier niveau concerne la mise en place du réseau de prise de vues afin d'aboutir à une précision géométrique optimale sur l'objet. Ceci, nous oriente vers une optimisation d'un processus de mesure tenant compte des différentes contraintes limitant la disposition spatiale. En effet plusieurs points peuvent intervenir dans cette disposition :

- Le nombre et le type de caméras utilisées,
- Le nombre de cibles visibles dans chaque caméra,
- La position et l'orientation de la prise de vues pour chaque caméra,
- Le facteur d'échelle du système photogrammétrique,
- Le dispositif de mesure sur les images (algorithmes),

On note que toutes ces considérations et contraintes sont fortement corrélées. Dans ces circonstances nous abordons la phase modélisation sur trois niveaux :

- Le niveau 1 est celui de l'abstraction et de l'acquisition dont le principal objectif est de fournir une image haute qualité : rayonnement, lumière et spectre entre sujet et caméras.

Il faut tenir compte des contraintes limitant l'environnement où l'on désire placer les caméras telles que cela a été décrit précédemment :

- ⇒ L'espace de travail
- ⇒ L'illumination ou l'éclairage
- ⇒ La visibilité précise des cibles,

- Le niveau d'abstraction 2 concerne le positionnement, l'échelle et l'orientation des caméras. En effet, pour mesurer tous les plans qui appartiennent à l'objet un certain nombre de contraintes présentes au moment de la prise de vues limitent l'espace de solutions, on cite :

- ⇒ Le champ de vision,
- ⇒ La zone de mise au point,
- ⇒ La résolution des caméras,

▪ Le niveau d'abstraction 3 concernera la restitution, la reconnaissance et la reconstitution des scènes et des objets. La forme des résultats doit être parfaitement corrélée avec les applications demandées. On distingue plusieurs solutions selon différents cas dont on cite :

- ⇒ Restitution de la scène ou de l'objet,
- ⇒ Reconnaissance d'objets,
- ⇒ Reconstitution d'objets dans une scène.

La complexité augmente donc de façon importante en fonction du nombre de contraintes, du nombre de cameras et de la forme de l'objet. Ainsi l'automatisation du processus de conception d'une modélisation de ces différents aspects devrait être accomplie afin que l'ensemble du traitement soit suivi par un processus de simulation par ordinateur. L'organigramme suivant exprime le principe de cette modélisation.

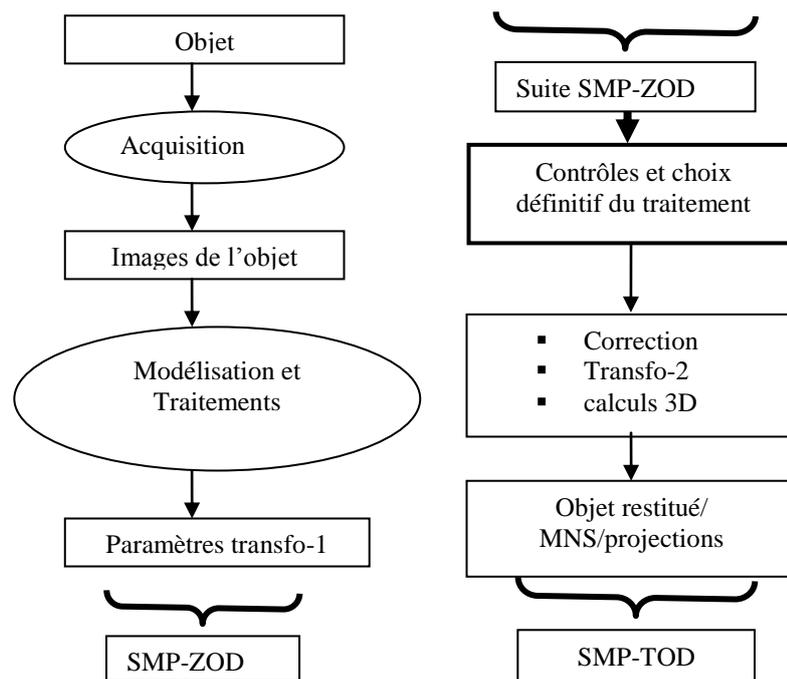


figure 4.17 : Différentes phases de traitement

Des exemples-test permettent d'illustrer l'organigramme de la figure (4.17) en montrant les traitements nécessaires après la formation du modèle photogrammétrique et le calcul 3D. Dans ce contexte on cite les applications suivantes :

- Application machine outil utilisant la camera Toshiba
- Application sur la tôle avec Kodac Easyshare
- Application canon EOS 5D (20/28 mm) pour le restituteur Wild B9.
- L'application concernant la machine outil n'a pas atteint un degré de restitution de niveau TOD. La planification du processus d'acquisition a donné des résultats de reconstruction que sur une partie du modèle. La méthode SIFT reste incomplète lorsque les positions des clichés sont faiblement convergentes figure (4.18)

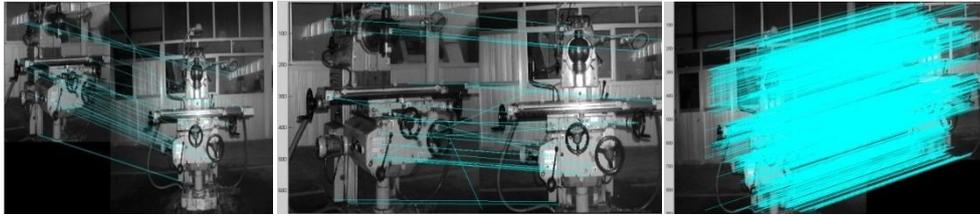


figure 4.18 Application machine outil (SIFT)

D'un autre côté la restitution des entités externe à l'objet génère un bruit qui fausse le calcul 3D du modèle. Les figures (4.19) montrent le maillage et le sujet restitué avec quelques défauts de produit. La méthode RANSAC permet d'éliminer ce bruit pour une visualisation et une représentation 3D du sujet.



Figure 4.19 Maillage et restitution « fraiseuse »

- **Application de la méthode RANSAC sur l'objet tôle**

L'application sur une tôle ondulée avec une camera amateur Kodac Easyshare est intéressante à plus d'un titre. L'objet étant de forme planaire on utilise la méthode RANSAC pour obtenir le meilleur plan possible. Le calcul 3D étant satisfait par voie photogrammétrique, on utilise la méthode RANSAC pour optimiser le fichier numérique obtenu en utilisant un critère géométrique représentant l'épaisseur. La figure (4.18) résume, sous la forme d'un organigramme, le processus de détection d'un plan par la méthode RANSAC. La triangulation selon la méthode des TIN (triangulated interpolation network) et le plan moyen (en vert) sont représentés par la figure (4.19).

Pour expliquer le processus du traitement RANSAC nous revenons à la formule (2.32) du chapitre 2.

$$(1-p) = (1-W^3) \Rightarrow N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-W^3)} \quad (4.6)$$

L'application de l'algorithme de RANSAC sous forme de processus séquentiel permet d'extraire tous les plans principaux constituant la tôle métallique. La solution apportée au problème cité ci-dessus consiste à adapter la fausse estimation de W (probabilité) au fur et à mesure que les différents « Ensembles Consensus » sont déterminés. Cette idée d'adaptation de la valeur W (probabilité) à travers les ECs trouvés peut être appliquée répétitivement pour déterminer la valeur du nombre d'itérations N avant le démarrage de la prochaine itération. Ainsi, le nombre d'itérations final sera déterminé par la valeur de W issue de l' EC du meilleur plan. Un autre avantage de cette adaptation est qu'elle permet de réduire le nombre d'itérations nécessaires.

▪ **Initialisation de la primitive géométrique « plan »**

Dans cette phase, l'algorithme procède à l'initialisation des paramètres du plan à partir de 3 points. Initialiser un plan signifie déterminer sa normale et sa distance par rapport à l'origine du repère. Algébriquement parlant, un plan est un sous-espace de dimension 2 d'un espace vectoriel sur un corps \mathbb{K} . On parle aussi dans ce cas d'un plan vectoriel. Un plan est toujours défini par deux vecteurs \vec{u} et \vec{v} non colinéaires. De la sorte, un vecteur appartient au plan si et seulement si il est une combinaison linéaire de \vec{u} et \vec{v} .

Il y a trois possibilités de définir un plan selon les grandeurs disponibles :

- par combinaison linéaire des deux vecteurs directeurs du plan,
- par la définition d'un vecteur normal et d'un point
- par la définition de 3 points (coplanaires) non colinéaires.

Etant donné que les plans sont déterminés par des points coplanaires définis par leurs coordonnées cartésiennes, c'est la troisième possibilité qui est mise en œuvre.

Le processus de définition d'un plan (*PL*) est le suivant : On sélectionne trois points non colinéaires $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$ et $M_3(x_3; y_3; z_3)$. Donc, pour qu'un point quelconque $M(x; y; z)$ appartienne au même plan que celui passant par les trois points M_1, M_2 et M_3 , les trois vecteurs $(\overrightarrow{M_1M}, \overrightarrow{M_1M_2}, \overrightarrow{M_1M_3})$ doivent être coplanaires, c'est-à-dire que leur déterminant doit être nul, comme l'exprime l'équation (4.7).

$$\det(\overrightarrow{M_1M}, \overrightarrow{M_1M_2}, \overrightarrow{M_1M_3}) = \begin{vmatrix} x - x_1 & x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y - y_1 & y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z - z_1 & z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (4.7)$$

Ainsi le plan (*PL*) s'écrit :

(*PL*):

$$(x - x_1) \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} + (y - y_1) \begin{vmatrix} x_3 - x_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix} + (z - z_1) \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (4.8)$$

Ou encore l'équation du plan peut s'écrire : $ax + by + cz + d = 0$ (4.9)

Avec :

$$a = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}, b = \begin{vmatrix} x_3 - x_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix}, c = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} \text{ et } d = -x_1a - y_1b - z_1c$$

Où : (a, b, c) : normale au (*PL*)

d : distance par rapport à l'origine du repère

Une fois que les paramètres initiaux d'un plan sont déterminés, on peut chercher les points du nuage lui appartenant ou s'en rapprochant.

▪ **Détermination des points « valables » composant un plan**

L'objectif de cette phase est de déterminer les points susceptibles d'appartenir ou de représenter le plan, dont les paramètres ont été définis dans l'initialisation précédente. Pour ce faire, la distance euclidienne de chaque point $M(x_0, y_0, z_0)$ du nuage au plan (*PL*) est calculée par la formule (4.10).

$$dist(M, PL) = \frac{|ax_0 + by_0 + cz_0 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4.10)$$

Cette équation donne l'écart entre un point et un plan, écart qui peut ensuite être confronté à la tolérance τ de l'Ensemble Consensus (cf. équation 3.7). Les distances des points appartenant effectivement au plan (*PL*) sont théoriquement nulles. On peut donc écrire leur ensemble comme suit :

$$E_0 = \{M \in NPTS : / \text{dist}(p, PL) = 0\} \quad (4.11)$$

Où $\text{dist}(p, PL)$: distance du point p au plan PL

En réalité, les données acquises par le biais d'un scanner laser terrestre ne sont pas immédiatement ajustables par des modèles mathématiques. Non seulement dans la réalité les murs ne sont pas parfaitement plans, mais en plus, les nuages ont habituellement une épaisseur non négligeable. Le bruit provient de l'état de surface et de la couleur de l'objet, mais aussi de l'opération de consolidation. C'est pourquoi une certaine souplesse dans l'ajustement par des modèles mathématiques doit être instaurée.

Dans notre cas, cette souplesse se traduira par l'utilisation d'une valeur seuil (tolérance) permettant de définir l'épaisseur d'une zone tampon autour du plan moyen théorique considéré. On appellera « points valables » l'ensemble des points situés à l'intérieur de cette zone tampon figure (4.18).

Evidemment, la qualité et la précision des plans détectés dépendront fortement de la tolérance choisie au départ. (Hartley et Zisserman, 2003) affirment que cette valeur peut être calculée si l'on suppose que l'erreur de mesure suit une distribution normale. C'est pourquoi, la distribution statistique des écarts au plan a été analysée.

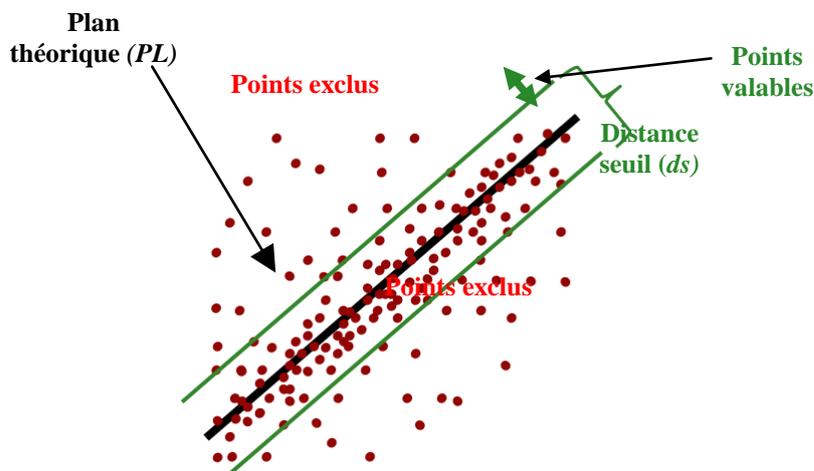


Figure (4.20). Zone tampon d'épaisseur ds définissant les points valables associés à un plan (vue de profil)

Distribution spatiale des distances à un plan

Pour s'assurer de la normalité de la distribution des distances séparant les points du plan théorique, il faut vérifier que les caractéristiques d'une distribution normale sont vérifiées, à savoir la symétrie par rapport à l'axe $x=m$, deux points d'inflexion aux points d'abscisses $m \pm \sigma$, un aplatissement fonction de σ et une probabilité de 1, égale à l'aire comprise entre la courbe et l'axe des abscisses.

La figure 4.19 montre un histogramme présentant des écarts qui suivent une distribution gaussienne comme cela a été confirmé par (Hartley et Zisserman, 2003). En effet, la distribution est bien symétrique par rapport à la valeur zéro (dans cet exemple, on a $\mu = -4.1569 * 10^{-10} \approx 0$ et $\sigma = 0.0025$ donc $\text{dist} \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$).

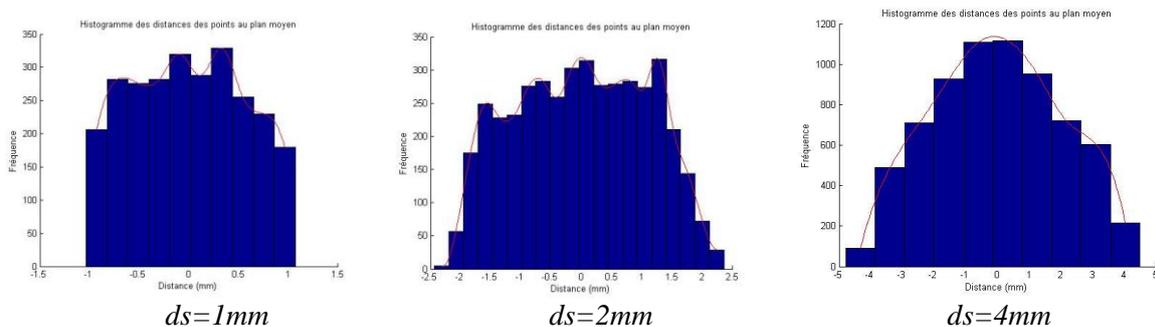


figure 4.21. Histogramme des fréquences de distribution statistique des distances algébriques des points au plan ($ds=1,2$ et 4mm). La courbe rouge passant par les sommets des barres de fréquence.

La variance permet de décrire la dispersion des observations d'un échantillon autour de la valeur la plus probable (la moyenne ici). C'est donc tout naturellement que l'on est amené à s'intéresser, dans le cas de la distribution normale, à la distribution de la somme des carrés des écarts des observations de l'échantillon à la moyenne. Si on suppose que les observations ne sont pas entachées d'erreurs systématiques, on peut utiliser l'estimateur sans biais de la variance de la distribution exprimée par l'équation (4.12).

$$V^2 = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (4.12)$$

Dans ce cas on a, d'après (Hartley et Zisserman, 2003), l'expression précédente multipliée par $\frac{n-1}{\sigma^2}$ suit la distribution du chi-2.

$$\frac{(n-1)V^2}{\sigma^2} \sim \chi_{n-1}^2 \quad (4.13)$$

Où : σ est l'écart-type des (n-1) distances des points au plan.

Les carrés de ces distances suivent une distribution du χ_m^2 (chi-2) avec m degrés de liberté. Le degré de liberté est égal à la « co-dimension » du modèle considéré. Pour une droite, la co-dimension est égale 1, car seule la distance perpendiculaire à la droite est mesurée. Si le modèle est un plan (comme dans notre cas), la co-dimension est égale à 2.

D'après (Hartley et Zisserman, 2003), si on suppose que tous les points suivent une distribution normale autour de leur plan moyen, la valeur seuil ds déterminant si un point appartient ou non, avec une probabilité p , à la zone tampon peut se calculer par la relation (4.14).

$$ds^2 = F_{\chi_2^2}^{-1}(p)\sigma^2 \quad (4.14)$$

Où : ds : valeur seuil (tolérance) de distance (zone tampon des points valables)
 p : probabilité considérée
 F : Fonction de répartition des distances point-plan, au carré.

La valeur de la fonction réciproque de la fonction de distribution est déduite de la table de la loi du χ_2^2 . Par conséquent, le test statistique peut se faire de la manière suivante :

$$\begin{cases} \text{si } dist^2 < ds^2 : \text{point valable (dans zone tampon)} \\ \text{si } dist^2 \geq ds^2 : \text{point non valable (hors tolérance)} \end{cases} \quad (4.15)$$

Donc pour une valeur de probabilité élevée ($p=0.99$), un point peut être considéré comme un point valable si l'écart au carré entre ce point et le plan est inférieur à ds^2 selon la formule (4.16).

$$ds^2 = F_{\chi_2^2}^{-1}(0.99)\sigma^2 = 9.21\sigma^2 \quad (4.16)$$

Où $F_{\chi_2^2}^{-1}(0.99) = 9.21$ (voir table de la loi du χ_2^2 Tableau 3.3)
 σ : écart-type des distances calculées par rapport au plan

Les détails sur la distribution du χ_2^2 ainsi que la table associée à cette distribution selon le degré de liberté et la probabilité considérée sont présentés dans le Tableau (4.4).

Degré de liberté	$F_{\chi^2}^{-1}(p = 0.95)$	$F_{\chi^2}^{-1}(p = 0.99)$
1	3.84	6.63
2	5.99	9.21
3	7.81	11.34
4	9.49	13.28

Tableau (4.4). Table de distribution χ^2 selon le degré de liberté et la valeur de la probabilité (Hartley et Zisserman, 2003)

La majorité des utilisateurs de RANSAC préfèrent déterminer la valeur seuil ds d'une manière empirique. En effet, une bonne connaissance des données (et de leur degré de bruitage) permet d'estimer une valeur optimale du seuil tout en répondant aux objectifs fixés.

Ce paramètre ds est bien entendu très important dans le sens où la qualité des résultats en dépend fortement. En effet, une faible valeur seuil implique que les plans obtenus sont proches des plans théoriques. Ainsi, une surface plane dans la réalité – ou considérée comme plane architecturalement parlant – risque d'être décomposée en sous-parties planes, alors qu'en réalité il ne s'agit que d'un seul plan. Le plan défini par RANSAC concernant la tôle est proche de la réalité pour $ds = 4\text{mm}$ car il représente la courbe de gauss sans anomalies de fréquence figure (4.21).

D'autre part, la valeur seuil ne doit pas être trop élevée. Sinon, plusieurs plans parallèles et adjacents risquent d'être fusionnés en un seul plan. Donc, pour obtenir des résultats satisfaisants, il est indispensable de choisir une valeur adaptée au niveau de détail recherché ainsi qu'au degré de bruitage des données. Cette valeur de la tolérance (ds) a généralement tendance à être égale à l'épaisseur du nuage de points brut. La figure (4.21) montre le choix du plan moyen restitué et sa représentation pour $ds=4\text{mm}$.

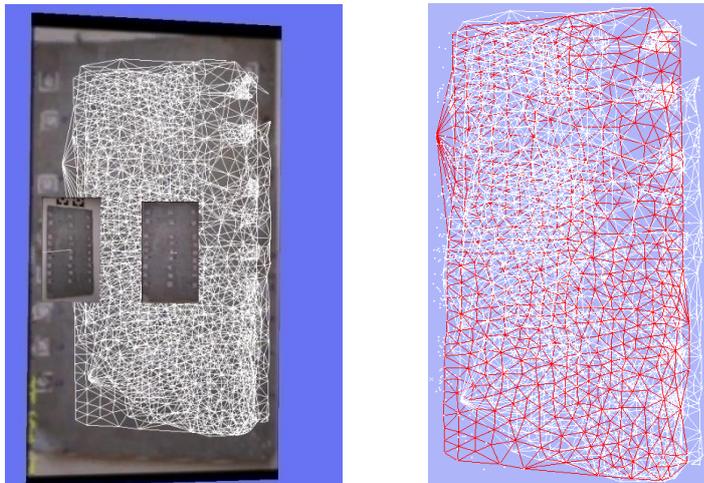


figure 4.22 Projection et triangulation de l'objet « tôle »

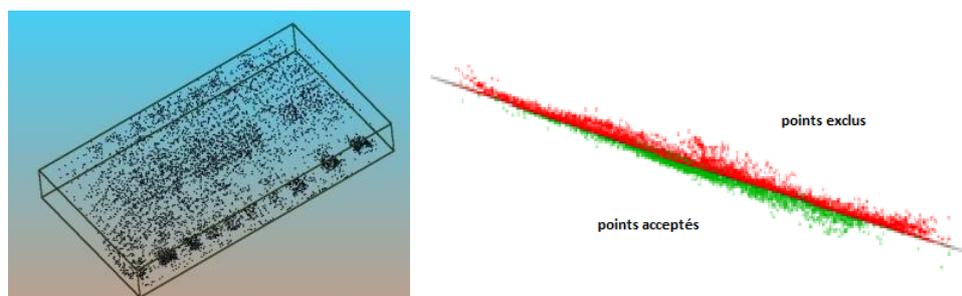


figure 4.23 Restitution et calcul du plan moyen par RANSAC « tôle métallique »

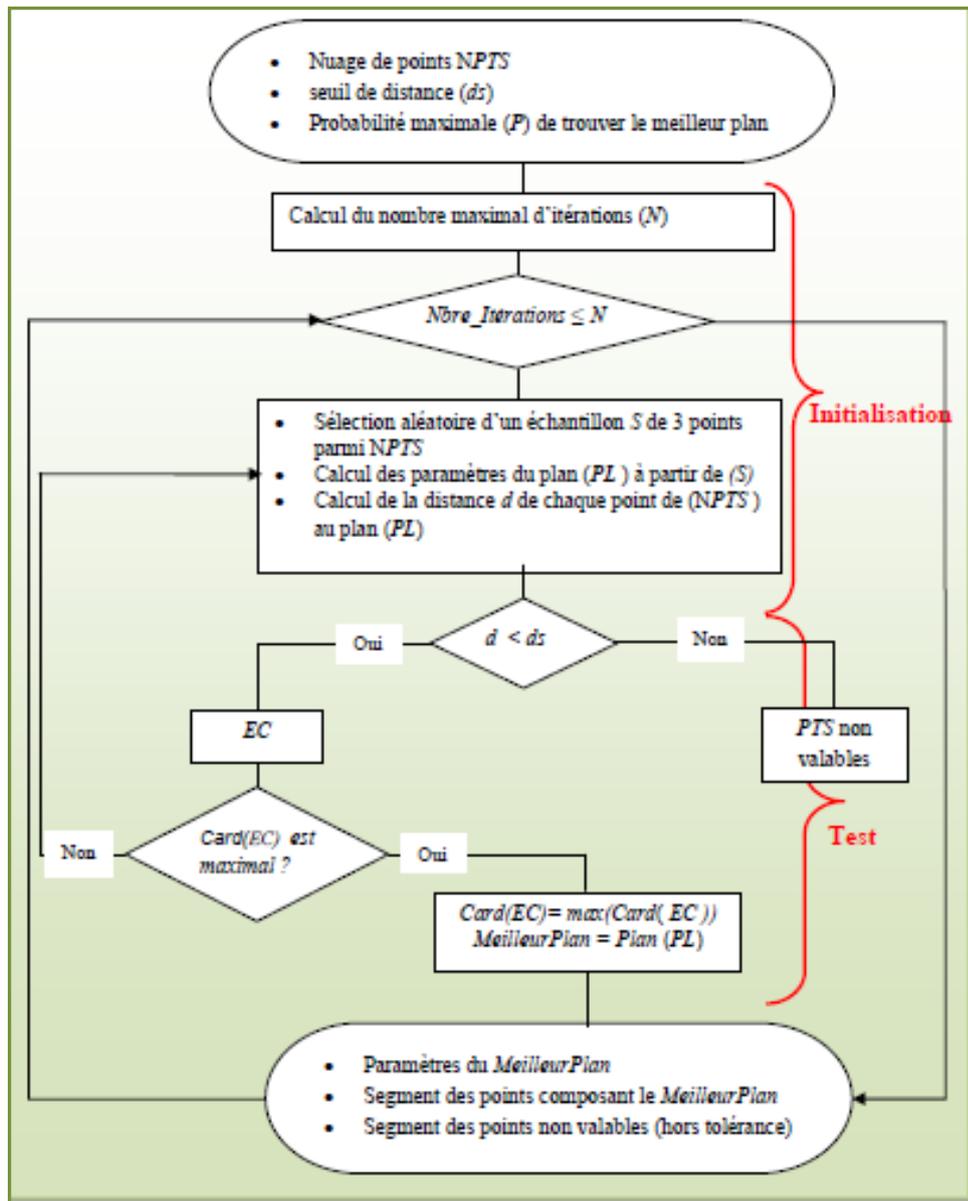


figure 4.24 Organigramme du traitement RANSAC (Boulaassal 2009)

• Restitution des objets complexes

Par rapport aux objets plans, la restitution de l'instrument B9 par voie photogrammétrique est complexe. Par densification (point Cloud) nous procédons par comparaisons des mesures lasergrammétrique et photogrammétrique. La face avant figure (4.25) de l'instrument est reconstruite de façon incomplète vue sa complexité surfacique (discontinuité). La face arrière figure (4.25) est totalement reconstruite car la disposition des photographies est perpendiculaire à la surface considérée. Malgré le nombre suffisant de faisceaux, l'intersection des rayons homologues n'est pas complète au niveau de la figure (4.26).

Des mesures de distances faites dans les deux systèmes (lasergrammetrie et photogrammètrie) nous ont permis de détecter un biais global mettent en évidence une erreur systématique propre au calcul photogrammétrique. La fonction écart garde la même forme pour les deux méthodes figure (4.27), ce qui justifie l'impact de la photogrammètrie en métrologie. Le même type d'erreur a été constaté au chapitre 3, figure (3.5). En effet, le biais constaté est propre à la photogrammètrie du fait des différentes orientations impliquées dans le processus.



Figure 4.25 Restitution de la face avant a) et arrière b) de l'instrument B9

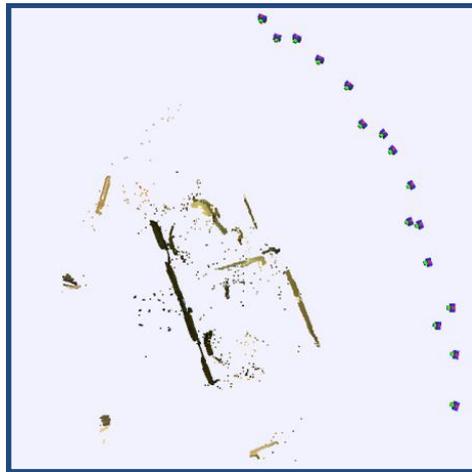


figure 4.26 Disposition des centres photographiques en bande

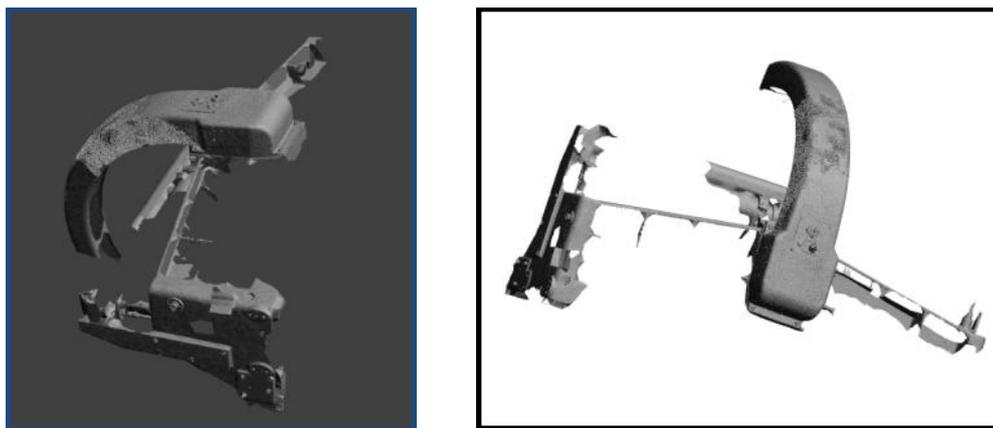


figure 4.27 Restitution lasergrammetric de Wild B9

Les mesures de distance comparative entre les deux méthodes fournies le tableau (4.5)

Nombre de mesures	Distance		Mesures laser	Mesures PMS
	N° point	N° point	(mm)	(mm)
6	1	2	412.92	410.5
//	1	3	897.90	894.9
//	1	13	664.92	664.
	2	3	485.77	480.6
	4	5	144.15	142.5
	4	7	518.20	515.5
	4	8	226.06	225
	5	8	694.68	696.5
	7	8	226.13	222.5
//	7	15	419.70	416.5
	8	15	521.86	519
	13	14	391.48	385
	13	15	706.11	704.5
	13	16	446.48	443.5
	14	15	374.13	370.5
	14	16	367.98	367
	15	16	443.73	445.5
//	18	19	703.96	700.5
	18	22	858.03	854
	19	22	711.48	711.5
	19	20	244.13	240.2
	21	28	131.06	131.1
	22	23	587.90	587
	25	26	267.79	260.5
	25	27	463.42	460.5
//	26	27	524.37	520

Tableau (4.5) Tableau comparatif lasergrammetrie / photogrammétrie

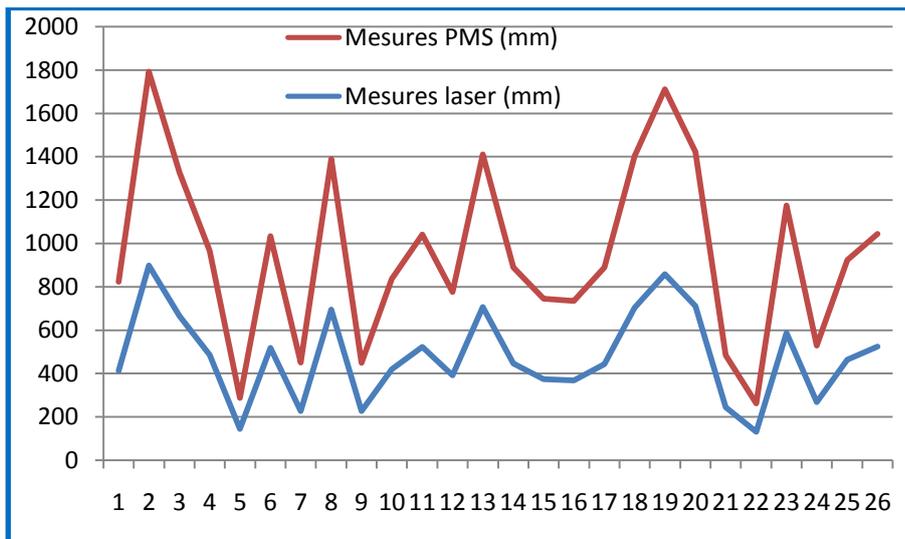


figure 4.28 : courbes comparatives (lasergrammetrie/photogrammetrie)

La différence des écarts est du principalement à l'orientation des faisceaux restitués combinés aux distorsions très aléatoires du traitement global de compensation. La figure (4.27) et (4.28) illustrent cet aspect en montrant une agrégation des erreurs.

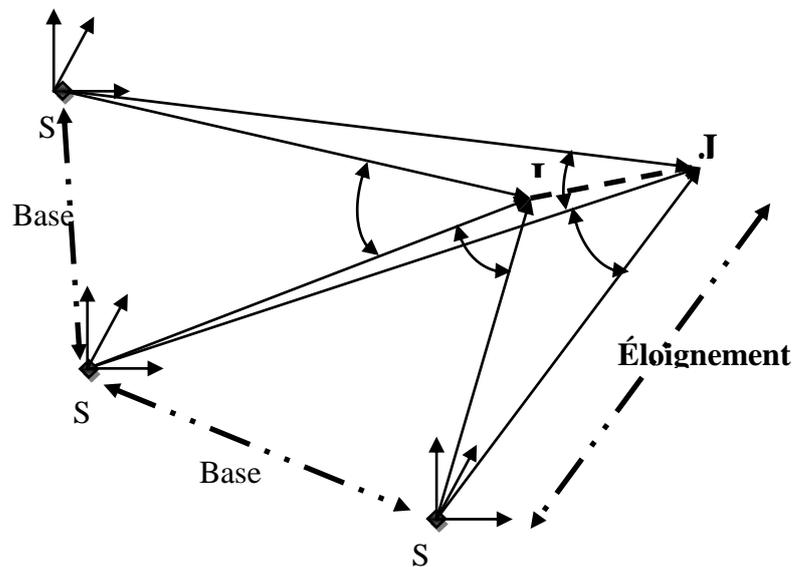


figure 4.29 orientation externe à partir de plusieurs faisceaux

▪ Proposition du système de mesure photogrammétrique

Les données produites sont, dans la majeure partie des cas, des images obtenues sous différents angles de vue par des cameras. Malgré quelques travaux notables utilisant des images couleur [Lee, 1992], la plupart des travaux utilisent des images en noir et blanc. En considérant la situation actuelle comme expérimentale, notre système s'articulera sur des données réelles en deux dimensions (2D) utilisant le principe de la DLT. Sachant que l'objet à analyser est multiforme et multidimensionnelle (coque, panneau, chantier, etc...) l'approche adoptée pour la définition du système se compose des modules :

- Traitements par couple pour des objets dans le plan et en relief.
- Traitements par faisceaux selon chaque modèle pour des cas multifaisceaux.
- Traitements multifaisceaux pour des cas complexes.

Les résultats obtenus dans le troisième chapitre expriment un certain optimisme pour des solutions approchées, mais restent insuffisant pour assurer un système photogrammétrique complet. Dans cette optique les modules sont indépendants et sont préparés à toute extension ou modification. Toutes les conditions doivent être retenues pour améliorer l'exactitude. Il est donc nécessaire d'impliquer la condition de co-angularité et les invariants pour prétendre au système qualité.

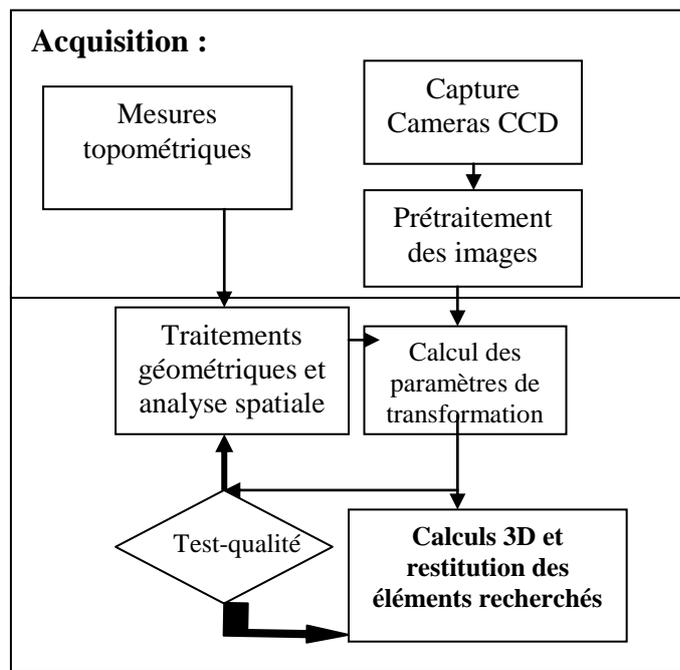


figure 4.30: définition du prototype

▪ **Valorisation du procédé**

A l'occasion de mesures réalisées dans le but de tester le processus, des temps indicatifs ont été relevés et permettent de déterminer une valorisation horaire du procédé. Les temps se décomposent comme suit :

Travaux Photogrammétriques	Temps nécessaire
Planification et Prises de vues	20h (une seule fois)
Opérations de terrain	10h (une seule fois)
Prétraitements géométriques et analyse spatiale	4h (voir type)
Calcul des paramètres de transformation	2h
Test qualité et validation	2h
Calcul 3D et restitution	4h (fonction densité)

Tableau 4.6 : phases photogrammétrique

Il est important de noter que les temps indiqués ont été constaté lors de relevés exécutés dans des conditions optimales. Des aléas sont susceptibles de ralentir considérablement l'exécution des mesures (passage d'engins, échafaudages, etc.). Pour les chantiers navals, il existe des facteurs propres au prémontage et au montage. A ce propos une planification spatiale des entités apportera certainement des solutions d'optimisation.

▪ Gestion de processus

Dans le but de diminuer les gênes engendrées par la fabrication des panneaux et des blocs, il est nécessaire de choisir les lieux et les moments propices à la réalisation des relevés dans des conditions optimales. Des études relatives aux SIG permettent une meilleure définition de la gestion de l'espace industriel. En effet, dans le contexte d'un programme assurance-qualité, une grille d'action ou d'intervention est proposée ; dont l'objectif est d'éviter les oublis et de ne commettre aucune négligence. Cette grille prend en considération le temps, l'espace et l'action [Combe J., 1998].

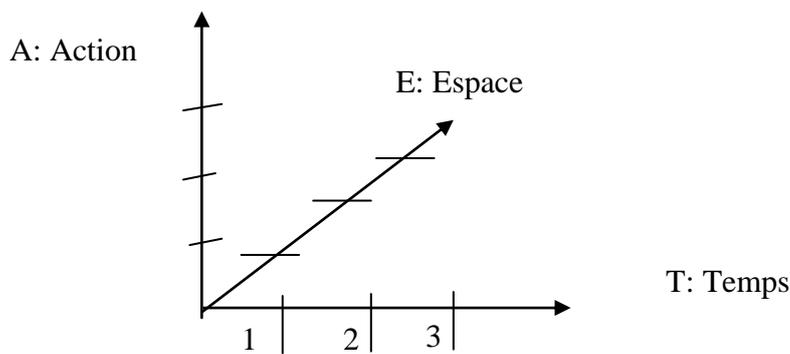


figure 4.31 : Grille d'intervention ($3A \times 3T \times 3E$ donne 27 chances de succès donc une meilleure longévité des ouvrages).

Le chantier naval est considéré comme un espace industriel localisé où des opérations spatiales s'effectuent. Ainsi, le classique répertoire de coordonnées tridimensionnelles devient un tableau complété par des indicateurs de cet environnement industriel. Toutes ces indications n'ont pas la prétention de donner des solutions finies, ni de résoudre tous les problèmes de production. L'ingénierie tonométrique et photogrammétrique coûte chère, mais elle reste incontournable pour la réussite des projets en construction navale. Pour le cas cette étude, les chantiers du génie maritime, il apparaît les meilleures conditions de relevé sur les panneaux de fond sont :

- En sortie d'atelier, lors des phases ultimes de fabrication (finitions, démontage des échafaudages, etc.). Les panneaux sont en général bien dégagés et disposent parfois d'un recul permettant la mise en œuvre d'un relevé (possibilité d'ouvrir les portes des ateliers),
- Dès leur arrivée sur l'aire de prémontage, les panneaux restent vierges de tout échafaudage pour une durée limitée.

Concernant les blocs, les conditions de relevés les moins défavorables sont réunies juste avant le départ des blocs à bord ou dès leur arrivée dans la forme de construction. Les durées de disponibilité sont alors très courtes mais l'exécution des mesures reste possible. Enfin, après avoir noté les différents points relatifs aux méthodes de mesures dans les chantiers navals, il apparaît comme une première nécessité l'intégration entre photogrammétrie les systèmes de CAO et les Systèmes numériques.

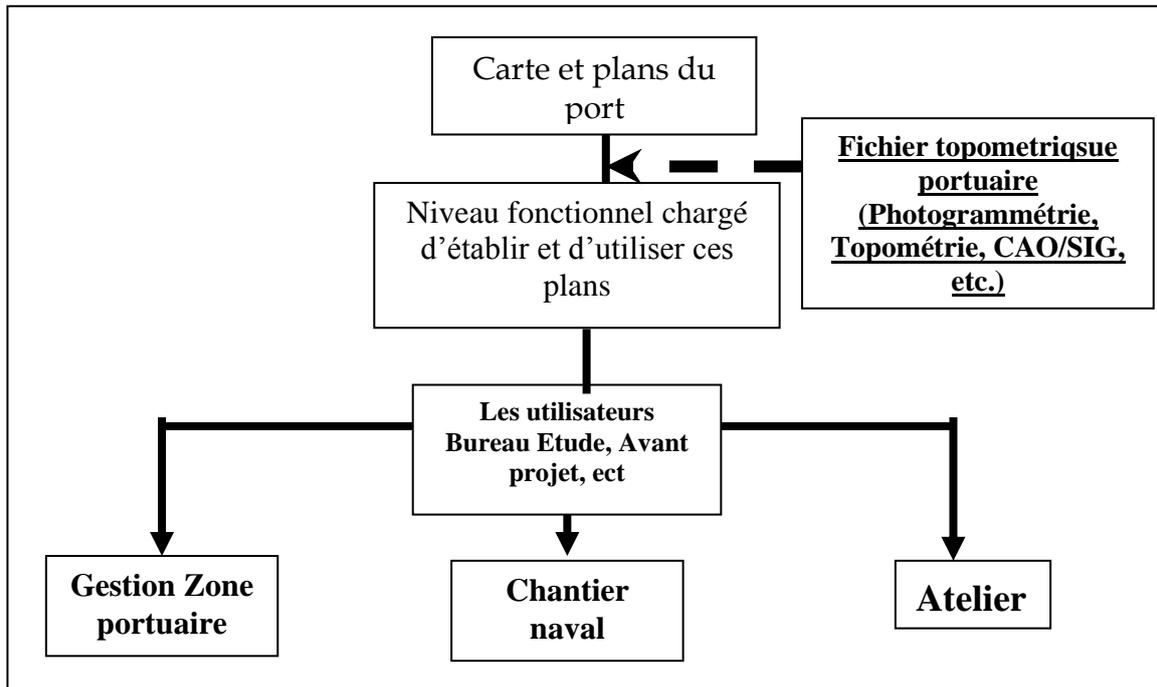


figure 4.32 : Les niveaux fonctionnels et intégration de données numériques

▪ **Analyse et Discussion**

La chaîne des processus dans les techniques optiques de mesure peut être subdivisée en quatre composants principaux [Hasted, 2006]:

- Le système d'appareil-photo (la géométrie, illumination d'appareil-photo),
- La gamme d'objet (configuration, complexité, signalisation),
- La conception de réseau (configuration, éléments de commande,..)
- Le système d'analyse (algorithmes pour la mesure d'image, le modèle fonctionnel pour la géométrie d'appareil-photo et l'ajustement).

Dans le processus ainsi élaboré, la démarche qualité se base sur la quatrième composante. En effet, les facteurs qui influencent la qualité des traitements effectués par la méthode DLT sont liés à plusieurs paramètres dont la résolution de l'image et le rapport base-éloignement. Le tableau (4.7) illustre l'exactitude en photogrammétrie en fonction de l'échelle et du rapport B/H [Krauss, wadhausl, 1998].

	B/H=1/1		B/H=1/3		B/H=1/10		B/H=1/20	
Echelle cliché	σ_{xy}	σ_z	σ_{xy}	σ_z	σ_{xy}	σ_z	σ_{xy}	σ_z
1000	0.72	0.50	0.86	1.50	1.81	5.00	3.41	10.0 cm
100	0.72	0.50	0.86	1.50	1.81	5.00	3.41	10.0mm
25	0.18	0.13	0.22	0.38	0.45	1.25	0.85	2.5 mm

Tableau 4.7: Tolérances photogrammétrique

Dans ce tableau, la valeur des écarts est exprimée en unité par rapport à échelle (8ème colonne). Ces tolérances données par [Krauss, et Waldhausl, 1998] sont déterminées par rapport à un système d'observation normal de précision 5μ en moyenne. Les résultats obtenus se trouvent dans cette gamme d'erreur avec un rapport base /éloignement de 1/4 et 1/6.25, tableau (4.8). Sur les points de contrôle, des

coordonnées aberrantes sont remarquées sur deux points, ceci est du aux mauvaises observations clichés. Dans le tableau (4.6) la synthèse des résultats et la tolérance par rapport au tableau 4.5 se présente comme suit :

Base/ Eloignement	Minolta	Kodak7300	Echelle 1/25 tolérances	Echelle 1/100 Tolérances
B/H = 1	Echelle1/40	Echelle 1/68	0.16 mm	1mm
B/H =1/20	B/H 1/6.25	B/H 1/4	2.64 mm	10.56 mm
Ecart type	5.6mm	1.2mm	-----	-----

Tableau 4.8: Synthèse des deux expériences et tolérances

Globalement, les résultats obtenus sont compris dans la zone de tolérance et on remarque que plus le rapport B/H tend vers 1 plus le résultat est meilleur. Cette règle est connue de la communauté des photogrammètres. Ces données permettent de calibrer la scène d'acquisition pour obtenir des précisions meilleures. Les méthodes simples d'étalonnage ou de traitement géométrique d'image sont d'un intérêt majeur pour les applications où des configurations superflues de multi-images ne peuvent pas être réalisées, où un contrôle de la géométrie de la formation image d'un appareil-photo simple est exigé pour chaque prise de vue. Un exemple en robotique où une caméra; avec un foyer variable ou non; est déplacé dans l'espace objet sur un bras de robot et est sujette continuellement à des changements de la géométrie d'appareil-photo [Luhman, and al. 2006].

On remarque que pour chaque cliché (ou faisceau) les 16 paramètres changent de valeur en fonction des points choisis et de la disposition de la caméra. La distorsion tangentielle est relativement faible par rapport à la distorsion radiale, en appliquant la fonction réciproque et en recalculant les paramètres de distorsion il est possible d'améliorer les résultats de la localisation par rapport au système de référence. Une redondance de faisceaux n'apporte pas forcément une meilleure précision Annexe A3. Dans certaines situations, la convergence de l'axe optique en utilisant la méthode DLT est conseillée pour minimiser le nombre d'images. En métrologie, la photogrammétrie a permis le développement de modèles ainsi que des systèmes de mesures 3D permettant de décrire ou de contrôler l'objet. En ce qui concerne les systèmes de mesure optique il existe des normes permettant de juger de l'opportunité des méthodes et des matériels [Haig, Heipke, et Wiggenhagen, 2004]. La directive VDI/VDE 2634/1 pour les systèmes 3D de mesure optiques propose les procédures qui tiennent compte des points suivants :

- mesure basée sur l'image d'un grand nombre de points,
- principe de triangulation pour densification,
- mobilité et souplesse,
- des configurations flexibles.
- volume de mesure illimité

Par rapport à cette directive, les résultats obtenus ne sont pas très satisfaisant du fait qu'on ne dépasse pas 10^{-4} en erreur relative. Sachant que tout ces points n'ont pas été respectés on peut améliorer le processus pour des précisions relatives de 10^{-6} . Avec les méthodes projectives, la DLT permet d'assurer une certaine flexibilité en métrologie industrielle. Plusieurs exemples montrent des applications multi échelle sur des volumes [Guerchouche, et François, 2008]. Ceci permet de concrétiser des analyses macro et micro sur l'objet [Mugnier et Walford, 2004]. L'algorithme ainsi défini peut servir au contrôle de la trajectoire du déplacement du robot. Dans ce procédé expérimental, l'évaluation des méthodes d'étalonnage et la rectification d'image pour une reconstruction 3D peut être appliqué avec la méthode DLT en définissant de

manière stable les paramètres internes et externes. Celle-ci est mise en marche pour des problèmes multi-stéréoscopiques d'images acquises. Ce procédé peut être appliqué pour tous les systèmes stéréoscopiques avec le nombre illimité d'appareils photographiques [Guerchouche, et François, 2008].

La gestion de la qualité généalogique de la figure (4.31) dans un processus industriel permet de suivre des modèles spatiaux temporelles. La manière de procéder nous oriente vers la manipulation de bases de données et donne au système de mesure des moyens de calibration. Le modèle conceptuel établis par [Gutierrez, and, Servigne, 2009] pour le compte des phénomènes industriels propose des relations sous forme de tables SQL (Select Query Langage) entre des données sur le capteur, la mesure et le réseau de mesure. La traçabilité des résultats à l'aide d'un tel modèle est assurée par des tables pour le suivi du réseau ou du système de mesure, figure (4.33). Le management industriel à besoin de ces métadonnées pour améliorer la métrologie en production.

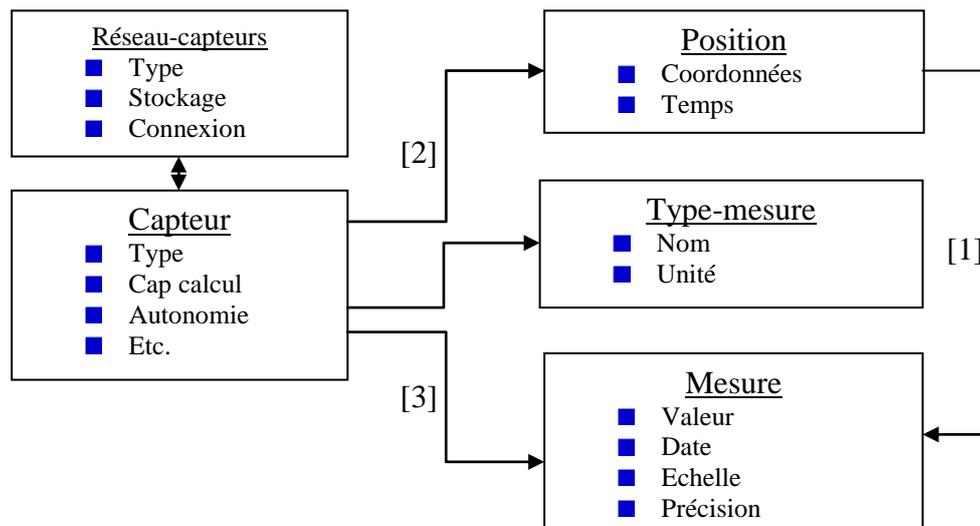


Figure 4.33 : Organigramme pour un Modèle Conceptuel « Métadonnées »

[1] : relation : position '**correspond**' à mesure,

[2] : relation : capteur '**défini**' par position

[3] : relation : capteur '**réalise**' mesure

La présentation des classes, des entités (objet) et des propriétés entre classes ou objets permet de structurer les données métrologiques et de visualiser les impacts de qualité. A partir de ce modèle nous pouvons identifier la relation entre les éléments statiques et dynamiques d'un système d'acquisition. Par exemple, nous distinguons les aspects statiques qui concernent notamment la station d'observation (caméra), le phénomène observé (sujet), l'élément mesuré (cible), les campagnes de mesures et le capteur fixe ; par rapport aux aspects dynamiques concernant la position et l'orientation du capteur, la mesure et les déplacements de capteurs mobiles. L'analyse des métadonnées temps réel, notamment concernant les métadonnées intervenant dans l'évaluation de la qualité des données est nécessaire dans un contexte d'aide à la décision. Dans cette étude, la structuration des données des traitements dont les paramètres de transformations (16), les éléments internes et les éléments externes et les écarts observés seront des indicateurs pour les projets futurs en industrie. Les schémas conceptuels de l'annexe A5 permettent d'affiner cette partie sur la traçabilité et la généalogie des données.

Pour le traitement photogrammétrique, les paramètres, la distorsion et l'écart obtenus sont des métadonnées indispensables au modèle. Après avoir souligné la difficulté de différencier les données des métadonnées dans un contexte temps réel, et également leur importance dans les systèmes temps réel, un modèle de données spatio-temporel (position, forme, dimension) aura pour objectifs des inters comparaisons en métrologie. Nous envisageons également d'approfondir l'étude des systèmes de mesures photogrammétriques notamment concernant la gestion des résultats obtenus, l'acquisition et l'annotation automatique ou manuelle et leur exploitation. Sachant qu'on considère que l'image est une homographie, le traitement numérique de la distorsion permet d'affiner les paramètres afin d'assurer une bonne projection de l'image. Pour le calcul des points nouveaux on peut opérer en éliminant les biais et en reconsidérant l'image. Une grille de paramètres peut-être édifiée pour une meilleure connaissance des déformations.

Dans la vision d'ordinateur, l'étalonnage d'appareil-photo basé sur des méthodes de géométrie projective est employé couramment. Ici la projection de matrice des inconnus contient 6 paramètres pour le modèle d'appareil-photo [Mugnier et Walford, 2004]. Une solution linéaire existe de façon identique au principe de la DLT. Le tableau résumé des erreurs obtenues montre l'intérêt de combiner différentes méthodes. Le processus d'orientation doit maintenir des solutions possibles et examiner chaque étape lorsque chaque point additionnel est mis en référence. La solution correcte est généralement isolée sans plus de dix points, tandis que pour une géométrie forte une orientation relative réussie peut habituellement être rapporté à l'opérateur après que six (6) points soient mis en référence. Le processus d'orientation peut alors être récapitulé comme le montre la figure (4.34) [Fraser, 2006].

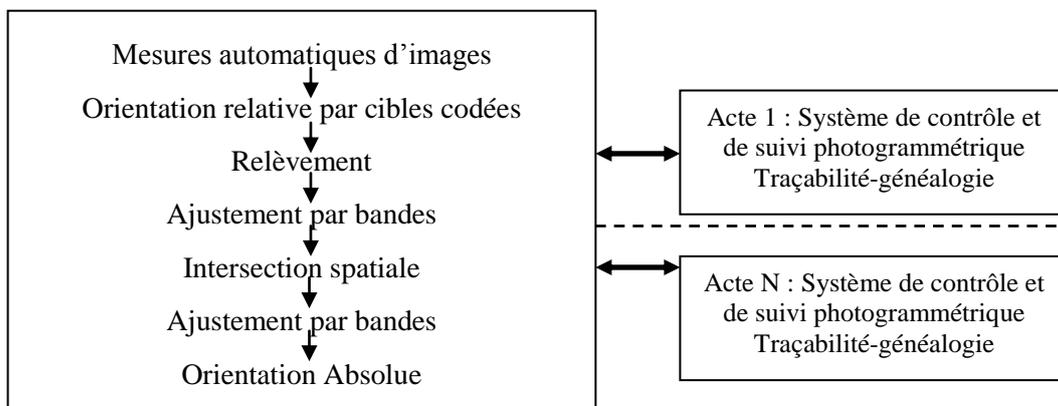


Figure 4.34 : Système de contrôle photogrammétrique

Le processus informatique d'un système lié à l'orientation (relèvement, intersection, ajustement par bandes, orientation absolue) a besoin par moment que l'opérateur puisse extraire des données des faisceaux pour des comparaisons et des analyses. Lorsque l'information est disponible, des calculs additionnels sont effectués pour connaître la cohérence et la traçabilité dans le système. La détection augmentée des erreurs est également un dispositif de cette approche puisque des erreurs sont identifiées. Un exemple de ce processus en ligne d'orientation de réseau est présent dans le dispositif d'iWitness [Fraser, 2006].

4. 7 Conclusion

L'objectif de cette étude était de montrer l'impact de la méthode photogrammétrique pour le génie maritime. L'utilisation de modèles rapide telle la DLT dans la construction des fichiers numériques 3D de l'objet reste une solution très louable afin d'accélérer les relevés. L'imagerie numérique et les méthodes topométriques de relevé devant être intégrées à l'outil pour une meilleure appréciation des résultats.

L'étude du contexte dans lequel les chantiers sont menés, d'un part, et l'analyse détaillée des besoins des constructeurs, d'autre part, ont justifié l'existence de cette étude. Le modèle proposé est apparu comme étant incomplet vu le manque de moyens disponibles sur chantiers et l'absence d'opérateurs. L'outil de mise en œuvre étant un système de mesure embryonnaire pour satisfaire le besoin du chantier naval et l'aménagement portuaire. Au cours de notre travail, l'étude du marché de l'acquisition photographique numérique et des différents modes de transfert de données entre les composants, à mettre en communication nous ont amené à réaliser une première définition du système de mesure. Pour l'exemple « tôle métallique », les plans sont extraits par l'algorithme RANSAC. L'ordre de détection de plans en favorisant les plus consistants au détriment des plus petits est primordial. Le problème que l'on peut rencontrer est qu'il est possible de trouver des segments plans dans le nuage de points qui ne coïncident pas géométriquement avec les surfaces planes d'un élément architectural de l'objet. La consolidation des plans est donc une nécessité pour restituer l'objet correctement.

L'aspect positif de ce travail réside beaucoup plus dans les travaux photogrammétriques, puisqu'il a permis l'emploi de nouveaux modules et de les intégrer dans une démarche opérationnelle. Cependant, les informations qu'il contient sont à considérer avec précaution. Certaines s'avéreront probablement imparfaites, mais il est important de noter qu'elles sont, aujourd'hui, considérées comme valables par des personnes compétentes dans des disciplines voisines (photogrammétrie industrielle et photogrammétrie aérienne). Le FTP (fichier topométrique photogrammétrique) et les techniques topométriques associées à la photogrammétrie nous orientent vers l'utilisation de photothéodolites. En effet, le photothéodolite est particulièrement bien adapté pour répondre aux besoins du génie maritime puisqu'il permet de produire des données 3D précises et détaillées plus rapidement que n'importe quelle autre méthode.

Par rapport aux résultats obtenus, on constate d'une part que les paramètres de la transformation linéaire sont relativement constants sauf pour les coefficients de distorsion qui varient d'une manière remarquable et d'autre part il y'a une amélioration du calcul en Z pour la mesure 3D. Ceci est un élément prometteur pour le contrôle de la reconstruction en trois dimensions. Le résultat de cette recherche est de mettre une plate-forme logicielle, carrefour entre la métrologie, la photogrammétrie, et le génie maritime. Cette étude sur la faisabilité espère donner aux spécialistes du génie maritime et de la construction des éléments qui guideront le cogniticien à bâtir des raisonnements en vue de résoudre les problèmes spatiaux du chantier naval.

Conclusion générale

Ce travail s'est articulé autour du thème de la modélisation, de la précision et des mesures qui peuvent être effectuées à partir d'images, au niveau de la localisation d'entités dans les images et de mesures tridimensionnelles d'objets ou de scènes. Plusieurs points ont été abordés sur ce thème. Dans le premier chapitre, un état de l'art a permis de situer les différentes applications de la méthode photogrammétrique en métrologie. Des aspects sur l'évolution technologique ont été cités et quelques questions relatives au matériel sont posées pour faire valoir le coût des opérations photogrammétriques. Ceci nous a orienté vers une approche qui permet de se ramener au cas théorique pour des objectifs présentant des types de distorsions tout à fait quelconques.

Le second chapitre a abordé la modélisation photogrammétrique et les principales méthodes de traitement. La cause des erreurs de mesure liée à la localisation de points dans les images et leur configuration sont analysées. Sachant qu'il est difficile de définir un SMP (système de mesure photogrammétrique) complet pour des applications en métrologie et que cette plate-forme dépend en grande partie de la configuration de l'espace objet nous avons porté notre choix sur le modèle DLT.

Le troisième chapitre a mis en évidence la mise en œuvre de la métrologie DLT 14 -16 paramètres sur quatre cas concrets. Il s'est avéré que lorsque toutes les conditions sont réunies (localisations précises de points et bonne connaissance des données tridimensionnelles des points de la base), alors la précision de la reconstruction que l'on peut obtenir est de l'ordre de $1/2500^{\text{ème}}$ de la taille de la scène. L'évaluation qualitative des surfaces reconstruites a été réalisée sur une scène comportant neuf objets polygonaux (îlots). La précision atteinte est cohérente avec le premier niveau de traitement (FOD), il reste beaucoup de travail pour obtenir des précisions de l'ordre du 10^{-6} pour l'ensemble de la surface objet.

Durant tout ce travail, l'utilisation de la méthode des moindres carrés a permis d'obtenir une grande robustesse lors des recherches de modèles face aux erreurs grossières. L'utilisation de cette méthode s'est notamment avérée indispensable pour la reconstruction de surfaces. Le couplage ZOD /TOD à travers la création de nuages de points est une nouvelle alternative dans le domaine du génie maritime.

Au niveau de la correction des distorsions optiques de la prise d'images, quelques améliorations mineures peuvent être apportées dans le cas de systèmes à forte distorsion. Dans un tel cas, l'hypothèse d'avoir des distorsions constantes localement peut s'avérer insuffisante. L'utilisation de fonctions d'interpolations plus complexes que l'interpolation bilinéaire peut s'avérer utile. La reconstruction de la surface telle qu'elle est décrite mérite quelques approfondissements, notamment pour la détection des parties concaves des objets. L'utilisation des contours des objets dans l'image

ainsi que des points observés derrière certaines facettes doit permettre une meilleure détection des concavités.

Dans certaines configurations un couplage DLT 14 paramètres et DLT 16 paramètres peut apporter une meilleur qualité de traitement. Le traitement du couple par la méthode des faisceaux et la généralisation de ce calcul donne la solution globale du système considéré à la phase ZOD. Des processus itératifs peuvent être prévus pour les phases FOD, SOD et TOD. L'exactitude et la précision tridimensionnelle atteinte est cohérente avec les prévisions du photogrammètre. Une bonne qualité peut être atteinte avec de bons opérateurs.

Perspectives en photogrammétrie

Plusieurs perspectives de travail s'offrent à la suite de cette thèse, tant au niveau théorique qu'au niveau expérimental :

- ⇒ Aucun banc d'expérimentations complet permettant la validation d'algorithmes quelques soient la configuration des prises de vues et les objets observés existe à l'heure actuelle. Il est pourtant important de prévoir la réaction de chaque méthode selon le type d'images dont on dispose, et ceci de façon systématique. Par exemple, dans cette thèse, aucune réponse n'a été apportée sur la mise en correspondance en fonction de la courbure de la surface observée. La création d'un banc d'expérimentations apparaît donc comme une tâche utile pour l'ensemble de la communauté des photogrammètres et de la vision par ordinateur.
- ⇒ Par ailleurs, la précision de la restitution a été étudiée en fonction de la méthode DLT et de la précision de la localisation des points dans les images. Cependant, l'erreur de déplacement de la caméra n'a pas été prise en compte, alors qu'elle est un facteur important dans la précision de la restitution. Une étude de l'erreur en fonction du mouvement de la caméra s'avère souhaitable pour des projets dynamiques.
- ⇒ La détermination d'une disposition spatiale favorable de cameras observant un objet donne, est le point important à résoudre pour les besoins de l'automatisme. Ainsi, si on veut automatiser le processus de conception, une modélisation de ces différents aspects devrait être accomplie afin que l'emplacement des caméras puisse être optimisé et suivi par un processus de simulation par ordinateur. La triangulation par faisceaux est combinée à travers un réseau de caméras pour définir avec exactitude l'objet à analyser.
- ⇒ L'intégration des données photogrammétriques issues de la restitution sur des modèles SIG permet de compléter les opérations d'analyses et de mettre à jour les processus de prise décision. D'un autre côté, le couplage entre la photogrammétrie et l'ordinateur permet de générer des

⇒ raisonnements géométriques en CAO. En effet, l'objet de la conception assistée par ordinateur (CAO) est de combiner des raisonnements géométriques, avec des raisonnements propres à la discipline d'utilisation. Par exemple en Génie Maritime, à chaque forme géométrique des objets du chantier naval sont associées des formules et des méthodes de calcul spécifiques. Le raisonnement géométrique dans le Génie Maritime utilise les données spatiales et la configuration spatiale de l'environnement industriel.

Perspectives en Génie Maritime

Dans le cadre de la vision industrielle tridimensionnelle, la photogrammétrie offre une réponse aux besoins de la mesure, du contrôle de la qualité et l'intégration de données avec d'autres systèmes de mesure. Il y'a des limitations technologiques fondées sur la stéréométrie et la photogrammétrie qui peuvent être résolues par les méthodes topométriques. Dans ce contexte la conception d'un photothéodolite s'avère une bonne initiative pour le contrôle des coques métalliques au niveau des chantiers. Les figures (5.1) et (5.2) illustrent la complexité d'un tel processus ; la figure (5.1) montre le cas d'une coque d'un navire de 30 mètres 'le Janus' et l'environnement industriel de montage et prémontage. Pour la figure (5.2), la méthode photogrammétrique a permis de faire des mesures sur les points cibles marqués sur le pétrolier AGIP MILANO



Figure 5.1 : coque Janus



Figure 5.2 : Marquage avant l'opération de mesure d'AGIP MILANO

A travers la méthode DLT, Les résultats de cette étude permettront dans un avenir proche la mise en pratique du processus photogrammétrique comme outil de mesure ou de contrôle dans un environnement industriel. L'étude du contexte dans lequel les chantiers sont menés, d'une part, et l'analyse détaillée des besoins du chantier naval, d'autre part, ont justifié l'existence de ce projet. La méthode adéquate est apparue comme étant le relevé photogrammétrique assisté par ordinateur, l'unité de mise en œuvre étant le faisceau. L'application en coque métallique nécessite la mise en place d'un prototype selon une configuration normalisée.

Les méthodes élaborées au cours de cette thèse ont soulevé de nombreuses problématiques qui pourront faire l'objet d'études à court et long termes, notamment au niveau de la limitation du bruit des nuages de points, la consolidation des modèles et leur référencement dans l'espace. Les perspectives données à cette première étude sont larges et n'auront pour limite que la créativité des acteurs du projet. L'automatisation de certains éléments de la chaîne de traitement est à envisager sérieusement au vu de l'étendue spatiale et temporelle que présente les entités du génie maritime. Enfin, le développement rapide des solutions existantes et l'augmentation des capacités de calcul des moyens informatiques conseillent une veille technologique à réaliser très régulièrement.

Références Bibliographiques

- Abdelaziz and Karara. Mathematical Formulation in Close Range Photogrammetry, Manual of Photogrammetry – fourth edition- American Society of Photogrammetry, pp. 801 - 803, 1980.
- Agnard, J.-P., Gagnon, P., Nolette, C., : Microcomputer and photogrammetry. A new tool : The Videoplotter PE & RS , 54(8) , pp 1165-1167, 1988.
- Ame , American Society for Photogrammetry, Manual of Photogrammetry, 4th édition, 1984.
- Albota, M.G., "Short Chronological History of Photogrammetry", Proceedings of XIII Congress of the International Society for Photogrammetry, Commission VI, Helsinki, 20p, 1976.
- Alshawa, M., Smigiel, E., Grussenmeyer, P., Landes, T., 2007. Integration of a terrestrial LIDAR on a mobile mapping platform: first experiences. *Workshop ISPRS. Mobile Mapping Technologies Symposium* , Padua – Italy, 2007.
- Anon. "Obituary – Gilbert Louis Hobrough", The Photogrammetric Record, 18(104):337-340, 2003
- Baysal, U and Sengul, G., 'Single Camera Photogrammetry System for EEG Electrode Identification and Localization', *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 38, n°4, pp. 1539-1547, 2010.
- Brown D.C. , Kenefick J.F., Harp B.F., " photogrammétric Measurement of explosive bolts on the canopy of the OAO launch vehicle" DBA systems, inc. Photogrammetric Structural Measurements N°31, 1971.
- Brown, DC., ; 1976 : the budle adjustment – progress and prospects. International archives of photogrammétric and remote sensing, 21(3) Helsinki 1976.
- Bopp and Krauss, 1980 Non topographic Photogrammetry- Manual of Photogrammetry – fourth edition- American Society of Photogrammetry, pp. 803, 1980.
- Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner. *International Journal of Architectural Computing (IJAC)*, Volume 7, Number 1, pp. 1-20, 2009.
- Christianson, S. and H. Hofstetter, 1972. "Some Historical Notes on Carl Pulfrich", *American Journal of Optometry and Archives of the American Academy of Optometry*, v.49 pp 944-947, 1972.
- Chabbi H. et Masini G.1991 : A combined use of regions and segments to construct facets. Proceedings of the 6th International Conference on Image Analysis and Processing, Como, Italie, Septembre 1991.
- Chérifi M.A. Bouras M.,Benedjema D. , élaboration d'un SIG pour la gestion du domaine portuaire de Mostaganem revue XYZ n°105 pp51-58, 2006.
- Cipolla R. et Blake A., Surface orientation and time to contact image divergence and deformation. G. Sandini, editeur, Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision, Santa Margherita Ligure, Italie, pages 187{202. Springer-Verlag, Mai 1992.
- Combe J. :1990 « gestion d'un espace industriel » revue XYZ n°45 ,pp45-55,1990.
- Connell J.H. et Brady. M., Generating and generalizing models of visual objects. *Artificial Intelligence*, 31:159-183, 1987.

- Devernay, F. and Faugeras, O.D., automatic calibration and removal of distortion from scenes of structural environment, proceedings of SPIE vol 2567, pp 62-72, 1995
- Doyle, I.W., "The Historical Development of Analytical Photogrammetry", Photogrammetric Engineering, XXX(2): pp 259-265, 1964.
- Doyle, I.W., 1980. "Sherman Mills Fairchild", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46(7), pp 923-936, 1980.
- Donnenwirth, C., Dubois, B. Quessette, J.A. Souplesse d'Emploi des Techniques de Photogrammétrie Numérique ; Revue XYZ n°80, Association Française de Topographie- pp. 42-45. 1999.
- Eugene, E. Derenyi and Ying C. 'Pseudo-stereo Digital Photogrammetry', ISPRS – commission II - Ottawa – pp. 138-144, 1994.
- El-Hakim S.F. and Pizzi. N.J., Multicamera vision-based approach to visible feature measurement for inspection and reverse engineering. Optical Engineering, 32(9):2201-2215, September 1993.
- Egels Y., «photogrammetrie et micro-ordinateur : outil de formation et de production », revue XYZ n°82, pp31-35, 2000.
- Faig W. « calibration of close range photogrammetric system : mathematical formulation », Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 41, pp 1479-1486, 1975.
- Faig. W. 1976 : Photogrammetric potentials of non-metric camera – report of ISP WG V-2 ; invited paper ; ISP congress Helsinki 1976.
- Faig. W., Precision Plotting of non metric photography. ISP Symposium 1974.
- Faugeras. O.D. 1992a : What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? G. Sandini, editeur, Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision, Santa Margherita Ligure, Italie, pages 563-578. Springer-Verlag, Mai 1992.
- Faugeras O.D. 1992b : 3D Computer Vision. MIT Press, 1992.
- Faugeras, O.D. Luong, Q.T. et Maybank. S.J. 1992c: Camera Self-Calibration: Theory and Experiments. G. Sandini, editeur, Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision, Santa Margherita Ligure, Italie, pages 321-334. Springer-Verlag, Mai 1992.
- Fischler M. A and Bolles R. C., Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Commun. ACM Vol. 24 (6), pp. 381-395. <http://doi.acm.org/10.1145/358669.358692>, 1981.
- Foerstner, W., Computer vision and photogrammetry-mutual questions: Geometry, statistics and cognition. Swedish Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 151-164, 2002.
- Foerstner, W., Performance evaluation and benchmarking of algorithms or systems for calibration, orientation and surface reconstruction, 32 pages, 2005.
- Foerstner, W., Computer vision and remote sensing - lessons learned. In: Dieter Fritsch (Ed.) Photogrammetric Week '09, Wichmann, pp. 241-249, 2009.
- Foerstner, W. & Gulch, E., A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. ISPRS Intercommission Workshop, Interlaken pp. 281-305, 1987.
- Foerstner, W. & Wrobel, B. (2004). Chapter 2: Mathematical concepts in photogrammetry. In: J. C. McGlone (Ed.), Manual of photogrammetry, V Edn., ASPRS, pp. 15-180.

- Forsyth D., Mundy, J.L., Zisserman, A. et Rothwell. C. 1991a : Invariant descriptors for 3D object recognition and pose. Proceeding of the Darpa{Esprit workshop on Applications of Invariants in Computer Vision, Reykjavik, Islande, pages 171{208, Mai 1991.
- Fourgassi A., photogrammétrie en zone littorale , revue XYZ n°38, pp 15-21,1989.
- Fraser C.S. «on the use of nonmetric camera in analytical close-range photogrammetry. the Canadian Surveyor, vol 36 n°3, pp 259,279,1982.
- Fraser C.S. and J.A. Mallison. Dimensional characterization of a large aircraft structure by photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(5):539-543, May 1992.
- Fraser C.S. Optimization of precision in close-range photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(4): pp 561-570, April 1982.
- Fraser C.S., Network design considerations for non-topographic photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 50(8):1115-1126, 1984.
- Fraser C.S. Limiting error propagation in network design. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53(5):487-493, May 1987.
- Fraser. C.S., Photogrammetric measurement to one part in a million. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(3):305-310, March 1992.
- Fraser. C.S., Network design. In K.B. Atkinson, editor, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, chapter 9, pages 256{281. Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheron wheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, 1996.
- Fraser, C.S., ‘Evolution of network orientation procedures’, *journal ISPRS Commision V Symposium-Image engineering and vision metrology IAPRS* Vol. XXXVI part5, pp.114-120, 2006.
- Frédérique B., étude de restituteur numériques, mémoire d’ingénieur CNAM, Paris, pp 17-21, 2002.
- Gava D., « Vision conoscopique 3D ; calibration et reconstruction », thèse université Renée Descartes, Paris V pp7-21, 1998.
- Goktepe, A. and Kocaman, E. ‘Analysis of camera calibrations using direct linear transformation and bundle adjustment methods’, *Scientific Research and Essays*, Vol.05,N°9, pp869-872, 2010.
- Grafarend , E. W., Optimization of image networks. Bolletino di Geodesia e Science Affini, 33 (4), pp. 351-406, 1974.
- Gruen A. 1978a : “experience with self calibration bundle adjustment, 44th American society of photogrammetric annual meeting, march 1978.
- Gruen A.,“nouveaux developpements en photogrammetrie numérique rapprochée“ revue XYZ n°52, juillet 1992, 5-15, 1992.
- Guerchouche, R. Bernier, O. and Zaharia, T., ‘Multiresolution Volumetric 3D Object Reconstruction’, *MAIK Nauka/Interperiodica by Springer Science*. Vol. 18, n°4, pp. 621-637, 2008.
- Gutiérrez, C. and Servigne, S., ‘Métadonnées et Qualité pour les Systèmes de Surveillance en Temps-Réel’, *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 19, N°2 pp. 151-168, 2009.
- Gruner, H., "Reinhard Hugershoff", Photogrammetric Engineering, 37(9), pp 939- 947, 1971.
- Gruner, H., “Photogrammetry: 1776-1976”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43(5):569-574,1977.

- Grussenmeyer P., «Enquête : les performances des logiciels de photogrammétrie à courte distance», revue XYZ n°82 , pp 40-42, 2000.
- Grussenmeyer, El_Khalil, « solutions for exterior orientation in photogrammetry : a review » photogrammetric record, 17 (100) pp 615-634, octobre 2002.
- Grussenmeyer P. , Koehl M. « architectural photogrammetry with the typhon software, towards digital documentation in the field. International archives of photogrammetry and remote sensing Vol XXXII,part5 Hakodate, 1998, pp 549-556, 1998.
- Grussenmeyer, P. Morot, C. Goujon, C., 'Typhon : un Logiciel de Photogrammetrie Numérique' *Revue de l'Association Française de Topographie XYZ* n°75, 61-66, 1998.
- Hasted H., 'Monte Carlo Simulation in close-range photogrammetry' *ISPRS journal*, Vol 34 partXXX, pp. 515-521, 2006.
- Haig, C., Heipke, C., and Wiggenghagen, M. 'Lens inclination due to instable fixings detected and verified with VDI/VDE 2634 Part I'. Paper Presented at the International conference of Photogrammetry and remote sensing'. Band XXXVI-5. Dresden, October 2006, Deutschland.
- Haeri, M. and Ayazi, S., 'analyze of mathematical model for digital camera calibration', *ISPRS journal*, vol. XXXVII, pp. 759-760, 2008.
- Hartley, R. and Zisserman, A., 'Multiple View Geometry in Computer Vision', Cambridge University Press, London; 2000.
- Hartley, R., Zisserman, A., Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Second Edition 2003. pp 117-121, 2003.
- Henry J-B., P.Grussenmeyer, J.-P Malet et O. Maquaire – génération des MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super-Sauze - *Revue de l'Association Française de Topographie XYZ* n°87, 42-50, 2001.
- Hottier. P., Accuracy of close range analytical restitution. Practical experiments and predictions. Commission V; *ISPRS Helsinki*; 1976.
- Hottier, P., *Photogrammétrie Analytique ; Photogrammétrie Générale ; tome 4, édition Eyrolles*, pp. 172-201, 1972.
- Hough: *Methods and Means for Recognizing Complex Patterns*, 1962. U.S. Patent 3.069.654.
- Jibrini H., *Reconstruction automatique des bâtiments en modèles polyédriques 3D à partir de données cadastrales vectorisées 2D et d'un couple d'images aériennes à haute résolution. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris*, 2002.
- Kasser, M. and Kalantari, M., 'Photogrammétrie et vision par ordinateur', *revue XYZ de l'AFT*, n°117, pp. 57-62, 2008.
- Kalantari, M. and Jung, F. 'Estimation automatique de l'orientation relative en imagerie terrestre', *revue XYZ de l'AFT*, n°114, pp. 27-31, 2008.
- Kölbl, O., « panorama de la photogrammétrie moderne », *revue XYZ* n°41-42 , pp21-39, 1990.
- Konecny, G., "The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - 75 Years Old, or 75 Years Young", Keynote Address, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(7), pp 919-933, 1985.

Kraus, K., Waldhäusl, P., Manuel de photogrammétrie, principes et procédés fondamentaux. Ed. Hermès, 1997.

Lavoisy O., "La matière et l'action – le graphisme technique comme instrument de la coordination industrielle dans le domaine de la mécanique depuis trois siècles", thèse de doctorat, laboratoire CRISTO, INPG, Grenoble, 2000.

Laroche, F et al., "A new approach for preserving the technical heritage", Colloque scientifique VRIC, Salon Laval Virtual, Laval, France, 11 p, avril 2006.

Legac A., « La vidéogrammétrie ou photogrammétrie digitale : généralités, méthodologie, applications ». In Mesure optique des formes 3D et des grandes déformations, Tours, pp85–90, 1994.

Lee S.W. et Bajcsy, R., Detection of specularity using color and multiple views. G. Sandini, editeur, Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision, Santa Margherita Ligure, Italie, pages 99{114. Springer-Verlag, Mai 1992.

Lawrence, C. and R.Powell, 1968. "Map compilation with orthophotography ", Proceedings of ACSM 28th annual meeting, Washington, D.C., March 10-15, pp 253-264, 1968.

Liu Tianshu , L. N. Cattafesta III, and R. H. Radeztsky AIAA Journal, Vol. 38, No. 6 , pp. 964-971, 2000.

Lucas P., création de photomodèles adaptés à l' étude des fronts rocheux revue XYZ n°109, pp23-28 2006.

Luhman, T. and al., 'Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Application', Whittlles editor, 2006.

Mason S.O.1995a : Expert system-based design of close-range photogrammetric networks. isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 50(5):13-24, 1995.

Mason S.O.1995b: Conceptual model of the convergent multistation network configuration task. Photogrammetric Record, pages 277-299, October 1995.

Mason. S.O., Heuristic reasoning strategy for automated sensor placement. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(9):1093-1102, September 1997.

Mason, S. 'Expert System Based design of Close Range Photogrammetric Network', *ISPRS journal*, Vol. 50, N°5, pp. 13-24, 1995.

Moylan, S. Hong, D. Damazo, B.N Soons, J. and Donmez, A. 'Development of a metrology frame to improve the positioning accuracy of Micro/Meso-scale Machine Tools' *International J. of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 2, No.5/6 pp. 600 – 619, 2009.

Mothersell,M. Moore,M.L and Reinert M.W., 'Hoshin Kanri planning: the system of five alignments behind the Toyota Production System' *International Journal of Business Innovation and Research* , Vol. 2, No.4 pp. 381 – 401, 2008.

Meyer, R., "100 Years of Architectural Photogrammetry", Kompendium Photogrametrie, Vol. XIX, Leipzig:Akademische Verlagsgesellschaft, pp. 183- 200, 1987.

Mohr R., L. Morin, et E. Grosso. 1992b: Relative positioning with uncalibrated cameras. A. Zisserman J.L Mundy, _editeur, Geometric Invariance in Computer Vision, pages 440{460. MIT Press, 1992.

Mohr R. L. Quan, F. Veillon, et B. Boufama ,1992c : Relative 3D reconstruction using multiples uncalibrated images. Rapport no. RT 84-I-IMAG LIFIA 12, Irimag-Lifia, 1992.

Mucha A., Bodgan S. "Mesure Photogrammetriques de la Houle sur des maquettes hydrotechniques" revue Zeiss Iena n°4 1983, p198-p200, 1983.

Mugnier, PL. and Walford, A., 'Photogrammetric Applications' in J. Chris McGlone (ed.), *Manuel of Photogrammetry*. (pp.1015 - 1103), Fifth edition, ASPRS, 2004.

Olague, G., 1998, Planification du placement de caméras pour des mesures 3D de précision, PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, <ftp://ftp.imag.fr/pub/Mediatheque.IMAG/theses/98-Olague.Gustavo/notice-francais.html>

Olague, G. and R. Mohr, 1998, Optimal Camera Placement to Obtain Accurate 3D Point Positions, In *Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 1, pages 8-10.

Olague, G., 2000, Design and Simulation of Photogrammetric Networks using Genetic Algorithms, In *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2000, Annual Conference Proceedings*, 12 pages, Washington DC, USA, Copyright.

Ostbye, b., Holm, k.r.1984, photogrammetry on marine structure, ISPRS archives – volume xxv part A5 -1984, Rio de Janeiro, Brasil, pp 597-604.

Neviere J. , Lugiez F., Baussart M.:“ la determination par photogrammetrie de la courbe de capacité d'une retenue hydroelectrique“, Société Française de Photogrammétrie et Télédétection SFPT n° 1966, pp29-34.

Paris. S.,1991 : Modélisation structurelle par apprentissage. Actes du 8eme Congres Afcet de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, Lyon { Villeurbanne, France, volume 3, pages 1345-1350. Afcet, 1991.

Pluquelles M., Dechenaux N., un outil de modelisation graphique appliqué à la Construction Navale revue XYZ, pp 65-68 2000.

Polidori, Laurent, Réflexion sur la qualité des modèles numériques de terrains, pp 10-18, Bulletin 139 Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, 1995.

Putze, T. Raguse, K. and Maas, 'Configuration of multi mirror systems for single high speed camera based 3D motion analysis', *Proceeding of SPIE, the international Society for Optical Engineering*, vol. 6491, pp. 64910L.1- 64910L.10, 2007.

Quinn, A.O., "Professor Earl Church", *Photogrammetric Engineering*, 41(5), pp 595-601, 1975.

Radlinski, W.A., "Russell Kerr Bean - Memorial Address", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(7), pp 975-983, 1985.

Reshetyuk, Y., Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Royal institute of technology (KTH), department of transport and economics, division of geodesy, Stockholm.pp 200-212, 2006.

RiekeZapp, DH. Tecklenburg, W. Peipe, J. Hastedt, H. and Luhman, T. (2008) 'Evaluation of the geometric stability and the accuracy potentiel of digital cameras- comparing mechanical stabilisation versus parametrization', *ISPRS journal of Photogrammetry and remote sensing*, Vol.64, N°3 pp.248-258, 2008.

Reiterer, A. , 'a semi automatic image-based measurement system', *IAPRS journal*, Vol. XXXVI, pp.260-265, 2006.

Schenk, T., *Digital Photogrammetry*, TerraScience, Laurelville, OH, 428p, 1999.

- Streilein, A., Hanke, K., Grussenmeyer, P., first experiences « With The Zurich city hall » data set for photogrammetry. 33(5), pp 772-779, 2000.
- Schut G.H., 1955, analytical aerial triangulation and comparison it and Instrumental Aerial Triangulation, photogrammétrie, vol 12, n°4, 1955.
- Slama C.C., Ebner H., Lawrence F. , Aerotriangulation, Manual of photogrammétrie 4ème edition pp453-476 , 1980.
- Swaminathan R., Grossberg M.D. Nayar S.K. , a perspective on distorsions, proceeding computer vision and pattern recognition,2,594-601, 2003.
- Tarbox G.H. and S.N. Gottschlich, Planning for complete sensor coverage in inspection. Technical Report TR-CAT-93-4, NYS Center for Advanced Technology in Automation and Robotics.,1993.
- Tarbox, G.H. S.N. Gottschlich, and L.A. Gerhard, Registration of dissimilar featureless models for inspection. In Proceedings of ieee International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, Georgia, USA, pages 686{691. ieee Robotics and Automation Society, May 1993.
- Tran, T. et LUX A.,detection des cretes et son application à la detection des lobs, RIVF'04 France, pp57-60, 2004
- Tubis, H., "The Brock Brothers and the Brock Process", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52(8). pp 1017-1034, 1976.
- Vallet, J, Gruber, U., Dufour, F., Photogrammetric avalanche volume measurements at vallée de la Sionne. IGS congress, Innsbruck 22-26 may 2000.
- Vallet, J. 2000: Saisie de la couverture neigeuse de sites avalancheux par des systèmes aéroportés. Thèse EPFL Lausanne, 2000.
- Vandendriessche O., (Volvo IT Electrical Solutions Competence Center Enterprise) "Mise en oeuvre d'une solution métier intégrée pour la filière électrique", MICAD, Paris, avril 2005
- Wahl M. , "la photogrammétrie industrielle à la régie nationale des usines Renault" , revue n°4 de Zeiss Jena pp189-200, 1983.
- Weiss. I. , Projective invariants of shapes. Proceedings of Darpa Image Understanding Workshop, Cambridge, Massachusetts, USA, pages 1125-1134,1988.
- Weiss. I., Noise-resistant invariant of curves. Proceeding of the Darpa, Esprit workshop on Applications of Invariants in Computer Vision, Reykjavik, Islande, pages 319-344, 1991.
- Wolf, P, "Houssam Mahmoud Karara Memorial Address", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67(7): pp 811-815, 2001.
- Wolf P.R and Forstner W. , Elements of photogrammetry, third edition, Boston Mc Graw hill. 2000.
- WILD 1973: Couple-test 2829-2830.
- Zaharescu, A. Boyer, E. and Horaud, R., 'Topology-Adaptive Mesh Deformation for Surface Evolution, Morphing, and Multi-View Reconstruction', IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol.XX, pp. 1-15. 2010.
- Zeroual I., Liazid A., Use of DLT in photogrammetric Metrology. ISPRS commission V; Corfu 2002.

Zi Ma Huipu X. Ying H. Defeng W. Mitchell C, and Quanmin Z., 'A novel robot surface measurement system enhanced with 3D surface reconstruction' International Journal of Modeling, Identification and Control, vol.4, N°3, pp. 286-298, 2008.

Sites internet

[@Eos Systems], Inc., PhotoModeler Pro User's Manual, Version 7, 2010. www.photomodeler.com

[@Canon] @ Site du constructeur d'appareils-photographiques Canon
URL : http://www.canon.fr/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_SLR/EOS_7D/

[@IGN] @Institut Géographique National, Documentation sur MicMac URL
<http://www.micmac.ign.fr/>

[@ZScan] @Logiciel Z-Scan, pour la corrélation automatique d'images
URL : <http://www.menci.com/>

[@PMVS] @Site de la solution logicielle PMVS (Patch-based Multi-View Stereo Software), développée par Yasutaka Furukawa et Jean Ponce
URL : <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/>

URL : <http://photosynth.net/>

VDI/VDE (2010). Vdi guideline: VDI/VDE - handbuch optische technologien.
http://www.vdi.de/401.0.html?&L=1&tx_vdirili_pi2%5BshowUID%5D=89692 (accessed July 2010).

VMS (2010). Vision measurement system developed by S. Robson (UCL, UK) and M. Shortis (RMIT, Australia). <http://www.geomsoft.com/> (accessed May 2010).

Geomagic Studio 7.0 (2010). Geomagic Studio 7.0 laser scanning software.
<http://www.geomagic.com/en/products/studio/index.shtml> (accessed December 2010).

Geodetic (2009). Geodetic systems Inc. 3D industrial measurement systems.
<http://www.geodetic.com/> (accessed August 2010).

